

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

Título: Parámetros de bombeo de agua cruda para tratamiento químico en la Termoeléctrica Lidio Ramón Pérez.

Autor: Michel González Oliveros

Tutores: Prof. Tít., Ing. Héctor Luis Laurencio Alfonso Dr. C.
Inst. Ing. Alexander Aldana Ramírez

Pensamiento

Creo en el milagro de lo que puede hacer el trabajo, de lo que puede hacer la ciencia, de lo que pueden hacer los hombres.

Fidel Castro Ruz

Dedicatoria

A mis padres, hermano y familiares, así como, a mis tutores y compañeros por todo el apoyo y dedicación durante mis estudios y a toda aquella persona que de una forma u otra cooperó para mi desempeño como un profesional.

A la Revolución y Fidel Castro Ruz, que ha facilitado la realización de convertir en realidad el sueño de formarme como profesional.

"Dedico la culminación de este trabajo y éxito"

Agradecimientos

A mis tutores Héctor Luis Laurencio Alfonso y Alexander Aldana Ramírez por la confianza y ayuda depositada durante la realización de la tesis.

A mi hermano, mi padre y mi madre por darme siempre su ayuda incondicional.

A mi novia Yaritza Aldana Sánchez que estuvo siempre conmigo.

A la familia de Aldana y Aguilera por acogerme con cariño en su hogar.

A Lester Batista Leyva y todo el personal de la Termoeléctrica Lidio Ramón Pérez que me dieron apoyo en la elaboración de este trabajo.

A todos los profesores de la facultad de Ingeniería Mecánica que de una forma u otra me ayudaron a alcanzar este éxito.

A la Revolución por darme la oportunidad de estudiar y hoy alcanzar el nivel superior.

A todos

Muchas Gracias

Declaración de Autoridad

Yo: Michel González Oliveros, autor de este trabajo de diploma y los tutores, Dr. C. Héctor Laurencio Alfonso, Ing. Alexander Aldana Ramírez, declaramos la propiedad intelectual al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, para que disponga de su uso cuando estimen conveniente.

Diplomante: Michel González Oliveros

Dr. C. Héctor Laurencio Alfonso

Ing. Alexander Aldana Ramírez

Resumen

En el presente trabajo se realizó un estudio sobre las limitaciones operacionales que presenta el sistema de bombeo de agua cruda, en la Termoeléctrica Lidio Ramón Pérez de Felton. La búsqueda de información sobre las propiedades del líquido, el caudal, las características específicas del circuito hidráulico, el diámetro de las tuberías, permitió la evaluación correcta de los equipamientos de bombeo. Se determinaron las causas que generan el bajo rendimiento en el sistema de bombeo de agua, las cuales se expresan en pérdidas mecánicas por empaquetaduras, vida reducida de los sellos mecánicos y rodamientos deficientes, deformación de la carcasa por esfuerzo producidos por la tubería o la bancada y deformación del impulsor; quedando demostrado que no ocurre la cavitación en ninguno de los puntos comprobados, con una reserva cavitacional de 3,8 m y un consumo de energía eléctrica real con valor ascendente 9 021,61 CUC/año. Se realizó una búsqueda en la empresa en correspondencia con el tema y los impactos asociados al proceso, encontrándose escasos trabajos referentes, los cuales no se encuentran argumentados en cuanto al objeto en estudio.

Abstract

A study on the operational limitations that you present the system of pumping of raw water, in Felton's Thermoelectric Lidio Ramón Pérez came true in the present work. The quest of information on the liquid's properties, the flow intensity, the specific characteristics of the hydraulic circuit, the diameter of the pipes, it enabled the pumping equipamiento's correct evaluation. They determined the causes that the low yield in the system of pumping of water, which generate they express themselves in mechanical losses for packing's, life reduced of the mechanical seals and deficient bearings, deformation of the incendiary bomb by effort produced by the piping or the stone bench and deformation of the propeller; Getting demonstrated than does not happen the cavitation in no one of the proven points, with a reserve cavitacional of 3.8 m and a consumption of real electric power with ascending value 9 021.61 CUC year. The process accomplished a quest at the company in mail with the theme and the correlated impacts itself, finding scarce referent works, which do not find themselves argued as to the object under consideration.

Introducción.....	1
Capítulo 1. Marco Teórico de la Investigación.....	5
1.1 Introducción.....	5
1.2 Generalidades sobre los fluidos.....	5
1.2.1 Clasificación reológica de los fluidos.....	6
1.3 Trabajos relacionados con la mecánica de los fluidos en Cuba.....	8
1.4 Tratamiento del agua para el proceso.....	10
1.4.1 Principales impurezas del agua cruda.....	11
1.4.2 Dispersión molecular e iónica.....	11
1.4.3 Aguas agresivas e incrustantes.....	12
1.5 Principio y funcionamiento de las bombas centrífugas y sistema de tuberías..	14
1.5.1 Acoplamiento de bombas.....	14
1.5.2 Redes de tuberías.....	16
1.5.2.1 Redes ramificadas o abiertas.....	16
1.5.2.2 Redes en mallas.....	17
1.6 Flujo tecnológico de la Planta de Tratamiento químico del Agua.....	18
1.7 Conclusiones del capítulo.....	19
Capítulo 2. Materiales y Metodología.....	20
2.1 Introducción.....	20
2.2 Características del agua cruda.....	20
2.3 Características de la bomba de agua cruda P-01.....	21
2.4 Metodología para obtención de la curva característica del sistema.....	22
2.4.1 Metodología de cálculo según el tipo de conexión en tuberías.....	22
2.4.2. Velocidad del fluido.....	24
2.4.3 Característica de la red.....	25

2.5 Procedimientos metodológicos para obtener las características operacionales de los equipos de bombeo.....	28
2.5.1 Cavitación en bombas centrífugas.....	29
2.5.2 Velocidad específica.....	32
2.5.3 Balance energético de una bomba centrífuga.....	33
2.5.4 Potencia útil de la bomba.....	33
2.5.5 Costo de bombeo de la instalación.....	36
2.6 Materiales empleados para las mediciones de los parámetros en el sistema ..	37
2.7. Conclusiones del capítulo.....	38
Capítulo 3. Análisis y discusión de los resultados.....	39
3.1 Introducción.....	39
3.2 Análisis químico del agua cruda.....	39
3.3 Resultados del cálculo y mediciones de los parámetros de trabajo de la instalación actual.....	40
3.3.1 Resultados de potencia y rendimiento de la bomba.....	44
3.3.2 Resultado del rendimiento mecánico en el sistema de bombeo.....	44
3.4. Comprobación del fenómeno de la cavitación en la bomba.....	45
3.5. Valoración económica.....	46
3.6. Impacto ambiental.....	49
3.7. Conclusiones parciales.....	51
Conclusiones generales.....	52
Recomendaciones.....	53
Bibliografía.....	54
Anexos	

Introducción

El desarrollo de la ciencia y la tecnología avanzan a pasos acelerados en el estudio y perfeccionamiento de las diferentes industrias a nivel mundial, desde las grandes potencias industriales hasta los países subdesarrollados. En Cuba a pesar de las grandes limitaciones de toda índole se busca mejorar eficazmente los procesos productivos y los medios de producción para lograr un óptimo resultado en beneficio económico y de la sociedad cubana.

La utilización del agua es de vital importancia, se considera en dos aspectos fundamentales: el económico como parte del proceso de manufactura, y en segundo lugar sin descuidar, como un bien social que se debe manejar en un marco integrado y amplio, teniéndose en cuenta la interrelación de los distintos sectores involucrados.

Una bomba centrífuga es turbo máquina generadora para líquidos, que consiste en un conjunto de paletas rotatorias encerradas dentro de una caja o cárter; o una cubierta o carcasa. Las paletas imparten energía al fluido por la fuerza centrífuga; se usa para transformar la energía mecánica en energía hidráulica (Aldana, 2013). Uno de los factores más importantes que contribuyen al creciente uso de bombas centrífugas ha sido el desarrollo universal de la fuerza eléctrica.

Un sistema de bombeo puede definirse como la adición de energía a un fluido para moverse o trasladarse de un punto a otro.

La empresa Termoeléctrica Lidio Ramón Pérez es una instalación energética con una potencia instalada de 500 MW, cuentan con dos turbinas de vapor, marca Skoda, de fabricación Checa y una planta de tratamiento químico al agua que tiene como objetivo tratar el agua cruda para el proceso productivo.

En el área de tratamiento químico se encuentra una bomba centrífuga (P-01) de serie AMIN 150-125-315 de fabricación Húngara, que succiona el agua de un tanque de 10 000 m³, el que recibe el fluido de la conductora de la zona de Corcovado.

El sistema, de acuerdo a sus particularidades e importancia que juega dentro del flujo productivo, ha presentado déficit en cuanto a pérdida de potencia y bajo rendimiento, acompañado de averías inoportunas de forma sistemática, provocadas por el tiempo de explotación, trayendo como consecuencia que el sistema no se encuentre en óptima capacidad productiva, debido a las siguientes deficiencias:

1. Deterioro de la camisa de la bomba.
2. Deterioro de los rodamientos por trabajo continuo.
3. Salideros por preense.
4. Inestabilidad en la dosificación del bombeo de agua.
5. Interrupción del proceso productivo.

Para garantizar una correcta evaluación de la instalación del transporte de agua, es necesario la previa investigación en relación con el trabajo requerido por el sistema y los diferentes tipos de bombas, además los detalles precisos sobre las aplicaciones específicas, propiedades, caudal, velocidad, pérdidas hidráulicas del líquido que se va a transportar, diámetro de la tubería y la elección correcta de los equipos adecuados para una mejor ejecución de sus capacidades con eficiencia, optimizando los recursos tecnológicos y promover el uso racional de la energía eléctrica. Una selección inadecuada puede conducir a consecuencias tales como el sobre consumo de energía por la máquina en el sistema analizado.

Se establece como **situación problemática** de la investigación:

En la empresa Termoeléctrica Lidio Ramón Pérez se presentan limitaciones operacionales con el sistema de bombeo de agua cruda para el tratamiento químico en el reactor, debido a las averías inoportunas de forma sistemática, causadas por el bajo rendimiento de la bomba, donde se incurre en considerables limitaciones para el proceso productivo; como consecuencia de estas afectaciones se tienen altos consumos por concepto de recursos materiales y energéticos.

Los aspectos antes mencionados determinaron como **problema**:

Necesidad de comprobación y establecimiento de los parámetros adecuados de trabajo del sistema de bombeo de agua cruda para el reactor en la planta de tratamiento químico de la empresa Termoeléctrica Lidio Ramón Pérez.

Para llevar a cabo la investigación, ha sido de gran importancia determinar la parte de la realidad objetiva donde el problema tiene lugar y debe ser investigado y resuelto.

Declarando como **objeto de la investigación:**

Sistema de bombeo de agua cruda para el reactor en la planta de tratamiento químico de la empresa Termoeléctrica Lidio Ramón Pérez.

Dentro de este como **campo de acción:**

Consumo energético en instalaciones de bombeo tecnológico.

Hipótesis:

Con la determinación de los parámetros de trabajo mediante el cálculo del sistema de bombeo de agua cruda para el reactor, basado en las propiedades físicas del agua, tales como la densidad y viscosidad; se podrán determinar las causas que influyen en el bajo rendimiento de operación de la bomba.

Objetivo general:

Determinar las causas que generan el bajo rendimiento del sistema de bombeo del agua cruda para el reactor.

Objetivos específicos:

1. Establecer una comparación entre los resultados obtenidos por cálculo y los parámetros de la instalación actual y de diseño.
2. Analizar el estado técnico económico y de afectación ambiental del sistema.

Tareas:

1. Revisión bibliográfica referente a las características del sistema.
2. Propuesta de la metodología que cumpla con las exigencias de evaluación de la red de bombeo de agua para tratamiento químico.
3. Comparación de los resultados obtenidos con los de la instalación actual.
4. Análisis de las incidencias económicas y ambientales del proceso.

Esta investigación se sustentó a través de métodos investigativos, utilizando los de carácter teóricos, empíricos, matemáticos y estadísticos.

Teóricos:

Posibilitaron la interpretación conceptual de los datos empíricos, interpretar teorías. Se utilizaron en la construcción y desarrollo de las teorías al explicar los hechos y profundizar en las relaciones esenciales de los procesos no observados. Dentro de los mismos se utilizaron:

- ✓ Análisis y síntesis: posibilitó el resumen de la información consultado, arribar a conclusiones, permitiendo elaborar la fundamentación teórica.
- ✓ Inducción y deducción: se utilizó para llegar a generalizaciones sobre los parámetros de trabajo del sistema de bombeo.
- ✓ Análisis histórico y lógico: permitió conocer la historia del problema con una secuencia lógica, así como, los intentos de investigarlo.

Empíricos:

Proporciona los datos empíricos para el desarrollo de las teorías científicas. Constituyeron la vía para constatar hechos científicos. Permitieron arribar a conclusiones inductivas.

- ✓ Trabajos con las fuentes: posibilitó la búsquedas y revisiones de distintas bibliografía.

Matemáticos y estadísticos:

Se utilizaron para procesar los datos obtenidos empíricamente

- ✓ Agrupación, registro de datos y cálculo porcentual: permitió procesar la información obtenida mediante los métodos empíricos.

Capítulo 1. Marco Teórico de la Investigación

1.1 Introducción

En el presente capítulo, que relaciona el marco teórico sobre el análisis de bombeo de agua cruda para el reactor en la empresa Termoeléctrica Lidio Ramón Pérez, se pueden corroborar de manera preventiva, los diferentes elementos y deficiencias que aparecen entre las investigaciones realizadas, las teorías existentes y los múltiples aspectos presentes en la investigación.

El objetivo del capítulo es:

Realizar el análisis bibliográfico de los trabajos existentes orientados al bombeo de fluidos y sus características.

1.2 Generalidades sobre los fluidos

La rama de la mecánica aplicada que estudia el comportamiento de los fluidos, ya sea en reposo o en movimiento, la constituye la mecánica de los fluidos y la hidráulica. En la estática de los fluidos, el peso específico es la propiedad más importante, mientras que en el flujo de fluidos, la densidad y la viscosidad son las que predominan. Cuando tiene lugar una compresibilidad apreciable es necesario considerar los principios de la termodinámica. Al intervenir presiones manométricas negativas, la tensión de vapor adquiere importancia, y la tensión superficial afecta a la estática o cinemática de los fluidos cuando las secciones de paso son pequeñas (Garcell, 2003; Leyva, 2012; Aldana, 2013).

Los fluidos son sustancias que se adaptan a la forma de los recipientes que los contienen. Cuando están en equilibrio no pueden soportar fuerzas tangenciales o cortantes. Todos los fluidos son compresibles en cierto grado y ofrecen poca resistencia a los cambios de forma (Labarte, 2011; Leyva, 2012).

Tres principios fundamentales se aplican al flujo de fluidos: (Labarte, 2011).

1. El principio de conservación de la masa, a partir del cual se establece la ecuación de continuidad.
2. El principio de la energía cinética, a partir del cual se deducen ciertas ecuaciones aplicables al flujo.
3. El principio de la cantidad de movimiento, a partir del cual se deducen las ecuaciones para calcular las fuerzas dinámicas ejercidas por los fluidos en

movimiento. El flujo de los fluidos puede ser permanente o no permanente; uniforme o no uniforme; laminar o turbulento; unidimensional, bidimensional o tridimensional y rotacional o irrotacional.

Existen dos tipos de flujos permanentes que hay que considerar, el flujo laminar y el flujo turbulento. Que sean permanentes quiere decir que la velocidad del flujo es constante en el tiempo, pero no necesariamente en el espacio (Aldana, 2013).

Por otro lado un flujo permanente podrá ser uniforme o no uniforme, la uniformidad implica constancia de la velocidad en el espacio (Aldana, 2013).

Cuando las partículas fluidas se mueven siguiendo trayectorias paralelas, se da el flujo laminar, formando el conjunto de ellas capas o láminas. Los módulos de las velocidades de capas adyacentes no tienen el mismo valor. El flujo laminar está gobernado por la ley que relaciona la tensión cortante con la velocidad de deformación angular, es decir, la tensión cortante es igual al producto de la viscosidad del fluido por el gradiente de las velocidades, donde la viscosidad del fluido es la magnitud física predominante y su acción amortigua cualquier tendencia a la turbulencia (Labarte, 2011).

En el flujo turbulento las partículas fluidas se mueven de forma desordenada en todas las direcciones.

1.2.1 Clasificación reológica de los fluidos

Desde el punto de vista reológica los fluidos se clasifican en dos grupos Newtonianos y no Newtonianos (Aldana, 2013).

En los fluidos Newtonianos existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante aplicado y la velocidad de deformación resultante, siguiendo de esta forma la ley de Newton de la viscosidad. La experiencia demuestra que todos los gases y líquidos homogéneos de baja viscosidad se comportan como fluidos newtonianos; la viscosidad de estos fluidos es constante respecto a los cambios en la magnitud del esfuerzo cortante y del gradiente de velocidad (Aldana, 2013).

Los fluidos no Newtonianos presentan como característica fundamental el hecho de que su viscosidad es función del gradiente de velocidad, por tanto, cambia con la variación de dicho gradiente, aun cuando se mantenga la temperatura y otras condiciones constantes. Según la variación de la viscosidad los materiales no Newtonianos se clasifican a su vez en tres grupos (Leyva, 2012).

1- De viscosidad independiente del tiempo:

Seudoplásticos: sus viscosidades disminuyen con el aumento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir apenas se le aplica un esfuerzo cortante ($\tau \neq 0$).

Dilatantes: sus viscosidades aumentan con el incremento de la velocidad; comienzan a fluir apenas se les aplica un esfuerzo cortante ($\tau \neq 0$). También se describen con el modelo de Ostwald de Waele (para $m > 1$) (Labarte, 2011).

Plásticos ideales (Bingham): se les conoce también como plásticos Bingham, ya que, siguen este modelo. Sus viscosidades disminuyen con el incremento del gradiente de velocidad; Comienzan a fluir cuando se les aplica un esfuerzo cortante mayor que su esfuerzo cortante inicial (τ_o), que es el esfuerzo limite que hay que aplicarle a estos materiales para romper su estructura de sólidos rígidos y comenzar a fluir (Aldana, 2013).

Plásticos reales: sus viscosidades también disminuyen con el aumento del gradiente de velocidad; Comienzan a fluir cuando se les aplica un esfuerzo cortante mayor que su esfuerzo cortante inicial (τ_o), siguen el modelo de Bulkley – Herschel (Labarte, 2011).

2. De viscosidad dependiente del tiempo:

- Tixotrópicos: la viscosidad de estos materiales disminuye con el tiempo, cuando están sometidas a un gradiente de velocidad determinado, se comportan reológicamente como seudoplásticos, plásticos ideales y reales (Aldana, 2013).
- Reopécticos: la viscosidad de estos aumenta con el tiempo, para un gradiente de velocidad determinado (Aldana, 2013).

3. Visco - elásticos o de Maxwell:

Estos materiales exhiben propiedades viscosas y elásticas, los cuales fluyen bajo la acción del esfuerzo cortante, aunque la deformación es continua no resulta totalmente irreversible, de manera que al cesar la acción del esfuerzo el material restablece en parte su forma, semejante al comportamiento de los cuerpos elásticos sólidos (Labarte, 2011).

1.3 Trabajos relacionados con la mecánica de los fluidos en Cuba

En Cuba no comienza un desarrollo de los estudios hidráulicos sino hasta después de la revolución en que dichos estudios constituyen una de las bases principales del progreso científico técnico de nuestro país. Sin embargo, en la época colonial, se debe recordar al ingeniero Francisco de Albear, proyectista y constructor del acueducto que surte de agua a nuestra capital y a los hidráulicos anónimos que durante dos siglos desarrollaron el sistema de regadío conocidos como la comunidad de regante de Güines (Rodríguez, 2011).

Para proyectar y explotar con efectividad el equipamiento de las instalaciones hidráulicas, es necesario seleccionar correctamente el equipamiento o la variante para las condiciones correctas de explotación de la instalación, a partir de analizar el régimen de trabajo para lograr una operación económica del sistema (Pérez, 2001).

La fuente principal de abasto de agua cruda, no tratada: es el río Mayarí, que pasa por el "Dreem" de Corcovado, que es un sistema de filtración artificial y bombeo construido en las orillas del río, a más de 20 km de distancia (Rodríguez, 2011).

El sistema está formado por un emplazamiento para seis bombas verticales de capacidad 30 l/s cada una y otras dos de pozo profundo que en su conjunto deben garantizar el agua necesaria en la Termoeléctrica Lidio Ramón Pérez, poblado de Felton, Cayo Saetía y varios núcleos poblacionales que se encuentran a lo largo del recorrido de la conductora, de 500 mm de diámetro; lo que justifica los altos gastos por concepto de bombeo debido al consumo de energía eléctrica, a los gastos de operación y mantenimiento, así como, los pagos por explotación de las fuentes hídricas (Rodríguez, 2011).

Una vez comenzada la ejecución civil de la obra en el año 1990 y como parte de la infraestructura de la misma se realiza el levantamiento topográfico para la ubicación de la fuente de abasto de agua que posteriormente tomaría parte en el proceso; este contó con un presupuesto inicial de 64,3 millones de peso, el mismo incluye el estudio geológico y del ecosistema, así como, las características hidrológicas del terreno (Francisco, 2006).

Dos años más tarde culmina la ejecución de la obra que consistía exactamente en una estación de bombeo integrada por cinco bombas y un dreem francés cuya

función en sus inicios era garantizar este servicio de agua de manera estable y eficiente (Rodríguez, 2011).

Teniendo en cuenta las primeras dificultades presentadas con el abasto, INEL (1994) realizó un estudio inicial liderado por la propia empresa y dirigido a mejorar las condiciones en el sistema de embalse, es decir, lograr represar la cantidad de agua necesaria teniendo en cuenta el diseño inicial del cabezal de descara conjuntamente con la modificación de las bases de 3 de las bombas y su compatibilidad con respecto a las condiciones reales del terreno con el propósito de garantizar un correcto proceso de filtrado antes de llegar a la succión de las bombas (Roberto, 2008).

Luego (Chacón, 1997) teniendo en cuenta las condiciones topográficas del terreno se hizo necesario una modificación que permitiera un mejor rendimiento de la instalación, es importante señalar que también existen pérdidas en el proceso de generación, unas imputables a problemas tecnológicos y otras mucho mayores que ocurren por el no accionar del hombre y que se encuentra vinculada a varios factores:

- No se cumple la ejecución correcta de la lista de chequeo documento muy conocido y muy poco aplicado sobre todo en arranques y paradas en ambos bloques.
- Falta de sensibilidad por parte del personal de operaciones al no tener en cuenta los altos consumos de agua, aún conociendo las causas no existe la acción correctora.
- No existe sentido de pertenencia por parte de la mayoría de los operadores estrechamente vinculados a las posiciones donde pueden ejecutarse acciones dirigidas al ahorro.
- No se tiene en cuenta los índices de consumo de agua y su vinculación con la política de estimulación aplicable a las diferentes áreas de la Termoeléctrica Lidio Ramón Pérez.
- Los controles de los consumos de agua en la mayoría de los casos son deficientes estando entre las causas principales la existencia de poco medidores para contabilizar el agua por área, la no existencia o incorrecta aplicación de indicadores que relacionan este consumo con parámetros

productivos, los bajos costos de agua en algunas empresas y la no existencia de chequeos periódicos, ni gestión integrada de su uso (Pérez, 2001).

Leyva (2012) determina las causas del bajo rendimiento en el sistema de bombeo de agua cruda en la empresa Plástico de Cajimaya, que atribuyen priorizando la existencia de numerosas pérdidas en el sistema, el alto consumo de energía eléctrica y la no entrega del caudal necesario por parte del sistema de bombeo para el proceso productivo.

Rodríguez (2011) realiza una evaluación del sistema de abasto en la Termoeléctrica Lidio Ramón Pérez para un uso eficiente del agua, se demostró que en el año 2010 también se contrató una cifra ascendente al 32 % del agua suministrada la que se considera como pérdida por un valor de aproximado 2399,40 CUP, por concepto de "Otros abastos".

Labarte (2011) evalúa el suministro de agua suavizada en la empresa René Ramos Latour donde asume que el fluido se encuentra en régimen turbulento y establece la metodología necesaria para el mismo, el costo de bombeo entre las tres plantas consumidoras asciende a 265 490 CUC/año, lo que representa el 31,5 % del gasto total de la Planta de Tratamiento de Agua.

1.4 Tratamiento del agua para el proceso

El tratamiento de agua es el conjunto de operaciones unitarias de tipo físico, químico o biológico cuya finalidad es la eliminación o reducción de la contaminación o las características no deseables de las aguas, bien sean naturales, de abastecimiento, de proceso o residuales (Terry, 2007).

Las operaciones de depuración de las aguas, tanto de abastecimiento como residuales, son una consecuencia del conocimiento de ciertos fenómenos físicos, químicos o biológicos. Por esa razón los métodos de tratamiento de agua se clasifican en físicos, químicos y biológicos (Francisco, 2006).

Los fenómenos de adsorción, coagulación-floculación, decantación, filtración, reacciones químicas y biológicas son constantemente aplicados en este trabajo, se recomienda que actualice sus conocimientos sobre estos fenómenos, que pueden ser consultados en la literatura general de física y de química (Pérez, 2000).

El tratamiento de agua permite acondicionar el agua al uso adecuado, éste dependerá también de la composición del agua en la fuente de origen y del proceso requerido en que se utilizará (Pérez, 2000).

Por supuesto cada uno de estos tratamientos además del aspecto de calidad es necesario evaluarlo desde el punto de vista económico.

En Cuba, el Decreto-Ley No. 138 de las aguas terrestres establece la obligación de contar con instalaciones destinadas al tratamiento de agua y la disposición final de sustancias de sustancias residuales, a fin de usar y proteger la calidad de las aguas terrestres (Gil, 2007).

1.4.1 Principales impurezas del agua cruda

El agua que usa el hombre, no se encuentra en estado puro, como se conoce desde el punto de vista químico, se puede considerar como $H_2O + x$, donde x es el conjunto de impurezas, las cuales se clasifican en: suspensión sólida con tamaño de partículas entre 50 μm y 1μ , soluciones y suspensiones coloidales con tamaño de partículas desde $0,001\mu m$ hasta $0,1\mu m$, la dispersión del tipo iónica y/o molecular con dimensiones de las partículas son menos de $0,001\mu m$ y no son capaces de depositarse por sí misma y crecimientos biológicos de diferentes tamaños que van desde algas, hongos, virus, bacterias, protozoos (Gil, 2007).

1.4.2 Dispersión molecular e iónica

El agua disuelve una gran cantidad de sustancias debido a su polaridad, la cual aporta la energía necesaria para el proceso de hidratación. La solubilidad de muchas depende fuertemente de la temperatura y algunas presentan máximos en esta dependencia (Rodríguez, 2011).

La dispersión del tipo iónica y molecular es la que presenta mayor variedad en sus componentes y en las fuentes a partir de las cuales se forman. Las dimensiones de las partículas son menos de $0,001\mu m$ y no son capaces de depositarse por sí misma (Rodríguez, 2011).

En la mayoría de los casos, en la composición de las aguas naturales se encuentran presente las siguientes impurezas moleculares de ácidos débiles disueltas en el agua como ácido carbónico, ácidos orgánicos; presenta sales procedentes de la neutralización de un ácido fuerte con una base fuerte o viceversa; cianuro de sodio,

citrato de sodio, bicarbonato de sodio; presenta gases disueltos en el agua: oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono, amoníaco, sulfuro de hidrógeno y iones negativos carbonatos, silicatos, fosfatos y positivos calcio, magnesio, sodio, potasio, hierro, cobre (Francisco, 2006).

1.4.3 Aguas agresivas e incrustantes

Las aguas pueden corroer a metales, calizas, cemento y algunos productos derivados como materiales de la construcción y hormigones, o precipitar sólidos insolubles que se aglomeran y se depositan en la superficie de los materiales (Rodríguez, 2011).

Entre las aguas agresivas se encuentran algunas aguas naturales de alcalinidad y dureza bajas, así como, las aguas coaguladas, suavizadas por intercambios iónicos y/o desmineralizados. Las aguas corrosivas debilitan la pared de las tuberías al eliminar parte del material, en los puntos corroídos aumentan las tensiones debidas a las cargas, y se produce una rugosidad elevada que disminuye la capacidad portante de los ductos. Dependiendo del material con el cual el agua entra en contacto, se puede provocar una coloración en el agua, e incluso en el caso de agua potable alterar su sabor (Rodríguez, 2011).

Con respecto a las aguas incrustantes, éstas acumulan depósitos en las líneas de distribución, calderas y otros equipos, así como, en los filtros de grava y arena, y en general en cualquier dispositivo que emplee agua o tanque de almacenamiento. En el caso de las tuberías, estas aguas reducen la sección útil e incrementan la velocidad y la pérdida de carga; así mismo aumentan la rugosidad y disminuyen la capacidad portante (Santiesteban, 1995).

Además de caracterizar las aguas naturales según su agresividad o incrustabilidad para uso doméstico e industrial, también es importante hacerlo en aquellos cuerpos de aguas que reciben aportes residuales municipales e industriales sin tratamiento. Dentro de los desechos que reciben se encuentran los metales pesados, los cuales se presentan como sedimentos y en formas disueltas, éstas últimas interactúan con otros componentes del agua y, bajo ciertas condiciones, provocan que el agua cambie su naturaleza a incrustante o agresiva (Pérez, 2000).

Por lo anteriormente expuesto, es necesario utilizar la teoría apropiada para determinar, no sólo de manera cualitativa sino además cuantitativa, la naturaleza del agua, y mantenerla en equilibrio; el no aplicar el modelo adecuado, podría generar errores trascendentes en la interpretación de resultados o en los posibles diseños de tratamiento (Terry, 2007).

Para evitar el contacto del agua y reducir las posibilidades de corrosión es importante que los materiales mantengan una película de carbonato de calcio (CaCO_3), esto se logra mediante la estabilización química del agua la cual consiste en ajustar el pH, la concentración de bióxido de carbono libre, o la concentración de carbonatos (CaCO_3) del agua a su equilibrio de saturación de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Dado que un agua estabilizada no disuelve ni precipita CaCO_3 , no remueve las incrustaciones de CaCO_3 que pueden proteger a las tuberías contra la corrosión, ni precipitan depósitos de CaCO_3 que pueden obstruirlas (Pérez, 2000).

Las aguas pueden contener diferentes cantidades de CO_2 libre, el cual influye en el comportamiento del carbonato de calcio contenido en tales aguas. Se dice que el CO_2 de equilibrio es la cantidad de dióxido de carbono que debe estar presente en el agua para mantener en solución al bicarbonato que se encuentra en dicha agua. Si existe CO_2 en exceso, éste ataca al CaCO_3 para aumentar la concentración del bicarbonato y mantener el equilibrio; por otro lado, si hay deficiencia de CO_2 , el CaCO_3 se precipita para disminuir la concentración de bicarbonato, aumentando así el CO_2 y restableciendo el equilibrio (Rodríguez, 2011).

Si el CO_2 libre es mayor que el CO_2 de equilibrio, existe exceso de CO_2 , por lo que se considera que el agua es agresiva. Si el CO_2 libre es igual al de equilibrio, el agua está en equilibrio. Sin embargo, cuando el CO_2 libre es menor que el de equilibrio, existe deficiencia en el CO_2 de equilibrio, y se dice que el agua es incrustante (Pérez, 2000).

Para determinar la agresividad del agua se conocen diferentes métodos, como el índice de saturación de Langelier, el índice de agresividad, el índice de estabilidad de Ryznar, el índice de Larson y Duswell, el índice de corrosión de Riddick, el índice de fuerza de conducción de Mc Cauley, y los diagramas de Caldwell-Lawrence para determinar la agresividad e incrustabilidad del agua; el método de Mojmir Mach

interrelaciona aspectos como la aportación de los iones denominados "ajenos" (todos los cationes y aniones presentes en el agua diferentes al calcio, bicarbonatos, carbonatos y protones) con la fuerza iónica, las relaciones fundamentales de disociación del agua y del ácido carbónico y la ecuación de electro neutralidad (Terry, 2007).

A bajas temperaturas se aplica el índice de saturación para conocer si un agua tiene tendencia a las incrustaciones o corrosión. Este término es muy aplicado en los sistemas de enfriamiento (Pérez, 2000).

1.5 Principio y funcionamiento de las bombas centrífugas y sistema de tuberías

El órgano principal de trabajo de la bomba es una rueda de paletas que, girando a altas velocidades, comunica el líquido que llega a la bomba a una presión elevada y lo empuja con una velocidad aumentada a la cámara espiral. Entre las paletas de la rueda y el flujo existe una interacción de fuerza, debido a la cual la energía del mando se transforma en la del flujo. La cámara espiral tiene la forma de caracol y está destinada para captar el líquido que sale del rodete y transformar parcialmente su energía cinética en la de presión. El rodete de trabajo de la bomba consta de dos discos, uno de los cuales está fijado por medio de un casquillo sobre el árbol y el otro que tiene un orificio central para dejar pasar el líquido, está acoplado con el primero por medio de los álabes. El líquido se aproxima al rodete a lo largo de su eje de rotación, a continuación se dirige al espacio entre los álabes y después de pasarlos sale por la hendidura entre los discos del rodete (Aldana, 2013).

1.5.1 Acoplamiento de bombas

Las bombas centrífugas constituyen el 80 % de la producción mundial en comparación a la fabricación de bombas de desplazamiento positivo, pues son más adecuadas para manejar una cantidad mayor de líquido. En Cuba, todas las industrias poseen al menos una bomba centrífuga (Ramos, 1989).

La asociación o acoplamiento de las bombas centrífugas puede llevarse a cabo de dos formas:

En paralelo: cuando todas las impulsiones de las bombas desembocan en el mismo colector. En este caso la altura manométrica de elevación es la misma y el caudal la suma de los caudales de cada bomba (figura 1.1).

En serie: la impulsión de una bomba constituye la aspiración de la siguiente. Todas las bombas bombean el mismo caudal, en tanto que la altura manométrica final es la suma de todas las alturas (figura 1.2).

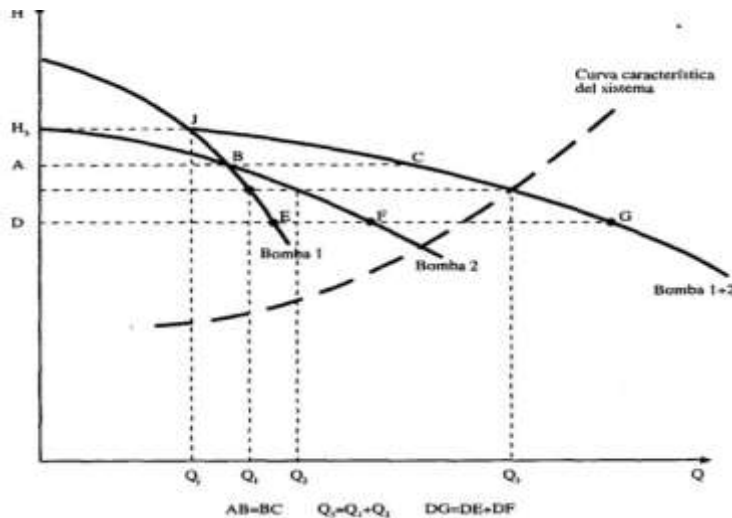


Figura 1.1: Esquema de dos bombas en paralelo.

Fuente: Ramos, (1989).

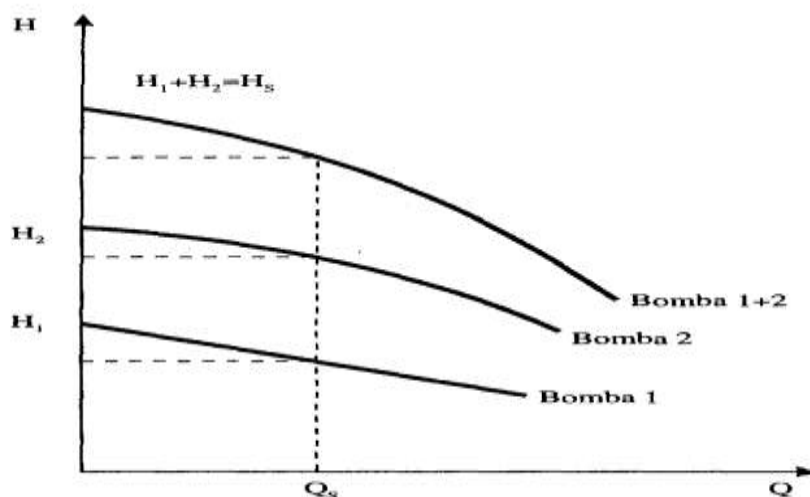


Figura 1.2: Esquema de dos bombas en serie.

Fuente: Ramos, (1989).

Para garantizar que la evaluación de la bomba sea adecuada y que las medidas de ahorro de energía sean aplicables, es necesario obtener información general de la operación de la bomba y su conexión.

1.5.2 Redes de tuberías

Las redes de tuberías pueden ser de dos tipos:

- a) Redes ramificadas o abiertas.
- b) Redes en mallas.

1.5.2.1 Redes ramificadas o abiertas

Las redes de distribución ramificadas, tienen como característica que el agua discurre siempre en el mismo sentido. Las redes ramificadas se componen esencialmente de tuberías primarias, las cuales se ramifican en conducciones secundarias y éstas, a su vez, se ramifican también en ramales terciarios. Los puntos donde las tuberías se dividen se denominan nudos del sistema.

Las arterias tendrán una longitud máxima de 1 000 m y seguirán el eje de los núcleos. Los distribuidores tendrán una longitud máxima de 300 m (ramales ciegos) (Fernández, 2003).

El sistema ramificado reúne las siguientes ventajas:

- ✓ Ser el más sencillo de calcular, ya que al estar definido el sentido de circulación del agua, puede precisarse con exactitud, el caudal que circulará por cada tubería, lo cual facilita, enormemente, el cálculo de los diámetros.
- ✓ Resulta a primera vista más económico.

Sus inconvenientes son:

- ✓ Una rotura puede originar el entorpecimiento e incluso el corte general, de la casi totalidad, de la distribución.
- ✓ Los extremos o finales de la ramificación presentan el inconveniente de que en ellos el agua queda estancada y se hace necesario, para evitar contaminaciones, efectuar frecuentes descargas (ya sea por medio de bocas de riego o llaves de descarga).
- ✓ La economía que resulta del menor desarrollo (menor número de kilómetros de la red) es más bien aparente que real, ya que en este caso será necesario contar

con diámetros mayores, puesto que la alimentación de cada tramo no se verifica más que por un solo lado.

En las redes ramificadas el sentido de circulación del agua puede determinarse fácilmente ya que el agua puede llegar a cada punto por un solo camino. Otro de los inconvenientes que presenta este tipo de red es que las pérdidas de carga resultan mayores ya que el líquido tiene un solo camino para llegar a un lugar determinado, por tanto, el consumo del flujo o caudal se incrementará en la medida que las pérdidas de carga sean mayores (Aldana, 2013).

1.5.2.2 Redes en mallas

Para evitar las inconvenientes de las redes ramificadas se utilizan las redes en mallas, las cuales se pueden obtener uniendo entre sí los extremos libres de las tuberías ramificadas o a punto de otros ramales, es decir, que las tuberías principales se comunican unas con otras, formando circuitos cerrados y se caracterizan por el hecho de que la alimentación de las tuberías puede efectuarse por sus dos extremos indistintamente, según se comporten las tuberías adyacentes, de manera que el sentido de la corriente no es siempre forzosamente, el mismo (Pérez, 1970).

Otra de sus características es que, un punto cualquiera de la red puede abastecerse por varios caminos, lo que hace que se reduzcan las pérdidas de carga, y que por otra parte una interrupción determinada no afecta a otros puntos aguas abajo ya que puede abastecerse por otro camino (Bienvenido, 1973).

La separación máxima entre los lados opuestos de una malla será de 900 m y la mínima de 250 m. La superficie máxima de una malla será de 30 Ha y la mínima de 9 Ha (Labarte, 2011).

La red quedará dividida en sectores mediante llaves de paso, de manera que, en caso necesario, cualquiera de ellos pueda quedar fuera de servicio y de este modo facilitar las operaciones de limpieza y de mantenimiento que son necesarias efectuar con carácter periódico (Pérez, 2001).

El sistema mallado, tiene las siguientes ventajas:

- ✓ Libertad en el sentido de la circulación del agua.
- ✓ Mejor repartición de la presión.

- ✓ Mayor seguridad en el servicio, ya que una avería en un punto determinado no acarrea, como en el caso anterior, un corte de suministro, pues el agua puede conducirse por otras tuberías de la malla, dejando aislado el tramo en reparación (Labarte, 2011).

Los inconvenientes son los siguientes:

- ✓ Para el cálculo de la red, es necesario establecer, de antemano y por hipótesis, el sentido en el que circulará el agua.
- ✓ El montaje de la red, resulta más costoso cuando se trata de una red ramificada (Leyva, 2012).

1.6 Flujo tecnológico de la Planta de Tratamiento químico del Agua

El agua procedente de la estación de bombeo de Corcovado, del río de Mayarí, llega a la termoeléctrica Lidio Ramón Pérez Felton con un flujo de $62 \text{ m}^3/\text{h}$, donde se almacena en los tanques de agua cruda T-503/1 y 2 con capacidad de $10\,000 \text{ m}^3$ cada uno, posteriormente succionan las bombas de agua cruda P-01/1,2 respectivamente, descargándola para el reactor descarbonatador T-01 con un flujo de $175 \text{ m}^3/\text{h}$, el reactor tiene como función eliminar materias orgánicas contenidas en el agua cruda, del reactor el agua pasa a los filtros mecánicos T-02/1,2,3,4 para su filtración, tres filtros están en servicio simultáneamente y uno está de reserva o bajo limpieza. La función de los filtros mecánicos es filtrar el agua cruda y convirtiéndose en agua filtrada, esta agua filtrada se almacena en la cisterna T-03 con capacidad de 250 m^3 . El agua filtrada es succionada de la cisterna T-03 por las bombas de agua P-05/1, 2,3 y la descarga a las líneas de desmineralización con un flujo de $147 \text{ m}^3/\text{h}$, Primeramente pasa por el intercambiador SCAVANGER el cual su función es eliminar la materia orgánica.

Posteriormente el agua pasa por el intercambiador catión T-15, luego del catión el agua pasa para el intercambiador anión T-16 que es un equipo que funciona en camada flotante con sistema de regeneración en contra corriente y de dos cámaras, finalmente el agua pasa del intercambiador anionico hacia el intercambiador lechos mezclados marcados como T-17, es un equipo de una sola cámara de funcionamiento de sistema de regeneración interno, su función es darle un acabado al agua procedente de los anteriores intercambiadores, saliendo un agua totalmente desmineralizada. El agua procedente del lecho mezclado es almacenada en los

tanques de agua desmineralizada T-19/1, 2, 3 con capacidad de 1 000 m³ cada uno, esta agua es succionada por las bombas P-17, P-18, P-19 y la descargan a los condensadores de los bloques de producción y las bombas de agua desmineralizada P-20, P-21 que descargan a los esquemas de regeneración acida y básica de la línea de intercambio.

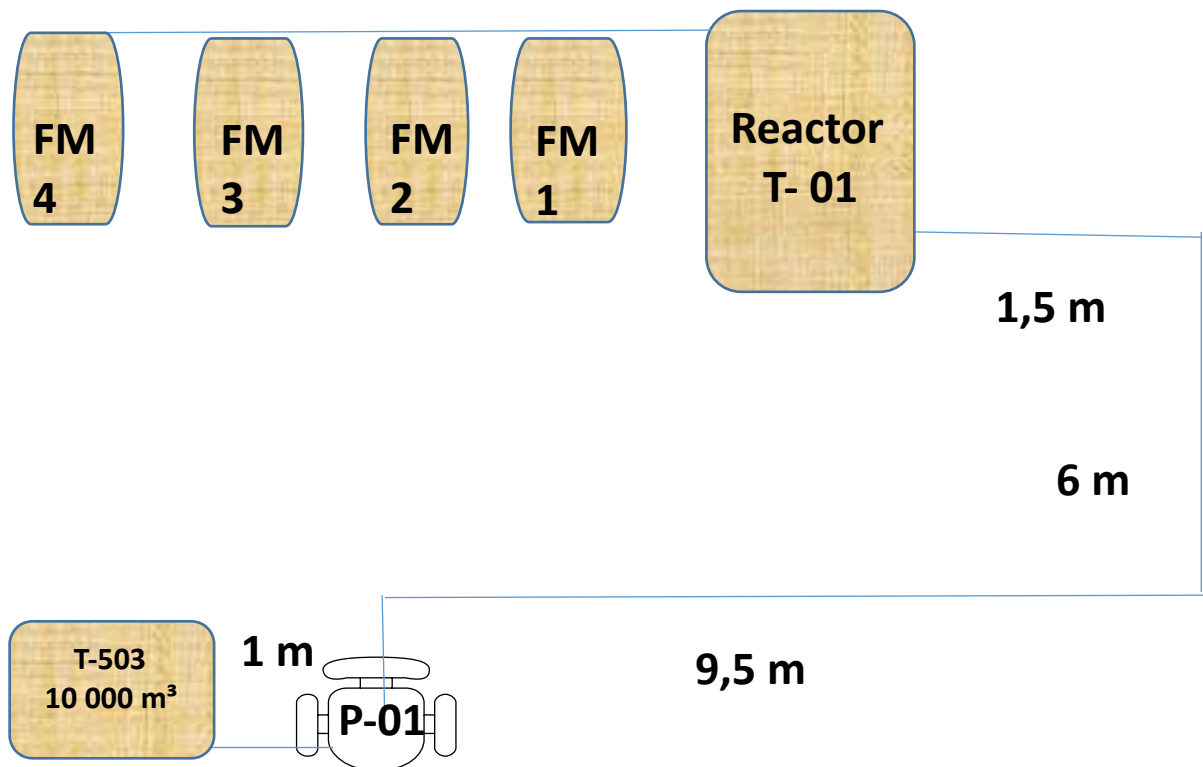


Figura 1.3. Esquema del flujo tecnológico de la planta de tratamiento químico del agua.

1.7 Conclusiones del capítulo

- En trabajos precedentes, pocos tratan temas relacionados con la determinación de los parámetros operacional de un sistema de bombeo de agua.
- Se exponen los fundamentos teóricos, que permiten desarrollar los objetivos planteados en la investigación.
- Se encuentra que los procedimientos tradicionales reportados por la literatura especializada, utilizan métodos gráficos para la obtención de los parámetros operacionales del sistema en el punto de funcionamiento y en comparación con los modelos matemáticos implementados computacionalmente ofrecen menor precisión, rapidez y confiabilidad.

Capítulo 2. Materiales y Metodología

2.1 Introducción

El análisis de una instalación de bombeo requiere de un examen atento de múltiples datos para ofrecer el producto adecuado a las exigencias del sistema de movimiento, un cierto margen de seguridad, pérdidas eventuales de carga que se deben tener en cuenta y los elementos necesarios para un correcto funcionamiento, conociendo las propiedades del líquido, el caudal del líquido, las características específicas del circuito de hidrotransporte.

Objetivo del capítulo:

Plantear la metodología para el cálculo y comprobación de la red transporte de agua.

2.2 Características del agua cruda

El agua además de ser una sustancia muy abundante en la naturaleza presenta excelentes propiedades, que permite su uso en casi todos los procesos industriales. En estado puro no tiene olor, no es tóxica, disuelve a todas las sales cristalinas y compuestos polares y debido a los valores elevados del calor específico y latente de vaporización constituye verdaderos volantes térmicos. La utilización del agua en la industria como fluido portador del calor se debe a estas razones (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Principales propiedades del agua cruda.

Propiedad	U/M	Valor
Densidad	kg/m ³	1000
Temperatura de ebullición	° C	100
Temperatura de solidificación	° C	0
Calor específico(14,5 a 15,5 ° C)	J/kg	4180
Calor de fusión del hielo	kcal/kg	80
Calor de vaporización	kcal/kg	539
Energía de formación molecular	cal/mol	58000
Viscosidad del agua	Poise	1,007·10 ⁻²

Tensión superficial (18 ° C)	dyna/cm ³	73
Conductividad eléctrica	mOhm/m	4,2·10 ⁻⁶

La transparencia del agua depende de la longitud de onda de la luz que atraviesa. Los rayos ultravioletas pasan bien, pero los infrarrojos, tan útiles desde el punto de vista físico y biológico, apenas penetran en ella. El agua absorbe fuertemente el anaranjado y el rojo en el espectro visible, debiéndose a ello color azul de la luz transmitida en capa espesa.

2.3 Características de la bomba de agua cruda P-01.

En la tabla 2.2 se muestran los parámetros diseño de la bomba de agua cruda, para los diferentes flujos volumétricos que fue diseñada y el valor de altura que puede alcanzar cuando transporta como fluido agua.

Tabla 2.2 Características de la bomba de agua cruda P-01

Bombas de agua cruda P-01.	U/M	Valor
Flujo volumétrico mínimo:	m ³ /h	100
Flujo volumétrico de servicio:	m ³ /h	175
Flujo volumétrico máximo:	m ³ /h	200
Altura de elevación/normal:	m	32
Medio transportado:	-	agua cruda
Voltaje de alimentación del motor propulsor:	V, trifásico	380
Ciclo:	Hz.	60
Velocidad:	rpm	1750

En la tabla 2.2 se relacionan las características de la bomba P-01 estableciendo valores para su rendimiento, entre 100 y 200 m³/h alcanzando una altura de elevación de 32 m y un caudal de servicio de 175 m³/h tratándose de agua cruda, necesitando 380 V para la alimentación del motor propulsor con un ciclo de 60 Hz y una velocidad de 1750 rpm, está estructurada por una caja de hierro fundido, un árbol de acero aleado A 60 y una rueda móvil de bronce según tabla 2.3.

Tabla 2.3 Materiales estructurales

Componente	Materiales estructurales.
Caja:	Hierro fundido.
Rueda móvil:	Bronce.
Árbol:	Acero aleado A 60
Marca tipo:	AMIN 150-125-315
Motor propulsor:	RZ 225 S4.

En la tabla 2.3 se relacionan los componentes que conforman la bomba y se describe los materiales estructurales con lo que fueron construidos cada elemento.

2.4 Metodología para obtención de la curva característica del sistema

La curva de un sistema de tuberías representa la energía por unidad de peso (carga) que es necesario suministrarle al sistema, para que circulen a través del mismo los caudales que se deseen. Cada punto de la curva representa la carga necesaria H_{nec} , para que circule el caudal Q , que le corresponda.

Tabla 2.4. Datos principales del sistema de abasto.

No	Variables	Valor	U/M
1	Q	175	m^3/h
2	L	18	m
3	D	0,15	m

Para el cálculo del sistema de bombeo de agua cruda se tuvo en cuenta los parámetros establecidos según el diseño del sistema según tabla 2.4.

2.4.1 Metodología de cálculo según el tipo de conexión en tuberías

Conexión en serie:

Están formadas por varias tuberías una a continuación de la otra.

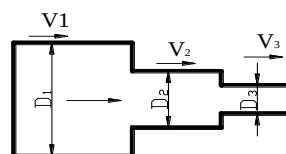


Figura 2.1. Tuberías en serie.

Fuente: Para resolver circuito hidráulicos.

En el caso de tuberías en serie se aplican las fórmulas siguientes:

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3$$

$$H_f = H_{f1} + H_{f2} + H_{f3} + \dots H_{fn} \quad (2.1)$$

$$v_1 \cdot D_1^2 = v_2 \cdot D_2^2 = v_3 \cdot D_3^2 \quad (2.2)$$

Donde:

Q- caudal o gasto del fluido; (m³/s)

v- velocidad del fluido; (m/s)

H_f- pérdida total

D- diámetro de la tubería; (m)

En efecto:

- El caudal que circula por los tramos 1, 2, 3, n de diámetros D₁, D₂, D₃, D_n es el mismo.
- La pérdida total es igual a la suma de las pérdidas parciales.
- Se cumple la ecuación de continuidad.

Conexión en paralelo:

Una combinación de dos o más tuberías conectadas, de tal manera que la corriente fluida se divida en dos o más tuberías y después se junten de nuevo, es un sistema de tubería en paralelo.

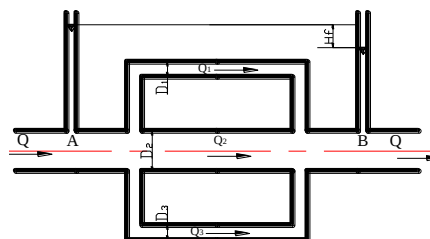


Figura 2.2. Tuberías en paralelo.

Fuente: Para resolver circuito hidráulicos.

Para estos casos se aplican las siguientes fórmulas:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (2.3)$$

$$H_f = H_{f1} = H_{f2} = H_{f3} \quad (2.4)$$

En efecto:

- El caudal total Q se reparte entre todas las tuberías.
- La presión al comienzo p_A y al final p_B de cada rama es la misma para todas las ramas, luego la caída de altura de presión (diferencia de lecturas en los tubos piezométricos), H_r será también la misma en todas las ramas.

Conexión ramificada:

Denominaremos tubería ramificada a un conjunto de varios tubos con una sección común: el lugar de ramificación o convergencia de los mismos. Son redes que para una situación definida de consumos en los nodos, pueden calcularse los caudales circulantes por las tuberías aplicando la ecuación de continuidad.

En las redes ramificadas el sentido de circulación del agua puede determinarse fácilmente ya que el agua, puede llegar a cada punto por un solo camino. Este tipo de red presenta dos inconvenientes principales; en primer lugar, que una rotura interrumpa el servicio a todos los lugares que quedan aguas abajo del mismo y en segundo lugar, que las pérdidas de carga resultan mayores ya que el líquido tiene un solo camino para llegar a un lugar determinado.

Para estos casos se aplican las siguientes fórmulas:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_M \quad (2.5)$$

Donde:

Q_1 , Q_2 y Q_3 son los gastos en las diferentes tuberías.

$$\sum h_1 = \sum h_2 = \sum h_3 \quad (2.6)$$

Donde:

$\sum h_1$, $\sum h_2$ y $\sum h_3$ no es más que la suma de las pérdidas de altura en cada unidad.

2.4.2. Velocidad del fluido

Para determinar la velocidad del fluido, se emplea la ecuación 2.7.

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi D^2} \quad (2.7)$$

En la que:

Q - caudal o gasto del fluido; (m³/s)

D - diámetro de la tubería; (m)

2.4.3 Característica de la red

La característica de la red de la instalación se recomienda calcular por la ecuación:

$$H_{red} = \Delta Z + R \cdot Q^2 \quad (2.8)$$

Donde:

ΔZ - altura geométrica; (m)

R - coeficiente de resistencia; (s²/m⁵)

El coeficiente de resistencia R para los distintos regímenes de corriente se calcula empleando las siguientes fórmulas:

Para el régimen turbulento se utiliza la ecuación 2.9.

$$R = \left(\sum \xi + \lambda \cdot \frac{l}{d} \right) \cdot \frac{8}{g \cdot \pi^2 \cdot d^4} \quad \text{y} \quad m = 2 \quad (2.9)$$

Donde:

$\sum \xi$ - pérdidas locales en la tubería; (adim.)

λ - coeficiente de fricción; (adim.)

Los valores de este coeficiente dependen del tipo de accesorio.

En la tabla 2.4 se muestran diferentes valores de según el accesorio.

Tabla 2.4 Valores de los coeficientes de resistencias locales

Accesorio	ξ
Codo de 90°	0,9
Válvula de cuña	0,11

Fuente: Kasatkin, (1985).

Tabla 2.4 Valores de los coeficientes de resistencias locales. (Continuación)

Accesorio	ξ
Válvula de globo	1,06
Coeficiente a la entrada	0,78
Coeficiente a la salida	1

Fuente: Kasatkin, (1985).

Para el cálculo de pérdida de carga en accesorios, se utiliza la siguiente expresión 2.10.

$$h_{loc} = \sum \xi \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{D^4 \cdot \pi^2 \cdot g} \quad (2.10)$$

Donde:

g - aceleración de la gravedad; (m/s²).

El factor ξ es adimensional y su valor depende del tipo de accesorio y diámetro del mismo; se define como la pérdida de altura de velocidad para una válvula o accesorio.

Algunos fabricantes pueden proporcionar su factor ξ , por lo tanto, deberá utilizarse ese valor, pero en el caso de no contar con esta información es conveniente utilizar las fórmulas para el cálculo del factor ξ .

Para el régimen de circulación laminar de fluidos de naturaleza newtoniana existe plena correspondencia entre los ensayos de Moody en tuberías comerciales y la siguiente ecuación.

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (2.11)$$

El coeficiente λ debe estar en función del criterio principal de semejanzas es decir del número de Reynolds que incluye viscosidad, diámetro y velocidad:

$$\lambda_t = \lambda_l = f(R_e).$$

Históricamente, la ecuación de Colebrook ha sido la más cotizada y representativa de la forma funcional del factor de fricción para flujo turbulento ($Re \geq 2300$); desafortunadamente, el factor de fricción está implícito con respecto al número de Reynolds y la rugosidad relativa en la representación de Colebrook. (Aguirre et al., 1996a; Streeter et al., 2000; Haestad, 2003; Martínez et al., 2007). La expresión de Colebrook & White expresa:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7 \cdot D} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} \right) \quad (2.12)$$

Donde:

λ - factor de fricción de Darcy – Weisbach; (adim).

ε - coeficiente de rugosidad de la tubería; (m).

Por su parte, Blasius propuso una relación empírica para tubos hidráulicamente lisos, válida en el rango de $2\,300 < Re < 100\,000$.

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad (2.13)$$

El factor de fricción está en función del número de Reynolds del flujo, el cual depende de la velocidad del fluido y ésta a su vez de la descarga. La ecuación de Colebrook & White, implícita para λ , se resuelve iterativamente por ensayo y error, con la aplicación de algún método de aproximaciones sucesivas.

Como primera aproximación para determinar el factor de fricción de Darcy – Weisbach puede utilizarse la ecuación de Swamee & Jaim (Haestad, 2003).

$$\lambda = \frac{1,325}{\left[\ln \left(\frac{k}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (2.14)$$

Donde:

k - coeficiente de rugosidad de la tubería; (m).

El coeficiente de rugosidad de la tubería se puede encontrar en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Coeficientes de rugosidad aproximados de las tuberías

Características de las tuberías	k, mm
Acero	0,045 a 0,5
Fundición	0,26 a 1,0
Metal, muy vieja con incrustaciones	1,0 a 3,0

Fuente: *Fernández, (2003).*

-Número de Reynolds

Este número adimensional se denomina número de Reynolds en honor al sabio inglés que estableció este criterio y se designa:

$$Re = \frac{d_{tub} \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad (2.15)$$

Donde:

μ - coeficiente dinámico de viscosidad del fluido; (Pa·s).

d - diámetro de la tubería; (m).

v - velocidad del fluido; (m/s).

ρ - densidad del fluido; (kg/m³).

2.5 Procedimientos metodológicos para obtener las características operacionales de los equipos de bombeo

Los métodos y modelos matemáticos tratados adolecen de no considerar los efectos de la regulación y reología del fluido sobre las características operacionales de los equipos de bombeo; por lo que se hace necesaria una serie de consideraciones y formulaciones físicas y matemáticas en relación con las características operacionales de los equipos de bombeo.

Las bombas centrifugas que operan a velocidad constante, pueden descargar cualquier capacidad desde cero hasta un valor máximo que depende del tamaño, diseño y condiciones de succión (Karassik y Carter, 1968). Diversos autores como Bienvenido (1973), Turiño (1994) y Turro (2002), coinciden en establecer el siguiente

modelo para la característica de carga-flujo de las bombas centrífugas a velocidad de giro constante.

$$H = a + b \cdot Q - c \cdot Q^2 \quad (2.16)$$

Donde a, b y c son coeficientes que se pueden obtener de análisis de la curva característica suministrada por el fabricante.

Santos y Martín (1999) a partir de un análisis estadístico de la forma de la característica de trabajo de un equipo de bombeo de tipo centrífugo, obtiene modelos que recalculan los coeficientes a, b y c de la ecuación (2.16) con la velocidad específica con un nivel de confianza de un 95 %. Donde:

$$a = 0,875 \cdot H_D + 0,002396 \cdot H_D \cdot n_{(int)} \quad (2.17)$$

$$b = 0,748 \cdot \frac{N_D}{Q_D} + 0,00315 \cdot \frac{N_D}{Q_D} \cdot n_{(int)} \quad (2.18)$$

$$c = 0,2878 \cdot \frac{H_D}{Q_D^2} \quad (2.19)$$

Donde:

n_{int} - velocidad específica; (rev/min)

Q_D - caudal de diseño; (m³/h)

H_D - altura de diseño; (m)

N_D - potencia de diseño de la bomba; (kW)

2.5.1 Cavitación en bombas centrífugas

Con la siguiente metodología de cálculo se determinará si la bomba objeto de estudio está trabajando bajo un régimen cavitacional.

El parámetro $(NPSH)_D$ debe ser comparado contra él $(NPSH)_R$, el cual está determinado por las características del tramo de succión del sistema y se puede mejorar aumentando el diámetro de la tubería de succión, mejorando la calidad de la tubería, reduciendo la distancia de la tubería de succión y la cantidad de accesorios. Todo lo anterior con el fin de garantizar que $(NPSH)_d \geq (NPSH)_r$.

Altura neta positiva en la succión disponible:

Se denomina NPSH (altura neta positiva en la succión) a la diferencia entre la presión del líquido a bombear referida al eje del impulsor y la tensión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo (es la presión del líquido que a esa temperatura, se halla en equilibrio con su presión de vapor en un depósito cerrado). Se deben conocer y combinar en cada caso el NPSH disponible $(NPSH)_D$ de la instalación y el NPSH requerido $(NPSH)_R$ por la bomba.

El $(NPSH)_D$ es en función de la instalación independiente del tipo de bomba.

$$(NPSH)_D = \frac{P_{atm}}{\gamma} + H_{succ} - \Sigma h - H_t; [m] \quad (2.20)$$

Donde:

P_{atm} - presión atmosférica; (Pa).

H_t - presión de vapor del agua; (m).

γ - peso específico; (N/m³).

Σh - pérdidas en la succión; (m).

Las pérdidas en la succión se calculan empleando fórmula 2.21.

$$\Sigma h = \left(\frac{\lambda_t \cdot l_t}{d_{tub}} + \Sigma \zeta_{succ} \right) \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot d^4 \cdot g} \quad (2.21)$$

Altura neta positiva en la succión requerida:

El $(NPSH)_R$: es un dato básico y característico de la bomba, varía según el modelo, tamaño y condiciones de servicio, recomendada en los datos que facilita el fabricante.

Para la evaluación de la calidad del diseño, de la fabricación o de la confiabilidad de los datos técnicos referentes a la aspiración, es importante la determinación del $(NPSH)_R$, el cual se calcula por la expresión 2.22, Pérez, (1986).

$$(NPSH)_R = 10 \cdot \left(\frac{n\sqrt{Q}}{C} \right)^{3/4}; [m] \quad (2.22)$$

Donde:

C - coeficiente de velocidad específica en la succión; (rev/min)

En el diseño de nuevas máquinas el valor del coeficiente de velocidad específica en la succión se determina mediante cálculo y posteriormente se comprueba con los ensayos correspondientes. En la práctica el coeficiente puede ser afectado por deficiencias del proyecto o de su ejecución. Para la realización de un análisis que permita una evaluación práctica y rápida de una bomba, el coeficiente de velocidad específica en la succión se obtuvo en función de la velocidad específica, ($C = f(n_s)$).

Su valor corresponde a las siguientes correlaciones empíricas:

- Bombas con el rodete en voladizo:

$$C = 880 \log n_s^{3/4} \quad (2.23)$$

- Bombas con el rodete entre apoyos:

$$C = 800 \log n_s^{3/4} \quad (2.24)$$

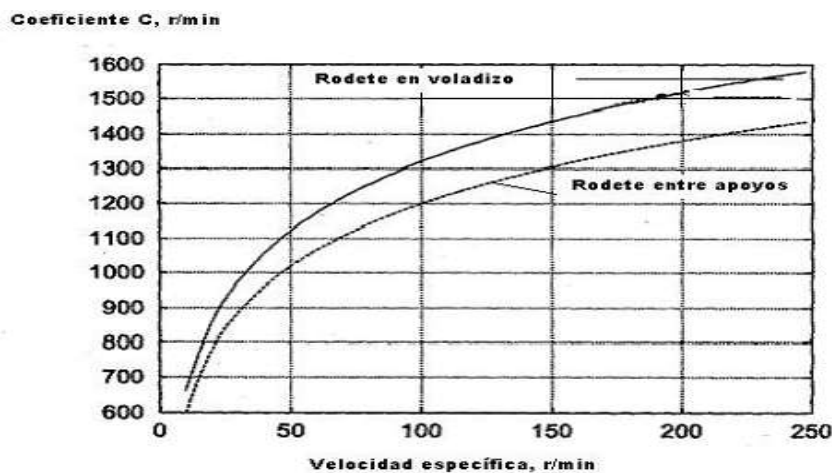


Figura 2.3 Coeficiente de velocidad específica de aspiración en función de la velocidad específica.

- Bombas con el rotor en voladizo.
- Bombas con el rotor entre apoyos.

Fuente: Pérez, (1986).

2.5.2 Velocidad específica

Es un coeficiente basado en los criterios de semejanza que caracteriza las máquinas de flujo comparándolas con una máquina hipotética que entrega un gasto de 0,075 m³/s con una carga de 1 m a su máxima eficiencia.

La velocidad específica se calcula a partir del caudal y la carga que corresponde al máximo rendimiento de la máquina o por los parámetros nominales de la misma.

Según sea la velocidad específica o característica n_s , las bombas centrífugas y otras de paletas, semejantes a estas, se dividen en los siguientes tipos:

- lentas: $n_s \leq 80$; $\frac{D_2}{D_1} = 2,2 - 3,5$
- normales: $n_s = 80 - 150$; $\frac{D_2}{D_1} = 2,2 - 1,8$
- rápidas: $n_s = 150 - 300$; $\frac{D_2}{D_1} = 1,8 - 1,3$
- diagonales o helicoidales: $n_s = 300 - 600$; $\frac{D_2}{D_1} = 1,3 - 1,1$
- axiales o de hélice: $n_s = 600 - 1200$; $\frac{D_2}{D_1} = 1$

De tal forma, la velocidad específica se calcula empleando la ecuación 2.25

$$n_s = 3.56 \cdot \frac{n\sqrt{Q}}{(H_{succ})^{3/4}} \quad (2.25)$$

Donde:

n - número de revoluciones; (rev/min).

H_{succ} - altura de succión; (m).

Q - caudal o gasto del fluido; (m³/s).

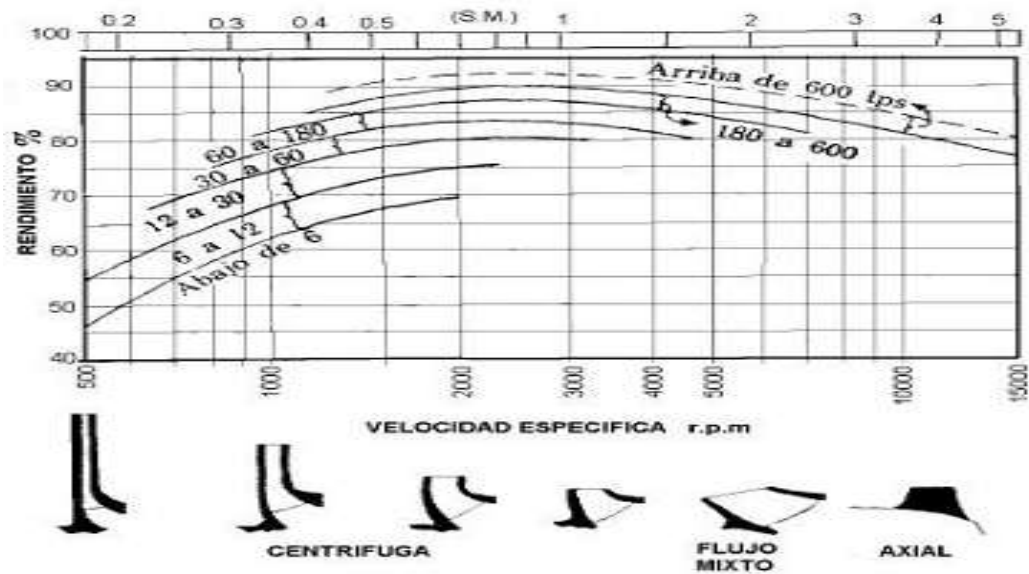


Figura 2.4 Clasificación de rodete de paleta según la velocidad específica.

Fuente: Nekrasov (1986).

2.5.3 Balance energético de una bomba centrífuga

El balance energético de una bomba centrífuga se sustenta en el cálculo del rendimiento total de la bomba y en la potencia real que consume el motor, porque estos aspectos caracterizan energéticamente la instalación. La metodología a utilizar se establece a continuación según (Nekrasov, 1968).

2.5.4 Potencia útil de la bomba

1. Determinar la potencia requerida por la bomba en la flecha (potencia demandada por la bomba o la entregada por el motor), mediante la ecuación:

$$\text{Potencia en la Flecha (hp o kW)} = \text{Potencia del motor (medida)} \times \eta_{\text{motor}} \quad (2.26)$$

Para determinar la potencia útil de la bomba se emplea la ecuación 2.27, la cual relaciona la densidad del agua, el gasto volumétrico, la aceleración de la gravedad y la altura de diseño que desarrolla la bomba.

$$Nu = \frac{\rho_{\text{agua}} \cdot Q \cdot g \cdot H_d}{1000} ; [\text{kW}] \quad (2.27)$$

Donde:

H_d - altura de impulsión; (m)

Rendimiento de la bomba:

$$\eta(\%) = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{N_{nec} \cdot 1000} \quad (2.28)$$

η_t - rendimiento total de la bomba; (%)

Si se conoce la eficiencia de la bomba y la potencia hidráulica se puede determinar la potencia requerida por la bomba o la entregada por el motor, mediante la ecuación:

$$N_{req} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta \cdot 1000} \quad (2.29)$$

Determinar la potencia requerida por la bomba (potencia demandada por la bomba y la entregada por el motor), mediante la ecuación:

$$N_m = \frac{N_b}{\eta_b} \quad (2.30)$$

Dónde:

η_b - Rendimiento de la bomba.

El rendimiento total de la bomba viene determinado por la relación de los distintos rendimientos de la bomba y se puede calcular empleando la ecuación 2.31.

$$\eta_t = \eta_h \cdot \eta_v \cdot \eta_{mec} \quad (2.31)$$

Donde:

η_h - rendimiento hidráulico, (%).

η_v - rendimiento volumétrico, (%).

η_{mec} - rendimiento mecánico, (%).

Rendimiento hidráulico

No es más que la relación entre la altura real y teórica, siendo finito el número de álabes. El rendimiento hidráulico de la bomba se resuelve empleando la ecuación 2.32 y es siempre mayor que el rendimiento total, porque éste último tiene en cuenta sólo un tipo de pérdidas de energía en la bomba, las hidráulicas. Las pérdidas hidráulicas surgen como resultado del rozamiento hidráulico y la formación de torbellinos en la máquina.

$$\eta_h = \frac{Hd - \sum \zeta_t}{Hd} \quad (2.32)$$

En el que:

H_d - altura de impulsión; (m).

Rendimiento mecánico

Para calcular el rendimiento mecánico del conjunto motor – bomba, se emplea la ecuación 2.33.

$$\eta_{mec} = \frac{N_u}{N_m} \quad (2.33)$$

Donde:

N_u – potencia útil de la bomba; (kW).

N_m - potencia del motor acoplado al eje de la bomba; (kW).

Rendimiento volumétrico

Las pérdidas volumétricas (fugas) están condicionadas por el paso de líquido a través de las holguras entre el impulsor y el cuerpo de la máquina y puede ser determinado a través de la ecuación 2.34.

$$\eta_v = \frac{Q}{Q_{calc}} \quad (2.34)$$

Donde:

Q_{calc} - gasto que debe entregar el impulsor; (m³/s).

Gasto que debe entregar el impulsor

A la hora de diseñar una bomba es necesario tener en cuenta las fugas. En la práctica se consideran entre dos y cinco %. Por lo que el gasto que debe entregar el impulsor para garantizar el flujo deseado se puede calcular mediante la ecuación 2.35.

$$Q_{calc} = (1,02 - 1,05) \cdot Q \text{ (m}^3\text{/s)}. \quad (2.35)$$

2.5.5 Costo de bombeo de la instalación

Para calcular el costo de bombeo se comenzará evaluando primeramente el costo que se emplearía para bombear el agua cruda de la instalación, por lo que para efectuar el cálculo se emplea la ecuación 2.36.

$$C_{bom} = \frac{t_{el} \cdot t_t}{\eta_m \cdot \eta_b} \cdot N_h \cdot 10^{-3} \quad (2.36)$$

Donde:

C_{bom} - costo de bombeo de la instalación; (CUC/año·m).

t_{el} - tarifa eléctrica; (CUC/ kW·h).

t_t - tiempo de trabajo del equipo; (h/año).

η_m - rendimiento del motor eléctrico; (%).

η_b - rendimiento de la bomba; (%).

N_h - potencia hidráulica; (W).

Para determinar este último, se utiliza la ecuación 2.37.

$$N_h = Q \cdot H \cdot \rho \cdot g \quad (2.37)$$

Siendo:

Q - caudal o gasto volumétrico entregado por la bomba; (m³/s).

H - altura que desarrolla la bomba; (m).

ρ - densidad del líquido; (kg/m³).

g - aceleración de la gravedad; (m/s²).

2.6 Materiales empleados para las mediciones de los parámetros en el sistema

Para evaluar una bomba centrífuga horizontal, es necesario realizar algunas mediciones, las cuales deben llevarse a cabo cuando la planta o proceso estén en operación normal. Deberán registrarse las diferentes condiciones de operación, representando por lo menos dos ciclos de trabajo en condiciones estándar de producción, ya que de esto dependerá la precisión y confiabilidad de la evaluación.

Los parámetros que deben medirse para realizar una correcta evaluación son los siguientes:

- Gasto (m^3/s): la medición de gasto es de fundamental importancia para la evaluación de la bomba.
- Carga o presión (kg/cm^2 o m): la medición de carga o presión en la succión y descarga de la bomba es igualmente importante para la evaluación de la bomba.
- Temperatura ($^{\circ}\text{C}$): la temperatura del fluido de trabajo es importante para identificar problemas de cavitación en la bomba.

Simultáneamente a la realización de las mediciones al sistema de bombeo y al levantamiento de los datos de la bomba, es importante medir los parámetros eléctricos del motor acoplado a ésta.

- Parámetros eléctricos del motor: para poder evaluar un motor es necesario medir sus parámetros eléctricos.

El instrumento de medición recomendado para evaluar los motores en un diagnóstico energético es el analizador de redes eléctricas.

Recomendaciones generales previas a las mediciones

Antes de iniciar cualquier medición es recomendable observar los siguientes puntos.

- Identificar los componentes del sistema de bombeo, tales como: la ubicación del conjunto motor-bomba, tuberías, equipos y el recipiente de succión y descarga.
- Identificar las fugas en el sistema y corregirlas (por ejemplo, en los puntos de unión en tuberías, en los empaques -goteo excesivo- o sello mecánico, en la bomba o equipos).
- Verificar la alineación del conjunto motor-bomba, o la alineación de poleas y tensión de bandas.
- Determinar mediante observaciones físicas o de acuerdo a la experiencia si la bomba está cavitando. Algunas recomendaciones para detectar la cavitación son:
 - ✓ Ruido intenso y continuo al trabajar la bomba (parecido al de un molino de bolas).
 - ✓ Vibración.

- ✓ Frecuente mantenimiento (erosión por cavitación en el impulsor).
- ✓ Gasto menor al de operación.

2.6.1 Funcionamiento y utilización de cada material

En la medición de los parámetros se utilizaron una cinta métrica de 30 metros, manómetros, calibre para mediciones en pulgada, manómetro, vibrómetro, flujómetro, pH- metro y sonómetro. Ver anexo # 3, Instrumentos de medición.

Cinta métrica: esta tiene gran utilización en la industria, en específico en el departamento de diseño, la cual se utiliza para la medición de tramos rectos y muy largos; en el trabajo se utilizó para los tramos largos de tubería con fácil acceso.

Manómetro: se utiliza para medir la presión del fluido en la succión y la descarga.

Calibre para mediciones: se utiliza para medir el diámetro de las tuberías. Con este instrumento fue fácil determinar los diámetros de la línea.

Vibrómetro: se utiliza para medir las vibraciones de la bomba y el motor.

Flujómetro: se utiliza para medir el caudal de trabajo en la descarga

pH- metro: se utiliza en el método electroquímico para medir el pH de una disolución.

Sonómetro: es un instrumento de medida que sirve para medir niveles de presión sonora.

2.7. Conclusiones del capítulo

1. Teniendo en consideración los elementos a emplear en la instalación y las de las características del material, se establece la metodología de cálculo para la evaluación del sistema actual.
2. La metodología de cálculos propuesta se ajusta como elemento fundamental a las características de modelo reológico en el trasiego de agua para el tratamiento químico de la planta en la Termoeléctrica Lidio Ramón Pérez.
3. El cálculo de la instalación del hidrot transporte permitirá la selección de tuberías, equipamiento de bombas y accesorios para instalaciones hidráulicas a partir de las propiedades de los fluidos.

Capítulo 3. Análisis y discusión de los resultados

3.1 Introducción

La evaluación final de una investigación es de primordial importancia para establecer en qué medida esta ha contribuido al desarrollo político, económico o social de un país o región. El correcto análisis de esta permite además sentar las bases para futuros trabajos que sobre la temática se desarrollen, de ahí su ineludible relación con la economía, la sociedad y el ambiente, en correspondencia con esto.

El **objetivo**: de este capítulo de forma concreta, es mostrar los resultados obtenidos en el cálculo de la red hidráulica para el fluido a transportar, tratándose de ser Newtoniano, así como, la valoración económica y ambiental para la instalación.

3.2 Análisis químico del agua cruda

La empresa Lidio Ramón Pérez de Felton cuenta con laboratorios químicos donde se analizan las muestras tomadas a las diferentes sustancias que intervienen en el proceso productivo con el objetivo de conocer sus propiedades y determinar si se encuentran en parámetros permisibles para la producción. A continuación se muestra el análisis realizado al agua cruda en los meses enero y febrero.

Tabla. 3.1 Resultado del análisis químico del agua cruda

Propiedades química	U/M	Valores mes de Enero	Valores mes de Febrero
PH	---	7,58	7,6
Conductividad	μs/m	4,69	4,7
Alcalinidad parcial (P)	meq/l	0	0
Alcalinidad total (M)	meq/l	4,02	4,1
Dureza total (Dt)	meq/l	3,76	3,8
Dureza cálcica (Dca)	meq/l	1,64	1,7
Dureza Magnésica(Dm)	meq/l	2,12	2,15
Cloruro (Cl)	meq/l	0,53	0,55
Sulfato (SO ₄)	meq/l	0,23	0,25
Sílice reactiva (SiO ₂ R)	meq/l	0,42	0,45
Sílice coloidal (SiO ₂ C)	meq/l	0	0
Materia orgánica (m.o)	mg/l	0,96	1,01

Se realizó el análisis químico del agua cruda en el laboratorio de la empresa Lidio Ramón Pérez antes de ser transportada por la bomba y se pudieron apreciar las propiedades químicas que se muestran en la tabla 3.1. En el mes de febrero el promedio del análisis realizado al agua se comportó por encima del mes de enero, debido a que las precipitaciones fueron mayores, por lo que existió mayor arrastre de las aguas además los movimientos mecánicos ocurridos en este período producen mayor contaminación de las aguas.

3.3 Resultados del cálculo y mediciones de los parámetros de trabajo de la instalación actual

El empleo de diversas herramientas permitió conocer los parámetros de trabajo del sistema de bombeo de agua cruda para el reactor en la planta de tratamiento químico, siendo estos obtenidos mediante mediciones con equipos que se encontraban certificados según normas de calidad para cada uno de ellos.

Tabla 3.2. Medición de los parámetros de la instalación actual

Mediciones realizadas	U/M	Valor
Flujo volumétrico	m ³ /h	140
Presión	kPa	282,6
Vibraciones en la bomba	mm/s	3
Tensión eléctrica	V	380
Corriente	A	71
Potencia	kW	18

En las mediciones realizadas al sistema de bombeo de agua cruda en la planta de tratamiento químico, se pudieron obtener los valores de operación, los que se muestran en la tabla 3.2, estando trabajando el sistema de manera continua transportando 140 m³/h a una presión absoluta de 282,6 kPa y una potencia de 18 kW.

Las vibraciones medidas al conjunto bomba motor mostraron que en la bomba se encontraban a 3 mm/s, mientras que en el motor aparecían en un rango normal. Al compararlo con el valor permisible que es de hasta 5 mm/s.

Para el análisis de la instalación actual se tuvieron en cuenta las características del sistema y propiedades del fluido, datos mostrados en la tabla 3.3, 3.4 y 3.5.

Tabla 3.3. Propiedades físicas del agua cruda

No	Variables	Valor	U/M
1	μ	0,001	Pa.s
2	ρ	1000	kg/m ³
3	D	0,15	m
4	L	18	m

Además para el cálculo de la instalación actual, se tuvo en cuenta la condición de la línea. El diámetro de 0,15 m y la longitud de 18 m, en todo su trazado tanto en la succión como en la descarga, según la tabla 3.4, donde se muestran los accesorios y su coeficiente de resistencia, según corresponde para cada uno de ellos.

Tabla 3.4 Accesorios y coeficiente de resistencia en la tubería de succión

Accesorios en la tubería	Unidad	Coeficiente de resistencia (ξ)
Válvulas	1	0,05
Coeficiente de entrada	1	0,78

En la tabla 3.5 se muestran los accesorios y su coeficiente de resistencia según corresponde para cada uno de ellos en la tubería de descarga.

Tabla 3.5 Accesorios y coeficiente de resistencia en la tubería de descarga

Accesorios en la tubería	Unidad	Coeficiente de resistencia (ξ)
Válvulas	1	0,05
Codo 90°	3	0,90
Coeficiente de salida	1	1

Una vez orientada la metodología a seguir para el cálculo de la red, y teniendo en cuenta que se trata de un fluido Newtoniano, se realiza el cálculo del sistema teniendo en cuenta los valores de pérdidas de 3,02, el diámetro y la longitud del sistema.

Tabla 3.6 Resultado del cálculo de la red conductora de agua.

Nro.	Q, m ³ /s	v, m/s	Re	λ	H, (m)
1	0,007	0,40	59416,67	0,020	7,00
2	0,014	0,79	118833,33	0,017	12,00
3	0,021	1,19	178250,00	0,015	17,05
4	0,028	1,59	237666,67	0,014	22,31
5	0,035	1,98	297083,33	0,014	26,97
6	0,042	2,38	356500,00	0,013	31,55
7	0,049	2,78	415916,67	0,013	36,08
8	0,056	3,17	475333,33	0,012	40,59
9	0,062	3,54	530472,00	0,012	45,03
10	0,069	3,94	590364,00	0,012	49,44

En la tabla 3.6 se muestran los principales valores obtenidos del cálculo del sistema de transporte, en correspondencia con los parámetros de altura de la bomba y potencia según los caudales para los que se realizó, esto facilita el posterior análisis para la obtención del punto de operación de la instalación, según figura 3.1, comparándose estos resultados con los valores nominales del sistema y sus condiciones de diseño.

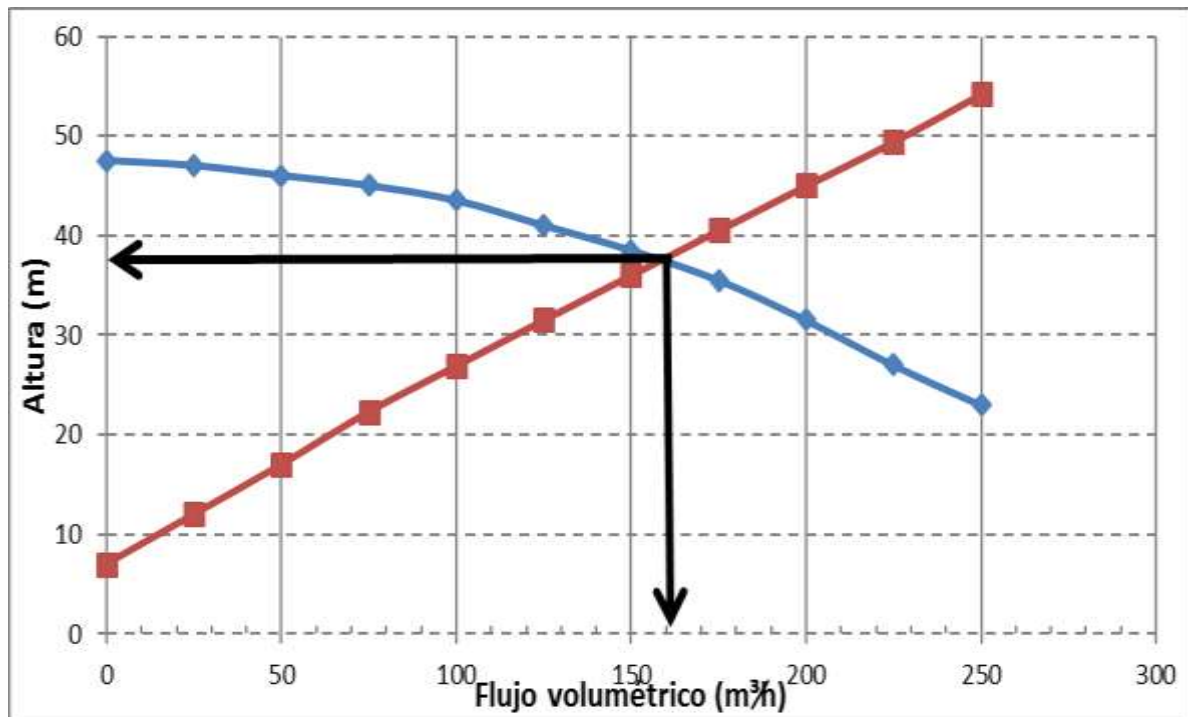


Figura 3.1. Curva de la red y la bomba.

En esta instalación trabaja una bomba con una capacidad de $160 \text{ m}^3/\text{h}$, una altura de carga de 38 m, Al compararlo con los resultados de las mediciones donde el caudal es de $140 \text{ m}^3/\text{h}$, existe una diferencia de $20 \text{ m}^3/\text{h}$; esta diferencia se relaciona con las condiciones actuales de deterioro de las tuberías y desgaste de la bomba. El error de cálculo para este caso se encuentra en el 12 %, dándose como resultado satisfactorio; al sistema no encontrarse en las óptimas condiciones por problemas mecánicos, no se posibilita que este transporte el caudal necesario para el sistema. Ver anexo 1.

En la figura 3.2 se muestra el comportamiento del rendimiento en función del flujo volumétrico en m^3/h , relacionado con los datos obtenidos mediante el cálculo del sistema de bombeo de agua cruda.

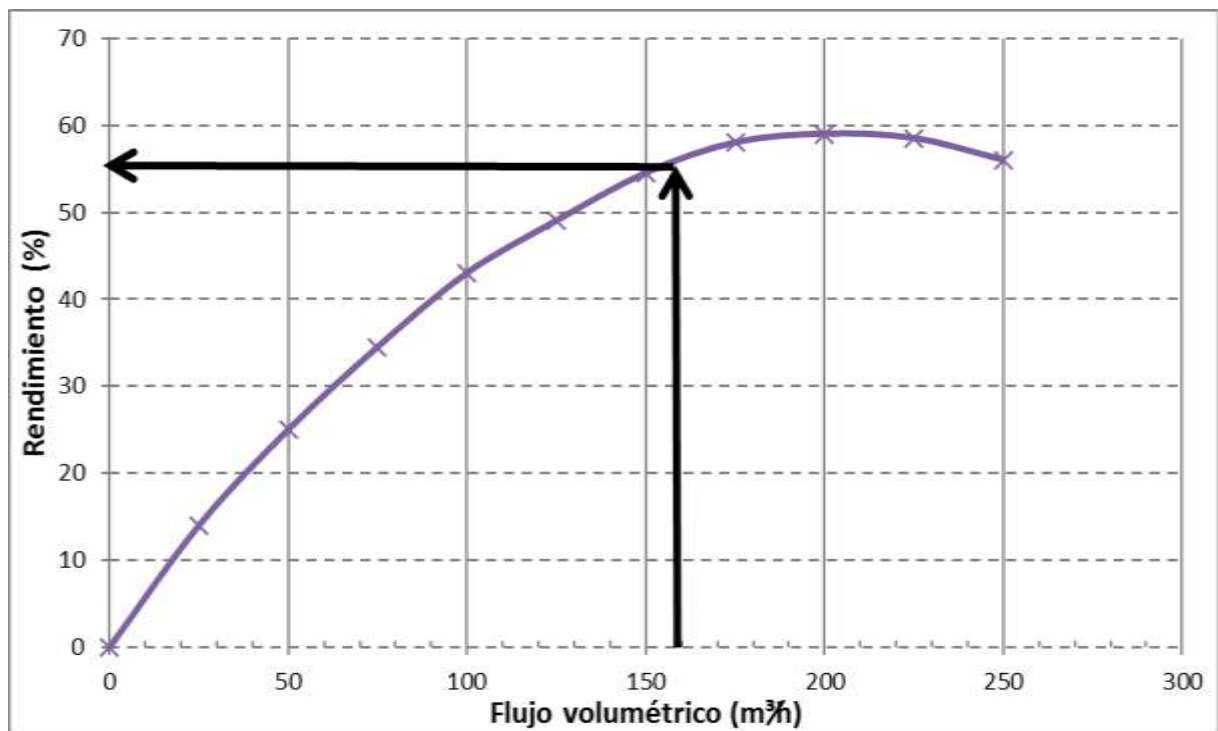


Figura 3.2. Curva del rendimiento.

Para ese punto de trabajo, la bomba tiene un rendimiento 55 % y por los datos nominales 59%, por lo que existe una diferencia de 4 %, y un rendimiento mecánico de 42,2 %, para obtener mejores resultados se debe trabajar garantizando $200 \text{ m}^3/\text{h}$, aunque los resultados obtenidos, se pueden considerar como favorables, debido a que se encontraron en el margen recomendado. El punto operacional como se indica en la figura 3.1, se encuentra a $40 \text{ m}^3/\text{h}$ por debajo de los parámetros nominales.

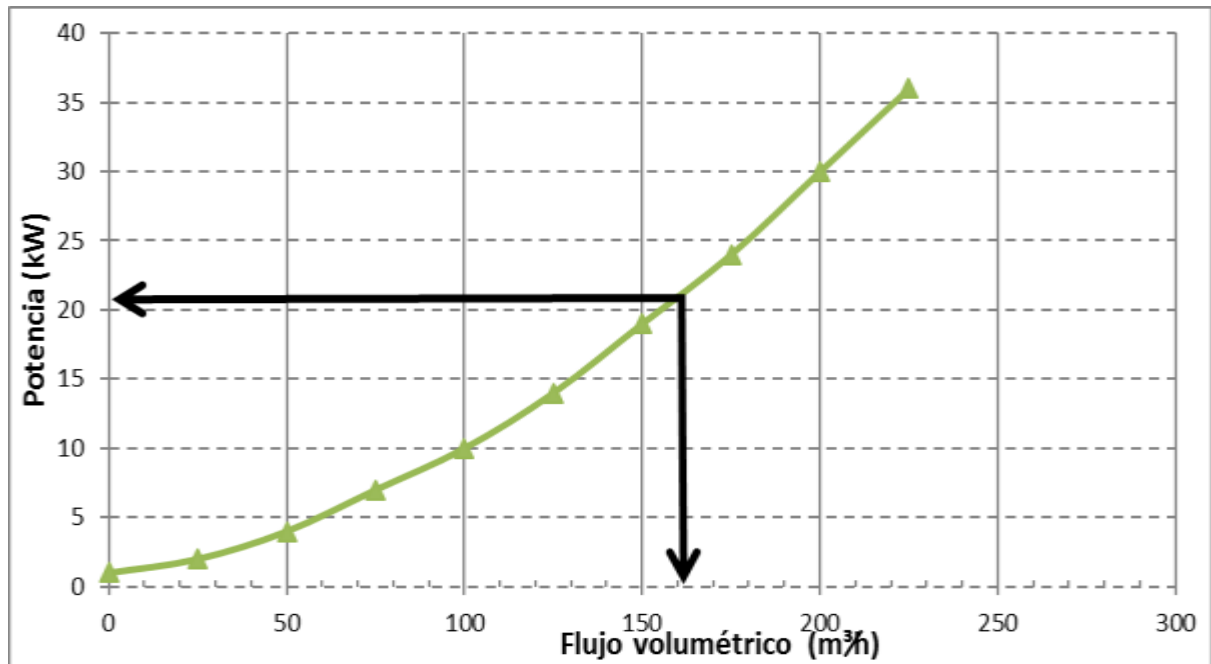


Figura 3.3. Curva de la potencia.

En la figura 3.3 se puede apreciar que para ese punto de trabajo la bomba tiene una potencia de 21 kW, para transportar 160 m³/h.

3.3.1 Resultados de potencia y rendimiento de la bomba

Los resultados de la potencia demandada por la bomba es calculada por las respectivas ecuaciones 2.27 y 2.28 luego de sustituir la densidad del agua cruda; el caudal requerido ($Q=160 \text{ m}^3/\text{h}$), y el valor de la aceleración de la gravedad ($g=9,81 \text{ m/s}^2$) se obtiene como resultado la potencia requerida por el sistema 23,4 kW.

El rendimiento de la bomba se determinó mediante la ecuación 2.29, arrojando como resultado 46,9 % encontrándose por debajo del parámetro de diseño por el tiempo de explotación de la bomba que es de 59 % por lo que no se encuentra en su optima capacidad para el transporte del caudal necesario del sistema.

3.3.2 Resultado del rendimiento mecánico en el sistema de bombeo

Sustituyendo en la ecuación 2.31 la potencia útil del motor 10,9 kW y la potencia del motor acoplada al eje de la bomba 26 kW, se obtiene un rendimiento mecánico de 42,2 %, siendo este el fenómeno que afecta el rendimiento del sistema, provocado por las siguientes causas.

Tabla 3.7 Principales causas mecánicas que afectan el rendimiento del sistema.

Causas	Efecto mecánico	Efecto económico
Pérdidas mecánicas por empaquetaduras.	Salida de la bomba del proceso de producción.	Consumo de empaquetaduras de teflón y de energía eléctrica.
Vida reducida de los sellos mecánicos y rodamientos deficientes.	Salida de la bomba del proceso de producción.	Cambio de sellos mecánicos y rodamientos.
Deformación de la carcasa por esfuerzos producidos por la tubería o la bancada.	Acortamiento de la vida útil del equipo.	Empleo de materiales para la reparación de la carcasa.
Deformación del impulsor.	Salida de la bomba del proceso de producción.	Cambio de impulsor.

En la tabla 3.7 se puede apreciar las principales causas que atentan contra el sistema, las cuales provocan la salida inoportuna del proceso de producción y a la vez implican una demanda económica para la solución de ellas.

Estas causas impiden el buen funcionamiento de la bomba debido a los daños que existen en sus partes lo que conlleva a que no pueda transportar el caudal que se necesita en el proceso, o sea, la aparición de un bajo rendimiento volumétrico.

3.4. Comprobación del fenómeno de la cavitación en la bomba

Para el cálculo de la cavitación de la bomba, según datos obtenidos para cada elemento que conforman las ecuaciones a calcular se cumple que $(NPSH)_{dis} \geq (NPSH)_{req}$. El fenómeno de la cavitación generalmente ocurre en los sistemas de bombeo centrífugos, por lo que es uno de los cálculos fundamentales a tener en cuenta. Para ello se analiza el sistema para comprobar la ocurrencia o no del fenómeno de la cavitación en la bomba centrífuga instalada.

Tabla 3.8 Condiciones en la red y la bomba en la succión

Parámetros	140 m ³ /h	160 m ³ /h	200 m ³ /h	Ecuación
Altura positiva neta de carga de succión disponible ($NPSH_{dis}$)	7,7 m	7,3 m	7,1 m	2.20
Altura positiva neta de carga de succión requerida ($NPSH_{req}$)	3,3 m	3,5 m	3,8 m	2.22
Condición	No cavita	No cavita	No cavita	-

En la tabla 3.8 se muestran los resultados obtenidos en el cálculo realizado según la ecuación 2.20 sobre altura positiva neta de succión disponible $NPSH_d$ y la ecuación 2.22 sobre la altura positiva neta requerida $NPSH_r$, teniendo en cuenta que la bomba se clasifica como una máquina normal con una velocidad específica de 143 m/s.

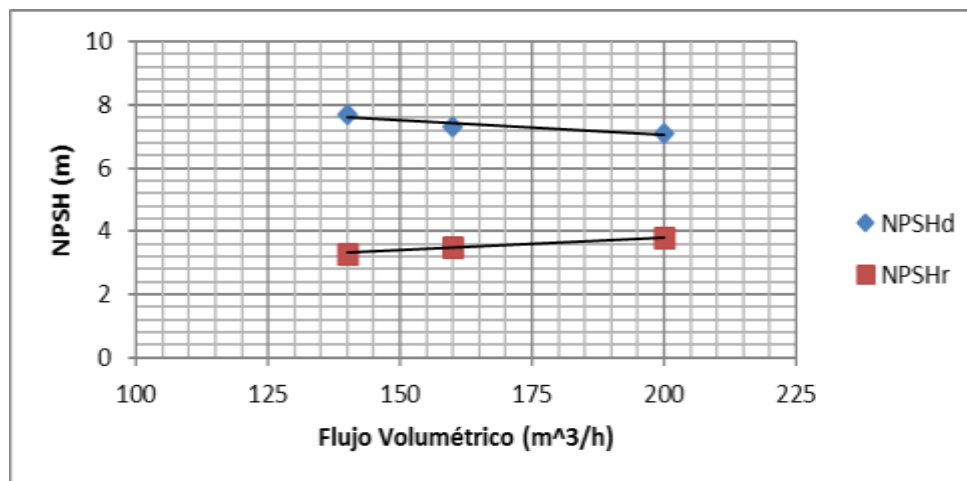


Figura 3.4 Curva del $NPSH_d$ y $NPSH_r$.

En la figura 3.4 se observa que al realizar la gráfica para los flujos volumétricos de 140, 160 y 200 m³/h no existe el fenómeno de la cavitación en todo el rango de operación, con una reserva cavitacional de 3,8 m; se cumple para todos los casos que $(NPSH)_{dis} > (NPSH)_{req}$.

3.5. Valoración económica

Para poder efectuar una correcta valoración económica, es necesario siempre tener en cuenta que la evaluación final de una investigación es de primordial importancia

para establecer en qué medida esta ha contribuido al desarrollo político, económico o social de un país o región. El correcto análisis de esta permite además sentar las bases para futuros trabajos que sobre la temática se desarrollen, de ahí su ineludible relación con la economía, la sociedad y el medio ambiente.

Se efectuó el cálculo del costo de bombeo por las ecuaciones 2.36 y 2.37, teniendo en cuenta que el valor de la tarifa eléctrica equivale a 0,09 CUC/kW, el tiempo de trabajo del equipo es de 8760 h/año, el rendimiento del motor es de 90 %, el rendimiento de la bomba, la altura de impulsión y la potencia hidráulica se tomó para los tres flujos volumétricos, teniendo como resultado el costo de bombeo de la instalación para 140 m³/h es de 0,27 CUC/año.m, para 160 m³/h es de 0,30 CUC/año.m y para 200 m³/h arrojó un resultado de 0,40 CUC/año.m como lo muestra la figura 3.5. A medidas que aumenta el caudal va aumentando el costo de bombeo.

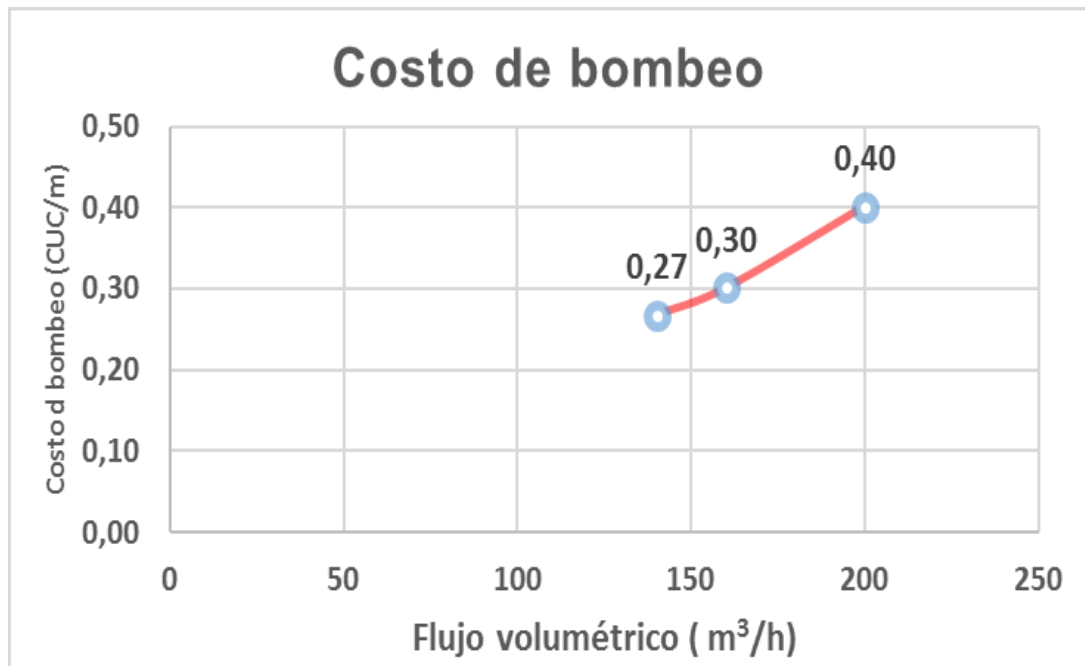


Figura 3.5 Costo de bombeo del agua cruda.

Según la medición realizada por el flujómetro se pudo constatar que el sistema se encuentra transportando 140 m³/h lo que se encuentra por debajo con relación al valor obtenido mediante cálculo información que se puede apreciar en la tabla 3.8.

Tabla 3.9 Comparación de bombeo de agua del sistema mediante los parámetros obtenidos por cálculo y los de medición actual en un año.

Parámetros	m ³ /h	m ³ /año
Flujo por medición	140	1 226 400
Flujo calculado	160	1 401 600
Diferencia	---	175 200
Gasto en CUC	---	52 560 CUC/año

Según muestra la tabla 3.8 comparando los resultados por cálculo y los de medición actual, en un año de trabajo el sistema instalado para el transporte de agua en la planta de tratamiento químico deja de transportar 175 200 m³ información que se obtiene por las mediciones que se realizan y esto equivale a la pérdida de 52 560 CUC/año.

Para el cálculo del portador energético se tuvo en cuenta el consumo de energía por el sistema de bombeo y el costo del MW, siendo este de 239,3 CUC, lo que el grafico 3.6 muestra el comportamiento del mismo.

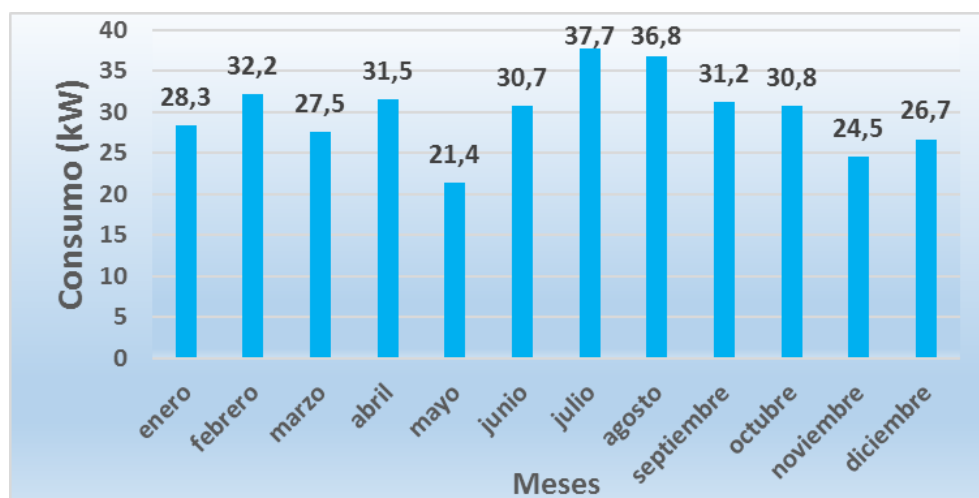


Figura 3.6 Consumo de energía eléctrica de la bomba AMIN 150-125-315

El gráfico 3.6 muestra el comportamiento del portador energético en un año de trabajo donde se puede observar la inestabilidad del sistema de bombeo en el proceso productivo y el consumo de energía eléctrica por meses, se puede apreciar que el mes de julio existió el mayor consumo eléctrico con 37,7 MW que esto representa 9 021,61 CUC, mientras que en mayo solo se consumió 21,4 MW que

representa 5 121,02 CUC, debido a las averías presentadas que trajeron como consecuencia la poca permanencia del sistema en operación.

En la planta de tratamiento químico de agua existe consumo energético por parte de los equipos que la conforman como son bombas, compresores, iluminación y otros lo que se muestra en la figura 3.7 comportamiento del consumo eléctrico para cada uno de ellos.

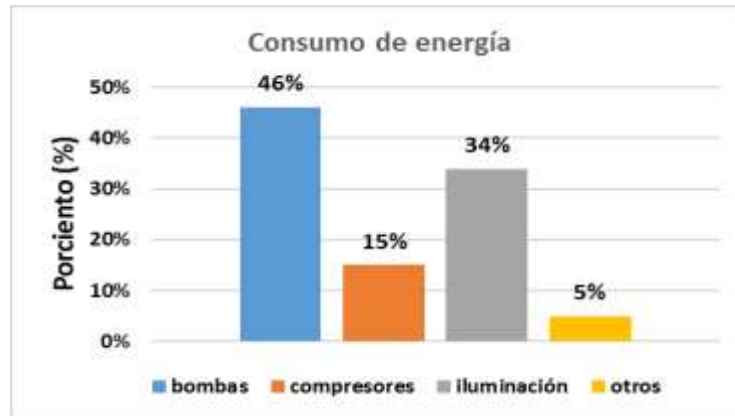


Figura 3.7 Consumo eléctrico de los equipos del área de Tratamiento químico.

En la gráfica 3.7 se pudo observar que los equipos de bombeo son los mayores consumidores de energía eléctrica en el área de tratamiento químico con el 46 %, en segundo lugar se encuentra el consumo de la iluminación con 34 %, siguiendo los compresores 15 % y por último los demás equipos del área con el 5 %.

3.6. Impacto ambiental

El ambiente es un sistema complejo y dinámico de interrelaciones ecológicas, socioeconómicas y culturales, que evoluciona a través del proceso histórico de la sociedad, abarca la naturaleza, la sociedad, el patrimonio histórico-cultural, lo creado por la humanidad, la propia humanidad, y como elemento de gran importancia las relaciones sociales y la cultura. Esta interpretación de su contenido explica que su estudio, tratamiento y manejo, debe caracterizarse por la integralidad y el vínculo con los procesos de desarrollo (Aldana, 2012).

Para la bomba, en su interacción con el ambiente, se destaca que existe un nivel de ruido medio respecto a las normas internacionales establecidas.

Los niveles máximos admisibles de ruido y los aspectos de protección contra el ruido, constituyen los requisitos higiénicos sanitarios que habrá de observarse en los

puestos y locales de trabajo, con el objetivo de disminuir los efectos nocivos del ruido sobre los trabajadores que desarrollan su actividad laboral en los mismos.

En mediciones realizadas a la instalación se comprobó que los niveles de ruido oscilaron desde 80 hasta 88 dB, lo que demuestra que afectan por acumulación y constancia el tímpano del oído, por encontrarse por encima de los 65 dB, donde ocurre la pérdida de la audición y los trastornos de los sistemas nervioso y cardiovascular.

Tabla 3.10 Matriz de identificación de riesgos en la instalación de bombeo de agua cruda

Causas	Efecto ambiental	Solución
Derrame de un m ³ /h de sosa cáustica.	Provoca desprendimientos de gases en la instalación.	Ejecutar mantenimiento y conservación de todas las tuberías, uniones y sellos.
Personal de la planta expuesto a gases tóxicos.	Los operadores que participan en el vaciado de la paila de ácido sulfúrico están expuesto a gases tóxicos.	Mantener la cultura industrial, eliminando toda la aparición de sustancias nocivas en el área de trabajo.
Nivel de ruido en la instalación mayor de 65 dB.	Provoca pérdida de la audición y trastornos de los sistemas nervioso y cardiovascular.	Garantizar la adquisición de orejeras contra ruido para los trabajadores que laboren bajo un régimen de trabajo con nivel de presión sonora de forma constante.

En la tabla 3.11 se pudo conocer las principales causas ambientales que afectan a los operadores y personal de mantenimiento en la planta de tratamiento químico de agua, donde fue diagnosticado un operador de problemas alérgicos en las sustancias tóxicas que aparecen en la planta al tener contacto con ella y un mecánico fue trasladado de esta área por la misma situación de salud.

3.7. Conclusiones parciales

- 1- Se comprobó que el punto de operación de la bomba se encuentra por debajo del valor nominal con una diferencia de 15 m³/h, que equivale a 131 400 m³ dejado de entregar en un año existiendo una pérdida ascendente de 39 420 CUC.
- 2- Se comprobó que existe altos índice de consumo de energía eléctrica en el área química donde las bombas son las mayores consumidoras de esta.

Conclusiones generales

1. La fundamentación teórica y experimental permitió conocer las causas que provocan el bajo rendimiento hidráulico en el sistema de bombeo de agua, las cuales se expresan en pérdidas mecánicas por empaquetaduras, vida reducida de los sellos mecánicos y rodamientos deficientes, deformación de la carcasa por esfuerzo producidos por la tubería o la bancada y deformación del impulsor.
2. La bomba centrífuga instalada modelo AMIN 150-125-315 para la operación del sistema de bombeo de agua no satisface los parámetros requeridos por el sistema ($Q = 175 \text{ m}^3/\text{h}$), ya que opera a $160 \text{ m}^3/\text{h}$ dejando de entregar $15 \text{ m}^3/\text{h}$, que equivale a $131\,400 \text{ m}^3$ dejado de entregar en un año existiendo una pérdida ascendente de 39 420 CUC.
3. Se comprobó el fenómeno de cavitación para los flujos volumétrico de 140, 160 y $200 \text{ m}^3/\text{h}$ quedando demostrado que no ocurre la cavitación en ninguno de los puntos comprobados, existiendo una reserva cavitacional de 3,8 m, además se clasificó la bomba en normal con una velocidad específica de 143 m/s.
4. Se demostró que existe un consumo de energía eléctrica real con valor ascendente 9 021,61 CUC/año para ello se propone la implementación de un plan de medida con el fin de mejorar la eficiencia energética en el sistema de bombeo de agua.
5. El nivel de ruido en la instalación oscila entre 80-88 dB, lo que provoca afectación al sistema nervioso y el cardiovascular.

Recomendaciones

De todo lo anteriormente expuesto y para que exista una continuidad en esta investigación se recomienda:

- 1.** Realizar la evaluación de la red de distribución, teniendo en cuenta el criterio técnico-económico, lo que garantizará satisfacer la demanda de operación del agua para el proceso productivo.
- 2.** Diseñar un sistema de gestión energética que posibilite disminuir los costos de consumo de la energía eléctrica, a través del aumento de la productividad y la calidad de los servicios.
- 3.** Lograr que se cumplan los ciclos de mantenimiento planificados para evitar el desbalance operacional.

Bibliografía

1. Aguirre, A. Pérez, R. y Martínez, D., (1996). Mecánica de Fluidos, Editorial Universo Sur, Cuba.
2. Aldana A., (2013). Análisis del bombeo para la cola en la 4ta etapa de lavado en la empresa Comandante René Ramos Latour, Nicaro, Cuba.
3. Análisis de la operación del sistema de alimentación de agua a generadores de vapor del CAI "G. Washington" Informe de investigación terminada. UCLV. Santa Clara, 1992
4. Bienvenido, J. (1973). "Modelo de un sistema de bomba, tanque y red". Voluntad Hidráulica, No 28.
5. Consultor de bombas centrífugas. Ed. Continental. Madrid, 1970.
6. Determinación aproximada de las características de funcionamiento de una bomba centrífuga. Centro Azúcar, No. 1, 1994
7. Fernández, H. K. (2003). "Uso del software Epanet 2.0 para el diseño de redes hidráulicas", Universidad de Oriente, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Sgto. de Cuba.
8. Francisco M. W. Y Colaboradores. (2006). Gestión y uso racional del agua. Editorial UNIVERSO SUR. Universidad de Cienfuegos.
9. Garcell, L., (2001). Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas. Apuntes para una monografía.
10. Gil S. (2007). Apuntes sobre la gestión del agua terrestre. Disponible en <http://www/ilustrados.com/publicaciones>.
11. Karassik, I. y Carter, R. (1968). "Bombas centrifugas. Selección, operación y mantenimiento", editorial Revolucionaria. La Habana.

12. Karelin, B. (1987). "Fenómeno de cavitación en bombas centrífugas y axiales".
Construcción de Maquinarias. Moscú.
13. Kasatkin, A. G. (1985). "Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química".
Tomo II, Editorial educación.
14. Kuttz, M. (1995). "Enciclopedia de la Mecánica Ingeniería y Técnica", Vol. 6, ed.
Océano, España.
15. La cavitación y la succión posible de las bombas rotodinámicas. Ed. ISPJAE. La
Habana, 1988.
16. Labarte, L., (2012). Evaluación del flujo tecnológico de agua para la planta de horno
en la empresa Comandante René Ramos Latour, Nicaro, Cuba.
17. Leyva, W.; (2012). Análisis de los parámetros de operación del bombeo para agua
tecnológica en la Empresa Plásticos Cajimaya.
18. Martínez, L.; Monteagudo, J. y Jáuregui, S. (2007). "Mecánica de los Fluidos y
Máquinas de Flujo", Editorial Universo Sur, Universidad de Cienfuegos, Cuba.
19. Mastrapa, M. (2006). "Manual de operaciones de planta tratamiento de agua",
Nicaro, Cuba.
20. Método de recálculo de las características de funcionamiento de las bombas
centrífugas que manipulan soluciones azucaradas. Memorias del VI Encuentro
Nacional de Jefes de Maquinaria. MINAZ. Santa Clara, 1989.
21. Modelo matemático de la operación de bombas centrífugas. Construcción de
Maquinaria, No. 1, 1996.
22. Moring, V., (2006). Termodinámica, Editorial Félix Varela, La Habana, Cuba.
23. Nekrasov, B. (1986). "Hidráulica", editorial PAZ, Moscú.
24. Pares, J.A.: (1987). Mejorar la especificación para compra de bombas centrífugas.
Energética, No. 3.

25. Pedroso, I.; Reyes, T.; Concepción, O. (1989). Programa de computación para pronosticar las curvas características de las bombas centrífugas. Memorias del VI Encuentro Nacional de Jefes de Maquinaria. MINAZ. Santa Clara.
26. Pérez M., (2001). Fernando. Introducción a la Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Editorial "Félix Varela". La Habana.
27. Pérez, F. D. (1986). "Equipos de bombeo", editorial Pueblo y Educación. La Habana.
28. Pérez, R. (2000). "Equipos de bombeo". 3ra Edición, Tercera Reimpresión, editorial Pueblo y Educación, Ciudad de La Habana.
29. Pérez, F, D:(1970). Instalación al estado de los sistemas de tuberías. Centro de investigaciones hidráulicas, Instituto superior José Antonio Echeverría ". Habana Cuba.
30. Rabinóvich, E. Z. (1987). "Hidráulica", editorial MIR, Moscú.
31. Ramos, N. (1989). "Bombas, ventiladores y compresores", editorial ISPJAE. La Habana.
32. Reyes, R. (1992). Sistema automatizado para el dimensionamiento de tuberías. Informe de investigación terminada. UCLV. Santa Clara.
33. Robert, W. and McDonald, A. (1995). "Introducción a la Mecánica de Fluidos", Cuarta Edición, ed. McGraw Hill, Interamericana S. A., USA.
34. Roberto L. (2008). Levantamiento sobre el metrado del consumo de portadores energéticos INEL.
35. Rodríguez L. E (2011). Evaluación del sistema de abasto en la central termoeléctrica Lidio Ramón Pérez para un uso eficiente del agua, Felton, Cuba.
36. Sánchez, G. (2002). "Estudio de fluidos no newtonianos con los métodos de volúmenes y elementos finitos". Revista de la Facultad de Ingeniería de Chile, Chile.

37. Sánchez, J.L.; Fuentes, O.; Gracia, J. (1994). Modelo de simulador de sistemas de drenaje operados por bombeo. Ingeniería del Agua 1.
38. Santiesteban, D. (1995). Optimización operacional de sistemas de bombeo. Trabajo de diploma. Tutores: Rosina Hing Cortón e Iván Turiño Hurtado. Publicación Universitaria, UCLV. Santa Clara, Cuba.
39. Santos, F. y Martín, M. (1999). "Modelos matemáticos para la determinación aproximada de la forma de la característica de trabajo de una bomba centrífuga"; Centro azúcar, N 1.
40. Sihi Halberg m.i.b.s.a. (1995). Bombas para fluidos. Ed. Gráficos Orión. Madrid.
41. Streeter, V.; Benjamin, E. y Bedford, K. (2000). "Mecánica de Fluidos", Novena Edición. McGraw-Hill. Best Seller International, S.A., Santa Fé de Bogotá, Colombia.
42. Teoría de los modelos en ingeniería de los procesos. Ed. Oriente. Santiago de Cuba, 1988.
43. Terry C.C., Gutiérrez J: B: Y Abo M. (2007). Manejo de aguas residuales en a la gestión ambiental CIGEA. Ciudad de la Habana.
44. Turiño, I. M. (1994). "Determinación aproximada de la característica de funcionamiento de una bomba centrífuga". Centro azúcar, No.1.
45. Turro, B. A. (2002). "Estudio del Hidrotransporte de las Colas en el Proceso Carbonato Amoniaco", Tesis en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. ISMM, Moa.
46. Velarde, S.; Huelsz, G.; Santolaria, C. (1993). Diagnóstico del funcionamiento anormal de una bomba centrífuga. Memorias del 1er. Congreso Iberoamericano de Ingeniería mecánica. Madrid.

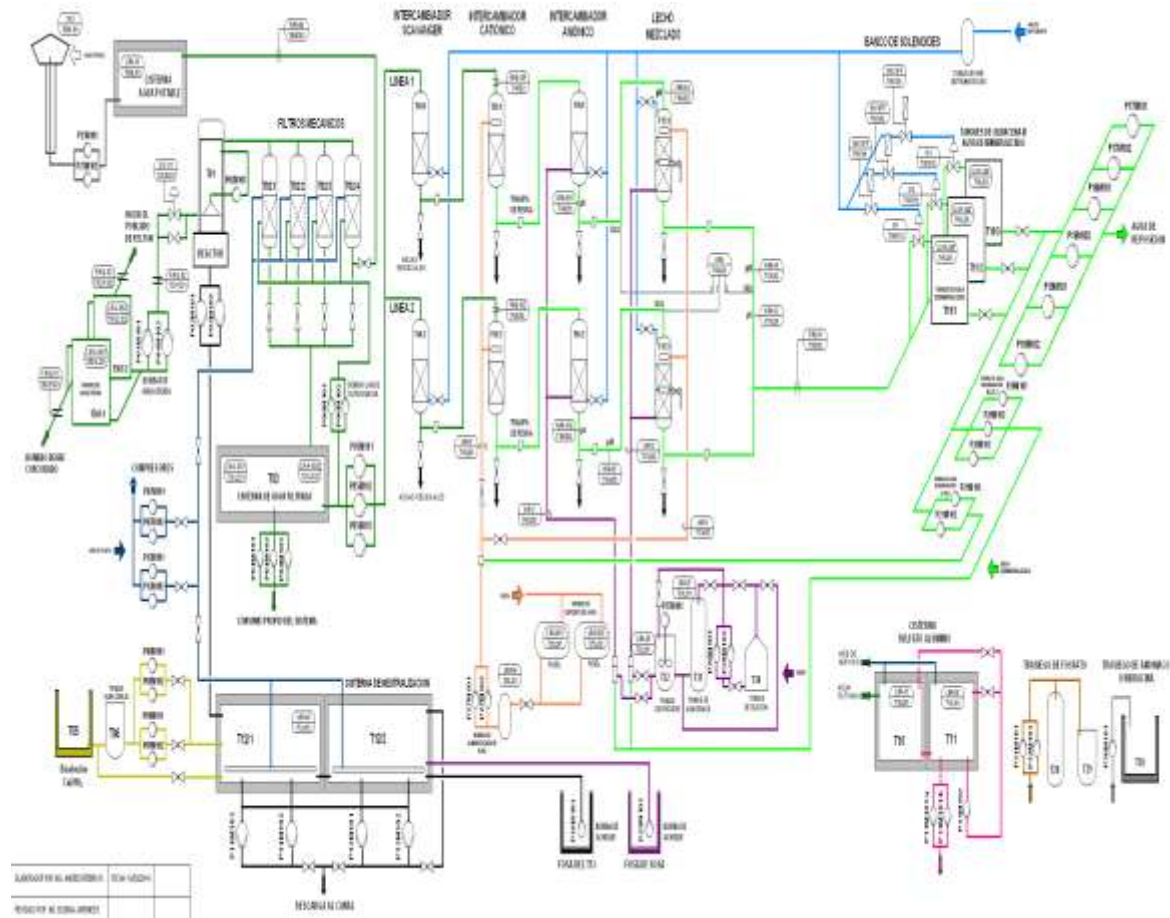
47. Vennard, J.K.; Street, R.L. (1986). Elementos de mecánica de los fluidos. Ed. Revolucionaria. La Habana.
48. Viera, R.; López, S.; Noemí, M. (1988). Modelación matemática para ingenieros químicos. Ed. Pueblo y Educación. La Habana.
49. Walton, T.A. (1986). PC Program helps monitor efficiency by describing pumps, compressor impeller curves. Oil & Gas Journal, vol. 84, No. 35.
50. Warring, P.H.: Selección de bombas, sistemas y aplicaciones. Ed. Labor S.A. Madrid.

Anexos

Anexo # 1 Bomba centrífuga AMIN 150-125-315



Anexo # 2 Esquema de la planta de tratamiento químico de agua en la empresa Lidio Ramón Pérez.



Anexo # 3 Instrumentos de medición

Cinta métrica



Sonómetro



Vibrómetro



Manómetro



Flujómetro



Calibre para mediciones

