

REPÚBLICA DE CUBA.
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR.
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS.
FACULTAD DE INGENIERÍA



TRABAJO DE DIPLOMA

TÍTULO:

Diseño de un sistema de bombeo para el laboratorio de flujometría de Refinería Cienfuegos SA.

AUTOR: José Danilo Gala Olivera

Tutores:

MS.c: Reinier Jiménez Borges

Ing.: Alejandro Elías Suárez

AÑO 64 DE LA REVOLUCIÓN.

Cienfuegos, 2022

Declaración de autoridad



UNIVERSIDAD
DE CIENFUEGOS
CARLOS RAFAEL RODRÍGUEZ

Facultad de Ingeniería

Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Refinería Cienfuegos S.A., como parte de la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica; autorizando para que el mismo sea utilizado para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total, además no podrá ser presentado en eventos ni publicado sin la aprobación de la Universidad de Cienfuegos.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certifican que el presente trabajo ha sido revisado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esa envergadura, referido a la temática señalada.

Información Científico Técnico
Nombre y Apellidos. Firma.

Firma del Vice Decano.

DEDICATORIA

A Dios, por todo lo que soy, por lo que he logrado, por como he mejorado y por lo que puedo aportar para el bien de mi país.

A mi esposa que tanto amo y a mis tres hijos, por la paciencia y el apoyo en estos años de estudio. A ellos los amo y fueron, son y serán, el motor impulsor de todos mis proyectos.

A mis padres, a ellos que tanto les hubiera gustado verme graduado.

A la familia Fraga, son amigos excelentes, siempre me alentaron.

A Gregorio Duarte Duarte, por enseñarme el camino.

A mis amigos todos, estén donde estén.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme lo necesario para aprender y aprobar todas las materias de las diferentes ramas de la ingeniería mecánica.

A mis tutores Reinier Jiménez Borges y Alejandro Elías Suárez, por su ayuda valiosísima en el desarrollo de este trabajo.

A todos los excelentes profesores de la universidad, por su tiempo y por todo el empeño puesto en lograr hacernos ingenieros.

A todos los que de una forma u otra contribuyeron a la realización de este proyecto.

Gracias a todos.

RESUMEN

El laboratorio de Refinería Cienfuegos S.A. no tiene incorporado un sistema de bombeo que garantice el caudal necesario en la calibración y certificación de los instrumentos que se utilizan para la medición y facturación de los productos que se comercializan. Por esta razón se conectó al sistema de bombeo de agua contra incendios y la descarga a una canal pluvial que vierte en la bahía. Esta situación genera cuantiosas pérdidas económicas, vulnera la seguridad de la planta y atenta contra el medio ambiente. Con la finalidad de resolver esta situación se realizó un estudio sobre temas relacionados a nivel mundial, se analizó la potencialidad del local y de los materiales existentes, se diseñó el sistema de tubería, se determinó la carga del sistema y se seleccionó el equipo de bombeo. Como resultado se logró un sistema de bombeo que recircula el agua entre dos tanques de 24 m³, con una bomba de 24.1 kW, un variador de frecuencia de 30.0 kW, y un sistema capaz de interconectar 12 caudalímetros, con el empleo 100% de la grúa monorraíl del taller, sin que esto afecte la dinámica de trabajo y con un mínimo de esfuerzo de los operarios. La implementación de este proyecto significa un ahorro de 31,827.00 CUP en 12 h, haciendo posible recuperar la inversión en 4 días de trabajo.

Palabras Claves:

Caudalímetros másicos tipo Coriolis, calibración, eficiencia, agua.

SUMMARY

The Cienfuegos S.A. Refinery laboratory It does not have a built-in pumping system that guarantees the necessary flow in the calibration and certification of the instruments used for the measurement and billing of the products that are marketed. For this reason, it was connected to the fire-fighting water pumping system and discharged to a storm channel that empties into the bay. This situation generates large economic losses, violates the safety of the plant and threatens the environment. In order to resolve this situation, a study was carried out on related issues worldwide, the potential of the premises and the existing materials were analyzed, the piping system was finished, the system load was finished and the pumping equipment was selected. As a result, a pumping system was made that recirculates the water between two 24 m³ tanks, with a 24.1 kW pump, a 30.0 kW frequency inverter, and a system capable of interconnecting 12 flowmeters, using 100% of the monorail crane in the workshop, without affecting the work dynamics and with minimal effort from the operators. The implementation of this project means a saving of 31,827.00 CUP in 12 hours, making it possible to recover the investment in 4 working days.

Key words:

Coriolis type mass flowmeters, calibration, efficiency, water.

INDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE SOBRE LOS CAUDALÍMETROS MÁSICOS, SISTEMAS DE BOMBEO Y EL IMPACTO DE UN MAL USO DEL AGUA. 3

Introducción del capítulo.	3
1.1. Generalidades sobre los caudalímetros másicos de tipo Coriolis, principio de funcionamiento y sus principales usos.	3
1.1.1. El principio de funcionamiento de los caudalímetros de tipo Coriolis:	3
1.1.2. Caudalímetros utilizados para el trasiego de productos en Refinería Cienfuegos. S.A.....	4
1.2. Equipos de bombeo. Eficiencia.	6
1.3. Clasificación de las bombas.	7
1.4. Bombas centrífugas.	8
1.4.1. Partes y componentes básicos de una bomba centrífuga.....	8
1.4.2. Elementos y funciones de una bomba centrífuga:	8
1.5. Eficiencia en los sistemas de bombeo.....	10
1.5.1. Estudios y recomendaciones para el análisis del conjunto sistema de tuberías-equipos de bombeo.....	11
1.5.2. Problemas que suelen presentarse en el manejo de fluidos.	12
1.5.3. Métodos de regulación de flujo y eficiencia.	12
1.5.4. Recomendaciones para aumentar la eficiencia en sistemas de bombeo.	14
1.5.5. Reducción del consumo de energía en equipos de bombeo. Uso de la regulación para reducir consumo.	15
1.6. La cavitación en los sistemas de bombeo.	17
1.6.1. La relación entre el NPSH y la cavitación.	17
1.7. Pérdidas por aumento de la fricción en tuberías.....	18
1.8. Sistema de bombeo asociado al laboratorio de flujometría de Refinería Cienfuegos S.A.	21
1.9. Situación del agua a nivel global.	21
1.9.1. Hacia el uso sostenible del agua en Cuba.....	22
1.10. Operación actual en la refinería de petróleo “Camilo Cienfuegos” para la calibración de los caudalímetros másicos tipo Coriolis.....	23
1.11. Conclusiones parciales.	24

CAPÍTULO 2. MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CARGA DEL SISTEMA, SELECCIÓN DE LA BOMBA Y DETERMINACIÓN DEL NPSHD. 25

Introducción del capítulo	25
2.1. Descripción del laboratorio de flujometría en Refinería Cienfuegos.....	25

2.2. Requerimientos del sistema.	27
2.3. Dimensionamiento del sistema de tuberías.	27
2.4. Propuesta para el diseño del laboratorio de flujometría.	30
2.5. Calculo de la carga del sistema, Hb.	31
2.5.1 Características del sistema.	32
2.5.2 Determinación de la carga del sistema. Sistema de Clase I.	34
2.5.2.1 Ecuación de Bernoulli para el sistema.	34
2.5.2.2 Determinación de las pérdidas del sistema.	35
2.5.2.3 Determinación de la velocidad y las áreas de conducción para los diferentes diámetros de las tuberías.	35
2.5.2.4 Determinación del número de Reynolds (NR).	36
2.5.2.5 Determinación del factor de fricción.	38
2.5.2.6 Cálculo de las pérdidas de entrada (h1).	39
2.5.2.7 Determinación de las pérdidas de fricción en los tramos rectos.	40
2.5.2.8 Determinación de las pérdidas de energía en válvulas.	41
2.5.2.9 Determinación de las pérdidas de energía en los codos.	42
2.5.2.10 Cálculo de la pérdida de energía en la Te de la línea de la succión y descarga.	43
2.5.2.11 Determinación de las pérdidas de energía en los cambios de diámetros.	44
2.5.2.12 Cálculo de las pérdidas de salida (h11).	45
2.5.2.13 Pérdidas de energía totales del sistema.	46
2.5.2.14 Determinación de la carga total de la bomba.	46
2.5.2.15 Selección del equipo de bombeo.	47
2.5.2.16 Determinación de la altura neta positiva en la succión (NPSHd).	49
2.6. Conclusiones Parciales.	50
CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL, DE SEGURIDAD Y ECONÓMICA DE LA PROPUESTA PARA EL REDISEÑO DEL LABORATORIO DE FLUJOMETRÍA EN REFINERÍA CIENFUEGOS.	52
Introducción al capítulo.	52
3.1. Características del sistema de agua contra incendios.	52
3.2. Operaciones en el sistema de bombeo de Refinería Cienfuegos S.A. para la realización de los trabajos de calibración y certificación de los caudalímetros másicos del tipo Coriolis.	53
3.3. Beneficios para la empresa del diseño del laboratorio de flujometría.	56
3.4. Evaluación del empleo de un variador de frecuencia para la regulación del caudal.	58
3.4.1. Selección del variador de frecuencia.	59

3.4.2. Comparación de los gastos de energía eléctrica en el sistema de bombeo con el uso del variador y por el método de estrangulación.	61
3.5. Destino final del agua que se utiliza en el proceso de calibración, una vez terminado.....	67
3.6. Evaluación de gastos por consumo eléctrico del sistema de bombeo propuesto con relación al sistema actual de bombeo.....	67
3.7. Factibilidad económica del diseño del laboratorio de flujometría propuesto. ..	70
3.8. Conclusiones parciales	70
Conclusiones.....	72
Recomendaciones.....	73
Bibliografía	74
Anexos	76

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Principio de Coriolis para Caudalímetros de flujo. ("Caudalímetros Másicos Coriolis," 2014).....	4
Figura 1.2. A Caudalímetro Promass 84F de la firma Endress & Hauser (Endress y Hauser, S.A., 2022), B Caudalímetro Rotomass RCCT-39 de la firma Yokogawa.....	5
Figura 1.3. Clasificación de los tipos de bombas.....	7
Figura 1.4. Posición de elementos básicos de una bomba centrífuga (Borrero Restrepo & Gil León, 1995).....	8
Figura 1.5 Variaciones en el punto de operación utilizando variadores de frecuencia y estrangulamiento(Suárez, 2019).....	12
Figura 1.6 NPSH disponible y requerido para un conjunto bomba-sistema de tuberías. (Elaboración propia).....	18
Figura 2.1 Vista general del taller de válvulas (Elaboración propia).....	26
Figura 2.2 Conexión de la unidad móvil a la línea de entrada. (Elaboración propia).	27
Figura 2.3 Sistema de bombeo del laboratorio de flujometría (Elaboración propia) .	30
Figura 2.4 Válvula para la selección del tanque de trabajo. (Elaboración propia)	31
Figura 2.5 Vista superior de la estación de calibración (Elaboración propia) .	31
Figura 2.6 Condición de funcionamiento seleccionada para los cálculos de la carga de la bomba (Elaboración propia).....	32
Figura 2.8 Determinación del factor de fricción. Diagrama de Moody (Robert L. Mott, 2015).....	39
Figura 2.9 Coeficientes de resistencia de entrada (Robert L. Mott, 2015)	40
.....	44
Figura 2.10 Coeficiente de resistencia de contracción gradual $\Phi \geq 15^\circ$ (Robert L. Mott, 2015).....	45
Figura 2.11 Coeficiente de resistencia ampliación gradual (Robert L. Mott, 2015)...	45
Figura 2.12 Perdida de salida cuando fluido fluye de una tubería a un depósito estático (Robert L. Mott, 2015).....	46
Figura 2.13 Gráfico de la curva del sistema (Elaboración propia).....	47
Figura 2.14 Gráfico de características constructivas de bombas KSB a $n = 2900$ rpm (KSB SE & Co. KGaA, 2018).....	48
Figura 2.15 Características de trabajo de las bombas 100-065-200 (KSB SE & Co. KGaA, 2018)	48
Figura 2.16 Características de trabajo de las bombas 100-065-200 (KSB SE & Co. KGaA, 2018)	48
Figura 3.1 Monitor para la visualización de los parámetros del sistema (Elaboración propia).....	54
Figura 3.2 Características gráficas de la bomba D-1250-125 (Добро пожаловать на официальный сайт УПК Фарватер, s.f.).....	55

Figura 3.3 Tanques para la recirculación del agua del laboratorio de flujometría. Elaboración propia.	57
Figura 3.4 bomba MegaCPK 100-065-200	58
Figura 3.5 Variador de frecuencia ST500. (SOURCETRONIC, 2022)	60
Figura 3.6 Comportamiento de la curva del sistema con el uso del método de estrangulamiento.....	64
Figura 3.7 Comportamiento de la curva del sistema con el uso de un variador de frecuencia.	66
Figura 3.8 Rendimiento de los motores eléctricos en dependencia del nivel de carga. (ElectroIndustria, 2022).	69

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Oportunidades de ahorro en sistemas existentes. (Hydraulic Institute, 2006)	16
Tabla 2.2 Determinación de las velocidades para distintos diámetros de tuberías a 120 m ³ /h (Elaboración propia).....	28
Tabla 2.3 Velocidad máxima aceptable en tuberías de succión (EMCALI, 2013). ..	29
Tabla 2.4 Velocidad máxima aceptada en tuberías (Robert L. Mott, 2015).	29
Tabla 2.5 Elementos que conforman la base de los cálculos.	33
Tabla 2.7 Determinación de la velocidad (a una tasa 120 m ³ /h) y las áreas de conducción para los distintos diámetros de tuberías (Elaboración propia).....	36
Tabla 2.8 Conversión del caudal m ³ /h a m ³ /s (Elaboración propia).....	36
Tabla 2.9 Determinación del número de Reynolds para todos los diámetros de tuberías de la red.	37
Tabla 2.10 Rugosidades de tuberías – Valores de diseño (Robert L. Mott, 2015)....	38
Tabla 2.11 Determinación de la rugosidad relativa. (Elaboración propia).....	38
Tabla 2.12 factor de fricción para cada diámetro de tubería del sistema (Elaboración propia).....	39
Tabla 2.13 Pérdidas de fricción en tramos rectos en la línea descarga.....	40
Tabla 2.14 Resistencia equivalente de válvulas y accesorios. (Robert L. Mott, 2015).	41
Tabla 2.15 Factor de fricción en la zona de turbulencia completa para tuberías de acero comercial. (Robert L. Mott, 2015).	42
Tabla 2.16 Cálculos de las pérdidas de energía en las válvulas de la descarga.....	42
Tabla 2.17 Cálculos de las pérdidas de energía en los codos de la descarga	43
Tabla 2.18 Cálculos de las pérdidas de energía en las Tes de la línea de la descarga	43
Tabla 2.19 Cálculo de las pérdidas de energía en los cambios de diámetros en la línea de descarga.....	44
Tabla 2.20 Curva de la carga del sistema (Elaboración propia).....	47
Tabla 2.21 Características de funcionamiento de la bomba MegaCPK 100-065-200 (KSB SE & Co. KGaA, 2018).....	49
Tabla 3.1 Características técnicas del variador de frecuencia ST500 (SOURCETRONIC, 2022)	60
Tabla 3.2 Leyenda de las tablas 3.4, 3.5 y las figuras 3.7 y 3.8.....	61
Tabla 3.3 Valores de eficiencia y potencia para los diferentes regímenes de carga de la bomba.	61
Tabla 3.4 Importe eléctrico en 12 horas para los cuatro modos de operación por estrangulamiento. Elaboración propia.	62
Tabla 3.5 A-1. Tarifa de alta tensión con actividad continúa.....	63

Tabla 3.6 Comportamiento de la potencia consumida por la bomba para diferentes frecuencias de rotación.	64
Tabla 3.7 Importe eléctrico en 12 horas para los cuatro modos de operación con el uso de un variador de frecuencia. Elaboración propia.	65
Tabla 3.8 Analisis de factibilidad del empleo del veriador.	65
Tabla 3.9 Parámetros del motor eléctrico.....	68
Tabla 3.10 Consumo eléctrico de los sistemas de bombeo. Elaboración propia.	69

INTRODUCCIÓN

La medición y el control de flujos son requerimientos indispensables para obtener los mejores resultados posibles en la utilización de recursos, calidad del producto, rentabilidad, protección medio ambiental y seguridad de una unidad productiva.

Alguna de las razones más importantes para calibrar los instrumentos de medición en las industrias es, mantener y verificar el buen funcionamiento de los equipos; responder a los requisitos establecidos en las normas de calidad y garantizar la fiabilidad y trazabilidad de las medidas.

Para optimizar el funcionamiento de la planta se utilizan varias herramientas de control automático, entre estas se destaca el caudalímetro másico de tipo Coriolis.

Estos se colocan en lugares donde es necesario controlar temperatura, densidad y caudal másico. Como los procesos de la refinería están automatizados, un error en la medición podría traer grandes problemas a la planta en general. Que estos equipos reflejen un valor confiable da seguridad en el proceso, esto obliga a que sean sometidos a ciclos de revisión. Estos ciclos consisten en utilizar un caudalímetro certificado como patrón y comprobar que no exista un desfase en las mediciones y en el caso contrario, corregir las mismas.

Estas pruebas se realizaban en campo ya que el equipo de calibrar tiene como base un remolque. Actualmente se llevan los equipos hasta el patrón evitando que el mismo pueda ser afectado por vibraciones en la carretera o rotura de alguno de sus componentes a la hora de ser emplazado y se utiliza como fluido de muestra el agua del sistema contra incendios de la planta.

Del sistema contra incendio se extrae para la calibración un caudal de hasta 120 m³/h, con regulación por el método de estrangulación, pasando por dos flujómetros patrones de 0.100 m y 0.150 m de diámetro en paralelos entre ellos y en series cada uno de ellos con líneas donde se conectan los instrumentos a calibrar. Para lograr esta tasa, se emplean equipos de bombeo que van desde los 74 kW a los 630 kW de potencia eléctrica, además todo este volumen de agua se vierte al sistema de canales pluvial, liberándose en la bahía y provocando pérdidas económicas al derrocharse tan necesario recurso.

Problema

El laboratorio de flujometría no cuenta con un sistema de bombeo con recirculación del agua para las calibraciones, por esta razón se utiliza el sistema de bombeo de agua contra incendios, conllevando al aumento de las pérdidas y gastos de la fábrica.

Hipótesis

Es posible a partir del diseño de un sistema de bombeo con recirculación de agua, calibrar los instrumentos de medición, prescindir del sistema de bombeo de agua contra incendio y eliminar el vertimiento del agua en la bahía.

Objetivo general

Diseñar un sistema de bombeo con recirculación para el laboratorio de calibración y certificación de flujómetros máxicos.

Objetivos específicos

1. Analizar estudios y experiencias relacionados con los caudalímetros, máquinas de flujo y el impacto de un uso ineficiente del agua.
2. Evaluar las condiciones actuales en el taller de calibración que permitan detectar facilidades para utilizarlas en el nuevo diseño.
3. Diseñar un sistema de recirculación de agua, partiendo de los recursos identificados.
4. Evaluar la factibilidad económica de la nueva propuesta.

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE SOBRE LOS CAUDALÍMETROS MÁSICOS, SISTEMAS DE BOMBEO Y EL IMPACTO DE UN MAL USO DEL AGUA.

Introducción del capítulo.

En este capítulo se analiza el funcionamiento de los caudalímetros másicos de tipo Coriolis y sus principales usos en la industria. Sobre las máquinas de flujo, se estudia sus principales características y la selección del tipo de bomba según las demandas del sistema. Finalmente se aborda el tema del impacto de un mal uso del agua y la necesidad de ahorrar este recurso.

1.1. Generalidades sobre los caudalímetros másicos de tipo Coriolis, principio de funcionamiento y sus principales usos.

El principio de medición Coriolis se utiliza en un amplio rango de distintas ramas de la industria, como las ciencias de la vida, los productos químicos y petroquímicos, la alimentación, y, no menos importante, en aplicaciones de transferencias fiscal (facturación). Un caudalímetro másico Coriolis pueden medir prácticamente todos los fluidos: detergentes, disolventes, combustibles, petróleo crudo, aceites vegetales, grasas animales, látex, aceites de silicona, alcohol, soluciones de fruta, pasta de dientes, vinagre, ketchup, mayonesa, gases o gases licuados.

1.1.1.El principio de funcionamiento de los caudalímetros de tipo Coriolis:

Cuando a través de una tubería vibrante fluye un flujo másico, se producen fuerzas de Coriolis que deforman la tubería. Estas deformaciones muy pequeñas de la tubería de medida se registran y evalúan por sensores óptimamente dispuestos. Como el desplazamiento de fase de las señales del sensor es proporcional al caudal, el caudalímetro másico Coriolis puede medir directamente el caudal másico transportado a través de la tubería.

Este principio de medida funciona independientemente de la densidad, temperatura, viscosidad, presión y conductividad. Las tuberías vibran siempre en resonancia. Esta frecuencia de resonancia depende de la forma geométrica de la tubería, las propiedades del material y de la masa del fluido vibrante. Así se obtiene una

información exacta sobre la densidad del fluido a medir, además el equipo tiene incorporado un sensor de temperatura que sirve para corregir los parámetros dependientes de la temperatura.

Resumiendo, puede decirse que el caudalímetro másico Coriolis permite medir al mismo tiempo el caudal másico, densidad y temperatura. Partiendo de estos valores se pueden calcular otras magnitudes de medida como el flujo volumétrico o la concentración ("Caudalímetros Másicos Coriolis," 2014).

La figura 1.1 muestra las distintas combinaciones posibles de los caudalímetros que funcionan por el principio de Coriolis.

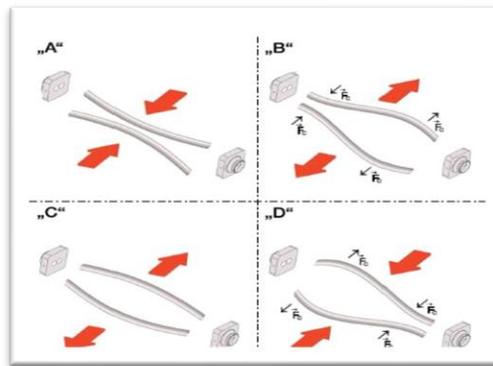


Figura 1.1 Principio de Coriolis para Caudalímetros de flujo. ("Caudalímetros Másicos Coriolis," 2014)

La magnitud de la fuerza de Coriolis, se determina mediante la E.c. 1.1.

$$F_c = -2m(\bar{\omega} \times \bar{V}) \quad \text{ec. 1.1}$$

Donde:

F_c , fuerza de Coriolis, (N).

m , masa del fluido, (kg).

$\bar{\omega}$, velocidad angular, rad/s.

\bar{V} , velocidad de la masa, (m/s).

1.1.2. Caudalímetros utilizados para el trasiego de productos en Refinería Cienfuegos. S.A.

En la Refinería Cienfuegos S.A. se utilizan dos tipos de flujómetros másicos para el despacho de combustible, estos son: los Promass 84F de la firma Endress & Hauser y los Rotomass RCCT-39 de la firma Yokohama (Figura 1.2). Ambos están basados

en el principio de medición Coriolis y presentan formas muy similares de procesar, presentar y transmitir la información.

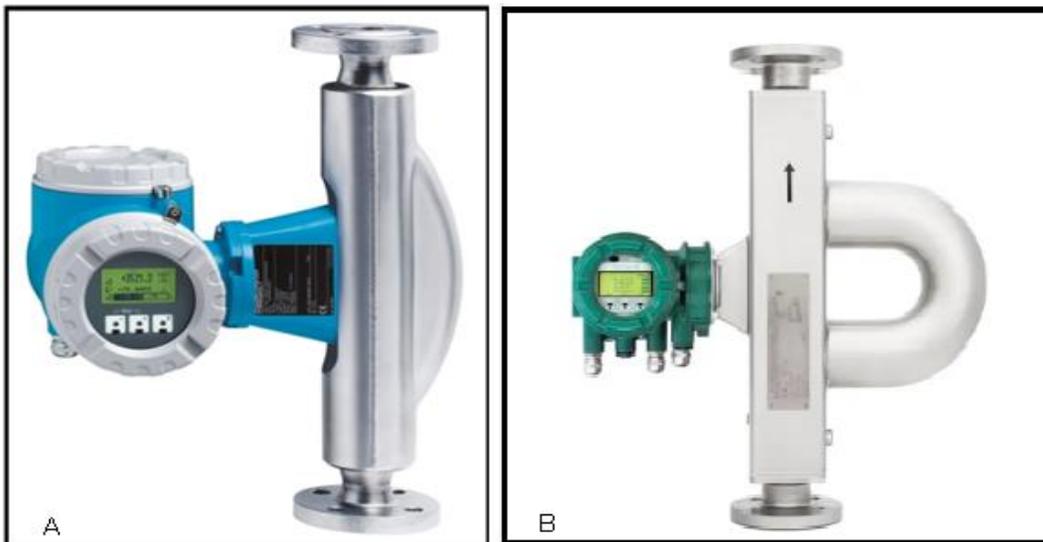


Figura 1.2. A Caudalímetro Promass 84F de la firma Endress & Hauser (Endress y Hauser, S.A., 2022), B Caudalímetro Rotomass RCCT-39 de la firma Yokogawa (YOKOGAWA Europe, 2022).

Características de los caudalímetros Promass 84F.

El principio de medición funciona con independencia de las propiedades físicas del fluido tales como la viscosidad o la densidad, otorgando un máximo rendimiento en mediciones para líquidos y gases en condiciones de proceso cambiantes y exigentes, especialmente para los proyectos que necesiten medición de transferencias fiscal (facturación), presentando homologaciones metrológicas reconocidas a escala mundial. Además, su medición multivariable (caudal, densidad, temperatura), reduce la cantidad de puntos de medida. Su precisión es $\pm 0,05\%$ y el contenedor secundario soporta hasta 40 bar (580 psi). (Endress y Hauser, S.A., 2022).

Características de los caudalímetros Rotomass RCCT-39.

El medidor de flujo másico Rotomass, también certificado para transferencias fiscal de líquidos, está disponible en sistema integral y remoto. Ambos tipos tienen electrónica con procesamiento digital de señales de alta tecnología, de modo que la medición de flujo másico es de alta precisión, y para caso de mediciones de líquido, el medidor también hace la lectura de la densidad y cálculo de concentración.

Además, tiene un sensor de temperatura acoplado para el monitoreo del proceso y compensación de dilatación de tubería, garantizando su excelente precisión.

El medidor Rotomass emplea un conversor del tipo a prueba de llamas adecuado para uso en el área de riesgo en conjunto con electrónica intrínsecamente segura. Es un medidor altamente robusto y confiable, con estructura de refuerzo en las tuberías para evitar daños por cargas externas e interferencias por vibraciones aumentando el rendimiento del medidor y garantizando su uso en aplicaciones y ambientes severos. Pudiendo ser utilizado en flujos de 0.04 t/h hasta 600 t/h, temperatura desde -200°C hasta 350°C, tipo de comunicación disponible HART, MODBUS y FIELDBUS, tiene precisión del 0.1% para líquidos y 0.5% para gases. (YOKOGAWA Europe, 2022)

1.2. Equipos de bombeo. Eficiencia.

Un equipo de bombeo es un transformador de energía. Este recibe energía mecánica que puede proceder de un motor eléctrico, térmico, etc., y la convierte en energía que un fluido adquiere en forma de presión, de posición o de velocidad.

Los equipos de bombeo generalmente se utilizan para cambiar la posición de un cierto fluido. Un ejemplo lo constituye una bomba de pozo profundo, que adiciona energía para que el agua del subsuelo salga a la superficie.

Un ejemplo de bomba que adicionan energía de presión sería una bomba de un oleoducto, en donde las cotas de altura, así como los diámetros de tuberías y consecuentemente las velocidades fuesen iguales, en tanto que la presión es incrementada para poder vencer las pérdidas por fricción que se tuviesen en la conducción. (Zubicaray, 2003)

La eficiencia energética para equipos de bombeo, estaría en lograr aumentar el paso del fluido en un tiempo determinado, con el menor consumo de energía y esto se logra encontrando el punto de mayor desempeño (BEP). El desempeño óptimo del conjunto Sistema – Bomba se obtiene superponiendo la curva de operación del sistema sobre la curva de desempeño de la bomba. (Bachus, 2003). El punto de mayor desempeño es el indicador principal del uso eficiente de la bomba; el BEP es

la condición donde el fluido puede transitar por la bomba sin ningún problema de perturbación, generando así que la bomba tenga mínimas pérdidas del fluido y de desgaste mecánico de sus partes.

1.3. Clasificación de las bombas.

Las bombas se clasifican en dos grandes grupos: Bombas de desplazamiento positivo y Bombas cinéticas o centrífugas (figura 1.3).

Las bombas de desplazamiento positivo suministran energía a un volumen determinado por cada ciclo de operación (Girdhar, 2005), por lo que su uso más común es, cuando se necesita bombear líquidos viscosos, bombear líquidos dosificados (por ejemplo, en industrias químicas o farmacéuticas) y/o bombear fluidos de alta y baja presión (Bachus, 2003).

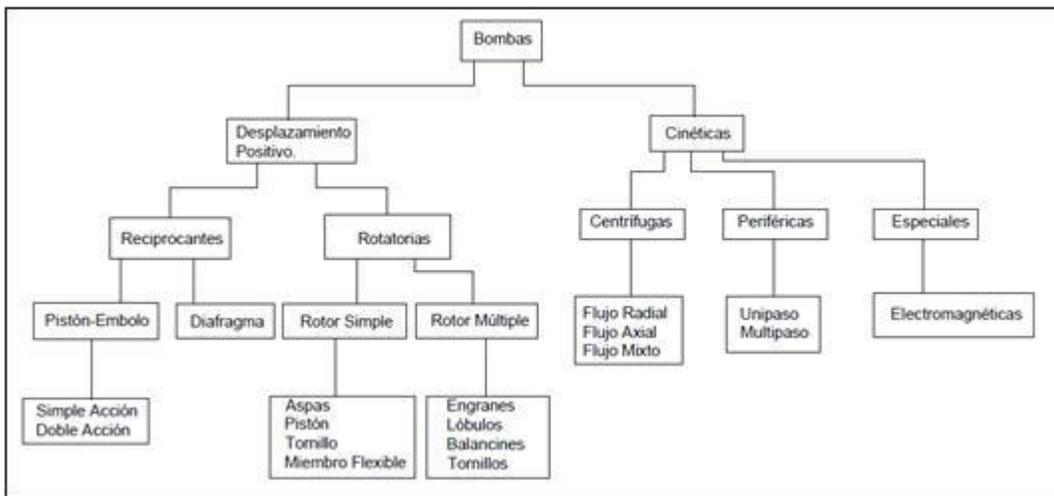


Figura 1.3. Clasificación de los tipos de bombas. Elaboración propia.

Las bombas cinéticas se caracterizan por generar un aumento de la presión del fluido a bombear gracias a su componente dinámico principal (el impelente) y su componente estático principal (la voluta) convirtiendo la energía cinética en energía de fluido (Girdhar, 2005), también conocidas con el nombre de roto-dinámicas se dividen en: bombas centrífugas, bombas regenerativas y bombas de efectos especiales. Estas a su vez se subdividen en otras categorías las cuales se pueden observar en figura 1.3. (Volk, 2005).

1.4. Bombas centrífugas.

Las bombas centrífugas se pueden definir como un conjunto de elementos mecánicos donde un fluido ingresa por el eje y sale siguiendo una trayectoria periférica por la tangente. Las bombas centrífugas, aunque no son el único tipo de bomba que es posible encontrar, se estima que el 90 % de las bombas instaladas en una industria son de este tipo.(Bachus, 2003).

1.4.1.Partes y componentes básicos de una bomba centrífuga.

Las partes fundamentales de una bomba en forma general, se pueden observar en la Figura 1.4.

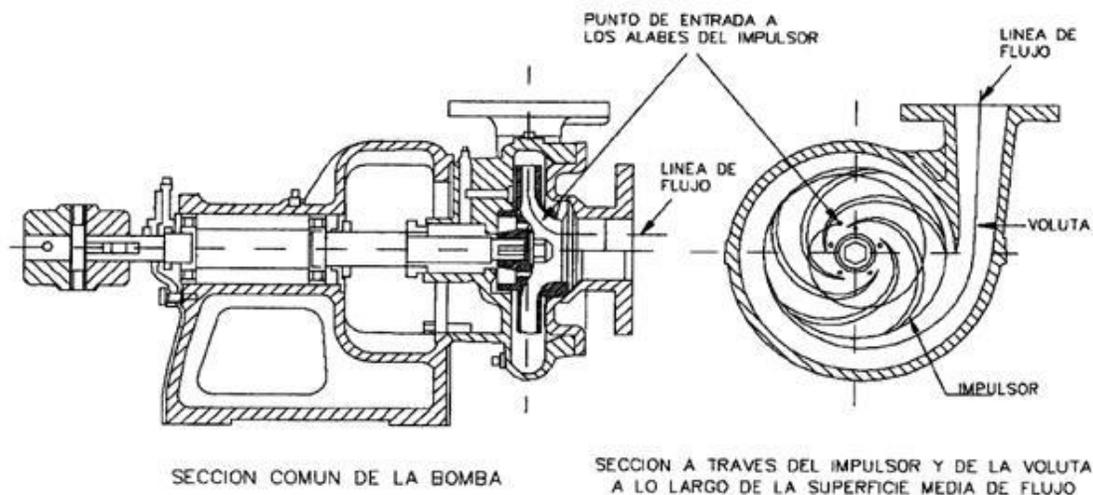


Figura1.4. Posición de elementos básicos de una bomba centrífuga (Borrero Restrepo & Gil León, 1995)

1.4.2.Elementos y funciones de una bomba centrífuga:

Dentro de las partes fundamentales de las bombas se identifican las siguientes.

Impulsor o Rodete. Es el elemento de la bomba encargado de suministrar la energía al flujo a bombear.(Borrero Restrepo & Gil León, 1995)

En su diseño se involucra primordialmente el líquido a manejar, según características de viscosidad, densidad, contenido o no de sólidos etc.

Su clasificación se hace según los siguientes criterios en orden de importancia:

Diseño Mecánico: Abiertos, semi abiertos y cerrados.

Tipo de Succión: única (el flujo entra por un lado solamente) o de doble succión (con dos bocas de succión en un solo rotor).

Configuración y forma de álabes:

- a. Impulsor de álabes rectos: Las superficies de los álabes se generan por líneas rectas paralelas al eje de rotación.
- b. Impulsor de álabes tipo Francis: Tienen una curvatura. Son tipos con velocidades específicas menores.
- c. Impulsor tipo mixto: Un impulsor que genera en el fluido una componente de flujo axial como otra de flujo radial (cuando la radial es pequeña se llama hélice).
- d. Impulsor de flujo axial: El flujo es estrictamente axial al eje de rotación, se mueve paralelo a este.

Carcaza. Carcaza o caja espiral se puede considerar como un canal o elemento directriz único que circunda todo el rodete. Se encarga de convertir parte de la energía de velocidad en energía de presión o una mezcla de ambas.

Su forma interna conocida como voluta está diseñada como un colector, el cual tiene una expansión progresiva, de tal manera que recibe el líquido o fluido del impulsor y lo pasa a la tubería de descarga, en esto la espiral corresponde sólo a la sección abierta del canal y en donde la tubuladuras cónica empalmada a la misma representa el canal difusor propiamente dicho. De esta forma se logra producir una velocidad igual en el líquido alrededor del impulsor de la bomba. El papel de la voluta es reducir al mínimo las pérdidas, ayudando de esta forma a transformar la energía dinámica que da al rodete en energía de presión.

Difusor. Es un sistema de canales dispuestos anularmente, que se ensanchan poco a poco (difusor de aletas); mediante una cámara anular lisa sin aletas (difusor de anillo), y finalmente con una caja espiral, que casi siempre está empalmada a una tubuladuras cónica para transformar la energía de velocidad del líquido a energía de presión. Sirve además como guía del líquido a la salida del impulsor y ayuda al balanceo hidráulico de la carga radial del rotor.

Generalmente son utilizadas en bombas centrífuga de flujo radial, mixto y en bombas de una y varias etapas.

1.5. Eficiencia en los sistemas de bombeo.

El diseño de un sistema de bombeo eficiente depende de la relación entre el caudal del fluido, el trazado de la tubería, la metodología de control y la selección de la bomba. El desempeño del conjunto Sistema de tuberías – Equipo de bombeo se obtiene superponiendo la curva de operación del sistema sobre la curva de desempeño de la bomba (Bachus, 2003).

El rendimiento total de una bomba centrífuga es definido por el caudal (Q), la carga (H) y la eficiencia (η). La curva característica de la bomba, identifica el comportamiento de esta en función del caudal, es recomendable el uso de la misma para identificar el punto donde la carga, el caudal entregado y la potencia consumida genera la mayor eficiencia que la bomba pueda entregar (Gülich, 2008). Uno de los inconvenientes ocurridos en la industria es que las bombas trabajan fuera de la zona de punto de mayor desempeño (BEP), ocasionando muchas complicaciones tales como:

- Separación del flujo en los álabes, el difusor y la voluta lo cual causa recirculación.

- Deterioro de la eficiencia debido al desgaste de las piezas mecánicas, fuga de líquido y alto consumo eléctrico.

- Cavitación.

- Vibración excesiva.

- Oscilación resonante crecientes (en algunas ocasiones).

- Reducción de la vida de la bomba.

Esto ocurre a partir del cálculo de la velocidad específica; los valores numéricos de la velocidad específica son muy razonables y pueden ser necesarios para el diseño de parámetros para todos los tipos de bombas (Lobanoff, 1992)

Las relaciones de los parámetros de trabajo de la bomba y la velocidad son:

- El caudal Q se incrementa proporcionalmente a la velocidad del eje n (Tuzson, 2000).

$$Q \propto n$$

- La carga H se incrementa al cuadrado de la velocidad del eje n (Tuzson, 2000)

$$H \propto n^2$$

En otras palabras, si aumentamos la velocidad del eje de una bomba ($2n$), esta entregaría el doble del flujo ($2Q$) y aumentaría 4 veces su carga ($4H$).

1.5.1. Estudios y recomendaciones para el análisis del conjunto sistema de tuberías-equipos de bombeo.

Según la “International Energy Agency” en el 2010 el 41.5% del consumo de energía eléctrica en el mundo se debió al sector industrial. Los sistemas de bombeo para transportar fluidos en los procesos, tales como: el agua fría o caliente, leche, petróleo; entre otros, son de los mayores consumidores y de los que presentan más pérdidas, por lo que se convierte en un requerimiento aumentar su eficiencia. El sistema de bombeo convencional está conformado por: la carga hidráulica, la bomba, el motor, el acople motor bomba, variador de velocidad para el motor (opcional) y el Centro de Control de Motores (CCM) o arrancador en la alimentación del sistema. (BRS Abril, 2013).

En cuanto a las metodologías de diseño, selección y mantenimiento de cada uno de los equipos por separado han trabajado varios autores como son (M. Benhaddadi, 2007); (Arturo Pedraza, 2011); (Eduardo Blanco Marigorta, 1994), tanto de motores convencionales, como de alta eficiencia, bombas para que trabajen eficientemente, conjunto motor – bomba y bomba motor – variador de velocidad; es poco lo que se ha trabajado en un modelo para todo el sistema de bombeo, como lo realizado por el grupo conformado en el 2012 por European Copper Institute (ECI), Fraunhofer – ISI, KuLeuven y University of Coimbra (U.C). (BRS Abril, 2013)

La disminución del consumo energético en estas instalaciones se considera que puede realizarse mediante dos aspectos:

- Por la disminución de consumos de agua como consecuencia de un mejor conocimiento de las necesidades de la instalación y los procesos.
- Por la correcta adecuación del sistema de recirculación de agua, y por la reestructuración, rediseño o modernización del sistema de bombeo.

1.5.2. Problemas que suelen presentarse en el manejo de fluidos.

Lo más habitual en una instalación hidráulica o de cualquier otro sistema, es tener el sistema de bombeo trabajando en un punto de operación inadecuado, trabajando de manera ineficiente. En general se utilizan válvulas para regular el caudal o variadores de frecuencia. La figura 1.5, muestra la diferencia en cuanto a potencia demandada al utilizar variadores de frecuencia o el método de estrangulamiento. También se observa como con el estrangulamiento se modifica la curva del sistema aumentando la carga en el mismo, mientras que la regulación de la velocidad provoca cambios en la curva de la máquina y mantiene la curva del sistema de tuberías (Suárez, 2019).

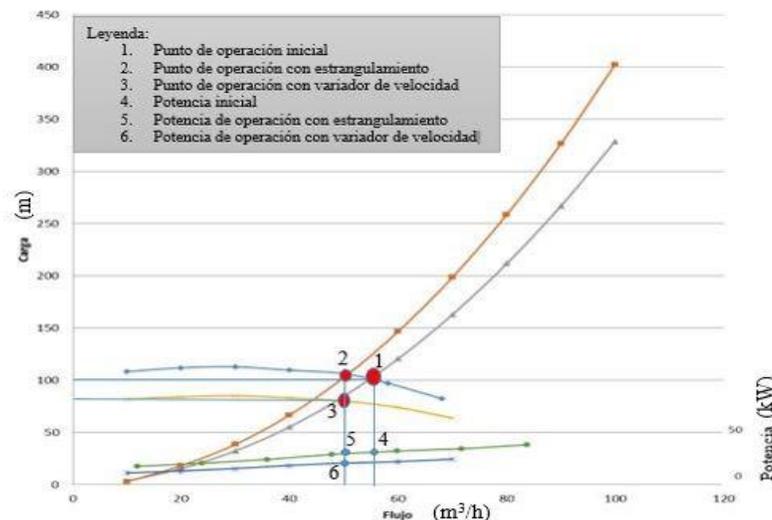


Figura 1.5 Variaciones en el punto de operación utilizando variadores de frecuencia y estrangulamiento (Suárez, 2019).

1.5.3. Métodos de regulación de flujo y eficiencia.

Generalmente la regulación de caudal se realiza mediante la manipulación de válvulas en la instalación. Este método conlleva una grave penalización, ya que cuando se cierra una válvula esta provoca una marcada pérdida de presión, que se traduce en pérdidas energéticas.

Para mejorar la eficiencia respecto al punto anterior, se emplean variadores de frecuencia en los sistemas de bombeo. Un variador de frecuencia es un dispositivo electrónico que modifica la velocidad del motor asincrónico que mueve los álabes de la bomba con la finalidad de adecuar la velocidad a la necesidad mayor o menor de caudal. Cabe la posibilidad de variar la frecuencia manualmente para ajustar el punto de operación deseado, o bien, implementando un autómata que, mediante realimentación en lazo cerrado, varíe la velocidad en función de los requerimientos. La primera posibilidad es eficaz en instalaciones con un caudal fijo, la segunda sería la más óptima en instalaciones con caudal variable. (Efinétika, 2019)

La utilización de variadores de frecuencia es un método muy eficiente ya que no se regula a base de pérdidas, sino a partir de la potencia entregada al motor de la bomba. No obstante, se debe trabajar en un rango de rendimientos similares al punto de operación inicial. Dicho punto de operación habitualmente se encuentra desplazado respecto al de rendimiento óptimo. (Efinétika, 2019)

Esta desviación puede tener diversos motivos, como el desgaste de la bomba, la modificación de la instalación, la adición de nuevos puntos de consumo, etc.

Otras formas de regulación de flujo menos utilizadas pero que también se pueden llevar a cabo, por poseer una serie de ventajas con ciertos inconvenientes, por lo que se recomiendan para casos muy concretos son las siguientes:

1. En algunas instalaciones se utilizan prerrotadores para redireccionar el flujo aportándole cierta angulación en la entrada para una mejor adaptación con los álabes del impelente. Siempre será mucho más eficiente un variador de frecuencia (aunque más costoso). Los prerrotadores son una solución más eficiente que las válvulas y con respecto a un variador se podría decir que es una solución de bajo costo. (Efinétika, 2019)
2. El recorte del impelente reduce mucho más la salida de la presión que el caudal. Sin embargo, la resistencia del sistema interactúa con la presión de la bomba para determinar el caudal actual del sistema. Teniendo en cuenta que la reducción del diámetro no es excesiva, las pérdidas por eficiencia son

moderadas y la reducción de la potencia de la bomba es sustancial. (Wulfinghoff, 1999)

3. Las válvulas de estrangulamiento en la descarga de la bomba, este método es menos eficiente que el recorte del impelente, sin embargo, es más sencillo y es reversible. La mayor desventaja de este método es que ofrece un ahorro energético relativamente pequeño. En una situación dada el recorte del impelente ahorra mucha más energía. (Wulfinghoff, 1999)

1.5.4.Recomendaciones para aumentar la eficiencia en sistemas de bombeo.

En el caso de la regulación por válvulas, se recomienda en primer lugar colocar un variador de frecuencia que sustituya la válvula, de esta manera se evitan las grandes pérdidas en la relación flujo-potencia. Ahora, si se quiere adecuar el funcionamiento de la bomba al punto de operación de mayor rendimiento, se deben estudiar la curva de la instalación y clasificarla.

En una instalación, cuanto más fuerte es la relación entre presión, altura y caudal, se dice que la instalación tiene un mayor grado de resistividad. Si la curva de la instalación es fuertemente resistiva se debe analizar la modificación de la curva de la bomba para desplazarla a la izquierda, hacia el punto de operación más eficiente, si, al contrario, es poco resistiva, se debe modificar de cara a un desplazamiento hacia la derecha, buscando de nuevo el punto de mayor rendimiento de la bomba.

Esta solución se puede llevar a cabo con la colocación de una bomba auxiliar, ya sea en serie o en paralelo (según el caso), con la bomba principal. La bomba auxiliar será aproximadamente entre 3 y 6 veces más pequeña que la bomba principal.

El ahorro energético con una bomba auxiliar puede oscilar, según el estado de la instalación y del sistema de bombeo, desde valores muy bajos, hasta un 20-25% en casos extremos donde este muy alejado del funcionamiento óptimo. Este ahorro se sumará (en gran parte) al conseguido por un variador de frecuencia (20-50%) dependiendo del estado de la instalación.

En conclusión, si se dispone de una instalación y se quiere ahorrar tanto en agua como en energía eléctrica, se debe estudiar el acoplamiento de un variador de frecuencia. Si, además, la instalación lleva varios años en funcionamiento y/o se han realizado modificaciones en ella, una buena forma de optimizarla es añadir una bomba auxiliar para llevarla al punto de operación maximizando el ahorro energético y además reduciendo el esfuerzo que realiza la bomba principal, aumentando así su tiempo de vida útil.

1.5.5.Reducción del consumo de energía en equipos de bombeo. Uso de la regulación para reducir consumo.

Los sistemas de bombeo representan el 20% de la energía mundial consumida por motores eléctricos y entre el 25% y el 50% de la energía total usada en la industria. Existen oportunidades significantes para reducir el consumo energético de los sistemas de bombeo a través de diseños inteligentes, adaptaciones y prácticas operacionales. Particularmente muchas aplicaciones de bombeo con requerimientos de servicio variable ofrecen grandes ahorros. Los ahorros pueden incluir mejoramientos en el desempeño, en la confiabilidad y reducir el ciclo de costo de vida. (Hydraulic Institute, 2004).

De acuerdo con (Kaya, 2008), se puede ahorrar hasta un 30% de la energía consumida por la bomba, dependiendo del diseño y la selección de la misma. A partir de esta información se han desarrollado diferentes análisis para calcular sistemas más eficientes tanto en la producción como en la operación de la bomba. El tema de la eficiencia energética ha llegado inclusive a ser parte de las leyes gubernamentales en muchos países, por ejemplo, en Estados Unidos existe la necesidad de etiquetar toda bomba que consuma una potencia mayor que 2.5 kW. Las bombas construidas en Alemania tienen la obligación de ser etiquetadas con una letra; indicando la eficiencia energética de la misma. (Kaya, 2008)

Lo anteriormente expuesto indica una fuerte tendencia hacia el ahorro de energía a nivel mundial, causando que los usuarios de bombas solo adquieran equipos de alta eficiencia y que el mercado sea dirigido hacia la eficiencia energética. Las mayores oportunidades de ahorro en los sistemas de bombeo se presentan en la tabla 1.1.

Por lo general implican cambios en el control del sistema o de la bomba o inclusive ambos. Sin embargo, realizar cambios significativos al sistema de tubería y otros equipos en los sistemas existentes en la actualidad no es viable económicamente.

Tabla 1.1. Oportunidades de ahorro en sistemas existentes. (Hydraulic Institute, 2006)

Medidas de eficiencia	Intervalos de ahorros (% de energía del sistema)
Reducir los requerimientos globales del sistema	5-20
Igualar el tamaño de la bomba con la carga	10-30
Reducir o controlar la velocidad de la bomba	5-50
Comprar componentes	1-3
Operación y mantenimiento	1-5

Si todas las industrias de EE.UU. implementaran estas medidas, los ahorros obtenidos podrían equivaler sobre una base promedio de 28 000 GWh/año. Este potencial de ahorro energético es de gran significancia en los costos de las plantas industriales para sus dueños y operadores.

Para maximizar la eficiencia del sistema de bombeo, la bomba debe estar operando en su punto de mejor desempeño o BEP según (Hydraulic Institute, 2006). Teniendo en cuenta que la mayoría de las bombas son sobredimensionadas por el diseñador, se recomienda que el punto de operación de una bomba debe estar lo más cercano posible hacia el lado izquierdo de su punto de máxima eficiencia (BEP) en la curva de la bomba. (Volk, 2005). (Hydraulic Institute, 2008) recomienda minimizar el consumo energético de los sistemas de bombeo al seleccionar una bomba tal, que la curva del sistema intercepte la curva de la bomba dentro de un 20% de su BEP, además se debe elegir un impelente de rango medio de tal forma que pueda ser recortado o reemplazado en caso de presentarse requerimientos de flujos mayores o menores. Por otra parte, una propuesta para un nuevo diseño del sistema de bombeo es igualmente importante y a menudo pasada por alto.

Una aplicación incorrecta de las bombas afecta directamente el costo operativo de los sistemas de bombeo. Una bomba forzada a operar más lejos de su BEP incrementa los costos de la energía, los mantenimientos y acorta su vida útil.

1.6. La cavitación en los sistemas de bombeo.

La cavitación está dada principalmente por un parámetro del fluido, que es la presión de vapor (P_{vp}), esta es la presión a la cual un fluido comienza a evaporarse para una temperatura determinada. Por lo que, cuando en alguna región del sistema, la presión estática cae por debajo de la presión de vapor, se forman burbujas de vapor como resultado de la evaporación parcial del líquido. Cuando estas burbujas o cavidades llenas de vapor se trasladan a zonas de la bomba con presiones más altas que la presión de vapor, se producirá la condensación instantánea del vapor contenido en la burbuja.

Como resultado de este proceso, las burbujas implosionan violentamente y se producen una serie de ondas de presión con efectos adversos sobre la bomba. Entre las consecuencias negativas de este fenómeno llamado cavitación están: la aparición de ruido y vibraciones, el bloqueo del flujo, la erosión y rotura de los elementos de bombeo.

1.6.1. La relación entre el NPSH y la cavitación.

Para que no ocurra la cavitación es necesario que la presión estática en cualquier zona del interior de la bomba sea superior a la presión de vapor. Todo ello está muy relacionado con el concepto de NPSH que se define a continuación.

La palabra NPSH proviene de las iniciales en Inglés de Net Positive Suction Head (Altura Neta Positiva de Aspiración). Para estudiar el NPSH se utilizan dos puntos de vista: el de la bomba y el del sistema de tuberías. A continuación, se definen los dos conceptos, es decir el del NPSH disponible ($NPSH_A$) en el sistema y el del NPSH requerido por la bomba $NPSH_R$.

Se define al NPSH requerido ($NPSH_R$) cómo el valor mínimo de NPSH, dado por el fabricante, que tiene que haber en la succión de la bomba para que no ocurra la cavitación. De lo anterior se deduce que, para evitar que aparezca la cavitación, el $NPSH_A$ deberá ser siempre mayor que el $NPSH_R$. La figura 1.6 muestra el $NPSH_R$ y el $NPSH_A$ de un sistema. En este caso existe cavitación para flujos mayores a 70 m^3/h , ya que en este momento el $NPSH_A$ se hace menor que el $NPSH_R$.

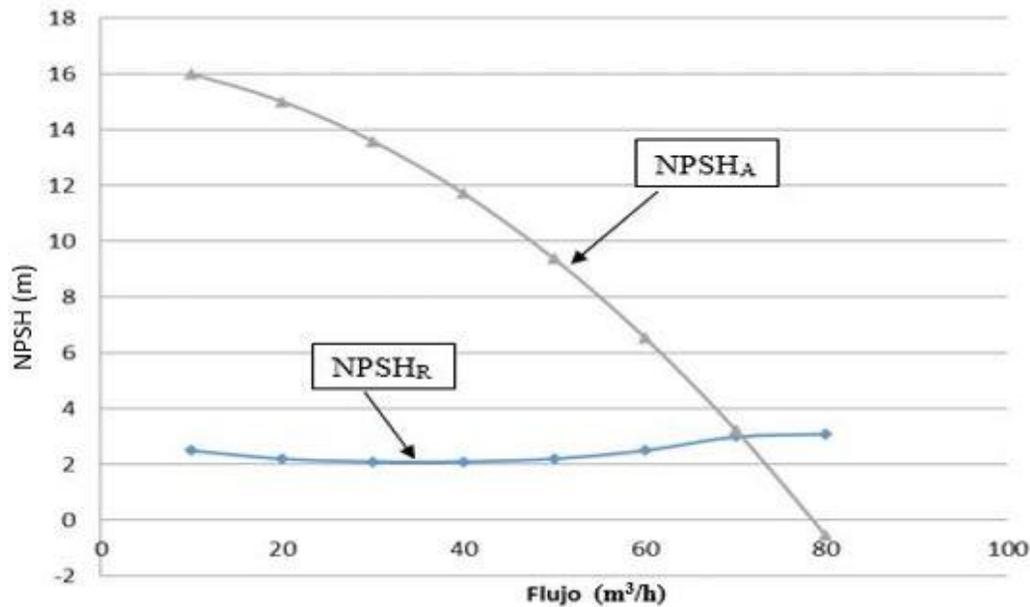


Figura 1.6 NPSH disponible y requerido para un conjunto bomba-sistema de tuberías.
(Elaboración propia)

1.7. Pérdidas por aumento de la fricción en tuberías.

Las características del flujo de un líquido en una tubería varían con la velocidad. Cuando la velocidad es muy lenta el flujo es viscoso. En estas condiciones, el efecto es el de cilindros concéntricos de líquido cizallando unos a través de otros en forma ordenada. La mayor velocidad es en el centro de la tubería; la velocidad cae a cero en las paredes de la tubería. Con agua, el flujo viscoso ocurre cuando la velocidad promedio es muy baja. En consecuencia, el flujo viscoso con agua raras veces se encuentra en aplicaciones normales. Al aumentar la velocidad promedio del líquido, el flujo se vuelve turbulento. En condiciones de flujo turbulento, la velocidad axial medida a través del diámetro del tubo es más uniforme que en el flujo viscoso; el flujo es viscoso en un área adyacente a las paredes del tubo. La velocidad promedio a la que cambia el flujo de viscoso a turbulento no es absoluta; hay un margen crítico en el que el carácter del flujo puede ser de cualquiera de los dos tipos. (Carter, 1968). El flujo de cualquier líquido está acompañado de dos tipos de fricción: Fricción interna causada por el frotamiento de las partículas del fluido unas contra otras; y la fricción externa causada por el frotamiento de las partículas de fluido

contra las paredes del tubo o contra la capa estática del líquido adherido a las paredes. Se tiene que gastar energía para vencer esta fricción(Carter, 1968)

Si el flujo es turbulento, la fricción desarrollada dependerá en parte de la rugosidad de las paredes. Debido a que las superficies interiores de los tubos del mismo material son prácticamente las mismas sin importar el diámetro, las tuberías más pequeñas son relativamente más ásperas que las grandes. Así, para velocidades iguales, mientras mayor sea la tubería menor será la pérdida por fricción. La rugosidad de la pared del tubo también dependerá del material del que está hecho el tubo y, después que éste ha estado en servicio, de cualquier cambio que ocurre en la superficie interior (Carter, 1968). Se han hecho numerosos estudios y experimentos de fricción en tuberías y se cuenta con gran número de tablas y cartas. Las tablas de Williams y Hazen son de las primeras normas para agua y se han encontrado especialmente verídicas para tuberías de hierro colado de diámetro de 72 mm o más grande. Estas tablas están basadas en una forma empírica que puede modificarse a la siguiente forma:

$$h_f = 82.7 * \left(\frac{Q}{C}\right)^{1.852} * \left(\frac{L}{d}\right)^{4.87} * L \quad \text{Ec1.2}$$

Dónde:

h_f = pérdida de altura de elevación para la longitud L en m de agua.

Q = flujo en l/min.

d = diámetro interior de la tubería en cm

C = coeficiente de lisura

L = longitud de la tubería en metros.

El coeficiente C es un índice de lisura de la superficie interior del tubo (mientras más lisa sea la superficie interior de la tubería, más alto será el valor de C), y la selección del valor apropiado de este coeficiente determinará la precisión de la pérdida de altura de elevación calculada para cualquier problema. Para tubería de hierro fundido nueva sin forro, una C de 130 es el valor común, pero se han encontrado algunas tuberías nuevas en las que las pérdidas de altura de elevación por fricción indican valores de C de 140 o más altos. Las tuberías cubiertas en el interior para dar una superficie más lisa, naturalmente tienen un valor C más alto. También hay

registros de tuberías hecha con lámina metálica y de cemento muy liso que tienen valores de C de 145 a 150 o más altos(Carter, 1968). La mayoría de las tuberías se deterioran con el tiempo y, por lo tanto, los valores de C se vuelven más bajos. Esta disminución en el valor de C o aumento en la pérdida de altura de elevación por fricción, depende del material de la tubería, del recubrimiento de ella (si se usa), y del carácter del agua. Por lo tanto, cualquier valor de C seleccionada para la tubería usada representa una pura adivinanza(Carter, 1968). Cuando se hace necesario definir las pérdidas de altura de elevación por fricción en esas tuberías, se deberá hacer una prueba, si es posible, para encontrar la pérdida por fricción a alguna capacidad conocida, para poder aproximar el coeficiente. Si no se puede hacer esa prueba, es conveniente alguna guía para indicar el cambio promedio de C con el tiempo. El Anexo 1 muestra una carta técnica de los coeficientes que podrían esperarse para tuberías de hierro colado que manejan agua dulce y limpia sin filtrar.

Se ha encontrado que las tuberías que llevan agua que ha sido filtrada pero que no se ha tratado químicamente, se deterioran menos rápidamente que las que manejan agua sin filtrar. Las aguas tratadas químicamente algunas veces se ha encontrado que producen más corrosión en la tubería que las aguas sin tratar. El agua estancada o salobre generalmente produce un aumento de tuberculización. Se ha encontrado que algunas aguas moderadamente duras causan un deterioro lento.

Por otra parte, también pueden depositar carbonato de calcio en el interior de la tubería, reduciendo así su tamaño y aumentando su rugosidad. Las tuberías de cemento liso y las recubiertas con cemento se ha visto que conservan un alto valor de C durante muchos años(Carter, 1968). Todas estas posibilidades hacen difícil seleccionar, con cierta seguridad de precisión, el coeficiente apropiado, por lo que cualquier guía debe usarse con reservas.

En estudios importantes con frecuencia se puede localizar una instalación similar y usar las pérdidas de altura de elevación obtenidas en esa instalación como guía.

1.8. Sistema de bombeo asociado al laboratorio de flujometría de Refinería Cienfuegos S.A.

La función del sistema de bombeo que se utiliza para la calibración de los instrumentos, es mantener macizada la línea de agua contra incendio a una presión entre 0.67 – 1.07 MPa. Para mantener esta condición, Refinería Cienfuegos S.A. cuenta con un sistema automático de bombeo en funcionamiento constante, equipado con: 3 tanques para el almacenamiento de agua con una capacidad total de 40 000 m³ abastecido desde la potabilizadora de Abreus, 2 motobomba eléctricas del tipo Jockey con una potencia eléctrica de 37 kW, una frecuencia de rotación 3500 rpm y una capacidad de 56.0 m³/h para el mantenimiento primario de la presión, 3 motobombas del tipo D-1250-125 con capacidad para 1 150 m³/h, 1.275 MPa de presión en la descarga, una tensión de 6 000 Vac, 60 Hz, 630 kW de potencia y una frecuencia de rotación de 1 800 rpm para el respaldo del sistema (ver anexo 2), más 1 motobomba de combustión interna de diésel del tipo RDL300/500 con capacidad para 1 250 m³/h y 1.226 MPa de presión en la descarga, también de respaldo del sistema.

1.9. Situación del agua a nivel global.

Unos 2 200 millones de personas en todo el mundo no tienen acceso a servicios de agua potable gestionados de manera segura, 4 200 millones no cuentan con servicios de saneamiento seguros y otros 3 000 millones carecen de instalaciones básicas para lavarse las manos. Las brechas en el acceso a fuentes de abastecimiento de agua y saneamiento, el crecimiento demográfico, el uso intensivo de agua, la mayor variabilidad de las precipitaciones y la contaminación son factores que se conjugan en muchos lugares transformando al agua en uno de los principales riesgos para el progreso económico, la erradicación de la pobreza y el desarrollo sostenible.

En el mundo interconectado y en rápido crecimiento que vemos hoy, las consecuencias de dichas tensiones son de carácter local, nacional, transfronterizo, regional y mundial. Las repercusiones afectarán de forma desproporcionada a los más pobres y los más vulnerables.

El crecimiento económico depende en gran medida del agua. El agua es un factor vital para la producción, por lo que la reducción de sus existencias puede reflejarse en una desaceleración del crecimiento económico. Las tasas de crecimiento económico de algunas regiones podrían reducirse en hasta un 6 % del PIB en 2050, como consecuencia de pérdidas vinculadas con el agua en las esferas de la agricultura, la salud, los ingresos y la propiedad. Asegurar un suministro suficiente y constante de agua en un contexto de creciente escasez será esencial para alcanzar los objetivos mundiales de alivio de la pobreza. (Banco Mundial, 2021).

1.9.1. Hacia el uso sostenible del agua en Cuba.

En la historia de la Revolución cubana existen momentos relevantes donde se evidencia la voluntad estatal para proteger y cuidar el medioambiente. Según la Estrategia Ambiental Nacional (1995), en la Constitución de la República de Cuba aprobada en 1976, artículo 27, se le otorga el rango institucional al medioambiente, expresado como sigue:

Artículo 27: El Estado protege al medioambiente y los recursos naturales del país. Reconoce su estrecha vinculación con el desarrollo económico y social sostenible para hacer más racional la vida humana y asegurar la supervivencia, el bienestar y la seguridad de las generaciones actuales y futuras. Corresponde a los órganos competentes aplicar esta política. Es deber de los ciudadanos contribuir a la protección del agua, la atmósfera, la conservación del suelo, la flora, la fauna y de todo el uso potencial de la naturaleza. (García, 2022).

Los recursos hídricos disponibles anuales per cápita en Cuba son limitados y están heterogéneamente distribuidos. La media nacional de 1220m³ por persona al año sitúa al país en un nivel de estrés hídrico moderado. El cambio climático, como problema ambiental global, tiene una elevada incidencia en la producción de alimentos, por lo que su impacto en la seguridad alimentaria es notable, en particular debido a la disminución del potencial hídrico. Ello es resultante de la acción combinada de varios factores: la penetración de la cuña salina hacia el interior del país, la disminución de las precipitaciones y la contaminación de las aguas terrestres.

Los principales problemas relacionados con el uso sostenible del agua en Cuba se resumen de la siguiente manera: el bajo volumen de agua disponible por habitante al año, un estrés hídrico superior al 50%, un indicador de la escasez de agua del 50%, una huella hídrica que sobrepasa los 1700 metros cúbicos por habitante al año, un bajo índice de reposición anual de los recursos hídricos con el 13, 7%, el incremento del caudal de las aguas residuales y su bajo aprovechamiento, la baja eficiencia en el uso del agua y las considerables pérdidas en las redes de distribución y consumo.

El agua constituye para Cuba el principal desafío ambiental para garantizar su desarrollo, así como su seguridad ambiental y alimentaria, lo que sólo será posible mediante la gestión sostenible de sus recursos hídricos, sobre la base de la eficiencia, el ahorro y su protección.

Una ruta deseable para alcanzar un uso sostenible del agua en el país pasa por los siguientes momentos: incrementar el índice de disponibilidad de los recursos hídricos, disminuir aceleradamente las pérdidas de agua en las redes, alcanzar la eficiencia hídrica en la agricultura y la industria, ahorrar el agua mediante la medición, el control de su uso y la aplicación de tarifas de acuerdo al consumo, reducir la contaminación en los cuerpos de agua e incrementar el aprovechamiento de las aguas residuales. (Duque, 2018)

1.10. Operación actual en la refinería de petróleo “Camilo Cienfuegos” para la calibración de los caudalímetros másicos tipo Coriolis.

La Refinería Cienfuegos S.A. actualmente cuenta con 25 flujómetros para la transferencia fiscal de los productos derivados del petróleo que ella comercializa. Ver anexo 3.

Para poder comercializar con estos flujómetros la Disposición General, DG 01 del 2014 de la Gaceta Oficial de la República de Cuba, establece los instrumentos o sistemas de medición que están sujetos a la verificación y aprobación de modelo según sus campos de aplicación. Por tal motivo es una exigencia verificar periódicamente todos estos instrumentos.

Por su diversidad en diámetros y lugares de ubicación la Gerencia de automática instrumentación y telecomunicaciones (AIT), adquirió una estación portátil de calibración de flujómetros que permitiría realizar esta acción sin sacar estos instrumentos fuera de la Refinería. La misma cuenta con dos patrones, uno de 0.125 m y otro de 0.150 m para poder abarcar todos los diámetros existentes. Ver anexo 4.

La práctica fue demostrando que calibrarlos en el lugar se hacía muy difícil pues las condiciones del proceso no siempre eran las apropiadas, también las inclemencias del tiempo actuaron desfavorablemente pues la calibración se hacía a la intemperie y hubo que detener los trabajos por lluvia u otros factores del clima.

Sería importante proponer un diseño de un laboratorio para calibrar flujómetros, que permita tener fija la estación de calibración y traer a ella los flujómetros a comprobar y crear en el mismo las condiciones de proceso que garanticen los flujos necesarios para esta acción.

1.11. Conclusiones parciales.

1. La selección correcta de una bomba para un determinado sistema teniendo en cuenta los parámetros de flujo, carga y NPSH podría aumentar la vida útil del equipamiento.
2. La opción de usar variadores de frecuencia es la más eficiente entre los métodos de regulación al trabajar con flujos variables.
3. El uso de una de las bombas de tipo D1250-125 con capacidad 1150 m³/h del sistema de agua contra incendio, para valores comprendidos entre 112 y 120 m³/h, provoca que el sistema opere ineficientemente, acorta los ciclos de mantenimiento del equipo y reduce la vida útil de la bomba.
4. En la realización de las calibraciones el agua utilizada en estos ensayos (120 m³/h), es vertido en su totalidad en la bahía, sin posibilidad de reutilizar, contaminada y ocasionando gastos económicos a la empresa y al país en general.

CAPÍTULO 2. MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CARGA DEL SISTEMA, SELECCIÓN DE LA BOMBA Y DETERMINACIÓN DEL NPSH_D.

Introducción del capítulo

En este capítulo se describen las características del local donde se encuentra emplazada la unidad móvil de calibración, se identifican los recursos en uso y los que cuentan con potencial para formar parte del nuevo diseño. Se hace la selección de los componentes del sistema para la realización del nuevo proyecto. Se realizan los cálculos de carga en función del flujo del sistema, teniendo en cuenta los accesorios y las longitudes de tramos rectos de las tuberías para elaborar las curvas características del sistema. Finalmente se selecciona una bomba que satisface la demanda máxima de flujo al determinar el punto de operación.

2.1. Descripción del laboratorio de flujometría en Refinería Cienfuegos.

El laboratorio de flujometría está instalado dentro del taller concebido originalmente para mantenimiento y reparación de válvulas neumáticas, éste ocupa un área útil total de 426.64 m². Ver figura 2.1.

El taller está estructurado por zonas de trabajo. En la zona 8 se realizan la carga y la descarga de instrumentos (válvulas neumáticas y caudalímetros), que son transportados en un camión acondicionado para esta actividad.

En la zona 2 se reparan y calibran las válvulas neumáticas, cuentan con una grúa monorraíl de 1T que cubre la zona central de taller, con la que se mueven los útiles de trabajo y los instrumentos de medición y control de la planta, desde su recepción hasta su retorno al proceso tecnológico, esta grúa tiene gran importancia debido al peso de los medios que en el taller se manipulan.

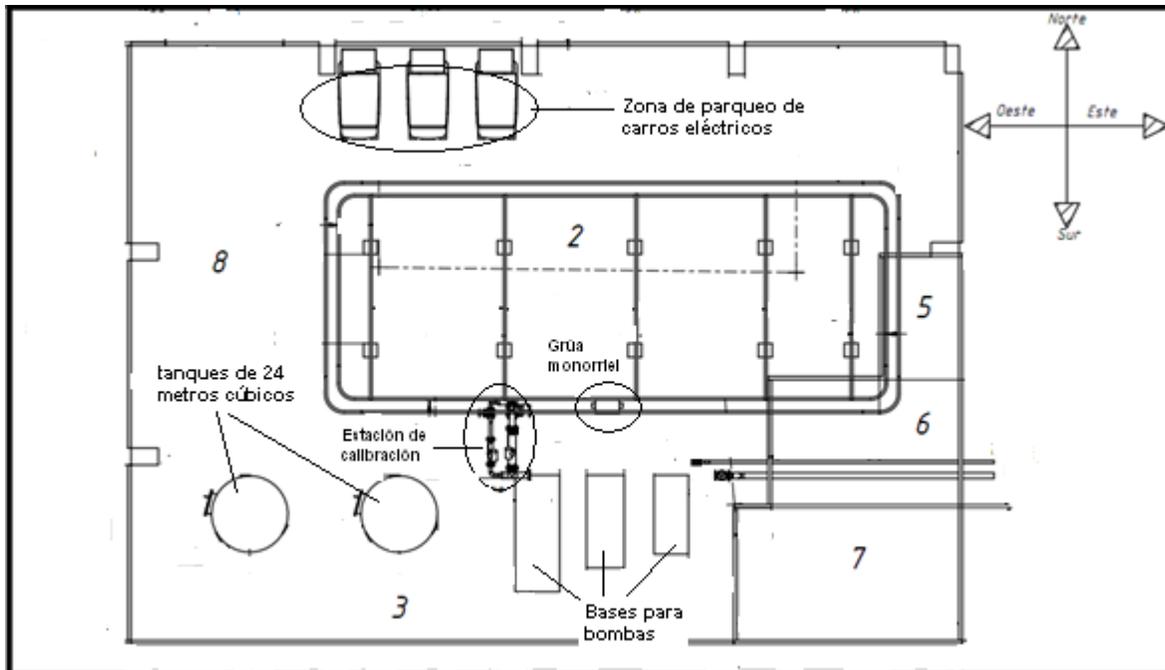


Figura 2.1 Vista general del taller de válvulas (Elaboración propia).

En la zona 5 se encuentra el local donde se procesa y registra la documentación de los trabajos del taller.

A la izquierda de la puerta de acceso al taller, está la zona de parqueo y carga de los carros eléctricos de la brigada de instrumentación.

Al Sur del taller con un área útil de 123,522 m² se encuentra la zona 3, el espacio destinado para el emplazamiento de la estación de calibración, sus accesorios, los caudalímetros a certificar, tres bases para bombas, dos tanques con capacidad de 24 m³ cada uno, una válvula de 0.150 m de diámetro para la conexión de la estación a la red de agua contra incendios a través de una línea 15 m de largo y otra válvula de 0.075 m de diámetro con la que se vierte a la bahía el agua contaminada de las calibraciones mediante una tubería de 12 m de largo que termina en la canal pluvial. (Figura 2.2).



Figura 2.2 Conexión de la unidad móvil a la línea de entrada.
(Elaboración propia).

La zona 7 consiste en un local para la custodia de los instrumentos y otros medios y la zona 6 para facilidades mecánicas (muelas abrasivas, taladros verticales, etc.).

2.2. Requerimientos del sistema.

La solicitud de la Gerencia de AIT en refinería Cienfuegos (ver anexo 5), demanda un sistema de bombeo con un caudal regulable desde 0 hasta 120 m³/h a temperatura ambiente, usando para la recirculación del agua dos tanques con una capacidad total de 48 m³, a través de un circuito de tuberías dispuesto de forma tal que garantice la circulación del fluido por dos flujómetros patrones colocados en la estación de calibración y de los instrumentos a calibrar.

2.3. Dimensionamiento del sistema de tuberías.

La elección de los diámetros de las tuberías es una decisión técnico-económica siendo aconsejable que las pérdidas de carga no sean excesivamente elevadas, con el fin de evitar un gasto excesivo de energía (Espa Group, 2000).

Las dimensiones de las tomas de aspiración e impulsión de las bombas sólo nos indica el tamaño mínimo de las tuberías. El dimensionado debe hacerse de forma que las velocidades sean como máximo las siguientes:

- Tubería de aspiración: 1,8 m/s
- Tubería de impulsión: 2,5 m/s

La velocidad del flujo es importante para la economía y duración del sistema de impulsión.

- Velocidades inferiores a 0,5 m/s originan normalmente sedimentaciones.
- Velocidades superiores a 5 m/s pueden originar abrasiones.

Para la determinación de la velocidad del fluido se pueden utilizar las ecuaciones Ec. 2.1 y Ec. 2.2.

$$V = \frac{Q}{A}, m/s \quad \text{ec. 2.1}$$

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4}, m^2 \quad \text{ec. 2.2}$$

Donde:

Q, Caudal en m³/s.

A, Área de la sección transversal de la tubería en m².

V, Velocidad del fluido en m/s.

D, Diámetro de la tubería en m.

En la tabla 2.2 se representan las velocidades para cada uno de los diferentes diámetros de tuberías y tasas de flujo, permitiéndonos seleccionar el diámetro de la tubería en la succión y en la descarga, de acuerdo a los criterios de (Espa Group, 2000).

Tabla 2.2 Determinación de las velocidades para distintos diámetros de tuberías a 120 m³/h (Elaboración propia).

Caudal m ³ /h	Velocidad m/s													
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
0.050 m	1.41471	2.82942	4.24413	5.65884	7.07355	8.48826	9.90297	11.3177	12.7324	14.1471	15.5618	16.9765	18.3912	19.8059
0.075 m	0.62876	1.25752	1.88628	2.51504	3.1438	3.77256	4.40132	5.03008	5.65884	6.2876	6.91636	7.54512	8.17388	8.80264
0.100 m	0.35368	0.70736	1.06103	1.41471	1.76839	2.122066	2.475744	2.82942	3.1831	3.53678	3.89045	4.24413	4.59781	4.95149
0.125 m	0.22635	0.45271	0.67906	0.90541	1.13177	1.35812	1.58448	1.81083	2.03718	2.26354	2.48989	2.71624	2.9426	3.16895
0.150 m	0.15719	0.31438	0.47157	0.62876	0.78595	0.94314	1.10033	1.25752	1.41471	1.5719	1.72909	1.88628	2.04347	2.20066

Considerando los resultados obtenidos y las recomendaciones (Espa Group, 2000), se selecciona para el diseño, tuberías de acero con un diámetro de 0.150 m en la aspiración y de 0.125 m para la descarga. Los valores de velocidad para la tubería 0.125 m de diámetro, son inferiores a los 5 m/s. Valores mayores de 5 m/s provocan abrasión y como consecuencia el deterioro prematuro de la tubería.

Según Norma: NDI-SE-IT-001 “Técnica de Impulsión y Transmisión de Agua (EMCALI, 2013), la velocidad máxima en tuberías de succión depende del diámetro. En la tabla 2.3 se muestran los valores de velocidad recomendados por esta norma, para los diferentes diámetros de tuberías.

Tabla 2.3 Velocidad máxima aceptable en tuberías de succión (EMCALI, 2013).

Diámetro de la tubería de succión (mm)	Velocidad máxima (m/s)
50	0,75
75	1,00
100	1,30
150	1,45
200	1,60
250	1,60
300	1,70
Mayor que 400	1,80

La velocidad en las tuberías de impulsión debe estar entre 1,0 y 3,0 m/s. Valores por fuera del rango deben ser justificados económicamente (EMCALI, 2013).

El diámetro de tuberías de succión y de impulsión no pueden ser menores que los admitidos por el equipo de bombeo. Se recomienda que el diámetro de la tubería de succión sea mayor que el de impulsión, por lo menos en 50 mm (EMCALI, 2013).

Autores como: Roberto L Mott y José A. Untener, tienen otras consideraciones en cuanto a los valores máximos de velocidades según los diámetros de las tuberías (tabla 2.4).

Tabla 2.4 Velocidad máxima aceptada en tuberías (Robert L. Mott, 2015).

Rapidez del flujo de volumen		Línea de succión			Línea de descarga		
		Tamaño de la tubería (in)	Velocidad		Tamaño de la tubería (in)	Velocidad	
gal/min	m ³ /h	(in)	ft/s	m/s	(in)	ft/s	m/s
10	2.3	1	3.7	1.1	¾	6.0	1.8
100	22.7	2½	6.7	2.0	2	9.6	2.9
500	114	5	8.0	2.4	3½	16.2	4.9
2000	454	8	12.8	3.9	6	22.2	6.8

2.4. Propuesta para el diseño del laboratorio de flujometría.

Para el diseño se comenzó por estudiar la documentación y la solicitud realizada por AIT (anexo 5), se tomaron las medidas de cada uno de los elementos y del área útil (ver anexo 6), se entrevistó a operarios, técnicos, especialistas y al jefe del área, se recogieron criterios y recomendaciones, se concertaron reuniones de trabajo donde se analizaron las propuestas surgidas de los análisis anteriores y finalmente se acordó, realizar el diseño del laboratorio como se indica en la figura 2.3. y se describe a continuación.

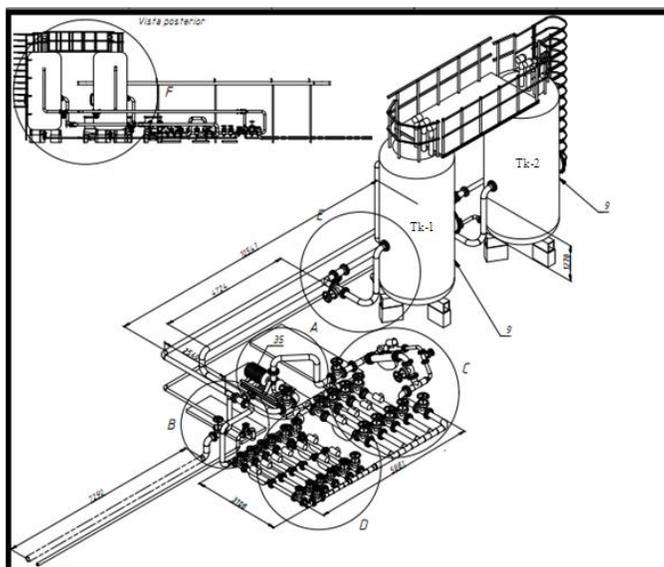


Figura 2.3 Sistema de bombeo del laboratorio de flujometría
(Elaboración propia)

Se succionará desde los tanques Tk-1 y Tk-2 (24 m^3 cada uno), a una altura de 2,91 m del nivel del suelo, se tendrá la opción de hacerlo desde los dos en paralelo o de uno solo, dependiendo de las condiciones o interés del taller, con tuberías de 0.150 m diámetros y 3 válvulas de compuertas de 0.150 m (figura 2.4). La bomba seleccionada, debe alcanzar los $120 \text{ m}^3/\text{h}$ para el flujo de trabajo.

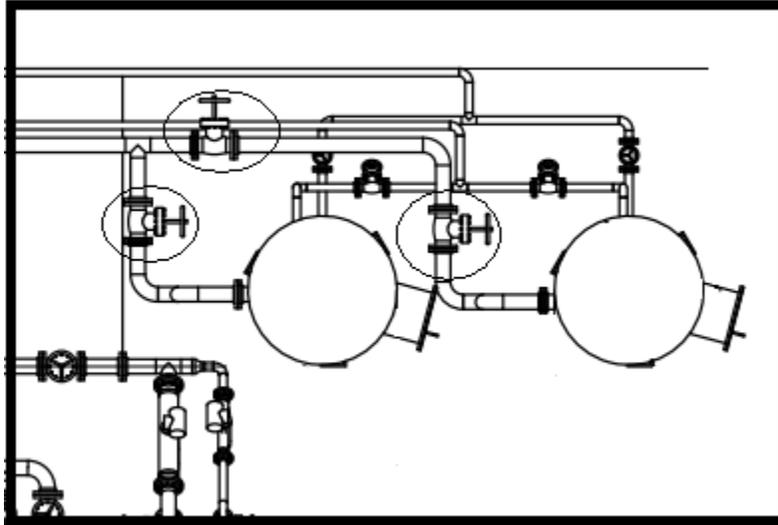


Figura 2.4 Válvula para la selección del tanque de trabajo.
(Elaboración propia).

Una válvula esférica de 0.150 m de diámetros en la descarga facilitará la regulación del caudal al rango de trabajo (figura 2.5), el fluido pasará a través uno de los dos flujómetros patrones, según la configuración que demande la prueba por el instrumento a calibrar, sólo es posible una calibración a la vez, y descargará finalmente en los dos o en uno de los tanques, dependiendo de dónde se esté succionando.

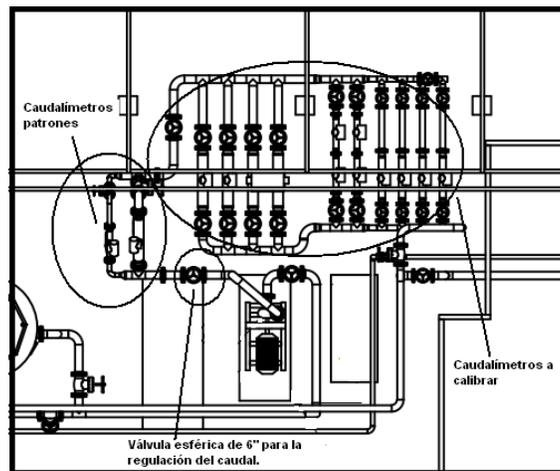


Figura 2.5 Vista superior de la estación de calibración (Elaboración propia).

2.5. Cálculo de la carga del sistema, H_b.

La red de tuberías del laboratorio diseñado cuenta con varios circuitos en paralelos, pero solo es posible realizar la calibración de un instrumento a la vez, por este

motivo los cálculos para la determinación de la carga del sistema se realizan considerando un sistema en serie. En la figura 2.6, aparece resaltado en negrita el circuito seleccionado para la realización de los cálculos. La decisión obedece, a que esta configuración será la más utilizada, el 40 % de los flujómetros son 0.125 m de diámetros, y además es el circuito con mayor longitud.

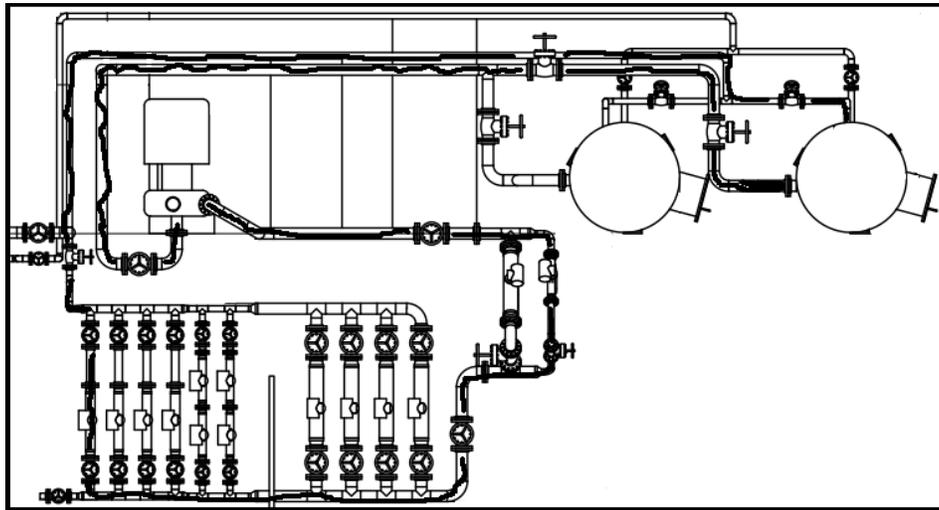


Figura 2.6 Condición de funcionamiento seleccionada para los cálculos de la carga de la bomba (Elaboración propia).

2.5.1 Características del sistema.

Para el cálculo de las pérdidas del sistema es imprescindible conocer las características de trabajo y cada uno de los elementos que lo conforman como son: tramos rectos de tuberías, codos, válvulas, reducidos, etc. (Ver Anexos 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14). Con este objetivo se describirán las características del sistema para un flujo de $120 \text{ m}^3/\text{h}$ y en la tabla 2.5 la relación de las tuberías por diámetros y longitudes, de las válvulas por tipos y diámetros y de igual forma con todos los accesorios.

Flujo máximo de trabajo, succión y descarga.

Q - $120 \text{ m}^3/\text{h}$

Altura de la succión, 2.91 m

Altura de la descarga, 4.767 m

Características del fluido:

Tipo: Agua

Temperatura, 30° C

Peso específico (γ), 9770.76 N/m³

Densidad (ρ), 996 kg/m³

Viscosidad dinámica del agua, = 0.0008 Pa*s

Tabla 2.5 Elementos que conforman la base de los cálculos.

Denominación	Características	Cantidad
Tuberías de la línea de succión	Tubo de acero al carbono A-106 (ANSI/ASME B36.19M Tubería 6 - Schedule 40S - 10). Diámetro interior, 0.150 m Área de flujo, 0.01766 m ²	13.525 m
Accesorios línea de succión	Válvula de globo de 6", 3 unidades.	3 unidades
	Codos de radio largo de 90° 6", 8 unidades.	8 unidades
	Uniones de 6", 1 unidades.	1 unidad
Tuberías de la línea de descarga	Tubo de acero al carbono A-106 (ANSI/ASME B36.19M Tubería 6 - Schedule 40S - 10). Diámetro interior, 0.150 m Área de flujo, 0.01766 m ²	7.797 m
	Tubo de acero al carbono A-106 (ANSI/ASME B36.19M Tubería 5 - Schedule 40S - 10). Diámetro interior, 0.125 m Área de flujo, 0.01227 m ²	20.710 m
	Tubo de acero al carbono A-106 (ANSI/ASME B36.19M Tubería 4 - Schedule 40S - 10). Diámetro interior, 0.100 m Área de flujo, 0.00785 m ²	1.730 m
Accesorios línea de descarga	Válvula de globo de 3".	1 unidad.
	Válvula de globo de 4".	3 unidades
	Válvula de globo de 5".	3 unidades.
	Válvula de globo de 6".	1 unidad.
	Válvula de compuerta de 6".	1 unidad
	Codos de radio largo de 90° y 6".	6 unidades.
	Codos de radio largo de 90° y 5".	7 unidades
	Codos de radio largo de 90° y 3".	3 unidades.
	Tes de 4".	5 unidades.
	Tes de 5",	3 unidades.
Tes de 6",	6 unidades.	

	Uniones de 3",	3 unidades.
--	----------------	-------------

2.5.2 Determinación de la carga del sistema. Sistema de Clase I.

El sistema de tuberías diseñado tiene tres modos de operación (ver acápite 2.4 Propuesta de diseño del laboratorio de flujometría), y en dos puntos del sistema existen tuberías conectadas en paralelos.

Consideraciones:

Atendiendo que sólo es posible la calibración de un instrumento a la vez, se determinará la carga del sistema, para un sistema de tuberías en serie.

Se tendrá en cuenta la condición de funcionamiento de la figura 2.6, para los cálculos de la carga de la bomba.

2.5.2.1 Ecuación de Bernoulli para el sistema.

La ecuación de Bernoulli permite determinar la carga que la bomba tendrá que vencer para suministrar al sistema un caudal de hasta 120 m³/h, realizar el gráfico de la carga de la bomba (H_b vs Q) y determinar mediante el catálogo de las bombas KSB, el equipo de bombeo con mejor prestación para la aplicación y los parámetros de este laboratorio.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + H_b = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \sum hl \quad \text{ec. 2.3}$$

Consideraciones

$$V_1 = 0$$

$$V_2 = 0$$

La velocidad en ese punto puede despreciarse ya que es un depósito de grandes dimensiones.

P₁ = 0 = Presión manométrica.

P₂ = 0 = Presión manométrica.

Los tanques no están sellados se encuentran a presión atmosférica.

$$H_b = Z_2 - Z_1 + \sum hl \quad \text{ec. 2.4}$$

El término de las pérdidas queda:

$$H_b = 1.857 + \sum hl \quad \text{ec. 2.5}$$

2.5.2.2 Determinación de las pérdidas del sistema.

Las pérdidas de energía por fricción del sistema de tubería rediseñado (h_L), está constituido por la suma algebraica de las pérdidas en los tramos rectos, válvulas y los accesorios (Ec. 2.6), en este subíndice se determinará la magnitud de cada una de estas pérdidas en función del caudal (Q), tributando al final a la función general Ec. 2.5, para la construcción del gráfico de la carga de la bomba, esta información permitirá hacer la selección optima del equipó de bombeo.

$$hl = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6 + h_7 + h_8 + h_9 + h_{10} + h_{11} \quad \text{ec. 2.6}$$

Donde:

h_L , Pérdida de energía total del fluido que fluye.

h_1 , Pérdida de entrada.

h_2 , Pérdida de fricción en la línea de succión.

h_3 , Pérdida de energía en válvulas en la succión.

h_4 , Pérdidas de energía en los codos en la succión.

h_5 , Perdidas de energía en Tes en la línea de succión.

h_6 , Pérdida de fricción en la línea de descarga.

h_7 , Pérdida de energía en válvulas en la descarga.

h_8 , Pérdidas de energía en los codos en la descarga.

h_9 , Perdidas de energía en Tes en la línea de descarga.

H_{10} , Perdidas de energía en los cambios de diámetros.

h_{11} , Pérdida de salida.

2.5.2.3 Determinación de la velocidad y las áreas de conducción para los diferentes diámetros de las tuberías.

Para la determinación de las velocidades en los diferentes diámetros de tuberías y las áreas de conducción, se emplean las ecuaciones E.c 2.8, E.c 2.9 y E.c 2.10. Los resultados se exponen en la tabla 2.7. y en la tabla 2.8, se muestra la conversión a m^3/s de las tasas de flujo de trabajo de la estación dadas en m^3/h .

$$V = \frac{Q}{A}, m/s \quad \text{ec. 2.8}$$

$$D = in * \frac{0.025 m}{in}, m \quad \text{ec. 2.9}$$

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4}, m^2 \quad \text{ec. 2.10}$$

Donde:

Q, Caudal en m³/s

A, Área de la zona de conducción de la tubería en m².

D, Diámetro de la zona de conducción de la tubería.

Tabla 2.7 Determinación de la velocidad (a una tasa 120 m³/h) y las áreas de conducción para los distintos diámetros de tuberías (Elaboración propia).

D(in)	D(m)	A(m ²)	V(m/s)
3	0.075	0.00442	7.54505
4	0.1	0.00785	4.24409
5	0.125	0.01227	2.71622
6	0.15	0.01767	1.88626

Para el cálculo de las pérdidas de energía del sistema por fricción y la confección del gráfico (H_b vs Q), es indispensable determinar el caudal en m³/s en cada uno de los valores a evaluar. En la tabla 2.8 se muestra el caudal en m³/h y m³/s para cada valor de flujo considerados.

Tabla 2.8 Conversión del caudal m³/h a m³/s (Elaboración propia).

Q (m ³ /h)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Q (m ³ /s)	0.002778	0.005556	0.008333	0.011111	0.013889	0.016667	0.019444	0.022222	0.025	0.027778	0.030555556	0.033333	0.036111	0.038889

2.5.2.4 Determinación del número de Reynolds (N_R).

Para determinar las pérdidas por fricción en la línea de succión y en la línea de descarga, es necesario obtener el número de Reynolds (Ec. 2.11, tabla 2.9), la rugosidad relativa, el factor de fricción para cada tubería, así como el factor de fricción en la zona de turbulencia completa para las líneas que contienen válvulas y accesorios para tuberías.

El comportamiento de un fluido, particularmente con respecto a las pérdidas de energía, resulta ser bastante dependiente de si el flujo es laminar o turbulento. (Robert L. Mott, 2015)

Criterio:

Si $N_R < 2000$, el flujo es laminar.

Si $N_R > 4000$, el flujo es turbulento.

$$R_e = \frac{V \times D \times \rho}{\eta} = \frac{1.88 \frac{m}{s} \times 0.15m \times 996kg/m^3}{0.0008 Pa \cdot s} = 3,52 \times 10^5 \quad \text{ec. 2.11}$$

Donde:

Densidad (ρ) del agua a 30° C, 996.0 kg/m³.

Viscosidad dinámica (η) 8.00*10⁻⁴ Pa*s

Tabla 2.9 Determinación del número de Reynolds para todos los diámetros de tuberías de la red.

Diámetro (m)	Velocidad (m/s)	Número de Reynolds
0,075	7,55	7,05*10 ⁵
0,1	4,24	5,28*10 ⁵
0,125	2,72	4,23*10 ⁵
0,15	1,89	3,52*10 ⁵

Los resultados obtenidos en la tabla 2.9 de muestran que, en el sistema propuesto, todas las zonas presentan un flujo turbulento. Para el flujo turbulento de fluidos en tuberías circulares, se recomienda usar la ecuación de Darcy (Ec 2.12), para calcular la pérdida de energía debida a la fricción (Robert L. Mott, 2015).

$$h_l = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g}, m \quad \text{ec. 2.12}$$

Donde:

h_L = pérdida de energía debida a la fricción (m).

L = longitud de la tubería (m).

D = diámetro de la tubería (m o ft)

v = velocidad de flujo promedio (m/s o ft/s)

f = factor de fricción (adimensional)

2.5.2.5 Determinación del factor de fricción.

Para determinar el factor de fricción en tuberías de acero comercial, se utilizará el Diagrama de Moody, para ello es necesario:

Determinar en la tabla 2.10 el coeficiente de rugosidad para calcular la rugosidad relativa mediante la ecuación, Ec. 2.13.

$$\frac{D}{\varepsilon} = \frac{0.15}{4.6 \times 10^{-5}} = 3\,280,67 \quad \text{ec. 2.13}$$

Para tuberías de acero comercial, tabla 2.10 Rugosidades de tuberías – Valores de diseño (Robert L. Mott, 2015).

Tabla 2.10 Rugosidades de tuberías – Valores de diseño (Robert L. Mott, 2015)

Material	Rugosidad ε (m)	Rugosidad ε (ft)
Vidrio	Liso	Liso
Plástico	3.0×10^{-7}	1.0×10^{-6}
Tubo estirado; cobre, latón, acero	1.5×10^{-6}	5.0×10^{-6}
Acero, comercial o soldado	4.6×10^{-5}	1.5×10^{-4}
Hierro galvanizado	1.5×10^{-4}	5.0×10^{-4}
Hierro dúctil —revestido	1.2×10^{-4}	4.0×10^{-4}
Hierro dúctil —sin revestir	2.4×10^{-4}	8.0×10^{-4}
Concreto, bien hecho	1.2×10^{-4}	4.0×10^{-4}
Acero remachado	1.8×10^{-3}	6.0×10^{-3}

Cálculo de rugosidad relativa para los otros diámetros de tuberías (Tabla 2.11).

Tabla 2.11 Determinación de la rugosidad relativa. (Elaboración propia)

Diámetro (m)	D/ ε
0,075	1 630,43
0,100	2 173,91
0,125	2 717,39
0,150	3 280,67

Para la determinación del factor de fricción de cada uno de los diámetros del sistema se utiliza el Diagrama de Moody (figura 2.8), a partir de los valores obtenidos en la tabla 2.11. Solo se representa en la imagen el valor obtenido para un diámetro de

tubería de 0.150 m (6 in). En la tabla 2.12 se recogen los resultados obtenidos para todos los diámetros.

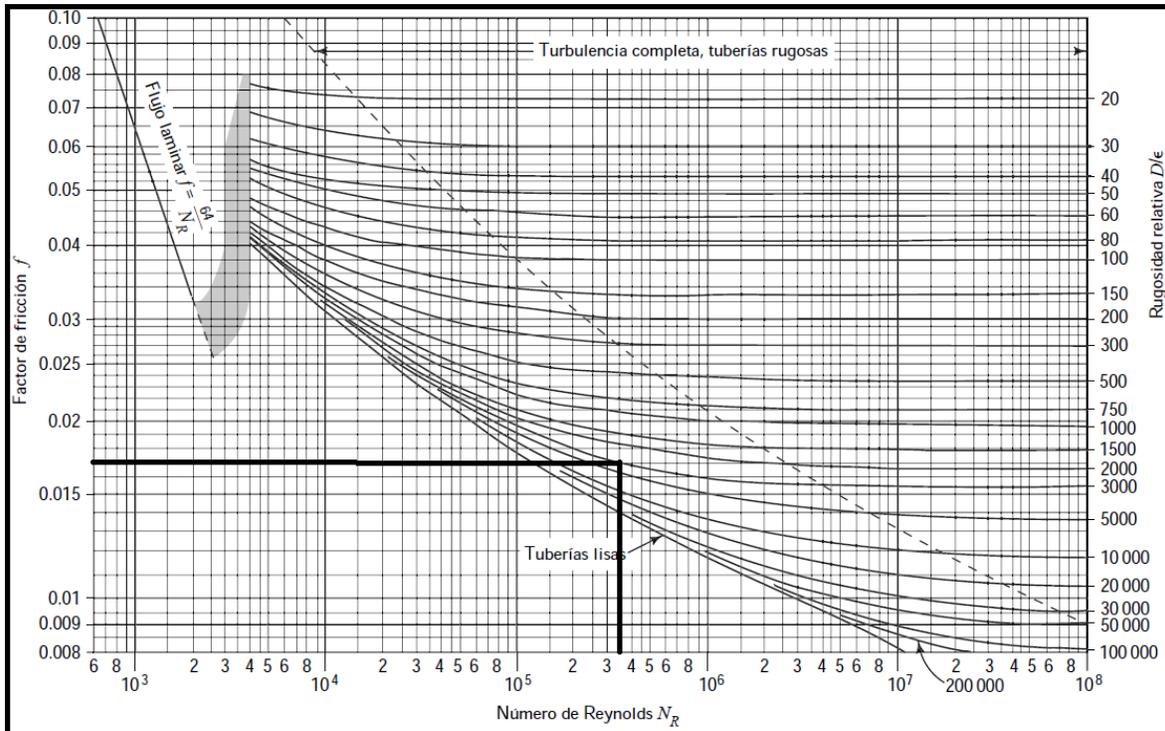


Figura 2.8 Determinación del factor de fricción. Diagrama de Moody (Robert L. Mott, 2015).

Tabla 2.12 factor de fricción para cada diámetro de tubería del sistema (Elaboración propia).

Diámetro	N_R	D/ϵ	Factor fricción
0,075	$7,05 \cdot 10^5$	1 630,43	0,019
0,100	$5,28 \cdot 10^5$	2 173,91	0,018
0,125	$4,23 \cdot 10^5$	2 717,39	0,017
0,150	$3,52 \cdot 10^5$	3 260,87	0,017

2.5.2.6 Cálculo de las pérdidas de entrada (h_1).

Cuando un fluido fluye desde un depósito o tanque relativamente grande hacia una tubería, el fluido se debe acelerar desde una velocidad insignificante hasta la velocidad de flujo que circula en la tubería. La facilidad con que se lleva a cabo la aceleración determina la cantidad de pérdida de energía y, por lo tanto, el valor del coeficiente de resistencia de entrada depende de la geometría de la entrada (Robert L. Mott, 2015).

Para determinar la magnitud de las pérdidas de entradas, se hará uso de la ecuación Ec. 2.14.

La unión de la tubería de succión a los tanques Tk-1 y Tk-2, se realiza de forma que no sobresale más allá de la pared metálica del mismo, clasificando como entradas con bordes cuadrados. Para entrada con bordes cuadrados, $k = 0.5$ figura 2.9.

$$h_1 = k \times \frac{V_s^2}{2g} = k \times \frac{Q^2}{2gA^2} = 81,61 \times Q^2 \quad \text{ec. 2.14}$$

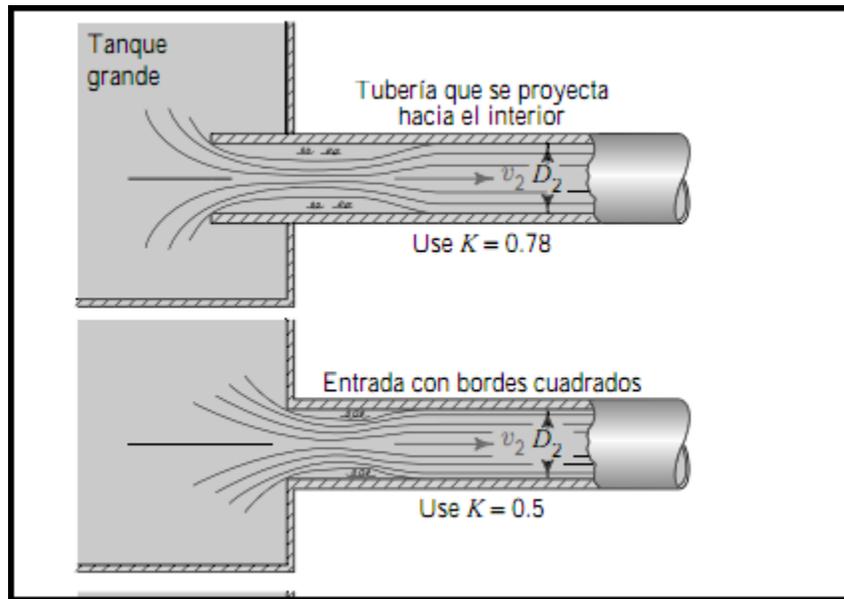


Figura 2.9 Coeficientes de resistencia de entrada (Robert L. Mott, 2015)

2.5.2.7 Determinación de las pérdidas de fricción en los tramos rectos

En este apartado se determinan las pérdidas en tramos rectos para los diferentes diámetros. En el caso del tramo recto de la succión, utilizando la ecuación Ec.2.15 y para la descarga la Ec. 2.16.

$$h_2 = f_s \times \frac{L}{D} \times (V_s^2/2g) = f_s \times \frac{L}{D} \times \frac{Q^2}{2gA^2} = 250,17 \times Q^2 \quad \text{ec. 2.15}$$

Tabla 2.13 Pérdidas de fricción en tramos rectos en la línea descarga.

Diámetro (m)	Longitud (m)	Línea	Factor de fricción	Pérdidas por fricción
4" (0,100)	1,73	Descarga	0,018	257,30 * Q ²
5" (0,125)	20,71	Descarga	0,017	953,24 * Q ²
6" (0,150)	7,80	Descarga	0,017	144,24 * Q ²
Total				1 354,78 * Q ²

$$h_6 = f_d * \frac{L}{D} * (V_s^2/2g) = f_d * \frac{L}{D} * \frac{Q^2}{2gA^2} = 1\,354.78 \times Q^2 \quad \text{ec. 2.16}$$

2.5.2.8 Determinación de las pérdidas de energía en válvulas.

En este apartado se determinan las pérdidas de energía en las válvulas de la línea de la succión. Para tres válvulas de globo de 6" (0,150 m).

Tabla 2.14. Para válvulas de globo, $L_e/D = 340$ ft.

Tabla 2.15 $f_t = 0,015$ para tuberías 0,125 m y 0,150 m de diámetro.

$$h_3 = f_{st} * \frac{L_e}{D} * (V_s^2/2g) = (f_{st} * \frac{L_e}{D} * \frac{Q^2}{2gA^2}) * 3 = 2\,497,17 \times Q^2 \quad \text{ec. 2.17}$$

Cálculo de las pérdidas de energía en las válvulas de la descarga.

Tabla 2.14 Resistencia equivalente de válvulas y accesorios. (Robert L. Mott, 2015).

TABLA 10.4 Resistencia en válvulas y accesorios expresada como la longitud equivalente en diámetros de tubería, L_e/D	
Tipo	Longitud equivalente en diámetros de tubería L_e/D
Válvula de globo —totalmente abierta	340
Válvula de ángulo —totalmente abierta	150
Válvula de compuerta —totalmente abierta	8
—abierta $\frac{3}{4}$	35
—abierta $\frac{1}{2}$	160
—abierta $\frac{1}{4}$	900
Válvula de retención —tipo oscilante	100
Válvula de retención —tipo bola	150
Válvula de mariposa —totalmente abierta, 2-8 in	45
—10-14 in	35
—16-24 in	25
Válvula de pie —tipo disco de vástago	420
Válvula de pie —tipo disco de bisagras	75
Codo estándar de 90°	30
Codo de 90° y radio largo	20
Codo de 90° para calle	50
Codo estándar de 45°	16
Codo de 45° para calle	26
Doble de retorno cerrado	50
Te estándar —con flujo por la línea principal	20
—con flujo por la ramificación	60

Tabla 2.15 Factor de fricción en la zona de turbulencia completa para tuberías de acero comercial. (Robert L. Mott, 2015).

TABLA 10.5 Factor de fricción en la zona de turbulencia completa para tubería de acero comercial, cédula 40, nueva y limpia					
Tamaño nominal de la tubería		Factor de fricción, f_f	Tamaño nominal de la tubería		Factor de fricción, f_f
Estados Unidos (in)	Métrico (mm)		Estados Unidos (in)	Métrico (mm)	
½	DN 15	0.026	3, 3½	DN 80, DN 90	0.017
¾	DN 20	0.024	4	DN 100	0.016
1	DN 25	0.022	5, 6	DN 125, DN 150	0.015
1¼	DN 32	0.021	8	DN 200	0.014
1½	DN 40	0.020	10-14	DN 250 a DN 350	0.013
2	DN 50	0.019	16-22	DN 400 a DN 550	0.012
2½	DN 65	0.018	24-36	DN 600 a DN 900	0.011

$$h_7 = f_{dt} * \frac{L_e}{D} * (V_s^2 / 2g) = (f_{dt} * \frac{L_e}{D} * \frac{Q^2}{2gA^2}) = 34608,79 * Q^2 \quad \text{ec.2.18}$$

Tabla 2.16 Cálculos de las pérdidas de energía en las válvulas de la descarga

Diámetros (m)	L_e/D	f_{dt}	Tipo de válvula	Unidades	Pérdidas por fricción
3" (0,075)	340	0,017	Válvula de globo	1	15 093,99 * Q^2
4" (0,100)	340	0,016	Válvula de globo	3	13 484,70 * Q^2
5" (0,125)	340	0,015	Válvula de globo	3	5 178,13 * Q^2
6" (0,150)	340	0,015	Válvula de globo	1	832,39 * Q^2
6" (0,150)	8	0,015	Válvula de compuerta	1	19,59 * Q^2
Total en pérdidas de energía					34 608,79 * Q^2

2.5.2.9 Determinación de las pérdidas de energía en los codos.

Determinación de las pérdidas de energía en los codos de la línea de la succión.

Codos de 90° y radio largo, 8 unidades de 6" (0,150 m) de diámetro.

De acuerdo con las tablas 2.14 y 2.15 de este documento: el factor de fricción en la zona de turbulencia completa para tuberías de acero comercial de 0,150 m (6") es de, $f_{st} = 0,015$ y la resistencia expresada como la longitud equivalente en diámetros de tubería, $L_e/D=20$. Entonces:

$$h_4 = f_{st} * \frac{L_e}{D} * \frac{V_d^2}{2g} = f_{st} * \frac{L_e}{D} * \frac{Q^2}{2gA^2} * 8 = 391,71 * Q^2 \quad \text{ec.2.19}$$

Cálculo de las pérdidas de energía en los codos de la línea de la descarga.

$$h_8 = f_{dt} * \frac{L_e}{D} * \frac{V_d^2}{2g} = f_{st} * \frac{L_e}{D} * \frac{Q^2}{2gA^2} = 3\,668,15 * Q^2 \quad \text{ec.2.20}$$

En la tabla 2.17 se exponen los resultados obtenidos al determinar las pérdidas de energía en los codos por fricción, para los diferentes diámetros de las tuberías.

Tabla 2.17 Cálculos de las pérdidas de energía en los codos de la descarga

Accesorios	Diámetros (m)	f_{dt}	L_e/D	Unidades	Pérdidas por fricción
Codos de 90° y radio largo	3" (0,075)	0,017	20	3	2 663,65 * Q ²
Codos de 90° y radio largo	5" (0,125)	0,015	20	7	710,72 * Q ²
Codos de 90° y radio largo	6" (0,150)	0,015	20	6	293,78 * Q ²
Total en pérdidas de energía					3 668,15 * Q ²

2.5.2.10 Cálculo de la pérdida de energía en la Te de la línea de la succión y descarga.

Te estándar – con flujo por la línea principal, 1 unidad de 6" (0,150 m) de diámetro.

A partir de las ecuaciones ec. 2.21 y 2.22, se determinan las pérdidas por fricción tanto en la línea de la succión como en la descarga.

Para la línea de la succión:

$$h_5 = f_{st} * \frac{L_e}{D} * (V_s^2/2g) = f_{st} * \frac{L_e}{D} * \frac{Q^2}{2gA^2} = 48,96 * Q^2 \quad \text{ec.2.21}$$

Para línea de la descarga:

En la tabla 2.18 se representan los resultados obtenidos en pérdidas por fricción para los diferentes diámetros de tuberías en la línea de la descarga y el valor dado al final de la ec 2.22 es la sumatoria de las pérdidas para los diferentes diámetros de Te, en la descarga.

$$h_9 = f_{dt} * \frac{L_e}{D} * \frac{V_d^2}{2g} = f_{dt} * \frac{L_e}{D} * \frac{Q^2}{2gA^2} = 1\,920,40 * Q^2 \quad \text{ec. 2.22}$$

Tabla 2.18 Cálculos de las pérdidas de energía en las Tes de la línea de la descarga

Accesorios	Diámetros (m)	f_{dt}	L_e/D	Unidades	Pérdidas por fricción
Tes estándar	4" (0,100)	0,016	20	5	1 322,03 * Q ²

Tes estándar	5" (0,125)	0,015	20	3	304,59 * Q ²
Tes estándar	6" (0,150)	0,015	20	6	293,78 * Q ²
Total en pérdidas de energía					1 920,41 * Q ²

2.5.2.11 Determinación de las pérdidas de energía en los cambios de diámetros.

En la tabla 2.19 se reflejan los resultados de los cálculos realizados, para determinar las pérdidas de energía en los cambios de diámetros por fricción, en la descarga. Se hará haciendo uso de la ecuación ec. 2.23.

Tabla 2.19 Cálculo de las pérdidas de energía en los cambios de diámetros en la línea de descarga.

Tipo	Grados	Relación	Cociente D ₁ /D ₂	k	Cantidad	Pérdidas
3" < 6"	60°	Ampliación	2	0,675	1	1 762,70 * Q ²
3" < 5"	60°	Ampliación	1,5	0,57	1	192,91 * Q ²
6" > 3"	60°	Reducción	2	0,04	2	13,06 * Q ²
Total en pérdidas de energía						1 968,67 * Q ²

$$h_{10} = k \times \frac{v_1^2}{2g} = k \times \frac{Q^2}{2gA^2} = 1 968,67 * Q^2 \quad \text{ec. 2.23}$$

Las k fueron determinadas a través de los gráficos de las figuras 2.10 y 2.11, para contracción gradual y reducción gradual.

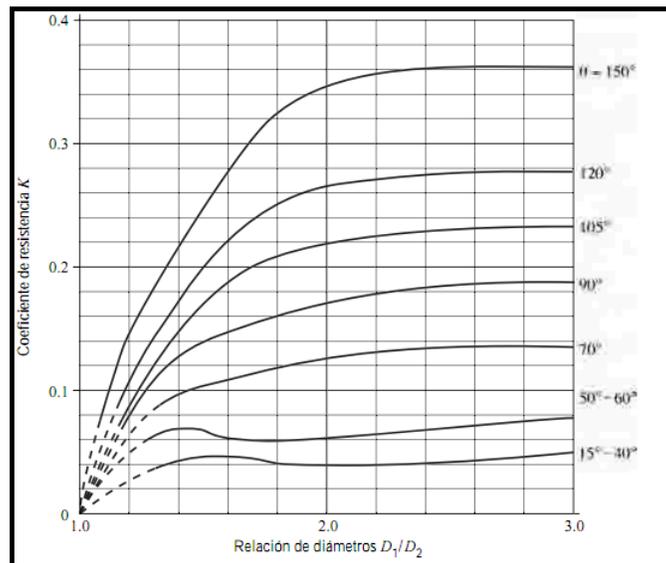


Figura 2.10 Coeficiente de resistencia de contracción gradual $\Phi \geq 15^\circ$ (Robert L. Mott, 2015)

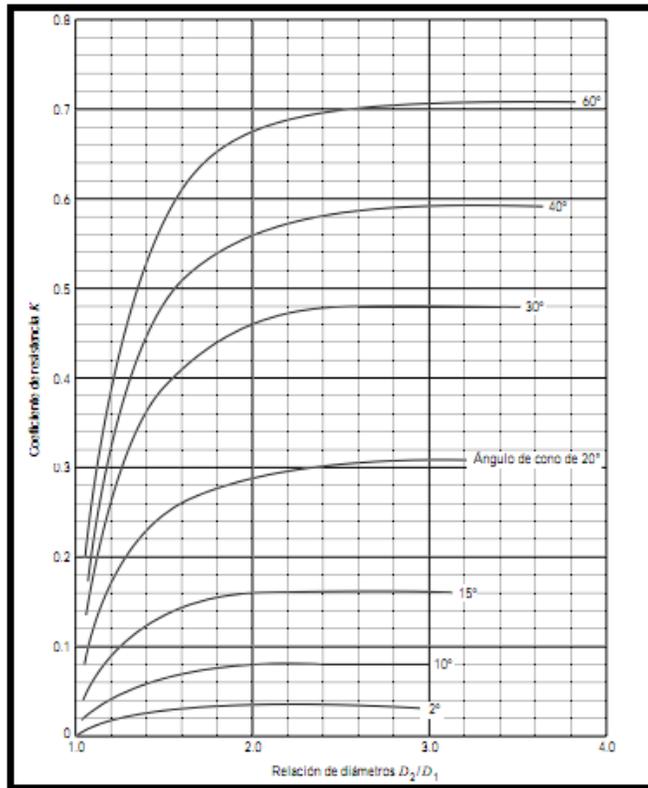


Figura 2.11 Coeficiente de resistencia ampliación gradual (Robert L. Mott, 2015)

2.5.2.12 Cálculo de las pérdidas de salida (h_{11}).

Cuando un fluido fluye de una tubería a un depósito o tanque grandes, como se muestra en la figura 2.12, su velocidad disminuye hasta cerca de cero. En el proceso, la energía cinética que posee el fluido en la tubería, indicada por la carga de velocidad ($V_1^2/2g$), se disipa. Por lo tanto, la pérdida de energía para esta condición es como se expresa en la ecuación Ec.2.24.

Esto se conoce como la pérdida de salida. Se usa el valor de $K = 1.0$, independientemente de la forma de la salida donde la tubería se conecta a la pared del tanque (Robert L. Mott, 2015).

$$h_{11} = k \times \frac{V_1^2}{2g} = k \times \frac{Q^2}{2gA^2} = 338,43 * Q^2 \quad \text{ec. 2.24}$$

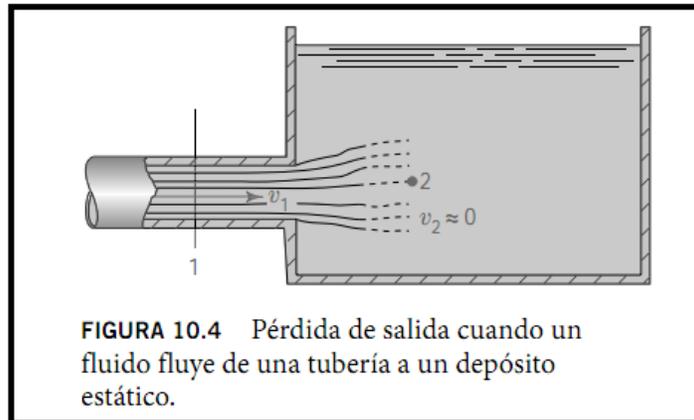


Figura 2.12 Pérdida de salida cuando el fluido fluye de una tubería a un depósito estático (Robert L. Mott, 2015).

2.5.2.13 Pérdidas de energía totales del sistema.

En este epígrafe se determinarán las pérdidas totales de energía por fricción del sistema en el modo de operación seleccionado (ver subepígrafe 2.5.2), las funciones obtenidas en la determinación de las pérdidas individuales de sistema, tributarán a la ecuación (Ec. 2.6), y esta formará parte, una vez determinada, de la ecuación de la carga total de la bomba (Ec. 2.3).

$$h_l = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6 + h_7 + h_8 + h_9 + h_{10} + h_{11} \quad \text{ec. 2.6}$$

Entonces:

$$h_l = 47\,128,87 * Q^2 \quad \text{ec. 2.26}$$

2.5.2.14 Determinación de la carga total de la bomba.

Considerando el resultado de la ec. 2.26 en la ec. 2.3, queda la función de la curva del sistema como:

$$H_b = 1,86 + 47\,128,87 * Q^2 \quad \text{ec. 2.27}$$

Los valores obtenidos en carga del sistema en metros, para cada una de las tasas de flujo, se exponen en la tabla 2.20 y en la figura 2.13, se presenta la gráfica caudal vs carga del sistema donde se puede ver el comportamiento de las pérdidas respecto al aumento de la energía del fluido.

Tabla 2.20 Valores obtenidos en el cálculo de la carga del sistema (Elaboración propia)

Q (m ³ /h)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Q (m ³ /s)	0.002778	0.005556	0.008333	0.011111	0.013889	0.016667	0.019444	0.022222	0.025	0.027778	0.030555	0.033333	0.036111	0.038889
H _b (m)	2.220649	3.311595	5.129838	7.675379	10.94822	14.94835	19.67579	25.13052	31.31255	38.22187	45.8584947	54.22242	63.31363	73.13215

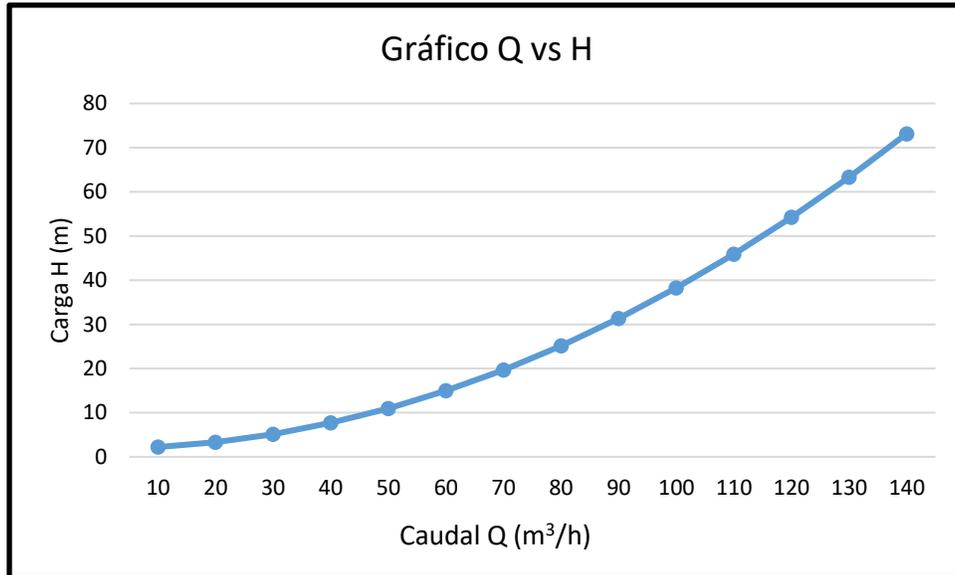


Figura 2.13 Gráfico de la curva del sistema (Elaboración propia)

2.5.2.15 Selección del equipo de bombeo.

Conociendo la carga total de la bomba ($H_b = 54,22$ m) y el caudal máximo de trabajo ($Q = 120$ m³/h), que demanda el laboratorio para calibrar, puede seleccionarse mediante el catálogo de bombas KSB, un equipo de bombeo que satisfaga las exigencias del estudio.

Fue posible consultar gráfico de características de trabajo de diferentes modelos de bombas (figura 2.14), en catálogo de bombas de la KSB.

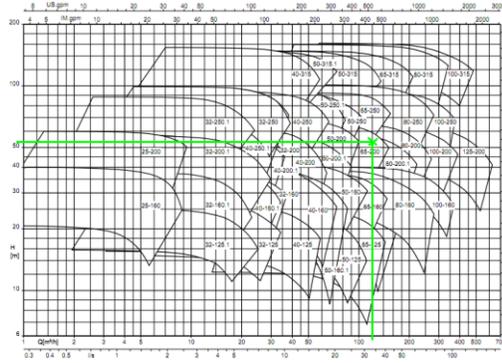


Figura 2.14 Gráfico de características constructivas de bombas KSB a $n = 2900$ rpm (KSB SE & Co. KGaA, 2018)

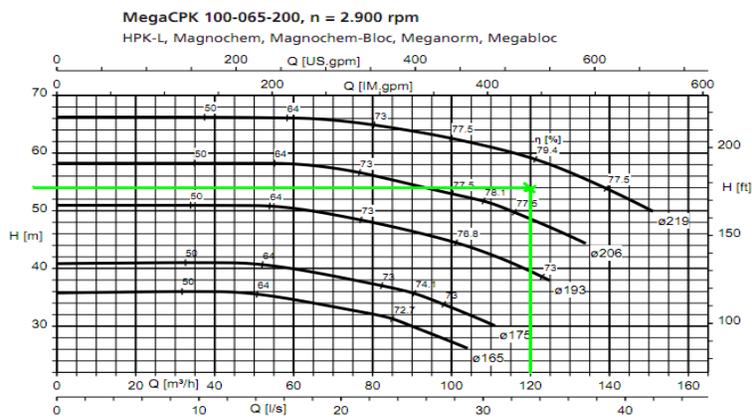


Figura 2.15 Características de trabajo de las bombas 100-065-200 (KSB SE & Co. KGaA, 2018)

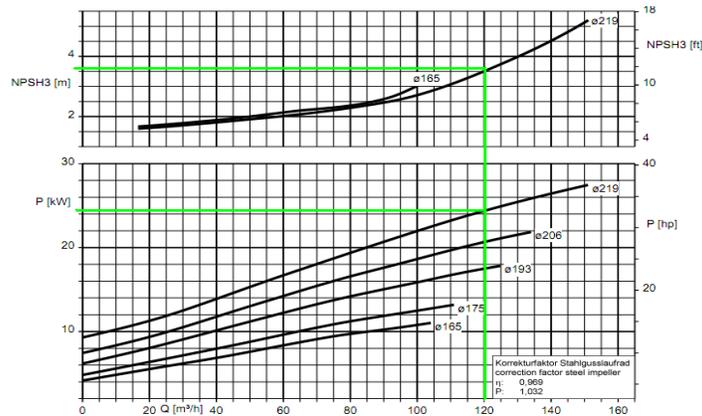


Figura 2.16 Características de trabajo de las bombas 100-065-200 (KSB SE & Co. KGaA, 2018)

La figura 2.14 muestra el proceso de selección general entre varios modelos de bombas KSB.

Las características constructivas del equipo de bombeo que cubre las demandas de funcionamiento del estudio, es una de los modelos 65-200 como se puede precisar

en la figura 2.14. El modelo seleccionado **MegaCPK 100-065-200** características de funcionamiento en las figuras 2.15 y 2.16 y tabla 2.21.

Tabla 2.21 Características de funcionamiento de la bomba MegaCPK 100-065-200 (KSB SE & Co. KGaA, 2018)

Modelo: MegaCPK 100-065-200	
Parámetros	Magnitud
Diámetro impulsor (mm)	219,0
Diámetro de la succión (mm)	100,0
Diámetro de la descarga (mm)	65,0
Potencia (kW)	22,0
Caudal de trabajo a $H_b = 54$ m (m^3/h)	120,0
Caudal máximo a $H_b = 54$ m (m^3/h)	140,0
Velocidad (rpm)	2 900,0
Eficiencia (%)	79,4
NPSH _R (m)	3,5

2.5.2.16 Determinación de la altura neta positiva en la succión (NPSH_d).

Resulta esencial que el diseño del sistema de tuberías que conduce a la bomba, llamado línea de succión, permita el flujo completo de líquido a través de la bomba y en la línea de descarga. El factor principal es la presión del fluido en la entrada de succión de la bomba. El diseño del sistema de tuberías de succión debe proporcionar una presión lo suficientemente alta como para evitar el desarrollo de la cavitación, en la cual se forman burbujas de vapor dentro del fluido que fluye. Las burbujas de vapor tienden a formarse dependiendo de la naturaleza del fluido, de su temperatura y de la presión de succión. (Robert L. Mott, 2015).

Los fabricantes de bombas prueban cada diseño de bomba para determinar el nivel de presión de succión necesario para evitar la cavitación, reportando el resultado como la carga de succión positiva neta requerida (NPSH_R), para la bomba en cada condición operativa de capacidad (caudal) y carga total sobre la bomba. El diseñador de un sistema de bombeo tiene la responsabilidad de asegurar que la carga de succión positiva neta disponible (NPSH_d), sea significativamente superior a la NPSH_R. (Robert L. Mott, 2015).

El American National Standards Institute (ANSI) y el Hydraulic Institute (HI) han establecido normas en conjunto donde exigen que exista una diferencia mínima del 10 por ciento de la $NPSH_D$ sobre la $NPSH_R$. (Robert L. Mott, 2015)

El valor de la $NPSH_D$ depende de la presión de vapor del fluido que está siendo bombeado, de las pérdidas de energía en la tubería de succión, de la elevación del depósito de fluido y de la presión aplicada al fluido en el depósito.

Esto se puede expresar como:

$$NPSH_D = h_{sp} \pm h_s - h_f - h_{vp} \quad \text{ec.2.28}$$

Donde:

Términos	Valor (m)	Definiciones
$h_{sp} = \frac{P_{sp}}{\gamma}$	10,376	Carga de la presión estática (absoluta) por encima del líquido contenido en el depósito, en metros o pies de líquido.
$h_{vp} = \frac{P_{vp}}{\gamma}$	0,4345	Carga de presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo, expresada en metros.
h_f	4,049	Pérdida de carga en la tubería de succión debida a las pérdidas por fricción y pérdidas menores.
h_s	2,910	Diferencia de elevación, expresada en metros o pies, entre el nivel del fluido contenido en el depósito y la línea central de la entrada de succión en la bomba.

Calculando el NPSH para una tasa de 120 m³/h.

$$NPSH_D = 10,38 + 2,91 - 4,05 - 0,43 = 8,8 \text{ m}$$

Se puede comprobar que:

$$NPSH_D > 1,10 NPSH_R$$

Los resultados obtenidos en el cálculo de $NPSH_D$ demuestran que la configuración propuesta en la línea de succión de la bomba, evita la aparición del fenómeno indeseable de la cavitación. Este fenómeno es causante de la pérdida de la capacidad de bombeo, genera vibraciones y ruidos anormales y daña los componentes del equipo de bombeo.

2.6. Conclusiones Parciales

1. El sistema diseñado cumple con los parámetros de velocidad recomendados para el flujo máximo de 120m³/h generando una carga en el sistema de 54 m para este caudal.

2. Fue seleccionada una bomba modelo MegaCPK 100-065-200 la cual vence la carga máxima calculada para el sistema a un caudal de $120\text{m}^3/\text{h}$, demandando una potencia de 24,1 kW y eficiencia de 79,4 %.
3. Los resultados obtenidos en el cálculo de NPSH_D demuestran que la configuración propuesta en la línea de succión de la bomba, evita la aparición del fenómeno de la cavitación.

CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL, DE SEGURIDAD Y ECONÓMICA DE LA PROPUESTA PARA EL REDISEÑO DEL LABORATORIO DE FLUJOMETRÍA EN REFINERÍA CIENFUEGOS.

Introducción al capítulo.

Este capítulo iniciará con una breve descripción del funcionamiento del sistema de agua contra incendio, se explicarán las operaciones y medidas que se toman en la planta de abastecimiento de aguas para conectar al sistema de agua contra incendios la estación de calibración y lo que representa en cuanto a la seguridad de la Refinería Cienfuegos.

Se presentan además los beneficios que traería a la empresa, al ecosistema de la bahía y al medio ambiente en general, la ejecución del estudio de diseño del laboratorio de flujometría. Se estimarán los gastos de la inversión y el tiempo en que se recupera la inversión, además se evaluará la factibilidad de emplear un variador de frecuencia para la regulación del caudal en las calibraciones de los caudalímetros máxicos.

Se hará una comparación de los gastos en el importe de agua de la empresa mediante el actual sistema de calibración y el propuesto en este trabajo, además de tratar sobre el destino del agua empleada una vez que haya perdido sus características.

3.1. Características del sistema de agua contra incendios.

Por la complejidad de la Refinería y el peligro potencial de incendio se hace necesario garantizar la seguridad de la extinción de estos. Para cumplir con esta premisa existen los Tk-120/12-2, Tk-120/12-3 destinados para el almacenaje del agua que garantiza la cobertura de un evento de este tipo por espacio de 3 horas. Cada tanque tiene una capacidad de 10 000 m³ y su llenado se realiza con agua procedente de la Potabilizadora de Abreus, el control de los niveles se realiza mediante instrumentos con señales in situ o desde el panel. Existe también el tanque 1255 en el título 128/2 con capacidad de 20 000 m³ que almacena agua como reserva de incendios para utilizarlo ante cualquier eventualidad. El sistema de bombeo está constituido por 2 motobomba eléctricas del tipo Jockey con una

capacidad de 56,0 m³/h, una presión de 10,19 kg/cm², de 440 Vac, 60 Hz, 37 kW y 3500 rpm para el mantenimiento primario de la presión, 3 motobombas del tipo D-1250-125 con capacidad para 1150 m³/h, 13 kg/cm² de presión en la descarga, 6000 Vac, 60 Hz, 550 kW y 1800 rpm, más 1 motobomba de combustión interna de diésel del tipo RDL300/500 con capacidad para 1250 m³/h y 12,5 kg/cm² de presión en la descarga, destinadas todas al respaldo del sistema.

El sistema contra incendios debe permanecer macizado en toda la Refinería, para garantizar esto están instaladas dos bombas JOCKEY (P-122-1240/C y 1240/D), una de trabajo y la otra de reserva. Estas bombas se ponen en funcionamiento de forma automática cuando la presión disminuye hasta 6 kgf/cm² y se mantiene en operación hasta alcanzar los 11 kgf/cm² en la línea.

En tiempos de operación normal, la arrancada excesiva de esta bomba es indicio de incidentes negativos que inciden en la pérdida de presión en el sistema, estas incidencias deben ser informadas al Jefe del Área y al Despacho Central para ser investigadas.

3.2. Operaciones en el sistema de bombeo de Refinería Cienfuegos S.A. para la realización de los trabajos de calibración y certificación de los caudalímetros másicos del tipo Coriolis.

La Dirección AIT, solicita a la Gerencia de Seguridad e Higiene Ambiental (SHA), autorización para utilizar el agua del sistema contra incendio en la unidad móvil de calibración para certificar los 24 caudalímetros másicos de refinería que necesitan certificación legal otorgada por la Oficina Territorial de Metrología (OTM).

Aprobada la solicitud, informado el cuerpo de bomberos de los trabajos que se necesitan realizar, se informa a todas las plantas dentro de Refinería bajo las condiciones con que la planta funcionará y las medidas de seguridad que deben poner en funcionamiento.

- Se selecciona el sistema, en modo de operación manual, de esta forma inhibe el arranque automático de las bombas en caso de una disminución de la presión por debajo de los 6.8 kgf/cm².

- Es chequeada la presión y el caudal en la línea del sistema contra incendio (el caudal es consecuencia de las pérdidas ocasionadas por salideros en la línea), mediante la pantalla de visualización de los parámetros del sistema. Ver figura 3.1.



Figura 3.1 Monitor para la visualización de los parámetros del sistema (Elaboración propia).

El caudal que se necesitará garantizar en el laboratorio de flujometría con el sistema de bombeo, es la sumatoria de las pérdidas en el sistema de tubería más, el valor máximo del flujo en la línea de medición del caudalímetro hacer certificado. El valor obtenido define, cuál de las bombas arrancar para suplir la demanda del sistema.

Cuando el valor total demandado supera los 112 m³/h, que es la capacidad sumada de las 2 bombas del tipo Jockey, se hace necesario suplir la demanda con una de las bombas del tipo D-1250-125 con capacidad para 1150 m³/h. Ver anexo 2. En esta situación, es estrangulada la válvula de descarga de la bomba casi totalmente, permitiendo sólo la circulación 120 m³/h, el 10 % de la capacidad de la bomba y menos de un 20% de eficiencia ($\eta_b < 20 \%$), lo que hace ineficiente el trabajo del sistema de bombeo, considerando que la bomba a un caudal de 1150 m³/h (Q_n) alcanza su eficiencia máxima de 70%. La norma API 610 2021, recomienda no operar la bomba fuera del rango de 0,7 Q_n a 1,2 Q_n (Smith, Simon, 2021), en el

gráfico de la figura 3.2 Características gráficas de la bomba D1250-125, puede observarse la zona de trabajo según recomendaciones del fabricante y como el punto de operación de la bomba a $120 \text{ m}^3/\text{h}$, está muy desplazado de la zona optima de operación.

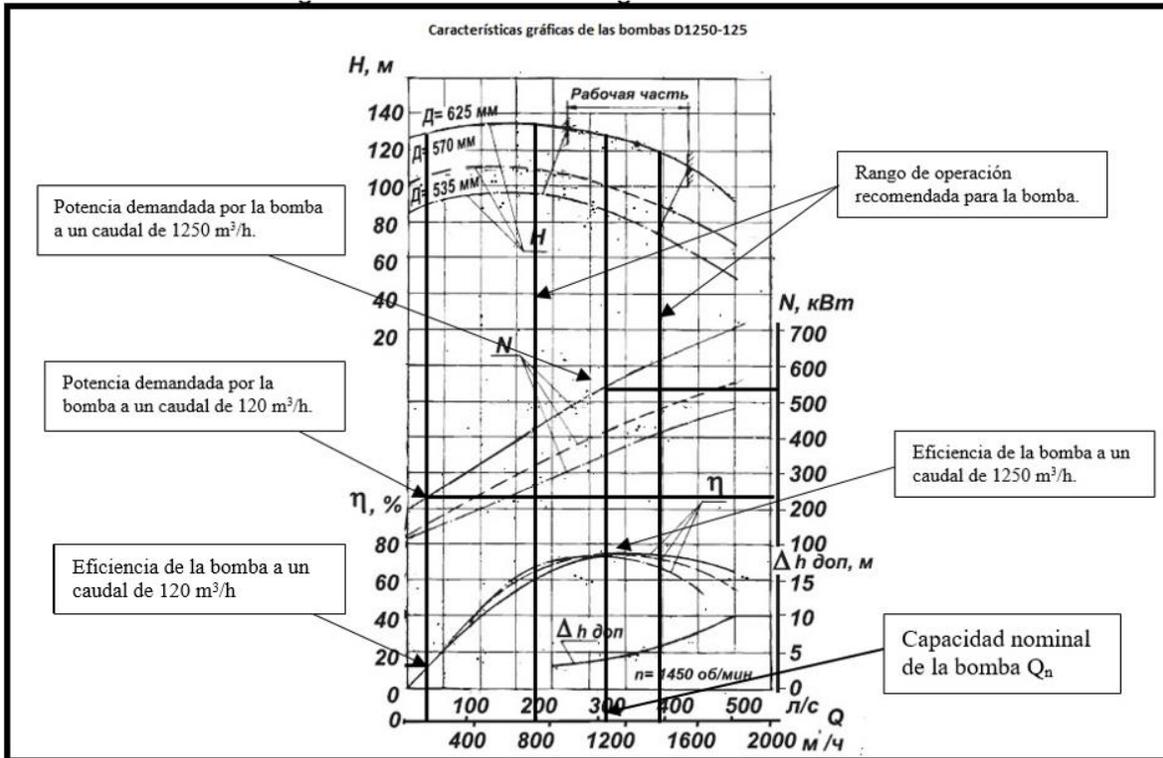


Figura 3.2 Características gráficas de la bomba D-1250-125 (Добро пожаловать на официальный сайт УПК Фарватер!, s.f.).

- Desde la unidad móvil de calibración y en constante comunicación con el operador de la estación de bombeo, se abre la válvula de descarga a la red de canalización pluvial que vierte a la bahía y la de admisión de la estación.
- En la planta se arranca la bomba previamente seleccionada y se verifican los parámetros del sistema.
- Mediante la válvula de entrada a la estación se regula por el método de estrangulamiento, el caudal a los niveles que demande los instrumentos a certificar.
- Al termino de los trabajos se regresa el sistema de agua contra incendio a modo automático, se devuelven los permisos e informan a todas las plantas

el termino de los trabajos y el restablecimiento de las condiciones de seguridad de la planta.

3.3. Beneficios para la empresa del diseño del laboratorio de flujometría.

La configuración desarrollada en el proyecto permitirá la reutilización del agua empleada en las calibraciones, la protección del ecosistema de la bahía, brindar mayor seguridad tecnológica (no se usará el sistema contra incendio), disminuirán los tiempos de operación, y humanizar el trabajo de operarios y técnicos al aprovecharse todas las potencialidades de la grúa del taller, tributando todo a un aumento de la calidad de las calibraciones y de la disponibilidad de los instrumentos en la planta. En el anexo 15 se presenta una vista en 3D del laboratorio de flujometría una vez terminados los trabajos.

Está previsto el llenado de los tanques Tk-1 y Tk-2 a través de la actual tubería de entrada aprovechando la presión en la red del sistema agua contra incendio. La limpieza y cambio del agua se realizará desde dos válvulas dispuestas en la parte inferior de los tanques (figura 3.3), con conexión a la antigua tubería de descarga a la red pluvial que desemboca en la bahía, pero una vez ejecutado este proyecto se estima, que la limpiezas y cambios de agua no sean necesario a no menos de 3 años, permitiendo planificar el uso del carro fosa de la fábrica para evacuar el agua hacia las piscinas de residuales, que luego de un proceso de descontaminación será utilizada nuevamente.

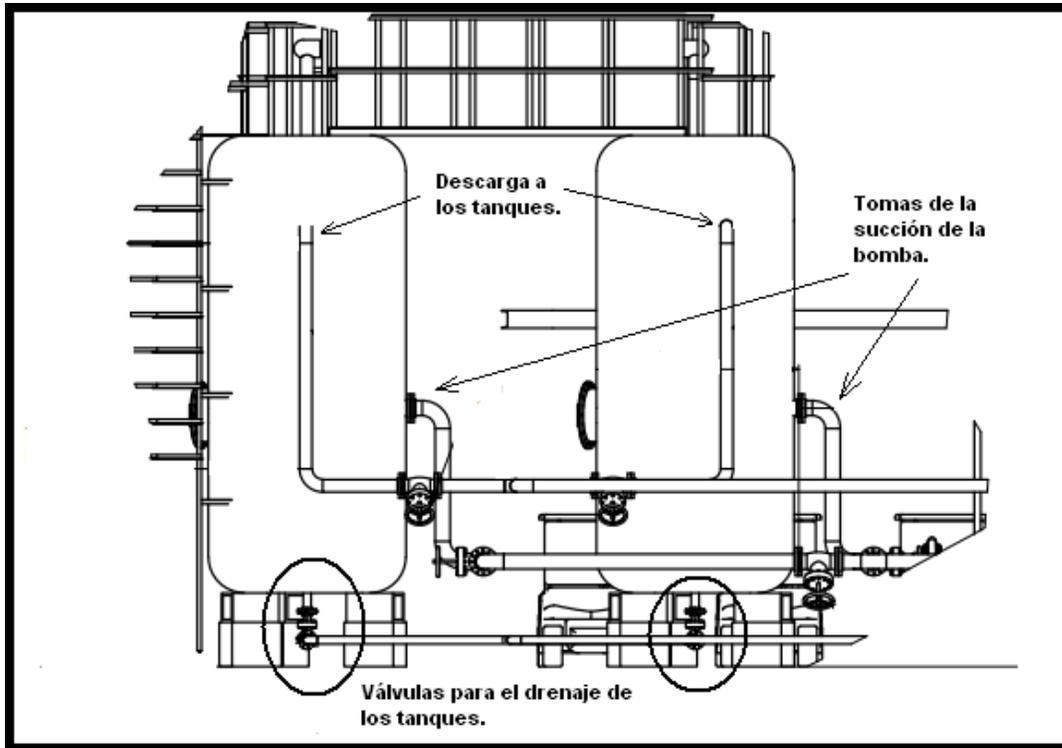


Figura 3.3 Tanques para la recirculación del agua del laboratorio de flujometría.
Elaboración propia.

La bomba podrá succionar desde uno de los dos tanques, desde ambos en paralelo o succionar de uno y descargar en el otro, la configuración dependerá de las necesidades propias o intereses del taller. La ventaja principal radica, en que se podrán realizar operaciones de mantenimiento o reparación en uno de los tanques sin que se afecte la programación de las calibraciones.

El modelo de bomba centrífuga que se muestra en la figura 3.4, garantizará el caudal de operación de la estación con un máximo de $120\text{m}^3/\text{h}$ y $5,786\text{ kPa}$ de presión a una potencia máxima de $24,1\text{ kW}$ (en ocasiones ha sido necesario el uso de una de las motobombas de 630 kW), la regulación del flujo se establecerá estrangulando la válvula de compuerta dispuesta en la descarga de la bomba o con el empleo de un variador de frecuencia (más adelante se evaluará si es factible su uso).

El fluido recirculará entre los tanques y el circuito que forman los patrones y los instrumentos de medición. La disposición de los caudalímetros permitirá la conexión y desconexión del circuito, mientras se realizan calibraciones (actualmente es

imposible, ya que estos son conectados en serie), lográndose mayor operatividad y rapidez en los trabajos. Ver anexo 17.

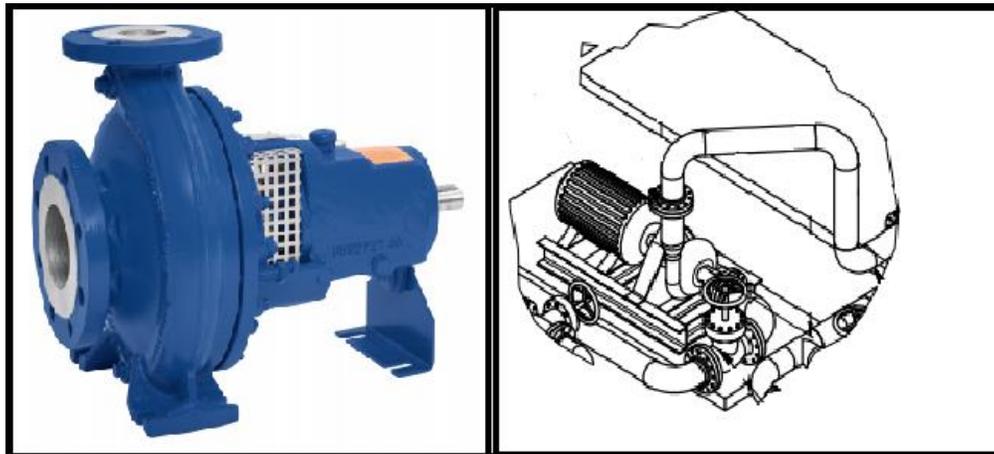


Figura 3.4 bomba MegaCPK 100-065-200

El costo estimado de los elementos necesarios para la ejecución del proyecto es de 177452.00 cup, como referencia se utilizaron documentos que avalan compras de accesorios, válvulas y bombas similares, realizadas por la empresa a diferentes suministradores. Ver anexo 18.

3.4. Evaluación del empleo de un variador de frecuencia para la regulación del caudal.

El sistema de bombeo propuesto no trabajará a flujo constante. Una medida común para regular el flujo es modificar el porcentaje de apertura de las válvulas a la salida de la bomba. Sin embargo, una de las medidas que tienen mayor impacto en la disminución de consumo de energía eléctrica es el control del gasto por medio del uso de variadores de frecuencia. Esto se explica mediante las leyes de semejanzas que, para el caso de bombas centrífugas, expresan la relación matemática que existe entre el caudal, la velocidad, la altura y el consumo de energía. (Rodríguez, 2019)

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad \text{ec. 3.1}$$

$$\frac{Hb_1}{Hb_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2} \quad \text{ec. 3.2}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{n_1^3}{n_2^3}$$

ec. 3.3

Donde:

- Q₁ Caudal a máxima frecuencia de rotación de la bomba.
- Q₂ Caudal a frecuencia de rotación variable de la bomba.
- Hb₁ Carga del sistema a máxima frecuencia de rotación de la bomba.
- Hb₂ Carga del sistema a diferentes frecuencias de rotación.
- P₁ Potencia de la bomba a frecuencia de rotación máxima.
- P₂ Potencia de la bomba a diferentes frecuencias de rotación.
- n₁ Frecuencias de rotación máxima.
- n₂ Frecuencias de rotación variable.

Analizando las expresiones anteriores se puede observar que si se disminuye la velocidad en 50%, el gasto se reducirá también en 50%, la altura en 75% y la potencia en 87,5%.

El uso de variadores de frecuencia en los motores tiene muchas ventajas financieras, operativas y medioambientales ya que supone una mejora de la productividad, incrementa la eficiencia energética y a la vez alarga la vida útil de los equipos, previniendo el deterioro y evitando paradas inesperadas que provocan tiempos de improductividad.

Aunque el ahorro potencial es atractivo, se debe hacer un análisis costo-beneficio antes de instalar un variador de frecuencia, puesto que normalmente requieren de una inversión considerable.

3.4.1. Selección del variador de frecuencia.

Es seleccionado el modelo ST500 de la firma SOURCETRONIC, con un costo de 1280,00 €. (SOURCETRONIC, 2022), que a la actual tasa de cambio en Cuba significarían 30 720,00 CUP. Ver figura 3.5



Figura 3.5 Variador de frecuencia ST500. (SOURCETRONIC, 2022)

Algunas de las características técnicas se relacionan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Características técnicas del variador de frecuencia ST500 (SOURCETRONIC, 2022)

Características técnicas del variador ST500	
Potencia	30 kW
Corriente de entrada	46,5 A
Corriente de salida nominal	45,0 A
Voltaje: 440 Vac \pm 10% red trifásica/motor trifásico.	
Frecuencia: 60 Hz	
Velocidad del motor ajustada por potenciómetros.	
Capacidad de sobre carga: 150% en 1 min/180% en 1 seg.	
150 % de torque cerca de 0 Hz	
Compensación automática de deslizamiento.	
Rampa de arranque/ parada lineal: 0.0 – 6500.0 seg.	
16 velocidades fijas ajustables y seleccionadas libremente mediante señales de entradas.	
Frecuencia de salida: 0 – 400 Hz	
Normas de seguridad: EN61800-5-1: 2007	

3.4.2. Comparación de los gastos de energía eléctrica en el sistema de bombeo con el uso del variador y por el método de estrangulación.

Para la verificación y calibración de los caudalímetros, se hace circular a través de ellos, un flujo del 25%, 50%, 75% y 100% del caudal al cual operan estos instrumentos en la planta, por consiguiente 30, 60, 90 y 120m³/h serían las tasas a evaluar.

En la tabla 3.2 se define el significado de cada abreviatura empleada en las tablas y figuras de este subepígrafe.

Tabla 3.2 Leyenda de las tablas 3.4, 3.5 y las figuras 3.7 y 3.8

Etiqueta	Definición
Hb	Carga del sistema en metros.
Regulación B, C y D Hb (m)	Regulación de la válvula de compuerta para el 30, 50 y 90% de caudal de trabajo.
η_b	Eficiencia de la bomba para diferentes régimen de funcionamiento.
Ha	Carga total de la bomba.
Pb _x	Potencia de la bomba para diferentes régimen de funcionamiento del sistema.
n _x	Frecuencia de rotación de bomba de la bomba en rpm.
Q _x	Caudal para diferente régimen de funcionamiento del sistema.

Determinación de las curvas de trabajo de la bomba empleando el método de estrangulamiento.

Como se puede apreciar en la figura 2.14 del epígrafe 2.5.2.15 Características constructivas de la bomba seleccionada para el sistema de bombeo propuesto, la máxima eficiencia (79.4%), se logra para una frecuencia de rotación de 2900 rpm, a un flujo de 120 m³/h y una potencia de 24.1 kW. En la tabla 3.3, se determinaron las características de potencia y eficiencia de la bomba para diferentes regímenes de cargas.

El punto de operación óptimo se encuentra a los 120 m³/h, que es la tasa máxima de operación (ver figura 3.6), con 58 m de carga del sistema, asociados este último a pérdidas por fricción en los diferentes elementos que conforman parte de la red, a partir de estos valores se seleccionó una bomba con la mayor eficiencia posible (79.2 %).

Tabla 3.3 Valores de eficiencia y potencia para los diferentes regímenes de carga de la bomba.

Q (m ³ /h)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Q (m ³ /s)	0,0028	0,0056	0,0083	0,0111	0,0139	0,0167	0,0194	0,0222	0,0250	0,0278	0,0306	0,0333
Punto de operación Hb (m)	2,25	3,42	5,38	8,13	11,65	15,96	21,06	26,93	33,60	41,04	49,27	58,28
Regulación B, Hb (m)	2,62	4,90	8,70	14,02	20,86	29,22	39,11	50,51	63,43	77,88		

Regulación C, Hb (m)	3,61	8,86	17,62	29,89	45,66	64,93	87,70					
Regulación D, Hb (m)	8,83	29,76	64,63	113,46	176,24							
Carga de la bomba (m)	66,21	66,20	66,15	66,05	66,00	65,98	65,85	64,30	64,00	62,30	60,50	59,00
Eficiencia de la bomba (%)			50,00	52,00	57,10	64,50	68,50	73,10	75,30	77,50	78,50	79,20
Potencia de la bomba (kW)	10,10	11,20	12,40	14,00	15,20	16,40	18,00	19,40	20,30	22,00	22,50	24,10

Para este caso las variaciones se consideran tomando como método la regulación por estrangulamiento. Entonces:

- Quando la certificación demanda 90 m³/h (75%), deberá cerrarse la válvula de descarga aumentando las pérdidas totales por fricción (h_L), a través de la longitud equivalente en diámetros de tubería (L_e/D) de la ecuación E.c. 2.18, logrando modificar la curva del sistema desde el punto A hasta el B (ver figura 3.6), disminuyendo la potencia utilizada en agregar energía al fluido a costa de la eficiencia (tercera columna tabla 3.4), facturándose 560.62 CUP en 12 horas.
- Para 60 m³/h (60 %) se cierra más la válvula obteniéndose la curva Hb(C), con mayores pérdidas totales, menor eficiencia y una facturación total en 12 horas de 452,91 CUP.
- De la misma forma para 30 m³/h (25%) facturándose en 12 horas 342,44 CUP.

La suma de los importes sería la factura por concepto de consumo eléctrico para 48 horas (4 días) y se estarían dedicando 12 horas a cada régimen de trabajo. El importe total sería de 2 021,55 CUP.

En la tabla 3.4 se relaciona los importes del consumo eléctrico para los diferentes regímenes de trabajo de la estación de calibración cuando se regula por el método de estrangulamiento.

Tabla 3.4 Importe eléctrico en 12 horas para los cuatro modos de operación por estrangulamiento. Elaboración propia.

Caudal (m ³ /h)	120	90	60	30
Hb (m)	58,20	63,43	64,93	64,63
Potencia (kW)	24,10	20,30	16,40	12,40
Eficiencia (%)	79,2	75,30	64,50	50,00

Gasto energético en 12 horas (kWh)	578,4	487,2	393,6	297,60
Factura eléctrica				
Horario del día (\$)	665,56	560,62	452,92	342,45
Importe total en 48 horas (CUP)	2 021,55			

En la tabla 3.5 se ilustra las tarifas por horarios establecidos en la resolución 24 del 25 de noviembre de 2020 por el Ministerio de Finanzas y Precios para el cobro del consumo eléctrico de las industrias en Cuba.

Tabla 3.5 A-1. Tarifa de alta tensión con actividad continúa.

Se aplica a los servicios de consumidores clasificados como de Alta Tensión con actividad continua.
<p>\$ 128.00 mensual por cada kW de demanda contratada durante el horario pico, comprendido entre las 17:00 y las 21:00 horas.</p> <p>Por cada kWh consumido en el horario pico: $(3.0501 \text{ \\$/kWh} * K + 0.7273 \text{ \\$/kWh}) * \text{Consumo pico en kWh}$</p> <p>Por cada kWh consumido en el horario del día: $(1.5282 \text{ \\$/kWh} * K + 0.7273 \text{ \\$/kWh}) * \text{Consumo día en kWh}$</p> <p>Por cada kWh consumido en el horario de la madrugada: $(1.0209 \text{ \\$/kWh} * K + 0.7273 \text{ \\$/kWh}) * \text{Consumo madrugada en kWh.}$</p>
<p>K = Precio promedio ponderado, de los combustibles del mes (\$/ton), dividido por: Precio promedio ponderado de los combustibles, base de la tarifa (\$/ton) generalmente K = 1.499</p>
Los períodos del día para la aplicación de las tarifas son:
<p>a) Día: de las 05:00 horas a las 17:00 horas.</p> <p>b) Pico eléctrico: de las 17:00 horas a las 21:00 horas.</p> <p>c) Madrugada: de las 21:00 horas a las 05:00 horas del día siguiente.</p>

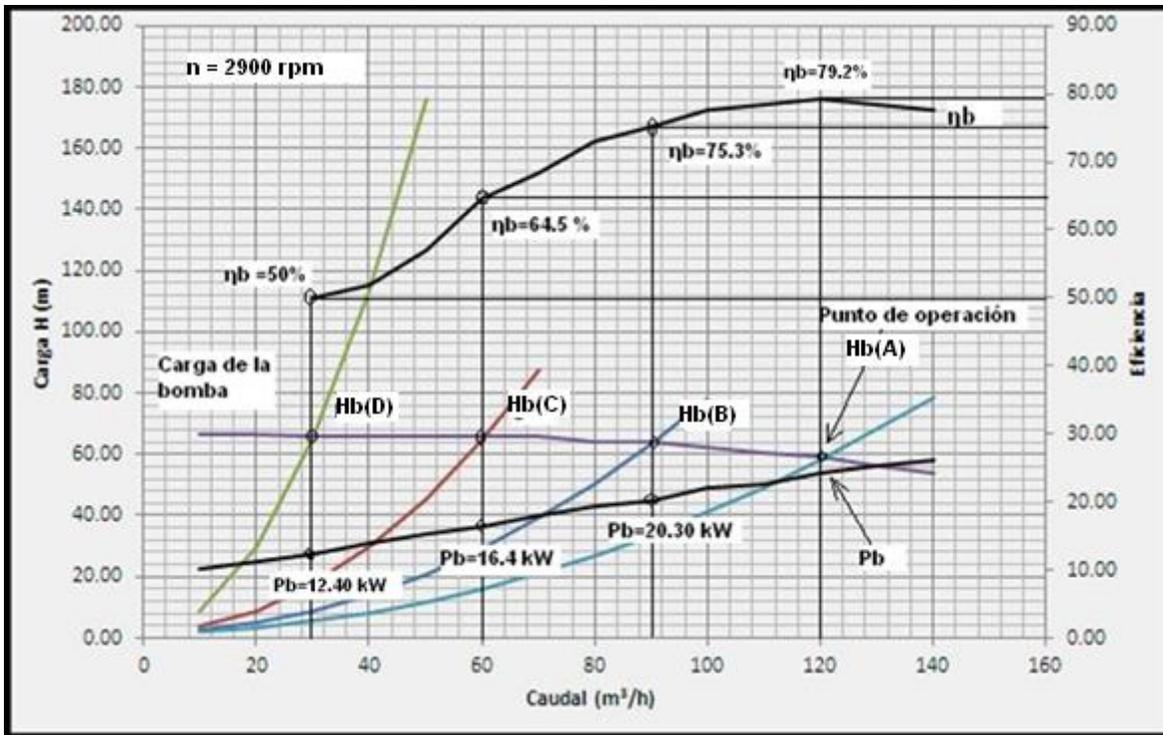


Figura 3.6 Comportamiento de la curva del sistema con el uso del método de estrangulamiento.

Determinación de las curvas de trabajo con el empleo del variador de frecuencia.

Aplicando teoría de semejanza y despejando n_1 en la ecuación E.c. 3.1, H_{b2} en E.c. 3.2 y P_2 en E.c. 3.3, se puede determinar los cambios en la carga del sistema y el consumo de potencia para los valores máximo y mínimo del flujo con empleo del variador de frecuencia. Estas son:

$$n_2 = \frac{n_1 \times Q_2}{Q_1} \quad H_{b2} = \frac{H_{b1} \times n_2^2}{n_1^2} \quad P_2 = \frac{P_1 \times n_2^3}{n_1^3}$$

En la tabla 3.6 se relaciona los valores de velocidad angular, la potencia de la bomba, la carga total de la bomba y la carga del sistema puntual para cada flujo volumétrico. Es necesario entender, que solo se trata de valores puntuales, no obedecen a una función continua.

Tabla 3.6 Comportamiento de la potencia consumida por la bomba para diferentes frecuencias de rotación.

Qx (m3/h)	10.00	20.00	30.00	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00	90.00	100.00	110.00	120.00
n_x (rpm)	241.67	483.33	725.00	966.67	1208.33	1450.00	1691.67	1933.33	2175.00	2416.67	2658.33	2900.00
P_x (kW)	0.01	0.11	0.38	0.89	1.74	3.01	4.78	7.14	10.17	13.95	18.56	24.10
Hb (m)	2.25	3.42	5.38	8.13	11.65	15.96	21.06	26.93	33.60	41.04	49.27	58.28
Ha (m)	0.46	1.84	4.13	7.34	11.46	16.50	22.41	28.58	36.00	43.26	50.46	59.00

En el subepígrafe 3.4 se describían las ventajas económicas que representa el uso de un variador de frecuencia, pero que independientemente a eso, no siempre es factible su uso, debe hacer siempre un análisis costo-beneficio, ya que generalmente requieren de una inversión considerable.

En la figura 3.7 se representa gráficamente los datos obtenidos haciendo uso de las ecuaciones E.c. 3.1, 3.2 y 3.3 que forman parte de las leyes de semejanza, que para el caso de las bombas centrifugas, expresan la relación matemática entre caudal, velocidad, altura y la potencia.

En la tabla 3.7 se muestra el importe total para un ciclo de trabajo de 48 horas empleando 12 horas para cada regimen, como se hizo con el método de estrangulamiento.

Tabla 3.7 Importe eléctrico en 12 horas para los cuatro modos de operación con el uso de un variador de frecuencia. Elaboración propia.

Caudal (m ³ /h)	120	90	60	30
Hb (m)	58,20	33,66	15,96	5,38
Potencia (kW)	24,10	10,17	3,01	0,38
Eficiencia (%)	79,2	79,2	79,2	79,2
Gasto energético en 24 horas (kWh)	578,4	244,08	72,24	9,12
Factura eléctrica				
Horario del día (\$)	665,56	280,86	83,13	10,49
Importe total en 92 horas (CUP)	1 040,05			

En la tabla 3.8 se exponen los resultados del análisis de factibilidad realizado para el uso del variador de frecuencia.

Tabla 3.8 Analisis de factibilidad del empleo del veriador.

Método	Importe para un ciclo (CUP)	Importe para ocho ciclos, 1 mes y 1 días de trabajo (CUP)
Estrangulamiento	2 021,55	2 021,55 * 8 =16 172,40
Variador	1 040,05	1 040,05 * 8 = 8 320,40
Diferencia	981,50	7 852,00

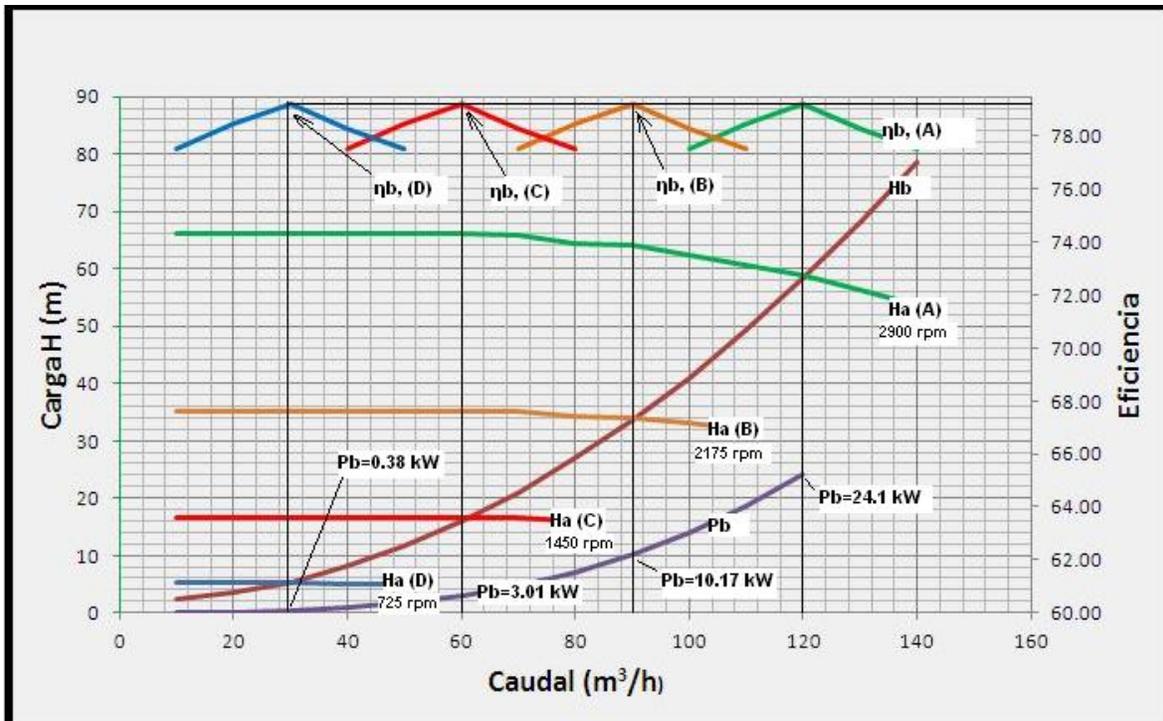


Figura 3.7 Comportamiento de la curva del sistema con el uso de un variador de frecuencia.

Los resultados de la evaluación de los métodos de regulación se exponen en la tabla 3.8, como es posible verificar por el método de estrangulamiento el importe de la factura para un periodo de un mes (ocho periodos de 48 horas), es de 16 172,40 CUP y con el empleo de un variador en igual periodo es de 8 320,40 CUP, lo que daría como resultado un ahorro de 7 852,00 CUP en un solo mes de trabajo.

Teniendo en cuenta que el valor del variador de frecuencia ST500 es de 30 720,00 CUP, este valor se amortizaría en:

$$TRI = \frac{CV}{APEV} = \frac{30\,720,00\text{ CUP}}{7\,852,00\text{ CUP}/384h} = 1\,502.35\text{ h} = 4\text{ meses de }12\text{ horas de trabajo.}$$

Donde:

TRI, Tiempo de recuperación de la inversión en meses de trabajo.

CV, Costo del variador en CUP.

APEV, Ahorro por el empleo del variador en CUP.

La inversión hecha en la compra del variador de frecuencia ST500 se recuperaría en 4 meses de trabajo calibrando caudalímetros máxicos de 120 m³/h, si se relacionan los demás caudalímetros que trabajan a otras tasas de flujo, la

recuperación sería aún más rápida, pero se considera que lo expuesto refleja que económicamente se justifica el empleo del variador de frecuencia para regular el caudal en las pruebas.

3.5. Destino final del agua que se utiliza en el proceso de calibración, una vez terminado.

En la actualidad el agua utilizada en las calibraciones es vertida íntegramente en la canal de agua pluvial que pasa a un costado del taller que vierte en la bahía, ocasionando pérdidas económicas a la empresa, debido a que toda esa agua es metrada y más tarde facturada por la empresa de acueducto y alcantarillado de Cienfuegos. Por otra parte, esta agua contiene residuos de productos derivados del petróleo, consecuencia precisamente de medir las cantidades de masa que son transferidas en la comercialización y recepción del petróleo y sus derivados. Todos estos residuos llegan a la bahía poniendo en peligro el ecosistema e incumpliendo con lo estipulado en el artículo 27 de la Constitución de la Republica y cito:

El Estado protege al medioambiente y los recursos naturales del país. Reconoce su estrecha vinculación con el desarrollo económico y social sostenible para hacer más racional la vida humana y asegurar la supervivencia, el bienestar y la seguridad de las generaciones actuales y futuras. Corresponde a los órganos competentes aplicar esta política. Es deber de los ciudadanos contribuir a la protección del agua, la atmósfera, la conservación del suelo, la flora, la fauna y de todo el uso potencial de la naturaleza. (García, 2022).

3.6. Evaluación de gastos por consumo eléctrico del sistema de bombeo propuesto con relación al sistema actual de bombeo.

Como en los subepígrafes anteriores, se tendrá en cuenta solo los resultados para los 120m³/h.

Cuando se necesita hacer circular un flujo de 120 m³/h por la estación es insuficiente la potencia sumada de las bombas Jockey de 37 kW del sistema de agua contra incendio, entonces se hace necesario poner en funcionamiento la bomba tipo de 550 kW D-1250-125 con capacidad para 1150 m³/h, 13 kg/cm² de presión en la descarga y 550 kW de potencia (ver anexo 2), con la válvula de descarga cerrada

casi en su totalidad. Para esas condiciones la bomba demanda una potencia de 240 kW, de la cual tan solo utilizará el 17 % en agregar energía al fluido (figura 3.2 Características gráficas de la bomba D-1250-125).

En estas condiciones la potencia que el motor demandará de la red eléctrica está relacionada con la eficiencia para ese nivel de carga (10 %), según figura 3.8 la eficiencia del motor se reduce al 55 % de su eficiencia máxima. En la tabla 3.9 se exponen los parámetros eléctricos del motor que entrega energía mecánica a la bomba.

Tabla 3.9 Parámetros del motor eléctrico.

Motor	trifásico
Tipo:	A-313-46-4T4
Tensión:	6000 Vac
Corriente nominal:	73.0 A
Frecuencia:	60 Hz
Potencia:	630 kW
Cos φ :	0.9
Eficiencia:	92.6%

La eficiencia real del motor para el estado de carga es:

$$\eta_{real} = \eta_{nom} * k = 92,6 * 0,55 = 50,9 \%$$

Donde:

η_{real} , Eficiencia del motor para el 10% de la carga nominal.

η_{nom} , Eficiencia del motor para el 100% de la carga nominal.

k, Factor de corrección de la eficiencia según el estado de carga.

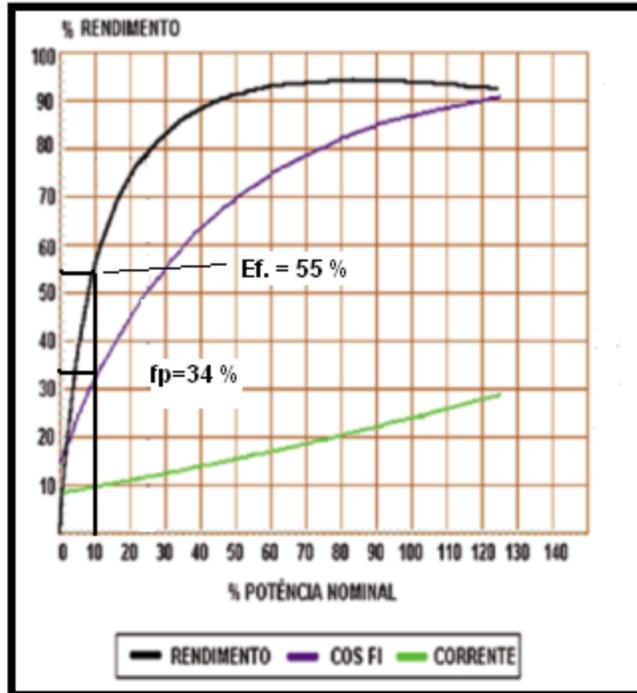


Figura 3.8 Rendimiento de los motores eléctricos en dependencia del nivel de carga. (ElectroIndustria, 2022).

La potencia consumida de la red por el motor eléctrico es:

$$P_e = \frac{P_S}{\eta_{real}} = \frac{240}{0,509} = 471,5 \text{ kW}$$

Donde:

P_e , Potencia de entrada de la bomba.

P_S , Potencia de salida de la bomba.

La energía consumida por el sistema de bombeo de agua contra incendio es de:

$$\text{Energía} = \text{Potencia} * 12 \text{ horas} = 5658.00 \text{ kWh}$$

La tabla 3.10 muestra los resultados de los cálculos donde se determina los importes de los consumos de energía de los dos sistemas de bombeo.

Tabla 3.10 Consumo eléctrico de los sistemas de bombeo. Elaboración propia.

Sistema de bombeo	Potencia demandada para 120 m ³ /h	Energía consumida en 12 h	Importe total a tarifa de horario de día.
Contra incendios	471,5 kW	5 658,00 kWh	17 076,25 CUP
Sistema propuesto	24,1 kW	289,2 kWh	872,82 CUP
Ahorro en 24 horas			16 203,42 CUP

Como se puede apreciar en la tabla 3.10, el sistema de bombeo propuesto garantiza en tan solo 12 horas un ahorro en la factura eléctrica de 16203.42 CUP. No se tomó en consideración el aporte del actual método de bombeo en potencia reactiva, pero, según la figura 3.8 hay un detrimento de este indicador del 34% del nominal del motor, contribuyendo al deterioro global de la calidad de la energía en la empresa, un factor de potencia por debajo 0.9, provoca la penalización de la empresa por la Organización Básica Eléctrica (Meisi Bolaños Weiss; Ministra de finanzas y precios, 2020).

3.7. Factibilidad económica del diseño del laboratorio de flujometría propuesto.

La inversión necesaria para la ejecución del proyecto tiene un costo total, incluyendo el variador de frecuencia, de 208 172,00 CUP, pero sólo por concepto de consumo eléctrico se ahorra en tan solo 12 horas de trabajo 16 203,00 CUP, si a esto sumamos que en la actual estación en un mismo periodo de tiempo, a un caudal de 120 m³/h se vierte en la bahía 1440 m³ de agua, lo cual significa a la tarifa actual de 10.85 CUP por metro cúbico consumido (Weiss, 2021), un importe de 15 624,00 CUP y que a partir de la implementación de este proyecto, donde el agua es reutilizada al 100 %, no se incurriría en este gasto, entonces, la ejecución de este proyecto y su puesta en servicio, significaría un ahorro total de 31 827,00 CUP en 12 horas de funcionamiento.

$$\text{Importe por consumo de agua} = 120\text{m}^3 * 12\text{h} * 10,85 \text{ CUP} = 15\ 624,00 \text{ CUP}$$

$$\text{Ahorro total} = (16\ 203,00 + 15\ 624,00)\text{CUP} = 31\ 827,00\text{CUP}$$

La recuperación de la inversión sería en:

$$\text{Recuperación de la inversión} = \frac{208\ 172,00 \text{ CUP}}{31\ 827,00 \text{ CUP}/12\text{h}} = 78,5 \text{ horas}$$

La inversión sería recuperada en tan solo 4 días de trabajo del laboratorio de flujometría.

3.8. Conclusiones parciales

1. El uso de la bomba modelo D-1250-125 de 1150 m³/h a un 10 % de su capacidad nominal en el bombeo de agua para las calibraciones, reduce la vida

útil de la bomba, aumenta la frecuencia de mantenimiento e incrementa los gastos en el importe de la factura eléctrica.

2. Implementar este diseño permitirá la reutilización del agua empleada en las calibraciones, proteger el ecosistema de la bahía, brindar mayor seguridad tecnológica, disminuir los tiempos de operación, aumentar la calidad de las calibraciones y la disponibilidad de los instrumentos en la planta.
3. Utilizar el variador de frecuencia ST500 propuesto para la regulación de flujo de trabajo en las calibraciones, garantiza un ahorro para la empresa 7 852,00 CUP, por mes de trabajo, con respecto al método de regulación por estrangulamiento.

Conclusiones

1. El diseño de este sistema de bombeo con recirculación de agua, garantiza los requerimientos del laboratorio de flujometría para la calibración y certificación de los instrumentos, permitiendo prescindir del sistema de bombeo de agua contra incendio, sin verter agua contaminada a la bahía y con un impacto económico de 31 827,00 CUP de ahorro por cada 12 horas de trabajo.
2. Dejar de utilizar el sistema de agua contra incendio aumenta la seguridad de la planta, puesto que en el tiempo que se realizan los trabajos de calibración, el sistema de bombeo automático, es intencionalmente puesto en modo de operación manual, provocando un aumento del tiempo de respuesta de los medios contra incendio ante la aparición de algún evento en la fábrica.
3. La inversión en la adquisición de todos los materiales y equipos que forman parte de este proyecto tiene un costo estimado de 208 172,00 CUP y según los cálculos realizados, el ahorro en el importe de las facturas de electricidad y agua es de 31 827,00 CUP por cada 12 horas de trabajo, lo que permite recuperar la inversión en 4 días.

Recomendaciones

- 1) Implementar este proyecto con la mayor brevedad posible, de esta forma se logrará:
 - a. Dejar de utilizar el sistema contra incendio en las calibraciones.
 - b. Disminuir la generación de potencias reactivas provocadas por el trabajo de motores eléctricos subcargados.
 - c. Mejorar las condiciones de trabajo en la estación, logrando mantener la calidad en los servicios allí prestado, con un mínimo de esfuerzo físico por parte de operarios y técnicos.
- 2) Adquirir variador de frecuencia del tipo ST500 de 30 kW, para la regulación del caudal mediante la variación de la velocidad del motor.
- 3) Una vez puesto en marcha el laboratorio, organizar muestreos periódicos al agua almacenada en los tanques Tk-1 y 2, de forma tal que permita, una vez que se pierda las características del agua producto de la contaminación con hidrocarburos provenientes de los flujómetros, disponer del carro fosa de la empresa, para transportar todo el volumen de agua hasta una de las piscinas de residuales y no continuar vertiendo a la bahía.

Bibliografía

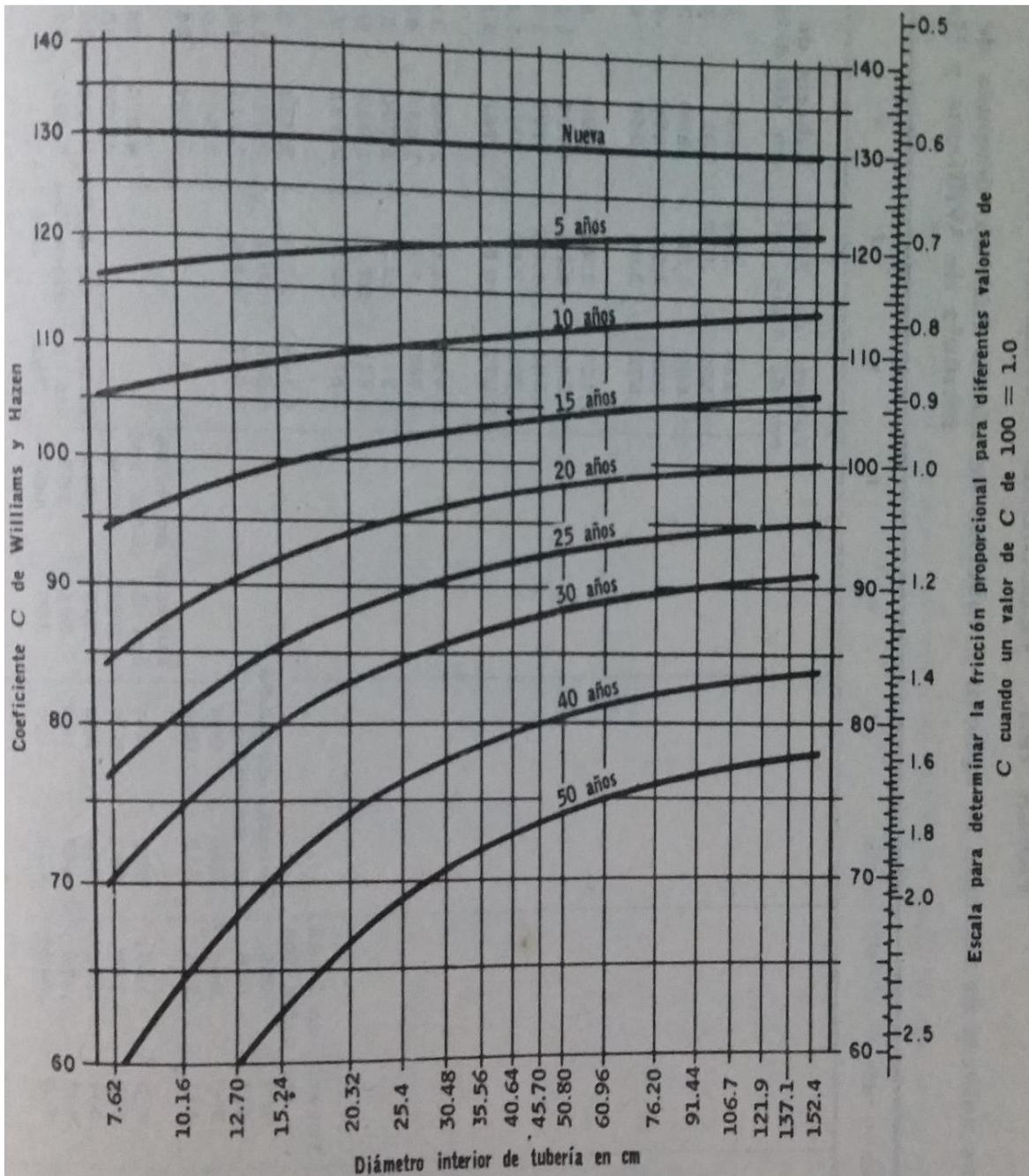
- Добро пожаловать на официальный сайт УПК Фарватер! (s.f.).
<https://fairway.com.ua/nasosy/nasosy-dvuhstoronnego-vhoda/nasosy-d/1250-125>
- Arturo Pedraza, R. R. (2011). *Evaluación para sistemas de bombeo de agua: Manual de eficiencia energética*.
- Banco Mundial. (2021). www.Bancomundial.org.
<https://www.bancomundial.org/es/topic/water/overview#1>
- Bernardo Gomez Sabogal, J. A. (2013). *Optimización de energía en sistemas de bombeo*.
- Bolaños Weiss, M., (2020). *El Decreto 24 “Facultades para la aprobación de Precios y Tarifas”*.
- BRS Abril, J. P. (2013). *Optimizador de energía en sistemas de bombeo*.
- Carter, I. K. (1968). *Bombas Centrífugas selección, operación y mantenimiento*. Edición revolucionaria.
- Duque, J. A. (2018). *El agua en Cuba: Un desafío a la sostenibilidad*.
https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=cantidad+de+agua+por+habitante+en+cuba+&btnG=#d=gs_qabs&t=1653773267978&u=%23p%3DLg-QP3tthUYJ
- Eduardo Blanco Marigorta, S. V. (1994). *Sistema de bombeo*.
- Efinética. (2019). www.efinetika.com
- ElectroIndustria. (2022). *ElectroIndustria*. <http://www.wegchile.cl>
- Empresa Municipales de Cali (EMCALI), (2013). *Norma NDI-SE-IT-001 Técnica de Impulsión y Transmisión de Agua*.
- Endress y Hauser, S.A. (2022). www.es.endress.com.
<https://www.es.endress.com/es/instrumentacion-campo/medicion-caudal/caudalimetro-aplicaciones-facturacion?t.tabld=product-specification>
- Espa Group. (2 de 04 de 2000). www.espa.com. Retrieved 21 de 06 de 2022.
- Lazo Hernández, E., (2017). *JURISCUBA*. <http://juriscuba.com/legislacion-2/leyes/ley-no-124-de-las-aguas-terrestres/>
- García, A. R. (2022). *La protección del medioambiente en Cuba, una prioridad gubernamental*. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1817-40782019000200113&script=sci_arttext&tIng=en
- Gerencia de AIT Refinería Cienfuegos S.A. (2019). *Propuesta Técnica # 1*. Cienfuegos.
- Hydraulic Institute. (2004). *Variable Speed Pumping: A guide to successful applications*.
- Hydraulic Institute. (2006). *Pumps systems matter (part 1)*. *World Pumps Magazine*

- Hydraulic Institute. (2008). *Select an energy efficient centrifugal pump*. World Pumps Magazine.
- Kaya. (2008). *Energy Efficiency in pumps*. *Energy Conversion and Management*.
- Korean Broadcasting System, (KSB.SE) & Bertelsmann, (Co. KGaA), (2018). *Folleto de curvas características*.
- Llanes, L. L. (2018). *RF-M5.3-M-58-07 Manual de Operaciones de la Planta de Abastecimiento de agua y Tratamientos de Residuales*. Cienfuegos.
- M. Benhaddadi, G. O. (2007). *Ahorro de energía mediante variador de velocidad. Utilización*. Canadá.
- Matos, L. R. (2017). *Cuba pierde millones de dólares al año por fugas de agua en las casas*.
- Mott, R. L. (2008). *Mecánica de fluidos*. Pearson Educación.
- Nekrasov, B. (1968). *Hidráulica*. Mir.
- Nelik. (1999). *Centrifugal y Rotary Pumps: Fundamentals with applications*. CRC Press.
- Pradas, D. (2020). *La liquidez del líquido*.
- Refinería Cienfuegos S.A. (2007). *RF-DO-IT-20-07 Instrucción técnica para la motobomba Diesel P-1240/B*. Cienfuegos.
- Robert L. Mott, J. A. (2015). *Mecánica de los fluidos*. Pearson Educación de México.
- Rodríguez, I. A. (2019). *Beneficios de los Variadores de Frecuencia*. <http://www.cenytec.com>
- Smith, Simon. (2021). *RUHRPUMPEN Specialist for Pumping Technology*. www.ruhrpumpen.com
- SOURCETRONIC. (2022). *SOURCETRONIC*. www.sourcetric.com
- Streater, V. L. (2008). *Mecánica de fluidos*. Felix Varela.
- Tuzson. (2000). *Centrifugal pump design*. John Wiley y Sons.
- Varios. (2015). *Monografía de mecánica de los fluidos*. Universo Sur.
- Volk, T. ,. (2005). *Pumps Characteristics and Applications 2nd Edition*. Group CRC Press.
- Weiss, M. B. (2021). *Resolución 419/2020*.
- White. (2003). *Fluid Mechanics*.
- Wulfinghoff. (1999). *Pump Energy Consumption. In Energy Efficiency Manual ..* Energy Institute Press.
- YOKOGAWA Europe. (2022). www.directindustry.es.
<https://www.directindustry.es/prod/yokogawa-europe/product-19033-1857066.html>

Anexos

Anexo 1.

Cambios en el coeficiente C de Williams y Hazen con los años de servicio, para tuberías de hierro colado que manejan agua limpia y suave sin filtrar.



Anexo 2.

Motobombas del tipo D-1250-125 con capacidad para 1 150 m³/h, 1.275 MPa de presión en la descarga.



Anexo 3

Relación de flujómetros tipo Coriolis en la Refinería de Petróleo de Cienfuegos.

Nro.	Denominación	Producto	Nro. serie	Rango
1	Flujómetro Coriolis GLP	GLP REG	A4070802000C	150-3000kg/min
2	Flujómetro Coriolis GLP	GLP DESP	A4070702000C	150-3000kg/min
3	Flujómetro Coriolis Cargadero	ISLA 1DIESEL	D1P700821	220-2200dm3/min
4	Flujómetro Coriolis Cargadero	ISLA 1 B-82	D1K700105	220-2200dm3/min
5	Flujómetro Coriolis Cargadero	isla 1 B-92	D1KAD1434	220-2200dm3/min
6	Flujómetro Coriolis Cargadero	ISLA 2 DIESEL	D1K700103	220-2200dm3/min
7	Flujómetro Coriolis Cargadero	ISLA 2 B-82	D1K700110	220-2200dm3/min
8	Flujómetro Coriolis Cargadero	ISLA 2 B-92	D1K700106	220-2200dm3/min
9	Flujómetro Coriolis Cargadero	Isla 3B-90	D1K700107	220-2200dm3/min
10	Flujómetro Coriolis Cargadero	ISLA 3 DIESEL	D1T200362	220-2200dm3/min
11	Flujómetro Coriolis Cargadero	ISLA3 KERO	D1K700111	220-2200dm3/min
12	Flujómetro Coriolis Cargadero	ISLA 4 DIESEL	D1K700112	220-2200dm3/min
13	Flujómetro Coriolis Cargadero	ISLA4 JET A1	D1K500838	220-2200dm3/min
14	Flujómetro Coriolis Cargadero	ISLA 4 JET A1	D1K700113	220-2200dm3/min
15	Flujómetro Coriolis Cargadero	ISLA 4 DIESEL	D1K902739	220-2200dm3/min
16	Flujómetro Coriolis Muelle GLP	MUELLE GLP	990E2702000C	350-12000kg/min
17	Flujómetro Coriolis Muelle Auxiliar	MUELLE AUXILIAR	AAOA5F02000	150-3000kg/min
18	Flujómetro Coriolis Muelle auxiliar	MUELLE AUXILIAR	ECOID202000	150-3000kg/min
19	Flujómetro Coriolis Muelle 1	MUELLE DIESEL	A4070602000C	50-1000dm3/min
20	Flujómetro Coriolis TERMO	TERMO FUEL	J90 D1702000	350-12000kg/min
21	Flujómetro Coriolis	DIESEL Punto Final	M600D302000	150-3000dm3/min
22	Flujómetro Coriolis	MUELLE DIESEL	A4070E02000C	50-1000dm3/min
23	Flujómetro Coriolis IFO 180	Zona Costera	AAOAF302000	350-12000kg/min
24	Flujómetro Coriolis IFO 380	Zona Costera	AAOAF202000	350-12000kg/min

Anexo 4

Estación de calibración caudalímetros patrones.



Anexo 5

Solicitud de la Gerencia de Automática Instrumentación y Telecomunicaciones (Gerencia de AIT Refinería Cienfuegos S.A., 2019).



Propuesta Técnica No: 1

Fecha de presentación: 9/1/2019

Taller o Área: Automática e Instrumentación

Título: Construcción del laboratorio de flujometría

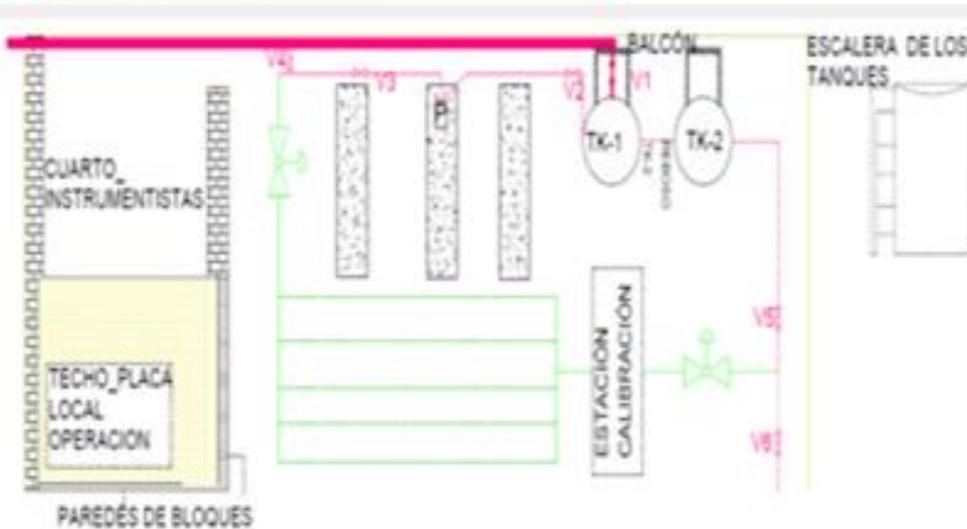
Desarrollo:

Con el objetivo de construir un laboratorio para la calibración de flujómetros, se requiere llevar a cabo una serie de trabajo de inspección, mantenimiento, construcción y reorganización dentro del taller.

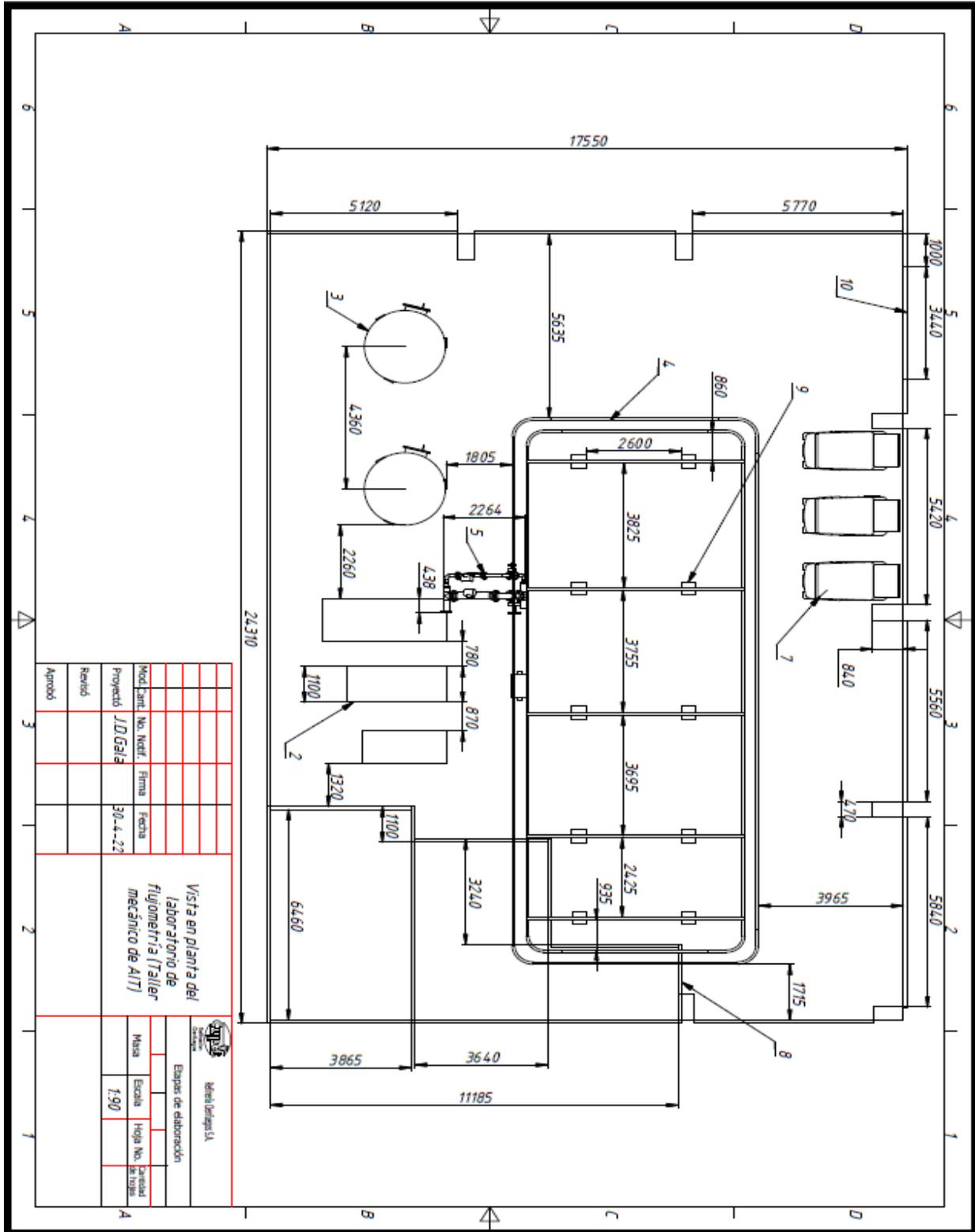
Se demandan una serie de tareas entre las que están:

1. La línea de agua en la entrada principal estará ubicada en la parte superior del cuarto de equipos, fijada en la pared con perfiles de montaje

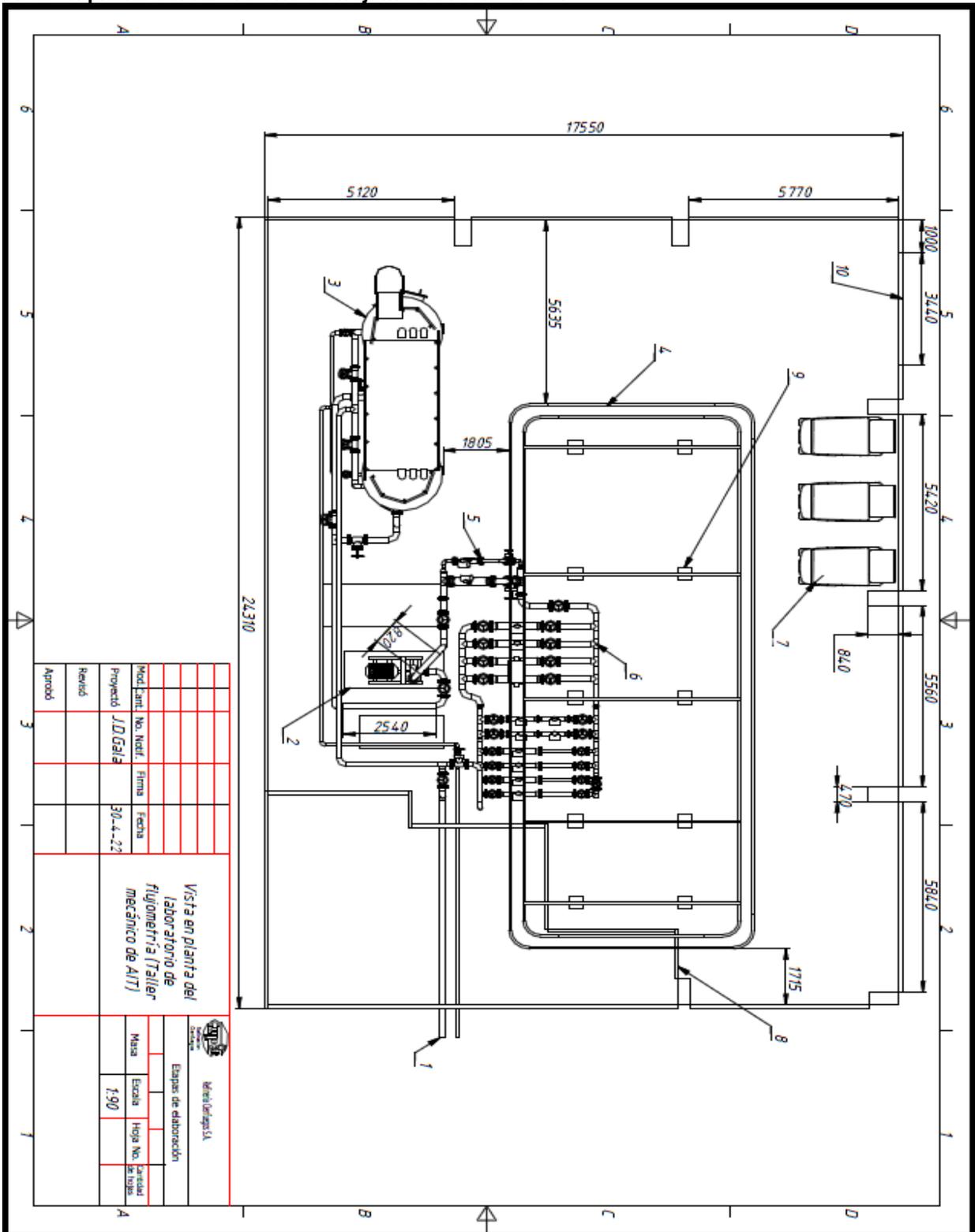
La siguiente figura propone a grandes rasgos como quedará el taller una vez terminada las tareas anteriores:



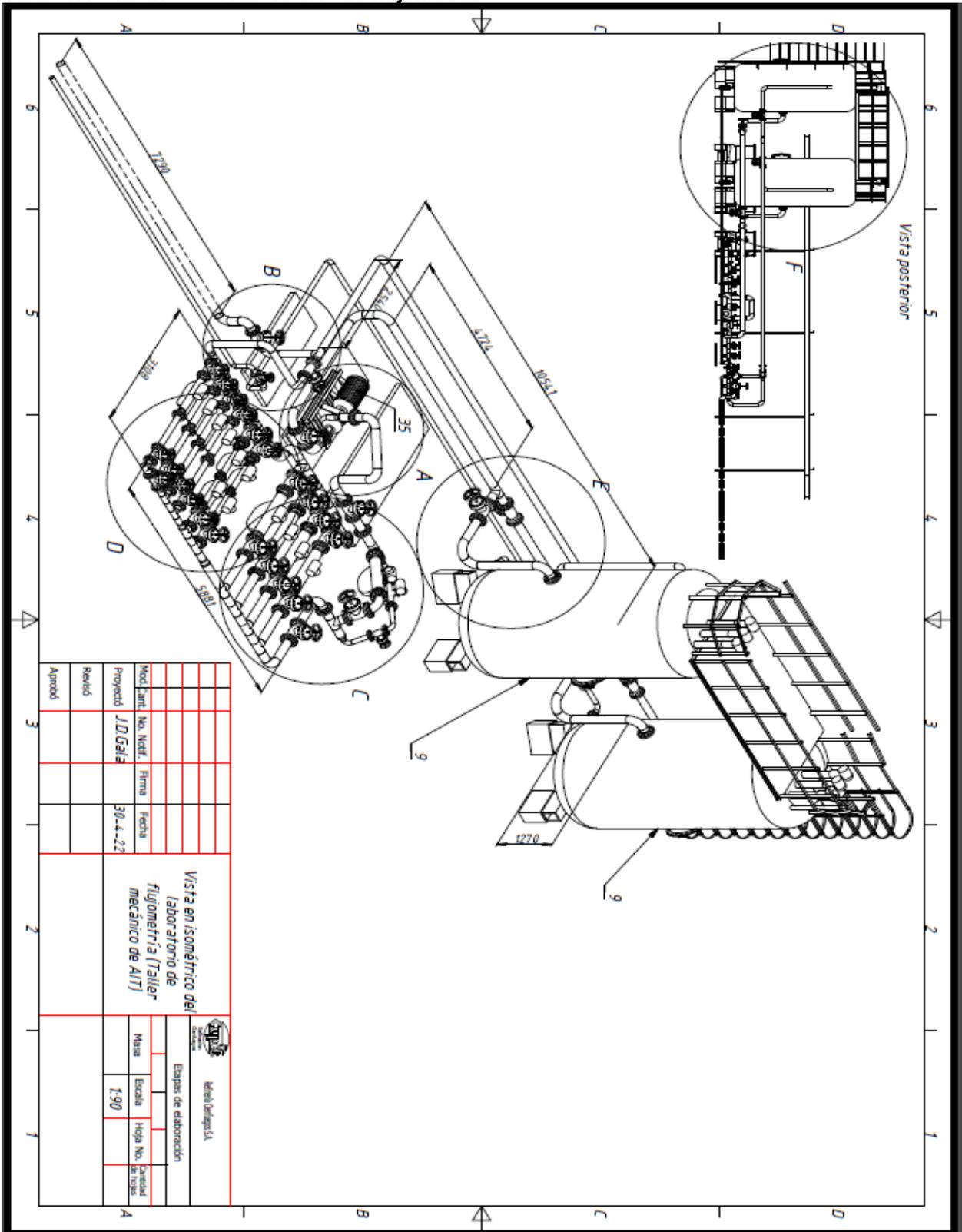
Anexo 6
Mediciones realizadas a cada uno de los elementos del sistema y al área útil para el rediseño del laboratorio.



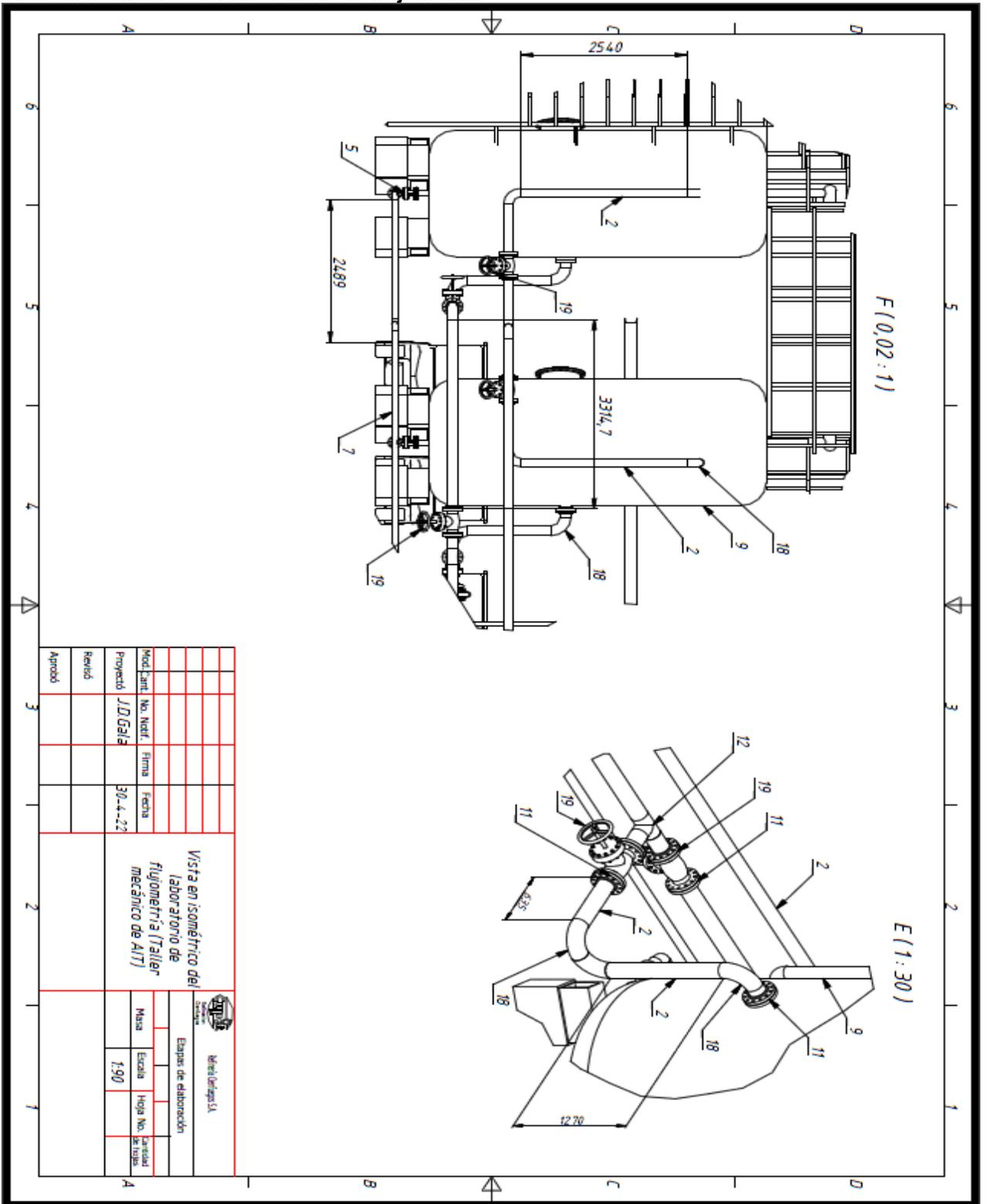
Anexo 7
 Vista en planta del laboratorio de flujo rediseñado.



Anexo 8
 Vista en isométrico del laboratorio de flujometría.



Anexo 10
 Vista en isométrico del laboratorio de flujometría.



Anexo 11
Componentes del laboratorio de flujometría.

ELEMENTO	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CTDAD	COMENTARIOS
1	ASME B16.9 Codo de radio corto de 90 grad 6 x 0.28	Accesorio forjado con soldadura a tope - Codo de radio corto de 90º. Pulgadas	3	
2	ANSI/ASME B36.19M Tubería 6 - Schedule 40S - 10	A-106	29260,8	
3	ASME B16.5 Brida de deslizamiento para soldadura - Clase 150 6	Bridas de tubería - Brida de deslizamiento para soldadura - Clase 150. Pulgadas	2	
4	ASME B16.34 Válvula esférica con finales con valona - Clase 150 6	Válvula esférica	1	
5	ASME B16.34 Válvula esférica con finales con valona - Clase 150 3	Válvula esférica	1	
6	ASME B16.5 Brida de deslizamiento para soldadura - Clase 150 3	Bridas de tubería - Brida de deslizamiento para soldadura - Clase 150. Pulgadas	2	
7	ANSI/ASME B36.19M Tubería 3 - Schedule 40S - 10	A-106	31678,88	
8	ASME B16.9 Codo de radio corto de 90 grad 3 x 0.216	Accesorio forjado con soldadura a tope - Codo de radio corto de 90º. Pulgadas	4	
9	Tanques		2	
10	Tapa de ManHole		2	

					<p style="text-align: center;"><i>Componentes del laboratorio de flujometría (Taller mecánico de AIT)</i> 1-10</p>	 <p style="text-align: center;">Refinero Cerfags S.A.</p>
Mod.	Cart.	No. Notif.	Firma	Fecha		
Proyectó		J.D. Gala		30-4-22		
Revisó						
Aprobó						

Anexo 12
Componentes del laboratorio de flujometría.

ELEMENTO	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CTDAD	COMENTARIOS
11	ASME B16.5 Brida de deslizamiento para soldadura - Clase 300 6	Bridas de tubería - Brida de deslizamiento para soldadura - Clase 300. Pulgadas	46	
12	ASME B16.9 Tubo en T recto 6 x 0.28	Accesorio forjado con soldadura a tope - Tubo en T recto. Pulgadas	10	
13	ASME B16.9 Reductor 6 x 3 - Schedule 40	Accesorio forjado con soldadura a tope - Reductor. Pulgadas	2	
14	ASME B16.9 Codo de radio largo de 90 grad (Métrico) 3 x 5.5	Accesorio forjado con soldadura a tope - Codo de radio largo de 90º - Métrico	9	
15	ASME B16.5 Brida de deslizamiento para soldadura - Clase 300 3	Bridas de tubería - Brida de deslizamiento para soldadura - Clase 300. Pulgadas	26	
16	Sensor		24	
17	ASME B16.9 Reductor 8 x 6 - Schedule 40	Accesorio forjado con soldadura a tope - Reductor. Pulgadas	10	
18	ASME B16.9 Codo de radio largo de 90 grad (Métrico) 6 x 7.1	Accesorio forjado con soldadura a tope - Codo de radio largo de 90º - Métrico	20	
19	ASME B16.34 Válvula esférica con finales con valona - Clase 300 6	Válvula esférica	15	
20	ASME B16.9 Reductor 4 x 3 - Schedule 40	Accesorio forjado con soldadura a tope - Reductor. Pulgadas	12	

					 Refrindo Cortaeps S.A. Etapas de elaboración Masa Escala Hoja No. Cantidad de hojas
Componentes del laboratorio de flujometría (Taller mecánico de AIT) 11-20					
Mod. Cart.	No. Notif.	Firma	Fecha		
Proyectó	J.D. Gala		30-4-22		
Revisó					
Aprobó					

Anexo 13
Componentes del laboratorio de flujometría.

ELEMENTO	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CTDAD	COMENTARIOS
21	ASME B16.34 Válvula esférica con finales con valona - Clase 300 3	Válvula esférica	3	
22	ASME B16.9 Tubo en T recto 3 x 0.216	Accesorio forjado con soldadura a tope - Tubo en T recto. Pulgadas	1	
23	ANSI/ASME B36.19M Tubería 5 - Schedule 40S - 5	A-106	30605,73	
24	ANSI/ASME B36.19M Tubería 4 - Schedule 40S - 5	A-106	6705,6	
25	ASME B16.5 Brida de deslizamiento para soldadura - Clase 300 4	Bridas de tubería - Brida de deslizamiento para soldadura - Clase 300. Pulgadas	26	
26	ASME B16.34 Válvula esférica con finales con valona - Clase 300 4	Válvula esférica	9	
27	ASME B16.9 Tubo en T recto 4 x 0.237	Accesorio forjado con soldadura a tope - Tubo en T recto. Pulgadas	8	
28	ASME B16.9 Reductor 5 x 4 - Schedule 40	Accesorio forjado con soldadura a tope - Reductor. Pulgadas	11	
29	ASME B16.9 Tubo en T recto 5 x 0.258	Accesorio forjado con soldadura a tope - Tubo en T recto. Pulgadas	6	
30	ASME B16.9 Reductor 6 x 5 - Schedule 40	Accesorio forjado con soldadura a tope - Reductor. Pulgadas	3	

					 Componentes del laboratorio de flujometría (Taller mecánico de AIT) 21-30	Refrón Corfeps S.A. Etapas de elaboración			
Mod.	Cart.	No. Notif.	Firma	Fecha		Masa	Escala	Hoja No.	Cantidad de hojas
Proyectó		J.D. Gala		30-4-22					
Revisó									
Aprobó									

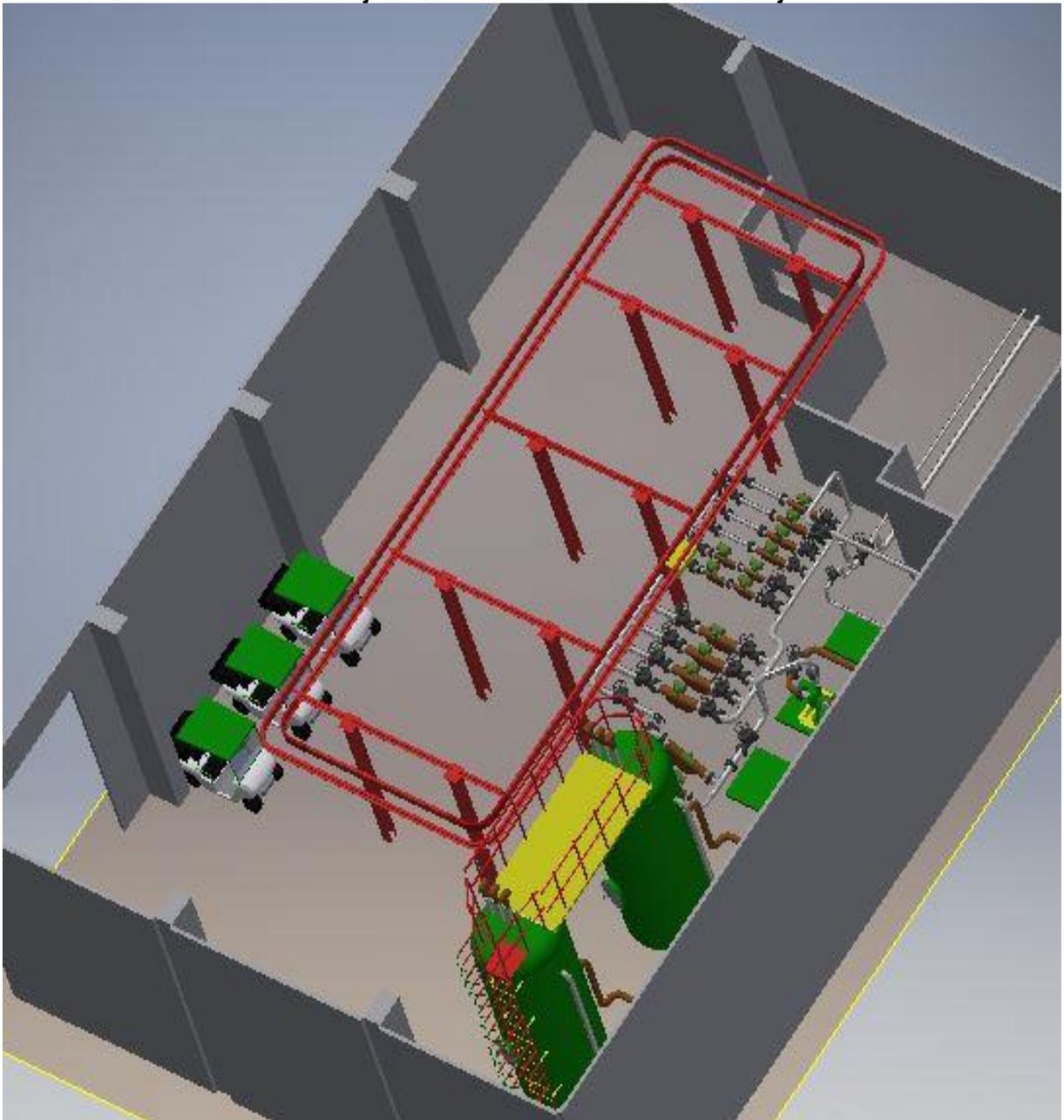
Anexo 14
Componentes del laboratorio de flujometría.

ELEMENTO	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CTDAD	COMENTARIOS
31	ASME B16.9 Codo de radio largo de 90 grad (Métrico) 5 x 6.6	Accesorio forjado con soldadura a tope - Codo de radio largo de 90º - Métrico	9	
32	ASME B16.9 Reductor 5 x 3 - Schedule 40	Accesorio forjado con soldadura a tope - Reductor. Pulgadas	4	
33	ASME B16.5 Brida de deslizamiento para soldadura - Clase 300 5	Bridas de tubería - Brida de deslizamiento para soldadura - Clase 300. Pulgadas	14	
34	ASME B16.34 Válvula esférica con finales con valona - Clase 300 5	Válvula esférica	7	
35	1455559825535-Waste water pump		1	
36	ASME B16.9 Reductor excéntrico 6 x 4 - Schedule 5	Accesorio forjado con soldadura a tope - Reductor excéntrico. Pulgadas	1	
37	ASME B16.9 Reductor 6 x 4 - Schedule 40	Accesorio forjado con soldadura a tope - Reductor. Pulgadas	1	
38	ANSI/ASME B36.19M Tubería 2 - Schedule 40S - 50	A-106	3048	
39	ANSI/ASME B36.19M Tubería 1/2 - Schedule 40S - 27,56	A-106	10490,2	
40	Sensor de nivel		6	

					<p>Componentes del laboratorio de flujometría (Taller mecánico de AIT) 31-40</p>	 <p>Refinería Derfago S.A.</p>				
							Etapas de elaboración			
Mod.	Cant.	No. Notif.	Firma	Fecha			Masa	Escala	Hoja No.	Cantidad de hojas
Proyectó		J.D. Gala		30-4-22						
Revisó										
Aprobó										

Anexo 15

Vista en 3D del laboratorio de flujometría una vez terminados los trabajos.



Anexo 17

Modo actual de conexión de los caudalímetros en el laboratorio de flujometría para calibración y certificación.



Anexo 18**Tabla de precios estimados de los elementos del proyecto. Elaboración propia.**

Nombre	Diámetro (m)	Cantidad	Precio unitario (Pesos/m)	Precio total (Pesos)
Tubería	0.1524	30 m	74.39	2 231.70
Tubería	0.127	30 m	54.3	1 629.00
Tubería	0.1016	5 m	28.01	140.05
Codos de radio largo 90°	0.1524	18 u	32.02	576.72
Codos de radio largo 90°	0.127	14 u	21.7	303.80
Tees	0.1524	10 u	44.21	442.10
Tees	0.127	10 u	27.8	278.00
Tees	0.1016	8 u	20.63	165.04
Válvulas de compuerta	0.1524	1 u	7456.5	7456.50
Válvulas de Globo	0.1524	8 u	8806.1	70 448.80
Válvulas de Globo	0.127	7 u	5205.6	36 439.20
Válvulas de Globo	0.1016	9 u	594.51	5 350.59
Codo de retorno	0.1524	1 u	64.04	64.04
Bridas clase 300	0.1524	36 u	41.73	1 502.28
Bridas clase 300	0.127	32 u	37.4	1 196.80
Bridas clase 300	0.1016	22 u	31.57	694.54
Reducción	0.1524-0.127	4 u	41.5	166.00
Reducción	0.127-0.1016	4 u	31.2	124.80
Bomba Modelo: MegaCPK 100-065-200		1 u	48242.0	48242.00
Total				177452.00