UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO – CHILE

“Evaluación, equipamiento y puesta en marcha del banco de ensayos de bombas centrífugas del laboratorio de termofluidos según norma ISO 9906-2012”

Kevin Alexander Bolovic Riquelme

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA
MENCIÓN ENERGÍA

PROFESOR GUÍA: DR. ING. MIRIAM ROTH
PROFESOR CO-REFERENTE: PHD. RODRIGO BARRAZA

ENERO 2019

AGRADECIMIENTOS

Quiero mencionar en mi primera ocasión a mis padres por su amor incondicional, apoyo y el gran esfuerzo que hicieron para poder entregarme la educación que tengo, de la cual estoy muy agradecido.

En segundo lugar, agradezco a Javiera por el amor, por creer en mí, brindarme apoyo, comprensión, parte de su tiempo y por las alegrías dentro de este último periodo.

Quiero agradecer también a todos los amigos que la vida me ha permitido conocer, cada uno de ellos ha contribuido en mi enriquecimiento personal y me han dado momentos inolvidables. Un agradecimiento en especial a aquellos que además brindaron de su apoyo para la elaboración de este documento.

Por último, quiero agradecer al departamento de ingeniería mecánica y a todos sus docentes, quienes ayudan en la importante labor de formar profesionales y excelentes personas. Quiero expresar mi enorme gratitud al profesor Claudio Aravena y Ignacio Ríos, quienes me brindaron su apoyo e interesantes conversaciones. Agradezco al profesor Rodrigo Barraza, y en especial a la profesora Miriam Roth por su apoyo, su paciencia, experiencia, comprensión y por compartir su conocimiento conmigo. Todo esto hizo que mi proceso de aprendizaje en la Universidad fuera enriquecedora de muchas maneras.

RESUMEN

En este documento, se realiza una evaluación de las capacidades del banco de pruebas de bombas centrífugas montado en el laboratorio de termofluidos, perteneciente al departamento de Ingeniería Civil Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María, campus San Joaquín, Santiago, Chile.

El banco está constituido por dos bombas centrífugas, una válvula de estrangulación neumática, sensores de presión y caudal, además de un sistema electrónico formado por un PLC, 2 variadores de frecuencia y una pantalla HMI que permite la lectura de las variables, como también el control de la válvula neumática y de los variadores de frecuencia.

Se analiza la competencia y capacidad de este banco para poder realizar una prueba de rendimiento hidráulico para las curvas características de altura y potencia. Se implementan las exigencias de la Norma ISO 9906-2012 en cuanto a condiciones de diseño, cumpliendo con los requerimientos del grado 1, que, según lo expuesto en la norma, es la categoría de mayor exigencia que permite asegurar condiciones de flujo estable.

Se implementan 2 métodos de adquisición de datos que permiten realizar la evaluación del cumplimiento de la norma con respecto a la toma de mediciones y análisis de datos. Las evaluaciones realizadas son de fluctuaciones, incertidumbre sistemática e incertidumbre general. Complementario a esto se realiza un análisis de 3 métodos de adquisición de datos, donde mediante las mediciones obtenidas se pueden ver sus principales diferencias. De estos, 2 fueron implementados correctamente, y se utilizan para visualizar el cambio en las fluctuaciones de las mediciones de presión antes y después de haber implementado las mejoras respectivas a las exigencias de diseño.

Finalmente, se especifican cuáles son las restricciones del sistema completo que están perjudicando la prueba de rendimiento hidráulico bajo todas las exigencias de la norma ISO 9906-2012, y se entregan recomendaciones de mejora para tener en consideración cuando se decida realizar estos cambios.

ABSTRACT

In this document, is carried out an evaluation of the capabilities of test rig of centrifugal pumps mounted in the thermofluid laboratory that belongs to the Mechanical Civil Engineering department of Universidad Técnica Federico Santa María, San Joaquin Campus, Santiago, Chile.

The test rig is constituted by two centrifugal pumps, a pneumatic throttle valve, pressure and flow sensors and an electronic system formed by a PLC, two variable frequency drives and an HMI screen that allows the reading of the variables, as well as the control of the pneumatic valve and the variable frequency drives.

The competence and capacity of this test rig is analyzed to be able to perform a hydraulic performance acceptance test for characteristic height and power curves.

The requirements of ISO 9906-2012 are implemented in design conditions, fulfilling with the requirements of grade 1. This grade can allow to ensure stable flow conditions.

Two methods of data acquisition are implemented, and these allow the assessment of compliance with the standard in terms of taking measurements and data analysis.

The evaluations carried out are about fluctuations, systematic uncertainty and general uncertainty.

Complementary to this, an analysis of three methods of data acquisition is carried out, where through the obtained measurements you can be look their main differences. Two of these methods were implemented correctly and are used to visualize the change in the fluctuations of the pressure measurements, before and after having implemented the improvements to the design requirements.

Finally, it is specified which are the restrictions of the entire system that are harming the hydraulic performance test under all the requirements of the ISO 9906-2012 standard, and some improvement recommendations are given to have in consideration when you make these changes.

SIMBOLOGÍA

Símbolo	Cantidad	Unidad
A	Área	m^2
D	Diámetro	m
e	Incertidumbre	%
f	Frecuencia	Hz, s^{-1}
g	Aceleración de gravedad	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$
H	Altura total de la bomba	m
$\mathbf{H_J}$	Pérdidas de carga en altura	m
k	Rugosidad equivalente	m
K	Número tipo	Adimensional
l	Longitud	m
M	Torque	Nm
n	Velocidad de rotación	min^{-1}
p	Presión	Pa
P	Potencia	W
Q	Flujo volumétrico (Caudal)	$\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}^2}$
Re	Número de Reynolds	Adimensional
U	Velocidad promedio	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$
v	Velocidad local	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$
V	Volumen	m^3
y	Energía específica	$\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}$
z	Altura según plano de referencia	m
η	Eficiencia	Adimensional
ρ	Densidad	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$
λ	Coeficiente de pérdidas por fricción	Adimensional
μ	Viscosidad dinámica	$\frac{kg}{m * s}$
ω	Velocidad angular	$\frac{\mathrm{rad}}{\mathrm{s}}$

Tabla de Contenidos

AGRADECIMIENTOS ..... **II**

RESUMEN ..... **III**

ABSTRACT ..... **IV**

SIMBOLOGÍA ..... **V**

I. INTRODUCCIÓN ..... **VIII**

II. OBJETIVOS ..... **IX**

OBJETIVO GENERAL IX
OBJETIVOS ESPECÍFICOS IX

III. PROBLEMÁTICA ..... **IX**

1.1 ALCANCE DEL PROYECTO X

2. MARCO TEÓRICO **11**

2.1 BOMBAS DINÁMICAS 11
2.2 ENSAYOS HIDRÁULICOS PARA BOMBAS Y NORMA ISO 9906-2012 20
2.3 BASE TEORICA DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL 35

3. BANCO DE PRUEBAS U.T.F.S.M **39**

3.1 COMPOSICIÓN DEL BANCO 39

4. ALCANCE Y PROBLEMÁTICAS **53**

4.1 CONDICIONES Y EXIGENCIAS 53

5. –DISEÑO DE LA SOLUCIÓN **63**

5.1 DISEÑO 63
5.2 SOLUCIÓN PARA EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS 71
5.3 PROCEDIMIENTO Y PASOS PARA ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS 81

6. IMPLEMENTACION Y PRUEBAS **85**

6.1 DISEÑO 85
6.2 MÉTODOS DE ADQUISICIÓN 91
6.3 ENSAYO DE CURVA DE ALTURA DE LA BOMBA 103

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS **119**

7.1 DISEÑO 119
7.2 PLC "TRACE" 119
7.3 LABJACK 122

7.4 MEDICIÓN DE POTENCIA 126

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 128

9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 130

10. ANEXOS 131

10.1 ANEXO A 131
10.2 ANEXO B 147
10.3 ANEXO C 166

I. INTRODUCCIÓN

En el área de mecánica de fluidos y turbomáquinas se estudia el funcionamiento de las bombas hidráulicas. En las experiencias de laboratorio las pruebas más comunes que se hacen son las mediciones de las curvas características de la bomba, las que incluye curva de altura, potencia y NPSH.

Actualmente, el laboratorio de termofluidos de la Universidad Técnica Federico Santa María cuenta con un banco de pruebas de bombas, constituido por dos bombas centrífugas de marca Vogt con sus respectivos motores eléctricos, dos Variadores de frecuencia, ocho sensores de presión, sensor de caudal, sensor de temperatura, una válvula neumática, control automatizado por PLC y una pantalla HMI para visualizar las variables de medición.

Actualmente se desconoce la confianza del sistema para realizar pruebas de rendimiento hidráulico de bombas centrifugas. En esto se incluyen si posee los componentes del sistema necesario como también si estos están aptos para reproducir la curva de las bombas, y en caso de estarlo con qué incertidumbre son capaces de hacerlo.

Como en toda experiencia de laboratorio la metrología cumple una labor importante para un correcto estudio de los fenómenos a estudiar, por lo que la adquisición y análisis de datos tienen una participación significativa.

Es por lo mencionado anteriormente que este trabajo de título realiza una evaluación del banco de ensayos utilizando como parámetro guía la Norma ISO 9906-2012, la cual menciona recomendaciones y establece parámetros de funcionamiento que se utilizan como guía para implementar y proponer mejoras en el banco de ensayos. Posterior a esto se realizan pruebas de rendimiento hidráulico de altura y potencia cumpliendo casi en la totalidad de los requerimientos de la norma, permitiendo así habilitar el funcionamiento del banco de pruebas de bombas centrifugas para poder realizar las experiencias de laboratorio en los ramos que requieran ensayar y demostrar experimentalmente el funcionamiento de estas.

Estas mejoras implementadas permitirán elaborar material fundamental y de calidad para experiencias futuras con los alumnos, además permite habilitar el banco para próximos estudios de investigación, lo cual abre la posibilidad para desarrollar nuevos proyectos.

II. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Realizar la evaluación, equipamiento y puesta en marcha del banco de ensayos de bombas centrifugas del laboratorio de termofluidos según norma ISO 9906-2012.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Hacer un levantamiento de información del banco de pruebas de bombas centrífugas
- Implementar mejoras recomendadas y exigidas por la Norma ISO 9906-2012
- Categorizar según la norma el banco de ensayo y proponer mejoras
- Elaborar documentación y base de datos con fines académicos

III. PROBLEMÁTICA

Actualmente en el Campus San Joaquín de la Universidad Técnica Federico Santa María no se cuenta con un banco de ensayos capacitado para realizar pruebas de rendimiento hidráulico de bombas centrifugas que permita demostrar experimentalmente a los alumnos el funcionamiento de estas máquinas, sin tener la necesidad de viajar a Casa Central en Valparaíso. Esto limita enormemente el desarrollo de los alumnos en esta área académica específica, por un lado, se ven afectados en la formación debido a experiencias breves o cancelación de estas debido a el traslado. Por otro lado, se ven afectados por la falta de un banco propio que permita a los alumnos la posibilidad de investigar o desarrollar nuevos proyectos y que este se encuentre en su propio Campus, lo cual incentiva al desarrollo de esta área de la ingeniería.

Es por esto que este trabajo y todos quienes colaboraron en su formación, permiten dar inicio a la puesta en marcha de un banco de pruebas que permitirá aportar desarrollando experiencias de laboratorio y permitiendo a otros alumnos seguir desarrollando este banco en el camino que lo requiera.

1.1 ALCANCE DEL PROYECTO

Según el objetivo general mencionado anteriormente, se plantean los siguientes alcances a desarrollar a lo largo de este trabajo:

a. Identificar las falencias del banco de pruebas de bombas centrífugas de la U.T.F.S.M según las exigencias de la norma para este tipo de banco.
b. Diseñar piezas y planos requeridos para cumplir con las exigencias de diseño en caso de no existir en el mercado.
c. Implementar un sistema de adquisición que permita leer la señal de los sensores en el tiempo de manera simultáneamente, y que, además, permita almacenar esta información.
d. Elaborar un documento en Matlab que permita calcular altura, caudal, errores sistemáticos y errores aleatorios en un punto de operación de la bomba, a partir de una base de datos almacenada en un documento de formato csv.
e. Dar recomendaciones de operación o mejoras a implementar para estudios futuros.

2. MARCO TEÓRICO

Este primer capítulo contiene la información técnica relevante para realizar el estudio del banco de pruebas de la UTFSM. En este se incluye la base teórica sobre el funcionamiento de bombas dinámicas y automatización electrónica.

Parte de la composición de este capítulo incluye la norma ISO 9906-2012 "Rotodynamic pumps – Hydraulic performance acceptance tests – Grades 1, 2 and 3", utilizada como documento base para evaluar, modificar y poner en marcha el banco actual.

2.1 BOMBAS DINÁMICAS

Las bombas dinámicas son un tipo de turbomáquina generadora que entregan energía a un fluido, transmitiendo parte de la energía mecánica al fluido. Esta energía en la mayor parte de los casos se presenta básicamente en forma de presión y velocidad.

Para el alcance de este trabajo basta analizar el grupo de bombas centrífugas, ya que es el tipo de bombas con las que cuenta el banco analizado. Además, es esta variedad de bombas dinámicas la más utilizadas en el ámbito industrial.

La potencia y caudal que puede entregar una bomba centrífuga es variable, abarcan grandes rangos de presiones y caudales. Generalmente sus capacidades quedan diferenciadas por el sentido de flujo (axial, mixto, radial y de paletas) y cantidad de etapas o rodetes que tenga.

Una manera de caracterizar las bombas tiene relación con el sentido de flujo, el cual está relacionado con la <u>forma del rodete</u>. Un término utilizado para clasificar las bombas es el de número específico de revoluciones (n_s), que se entiende como la velocidad necesaria por el rodete para mover un caudal $Q_s = 1\ [\frac{m^3}{s}]$ a una altura de $H_s = 1\ [m]$. Esta expresión es posible extraerla de las leyes de afinidad que son explicadas en la descripción de la norma ISO 9906-2012, de modo que la velocidad de específica se presenta de la siguiente manera:

$$n_s = n\ \times \frac{(\frac{Q}{Q_s})^{0.5}}{(\frac{H}{H_s})^{0.75}} \tag{1.01}$$

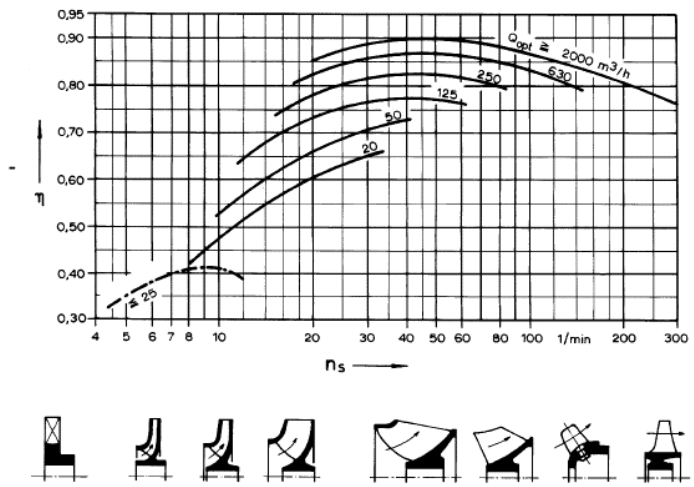
Se reemplaza con los valores definidos de velocidad específica y obtenemos la siguiente expresión conocida para las Turbomaquinas:

$$n_s = \frac{n}{1}\ \times \frac{(Q_{opt})^{0.5}}{(H_{opt})^{0.75}} \tag{1.02}$$

Otra variable que cumple la misma función es el número tipo característico "K", la cual deriva de las mismas leyes de afinidad, por lo que tiene una estructura similar como se puede ver en la **ecuación 1.03**. Se define con la siguiente ecuación:

$$K = 2 \times \pi \times n \times \frac{(Q_{opt})^{0.5}}{(g * H_{opt})^{0.75}} \tag{1.03}$$

En la **figura 2-1** es posible ver la relación que tiene la forma del rodete con n_s y cómo esto afecta en la eficiencia máxima alcanzable en la bomba centrifuga según el número especifico de revolución que tenga.



Impulsores de paletas n_s=4 a 12 rpm	Impulsores de flujo radial n_s=8 a 45 rpm	Impulsores de flujo mixto n_s=40 a 160 rpm	Impulsores de flujo axial n_s=100 a 300 rpm

Figura 2-1: Velocidad específica, forma del impulsor y rendimiento. [Sterling Fluid Group, 2003]

Las curvas características se grafican con relación al caudal, sin embargo, dependiendo del tipo de bomba, existen **caudales máximos y mínimos recomendados de operación.** Se define como el **caudal mínimo** y **máximo estable**, como el caudal máximo y mínimo para el correcto funcionamiento de la bomba, asegurando que no haya condiciones de flujo inestable, ruidos o vibraciones.

El caudal mínimo estable **($Q_{\text{mín}\,estable}$),** y máximo estable ($Q_{\text{máx}\,estable}$) generalmente son determinados por el fabricante, sin embargo, existe una tabla que se puede ver en la **figura 2-2,** con **caudales mínimos y máximos estables recomendados**, pudiendo ser estos diferentes a los que el fabricante recomienda, pero útiles como punto de referencia.

Tipo de bomba	Bombas de canal lateral	Bombas de flujo radial	Bombas de flujo mixto	Bombas de flujo axial
n_s	4 ... 12	8 ... 45	40 ...160	100 ... 300
$Q_{\text{min stable}}/Q_{\text{opt}}$	0,10 ... 0,64	0,10 ... 0,40	0,60 ... 0,65	≈ 0,75
$Q_{\text{max stable}}/Q_{\text{opt}}$	1,10 ... 1,40	≈ 1,50	≈ 1,35	≈ 1,10

Figura 2-2: Valores límites recomendados según velocidad específica. [Sterling Fluid Group, 2003]

El punto de operación de las bombas está dado por las variables altura (**H**), potencia (**P**), rendimiento (**η**) y NPSHR (**Net Positive Suction Head Required**). Estas variables suelen estudiarse en todo el rango de operación para el caudal (**Q**), a una velocidad de rotación **constante** en la bomba.

El estudio de estas variables en función del caudal, se conocen como **curvas características,** siendo base importante para la selección y estudio de bombas.

La **curva de H vs Q** expresa la cantidad de energía aportada por la bomba al fluido, la cual se manifiesta en las formas de **presión**, **velocidad** y **altura geodésica.**

$$H = \frac{\Delta p}{\rho \times g} + \frac{\Delta U^2}{2 \times g} + \Delta z \; [m] \tag{1.04}$$

Esta energía expresada en **altura** (H) en bombas centrifugas suele disminuir mientras el caudal aumenta, como se puede ver en la **figura 2-3,** imagen **a).**

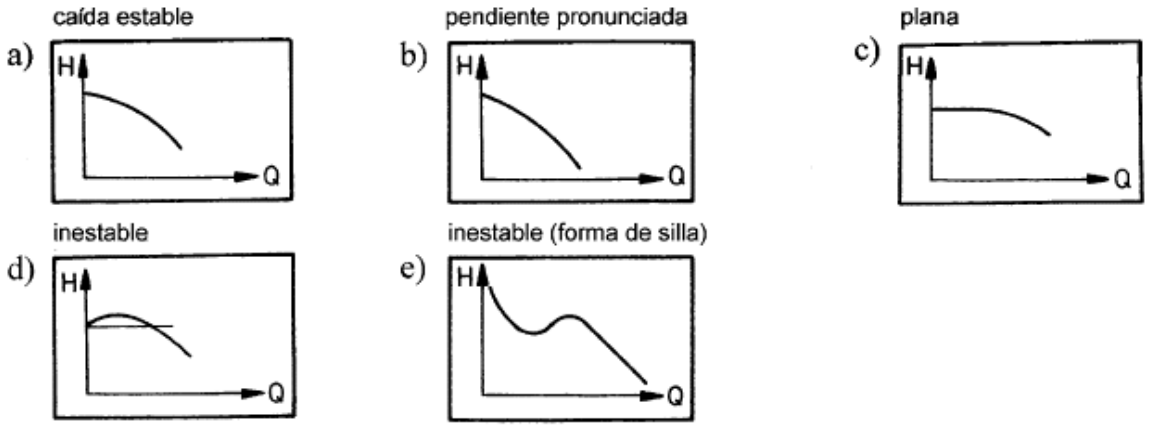


Figura 2-3: Tipos de curvas H vs Q. [Sterling Fluid Group, 2003]

En el caso de la **curva Potencia (P) vs Caudal (Q),** expresa la potencia absorbida por la bomba en su eje. Esta puede medirse directamente en el eje mediante la **ecuación 1.05,** o mediante magnitudes eléctricas (**ecuación 1.06**), en caso de no ser posible el método anterior. Esta última es posible en el caso que la bomba sea alimentada por un motor eléctrico.

$$P = \omega \times T \tag{1.05}$$

$$P = P_{ele} \times \eta_{ele} \tag{1.06}$$

La **<u>curva Rendimiento (η) vs Caudal (Q)</u>** como se ve en la **ecuación 1.07**, expresa la eficiencia de la bomba en un punto de funcionamiento y relaciona la potencia hidráulica del fluido y la potencia absorbida por la bomba. La eficiencia de la bomba aumenta acorde aumenta el caudal, hasta encontrar un punto de máxima eficiencia. Este corresponde al punto donde generalmente se seleccionan las bombas para un funcionamiento eficiente. Posterior a este punto de **máxima eficiencia**, comienza a bajar en relación el caudal aumenta.

$$\eta = \frac{\rho \times g \times H \times Q}{P} \tag{1.07}$$

2.1.1 Variaciones en las curvas características de las bombas.

Complementando lo visto anteriormente, la selección de una bomba centrífuga depende de factores como el líquido a bombear, los requerimientos del sistema en cuanto a caudal requerido, altura, capacidad de succión, descarga, rango de funcionamiento, altura geográfica, el sistema que lo compone, dentro de otros parámetros para diseñar.

Se entiende que una bomba, en lo ideal, es seleccionada para un trabajo en particular. En el caso que la bomba requiera trabajar en un punto de operación de caudal constante o poco variable, simplifica el proceso de selección una bomba, sin embargo, hay situaciones de trabajo que requieren un amplio rango de trabajo en cuanto a altura, caudal y succión.

Una manera de modificar las curvas características de una bomba es haciendo un **cambio en el diámetro del rodete**. Para un determinado sistema a mayor diámetro puede abastecer de mayor caudal y altura, pero a la vez requiere mayor potencia para su funcionamiento.

La posibilidad de construir o diseñar una bomba con distintos diámetros de rodete da versatilidad al modelo, teniendo mayor variedad y opciones de seleccionar la bomba adecuada para una condición específica. Esta característica permite modificar una bomba existente reduciendo su diámetro levemente para disminuir su consumo cuando los requerimientos de caudal o altura sean menores que las presentaciones de la bomba.

La ecuación para relacionar sus variables de estudio cuando el mecanizado del rodete es pequeño es la siguiente:

$$\frac{Q_x}{Q} \approx \frac{H_x}{H} \approx (\frac{D_x}{D})^2 \qquad (1.08)$$

A continuación, en la **figura 2-4,** se aprecia una imagen de las curvas características de la bomba trabajada en el banco de ensayos de la Universidad Técnica Federico Santa María – Campus San Joaquín, una bomba **Vogt H620** para distintos diámetros de rodete, para una velocidad nominal de **2900 [rpm].**

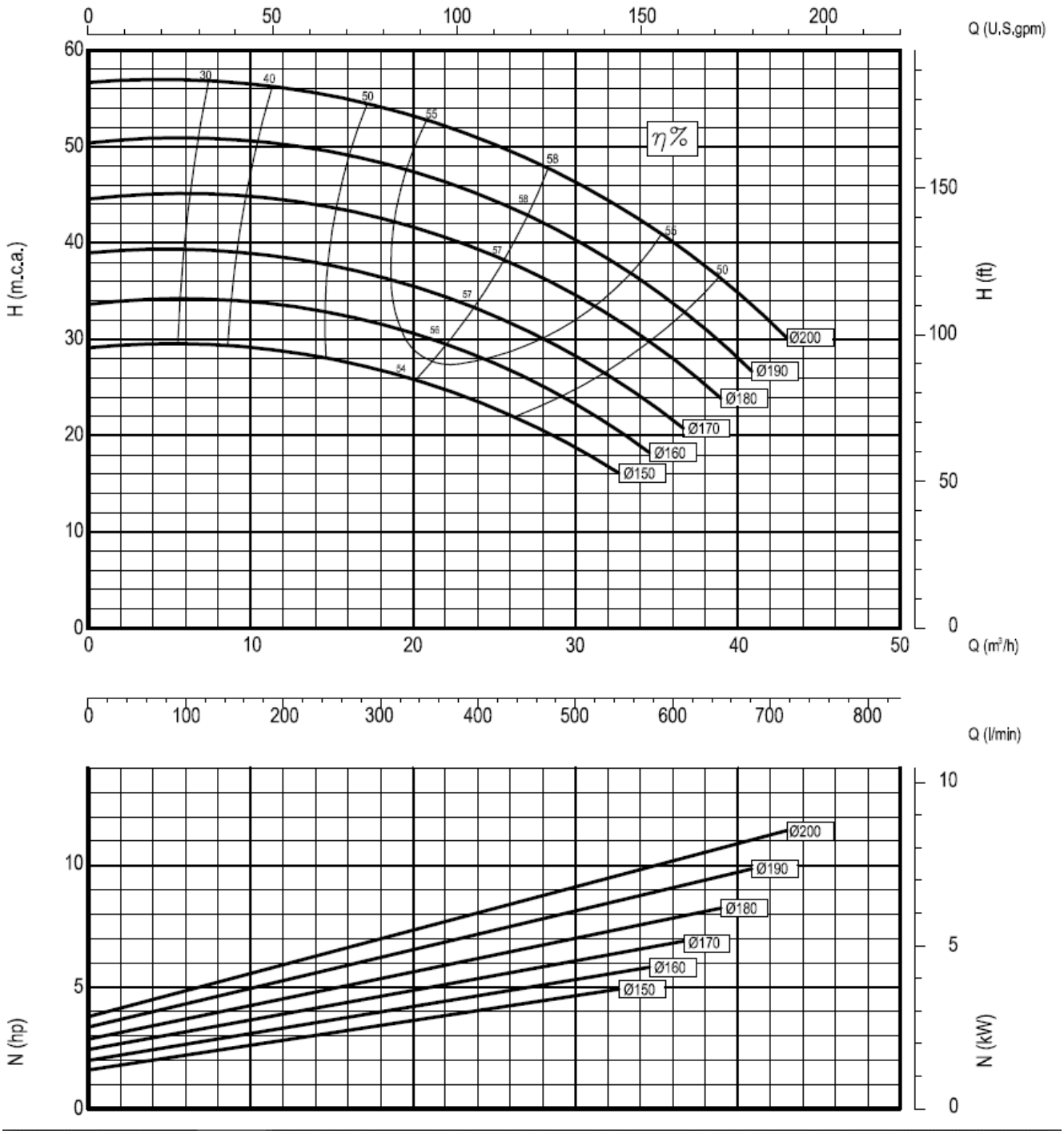


Figura 2-4: Curvas características H vs Q y P vs Q, para la bomba Vogt H 620 a una velocidad nominal 2900 rpm. [VOGT, 2016]

Otro método de modificar las curvas características de trabajo es hacer un **cambio en la velocidad de rotación de la bomba.** Al girar a una velocidad distinta de la nominal las curvas se ven afectadas. En la **figura 2-5** se puede ver el comportamiento de la curva de altura a diferentes velocidades de rotación. Además, se puede apreciar que al aumentar las revoluciones la curva de altura sufre un tipo de desplazamiento, aumentando la altura y caudal.

Este método es una excelente opción para considerar cuando las condiciones de caudal y altura deben ser modificadas constantemente. Se debe tener en consideración el costo asociado al método elegido y la posibilidad de implementarse. Los métodos más comunes para variar la velocidad de rotación de una bomba son los siguientes:

- **Reductor mecánico** con sistema de polea y engranajes si el rpm del motor lo permiten.
- Bombas con grandes potencias cercanas a los 8 MW con **accionamiento por turbinas de vapor.**
- Motores trifásicos con **variador de frecuencia**
- Motores trifásicos con **cambio de polaridad**
- Motores trifásicos con control de **velocidad mecánico, hidráulico o mixto**.

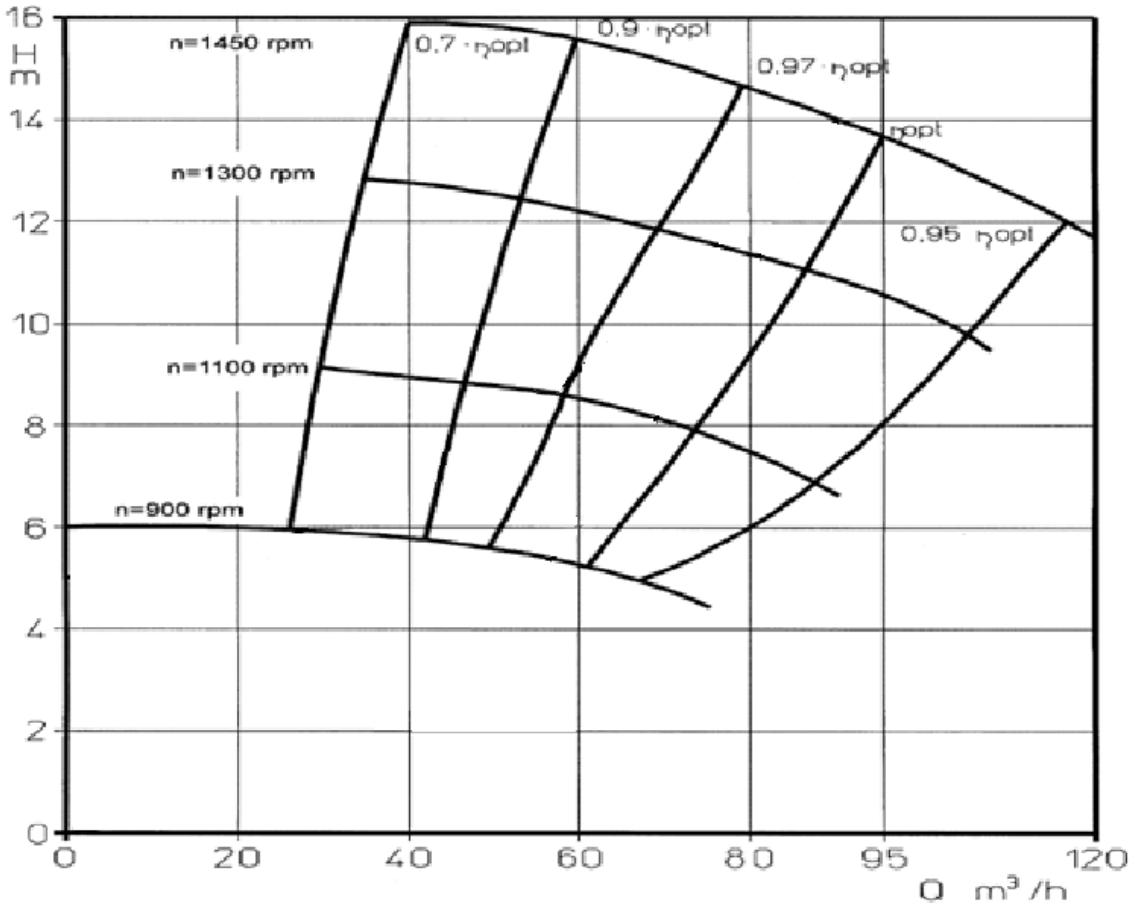


Figura 2-5: Cambio curva característica según cambio de velocidad de rotación. [Sterling Fluid Group, 2003]

Una tercera forma de modificar las curvas características de una bomba es haciendo una **conexión entre bombas** en el mismo sistema. Las curvas características de las bombas funcionando como conjunto se ven modificadas en comparación de las curvas de cada una trabajando de manera independiente.

Los dos métodos de conexión son hacerlo en serie o paralelo, donde cada método presenta ventajas diferentes. En algunas ocasiones se puede presentar un conjunto de bombas que trabajando juntas puedan utilizar ambos métodos de conexión.

El método de **conexión en serie** nos da la posibilidad de aumentar en creces la presión suministrada por una solo bomba de manera individual. Teóricamente al conectarse las bombas en serie producen una presión equivalente a la suma de las presiones producidas por cada bomba de forma individual para un caudal dado (**figura 2-6**).

Como se puede apreciar en la **figura 2-6**, el punto de operación es en la intersección de la curva $H_{\mathrm{B1+B2}}$, con la curva del sistema J_{sist}.

Se debe tener en consideración que el caudal máximo producido por este conjunto de bombas no sea mayor al caudal máximo de la bomba de menor capacidad, por ende, generalmente las bombas conectadas en serie son idénticas o de iguales capacidades.

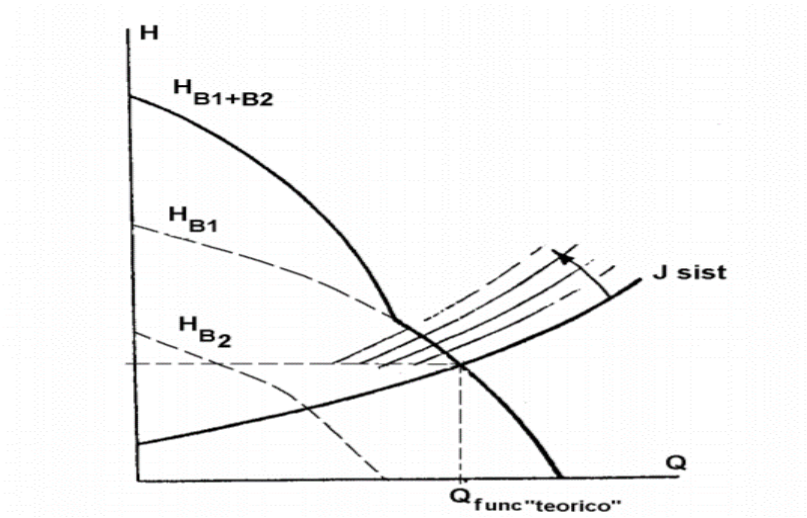


Figura 2-6: Curva característica de 2 bombas (H_{B1} H_{B2}) y curva ($H_{\mathrm{B1+B2}}$) resultante de su conexión en serie. [Ariel.R.Marchegiani, 2004]

En la **conexión de bombas en paralelo**, estas son abastecidas por un mismo flujo a sus respectivas succiones, y descargando ambas el fluido a una misma tubería, por lo que el caudal máximo capaz de descargar el conjunto es similar a la suma del caudal máximo descargable por cada una de forma independiente.

En el caso de la altura para el conjunto, el máximo es similar al de la bomba de mayor capacidad de altura (**H**), como se puede ver en la **figura 2-7**.

Al utilizar este tipo de conexiones, se debe hacer en un punto óptimo, teniendo cuidado de no trabajar en caudales capaces de ser abastecidos por una bomba de forma independiente ya que estaríamos desperdiciando la utilidad y energía de una de las bombas.

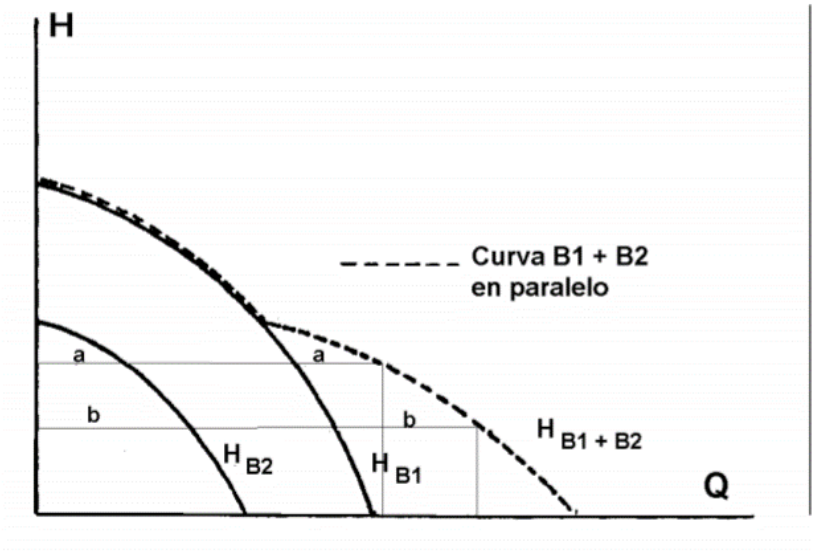


Figura 2-7: Curva característica de 2 bombas (A, B) y su curva C resultante de su conexión en paralelo. [Ariel.R.Marchegiani, 2004]

2.2 ENSAYOS HIDRÁULICOS PARA BOMBAS Y NORMA ISO 9906-2012

Es indispensable conocer las curvas características de las bombas, para seleccionar y predecir de manera correcta el funcionamiento en distintos puntos de operación. Para poder comprobar y apreciar experimentalmente las curvas de una bomba, son necesarias instalaciones diseñadas particularmente para este propósito. Existen normas que proporcionan condiciones de diseño y medición para asegurar las exigencias mínimas para poder realizar ensayos, además estandarizan las condiciones y métodos de ensayos para establecer parámetros generales e internacionales.

En este trabajo en particular utilizamos como referencia la Norma ISO 9906-2012 "Rotodynamic pumps- Hydraulic performance acceptance tests- Grades 1, 2 and 3", debido a que es la norma de carácter internacional más actualizada que permite aplicar métodos modernos, que posibilitan determinar las curvas características de la bomba según las exigencias y parámetros exigidos actualmente.

2.2.1 Alcance

La normativa en general está destinada a pruebas realizadas en instalaciones de ensayo de bombas: centrífugas, flujo mixto, axiales, ya sea por parte de **fabricantes**, **particulares y centros de investigación o académicos.**

La norma reconoce que, en la mayoría de los bancos, **no existen las condiciones ideales para su cumplimiento al 100%,** pero aun así el banco puede ser utilizado para pruebas de aceptación, siempre y cuando exista un acuerdo entre el fabricante y el cliente.

Esta norma especifica 3 niveles de aceptación:

- Grados 1B, 1E y 1U. Tolerancias ajustadas
- Grados 2B y 2U. Tolerancias medias
- Grado 3B. Tolerancias amplias

Estos 3 niveles de aceptación son explicados con mayor detalle en la sección 1.2.3.

Si el banco de ensayo cumple con las condiciones de diseño y medición exigidas por la norma, o si existe un acuerdo entre fabricante y cliente, la bomba ensayada se evaluará en el grado de aceptación que se acuerde, junto con la tolerancia que mejor se adapte a su uso destinado.

Las curvas características se ensayan para comprobar un punto específico de flujo vs altura, llamado **punto de garantía** ("Guarantee point"). Entre cliente y fabricante pueden acordar probar más de 1 punto de garantía, como también establecer puntos de garantía para potencia, eficiencia y NPSH.

Generalmente el punto de garantía es el punto de operación optimo, es decir, en el punto de mayor eficiencia, a pesar de que puedan acordarse una o dos puntos de garantías extras a este.

2.2.2 Garantías y funcionamiento de la prueba.

El principio de funcionamiento de la prueba establece que el fabricante garantiza para el punto de garantía a una cierta velocidad nominal (En algunos casos de tensión y frecuencia), que la curva media obtenida por medición en el banco de pruebas toca o pasa a través de las tolerancias seleccionadas para la prueba y que rodean el punto de garantía.

Para la correcta aceptación de la prueba las mediciones deben encontrarse dentro de los rangos de incertidumbre y fluctuación permitidas.

2.2.3 Incertidumbre de medición y fluctuación admisible

Toda medición realizada está sujeta a una cierta incertidumbre, es decir, que a pesar de realizar un excelente procedimiento de medición y utilizando instrumentos precisos, la variable a medir dará un valor medido que presenta una diferencia del valor "real" de la magnitud medida.

Según esta norma internacional, antes de proceder a calcular las incertidumbres de medición, es necesario evaluar que las fluctuaciones de las variables a medir se encuentren dentro de los rangos permitidos. En caso de no encontrarse dentro de los rangos permitidos, es **necesario utilizar un dispositivo de amortiguación en los instrumentos de medición** o en sus líneas de conexión, el cual permitirá disminuir la amplitud de las fluctuaciones dentro de los valores permitidos. (el instrumento de amortiguación a utilizar debe ser simétrico y lineal, como por ejemplo un tubo capilar, que permite obtener una integración en al menos un ciclo completo de fluctuaciones).

Measured quantity	Permissible amplitude of fluctuations		
	Grade 1 %	Grade 2 %	Grade 3 %
Rate of flow	±2	±3	±6
Differential head	±3	±4	±10
Outlet head	±2	±3	±6
Inlet head	±2	±3	±6
Input power	±2	±3	±6
Speed of rotation	±0,5	±1	±2
Torque	±2	±3	±6
Temperature	0,3 °C	0,3 °C	0,3 °C

Figura 2-8: Valores en la amplitud de fluctuación en porcentaje permitidos para cada variable. [NORMA ISO9906-

Rate of flow: Caudal, o flujo volumetrico

Differential head: La diferencia de altura entre Outlet head y Inlet head

Outlet head: La altura en la salida de la bomba

Inlet head: La altura en la entrada de la bomba

Input power: Se refiere a la potencia de alimentación de la bomba, o potencia en el eje.

Speed of rotation: Velocidad de rotación en RPM.

Si las mediciones se encuentran dentro de los rangos permisibles de fluctuaciones, requeridos por la norma ISO 9906-2012 dadas en la **figura 2-8**, es posible calcular la incertidumbre general de nuestra medición, y para esto es necesario estudiar las componentes aleatorias y sistemáticas de esta.

2.2.3.1 Incertidumbre aleatoria

La incertidumbre aleatoria, debido a las componentes de medición, o de variación de la cantidad misma a medir, o en efecto producto de ambos casos, aparece directamente como una dispersión en la medida.

Esta componente aleatoria disminuye con el número de mediciones de la variable de estudio y el nivel de confianza establecido. En este caso se utiliza una distribución t-student, la cual se asemeja a una distribución normal, sin embargo, tiene una mayor dispersión que esta. El error aleatorio para este caso es calculado con la ecuación 1.11, donde se puede ver que depende del número de mediciones, el valor promedio y la variable t, que para un nivel de confianza del 95% toma los valores de la **figura2-9**, sin embargo, esta variable tiene un valor mínimo de 1.96 cuando $n \rightarrow inf$ asemejándose a una distribución normal.

Para la estimación, debe realizarse una toma de un mínimo de 3 lecturas en cada punto de prueba, luego se debe calcular la media ($\bar{x}$) y desviación estándar (s) de las mediciones.

Se debe considerar " x" como la variable a calcular, "x_i" como la medición número i: 1,2,3, 4…n. Siendo "n" el número total de mediciones.

La media y desviación estándar se calculan con las siguientes fórmulas:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \times \sum_{1}^{n} x_i \tag{1.09}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum (x_i - \bar{x})^2} \tag{1.10}$$

Finalmente, el valor de la incertidumbre aleatoria e_R se calcula con la ecuación 1.11:

$$e_R = \frac{100 \times t \times s}{\bar{x} \times \sqrt{n}} \ [\%] \tag{1.11}$$

El valor t de la ecuación se debe seleccionar de acuerdo con los valores de la **figura 2-9**, que representar los valores asignados según una **distribución t- Student´s, basada en una confianza del 95 %.**

n	*t*	*n*	*t*
3	4,30	12	2,20
4	3,18	13	2,18
5	2,78	14	2,16
6	2,57	15	2,14
7	2,45	16	2,13
8	2,36	17	2,12
9	2,31	18	2,11
10	2,26	19	2,10
11	2,23	20	2,09

Figura 2-9: Valores para distribución t Stundent´s. [Norma ISO 9906, 2012]

2.2.3.2 Incertidumbre Sistemática

La incertidumbre sistemática e_S, a diferencia de la aleatoria, no se puede reducir aumentando el número de mediciones, ya que se basa en los instrumentos y en el método utilizado. Su estimación se basa en la calibración trazable a los estándares internacionales de medición. En la **figura 2-10** se puede apreciar los valores permitidos en el punto de garantía**.**

El primer requisito de la Norma ISO 9906-2012 es tener todos los instrumentos de medición calibrados y con su correcto ajuste a cero (más información en **Anexo A-1)**. También, deben estar correctamente instalados de acuerdo con las condiciones establecidas por el fabricante y los requerimientos de la norma que se verán posteriormente.

Measured quantity	Maximum permissible systematic uncertainty (at guarantee point)	
	Grade 1 %	Grades 2 and 3 %
Rate of flow	±1,5	±2,5
Differential head	±1,0	±2,5
Outlet head	±1,0	±2,5
Inlet head	±1,0	±2,5
Suction head for NPSH testing	±0,5[a]	±1,0
Driver power input	±1,0	±2,0
Speed of rotation	±0,35	±1,4
Torque	±0,9	±2,0

Figura 2-10: Valores permitidos para la incertidumbre sistemática. [Norma ISO 9906, 2012]

Para calcular este error dependerá del error producto de la precisión y exactitud del instrumento, y de los componentes utilizados hasta la visualización del valor medido.

2.2.3.3 Incertidumbre general

Una vez calculadas ambas componentes de incertidumbre, se procede a calcular una incertidumbre general con la ecuación siguiente:

$$e = \sqrt{{e_R}^2 + {e_S}^2} \tag{1.12}$$

Los valores obtenidos de e para las distintas variables deben compararse con los valores de la **figura 2-11:**

Quantity	Symbol	Grade 1 %	Grades 2, 3 %
Flow rate	e_Q	±2,0	±3,5
Speed of rotation	e_n	±0,5	±2,0
Torque	e_T	±1,4	±3,0
Pump total head	e_H	±1,5	±3,5
Driver power input	e_{Pgr}	±1,5	±3,5
Pump power input (computed from torque and speed of rotation)	e_P	±1,5	±3,5
Pump power input (computed from driver power and motor efficiency)	e_P	±2,0	±4,0

Figura 2-11: Valores permitidos de incertidumbre general.

Para el caso de la eficiencia global e_{Pgr}, la cual considera desde la entrada de potencia del accionador (P_{gr}) de la bomba, hasta la potencia hidráulica o de salida de la bomba, se utiliza la **ecuación 1.13**.

En el caso de calcula la eficiencia de la bomba (e_P), se utiliza la ecuación 1.14 cuando se tienen las mediciones de incertidumbre de torque y velocidad de rotación. Se puede utilizar la ecuación 1.15 para cuando se tiene la incertidumbre general de la medición de potencia o cuando la potencia es calculada mediante entrada de potencia eléctrica y eficiencia del motor.

$$e_{\eta gr} = \sqrt{{e^2}_Q + {e^2}_H + {e^2}_{Pgr}} \tag{1.13}$$

$$e_\eta = \sqrt{{e^2}_Q + {e^2}_H + {e^2}_T + {e^2}_n} \tag{1.14}$$

$$e_\eta = \sqrt{{e^2}_Q + {e^2}_H + {e^2}_P} \tag{1.15}$$

Quantity	Symbol	Grade 1 %	Grades 2 and 3 %
eficiencia general (calculadas con Q, H, P_{gr})	$e_{\eta gr}$	±2,9	±6,1
eficiencia bomba (calculadas con Q, H, M, n)	e_{η}	±2,9	±6,1
eficiencia bomba (calculadas con Q, H, P_{gr}, η_{mot})	e_{η}	±3,2	±6,4

Figura 2-12: Valores incertidumbre general aceptada para eficiencia, según método calculado. [Norma ISO 9906, 2012]

2.2.4 GRADOS DE ACEPTACIÓN Y TOLERANCIAS PARA LAS PRUEBAS BAJO NORMA.

La norma tiene 6 grados de aceptación con 3 niveles de exigencia en cuanto a magnitud de la tolerancia y en resumen son las siguientes:

- **Grado 1**: Es el más estricto de la norma
  - **Grado 1U:** Es el grado más estricto con una tolerancia unidireccional, utilizado generalmente cuando **la bomba no puede estar bajo el punto de garantía**.
  - **Grado 1E**: Es la categoría más exigente en la eficiencia, **enfocada a la eficiencia energética**, siendo bilateral en cuanto a las tolerancias permitidas.
  - **Grado 1 B**: Es **la categoría bidireccional de este nivel**, teniendo un poco menos de énfasis en la eficiencia de la bomba, siendo igual en las demás variables.
- **Grado 2**: Es el nivel intermedio en cuanto a exigencias requeridas en cuanto a tolerancias
  - **Grado 2B:** Categoría **bidireccional del nivel intermedio** de exigencia en cuanto a tolerancias.
  - **Grado 2U:** Caso **unidireccional del grado 2**, teniendo magnitud de tolerancia similar en comparación con su otra variante bilateral.
- **Grado 3:** Es el menos estricto y nivel base para cumplir con los requisitos de la norma.
  - **Grado 3B:** Caso menos estricto, único y **base para cumplir el mínimo de exigencias de la norma.**

En la **figura 2-13** se puede apreciar las diferentes tolerancias obligatorias par caudal altura y potencia para los 6 grados de aceptación en sus diferentes categorías unilateral o bilateral. También se puede apreciar la tolerancia de eficiencia de carácter opcional, que se debe acordar entre las partes interesadas para pruebas de rendimiento.

Grado	1			2		3	
$\Delta\tau_Q$	10 %			16 %		18 %	Requisito de Garantía
$\Delta\tau_H$	6 %			10 %		14 %	
Grado de aceptación	1U	1E	1B	2B	2U	3B	
τ_Q	+10 %	±5 %		±8 %	+16 %	±9 %	Obligatorio
τ_H	+6 %	±3 %		±5 %	+10 %	±7 %	
τ_P	+10 %	+4 %		+8 %	+16 %	+9 %	Opcional
τ_η	≥0 %		−3 %	−5 %		−7 %	
NOTA: $\tau_x(x = Q, H, P, \eta)$ representa la tolerancia de la cantidad indicada.							

Figura 2-13: Grados de aceptación para la prueba de bombas y sus tolerancias correspondientes

2.2.4.1 Tolerancias para bombas con potencia de entrada menor a 10[kW]

Para el caso de las bombas con **potencias inferiores a los 10 [kW],** las tolerancias mencionadas anteriormente en los 6 grados de aceptación pueden resultar muy estrictas, por lo que se cuenta con tolerancias especiales para su evaluación, las cuales se presentan a continuación:

- Tasa de flujo $\tau_Q = \pm 10\ \%$
- Altura total de la bomba $\tau_H = \pm 8\ \%$

En caso de querer evaluar la eficiencia se calcula de la siguiente forma:

$$\tau_\eta = -[10 \times \left(1 - \frac{P_2}{10}\right) + 7\ ]\ \% \tag{1.16}$$

Donde la variable P_2 es la potencia de entrada de la bomba, la cual coincide con la potencia en el eje en [kW].

Para calcular el factor de tolerancia para la potencia general se utiliza la siguiente fórmula:

$$\tau_{P,gr} = \sqrt{7^2 + {\tau_\eta}^2}\ \% \tag{1.17}$$

2.2.4.2 Método de evaluación de la prueba de aceptación

La prueba de aceptación debe ser realizada sobre la **velocidad nominal** de la bomba y el **punto de garantía**, por lo que los valores obtenidos deben ser corregidos con las leyes y fórmulas de afinidad en casos de no cumplir con la velocidad nominal.

La variación de la velocidad de giro en la prueba debe estar en un rango entre 50 % y 120% del valor nominal, pero idealmente no debería tener variaciones superiores a un 20% del valor nominal. En este caso, donde la velocidad de rotación es diferente de la nominal, se deben utilizar las leyes de afinidad para recalcular los parámetros mediante las fórmulas 1.18, 1.19, 1.20 y 1.21.

$$Q_T = Q \times \frac{n_{sp}}{n} \tag{1.18}$$

$$H_T = H \times (\frac{n_{sp}}{n})^2 \tag{1.19}$$

$$P_T = P \times \left(\frac{n_{sp}}{n}\right)^3 \times (\frac{\rho_{sp}}{\rho}) \tag{1.20}$$

$$n_T = \eta \tag{1.21}$$

Donde Q_T, H_T, P_T y n_T son los parámetros re calculador a la velocidad de rotación deseada n_{sp} a partir de la velocidad de rotación n a la cual se hicieron las mediciones Q, H, P, η y ρ . Donde la ecuación 1.21 solo es válida cuando la diferencia de la velocidad de rotación es inferior al 20%.

A continuación, se presenta de manera gráfica como se evaluará la aceptación de una prueba de rendimiento de una bomba bajo ciertas tolerancias: en su curva característica H vs Q.

- **Unilateral**: La tolerancia solo aplica sobre un lado del eje de la variable evaluada, hacia el lado creciente de la magnitud calculada. En el caso de la **figura 2-14**, se aprecia como la tolerancia permite una mayor altura y caudal que el punto de garantía.

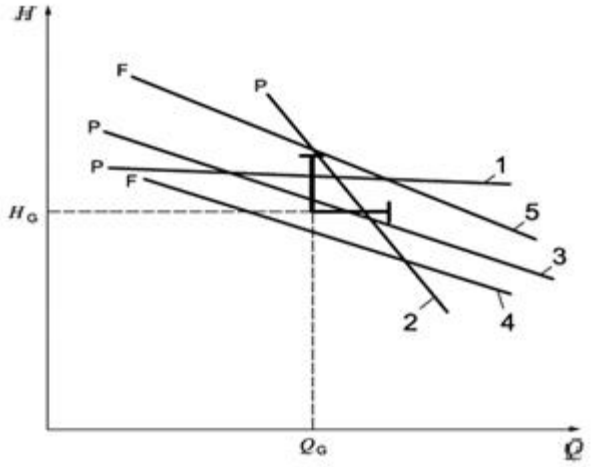


Figura 2-14: Tolerancias en el punto de garantía de forma unilateral. [ISO 9906, 2012]

- Q_G : Es el caudal de garantía.
- H_G: Altura de garantía.

Ejemplos de aplicación:

- Curva 1: Cruza la tolerancia de altura y **aprueba**.
- Curva 2: Cruza la tolerancia de caudal, por lo que **aprueba**.
- Curva 3: Cruza ambas tolerancias, por lo que **aprueba**.
- Curva 4: No cruza tolerancias, **falla la prueba** de aceptación.
- Curva 5: No cruza tolerancias por lo que **no aprueba.**

- **Bilateral**: En este caso las tolerancias se mueven hacia ambos lados del eje en el punto de garantía en ambas variables (caudal y altura)

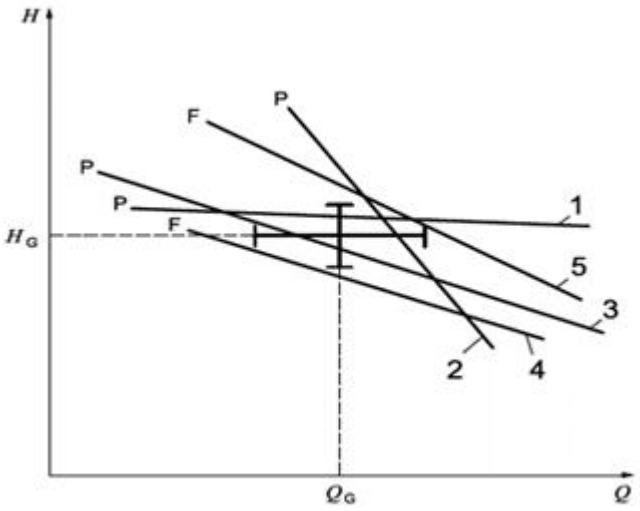


Figura 2-15: Tolerancias en el punto de garantía de forma bilateral. [ISO 9906, 2012]

- Q_G: Caudal de garantía.
- H_G: Altura de garantía.

Ejemplos de aplicación:

- Curva 1: Cruza la tolerancia superior de altura y **aprueba**.
- Curva 2: Cruza la tolerancia superior de caudal, por lo que **aprueba**.
- Curva 3: Cruza ambas tolerancias inferiores, por lo que **aprueba**.
- Curva 4: No cruza tolerancias, **falla la prueba** de aceptación.
- Curva 5: No cruza tolerancia, **falla la prueba** de aceptación**.**

Para evaluar las **<u>tolerancias de potencia y eficiencia</u>** se utiliza un procedimiento diferente. Se debe graficar las curvas de H vs Q, P vs Q, η vs Q, posteriormente se deben ajustar mediante el punto cero del plano y el valor de las variables de garantía.

Los ejemplos de estas tolerancias se encuentran en el **ANEXO 9.1.5.**

2.2.5 DATOS IMPORTANTES DE LOS ANEXOS A, B, C, D, y E, DE LA NORMA ISO 9906-2012.

Dentro de los anexos de la norma se mencionan condiciones importantes que se deben tener en consideración para evaluar el banco en cuanto condiciones de diseño, mediciones y calibración de instrumentos. A continuación, se presenta la información utilizada en este trabajo recomendada por la norma para decidir nuevas implementaciones.

El fluido de trabajo debe ser agua fría y limpia, cumpliendo con las características mencionadas en la **figura 2-16**:

Característica	Unidad	Valor máximo
Temperatura	°C	40
Viscosidad cinemática	m^2/s	$1{,}75 \cdot 10^{-6}$
Densidad	kg/m^3	1050
Contenido en sólidos no disueltos	kg/m^3	2,5
Contenido en sólidos disueltos	kg/m^3	50

Figura 2-16: Especificaciones de agua limpia y fría. [Sterling Fluid Group, 2003]

Para obtener las condiciones óptimas para las mediciones de presión, es ideal que el flujo en la sección transversal donde se realizan las mediciones cumpla con los siguientes requisitos:

1. **El flujo debe ser axial simétrico en la sección de medición.**

2. **Una distribución de presión estática uniforme.**

3. **Flujo libre de remolinos inducidos en la instalación.**

Con esto queremos decir un flujo axial unidireccional simétrico y totalmente desarrollado.

Tener un flujo libre al 100% de estas condiciones resulta casi imposible, sin embargo, se pueden asegurar condiciones aceptables de estos parámetros en la práctica para poder cumplir con los requisitos mínimos de la norma.

Para evitar condiciones desfavorables en la medición, se recomienda no tener cambios de secciones, válvulas, codos o cualquier discontinuidad a <u>menos de 4 diámetros de la sección transversal de medición</u>.

Para instalaciones que cuenten con un sumidero o estanque que se encuentre abierto a la atmósfera, se recomienda que el largo de la tubería recta (desde el último codo o discontinuidad en la tubería) <u>cumpla con la siguiente ecuación</u>:

$$\frac{L}{D} = K + 5 \tag{1.22}$$

Donde L es el largo mínimo de la tubería en la succión sin discontinuidades, D es el diámetro de la tubería y K el número tipo característico visto en la **ecuación 1.03**, que tiene relación directa con la velocidad especifica n_s.

En la **figura 2-17**, en la imagen de la izquierda se puede apreciar la conexión adecuada para las tomas de presión mediante un anillo colector, exigencia para **grado 1**. A la derecha se muestra la correcta instalación de un sensor para pruebas de aceptación de **grado 2 y 3.**

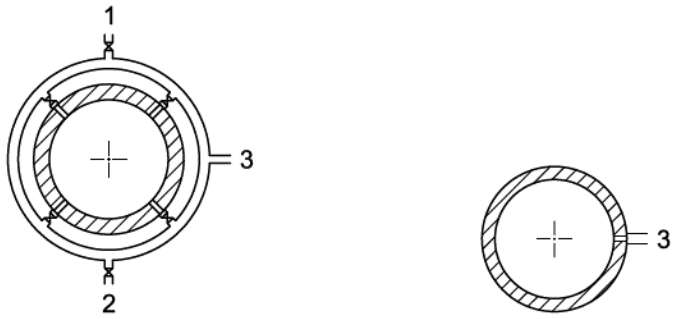


Figura 2-17: Conexión adecuada para sensores de presión [Norma ISO 9906, 2012]

Dentro de las exigencias de la instalación para los instrumentos de medición de presión, igualmente se deben tener ciertas consideraciones, si la tubería es gruesa, como se ve a la **izquierda** de la **figura 2-18**, o delgada, a la **derecha** de la misma figura. Estas condiciones son para asegurar buena calidad de medición reduciendo efectos de presiones dinámicas y fluctuaciones.

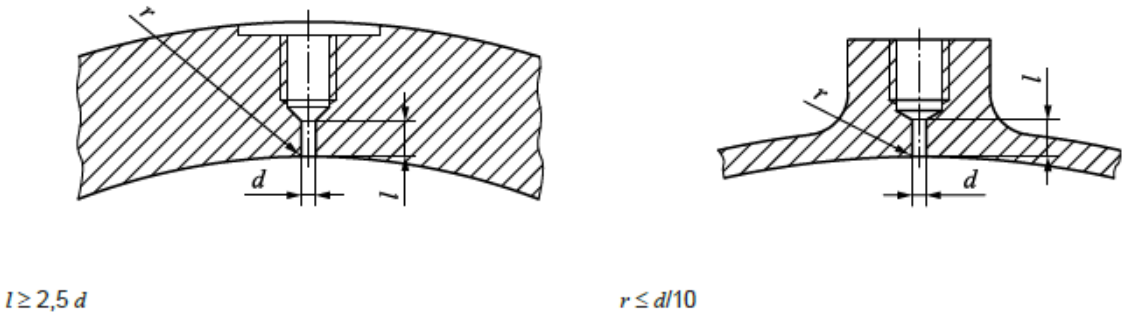


Figura 2-18: Requerimiento para las tomas de presión. [NORMA ISO 9906,2012]

$$l \geq 2{,}5\, d \tag{1.23}$$

$$r \leq d/10 \tag{1.24}$$

La correcta instalación del instrumento de medición de presión ya sea para pared delgada o gruesa, debe contar con una perforación en la tubería, en la que se debe tener la precaución de contar con una distancia "l", no menor a 2,5 veces el diámetro de la perforación "d". Esta debe estar entre 3 a 6 [mm], y/o **ser menor al 10% del diámetro de la tubería** "D".

Los sensores deben estar ubicados en la mitad de la altura de la sección transversal, siempre y cuando la instalación lo permita. Se recomienda utilizar tuberías transparentes para apreciar si el flujo sufre pulsaciones y aire, en el caso de ser posible.

En la norma se menciona además que las curvas características y pruebas realizadas deben ser en las secciones de succión S_1 y descarga S_2 de la bomba, por lo que se deben considerar las pérdidas de carga por fricción en la tubería desde la sección de medición hasta la sección de la bomba. En la succión la sección de medición S'_1, en la descarga S'_2, por lo que llamaremos H_{J1} y H_{J2}., las pérdidas de carga de la sección de medición hasta la sección de succión o descarga de la bomba.

Estas pérdidas de carga por fricción se deben considerar si y sólo si la suma de H_{J1} y H_{J2} supera por 0,5% el valor de la altura H para los casos de pruebas de aceptación de **grados 2 y 3**, y 0,2% en el caso del **grado 1.** En caso de ser mayores se deben considerar y ser calculadas con la **fórmula 1.25** de Darcy - Weisbach:

$$H_J = \lambda \times \frac{L}{D} \times \frac{U^2}{2 * g} \ [m] \tag{1.25}$$

El valor para el coeficiente de fricción "λ" se debe calcular mediante la **fórmula 1.26**, siendo esta la ecuación de Colebrook - White:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \times [\frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,7 \times D}] \tag{1.26}$$

Se pueden utilizar los siguientes valores mostrados en la **figura 2-19** para el coeficiente de rugosidad "k" que son establecidos como referencia por la norma.

Commercial pipe (new) material	Equivalent uniform roughness, *k*, of the surface mm
Glass, drawn brass, copper or lead	smooth
Steel	0,05
Asphalted cast iron	0,12
Galvanized iron	0,15
Cast iron	0,25
Concrete	0,30 to 3,0
Riveted steel	1,0 to 10,0

Figura 2-19: Rugosidad uniforme equivalente para tuberías. [Norma ISO 9906, 2012]

Los instrumentos de medición de presión deben ser instalados a una distancia mínima de 2D desde los flanches de conexión en la succión y descarga. Si la instalación cumple con las recomendaciones anteriores, la altura de la bomba puedes ser calculada con la siguiente fórmula teniendo como referencia la **figura 2-20**:

$$H = z_{2'} - z_{1'} + z_{M2'} - z_{M1'} + \frac{p_{M2'} - p_{M1'}}{\rho * g} + \frac{U_{2'}^2 - U_{1'}^2}{2 * g} + H_{J2} + H_{J1} \tag{1.27}$$

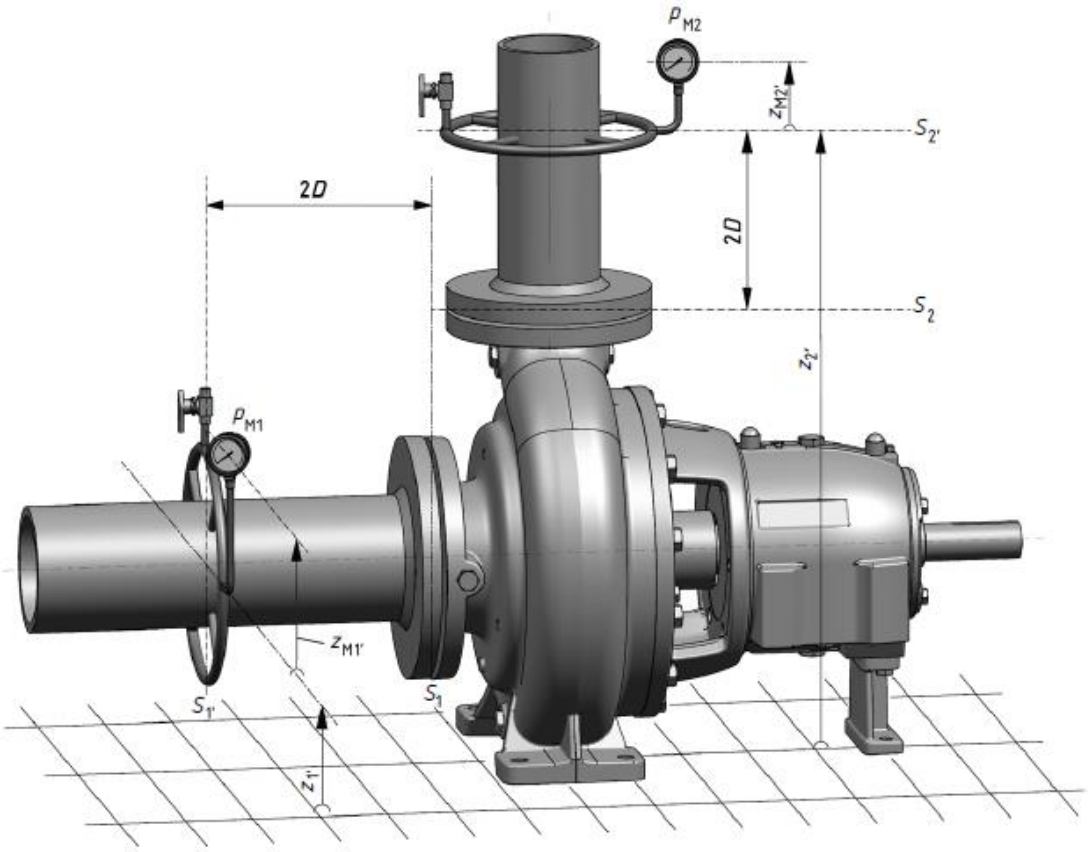


Figura 2-20: ilustración de una bomba para determinar la altura. [NORMA ISO 9906,2012]

2.2.5.1 Equipos de medición.

En los equipos de medición existen ciertas restricciones para su correcto uso. Primero, deben cumplir con las tolerancias e incertidumbres exigidas por la norma. Segundo, deben cumplir con otros requisitos nombrados a continuación para cada variable:

- **Presión**: Los transductores de presión son permitidos siempre y cuando cumplan con las condiciones de tolerancia e instalación exigidas por la norma. Además, deben contar con una calibración más a menudo que otros dispositivos de presión como lo son los manómetros.
- **Velocidad de rotación:** La medición de la velocidad de rotación se debe realizar directamente al eje en caso de ser posible, ya sea con un tacómetro directo, con un contador óptico, magnético o estroboscopio.
- **Caudal:** El instrumento de medición de caudal tiene restricciones en el largo mínimo de la tubería recta donde se instala. En la succión debe ser de al menos 10 veces el diámetro de la tubería, mientras que para la descarga basta con 5 veces el diámetro de esta. Considerando que esta distancia debe ser recta y sin discontinuidades.
  Para los dispositivos de medición de caudal por método electromagnético, además se deben cumplir con las normas ISO-6817, ISO-9104 e ISO-9213.
- **Entrada de potencia de la bomba:** En el cálculo y medición de la P, se permiten 2 métodos. El primer método utiliza el par de torsión en el eje y la velocidad de rotación, mientras que el segundo usa las entradas de potencia eléctrica y la eficiencia de los equipos eléctricos.
  Para motores alternos trifásicos se permite hacerlo de varios métodos, por ejemplo: usando 2 vatímetros, 3 vatímetros, un vatímetro polifásico, entre otros métodos. Sin embargo, siempre se debe conocer la eficiencia del motor en el punto de operación que se está trabajando, y esta debe estar dada por el fabricante, cumpliendo las normas IEC 60034-2-1, IEC 60034-2-2 y IEEE 112 método B.

Se puede ver el tiempo de calibración de los instrumentos en el **ANEXO 1.11.**

2.2.5.2 Prueba de rendimiento para el equipo completo - prueba en cadena.

Las curvas características son obtenidas al medir la altura de la bomba, su caudal y potencia. Luego mediante estas magnitudes es posible calcular la eficiencia del punto de operacion.

El uso de **VDF (Variador De Frecuencias)** para el cálculo de potencia mediante el método de potencias eléctricas, **no está permitido** directamente por la norma. Sin embargo, sí se autoriza realizar las curvas cuando el cliente solicita hacerlas con VDF, o cuando se requiera hacer la prueba de la bomba a distintas velocidades que no sean la nominal. Se hace esta forma, ya que al utilizar VDF se ven afectados los parámetros de funcionamiento del motor eléctrico, lo cual podría afectar las mediciones de potencia y eficiencia.

La norma menciona la posibilidad de realizar una curva de eficiencia de la bomba para los métodos de conexión conocidos. Estos se presentan en la **figura 2-21** en orden descendente en cuanto a la precisión el método de conexión y medición.

Configuration	Drive	Measurement of power	Measurement of revolutions per minute	Influencing factors	Pump efficiency accuracy
Pump only	Mechanical	Torque transducer	Tachometer	None	Highest
Pump and motor, direct connected	Line power	Wattmeter	Tachometer	a) Motor efficiency	••••••••••• •••••••••••
Pump and motor, belt or gear driven	Line power	Wattmeter	Tachometer	a) Motor efficiency b) Transmission efficiency	••••••••••• ••••••••••• •••••••••••
Pump and submersible motor	Line power	Wattmeter	From motor or vibration data	a) Motor efficiency b) Seal power consumption c) Cooling system power consumption	•••••••••• •••••••••• •••••••••• •••••••••
Pump and motor, direct connected	Motor plus VFD	Wattmeter input to VFD	Tachometer	a) Motor efficiency b) VFD efficiency c) Motor efficiency correction for VFD power	••••••••• ••••••••• •••••••• ••••••••
Pump and motor, belt or gear driven	Motor plus VFD	Wattmeter input to VFD	Tachometer	a) Motor efficiency b) Mechanical drive efficiency c) VFD efficiency d) Motor efficiency correction for VFD power	••••••• ••••••• ••••••• •••••• •••••• •••••
Pump and submersible motor	Motor plus VFD	Wattmeter input to VFD	From motor or vibration data	a) Motor efficiency b) Seal power consumption c) Cooling system power consumption d) VFD efficiency e) Motor efficiency correction for VFD power	••••• •••• •••• ••• ••• ••• •• •• •• • • Lowest

Figura 2-21:Factores influyentes para calcular la eficiencia de la bomba en diferentes tipos de configuraciones. [Norma ISO 9906, 2012]

VFD: Es el VDF (Variador de frecuencias).

2.3 BASE TEORICA DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

El concepto de automatización se entenderá como un método que permite procedimientos automáticos mecánicos o electrónicos, con el fin de hacer un proceso o subproceso de forma automática.

Básicamente, todo sistema de automatización está formado por dispositivos tecnológicos que permiten hacer posible el proceso de forma automática. Los conceptos claves son los siguientes:

- **Proceso** por automatizar
- **La unidad de control** que se encarga de ejecutar las ordenes programadas
- **Los controladores,** quienes son la interfaz entre el proceso y el sistema de control
- **Los captadores** son quienes recogen la información que se procesa en la unidad de control
- **Los actuadores** se encargan de comunicar las órdenes dadas por la unidad de control al proceso

Gracias a los elementos mencionados es posible comunicar la unidad de control con el proceso, donde la información fluye constantemente. Esta posee un algoritmo o lenguaje donde se especifica el cómo actuar, es decir, las acciones que darán el funcionamiento del proceso.

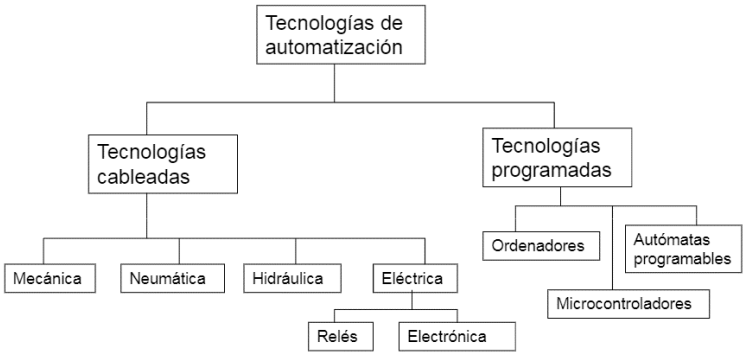


Figura 2-22 Tipos de tecnologías en la automatización. [Escuela de Profesiones Técnicas, sf]

En la **figura 2-22** se aprecian dos grandes grupos que definen las diferentes tecnologías existentes de automatización. Para efectos de este trabajo se acotan los conceptos a **tecnología programada**, la cual ha evolucionado y crecido esta última década.

Un **microcontrolador** se puede definir como un dispositivo, el cual cuenta con su propia CPU, puertos de entradas, salidas, temporizadores, contadores, memorias y convertidores análogo digital. Este dispositivo es utilizado para aplicaciones donde lo más probable es que no haya modificaciones en el funcionamiento del proceso.

Los **autómatas programables (PLC),** destacan por ser un equipo electrónico que posee la capacidad de ejecutar control en el proceso en tiempo real, donde se incluyen parcial o totalmente las interfaces con la información del proceso. El PLC posee sus propias entradas y

salidas de señales, como también un hardware flexible, ya que cuenta en la gran mayoría de los casos con uno incorporado.

El **control por ordenador** es un sistema complejo que destaca por poseer una gran capacidad de cálculo, comunicación y adaptación. Su desventaja es el elevado costo y el requerimiento de personal autorizado para su mantenimiento y programación.

En la actualidad, existen sistemas donde controladores de ordenador se comunican con microcontroladores y autómatas programables. Este sistema permite obtener los beneficios de todos los dispositivos.

2.3.1 Instrumentación, señales y conexión

En la adquisición de datos de sistemas automatizados, existen los llamados 'sensores', que son dispositivos que permiten detectar una acción, estímulo o magnitud. Estos son dispositivos transductores, es decir, transforman el estímulo detectado de una magnitud física, química o digital.

Los sensores pueden ser clasificados según la señal que emiten en análogos y digitales. El sensor análogo emite una señal continua con infinitos valores posibles en su magnitud medida entre un punto y otro, además de representar la medición en un instante dado. Los digitales, en cambio, emiten una señal rectangular que puede tomar valores finitos según la resolución del instrumento, tal como se puede ver en la **figura 2-23.**

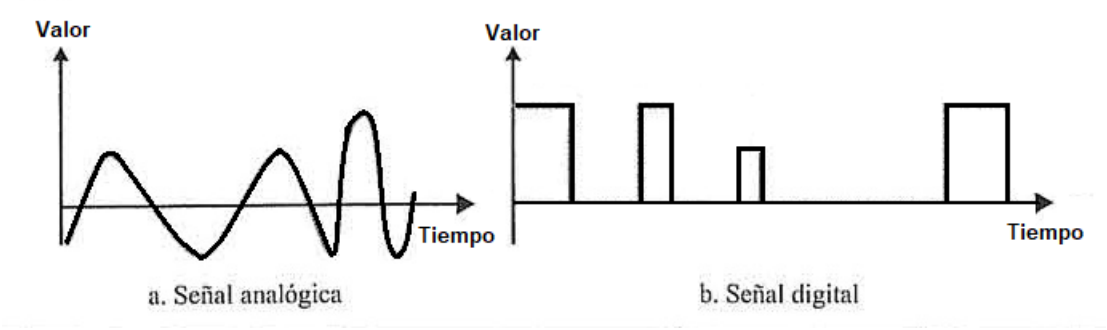


Figura 2-23 Señal análoga y señal digital.

Los sensores pueden ser clasificados en 2 grupos según su fuente de energía, llamados **activos** y **pasivos**. Los sensores activos suelen ser su propia fuente de energía, mientras que los pasivos requieren de una fuente de alimentación externa.

Los sensores analógicos, por sus características, resultan muy prácticos para realizar mediciones experimentales dada su capacidad de mostrar una señal en tiempo real y ser continua.

Los sensores analógicos suelen transformar la magnitud medida en una magnitud eléctrica, comúnmente en una tensión o corriente. Dada esta característica, es que se debe tener cuidado con el sistema de transmisión y lectura de la señal para evitar pérdidas o distorsiones.

Para alcances de este proyecto se menciona la conexión típica para sensores de corriente de 4-20 [mA] llamada de **2 hilos**.

La conexión de 2 hilos para sensores pasivos contiene 2 líneas o conductores de corriente. La línea negativa del sensor es quien transmite la señal de corriente. Lo anterior se puede apreciar en la **figura 2-24**.

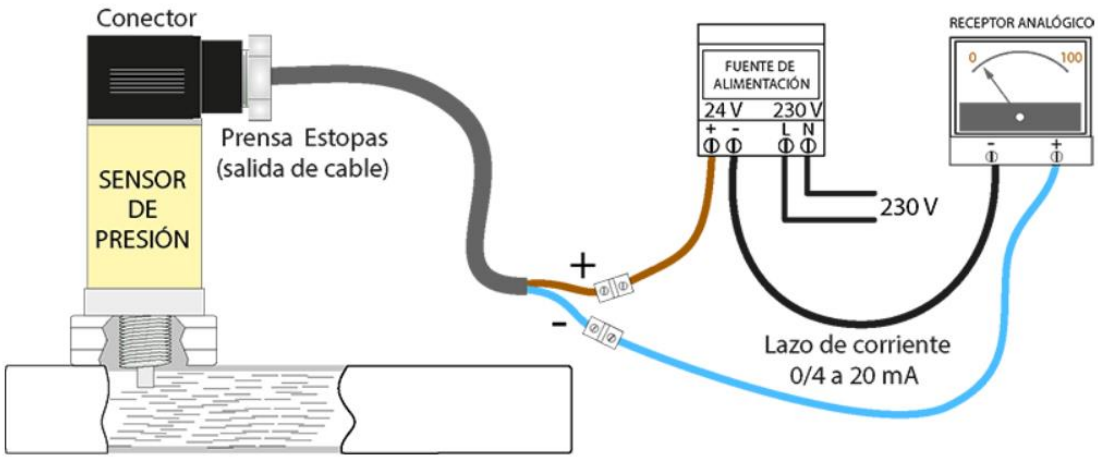


Figura 2-24: Conexión sensor de presión a 2 hilos. [http://www.contaval.es,2017]

En la **figura 2-24** se puede apreciar cómo se alimenta un sensor con una fuente de 24[V] mediante 2 conductores y cómo es la conexión de las 2 líneas en el receptor de la señal.

La conexión de los instrumentos del PLC es posible verla en los planos de conexión de instrumentación del **Anexo B.**

2.3.2 Motores eléctricos y Variadores de frecuencia.

Los motores eléctricos son máquinas altamente utilizadas por su capacidad de transformar energía eléctrica en energía mecánica. Dentro de las máquinas comúnmente accionadas por motores eléctricos, se encuentran las bombas hidráulicas, que al igual que los motores, se fabrican en amplia variedad según los requerimientos del cliente.

Para efectos de este trabajo, debido a que el banco funciona con un variador de frecuencias, es necesario definir las características técnicas del funcionamiento de un motor, el variador de frecuencias y la interacción de ambos funcionando juntos.

Un motor eléctrico inductivo mantiene una velocidad de rotación que tiene relación con la frecuencia f_n $[Hz]$, el número de polos del motor N_p y el deslizamiento s. La ecuación que representa su relación es la siguiente:

$$n = \frac{120 \times f_n \times (1 - s)}{N_p} \tag{1.28}$$

Como hace referencia su nombre, un variador de frecuencia modifica la frecuencia de la señal eléctrica, es decir, recibe en la entrada una onda de tensión y corriente sinusoidal provenientes de la red a una frecuencia nominal de 50 [Hz] en Chile. En su salida, el VDF produce una señal modulada de una frecuencia asignada, la cual afecta el carácter sinusoidal de la corriente y la tensión, esta última en mayor cantidad.

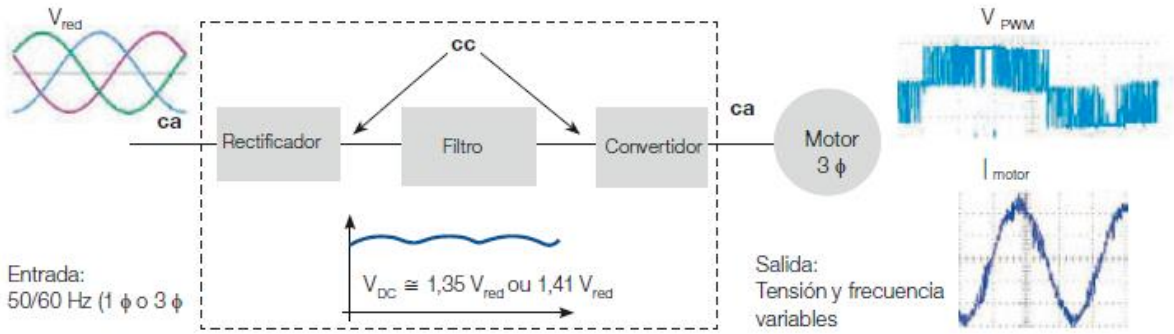


Figura 2-25: Funcionamiento básico de un variador de frecuencia con tensión impuesta PWM. [www.WEG.net, 2018]

En la **figura 2-25** se puede apreciar cómo entra una onda de carácter sinusoidal a un VDF y sale una onda modulada.

Los variadores comúnmente utilizan un rectificador, un filtro y un convertidor. Inicialmente, se rectifica la señal alterna proveniente de la red y se transforma a corriente continua. Posteriormente el filtro y banco de capacitores generan una nueva señal que es convertida finalmente en el inversor en corriente alterna modulada para su salida.

El trabajo que hace el variador de frecuencia al modular la señal afecta la eficiencia del motor o máquina que la recibe. Esto se debe a los harmónicos que se producen en la corriente y en la tensión, producto de la modulación de la señal. Estos harmónicos de diferentes amplitudes dependen del tipo de motor y de la frecuencia modulada entre otros. El motor tiene pérdidas debido a la frecuencia fundamental de alimentación, además, debido a los harmónicos generados.

Más información en: https://www.weg.net/institutional/CL/es/

"WEG-motores-de-inducción-alimentados-por-convertidores-de-frecuencia-pwm-50029372-articulo-tecnico-espanol"

3. BANCO DE PRUEBAS U.T.F.S.M

3.1 COMPOSICIÓN DEL BANCO

El banco disponible actualmente en el laboratorio de termofluidos en la U.T.F.S.M Campus San Joaquín está constituido por una serie de elementos que pueden ser agrupados en dos grupos:

- Componentes del sistema de transporte hidráulico
- Componentes del sistema de adquisición de datos

En el **Anexo B-1** se puede ver un plano del banco de bombas que fue facilitado por el laboratorio de termo-fluidos. Este incluye algunas dimensiones del banco de pruebas que son utilizada netamente como referencia para la **figura 3-1.**

Figura 3-1: Banco de pruebas de bombas centrífugas de la UTFSM, Campus San Joaquín. [Elaboración propia 2018]

3.1.1 COMPONENTES DEL SISTEMA DE TRANSPORTE HIDRÁULICO

Las componentes del banco de pruebas que forman parte de este grupo permiten el movimiento del fluido de manera continua y está constituido por los siguientes elementos:

- 2 bombas centrífugas
- 2 motores eléctricos acoplados a las bombas mediante su eje
- Tuberías
- Accesorios (Codos, uniones de tuberías, tomas de sensores, válvulas con accionamiento manual)
- Estanque de almacenamiento de agua

3.1.1.1 Bomba centrífuga

El laboratorio cuenta con dos bombas de idénticas características, marca **Vogt, modelo H 620**, **velocidad nominal de 2900 [rpm],** diámetro de **succión de 2 [in]** y **descarga de 1,5 [in].** Sus curvas características se pueden ver en el ANEXO A-5.

En la **figura 3-2** se puede apreciar cómo están montados físicamente el motor eléctrico junto con la bomba, que se encuentran unidas directamente en el eje.

Figura 3-2: Bombas Centrífuga Vogt H620, junto con su motor eléctrico Weg W-22(Vista Lateral).

Dentro de las características más importante se encuentran las siguientes:

- $Q_{opt} \approx 23.5\ [\frac{m^3}{h}]$
- $H_{opt} \approx 33.5\ [m]$
- $n_{nominal} = 2900\ [rpm]$
- $n_s \approx 16.83\ [rpm]$
- $\emptyset\ rodete = 170\ [mm]$

3.1.1.2 Motor eléctrico

Las bombas están impulsadas por un motor eléctrico de marca Weg modelo W22, el cual cuenta con un grado de eficiencia IE1 (standard efficiency) de acuerdo con la norma IEC 60034-2014, siendo este el grado menos exigente de eficiencia dentro de las categorías de la norma.

Las características relevantes son las siguientes:

- **Potencia nominal de 5,5 [kW]**
- **Velocidad nominal de 2870 [rpm]**
- **Tensión de alimentación de 380/660 [V]**
- **Frecuencia nominal 50 [Hz]**
- **Eficiencia 86%**
- **Factor de potencia 0,9**

Estas se encuentran en el manual del fabricante que coinciden con las de la placa del motor. Más información del motor eléctrico en **Anexo A-2.**

3.1.1.3 Tuberías, conexiones y válvulas.

En esta sección se dan las especificaciones técnicas de tuberías y accesorios, principalmente para conocer cómo está formado el banco de pruebas y tener características técnicas básicas.

La tubería cuenta con dos secciones principales. La succión de las bombas y el sistema, casi en su totalidad, están compuestos por una tubería de diámetro 2 pulgadas, mientras que en la descarga tienen un pequeño tramo de diámetro de 1,5 pulgadas. Ambas tuberías son de acero galvanizado y cumplen con la Norma ASMT 53 Sch40 grado A galvanizado.

Norma ASTMA-53 SCH 40 GRADOS A y B						
Diámetro Nominal Pulgada	Diámetro Exterior mm (D)	Espesor Nominal mm (e)	Peso Teórico Kg/m	Peso Teórico Kg/ Tira	Presión de Prueba Kg/cm² Grado A	Grado B
1/2	21,30	2,77	1,27	7,62	49,2	49,2
3/4	26,70	2,87	1,69	10,14	49,2	49,2
1	33,40	3,38	2,50	15,00	49,2	49,2
1 1/4	42,20	3,56	3,39	20,34	70,3	77,4
1 1/2	48,30	3,68	4,05	24,30	70,3	77,4
2	60,30	3,91	5,44	32,64	161,7	175,8
2 1/2	73,00	5,16	8,63	51,78	175,8	175,8
3	88,90	5,49	11,29	67,74	154,7	175,8
4	114,30	6,02	16,07	96,42	134,0	154,7
6	168,30	5,00	24,14	120,84	75,2	87,9
6	168,30	6,35	25,36	152,16	95,6	111,11
6	168,30	7,11	28,26	169,56	105,5	128,5

Figura 3-3: Norma ASTM-53 SCH 40 grados A y B. [www.imel.cl , 2015]

Las válvulas de bola son Marca Giacomini, de procedencia italiana, la cual sugiere presiones no mayores a 28 [bar] cuando se trabaja con agua. (**Figura 3-4)**

El fabricante de codos de 90°, acoples flexibles, acoples tee y accesorios, es una marca China llamada Xhtong, la cual no da especificaciones en cuanto al coeficiente de perdida de carga, ni tampoco presiones máximas de trabajo. Esta sólo especifica que sus productos cumplen con la norma ASTM A536 y cuenta con 3 grados de esta (65,45 y 12).

Para controlar el caudal el banco cuenta con una válvula neumática Samson 3277 **(figura 3-5)** con accionamiento análogo comandado digitalmente. Esta se utiliza para la estrangulación del fluido y requiere de una presión de trabajo aproximada de 75 [psi] para su correcto funcionamiento. La presión es abastecida por un compresor con su respectivo acumulador marca Schulz (**figura 3-6).**

Figura 3-4: Válvula de Bola Giacomini R850 (Vista Superior).

Figura 3-5: Válvula de estrangulación Samson 3277.

Figura 3-6: Compresor y acumulador Schulz.

3.1.1.4 Estanque de almacenamiento de agua

Como parte del sistema de bombas se tiene un estanque de almacenamiento de agua con una capacidad cercana a los 12 [m^3], el cual abastece además del banco de bombas, a la sala de prueba de motores. Esta última, a diferencia del banco de bombas, **consume una cierta cantidad de agua** que no retorna.

Para mantener la altura del agua en el estanque, se cuenta con un sensor flotante de nivel que permite el ingreso del agua cuando la altura está bajo un valor mínimo permitido. Una vez accionado este dispositivo, el agua deja de entrar cuando alcanza el nivel máximo de altura que da la señal de corte.

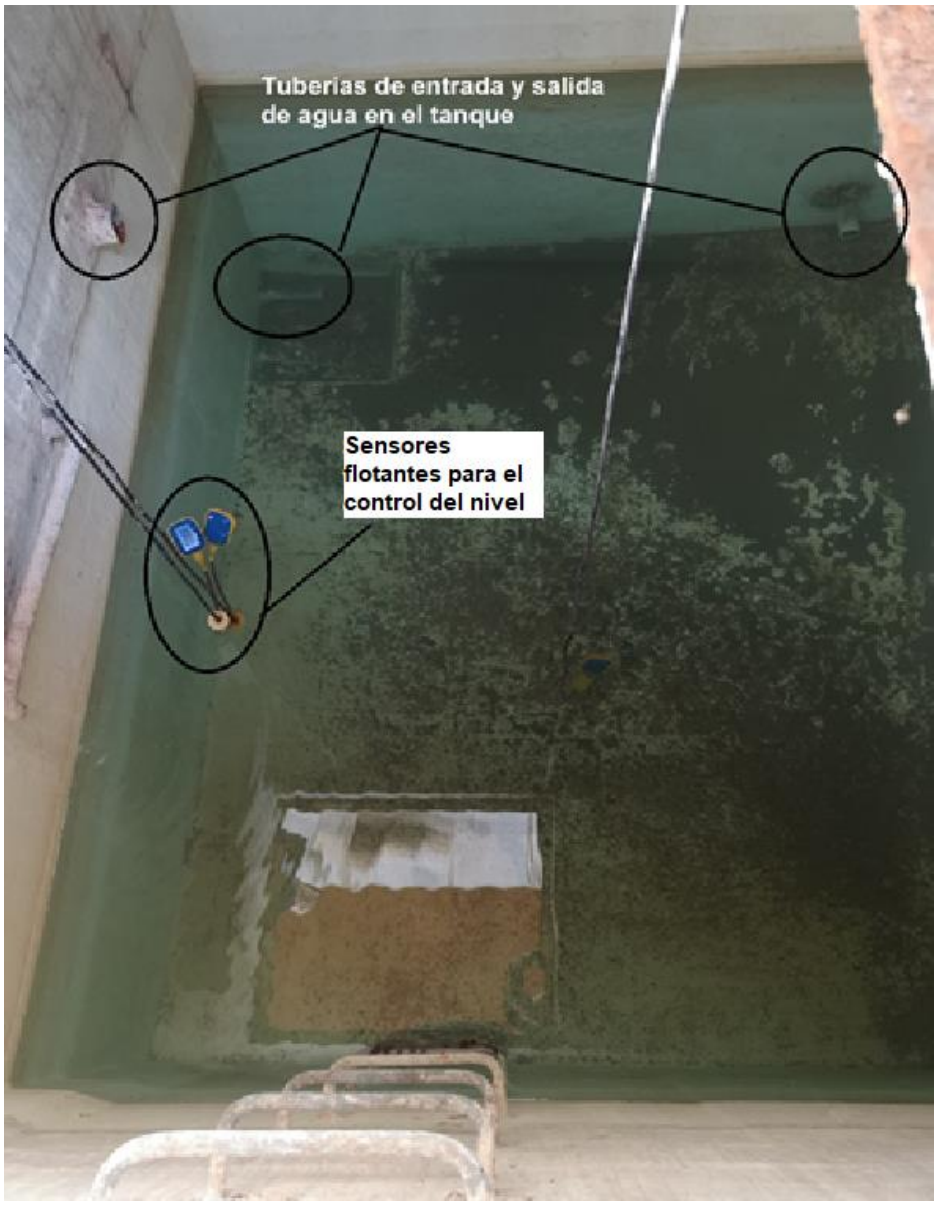


Figura 3-7: Tanque de almacenamiento de agua.

3.1.2 COMPONENTES DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS

Dentro de los componentes de control y automatización se consideran todos los dispositivos electrónicos que lo constituyen, junto con la instrumentación extra requerida para la adquisición de datos.

Actualmente, se tiene poca información sobre el sistema de adquisición de datos, fuera de la composición en cuanto a hardware del sistema.

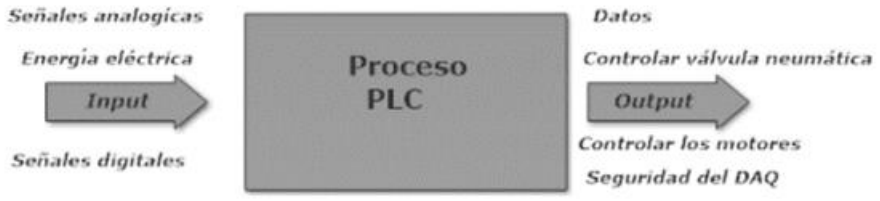


Figura 3-8: Diagrama de caja negra del proceso del PLC

En la **figura 3-8** se pueden apreciar las entradas y salidas en el funcionamiento del PLC.

3.1.2.1 Instrumentos de medición

Dentro de las variables que son necesarias medir para poder calcular las curvas características de las bombas están presión, caudal, temperatura, voltaje, corriente, velocidad de rotación y densidad del fluido. A continuación, se da a conocer los sensores e instrumentos con los que cuenta el laboratorio para poder medir estas variables. Cabe destacar que según la norma ISO 9906-2012, todos estos instrumentos tienen un periodo máximo entre calibración, como se muestran en el ANEXO 1.1.1.

- **Sensor transmisor de presión Danfoss, modelo MBS 1700 (Descarga de la Bomba):** Medición de presión manométrica. Cuenta con amortiguación de pulsos, tiene un tiempo de respuesta inferior a los 10 [ms], rango de trabajo de 0-10 [bar], salida de corriente estandarizada de 4-20 [mA] y una precisión de 1.0 % F.S (Full Scale).

Figura 3-9: Sensor MBS 1700. [Danfoss, 2014]

- **Sensor transmisor de presión Wika modelo S10 (Succión de la Bomba):** Capaz de medir presión absoluta, tiene un tiempo de respuesta menor a 1 [ms], rango de medición de -1 a 15 [bar] de presión manométrica, salida de corriente estandarizada 4-20 [mA] y cuenta con una precisión menor a 0,5% del rango de medición.

Figura 3-10: Sensor de presión Wika, S10.

- **Sensor de temperatura tipo PT100:** Este sensor tiene un rango de medición de 0 a 80 °C, con un rango de trabajo de 4-20[mA].

Figura 3-11: Sensor de Temperatura tipo PT100.

- **Sensor (SINTRANS F M MAG 5100 W) y transmisor (SINTRANS F M MAG 5000):** Sensor electromagnético de caudal, con posibilidad de salida digital o análoga, tiene precisión de 0,5 % del valor medido, un rango de trabajo de 0 a 10 [m/s] y una frecuencia de muestreo de hasta 10 [KHz].

Figura 3-12: Sensor de caudal en la parte izquierda con su respectivo transmisor en la parte derecha de la figura. [Siemens, 2018][https://w3.siemens.com/mcms/sensor-systems/es/instrumentacion-de-procesos/medicion-de-caudal/electromagneticos/Pages/electromagneticos.aspx]

- **Variador de frecuencia Sinamics G120C PN:** Potencia máxima de alimentación de 5,5 [kW], posibilidad de control y comunicación vía Profibus. Mediciones de tensión, potencia, revoluciones, corriente y frecuencia.

Figura 3-13: Variador de frecuencia (izquierda), junto con su comando (derecha)

- **Tacómetro digital marca Lutron modelo DT-2236:** Posibilidad de medir velocidad de rotación por contacto o cinta reflectante para la operación sin contacto. El rango de medición va de 5 a 10.000 [rpm] para el Foto Tacómetro, con una resolución de 0,1 [rpm] para mediciones inferiores a 1.000 rpm. La exactitud de la medición es de $\pm 0{,}05\ \% + 1\ digito$.

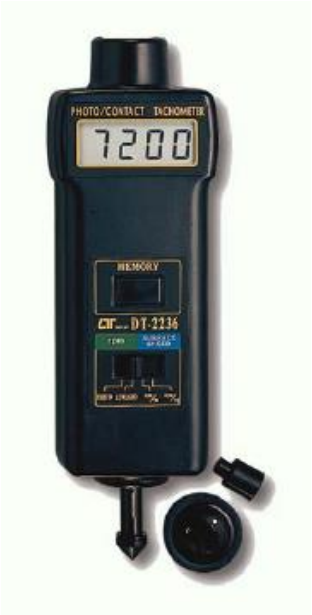


Figura 3-14: Tacómetro, digital.

- **Pie de metro Mitutoyo CD-8:** Instrumento digital, tiene un rango de medición de 0 a 200 [mm] o 8 [in] y su resolución es de 0,01 [mm].

Figura 3-15: Pie de metro Mitutoyo CD-8

En el **ANEXO A-4** se pueden ver en mayor detalle la ficha técnica de los instrumentos descritos.

3.1.2.2 Componentes de control y adquisición de datos mediante PLC.

El banco cuenta con un PLC (Programmable Logic Controller) y una pantalla HMI (Human Machine Interface), que componen un sistema de automatización y control. Este permite la lectura de las señales analógicas recibidas por los sensores, controla la válvula neumática, los variadores de frecuencia para encendido de motores y el cambio de velocidad de giro. Además, escala las señales para traducir las magnitudes analógicas de los sensores en valores digitales de las magnitudes físicas medidas.

El sistema en detalle dispone de los componentes que se pueden ver en la **figura 3-16** desde izquierda a derecha en el siguiente orden:

- **Fuente de Poder Siemens PM 1207:** Fuente de alimentación de 24 [V] DC para el PLC, y módulos adicionales.

- **PLC Simatic S7 1200 CPU 1215C DC/DC/RLY:** Este PLC cuenta con 2 puertos PROFINET, con 14 DI (Digital In), 10 DO (Digital Out), 10 salidas binarias (Relé), 2 entradas analógicas (0-10 V) y admite hasta 8 módulos adicionales. Estas son las características más importantes para el sistema que está operando actualmente.

- **Módulos de entradas analógicas SM 1231 AI (Analogic In):** 3 módulos externos al PLC con conexión directa. Cada uno añade 4 entradas analógicas de 13 bit (12 más el signo), permite lectura de señales de 0-20 [mA], 4-20 [mA] y 0-10 [V].

- **Simatic Net CSM1277:** Es un puerto ethernet que cuenta con 4 slot de conexión para la comunicación vía Profinet entre los dispositivos.

- **Fuente de poder Siemens Sitop:** Fuente de poder utilizada para alimentar la instrumentación con 24[V] DC, capaz de abastecer con hasta 5 [A] de corriente.

Figura 3-16: Tablero de control del PLC, 2 fuentes de poder, 3 módulos analógicos y switch ethernet.

Detalles de las características técnica en el **ANEXO A-4**

- **Pantalla HMI Siemens KTP700 Basic:** Interfaz gráfica que se comunica con el PLC en ambas direcciones, por lo que permite la lectura de las variables de control. Además, envía señales al PLC para el control de la válvula neumática y variadores de frecuencia, lo que permite el control del encendido de las bombas y su velocidad de rotación.

Figura 3-17: Pantalla HMI juntos con los controladores de ambos variadores de frecuencia.

3.1.2.3 INFORMACIÓN EXTRA DEL SISTEMA ELECTRÓNICO.

Se debe tener en consideración los siguientes puntos:

- La alimentación eléctrica general del banco es trifásica, las fases llegan a un interruptor termomagnético trifásico, donde se abastece de manera independiente a los 2 VDF, los que posteriormente alimentan los motores eléctricos de las bombas.

- Se dividen las cargas de cada fase y se alimentan monofásicamente las fuentes de poder para el PLC e instrumentación, las cuales posteriormente alimentan con corriente continua (DC) y 24 [V]. Se puede ver el diagrama unilineal en el **Anexo A-3**.

- El PLC es el canal de comunicación de todos los componentes electrónicos y mecánicos, ya que toda la instrumentación, válvula neumática, pantalla HMI y variadores de frecuencia están conectados mediante cables ethernet. Se puede ver los planos de conexión en el **Anexo A-3**.

- El PLC recibe una señal analógica (4-20 [mA]) de los instrumentos de medición, las cuales son recibidas por los módulos analógicos y transformadas en una señal digital. Esta, posteriormente, es llevada a una magnitud física en la programación del PLC y comunicada mediante una interfaz Profinet con la pantalla HMI para ser visualizada por los operadores.

- La pantalla HMI puede enviar señales al PLC. Como los **variadores de Frecuencia** y **Válvula neumática** están conectados a este, una señal de la pantalla HMI puede controlar indirectamente estos componentes a través del PLC, permitiendo al operador manejar la válvula neumática y los VDF.

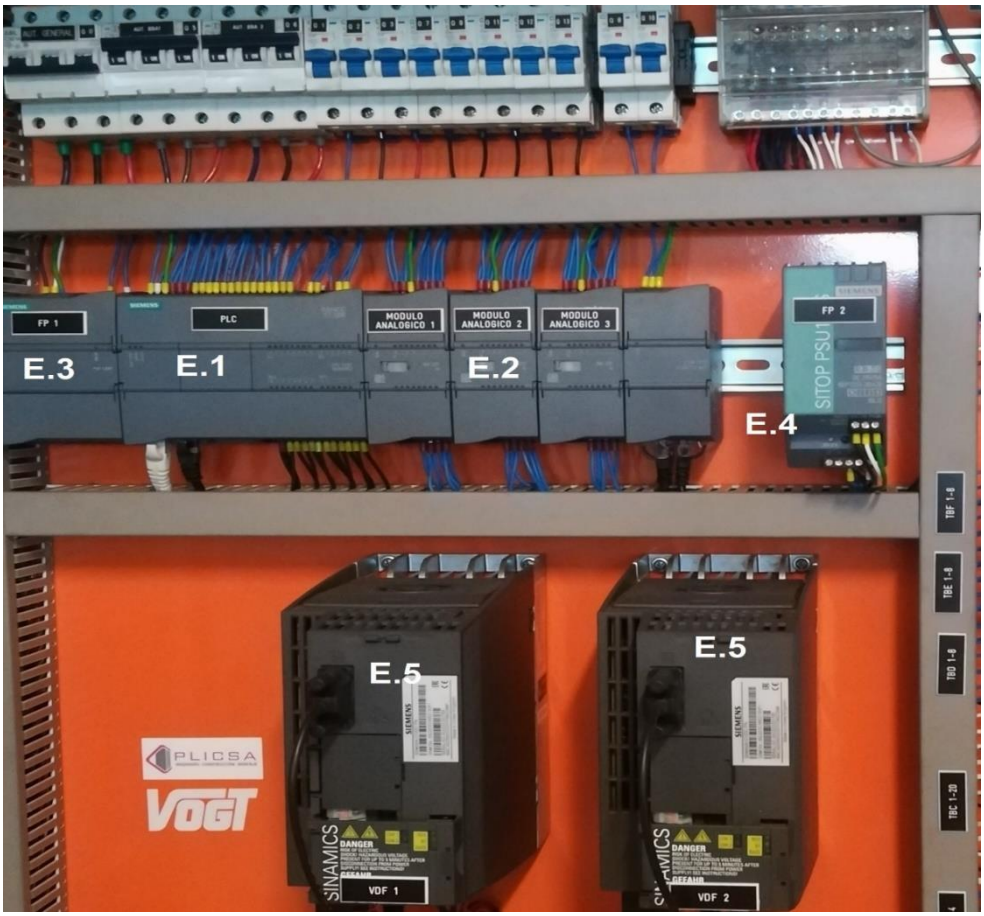


Figura 3-18: Tablero general de electricidad y control.

De la **figura 3-18** se aprecia lo siguiente:

- E.1= PLC (Programmable Logic Controllers)
- E.2= Módulos analógicos
- E.3= Fuente de poder de componentes del PLC de 24 [V] DC
- E.4= Fuente de poder de instrumentación de 24[V] DC
- E.5= Variadores de frecuencia Sinamics

4. ALCANCE Y PROBLEMÁTICAS

4.1 CONDICIONES Y EXIGENCIAS

En esta sección se realiza una primera evaluación del banco de pruebas acorde a las exigencias y restricciones dadas por la norma ISO 9906-2012 y se ve en 3 secciones, siendo estas el **agua utilizada, diseño del banco** y **sistema de adquisición de datos**.

4.1.1 EXIGENCIAS DEL FLUIDO TRABAJADO

En la **sección 1.2.5.1** se establecen los valores máximos para ciertas propiedades exigidas en el fluido de trabajo para las bombas. Esto es para comprobar que el fluido es agua limpia y fría como lo requiere la norma y para esto se debe medir la viscosidad cinemática, densidad, concentración de solidos disueltos y solidos no disueltos.

La medición de densidad se hizo para 2 muestras de agua tomadas diferentes días del tanque de agua. El valor promedio para la primera muestra realizada con 5 mediciones fue de 1.001[$\frac{kg}{m^3}$] con una temperatura promedio de 20,3 °C, mientras que para la segunda muestra se obtiene un valor promedio de 1.000[$\frac{kg}{m^3}$] a una temperatura promedio de 19,1 °C.

Ya que realizar las otras mediciones presentaban trabajo y no se contaba con los instrumentos, se decide no hacerlo. Se tiene en consideración que el resto de las propiedades no afectan notoriamente los resultados obtenidos.

4.1.2 EXIGENCIAS DE DISEÑO

Basándose en la norma ISO 9906-2012 vista en la sección 1.3, se mencionan las problemáticas existentes en el banco de ensayos actual de la UTFSM. Se consideran como problemáticas todos los eventos de diseño que no cumplen con las exigencias requeridas para realizar una prueba de la **primera categoría** de la norma.

Se utiliza la palabra diseño para referirse a la composición del banco en la que se consideran tuberías, uniones, codos, válvulas, motores y bombas. También se considera dónde y cómo están ubicados cada uno de estos componentes del banco.

Las **3 restricciones** de la norma en cuanto a diseño para un banco de pruebas con un estanque abierto a la atmosfera son las siguientes:

1. Las tuberías no deben tener uniones, codos o discontinuidades a una **distancia mínima de los sensores de presión** para asegurar ciertas condiciones estables en la sección de medición del fluido. Las distancias son las siguientes:
    a. Tubería de **succión** de diámetro 60.3 [mm] = Distancia mínima **241,2 [mm]**
    b. Tubería de **descarga** de diámetro 48.3 [mm] = Distancia mínima **193,2 [mm]**
2. Si utilizamos las **ecuaciones 1.03 y 1.22**, podemos calcular el **largo mínimo** requerido en la tubería de succión, medida desde la sección de entrada de la bomba. En esta distancia la tubería no debe tener ninguna discontinuidad o accesorio que altere su sección transversal.

    a. Largo mínimo tubería de succión: **32,07 [cm]**

3. Las tomas de presión deben estar ubicadas a una **distancia mínima** de la sección de medición según el diámetro de su tubería, la cual debe ser de igual sección que la bomba. Además, las tomas de presión deben cumplir con las exigencias de la norma dadas en la **sección 1.2.5.1,** donde se establecen los diámetros de las perforaciones y el anillo requerido para poder realizar una prueba hidráulica de grado 1, el más exigente de la norma.
    a. **120,6 [mm] distancia** para el tramo de **succión**
    b. **96,6 [mm] distancia** para el tramo de **descarga**

Opcionalmente la norma **recomienda** tener una tubería transparente en las secciones de medición, ya que esto permite verificar visualmente las condiciones del flujo como, por ejemplo, ver que no se encuentren burbujas de aire o condiciones inestables en el flujo.

Se recomienda además tener en consideración evaluar la necesidad de instalar algún dispositivo de amortiguación de fluctuaciones si con las exigencias de la norma en cuanto a diseño no se logra estar dentro de los valores máximos permitidos.

En el tramo de succión para ambas bombas se presentan 3 problemas que no cumplen con los requerimientos de la norma.

Figura 4-1: Perforación para montaje de sensores en tubería.

El **primer incumplimiento** hace referencia al **punto 3** de las restricciones mencionadas anteriormente, ya que como se puede apreciar en la **figura 4-1,** la perforación en las tuberías para la instalación de las tomas de presión tiene un diámetro aproximado de 3[cm], mientras que el valor del diámetro recomendado por la norma de 3[mm], es decir, casi 10 veces más pequeño.

Figura 4-2:Tubería de succión de la Bomba Sur.

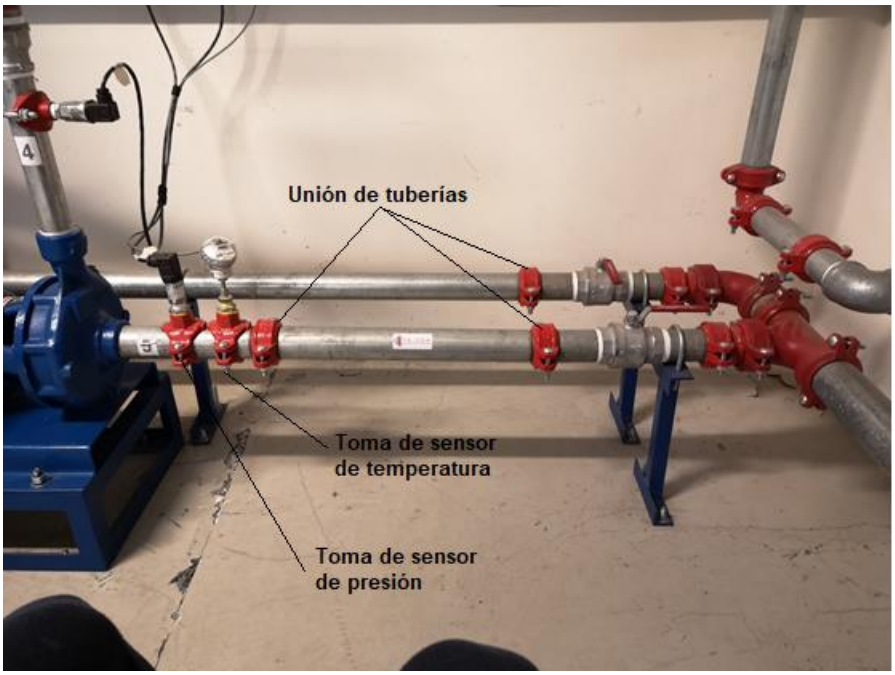


Figura 4-3 : Tramos de succión y descarga de la bomba norte.

En la **figura 4-3** se puede apreciar que la tubería en la entrada de la bomba norte cuenta con 3 abrazaderas color rojo, mientras que la bomba sur (**figura 4-2**) tan solo tiene 2. La distancia entre las flanches de succión y unión de tubería es aproximadamente **26[cm]** para ambas bombas.

Para el caso de la tubería con 3 abrazaderas, la más cercana es la **toma del sensor de presión.** La **primera problemática por solucionar** es la perforación mencionada anteriormente. La segunda abrazadera de estas es la toma del **sensor de temperatura,** que se encuentra aproximadamente a 22 [cm] de la sección de succión de la bomba. Este sensor cuenta con una termocupla en contacto directo con el flujo e **incumple con los puntos 1 y 2** de las exigencias de la norma, por lo que **será la segunda problemática por solucionar.**

La última abrazadera, cumple la función de **unión entre tuberías** y genera una discontinuidad en el flujo por 2 razones. La primera razón ocurre debido que a pesar de que sus secciones transversales quedan unidas y selladas por una goma, se generar pequeñas discontinuidades en la sección transversal, por lo que se considerara un incumplimiento siendo estrictos con las exigencias de la norma.

La segunda razón, se debe al método utilizado para mecanizar las tuberías e instalar la abrazadera, ya que para esto la tubería debe tener un sacado en la superficie exterior como se muestra en la **figura 4-4,** sin embargo, el método utilizado para generar esta sección fue aplicar presión en el manto exterior deformando la tubería, por lo que se ve afectada la superficie interior con un exceso de material que fue desplazado desde la parte exterior. Por lo tanto, incumple con los **puntos 1 y 2,** siendo la **tercera problemática.**

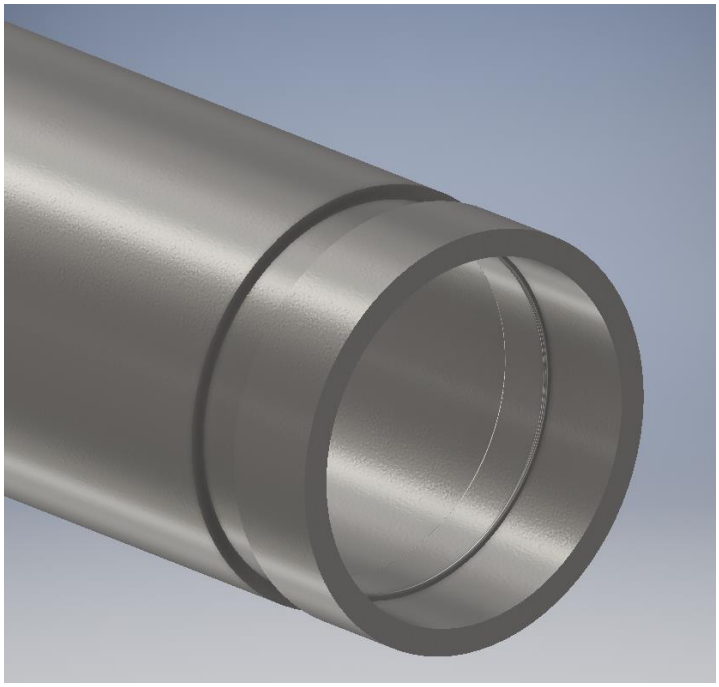


Figura 4-4: Dibujo representativo del sacado realizado en la tubería para montar unión.

Al ver la **figura 4-2** se puede apreciar que el tramo de succión de la **bomba sur** cuenta con las mismas problemáticas que la bomba norte, a diferencia del sensor de temperatura que en este caso no existe.

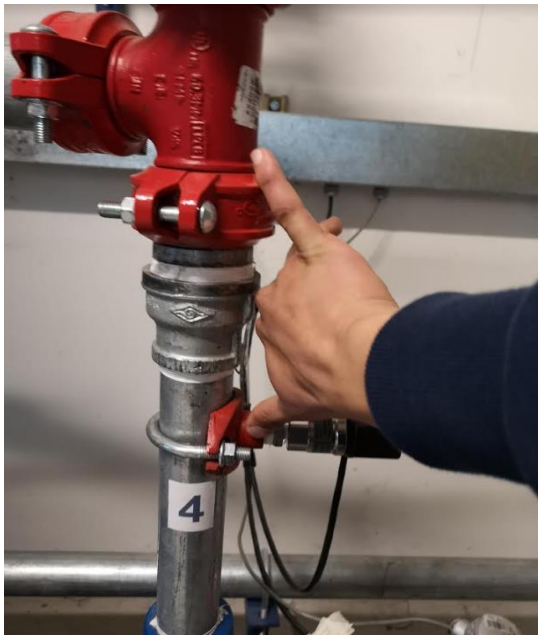


Figura 4-5: Tubería de descarga de la bomba norte

En la zona de descarga de las bombas, se presenta la misma problemática que en la succión con respecto a la instalación y ubicación de los sensores de presión que incumplen con la **restricción 3.**

La mano de la **figura 4-5** da una referencia aproximada de la distancia mínima requerida sin discontinuidades desde la sección de medición. Se puede ver claramente que se encuentra lejos de cumplir con las exigencias de la norma, ya que presenta una unión con un cambio de sección transversal seguido inmediatamente de una unión tee dentro del tramo que debería ser de tubería recta, incumpliendo la **restricción 1 a.**

4.1.3 Resumen de diseño.

Los tramos de succión y descarga para ambas bombas presentan problemáticas similares en cuanto a las exigencias de la norma.

Se resumen en 4 **problemáticas de diseño** que se deben tener en consideración y son las siguientes:

- **a)** Ubicación e instalación de los sensores de presión no adecuada.
- **b)** Sensor de temperatura en la succión de la bomba norte influye sobre el flujo.
- **c)** Unión de tuberías que generan discontinuidades cercanas a los sensores de presión en la succión.
- **d)** Uniones con cambios de sección cercanas a las mediciones de presión en la descarga.

A modo de observación, se recuerda que tan **solo la bomba norte** posee **medición de temperatura**, por lo tanto, al ensayar la bomba sur individualmente no se cuenta con una medición de temperatura.

4.1.4 CONDICIONES Y EXIGENCIAS EN LA TOMA DE DATOS.

En esta sección se evalúan las condiciones exigidas por la norma en la toma y análisis de datos para realizar las curvas características de las bombas. Para evaluar a qué categoría pertenece un banco de pruebas, se requiere de mediciones a las cuales se evalúan amplitud de fluctuación e incertidumbre general.

Parte de la problemática del **método de adquisición actual del banco**, es la adquisición a través de una **pantalla HMI**. La desventaja de este método es la dificultad de obtener mediciones simultáneas, de manera rápida y en un instante de tiempo conocido. Además, se debe tener en consideración que las magnitudes leídas en la pantalla HMI provienen de un sistema de adquisición de datos con un sistema de trabajo del cual no se tiene información, por lo tanto, tampoco se puede corroborar que las mediciones leídas sean correctas.

Ya que el banco de pruebas **aún no cuenta con un sistema de adquisición de datos que permita realizar la evaluación de las mediciones**, en esta primera instancia se evalúa la capacidad de obtener todas las variables requeridas para el cálculo de las curvas características.

El banco actualmente **no cuenta** con un protocolo de medición en el cual se especifiquen los pasos y procedimiento a seguir para poder realizar una correcta medición, lo cual es necesario para contar con un método de medición que se pueda reproducir asegurando ciertas condiciones de trabajo.

4.1.4.1 Altura y caudal

Para calcular la **Altura (H**) de la bomba, se utiliza la **ecuación 1.01**. Esta incluye las variables que se necesitan medir para calcular la altura, donde se debe incluir además la velocidad de rotación.

Adicional a las variables de la **ecuación 1.01**, debemos tener una medición de **temperatura** para verificar que no haya una variación brusca que pueda afectar notablemente la densidad del fluido.

Para determinar el **Caudal (Q),** es necesario un instrumento que lo mida directamente o hacerlo a partir de la velocidad media con la **ecuación 2.1**:

$$Q = A \times U \qquad \textbf{(2.1)}$$

El banco de ensayo cuenta con la instrumentación necesaria para medir o calcular las variables mencionadas en las ecuaciones 1.01 y 2.1, a excepción de la **densidad del fluido.**

Tabla 1: Variables necesarias medir para obtener curvas características de Altura.

Variables	Disponibilidad del banco
Presión Entrada	**Posee** sensores que lo permiten
Presión Salida	**Posee** sensores que lo permiten
Temperatura	**Posee** sensor que lo permite, pero se encuentra mal ubicado
Gravedad	**Se encuentra base de datos confiable** en internet para optar a la primera categoría de la norma ISO9906-2012
Velocidad Entrada	**Se puede calcular** mediante el caudal, conociendo la sección transversal
Velocidad Salida	**Se puede calcular** mediante el caudal, conociendo la sección transversal
Viscosidad cinemática	Actualmente **No** se cuenta con el instrumento necesario para medir dicha magnitud
Densidad	Actualmente **No** se cuenta con el instrumento necesario para medir dicha magnitud
Sección transversal Entrada	Se conocen las dimensiones por norma de la tubería y **se cuenta** con un pie de metro para medir con mayor precisión
Sección transversal Salida	Se conocen las dimensiones por norma de la tubería y **se cuenta** con un pie de metro para medir con mayor precisión
Caudal	Se **cuenta** con un sensor electromagnético permitido por la norma para tal medición

4.1.4.2 Potencia

- La **variable P** corresponde a la potencia de la bomba, esta se puede calcular de diversos métodos. A continuación, se presentan las ecuaciones que permiten calcularla:

$$P = \omega \times T \tag{2.3}$$

$$P_{elec} = S \times F.P \tag{2.4}$$

$$P = P_{elec} \times \eta_{elec} \tag{2.5}$$

$$F.P = \cos\varphi = \frac{P}{S} \tag{2.6}$$

La manera más exacta de calcular la potencia es mediante la **ecuación 2.3**, en la cual basta conocer el torque y la velocidad de rotación en el eje. Este método permite evaluar la potencia de las bombas trabajando en distintos puntos de operación en cuanto a velocidad de rotación. Su desventaja es que para utilizarla se debe intervenir la unión entre motor y bomba, lo que requiere de un estudio de diseño, y el banco actualmente no cuenta con este dispositivo.

Para calcular la potencia mediante el método de magnitudes eléctricas, se requiere conocer lo siguiente:

- La potencia eléctrica que puede ser medida en la entrada o salida del VDF
- La eficiencia del VDF en caso de medir en la entrada de este
- El factor de potencia del motor bajo las condiciones de trabajo del VDF
- La eficiencia del motor bajo estas mismas condiciones de trabajo

No fue posible encontrar la eficiencia del VDF en el manual del fabricante, mientras que la **eficiencia del motor eléctrico** sólo fue posible encontrarla para su **frecuencia nominal** de 50 Hz.

Actualmente, el banco de ensayos no cuenta con ninguno de los dos métodos permitidos por la norma para poder realizar una prueba de potencia de la bomba.

Tabla 2: Variables necesarias a medir para obtener curva característica de P.

Variables	Capacidad del banco
Caudal	Se **cuenta** con un sensor electromagnético permitido por la norma para tal medición
Velocidad de rotación (A)	El VDF cuenta con una medición con bastante error de dicha magnitud. El laboratorio cuenta con un **tacómetro digital** de buena precisión
Torque (A)	**No** se cuenta con un instrumento para medir esta magnitud.
Potencia eléctrica aparente (B)	El VDF posee una medición de dicha magnitud, **No** apta para una medición bajo norma
Factor de Potencia (B)	Se desconoce, y **No** se cuenta con el instrumento necesario para cuantificar su valor
Eficiencia del motor eléctrico (B)	Se cuenta con tablas de eficiencia para la velocidad nominal, las cuales **No** son útiles al usar un VDF.

4.1.5 RESUMEN DE PROBLEMÁTICAS PRESENTES EN EL BANCO

El banco se encuentra funcional y con la instrumentación necesaria para poder realizar pruebas demostrativas del funcionamiento de un banco de ensayos y curvas características. En las pruebas demostrativas el error de las mediciones no suele tener mucha importancia, por lo que se pueden utilizar valores aproximados como, por ejemplo, eficiencias del motor eléctrico, su factor de potencia o la densidad del agua.

Ya que el banco idealmente debe poder realizar prueba de rendimiento hidráulico para las bombas centrífugas según las exigencias de la norma, se enumeran las problemáticas que se deben solucionar en el banco de pruebas para estar dentro del "Grado 1" acorde con las restricciones de diseño de la norma:

1. Ubicación e instalación inadecuada de los **sensores de presión**
2. **Sensor de temperatura** en la succión de la Bomba norte **mal ubicado**
3. **Unión de tuberías** cercana a los sensores de presión en la **succión**
4. **Uniones con cambios de sección** cercanas medición de presión en la **descarga**
5. Tener un método que permita **medir la potencia** de la bomba bajo las exigencias de la norma
6. Contar con un **sistema de adquisición de datos** que permita obtener información del proceso como lectura de las señales de los sensores, tiempo y configuración. Esto permitirá un posterior análisis de errores y fluctuaciones
7. Se requiere **densímetro** para la curva de altura, y un instrumento que permita medir **torque** o **magnitudes eléctricas** junto con el **factor de potencia**, además de estimar la **eficiencia del motor**.

5. –DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

En este capítulo se evalúan las problemáticas existentes en el banco de pruebas planteadas en el capítulo anterior y se proponen soluciones que permite optar a las competencias esperadas del banco de ensayos. Se divide el análisis en dos secciones para mantener el mismo orden del capítulo anterior.

En la **sección 3.2.5** se cuenta con un resumen de **7 puntos** que presentan **problemas** que deben ser solucionados, de los cuales **4** pertenecen a **diseño** y **3** de estos a la **adquisición de datos**.

5.1 DISEÑO

En esta sección se diseña la solución para los 4 puntos enumerados en el capítulo anterior. Para los puntos 2 y 3 se propone una solución para de manera individual, mientras que para los puntos 1 y 4 se propone una solución global que involucra ambas problemáticas.

5.1.1 Sensor de temperatura

La medición de temperatura debe contar con las siguientes características:

- Medir la T ° y no provocar turbulencias en el flujo
- Medir de manera representativa para ambas bombas
- Cumplir con las exigencias de la norma y no perturbar el flujo en una zona cercana a una medición de presión.
- Implementación rápida y económica

Las alternativas que cumplen con las características mencionadas anteriormente son:

1. Ubicar un sensor de temperatura en el tramo de succión que alimenta ambas bombas
2. Montar sensores en los tramos de succión de las bombas norte y sur, cumpliendo con la distancia mínima recomendada
3. Montar un sensor en el tramo de succión que alimenta ambas bombas e instalar otro sensor en el tramo de succión de la bomba sur

La **alternativa 1** cumple con todas las características requeridas y tiene como ventaja que es rápida de implementar y no requiere una gran inversión económica, por lo que es una **excelente alternativa** para cumplir con las exigencias de la norma.

La **alternativa 2** es la manera más precisa de medir la temperatura, ya que permite obtener la temperatura del fluido en dos secciones del sistema. Este método permite adquirir datos de temperatura del flujo en la entrada de ambas bombas, ya sea para cuando trabajen en forma individual, paralelo o en serie.

La **alternativa 3** cumple con las exigencias de la norma y permite tener lectura de ambas bombas en cualquier tipo de funcionamiento, además permite estudiar el alza de temperatura en el tramo de tubería de succión a la bomba sur. Sin embargo, la alternativa 2 mide de manera más precisa la temperatura en la succión de las bombas que tiene una recompensa mayor y a un costo similar.

Figura 5-1: Lugar de ubicación recomendada para el sensor de temperatura según la alternativa 1.

En la **figura 5-1** se muestra el lugar recomendado para la **alternativa 1**, que permitiría tener una medición bajo las exigencias de la norma de manera rápido y económica, cumpliendo con los requerimientos más importante para la Universidad.

5.1.2 Unión de tuberías.

Las **uniones en las tuberías** es el **tercer punto por solucionar** de las **problemáticas de diseño.** Para esto, se decide eliminar las uniones de tubería que se encuentran en la succión a menos de 33 [cm] de la bomba, distancia mínima recomendada por la norma. Sin embargo, pese a eliminar esta unión, se deben acoplar las nuevas tuberías con las del sistema que se encuentran a una distancia mayor a los 33 [cm]. Se decide utilizar un método de mecanizado para las nuevas tuberías, que no altere la superficie interior, para así evitar discontinuidades en la sección transversal e intervenir al mínimo el flujo de succión de la bomba.

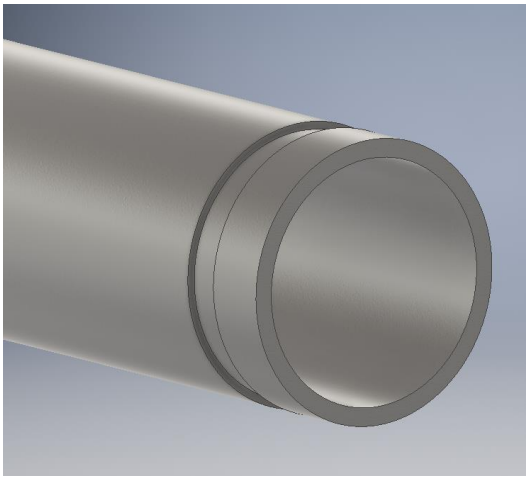


Figura 5-2: Prototipo de mecanizado para la unión de tuberías.

5.1.3 Diseño de las tomas de presión y acople en las tuberías.

Se diseña un sistema que incluye tomas de presión y nuevas tuberías que permitan dar solución a las problemáticas planteadas en la sección 3.2.5, en específico a los **puntos 1, 3 y 4.**

Primero, se decide diseñar una **toma de presión** cumpliendo con los requerimientos de la norma. Para esto se evalúa los atributos esperados de este sistema que se pueden ver en la **tabla 3**. Posteriormente se categorizan los atributos en 2 categorías que se pueden ver en la **tabla 4**, con en el fin de facilitar su posterior jerarquización.

Tabla 3: Restricciones y características adicionales.

Restricciones	**Características adicionales**
Contar con las exigencias de perforación de la norma	Montaje y desmontaje sencillo de todo el sistema
Bajo costo de construcción	Mantenimiento sencillo
Condiciones de trabajo seguras	Bajo costo de construcción
Permitir evacuar burbujas de aire en la línea	Fácil limpieza
Facilitar el montaje del sensor	Rápido montaje
Ser hermético	Rápida fabricación
Montar el sensor	Sistema con fines académicos
Cumplir con las exigencias de la Norma	Larga vida útil
	Medir presión de forma precisa

Se diseña un primer prototipo con la finalidad de cumplir con la totalidad de las restricciones del **grado 1** de la Norma, considerando un bajo costo de implementación.

Las tomas de presión deben ser diseñadas considerando las restricciones de la norma mencionadas en la sección **3.2.2**. Por lo tanto, se tiene en consideración además del diseño de la toma de presión, se considera el mecanizado de las tuberías para la instalación de las tomas de presión a una distancia de $2\ D_{tubería}$ que cumplen con las exigencias número 3 de las exigencias mencionadas en esa misma sección **(3.2.2)**.

Para cumplir con las restricciones y características adicionales, se decide diseñar una pieza **desmontable** que permita fácilmente **limpiar** el agujero y dar la posibilidad de cambiar la pieza por una nueva en caso de ser necesario. La pieza debe ir unida a la tubería y sellada para evitar **fugas,** evitando aire afectando las mediciones. Además, debe contar con un método que permita la conexión entre las 4 tomas de presión y montar el sensor según los requerimientos de la norma vistos en la **sección 1.2.5.1** en las **figuras 2-17 y 2-18.**

El prototipo ideado cuenta con un eje roscado que permite la unión de la **toma de presión** con la **tubería** a través de un montaje rápido y sencillo, facilitando así la limpieza, mantención y reparación del conjunto.

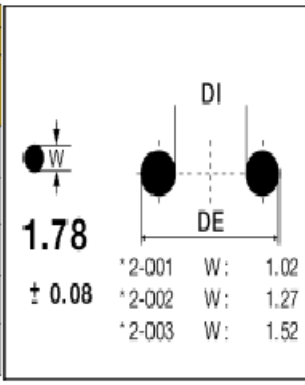
Para su correcta unión, las piezas se diseñan con sus **caras planas**, ya que de esta manera permite incorporar un O'ring que tiene como objetivo sellar y obtener una mayor estanqueidad. Si lo anterior no es suficiente y en caso de ser requerido, se le agrega un sellante líquido.

Para unir las 4 tomas de presión que se encuentran acopladas a la tubería, se decide hacerlo mediante uniones rápidas y mangueras flexibles. Desde el anillo de presión estática se conecta una manguera flexible seguida de una válvula de bola que permita cerrar el paso del agua.

Posteriormente, se conecta una unión tee, que por un lado de sus salidas cuenta con una válvula de purga que permite sacar partículas de aire de la línea, mientras que por el otro lado se acopla a una manguera flexible que se conecta a un manifold. En este se pueden conectar fácilmente diferentes sensores de presión. Se ve pueden apreciar en la **sección de 6.1**, de resultado en las condiciones de diseño.

Las **tomas de presión** se diseñan considerando una perforación en el eje roscado con un diámetro de 2 [mm] y un largo de 5[mm]. Además, incluye un alojamiento para el O'ring ya que la tubería tiene un espesor muy limitado.

TABLA DE DISEÑO				
Secc. "W"	Dimensiones de Alojamiento			
	Profundidad "L"		Ancho "G" ± C.1	Radio "R"
	Estático	Dinámico		
1.78	1.25 1.35	1.40 1.45	2.5	0.1 0.4
2.62	2.05 2.15	2.25 2.30	3.7	0.1 0.4
3.53	2.80 2.95	3.05 3.10	4.9	0.2 0.6
5.33	4.30 4.50	4.65 4.75	7.3	0.5 1.0
6.99	5.75 5.95	6.00 6.10	9.7	0.5 1.0



Parker Nº	DI mm	DE mm	Parker Nº	DI mm	DE mm
2-001*	0.74	2.78	2-011	7.65	11.21
2-002*	1.07	3.61	2-012	9.25	12.81
2-003*	1.42	4.46	2-013	10.82	14.38
2-004	1.78	5.34	2-014	12.42	15.98
2-005	2.57	6.13	2-015	14.00	17.56
2-006	2.90	6.46	2-016	15.60	19.16
2-007	3.68	7.24	2-017	17.17	20.73
2-008	4.47	8.03	2-018	18.77	22.33
2-009	5.28	8.84	2-019	20.35	23.91
2-010	6.07	9.63	2-020	21.95	25.51

Figura 5-3: Tabla de O'ring, junto con la de diseño. [Parker, s.f]

De la **figura 5-3** se pueden ver en la primera columna "Secc W"", donde se especifica el espesor del O'ring, el espesor condiciona el ancho "G" y la profundidad "L" que se requiere para una correcta instalación.

Se evalúan **4 posibilidades** para las dimensiones de las tomas de presión:

1. Toma de presión con eje roscado M5, O'ring de espesor W1,78
2. Toma de presión con eje roscado M5, O'ring de espesor W2,52
3. Toma de presión con eje roscado M6, O'ring de espesor W1,78
4. Toma de presión con eje roscado M6, O'ring de espesor W2,52

En la **figura 5-3**, se puede observar que para el O'ring de menor espesor (W=1,78) se requieren 2,5 [mm] en el ancho del alojamiento, mientras que para el espesor W=2,52 se requiere de 3,7[mm].

Si consideramos la información anterior, el diámetro requerido para las tomas de presión es de 12[mm], 13[mm],14[mm] y 15 [mm], para las **opciones 1 ,2 ,3 y 4** respectivamente, considerando una pared de 1 [mm] para el alojamiento del O'ring en todas las opciones.

El mecanizado en la tubería cuenta con 1 [mm] más en el ancho de la cara plana, para dar holgura a la tolerancia, y tener flexibilidad ante cualquier problema posible en el mecanizado o diseño de las tomas de presión. La cara plana en la tubería debe tener 13[mm], 14[mm],15[mm] y 16 [mm] para las opciones 1,2,3 y 4 respectivamente.

Tabla 4: Espesor de las tuberías para las distintas opciones de diseño

Opción	Espesor disponible tubería succión [mm]	Espesor disponible tubería descarga [mm]
M5; W=1,78	**2,79**	**2,95**
M5; W=2,52	2,49	2,7
M6; W=1,78	2,64	2,83
M6; W=2,52	2,31	2,58

Tabla 5:Cantidad de hilos que permiten la unión entre piezas para las distintas opciones de diseño

Opción	Número de hilos en la rosca succión	Número de hilos en la rosca succión
M5; W=1,78	**3,48**	**3,68**
M5; W=2,52	3,11	3,37
M6; W=1,78	2,64	2,83
M6; W=2,52	2,31	2,58

Si miramos las **tablas 4 y 5** se puede apreciar para las distintas opciones evaluadas el espesor aproximados de la tubería y la cantidad de hilos disponible para la unión entre la toma de presión y la tubería mediante el eje roscado. Se decide construir el prototipo en M5 y W1,78, ya que se desea disponer de mínimo 3 vueltas para la unión roscada, considerando la cantidad de hilos disponible como variable critica en comparación con el espesor del O'ring.

Las **tomas de presión** deben contar además con la posibilidad de conectarse a una unión rápida que permita unir fácilmente las mangueras flexibles, por lo que se añade un agujero roscado en su otro extremo para instalar una unión con un eje roscado bsp 1/8 y conexión rápida de 6[mm]. En esta, se conecta una manguera flexible de 6[mm] que mediante uniones tee permiten comunicar las 4 tomas de presión.

Los anillos de presión de cada tubería son comunicados mediante las mangueras flexibles con el Manifold donde se medirán las presiones. Este se diseña con 4 perforaciones pasantes de 2[mm] que son utilizadas como cámara para contener una presión estática. Por una cara de esta perforación el Manifold tiene agujeros diseñados a medida para los sensores, y por la otra cara tiene un agujero roscado para instalar una unión rápida con hilo bsp 1/8 para una manguera de 6[mm].

En el **ANEXO D** se puede ver el plano de detalles de las tomas de presión, las nuevas tuberías y el Manifold.

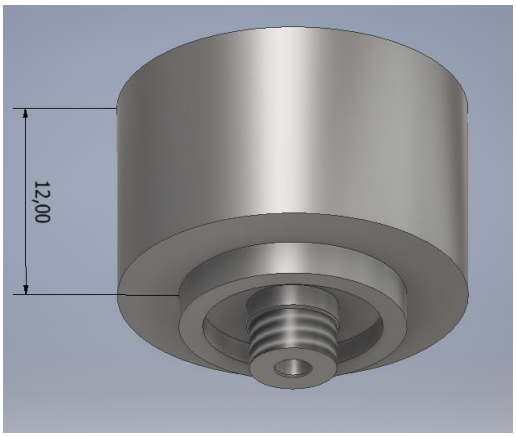


Figura 5-4: Prototipo de toma de presión diseñada

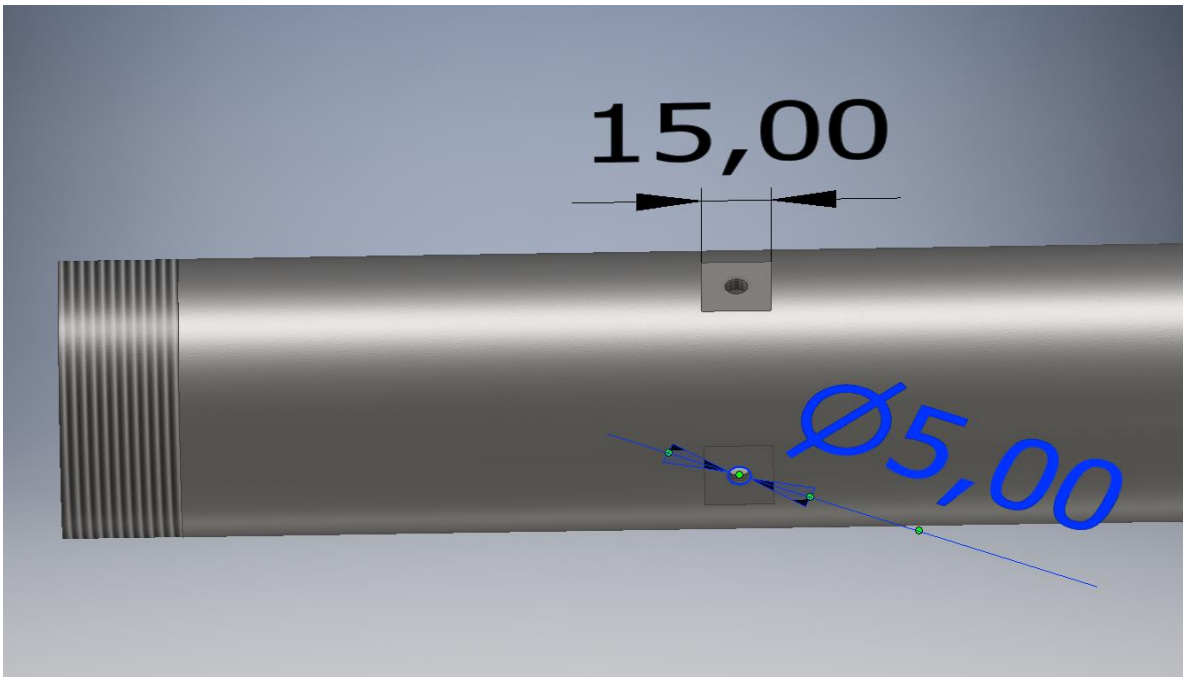


Figura 5-5: Prototipo de la tubería diseñada para las tomas de presión.

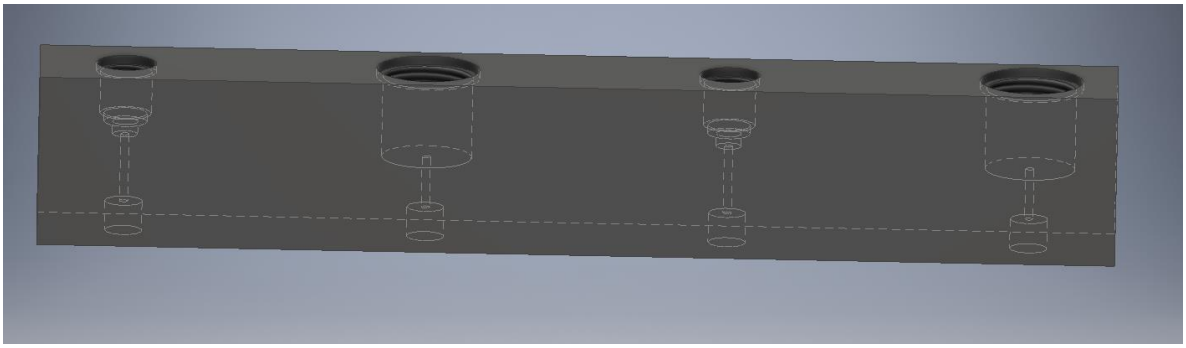


Figura 5-6: Prototipo de Manifold para mediciones de presión.

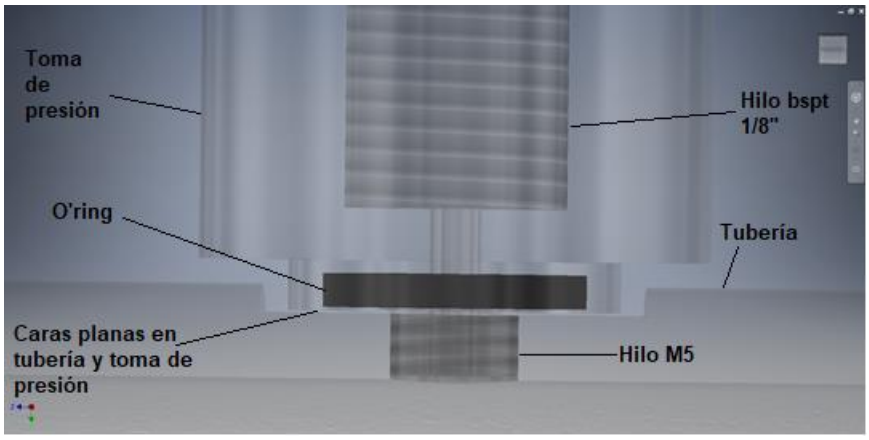


Figura 5-7: Unión de la toma de presión y tubería diseñada junto con su O'ring.

En la **figura 5-7**, se puede apreciar el diseño del montaje de la toma de presión y la tubería que fueron diseñadas en Autodesk Inventor y mecanizadas en el taller de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Cabe mencionar que las propiedades del material de las piezas deben ser antioxidantes para no afectar la composición del fluido a medir y su limpieza. Se debe considerar que para las tomas de presión el material debe poseer excelentes propiedades mecánicas, ya que se deben unir a la tubería de acero y soportar presiones de hasta 8[bar], además del desgaste que sufren los pequeños hilos al montar y desmontar.

5.2 SOLUCIÓN PARA EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

5.2.1 Curva de P vs Q

Como se comenta en la **sección 2.2.2** y corrobora en la **tabla 1,** el sistema no cuenta con las competencias necesarias para poder realizar la prueba de **P vs Q** con las exigencias de la norma.

La posibilidad de calcular la potencia de la bomba mediante la medición de torque en el eje escapa del alcance de este estudio, ya que requiere un largo proceso administrativo.

La segunda posibilidad es obtener la potencia mediante las magnitudes eléctricas (**ecuaciones 2.4 y 2.5**). Este método en particular resulta complejo, ya que no existe documentación dada por el fabricante que especifique la **eficiencia del VDF**, el **factor de potencia** y **eficiencia del motor eléctrico** cuando este es alimentado por un VDF a carga variable.

Se decide realizar una medición con un **analizador de redes**, el cual permite medir la potencia eléctrica activa, reactiva, factor de potencia en la alimentación del motor y factor de distorsión del voltaje, además de otras magnitudes eléctricas que son especificadas en el **ANEXO A-4**. Mediante el analizador de redes junto con un gráfico de eficiencia del motor a diferentes potencias y frecuencia nominal de 50 [Hz], se evaluará el cálculo de potencia y eficiencia.

Cabe mencionar que este instrumento permite tener potencia y factor de potencia, sin embargo, para calcular la potencia en el eje según requerimientos de la norma, se debe cuantificar la perdida de eficiencia del motor producto de los THD en las señales generadas por la modulación de la señal mediante un VDF. Esto es posible, sin embargo, para conceptos de este trabajo no se cuantificaron.

5.2.2 Evaluación curva H vs Q

Para realizar la curva de la bomba, el sistema de adquisición del banco debe contar con lo siguiente:

- Instrumentación.
- Conocer y trabajar las señales de los sensores de presión y caudal
- Controlar la válvula neumática.

Ya que el banco actualmente requiere de un instrumento para medir densidad y un sistema de adquisición que permita almacenar datos simultáneamente, se decide abordar el siguiente método de trabajo:

- La instrumentación faltante es facilitada por el laboratorio de química para realizar las mediciones necesarias a excepción de un viscosímetro.
- El control de la válvula neumática se hace con la programación actual del PLC y la pantalla HMI.
- Para el procesamiento de las señales se evaluarán 3 métodos DAQ (Data Acquisition).

Los métodos para la adquisición de datos es un problema crítico, ya que este permite realizar una mejor evaluación del banco, considerando datos más representativos como una mayor velocidad de prueba.

Los 3 métodos DAQ que se implementan en el banco de pruebas son los siguientes:

1. Mediante el programa **TIA Portal** que cuenta con **Trace,** una sección dentro del software que permite graficar, almacenar datos en una cantidad limitada de ciclos de lectura y luego exportarlos

2. Otra solución es comunicar **TIA Portal** con **"LabVIEW"** de National Instruments, y programar un documento para la toma de muestras. Esta programación a futuro puede incluir códigos para automatizar la totalidad de la prueba.

3. Una tercera alternativa de adquirir datos es conectando la señal transmitida por los sensores directamente a una tarjeta de adquisición de datos externa USB "**LabJack U3-HV"**

Para el posterior análisis de los datos almacenados se utiliza MATLAB con la finalidad de poder procesar la información de las mejoras implementadas.

5.2.2.1 TIA PORTAL (OPCIONES 1 Y 2)

Las **2 primeras opciones de adquisición de datos** utilizan en común el software TIA Portal. Este es un programa elaborado y recomendado por Siemens para establecer comunicación entre un computador y el PLC mediante un cable ethernet.

El software permite crear y modificar la programación del PLC, además de permitir una comunicación en tiempo real para evaluación de errores o lectura de señales.

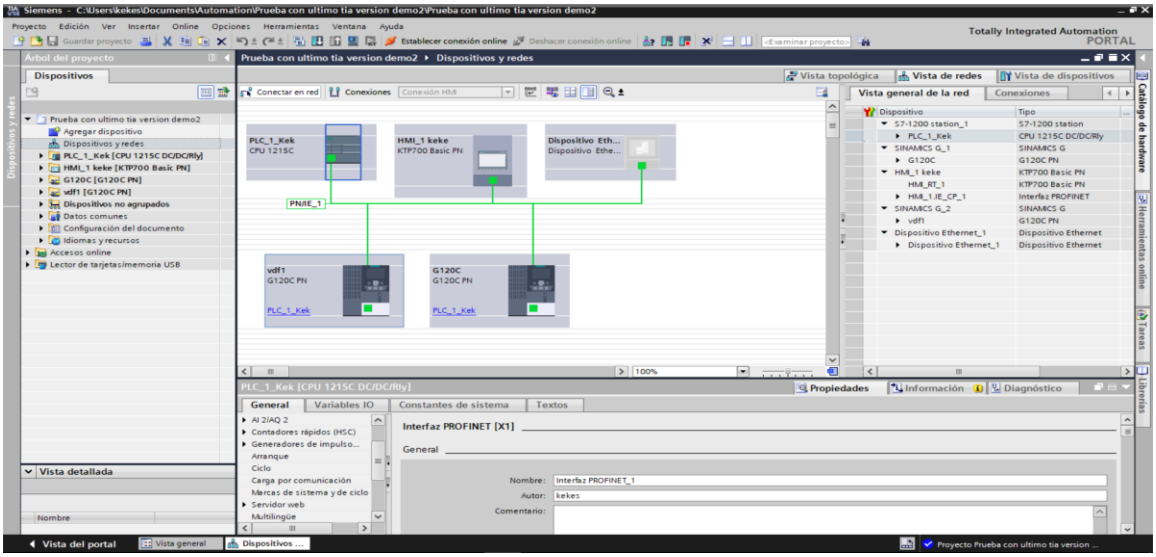


Figura 5-8: Software TIAPortal V14, con una vista general de la plataforma de configuración y programación.

La **figura 5-8** muestra una vista general de la plataforma gráfica del TIA Portal con la composición del hardware de nuestro sistema de adquisición de datos.

Una vez establecida la comunicación, se realiza una inspección a la configuración de los módulos analógicos, los que reciben las señales de los sensores de presión, caudal y temperatura.

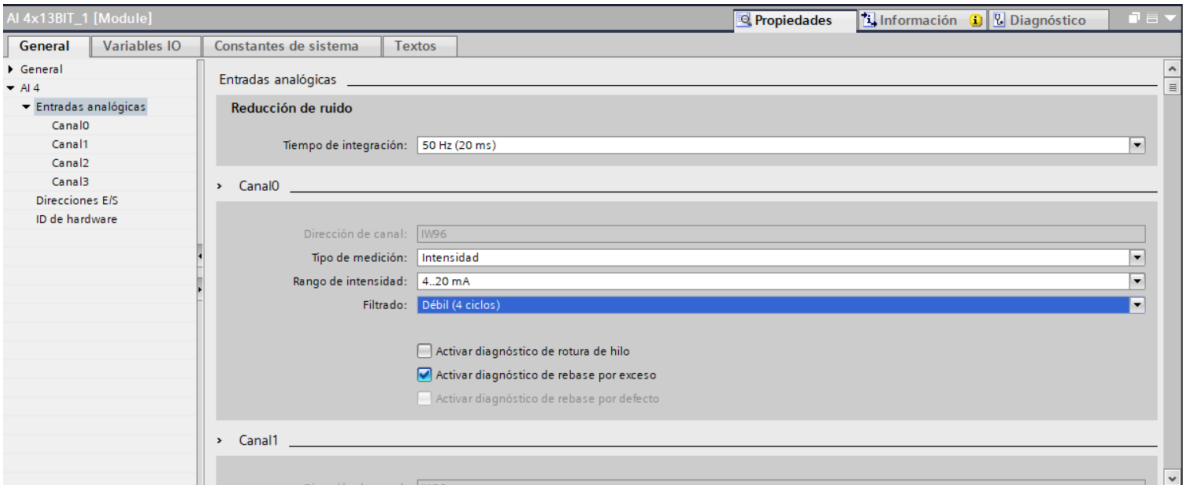


Figura 5-9: Configuración de módulos analógicos del sistema de adquisición de datos.

En la **figura 5-9** se puede apreciar que el módulo está configurado con la reducción de ruidos en 50 Hz, que es la frecuencia de trabajo de la red eléctrica en Chile; también cuenta con el filtrado activado en la configuración débil de 4 ciclos y también el diagnóstico de rebase por exceso que protege el canal en caso de que haya una corriente mayor.

Esta configuración se establece igual para los 12 canales totales de los 3 módulos existentes, permitiendo al PLC tener la lectura de los sensores con un filtrado de ruido y fluctuaciones. Este filtrado débil de 4 ciclo suaviza las mediciones realizas, almacenando 1 valor luego de 4 ciclos de medición.

Los módulos de 12 bit, de 4096 valores digitales posibles, al realizar la conversión análoga digital asigna un valor de 0 a 27648 [-] debido a la configuración del software TIA Portal.

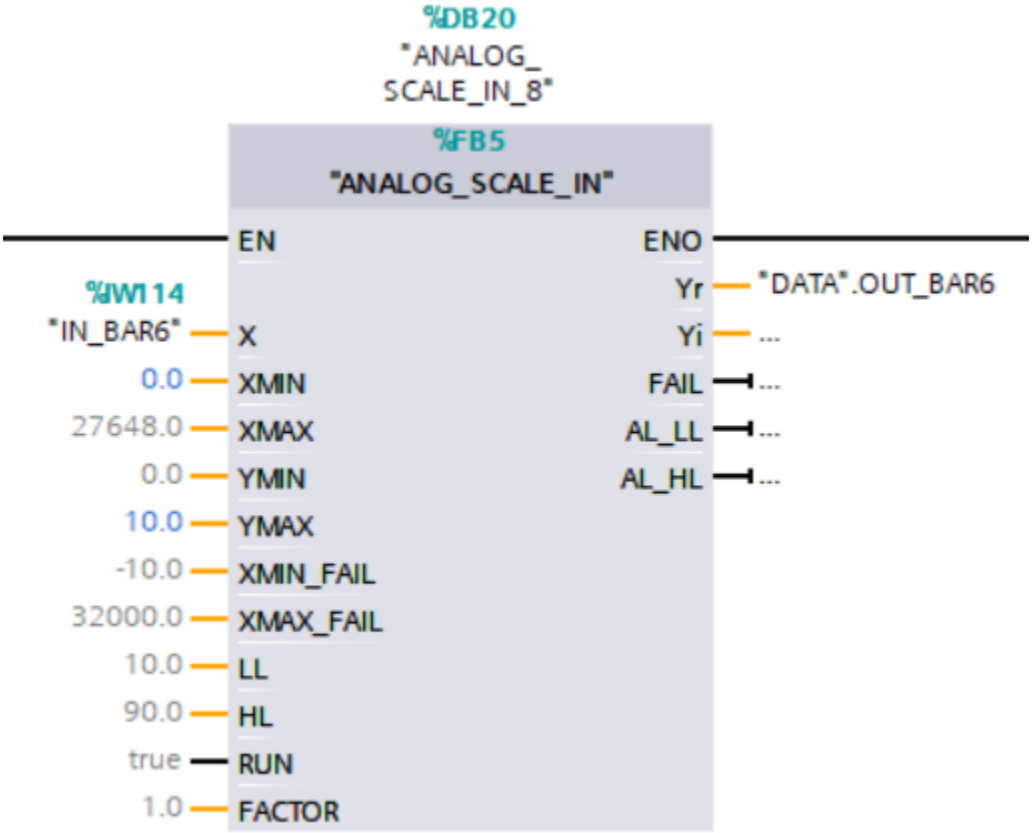


Figura 5-10: Escalado de la señal

En la **figura 5-10** se puede ver como la función **"%DB20"** hace el escalado lineal de una señal digital que se mueve en el rango de "XMIN" igual a 0, hasta un valor "XMAX" de 27648, con el rango de referencia que se mueve de "YMIN" hasta "YMAX". Para el caso de la **figura 5-10** se

realiza el escalado de la señal proveniente de un sensor de presión con un rango de lectura desde **0 [bar] = YMIN** hasta **10 [bar] = YMAX.**

De manera análoga se realiza el escalado de la señal para las variables de Q, T y los sensores de presión.

Tabla 6: Rango de trabajo de instrumentación y resolución en la adquisición de datos PLC.

Variable	Rango trabajo instrumento	Rango módulos (12 bit)	Rango asignado en TIA Portal	Resolución magnitud física	Resolución TIA Portal
P succión	-1 - 15 [bar]	0 -4096	0 -27648	**0,003906 [bar]**	6-7
P descarga	0 - 10 [bar]	0 -4096	0 -27648	**0,002441 [bar]**	6-7
Q	0 - 60 [$\frac{m^3}{h}$]	0 -4096	0 -27648	**0,014648 [$\frac{m^3}{h}$]]**	6-7

En la **tabla 6,** la segunda columna muestra el rango de trabajo de los sensores de presión y caudal del banco de pruebas. La tercera columna muestra el número de valores que pueden tomar los módulos analógicos debido a su resolución de 12 bit.

La cuarta columna muestra el rango de valores que tiene el software, ya que tiene un rango mayor al módulo, por cada unidad digital que aumenta el módulo, el software tiene un aumento entre 6 a 7 unidades digitales como se puede ver en la sexta columna.

5.2.3 Primera opción (Herramienta Trace)

En el **primer caso de adquisición de datos** se decide adquirir los valores digitales transformados en los módulos analógicos del PLC y procesarlos directamente en TIA Portal mediante la herramienta Trace. Esta permite graficar y exportar las variables deseadas a un archivo csv, el cual es importado a MATLAB para su posterior análisis.

En la **figura 5-11** se aprecia la primera ventana para configurar la toma de datos mediante Trace, donde se seleccionan las variables creadas dentro de la memoria del PLC que desean ser guardadas y procesadas. Además, se puede ver en la **figura 5-11** que se seleccionan los 2 sensores de succión, los 2 de descarga, el de temperatura (**IN_FLOW**) y el de caudal (**tag_21**).

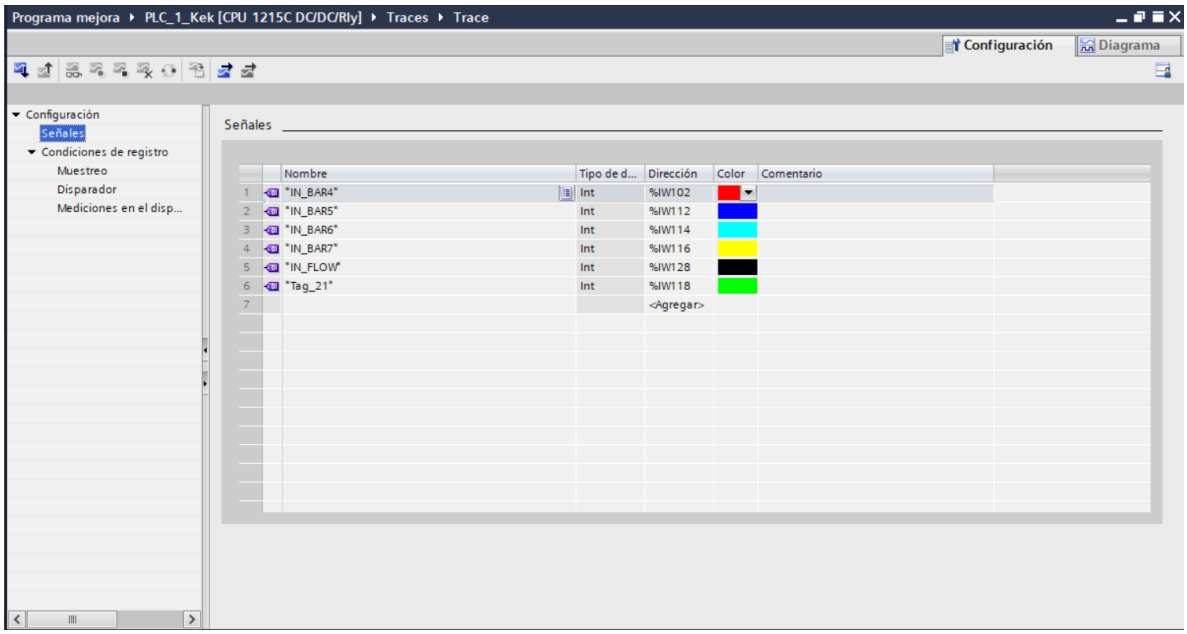


Figura 5-11: Parte 1 selección de variables para almacenamiento de datos.

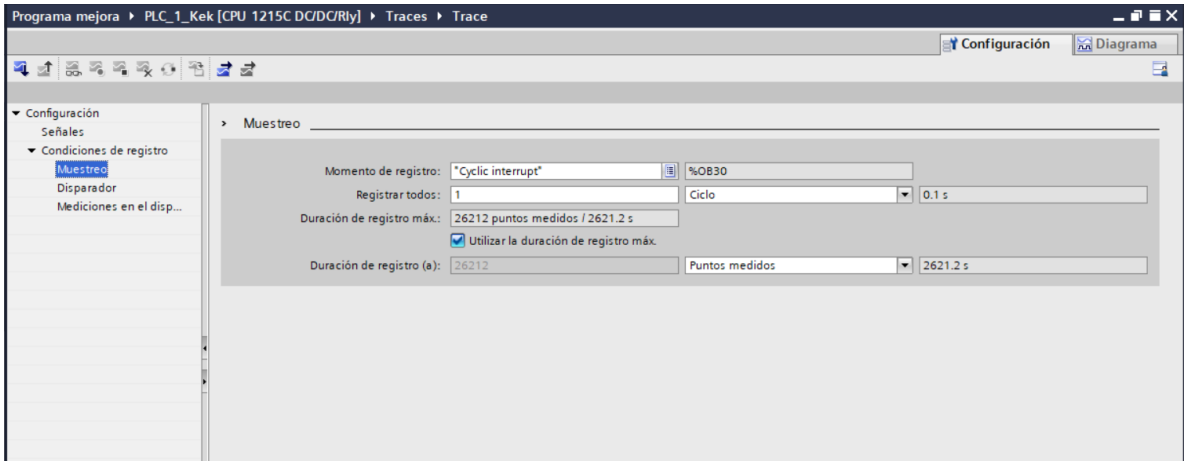


Figura 5-12: Parte 2 configuración de velocidad de toma de muestra.

En la **figura 5-12** se puede observar la segunda parte de la configuración, donde se selecciona el tipo de ciclo que se realizara para registrar los datos. En el caso de muestra se selecciona el ciclo más rápido posible con la característica del PLC, que permite obtener los datos las variables seleccionadas simultáneamente cada 0,1 [s].

5.2.4 Segunda opción LabVIEW

Se evalúa adquirir datos usando LabVIEW, programa que permite obtener las lecturas de la totalidad de canales del PLC y además enviar señales a este. En este trabajo se utiliza netamente para la lectura de señales de los sensores analógicos.

Para comunicar LabVIEW con TIA Portal se utiliza OPC Server, programa que sirve como intermediario entre TIA Portal y LabVIEW. En la **figura 5-13** se puede apreciar cómo se seleccionan las variables que se desea leer del PLC mediante la dirección del canal de entrada configurada en TIA Portal.

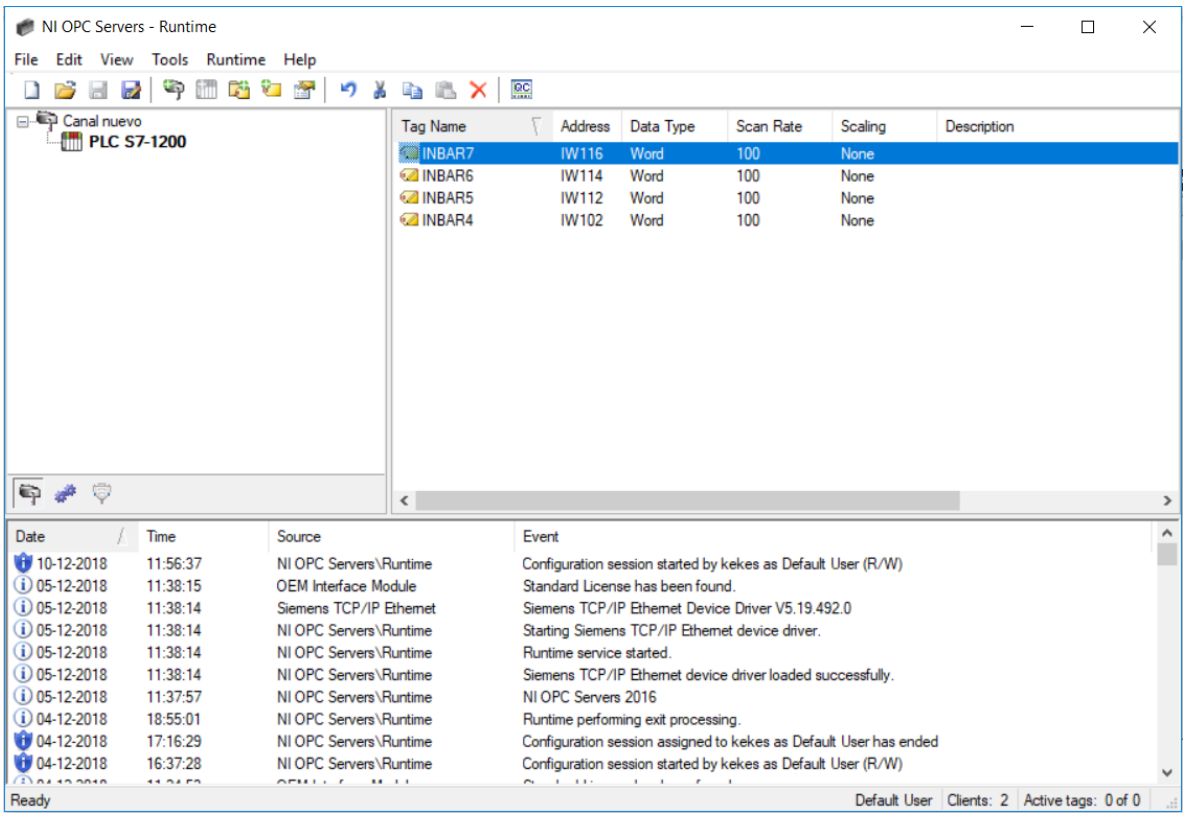


Figura 5-13: Configuración de NI OPC Servers.

LabVIEW necesita la creación de un programa para guardar datos, enviar señales u ordenar a este lo que se requiera.

En este caso, se realiza un programa de prueba que permite la adquisición de datos de presión, caudal y temperatura, con una frecuencia y tiempo total de muestreo que pueden ser ajustados a los requerimientos de la muestra que se necesite realizar. Ver en la **figura 5-14**.

El programa de LabVIEW permite configurar la frecuencia de muestreo requerida, contando con una frecuencia de muestreo de 10 [ms] limitada por OPC Server. Sin embargo, el PLC demora cerca de 20 [ms] en realizar la transformación análoga-digital con la configuración actual. El programa permite configurar el tiempo de muestreo de las variables, adquirir datos de los sensores

simultáneamente y luego exportar la información almacenada en un archivo csv para su posterior análisis en MATLAB.

Este método fue implementado, pero no se encuentra disponible ya que el PLC presentó un error de comunicación.

El dispositivo fue revisado por profesionales de Vogt, quienes diagnosticaron el problema como irreparable. Sin embargo, antes del problema de comunicación, fue posible realizar algunas mediciones con el programa en "Beta" que permite analizar algunas características del método de adquisición.

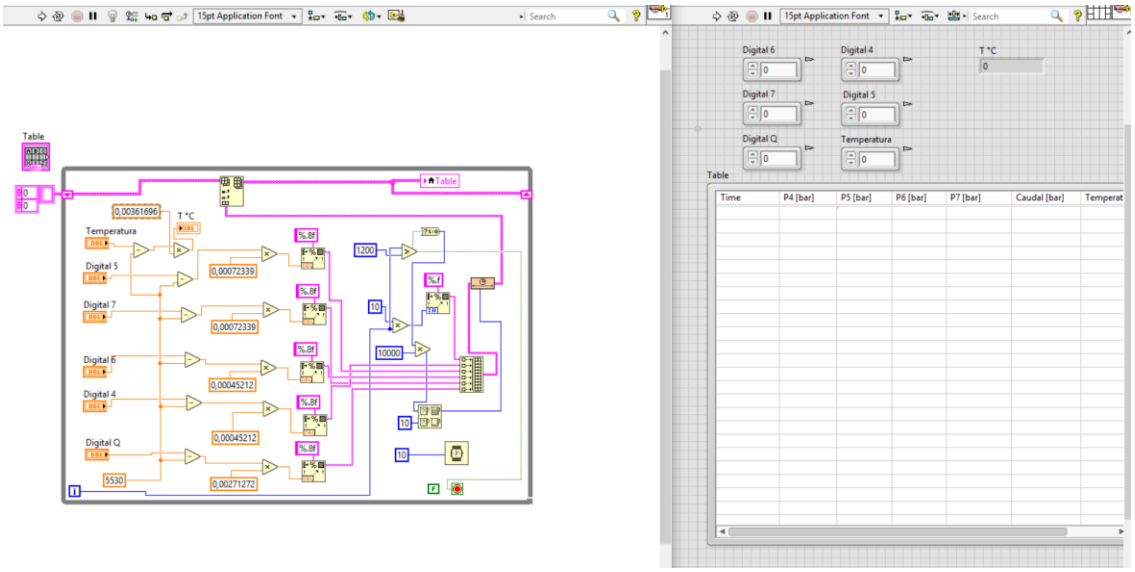


Figura 5-14: Programa LabVIEW para toma de datos.

5.2.5 Método de adquisición en un módulo externo. (LABJACK)

La tercera opción para evaluar como método de adquisición de datos, es hacerlo con un módulo externo al PLC, por lo que se utiliza un equipo LabJack U3 HV.

El módulo no es la opción idónea para adquirir las señales de los sensores que utiliza el banco de pruebas, ya que tiene 4 entradas analógicas de "High Voltage" que permiten obtener señales desde los -10,3[V] hasta los 10,3 [V]. Sin embargo, los sensores utilizan una señal de corriente de 4-20 [mA].

Para poder hacer posible la adquisición de datos mediante este método, es necesario utilizar un pequeño circuito eléctrico, que transforme esa pequeña corriente producida por el sensor para provocar una diferencia de potencial dentro del rango de lectura que tiene nuestro dispositivo.

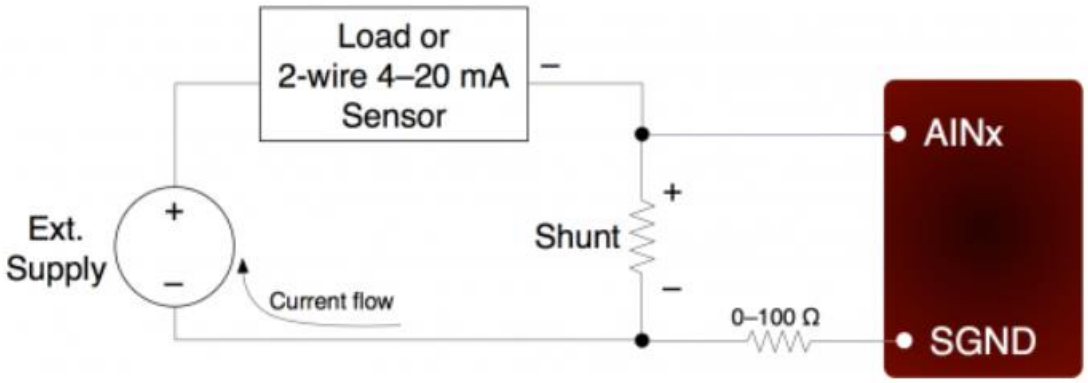


Figura 5-15: Conexión recomendada por el fabricante para sensores de corriente de 2 hilos.

En la **figura 5-15** se puede apreciar el circuito recomendado por el fabricante para conectar los sensores de corriente de 2 hilos, que son alimentados mediante una fuente externa al dispositivo U3.

Se utilizan 2 resistencias. La primera es la denominada *Shunt,* esta resistencia produce el escalado de corriente a voltaje (V= IR). La segunda resistencia utilizada es de 100 [Ω], y su función es netamente evitar un alza de corriente en la entrada del canal de tierra. La resistencia *Shunt* utilizada es de 460 [ohm] nominal, por lo que una señal del sensor de 4 [mA] equivalen a 1,84 [V], mientras que 20 [mA] son 9,2 [V].

Si bien el rango total de lectura del canal del dispositivo va desde los -10,3 [V] hasta los 10,3 [V], sólo se utiliza el rango de -1,84 [V] hasta -9,2 [V], perdiendo resolución debido al resto del rango disponible que no es utilizado por el escalado de la señal.

El rango utilizado corresponde sólo a un 36 % del rango total disponible por el dispositivo, por lo que la resolución accesible en las condiciones de uso se restringe bastante, dejando un 64 % del rango inutilizables.

Tabla 7: Rango de trabajo de instrumentación y resolución en la adquisición de datos de LabJack

Variable	Rango trabajo instrumento	Resolución canales (12 bit)	Rango canal LabJack	Rango utilizado	Resolución magnitud física
P succión	-1 - 15 [bar]	0 -4096	-10,3 -10,3 [V]	**1,84-9,2 [V]**	**0,01065 [bar]**
P descarga	0 - 10 [bar]	0 -4096	-10,3 -10,3 [V]	**1,84-9,2[V]**	**0,00669 [bar]**
Q	0 - 60 [$\frac{m^3}{h}$]	0 -4096	-10,3-10,3 [V]	**1,84-9,2 [V]**	**0,04016 [$\frac{m^3}{h}$]**

En la **tabla 7** se puede ver cómo cambia la resolución final de los módulos al cambiar el rango de trabajo del canal.

La resistencia utilizada *Shunt* de la **figura 5-15** puede cambiar estas proporciones en cuanto al rango utilizado, y con esto, la resolución de trabajo. En este caso se evaluará de este modo, sin embargo, posteriormente se puede realizar una mejora que debe considerar también una correcta instalación.

LabJack permite diversas configuraciones de temporizadores. Para temas de este trabajo se utiliza el temporizado recomendado por default. Este requiere 2 canales para funcionar, en este caso se utilizan el F05 y F06, uno envía un pulso rectangular mientras que el otro recibe este pulso y determina cuánto tiempo demora en base al ancho del pulso. Existen diferentes configuraciones para el temporizador, pero en este caso de pruebas se dejó la configuración básica recomendada que tiene una frecuencia de 550 [Hz] aproximadamente.

La configuración del dispositivo se realiza mediante MATLAB, se programó la adquisición de datos que guarda los valores recibidos por este dispositivo en una matriz, en la cual se añaden las 4 entradas analógicas configuradas en HV (-10 a 10 [V]). La adquisición de datos mediante el método programado adquiere datos cada 1,8 [ms] aproximadamente.

Se puede ver en detalle el código utilizado en la programación en el **ANEXO D-2.**

5.3 Procedimiento y pasos para adquisición y procesamiento de datos

Uno de los objetivos de este trabajo es realizar la prueba de rendimiento hidráulico para una bomba trabajando de forma independiente, se realiza el protocolo y procedimiento para las pruebas, para poder realizar el almacenamiento y procesamiento de datos para los métodos de adquisición mostrados en la sección anterior.

El **primer paso** es almacenar los datos en un archivo para su posterior análisis. Al hacerlo mediante TIA-Portal basta con seleccionar exportar datos una vez que se detiene la toma de datos desde Trace y guardarlos en un archivo con formato "csv", que separa con una "," (coma) los datos entre columnas. Mediante LabVIEW se usa una modalidad similar, ya que el programa creado permite exportar los datos almacenados en un archivo "csv".

Mediante LabJack la adquisición de datos se realiza mediante MATLAB, en el cual se crea una función llamada "toma_datos" que inicia el funcionamiento de la adquisición de datos una vez seleccionado el tiempo que se requiere almacenarlos. Se realiza el muestreo con un periodo de 1,5 [ms] aproximadamente, que sufre fluctuaciones de hasta 0,3 [ms]. Una vez acabado el tiempo de adquisición, la función guarda automáticamente una variable llamada "A" la cual guarda en 6 columnas la cantidad de muestras tomadas de la tensión en los canales 0, 1, 2 y 3, además guarda el tiempo y la cantidad de muestras. Finalmente se debe guardar esta matriz en un archivo "csv" utilizando la función "csvwrite" que se encuentra en la librería de MATLAB.

Los archivos almacenados mediante los procedimientos anteriores cuentan con las mediciones de presión en la succión, presión en la descarga, caudal y tiempo. Sin embargo, hace falta almacenar los datos de la velocidad de rotación, las secciones de las tuberías, la gravedad y los errores sistemáticos de cada instrumento de medición.

El **segundo paso** es calcular las variables de estudio, para este caso, se requiere calcular la altura en la succión, la altura en la descarga, la altura total de la bomba y el caudal. Además de esto, se requiere calcular la fluctuación de las mediciones, el error sistemático y la incertidumbre total de las mediciones.

Teniendo estos 2 pasos en consideración se establece el procedimiento a seguir para calcular la curva de la bomba que se divide en 2 secciones, primero de DAQ, y otra de procesamiento de datos. Se detalla en los siguientes pasos:

5.3.1 DAQ (Almacenamiento de datos)

a. Primero se debe comprobar que a la configuración del banco cumpla con la apertura de válvulas correctas para su funcionamiento, teniendo en consideración el dejar las válvulas ubicadas en la zona de descarga de las bombas cerradas.

b. Definir qué método de adquisición se utilizará. En caso de utilizar LabJack se debe tener en consideración conectar el sensor de presión de succión en el canal 0, el de descarga en el canal 1 y el de caudal en el canal 2.

c. Se debe encender el tablero general que alimenta el PLC, las bombas e instrumentación, y ubicar las perillas del tablero en la posición que permita el "funcionamiento".

d. Se define la cantidad de puntos a ensayar a lo largo del rango de caudal que permite el funcionamiento de la bomba. Teniendo en consideración tomar como mínimo 5 puntos, dentro de los cuales 2 se deben encontrar cercanos al caudal de garantía.

e. Se selecciona en la pantalla HMI la velocidad de rotación a la cual se hará la prueba, verificando que el sistema se encuentra correctamente preparado para funcionar antes de pulsar "Inicio". Se debe verificar la presión en la válvula neumática y las correctas aperturas de las válvulas de bola, para que el flujo se mueva por los conductos correctos.

f. Una vez definida la cantidad de puntos a ensayar y la velocidad de rotación, se comienza con la adquisición de datos. Primero se abre la válvula de bola, seleccionando un porcentaje de apertura de 100 % en la pantalla HMI, y se inicia la toma de datos en este punto con el método de adquisición definido anteriormente. Simultáneamente se almacenan los datos de presión y caudal se realizan las mediciones de velocidad de rotación mediante el tacómetro digital.

   Se recomienda guardar el archivo con un nombre que permita recordar el método DAQ utilizado, la velocidad de rotación y la apertura de la válvula.

g. Se repite el procedimiento del paso f para todos los puntos que se decidan ensayar, consideran mínimo los puntos exigidos por la norma establecidos en el paso d.

5.3.2 Procesamiento de los datos almacenados

h. Ya se cuenta con los archivos almacenados de forma digital del método DAQ, sin embargo, resta digitalizar las mediciones de la velocidad de rotación. Para esto se crea una función en MATLAB llamada "rpmplc" o "rpmlj" en la cual se debe llenar la matriz con las mediciones obtenidas mediante el tacómetro digital y rellenar la variable *n* con él porcentaje de apertura de la válvula neumática.

i. Para las mediciones de densidad se hace un procedimiento similar, se toma un valor promedio medido a la temperatura de funcionamiento del banco y se selecciona un error sobredimensionado, ya que no se cuenta aún con un sensor de temperatura que permita

conocer la densidad de manera más exacta. Los valores definidos se remplazan en la función “alturabomba” y “esistematico”.

j. Se deben preparar los archivos almacenados para poder ser trabajados en MATLAB. Si se adquirieron mediante LabJack se encuentran listo para ser trabajados, sin embargo, si se adquirieron por PLC se necesita eliminar la primera fila del archivo que contiene el nombre de las variables y las columnas que tengan mediciones no deseadas. Se deben dejar en la columna 1,2,3 y 4, el tiempo, la presión de succión, presión de descarga y el caudal respectivamente. La columna tiempo se debe configurar como dato numérico.

k. Una vez modificados correctamente los archivos del PLC se deben guardar en la carpeta con la dirección D:\MATLAB INS\bin, para poder ser trabajados desde MATLAB.

l. Para iniciar el cálculo de datos se deber correr la función “calculodedatos”, la cual abre una pequeña ventana en la que se debe seleccionar si se trabaja con PLC o LabJack.

m. MATLAB pregunta el nombre del archivo a calcular, se debe escribir su nombre inmediatamente después de los “:”.

n. Finalmente, se requiere seleccionar el % de apertura de la válvula neumática, ya que mediante este dato la función puede leer el archivo donde fueron guardadas las mediciones de revolución.

Si se siguen los pasos anteriores MATLAB entrega en pantalla los **valores promedios** con sus respectivas **fluctuaciones porcentuales**. Posteriormente presenta los valores con **el error sistemático porcentual,** y finalmente, muestra la **altura total de la bomba y caudal** llevados a 2900 [rpm] por las leyes de afinidad, ya que es la velocidad de rotación nominal de la bomba. El programa además muestra los porcentajes de incertidumbre totales calculados para las mediciones finales.

Para el cálculo de los errores se utilizaron las ecuaciones de incertidumbre sistemática y aleatoria que exige la norma, sin embargo, esta no especifica un método para la propagación del error, por lo que se utilizó un método científico y estadístico para esto.

Cabe mencionar que no se incluyen las pérdidas de carga, ya que la norma estipula no considerarlas cuando la suma de las pérdidas de carga en la succión y la descarga es inferior o igual a 0,2% del valor promedio de altura medido para el grado de aceptación 1 e inferior a 0,5 % para grados 2 y 3.

En condiciones de caudal máximo la bomba tiene una velocidad media de aproximadamente 3 [m/s] en la succión y 5[m/s] en la descarga. Si utilizamos un valor de coeficiente de rugosidad de 0,15 [mm] que establece la norma para acero galvanizado, obtenemos pérdidas de carga de 0,027

[m] en la succión y de 0,084 en la descarga, dando como suma 0,111 [m]. Esto es equivalente a un 0,34 % del valor de altura nominal de 33 [m] a este caudal de 24[$\frac{m^3}{h}$]]. Los cálculos anteriores se pueden ver en el **ANEXO B-3**, y justifican el no considerar pérdidas de carga para mediciones de grado de aceptación de orden 2 y 3.

Todas las funciones utilizadas para el cálculo de datos se pueden ver en el **ANEXO D-2 en la sección 8.2.2.1 hasta 8.2.2.3.**

6. IMPLEMENTACION Y PRUEBAS

En este capítulo se da a conocer la implementación de las piezas y métodos de adquisición propuestos en el capítulo anterior. Luego, se evalúan sus competencias en el banco de pruebas para finalmente realizar una evaluación de las mediciones según la norma ISO9906-2012 y compararlas con las distintas categorías.

6.1 DISEÑO

En esta sección se da a conocer el procedimiento de fabricación y el resultado de las 3 piezas (**tubería, toma de presión y manifold)** que fueron diseñadas y propuestas en el capítulo anterior.

6.1.1 Tubería.

Las tuberías de succión y descarga de la bomba sur son compradas en un formato de 6 metros de largo y con hilo NPT para montarlas directamente en la bomba, por lo que primero se realiza el corte de las tuberías al largo diseñado, para posteriormente realizar el mecanizado de las caras planas, perforaciones e hilo roscado M5.

Este trabajo fue realizado en el taller de mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María, Campus San Joaquín.

Figura 6-1: Mecanizado de las caras planas y perforaciones roscadas de la tubería de succión.

Una vez hecho el mecanizado de las caras planas y perforaciones para las tomas de presión, se requiere hacer un hilo **BSP 1,5 [in] para la tubería de descarga,** en la extremidad que no tiene el hilo NPT. Para la **tubería de succión se realiza el sacado de material** en torno, el cual permite el posterior montaje de la abrazadera que facilita la unión entre tuberías. Estos trabajos fueron realizados en una maestranza exterior a la Universidad.

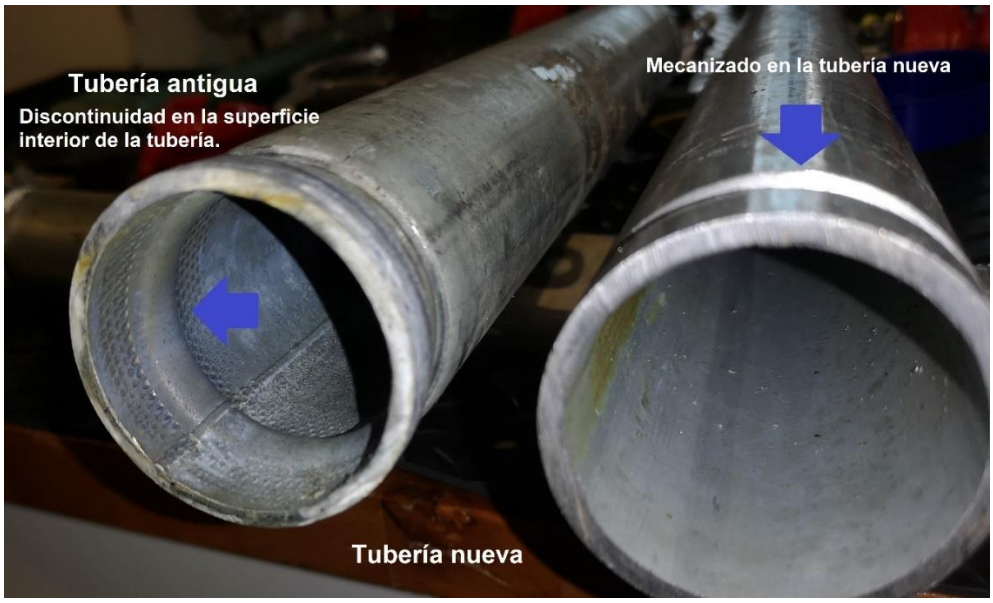


Figura 6-2: Comparación de la superficie interior con mecanizado de la tubería nueva en comparación con el método antiguo.

6.1.2 Tomas de presión.

Las tomas de presión se diseñaron en acero inoxidable, sin embargo, se facilitó Acetal en un formato de 20[mm] de diámetro. El Acetal es un plástico de ingeniería con excelentes propiedades mecánicas, usado para fabricar piezas de precisión como engranajes, por lo que se decide realizar prototipos con este.

Las tomas de presión requieren un sacado de 2,5[mm] de ancho y 1,3 [mm] de profundidad con una tolerancia de 0,1[mm] para instalar el O'ring. El taller de la universidad no cuenta con los implementos necesarios para realizar esta pieza con las tolerancias requeridas, sin embargo, se cuenta con una fresadora CNC (Control numérico computarizado), utilizada en el ramo "CNC" para la carrera Ing. Civil Mecánica que se puede en la **figura 6-3**. Esta máquina de precisión cuenta con los requerimientos necesarios para poder fabricar las tomas de presión, por lo que se solicita utilizar dicha máquina para fabricar las piezas.

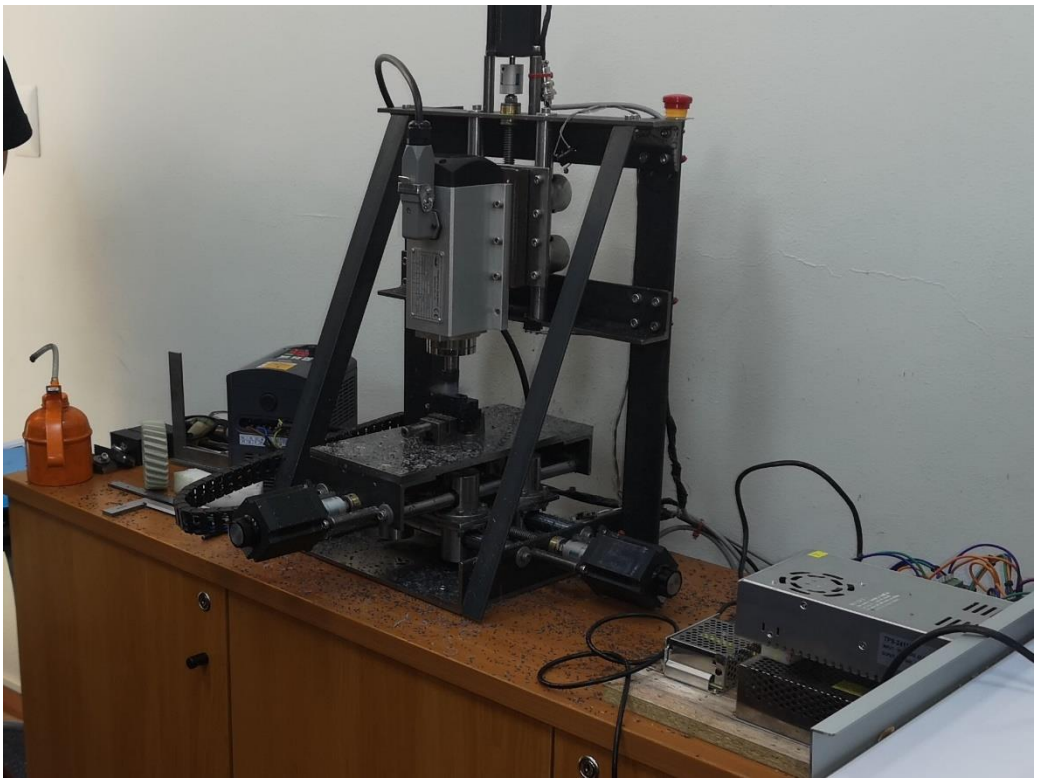


Figura 6-3: Fresadora CNC.

La pieza fabricada cumple con los requerimientos del sistema, se une fácilmente a la tubería y soporta las presiones de trabajo máxima del banco de ensayos de aproximadamente 7 [bar] sin tener fugas.

Cabe mencionar como observación que luego de montar y desmontar varias veces las tomas de presión, se daña el hilo de 1 pieza debido a un torque excesivo al momento del montaje.

Figura 6-4: Toma de presión mecanizada en Acetal

6.1.3 Manifold

El prototipo del manifold se realizó en Technyl, material que puede ser definido como una poliamida dentro del grupo de plásticos de ingeniería, debido a sus características mecánicas y su bajo costo. El mecanizado de la pieza se realiza con colaboración del taller de mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María y con apoyo de la fresadora CNC.

En la **figura 6-5**, se puede apreciar el manifold montado en la fresadora CNC, que permitió realizar las perforaciones requeridas para los sensores con gran precisión.

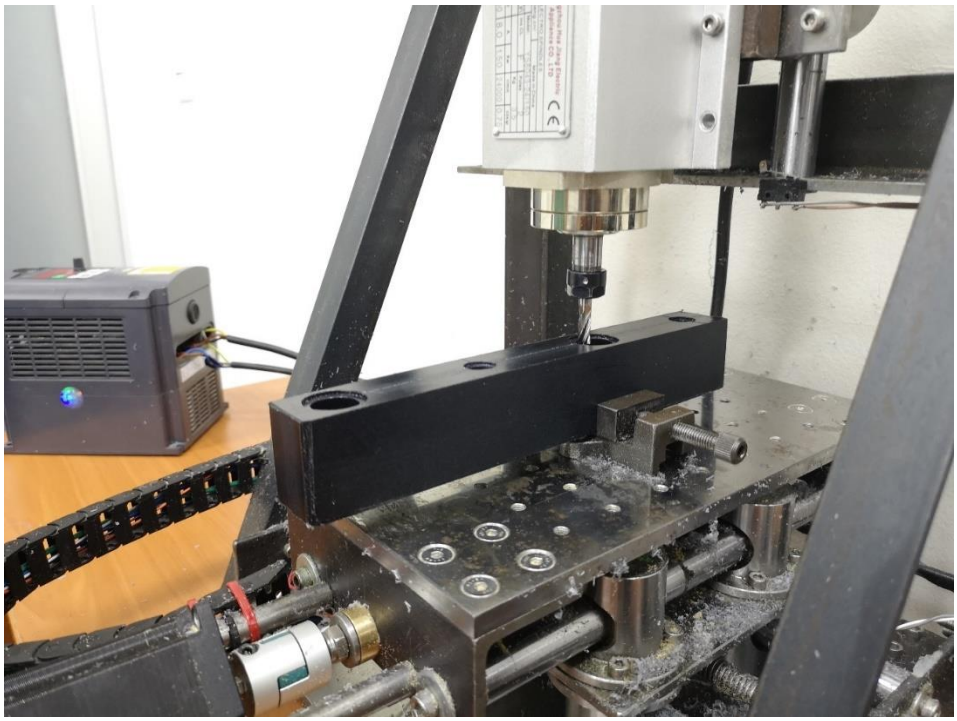


Figura 6-5: Mecanizando las últimas perforaciones en la fresadora CNC.

Para hacer lo hilos bsp 1/8 se debe tener cuidado de sacar la viruta y no ejercer mucho torque, debido a que los hilos de este material se dañan fácilmente. Se debe tener en consideración dentro del mecanizado que el material expulsa bastante rabada en comparación con otros plásticos de ingeniería.

6.1.4 Tomas de presión y manifold

El resto del sistema se forma con las uniones rápidas, mangueras, uniones tee, válvula de bola y purga.

Figura 6-6: Anillo unido a las tomas de presión.

En la **figura 6-6** se puede apreciar el anillo compuesto por 4 tomas de presión. Esta instalación tiene como ventaja el tener el diámetro y longitud de perforación adecuado, medir la presión en 4 puntos en la sección transversal obteniendo un valor de medición que es el valor final que se ha estabilizado producto de las 4 tomas, además permite amortiguar fluctuaciones bruscas de presión.

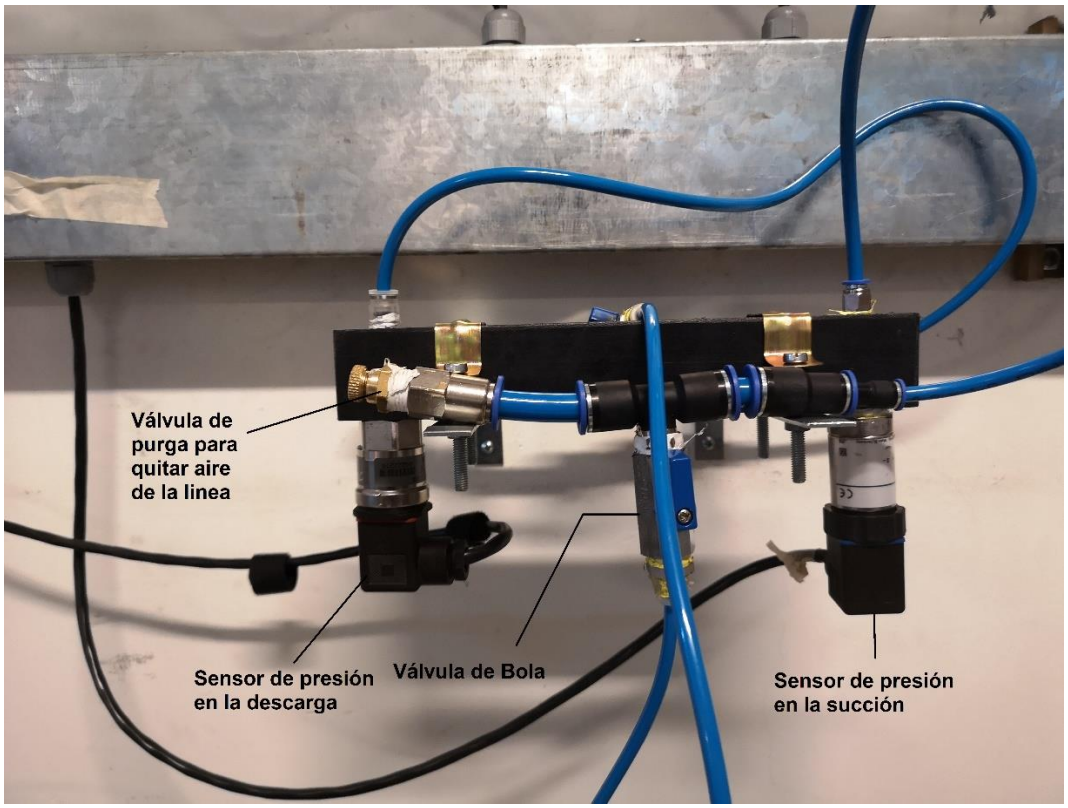


Figura 6-7: Manifold instalado con los sensores de la bomba sur.

El manifold de la figura 6-7 permite conectar y desconectar los sensores rápidamente, limpiar la cámara de medición del manifold en caso de que se requiera.

6.2 MÉTODOS DE ADQUISICIÓN

En esta sección se dan a conocer ventajas y desventajas de los métodos de adquisición de datos presentados en el capítulo 4. También se analiza el funcionamiento y diferencia entre ellos.

Para realizar una primera observación de los métodos de adquisición se realizan mediciones de presión y caudal. Esto se hace a revoluciones y caudal máximo permitido por el sistema, es decir, con la válvula de estrangulación completamente abierta y los VDF en 2900 rpm.

6.2.1 TIA Portal "Trace"

Este método es de rápido acceso y muy sencillo de utilizar, basta configurar 1 vez TIA Portal para establecer conexión en tiempo real con el PLC y luego se reduce a un par de clics.

Este método permite adquirir la cantidad de variables que se consideran necesarias simultáneamente, sólo deben estar creadas previamente estas variables en el PLC. En este caso se configura Trace para leer la señal de los sensores de presión de succión y descarga de ambas bombas, además las de temperatura y caudal.

Se realizaron mediciones **antes y después de implementar las mejoras** en la **bomba sur**.

La primera medición que se realizó fue en la succión de ambas bombas antes de implementar las mejoras propuestas, esto con fin de evaluar si realmente se presentaba mayor fluctuación en la bomba norte producto de la termocupla. Para facilitar la lectura, se graficó el valor medido dividido en el valor promedio para 2 caudales diferentes de 24 [$\frac{m^3}{h}$] y 16 [$\frac{m^3}{h}$], manteniendo la velocidad de rotación en el VDF a 2900 [rpm].

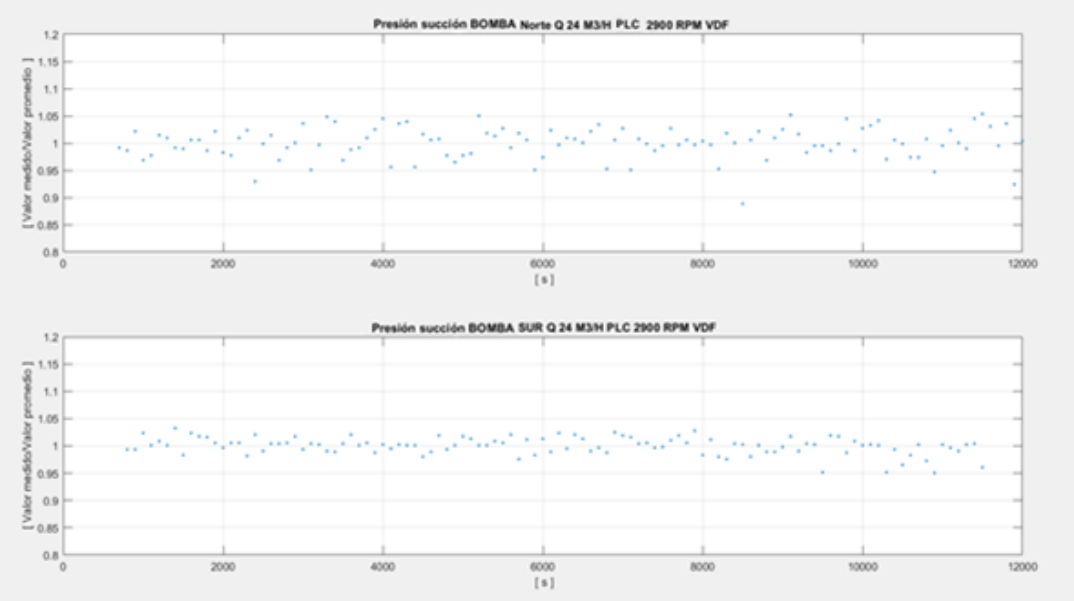


Figura 6-8: Medición de presión en la succión antes de implementar mejoras, obtenidas con PLC para Q=24[m3/h]

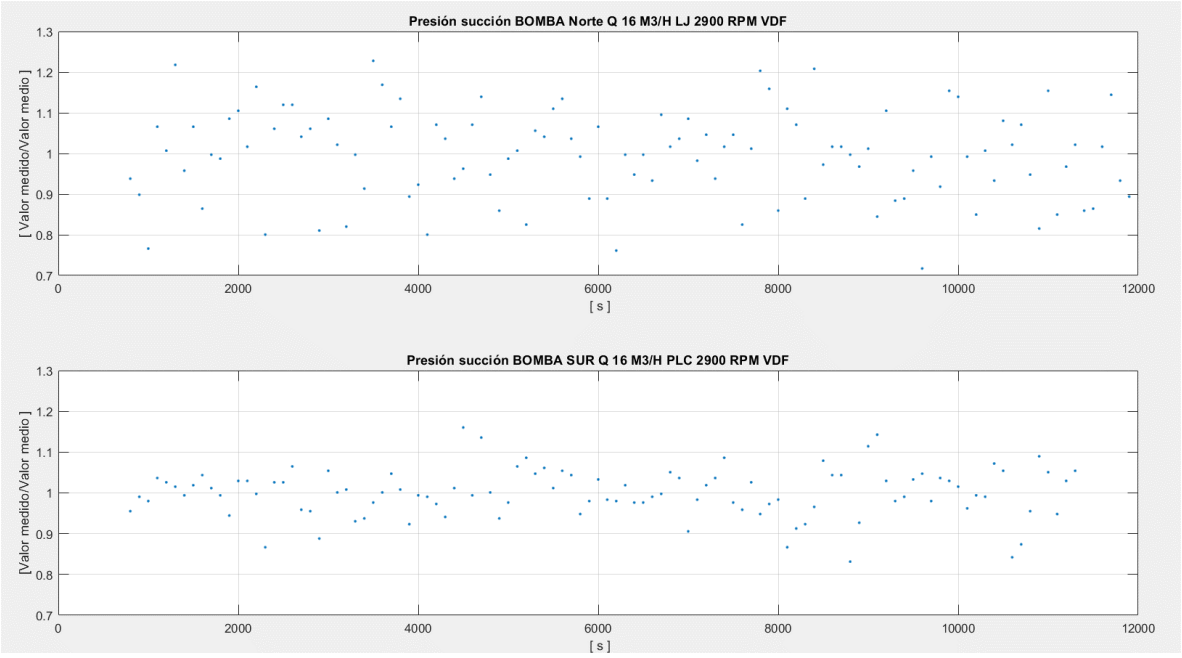


Figura 6-9: Medición de presión en la succión antes de implementar mejoras, obtenidas con PLC para Q=16 [m3/h]

Tabla 8:Valores de desviación estándar obtenidos para la succión antes de implementar mejoras PLC.

$\boldsymbol{\sigma_s}$ ($Q = 24\frac{m^3}{h}$)	Succión ($Q = 24\frac{m^3}{h}$)	Succión ($Q = 16\frac{m^3}{h}$)
Bomba Norte [Pa]	$1{,}74 \cdot 10^6$	$2{,}30 \cdot 10^6$
Bomba Sur [Pa]	$1{,}06 \cdot 10^6$	$1{,}68 \cdot 10^6$

En la **figura 6-9** se puede ver la presión en la succión y descarga "antes" y "después" de implementar las mejoras en las tomas de presión. Se realizaron con velocidad de rotación en el VDF a 2900[rpm] y con la válvula de estrangulación abierta al 100%. El valor observado es un valor digital antes de ser escalado a una magnitud física.

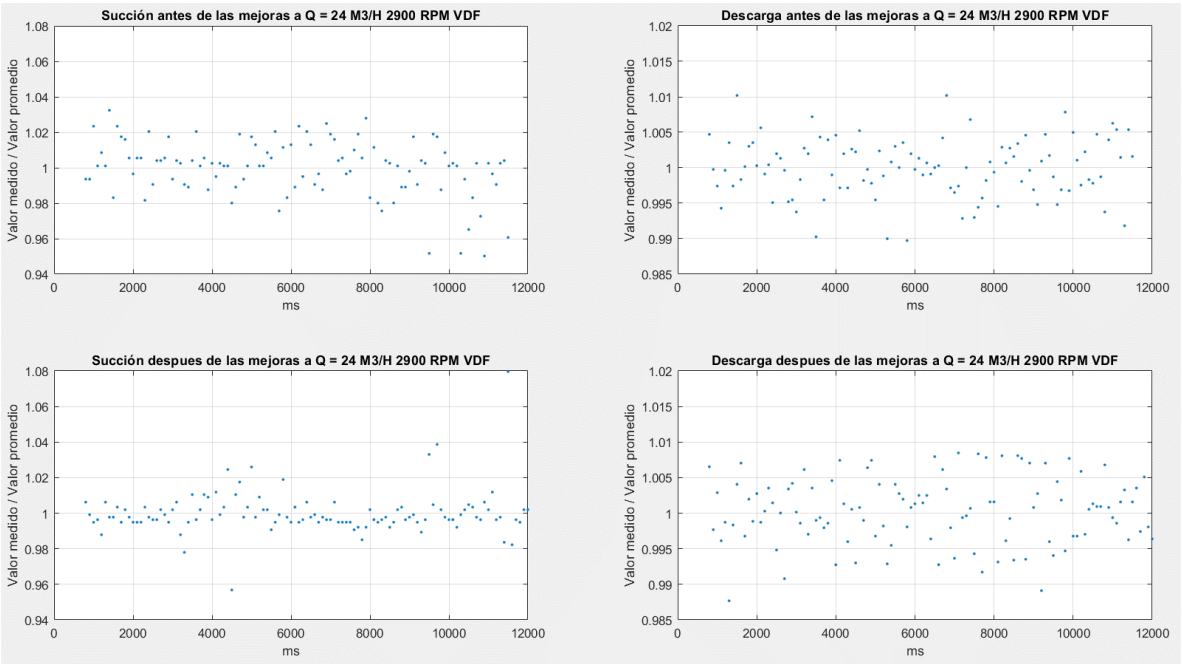


Figura 6-10: Fluctuaciones en la presión antes y después de implementar mejoras, obtenidas por PLC para Q 24[m3/h]

La **figura 5-11** muestra las mediciones sobre el valor promedio para poder visualizar la magnitud de las fluctuaciones porcentualmente.

Tabla 9: Valores de desviación estándar para presión antes y después de implementar mejoras (PLC).

$\boldsymbol{\sigma_s}$ $\boldsymbol{y}$ $\boldsymbol{\sigma_d}$ ($Q = 24\frac{m^3}{h}$)	$\boldsymbol{\sigma_s}$	$\boldsymbol{\sigma_d}$
Bomba sur antes [Pa]	$6{,}16 \cdot 10^2$	$1{,}15 \cdot 10^3$
Bomba sur después [Pa]	$4{,}89 \cdot 10^2$	$1{,}26 \cdot 10^3$

La **figura 6-11** muestra un histograma de las mediciones en la succión y descarga antes y después de implementar las mejoras para corroborar que sigan una distribución t-student como lo menciona la norma, y también si mejoran las condiciones de esta después de implementar las piezas diseñadas.

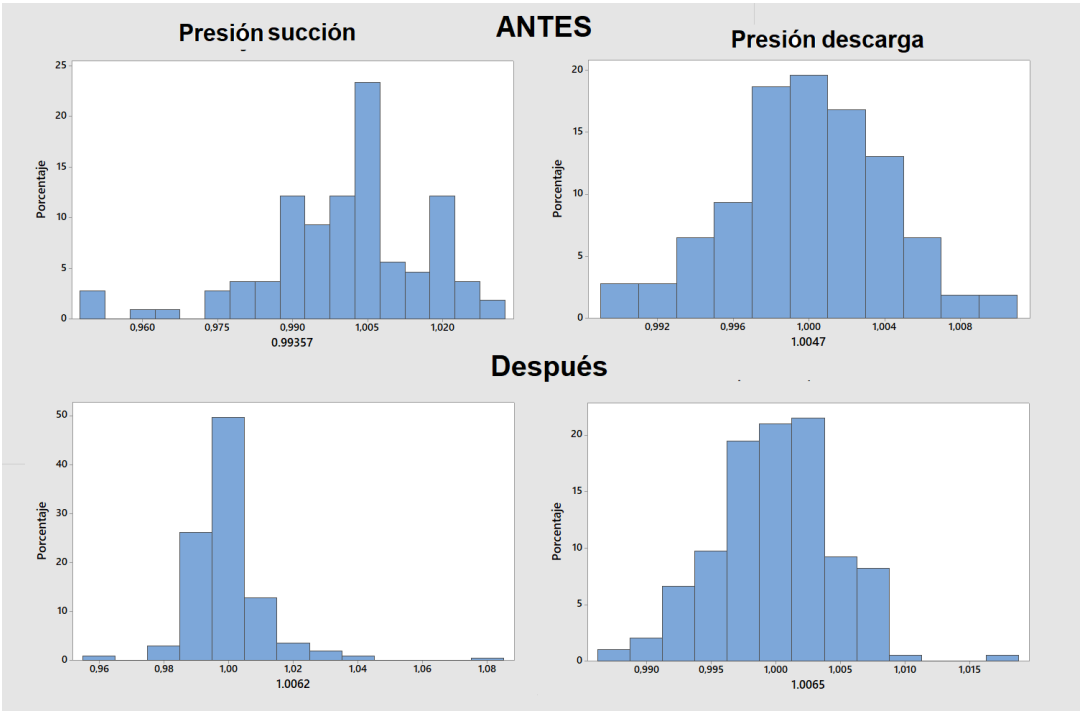


Figura 6-11: Histograma mediciones de presión antes y después de implementar mejoras Q 24[m3/h]

Para visualizar fácilmente el comportamiento del valor promedio en relación con el número de mediciones, se divide el valor promedio para N° mediciones, sobre el valor promedio para N final.

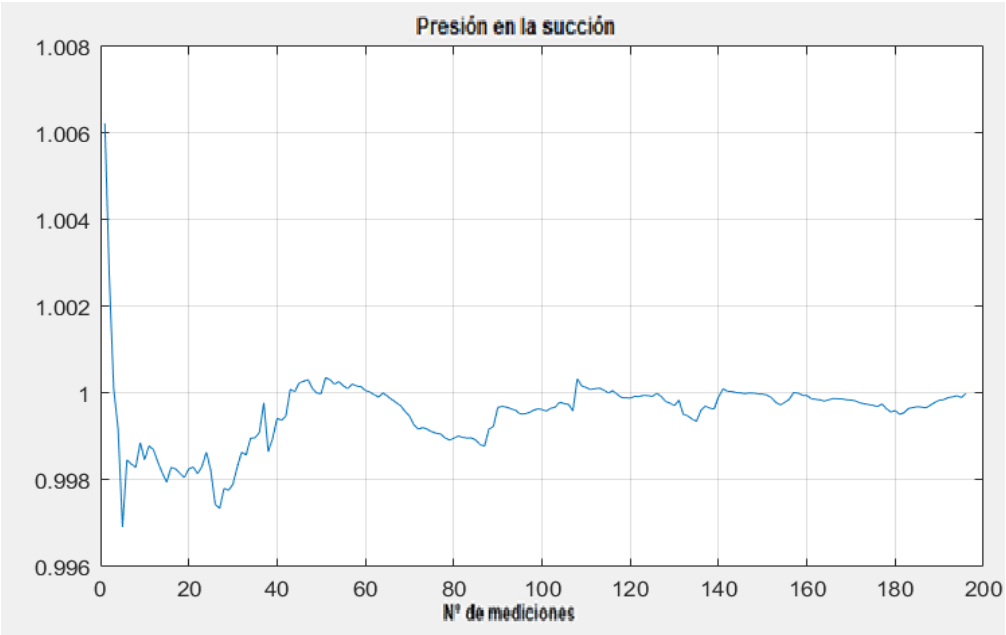


Figura 6-12: Curva de valor promedio para la succión a caudal máximo.

Figura 6-13: Curva de valor promedio para la descarga a caudal máximo.

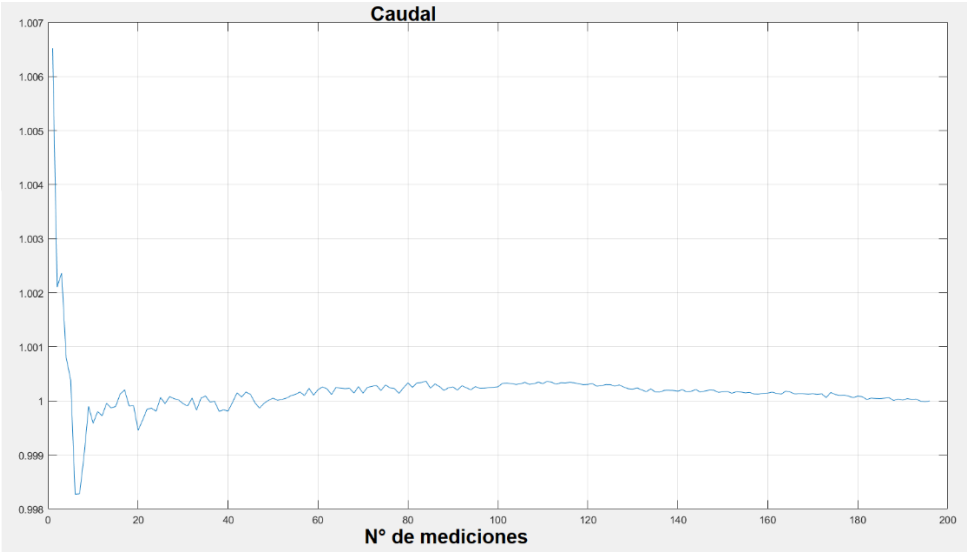


Figura 6-14: Curva de valor promedio para el caudal máximo

6.2.2 TIA Portal con LabVIEW

El realizar mediciones mediante LabView está imposibilitado por problemas presentados en el PLC, sin embargo, antes de la falla, cuando el programa se encontraba en su fase de prueba, fue posible realizar mediciones a revoluciones máximas de 2900 [rpm] en el VDF. Estas fueron ejecutadas para la bomba norte con la válvula de estrangulación totalmente abierta.

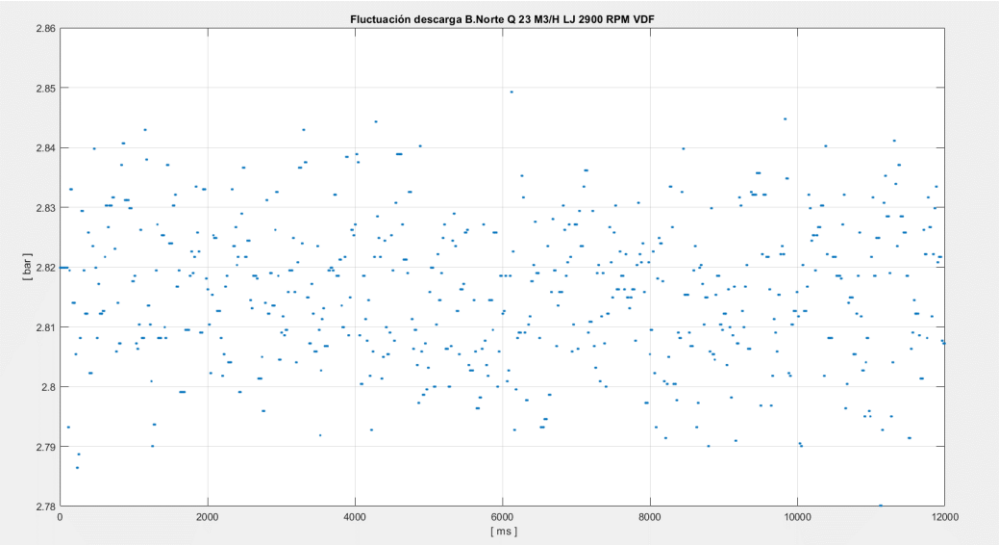


Figura 6-15: Gráfico de presión de descarga en el tiempo para la bomba norte 2900 [rpm] mediante LabVIEW.

En la **figura 6-15** se puede apreciar una medición hecha en la bomba norte mediante LabVIEW. El programa se encontraba configurado para tomar muestras cada 10 [ms], lamentablemente el **escalado de la señal se encuentra levemente errado**.

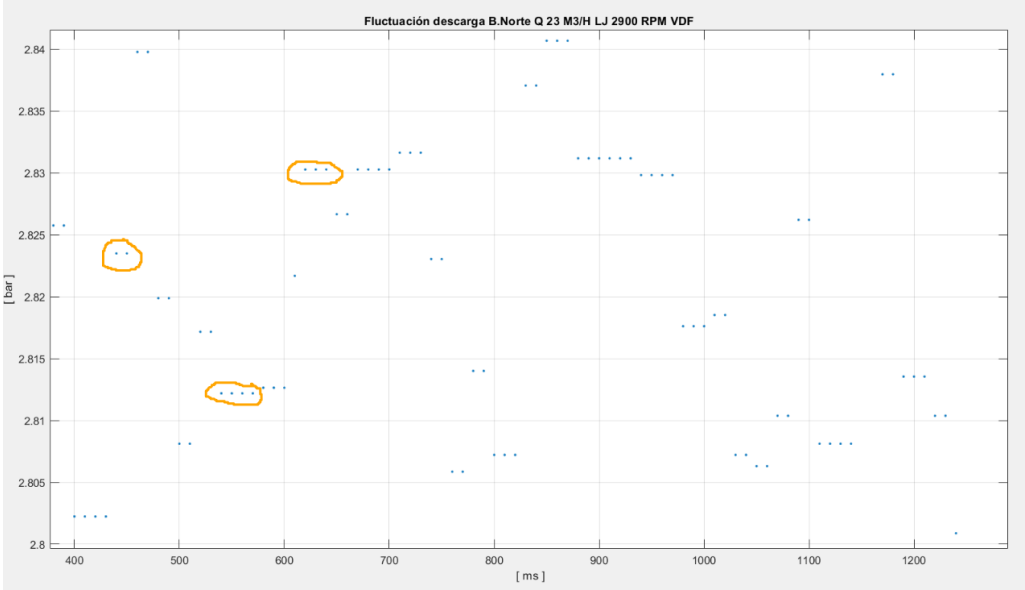


Figura 6-16: Zoom en el gráfico de la figura 81.

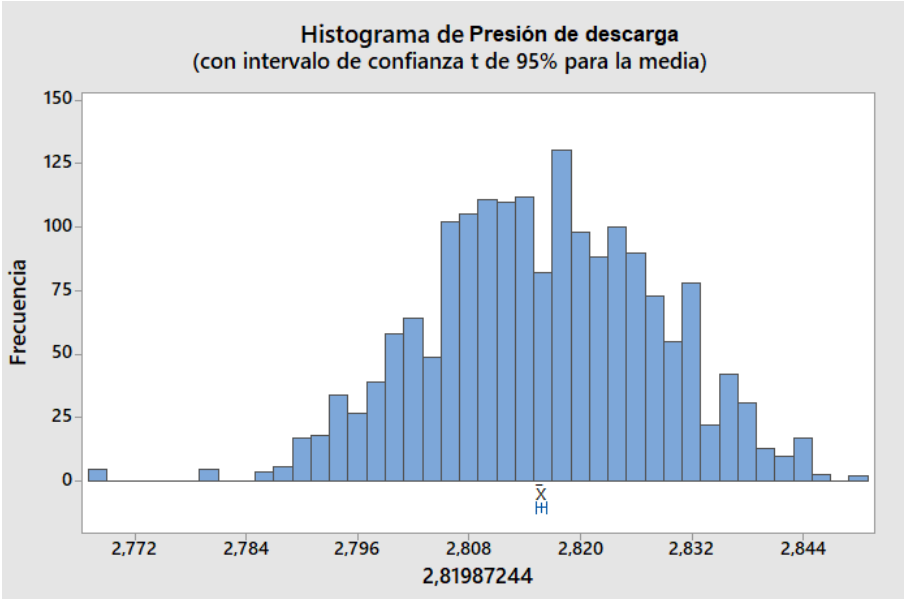


Figura 6-17: Histograma de presión de descarga obtenida mediante LabView.

6.2.3 LabJack U3 – HV

Este último método utilizado para adquirir datos presenta un trabajo extra, ya que además de la configuración y programación necesaria para usarlo, se requiere escalar la señal de corriente a una señal de tensión, lo cual genera un error y perdida de resolución, pero de esta manera el módulo U3 puede leer las señales de los sensores.

Para realizar la toma de datos, además se debe intervenir levemente el T.G (tablero general), desconectando los sensores del PLC para poder leerlos mediante LabJack, lo cual imposibilita el poder tomar mediciones simultáneas de un mismo sensor mediante ambos métodos.

Para hacer una posterior comparación con el método de adquisición llamado *Trace*, se grafican las mismas variables en un punto de operación similar.

Primero se evalúa la influencia del sensor de temperatura en la bomba norte, graficando la fluctuación de la presión de succión de ambas bombas antes de implementar las mejoras diseñadas. Esto se hace en dos puntos de operaciones distintos, ambos a una velocidad de rotación de 2900 [rpm] configurados en los VDF, pero uno a un caudal de 24[$\frac{m^3}{h}$] y otro a 16[$\frac{m^3}{h}$] aproximadamente.

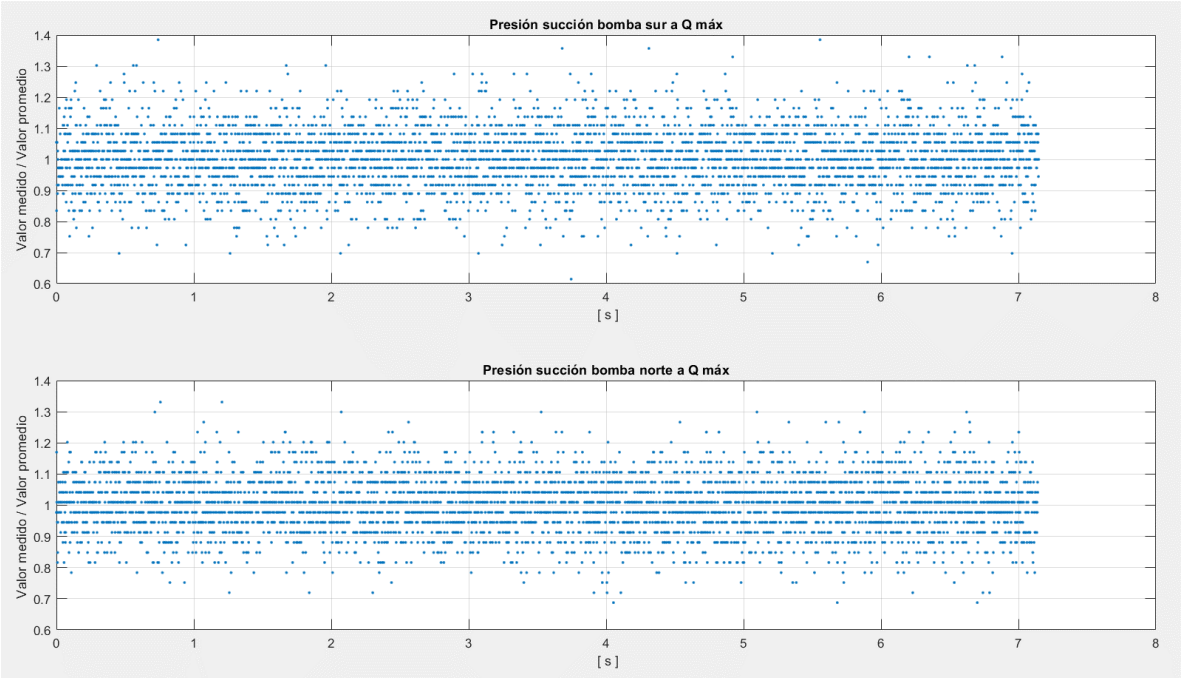


Figura 6-18: Mediciones de presión en la succión antes de implementar mejoras a Q 24[m3/h] obtenidas con LabJack.

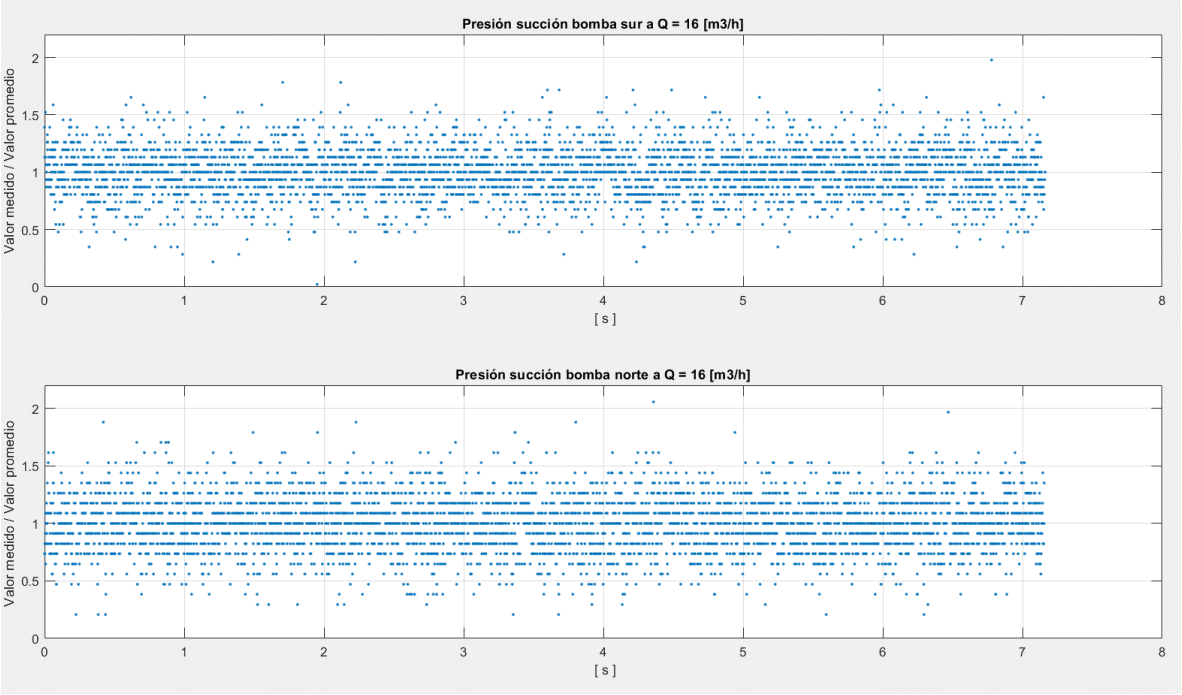


Figura 6-19:Mediciones de presión en la succión antes de implementar mejoras a Q 16[m3/h] obtenidas con LabJack.

Tabla 10: Desviación estándar obtenidas para la succión antes de implementar mejoras en ambas bombas (LJ).

$\boldsymbol{\sigma_s}$	Succión ($Q = 24\frac{m^3}{h}$)	Succión ($Q = 16\frac{m^3}{h}$)
Bomba Norte [Pa]	$2{,}95 \cdot 10^3$	$2{,}98 \cdot 10^3$
Bomba Sur [Pa]	$3{,}93 \cdot 10^3$	$3{,}51 \cdot 10^3$

Análogamente de lo que se hizo con las mediciones del PLC, en la **figura 6-20** se grafica el valor medido sobre el valor promedio de las mediciones**,** con la finalidad de observar porcentualmente el valor de la amplitud de las fluctuaciones.

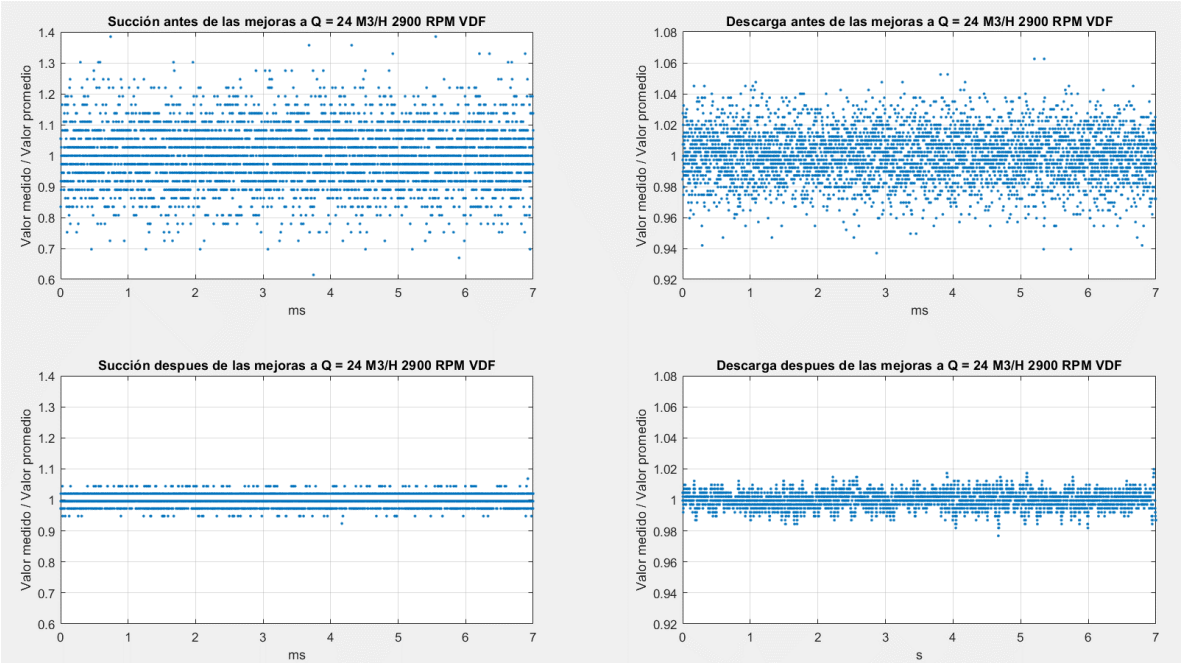


Figura 6-20: Fluctuaciones en la presión antes y después de implementar mejoras, obtenidas por LabJack para Q 24[m3/h]

Tabla 11 Valores de desviación estándar para presión antes y después de implementar mejoras (LJ).

$\boldsymbol{\sigma_s}$ **y** $\boldsymbol{\sigma_d}$ ($Q = 24\frac{m^3}{h}$)	$\boldsymbol{\sigma_s}$	$\boldsymbol{\sigma_d}$
Bomba sur antes	$3{,}93 \cdot 10^3$	$4.60 \cdot 10^3$
Bomba sur después	$8{,}42 \cdot 10^2$	$1{,}50 \cdot 10^3$

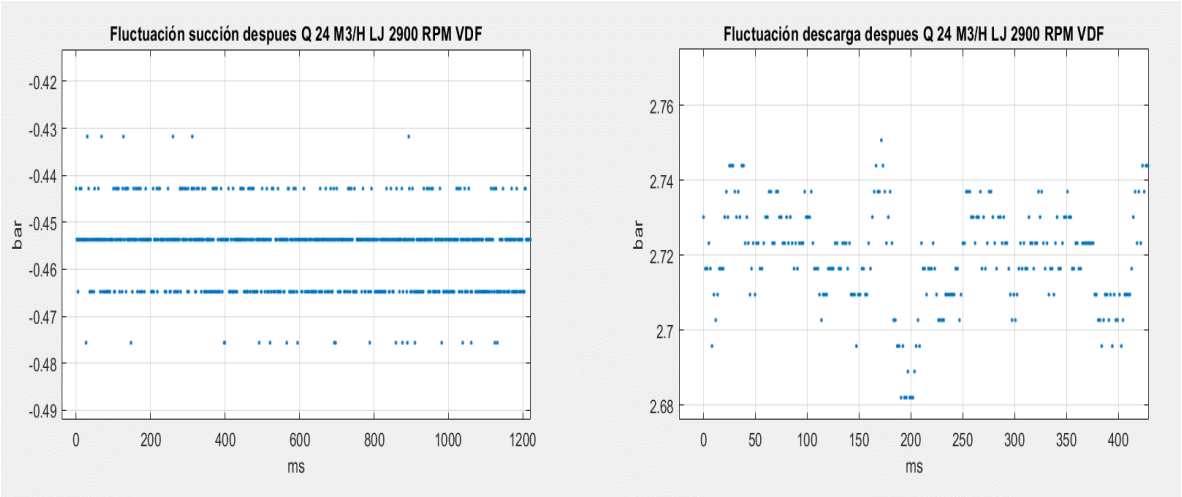


Figura 6-21: Zoom de los gráficos de presión para la succión y descarga después de implementar las mejoras.

La **figura 6-21** muestra un zoom en los gráficos de presión en la succión y descarga posterior a las implementaciones de las mejoras de diseño. En estos gráficos se puede visualizar especialmente en la succión que los datos sufren cambios acordes a la resolución del método de adquisición.

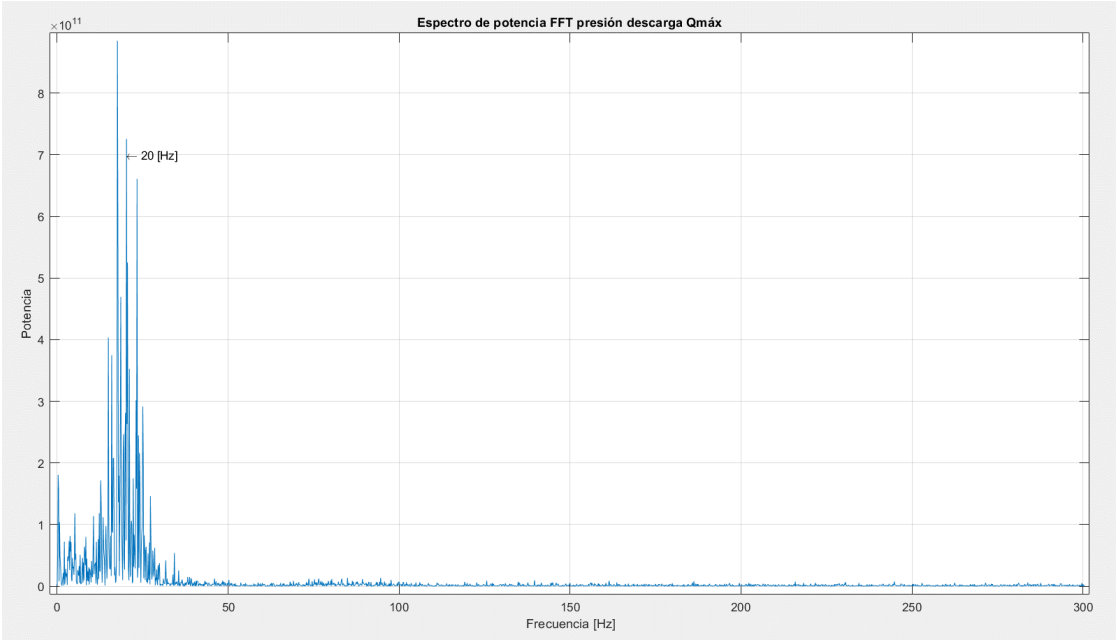


Figura 6-22: FFT realizada en Matlab para análisis espectral de las mediciones de presión en la descarga, obtenidas mediante LabJack a 2900 [rpm].

La **figura 6-222** muestra un gráfico obtenido al realizar una FFT (Fast Fourier Transform) al vector de presión de descarga cuando la válvula neumática se encontraba totalmente abierta. El objetivo es detectar las frecuencias predominantes del conjunto de datos en el tiempo.

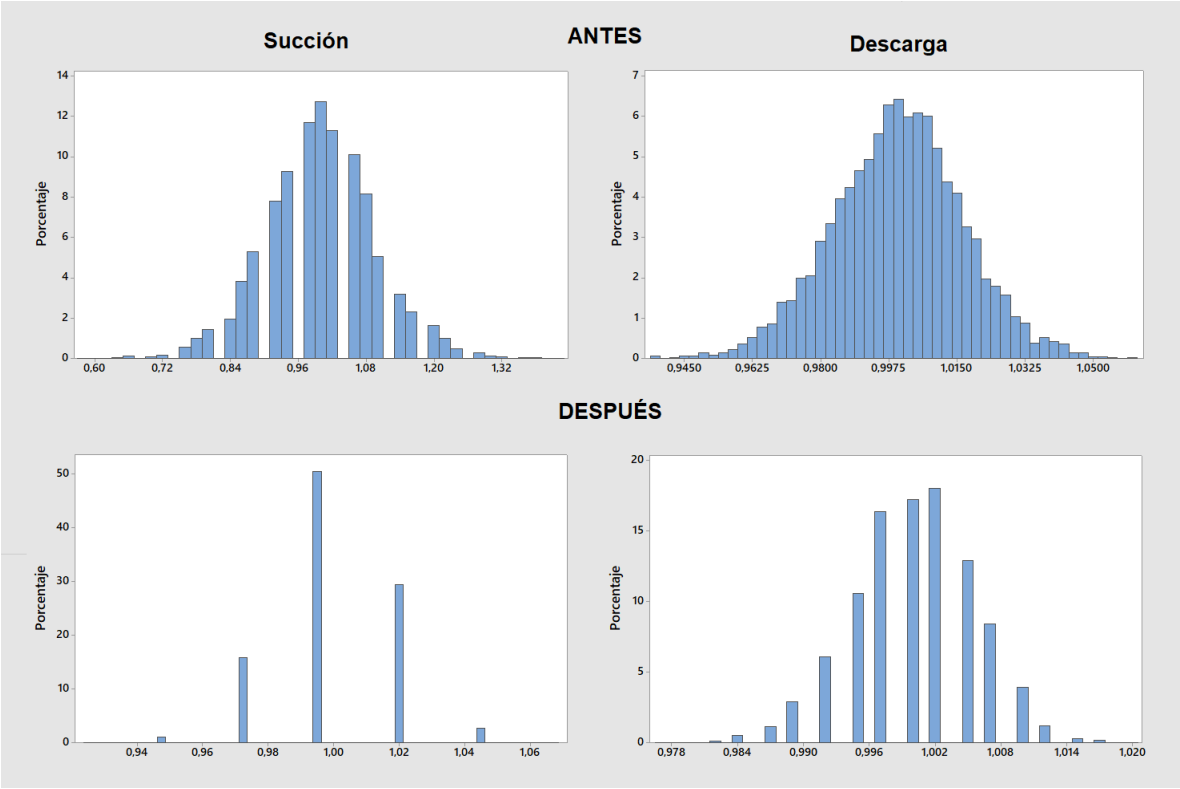


Figura 6-23: Comparación de valor medido sobre valor promedio antes y después de implementar mejoras. (LJ)

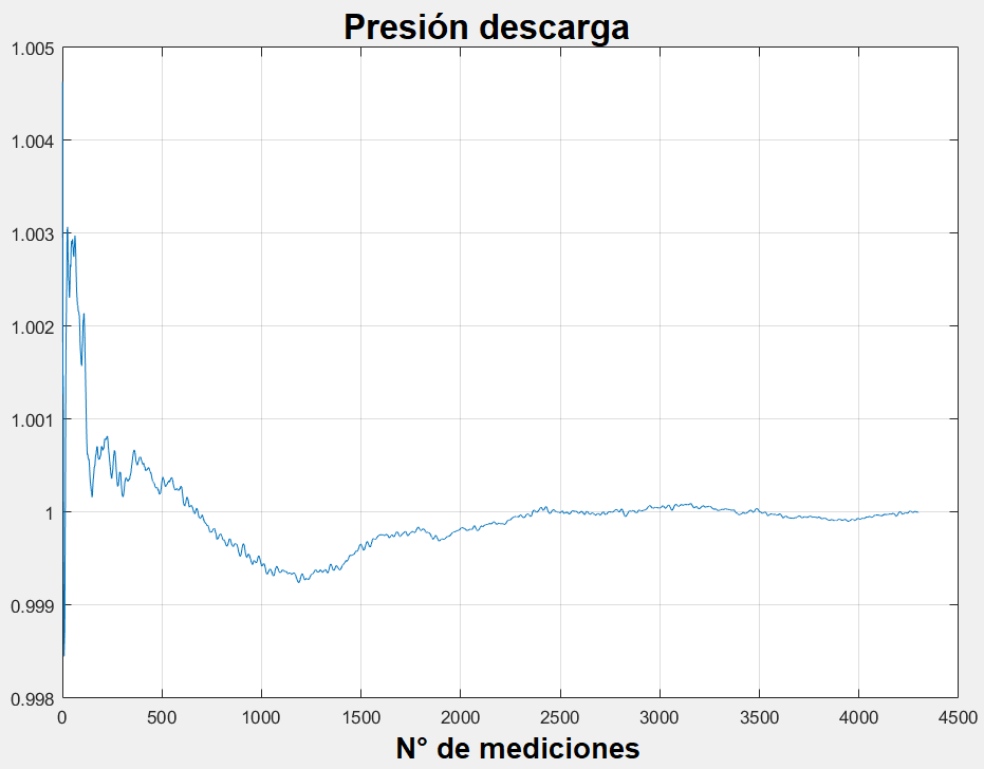


Figura 6-24: Curva de valor promedio para la presión de descarga a caudal máximo (LJ).

Las figuras **6-24, 6-25 y 6-26** muestran la evolución del valor promedio versus la cantidad de datos para la presión de descarga, succión y caudal. Se grafica el valor promedio obtenido para una N cantidad de datos divido por el valor promedio obtenido para el número máximo de mediciones.

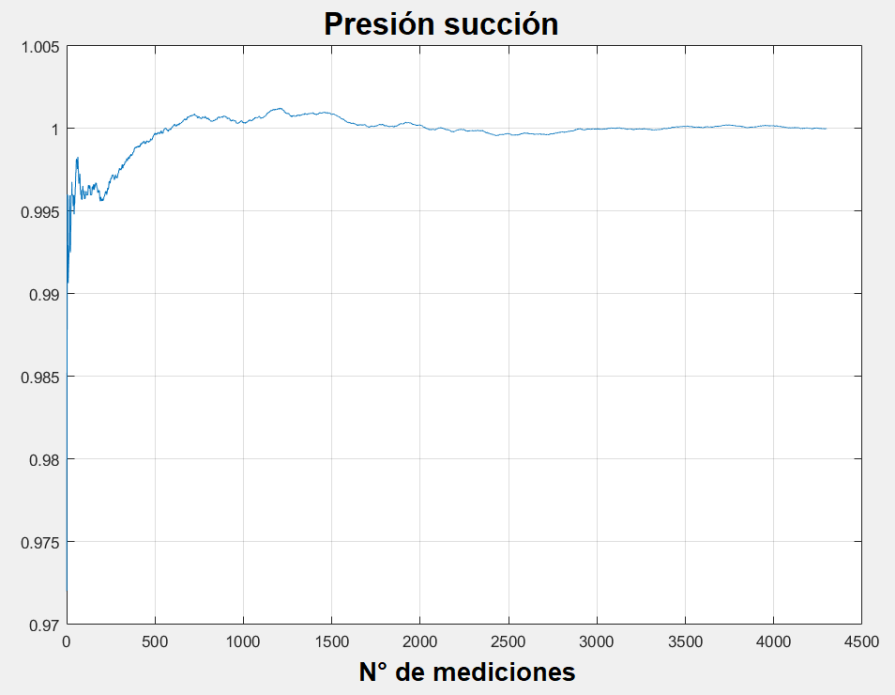


Figura 6-25: Curva de valor promedio para la presión de succión a caudal máximo (LJ).

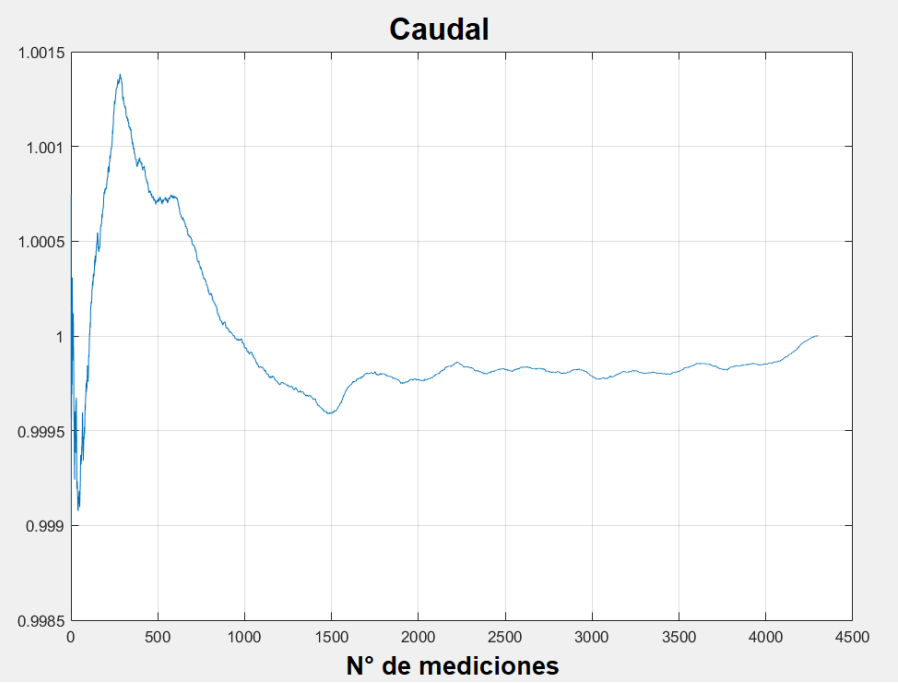


Figura 6-26: Curva de valor promedio para la medición de caudal máximo(LJ).

6.3 ENSAYO DE CURVA DE ALTURA DE LA BOMBA

Para realizar la evaluación de fluctuaciones e incertidumbres, se selecciona como primer punto de garantía el punto H-Q (23,34), ya que es cercano al punto de óptimo de funcionamiento, y como segundo el punto H-Q (14,38), seleccionado ya que es cercano al punto medio del rango posible medir caudal.

El caudal de garantía 1 es de 23 [$\frac{m^3}{h}$]. Por exigencias de la norma se deben tomar 2 puntos en el intervalo [21,85; 24,15] y mínimo 3 puntos más a lo largo de la curva, con uno cerca del mínimo y máximo estable. Para el caudal de garantía 2 se deben cumplir con 2 mediciones en el intervalo [13,3; 14,7].

Para comparar los 2 métodos de adquisición, se decide realizar mediciones de presión y caudal en 8 puntos de la curva. En ambos métodos se intenta reproducir los mismos puntos de medición.

La medición de gravedad utilizada es obtenida de "The Physikalishch-Technische Bundesanstalt" (PTB), el instituto nacional alemán de metrología, el cual cuenta con una base de datos para gravedad.

Las mediciones de velocidad son obtenidas indirectamente mediante el caudal y mediciones de la sección transversal de la tubería que fueron hecha con un pie de metro. Se realizaron 6 mediciones, de las cuales se pudo obtener un valor promedio, desviación estándar e incertidumbres.

La densidad del agua es medida en dos días diferentes, se mide temperatura para comprobar el cambio de esta propiedad. El sensor de temperatura que tiene el banco actualmente no se alcanzó a reubicar en el plazo estipulado, por lo que resulta imposible realizar mediciones de temperatura del flujo durante los ensayos para comprobar los cambios de densidad del fluido.

Se estimó el rango de operación de las bombas, el que se compara con el rango de operación de los sensores para tener una idea global antes del análisis de errores.

Tabla 12: Rango de operación de los sensores de presión y de las bombas aproximados, junto con el error instrumental

	Presión succión	**Presión descarga**
Rango [bar]	-1 a 15	0 a 10
Error instrumental	0.08 [bar] = 0,5 % Rango	0,1 [bar] = 1 % Rango
Bomba Norte		
Presión mínima	-1 [bar]	0 [bar]
Presión máxima	1 [bar]	4 [bar]
Bomba Sur		
Presión mínima	-1 [bar]	0 [bar]
Presión máxima	4 [bar]	8 [bar]

En la **tabla 12** se puede ver el rango de medición de los sensores de presión en la succión y descarga de las bombas. También se puede apreciar el error sistemático presente en estos, que tiene relación directa con el rango de operación. Si se observa el rango de medición de los sensores versus el valor máximo y mínimo que se presenta durante las pruebas de bomba (manera individual, en serie o en paralelo), se puede ver que hay un gran porcentaje del rango de medición de los sensores que está inutilizable. Para la **bomba norte**, el sensor de succión y el de descarga operan tan sólo dentro de un 12% y 40% de su rango de medición respectivamente, mientras que para la **bomba sur** se utiliza un 31% del rango para la succión si se considera que esta puede tener una presión en la succión mayor a la bomba norte si se realizan pruebas en serie. Para la descarga de esta bomba el rango alcanza el 80 % suponiendo las mismas condiciones de trabajo.

6.3.1 LabJack

El primer método usado para ensayar la curva fue LabJack. Los 8 puntos de la curva tomados fueron seleccionando la apertura de la válvula neumática en un porcentaje de 15, 26, 30, 35, 42, 50, 75 y 100 porciento de apertura, obteniendo así los siguientes puntos de caudal y altura promedio:

Tabla 13: Valores de altura y caudal promedio medidos mediante LabJack , bomba operando a 2900 rpm.

Medición	1	2	3	4	5	6	7	8
H [m]	37,59	37,93	38,14	38,00	37,08	35,93	33,66	32,89
Q [$\frac{m^3}{h}$]	2,34	6,67	8,97	11,95	16,12	19,17	22,68	23,53
$\frac{Q}{Q_{opt}}$	0,10	0,28	0,38	0,51	0,69	0,82	0,97	1,00

Al ver la **tabla 13** se puede verificar que los puntos 7 y 8 cumplen con las mediciones que deben estar dentro del rango establecido de caudal [21,85; 24,15]. Se realiza una medición a un caudal de 2,34 [$\frac{m^3}{h}$], valor cercano al mínimo recomendado, sin embargo, resulta imposible realizar una medición cercana al caudal máximo recomendado de 37 [$\frac{m^3}{h}$] por condiciones de diseño del sistema. Es por esto que la medición de máximo caudal es la número 8, con un caudal de 23,53 [$\frac{m^3}{h}$]

6.3.1.1 Fluctuaciones L.J

La primera exigencia de la norma por analizar es la **fluctuación de las mediciones** de altura entrada, altura salida, diferencia de altura, caudal y velocidad de rotación. Para hacerlo se examina cada uno de los 8 puntos medidos de la curva H-Q con respecto a las exigencias de los 3 grados de la norma. En las tablas del ANEXO C-1 se pueden apreciar la magnitud de las fluctuaciones de las variables en cada punto, y se puede ver también cuáles de ellas cumplen o no según alguno de los 3 grados de exigencias de la norma. Las variables que cumplen están coloreadas de azul, mientras que las que no lo hacen de rojo.

Para visualizar como se ven gráficamente las fluctuaciones en el tiempo, se grafica para la variable **caudal(Q**), la mayor fluctuación para esta variable es en el **punto 1,** donde se cuenta con una apertura de la válvula neumática al 15%, y su fluctuación toma valores cercanos al 10% como se puede ver en la **figura 6-27.**

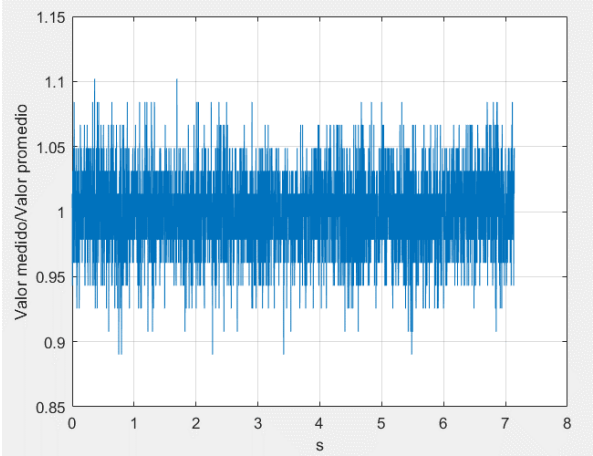


Figura 6-27: Fluctuaciones en el tiempo para el caudal con apertura de válvula al 15%.

6.3.1.2 Error Sistemático L.J

El siguiente paso para cumplir con las exigencias de la norma es verificar el **error sistemático** máximo permitido para las mediciones de velocidad de rotación, caudal, altura de entrada, salida y total de la bomba. Éste se calcula mediante MATLAB para todas las variables en cada punto medido de la curva, el valor de este error es característica de cada instrumento de medición utilizado y los valores obtenidos se pueden ver en las tablas del Anexo B.

6.3.1.3 Incertidumbre General L.J

Finalmente, el último punto a evaluar es si **la incertidumbre general** de la medición de altura y caudal cumplen con los valores máximos permitidos por la norma. A pesar de que con los instrumentos de medición que se cuentan actualmente en el banco no es posible obtener los valores de incertidumbre sistemática exigidos por la norma, se evalúa la incertidumbre general con el objetivo de verificar el aumento de la incertidumbre por la componente aleatoria, y así posteriormente poder evaluar la mejor opción para proponer una mejora.

Tabla 14: Valores promedio y error general de altura y caudal para la bomba sur a 2900 rpm.

Punto 8	H	Q	Punto 7	H	Q
Promedio	32,89	23,53	Promedio	33,66	22,68
Et %	4,04	0,50	Et %	3,96	0,50
Punto 6	**H**	**Q**	**Punto 5**	**H**	**Q**
Promedio	35,93	19,17	Promedio	37,08	16,12
Et %	3,71	0,50	Et %	3,60	0,50
Punto 4	**H**	**Q**	**Punto 3**	**H**	**Q**
Promedio	38,00	11,95	Promedio	38,14	8,97
Et %	3,52	0,50	Et %	3,51	0,5
Punto 2	**H**	**Q**	**Punto 1**	**H**	**Q**
Promedio	37,93	6,67	Promedio	37,59	2,34
Et %	3,53	0,50	Et %	3,57	0,50

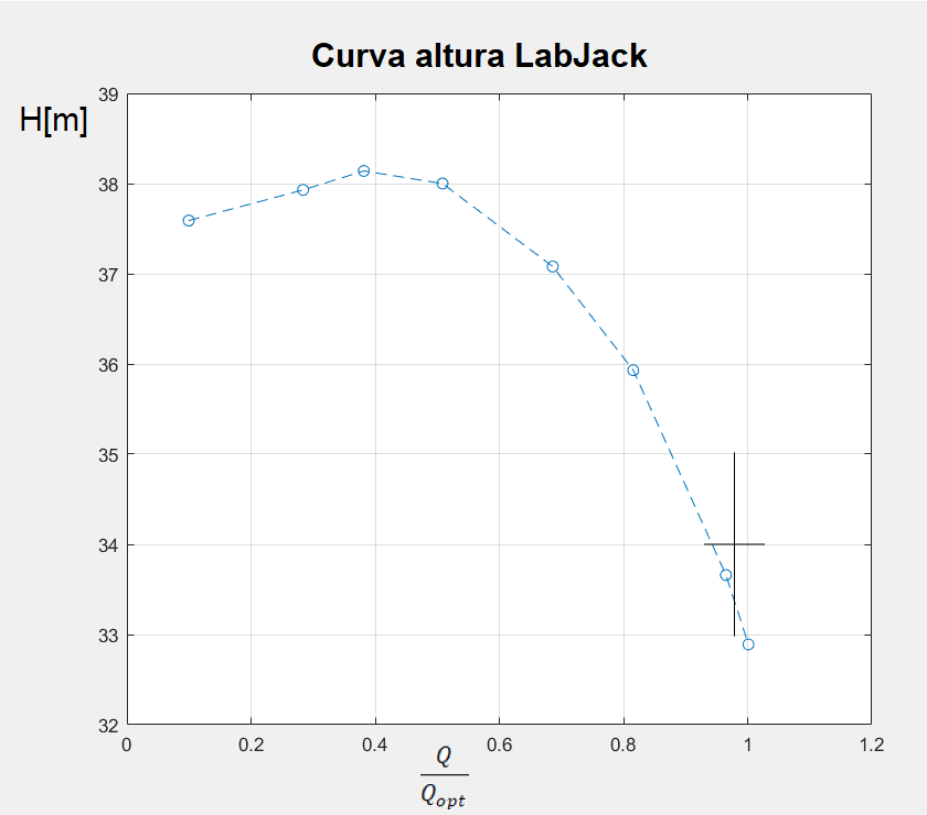


Figura 6-28: Curva H-Q bomba Vogt H-620 Ø 170 mm a 2900 rpm tolerancias 1E, Punto garantía 1 mediante LabJack

Las rectas representan las tolerancias de caudal y altura (la cruz). Se debe tener en consideración que el banco no cumple con todas las exigencias de fluctuación, error sistemático y error general. Se utilizan las tolerancias bilaterales más exigentes de la norma, es decir, el grado de aceptación 1E.

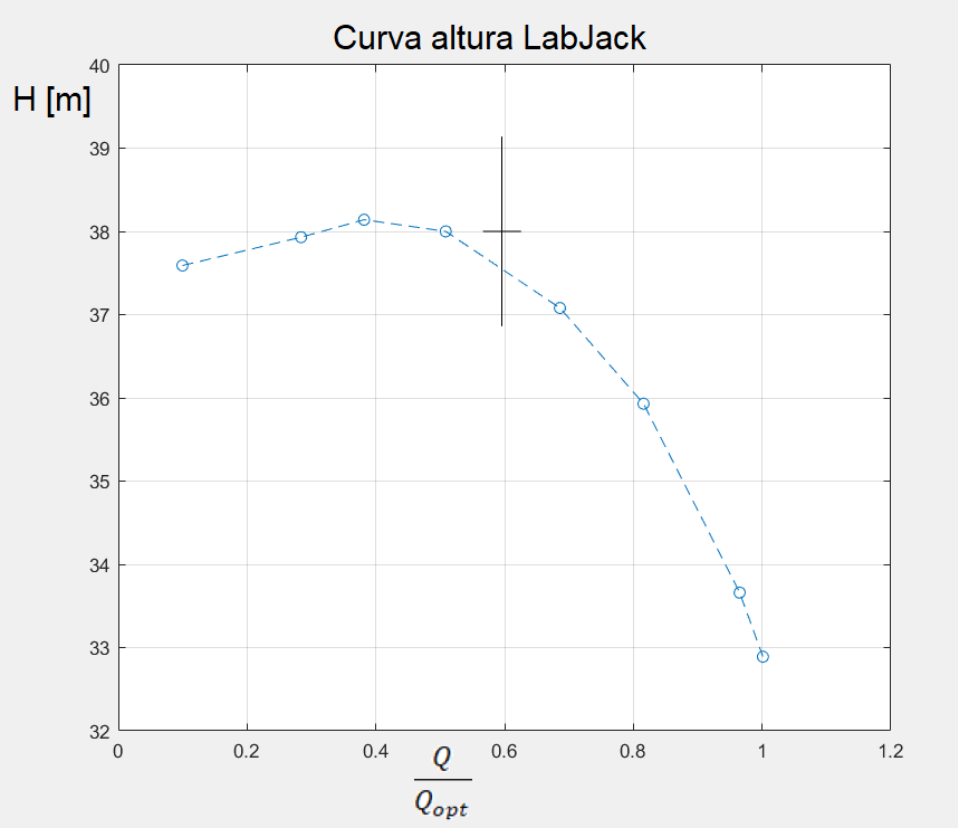


Figura: 6-29 Curva H-Q bomba Vogt H-620 Ø 170 mm a 2900 rpm tolerancias 1E, Punto garantía 2 mediante LabJack

.

6.3.2 PLC

Para realizar la prueba del PLC se utilizó un procedimiento idéntico al hecho con LabJack, es decir, se miden 8 puntos de trabajo a las máximas rpm que brinda el VDF.

Se realizan las mediciones de presión de succión, descarga y caudal mediante PLC. La temperatura se encuentra inhabilitada hasta el momento, por lo que se utiliza una densidad promedio interpolada a la temperatura de trabajo del agua al iniciar la prueba. Para el error se usa una magnitud excesiva, obtenida de un valor calculado para una variación de temperatura de 10°C aproximadamente. La gravedad utilizada es obtenida de "The Physikalishch-Technische Bundesanstalt" (PTB) el instituto nacional alemán de metrología.

Los 8 puntos de la curva fueron tomados seleccionando la apertura de la válvula neumática en un porcentaje de 15, 26, 30, 35, 42, 50, 75 y 100 porciento de apertura, obteniendo así los siguientes puntos de caudal y altura promedio:

Tabla 15: Valores de altura y caudal promedio medidos mediante PLC.

Medición	1	2	3	4	5	6	7	8
H [m]	37,93	38,27	38,46	38,37	37,40	36,21	33,92	33,17
Q [$\frac{m^3}{h}$]	2,52	6,96	9,22	12,25	16,44	19,56	23,13	23,98
$\frac{Q}{Q_{opt}}$	0,11	0,30	0,39	0,52	0,70	0,83	0,98	1,02

En la **tabla 15** se ven los 8 puntos, con valores promedios obtenidos mediante cálculo. Se puede observar que nuevamente los puntos 7 y 8 son los dos puntos exigidos obligatoriamente en el rango de [21,85; 24,15] de caudal para el **punto de garantía 1**. Se realiza una medición a un caudal de 2,52 [$\frac{m^3}{h}$] (punto 1), cercano al mínimo recomendado, mientras que el caudal máximo medido es de 23,98 [$\frac{m^3}{h}$].

6.3.2.1 Fluctuaciones PLC

Si se revisan las tablas del **ANEXO C**, se ven las fluctuaciones de las variables de altura y caudal para todos los puntos.

Para poder apreciar cómo se ven las variables en el tiempo mediante este método, se realiza un gráfico de fluctuaciones para la **variable caudal (Q)** en el **punto 1**, la cual se grafica cuando se encuentra la válvula de retención abierta al 15%.

Para facilitar la lectura se grafica el valor medido de caudal dividido el valor promedio de todo el vector. Además, esto facilita la comparación visual con el gráfico hecho para esta misma variable obtenida mediante LabJack en la sección 4.4.1.1.

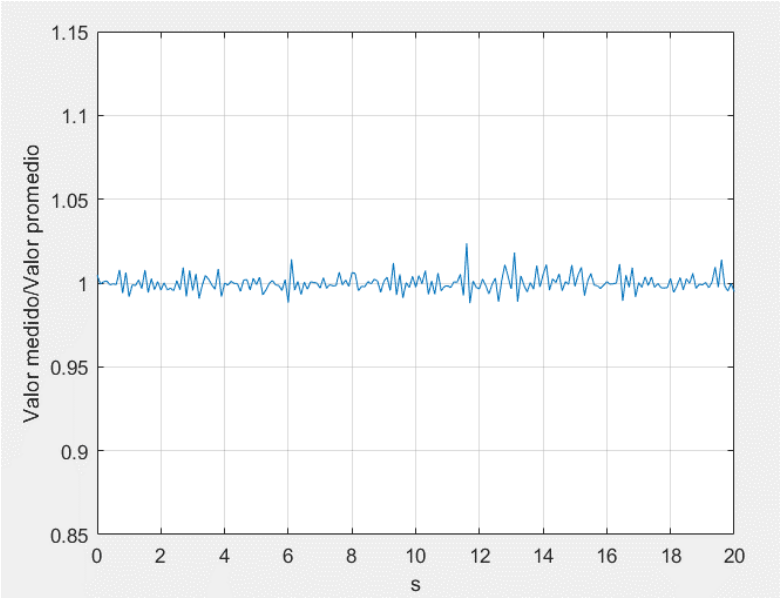


Figura 6-30: Fluctuaciones para el caudal con la válvula de estrangulación abierta al 15, dato adquirido por el PLC.

6.3.2.2 Error sistemático PLC

Los errores sistemáticos son similares para ambos métodos y para el caso del PLC se pueden visualizar en el **ANEXO C-2.**

6.3.2.3 Incertidumbre general PLC

Mediante la adquisición por PLC se realiza una evaluación de incertidumbre general similar a la hecha para LabJack. Se busca poder verificar la magnitud de esta, a pesar de que las fluctuaciones para la succión no cumplen los valores limites exigidos, ya que de esta forma se pueden evaluar posteriormente algunos casos posibles que permitirán estar dentro de los límites establecidos por la norma en todas las categorías evaluadas.

Tabla 16: Valores promedio de altura y caudal junto con el error total para ambas mediciones en los 8 puntos de la curva.

Punto 8	H	Q	Punto 7	H	Q
Promedio	33,17	23,98	**Promedio**	33,92	23,13
Et %	4,02	0,50	**Et %**	3,93	0,50
Punto 6	**H**	**Q**	**Punto 5**	**H**	**Q**
Promedio	36,21	19,56	**Promedio**	37,4	16,44
Et %	3,69	0,50	**Et %**	3,57	0,50
Punto 4	**H**	**Q**	**Punto 3**	**H**	**Q**
Promedio	38,37	12,25	**Promedio**	38,46	9,22
Et %	3,49	0,50	**Et %**	3,51	0,5
Punto 2	**H**	**Q**	**Punto 1**	**H**	**Q**
Promedio	38,27	6,96	**Promedio**	37,93	2,52
Et %	3,53	0,50	**Et %**	3,54	0,50

Finalmente, con los datos obtenidos por el PLC se decide graficar una curva de la bomba incluyendo las tolerancias en el **punto de garantía 1**. La finalidad es corroborar si mediante las condiciones de medición que posee el banco y considerando el deterioro en el rodete de la bomba, se logra cumplir con las tolerancias para la categoría 1E, la más exigente de la norma en cuanto a tolerancia.

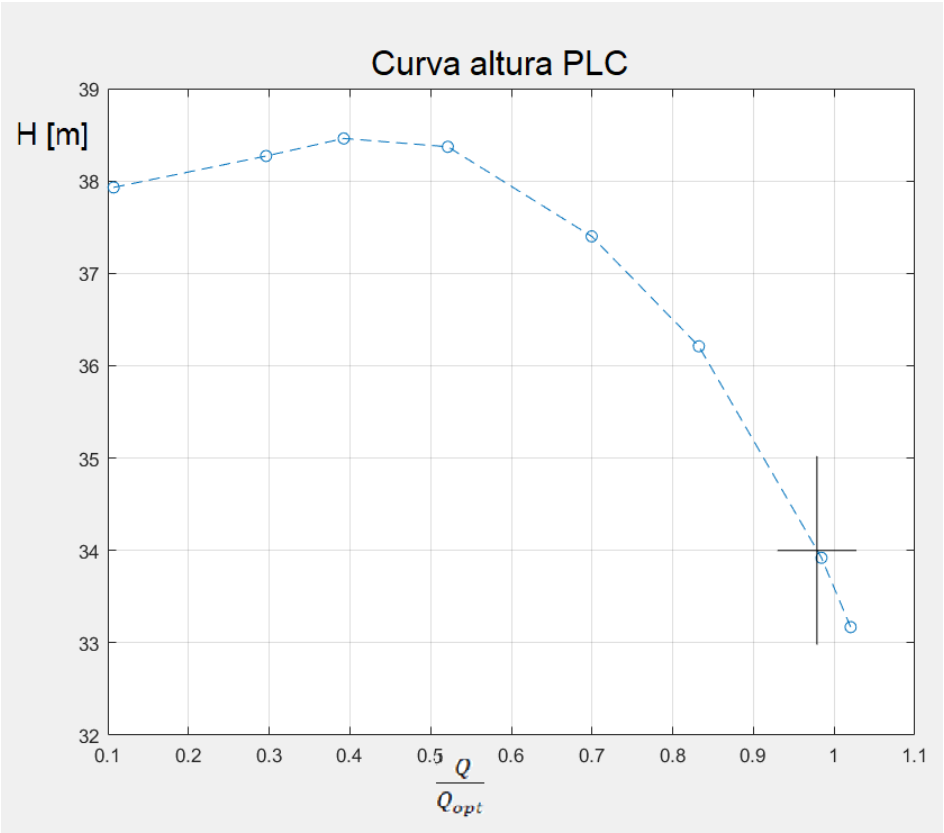


Figura 6-31: Curva H-Q bomba Vogt H-620 Ø 170 mm a 2900 rpm, mediante PLC, tolerancia 1E, para el punto de garantía 1.

Las **figuras 6-31 y 6-32** representan el mismo análisis hecho en LabJack, donde la "cruz" representa las tolerancias en los puntos de garantía.

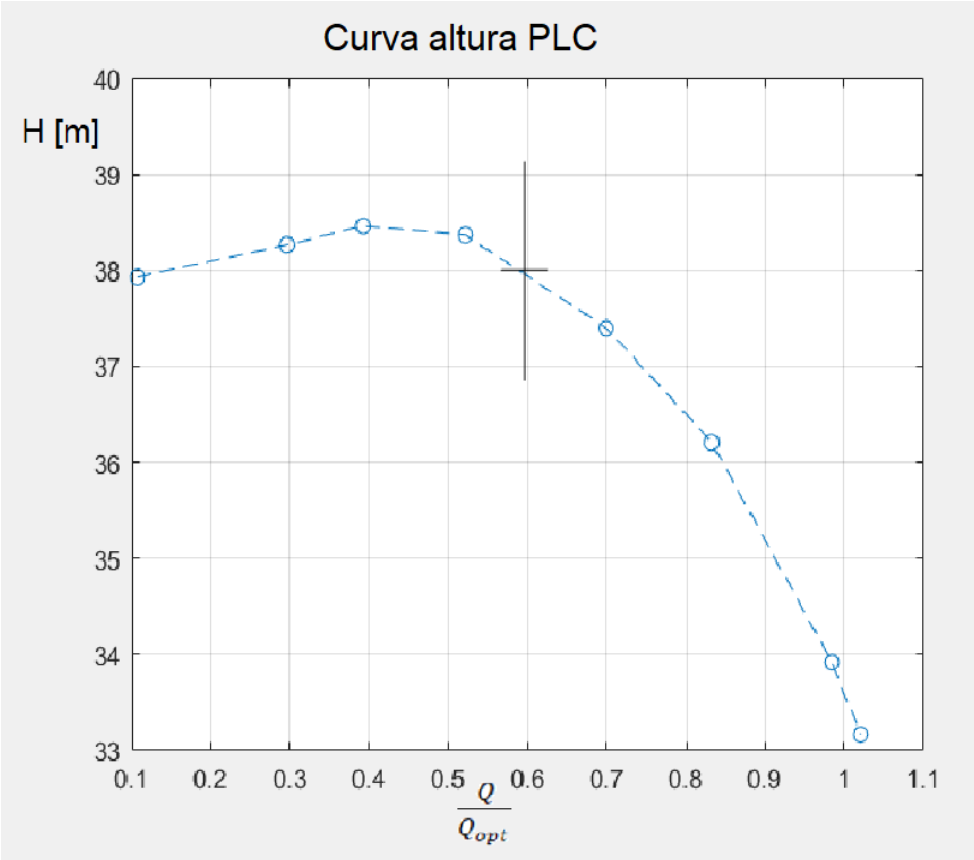


Figura 6-32: Curva H-Q bomba Vogt H-620 Ø 170 mm a 2900 rpm, mediante PLC, tolerancia 1E, para el punto de garantía 2.

6.3.3 Cambios en la instrumentación.

Ya que se evalúa mediante ambos métodos de adquisición las capacidades del banco actualmente, se realiza una aproximación de la capacidad de este al implementan algunos cambios en la instrumentación o sistema de adquisición.

Con la intención de proponer mejoras, se aproximan los resultados que son posibles de obtener al implementar nuevos sensores que tengan un rango de operación dentro del rango de funcionamiento de las bombas actualmente. De esta manera se evita la pérdida del rango de medición sin utilizar, además de considerar un sensor de mayor precisión que los actuales.

Se evalúa la solución considerando que las presiones de trabajo de las bombas fueron establecidas anteriormente en la **tabla 12**.

Tabla 17: Valores aproximados esperados al cambiar la instrumentación de los sensores.

Válvula 15 %	**Q [m3/h]**	**Diferencia Altura[m]**	**Altura Descarga[m]**	**Altura Succión[m]**
Valor promedio	2,3	37,1	36,3	-0,7
Es [%]	0,5	0,56	0,57	0,7

Se hizo la prueba para el **punto 1** con apertura de 15% de la válvula, ya que era el punto con mayores errores. En la **tabla 17** se pueden ver los errores sistemáticos y valores promedios que se hubieran en la incertidumbre sistemática si en las mediciones los sensores utilizados fueran de mayor precisión.

Los resultados son obtenidos utilizando sensores *Wika*, considerando rango de trabajo 0-5 [bar] y 0-8 [bar] para la succión y descarga respectivamente. En la succión se consideró un sensor con una precisión de 0,01% del rango de trabajo, equivalente a 0,0005[bar]. Para la **descarga** se considera un sensor de 0,25% de precisión sobre el rango de trabajo (la categoría de precisión del sensor *Wika* que se encuentra instalado en la succión actualmente).

Se obtiene una **incertidumbre general 0,76 %** para un **valor promedio de 37,59 [m]** en la medición de altura, mientras que para el caudal las mediciones no sufren ningún cambio ya que los sensores de presión no afectan su magnitud.

6.3.4 Curvas de ambas bombas

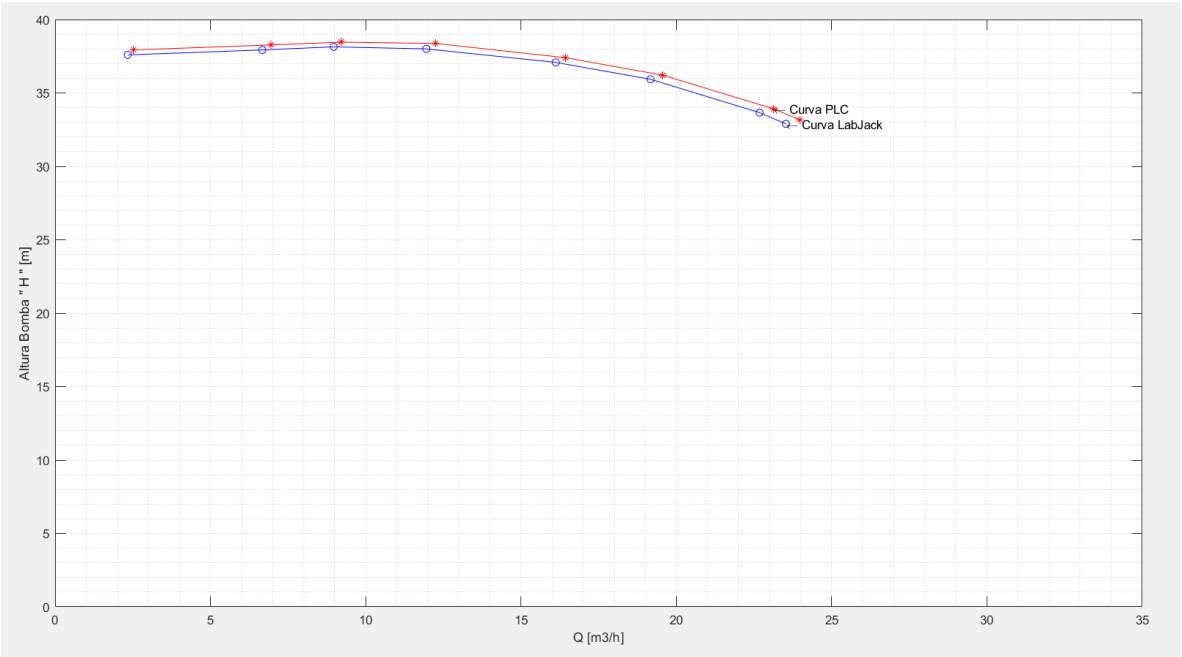


Figura 6-33: Curva H vs Q obtenida mediante PLC y LabJack

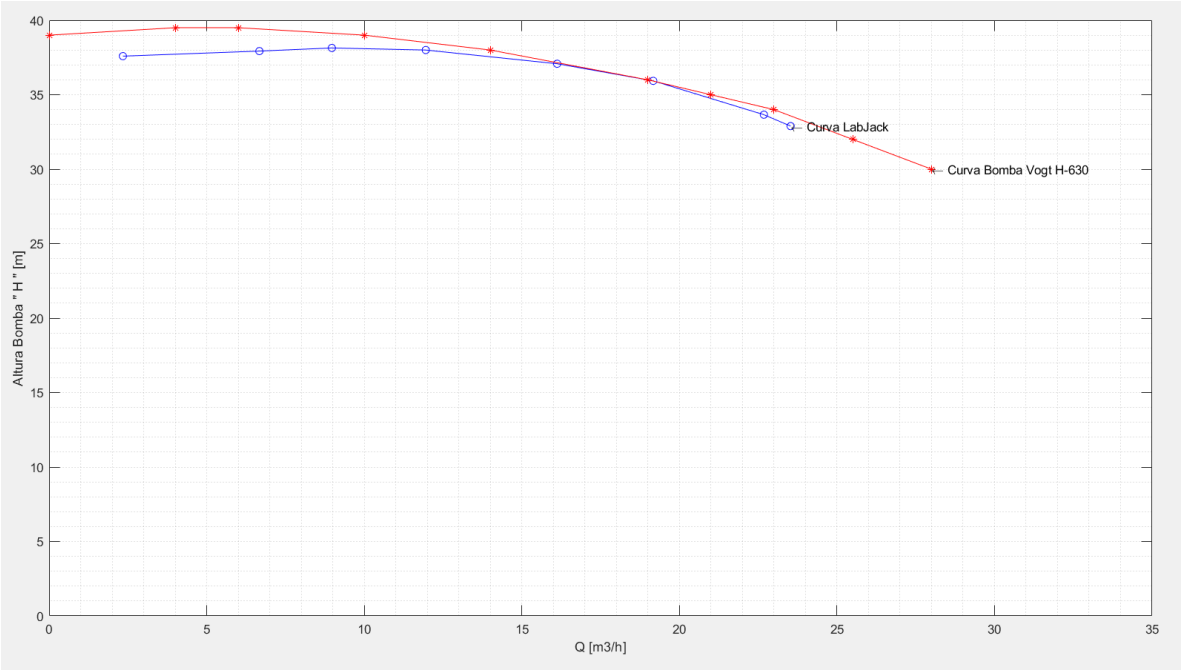


Figura 6-34: Curva H vs Q obtenida mediante LabJack comparada con la curva dada por el fabricante.

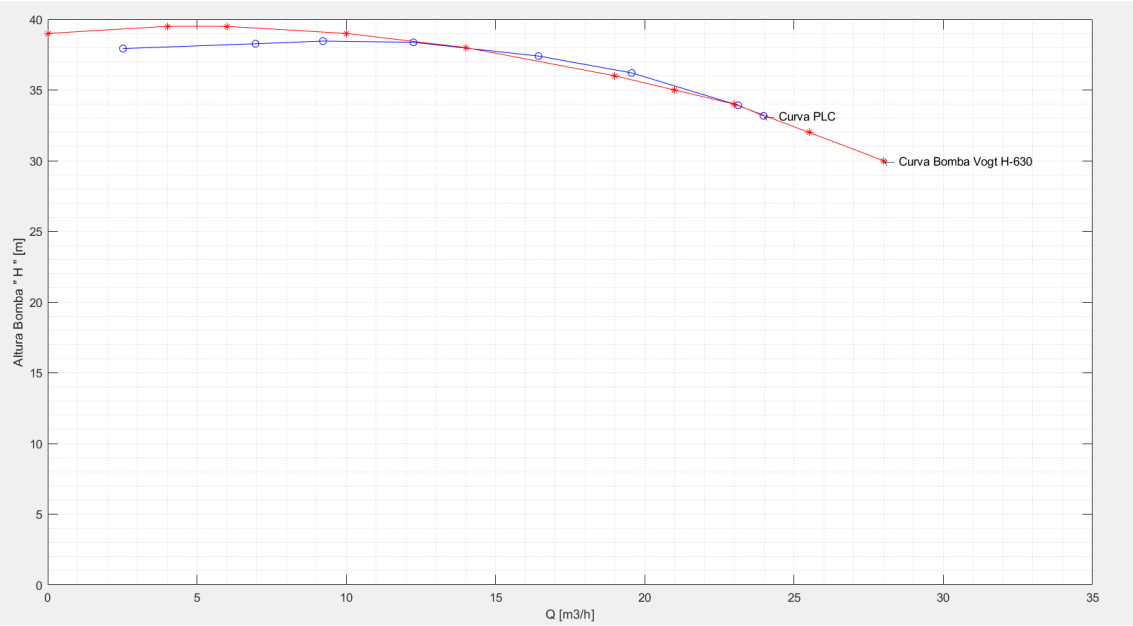


Figura 6-35: Curva H vs Q obtenida mediante PLC comparada con la curva dada por el fabricante.

6.3.5 Medición de potencia.

Mencionamos que las mediciones de potencia resultan difíciles de realizar con las condiciones actuales del banco, ya que para hacerlo mediante medición de torque se requiere un estudio, diseño e implementación a profundidad del sistema que no es la finalidad de este trabajo. Sin embargo, el método de mediciones eléctricas presenta la oportunidad de poder calcular la potencia de la bomba si el motor es alimentado directamente desde la red, ya que de esta forma se conoce el valor de la eficiencia del motor eléctrico y el factor de potencia.

Para realizar las pruebas se hace una medición incluyendo el VDF, este es un instrumento altamente usado a nivel industrial, ya que es una de las maneras más rápidas de variar la velocidad de rotación de un motor.

Para efecto de este trabajo se realiza una prueba utilizando un analizador de redes de marca *AEMC Instruments* modelo 3945-B. Este instrumento realiza una medición eléctrica en la alimentación del motor, que nos entrega el valor de la potencia activa, reactiva, el factor de potencia e incluso gráficas de las tensiones y corrientes en el tiempo, tal como muestran las **figuras 6-39, 6-40.**

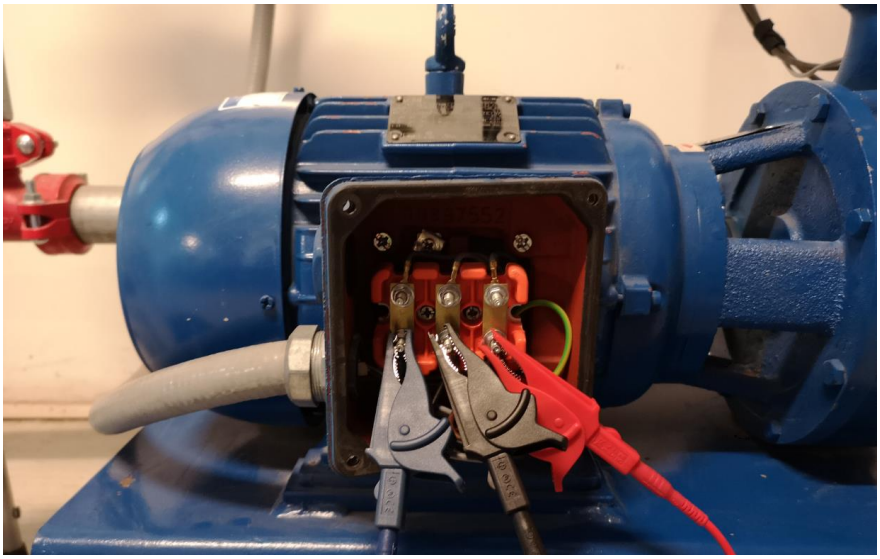


Figura 6-36: Conexión de las pinzas de tensión del analizador de redes.

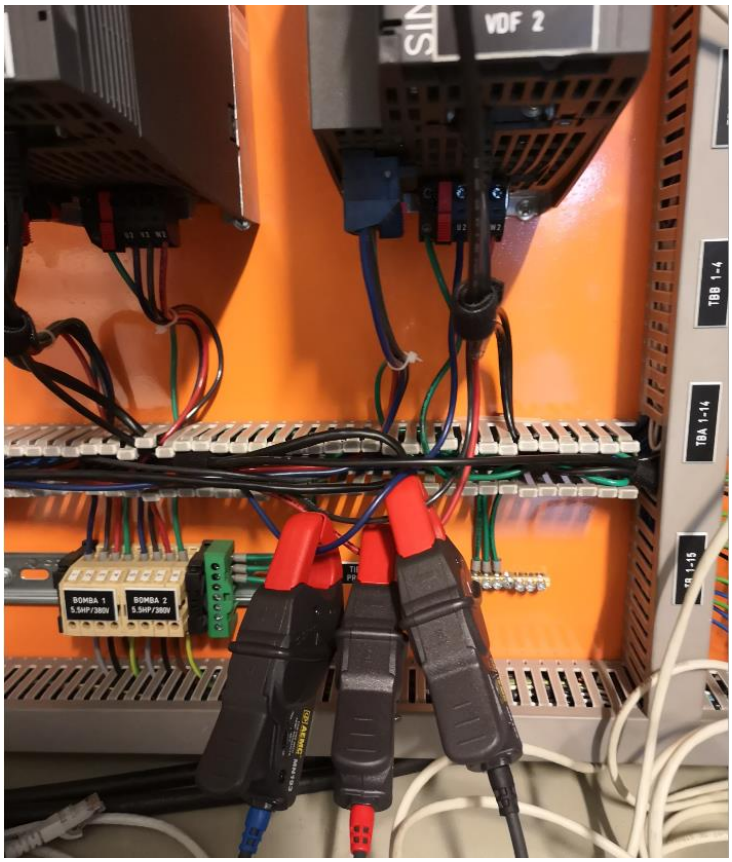


Figura 6-37: Pinzas de corriente del analizador de redes para las 3 fases.

En las **figuras 6-36 y 6-37** se puede ver como se conectan las pinzas de tensión directamente a la alimentación del motor eléctrico que impulsa la bomba, mientras que las pinzas de corriente lo hacen a los conductores de las 3 fases que salen del VDF en dirección a la alimentación del motor eléctrico. El analizador de redes se configura para permitir la lectura especificando este tipo de conexión.

Las propiedades del motor eléctrico especificadas en la parte del marco teórico en la **sección 2.1.1.1**, son de carácter nominal a máxima carga del motor.

Para la prueba se realiza la medición seleccionando velocidad de rotación 2900 [rpm] en el VDF y manteniendo la apertura de la válvula neumática al 100%. La velocidad real en el eje es menor a la que configuramos en los VDF, en esta ocasión no se mide la velocidad de rotación mediante el tacómetro digital, sin embargo, se realizaron mediciones en este punto de operación en otras pruebas que s permiten tener una velocidad de rotación referencial de 2870[rpm].

Figura 6-38: Pantalla del analizador de redes una vez se seleccionan las 2900 [rpm] en VDF.

En la **figura 6-38** se puede apreciar la lectura de las potencias activa, reactiva y aparente, permite verificar el PF (factor de potencia) y la frecuencia que se aprecia en la esquina superior izquierda.

En la medición realizada se aprecia que la frecuencia de trabajo es levemente inferior a los 50 [Hz] nominales de la red y se pudo verificar que su valor variaba entre 49,10 y 49,21 [Hz]. La potencia activa del motor es de 4,511 [kW], mientras que su factor de potencia es de 0,765 [-] promedio.

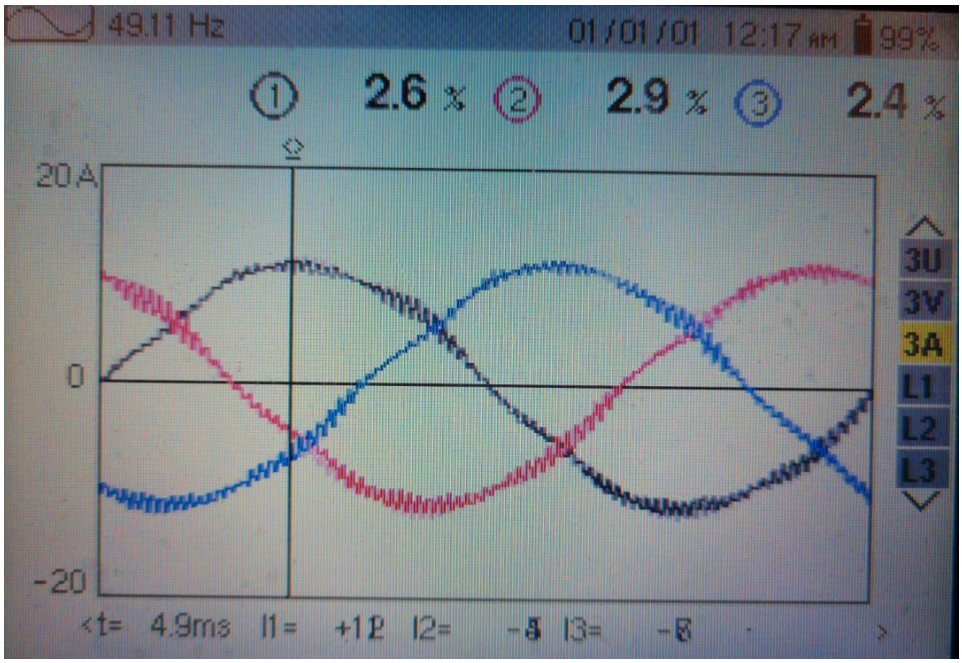


Figura 6-39: Corriente de fases R, S y T en el tiempo en un rango de 4,9 [ms].

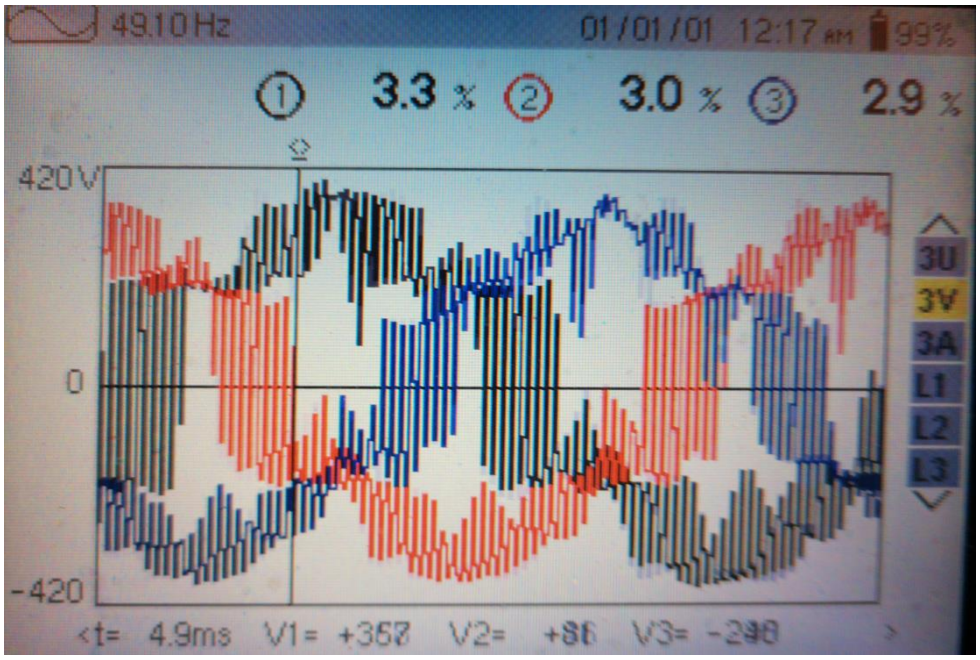


Figura 6-40: Tensiones en el tiempo en un rango de 4,9 [ms].

De las **figuras 6-39 y 6-40** se puede apreciar el comportamiento de las corriente y tensiones en función del tiempo, además de ver el THD (total harmonic distortion). Las imágenes se muestran con la finalidad de poder ver el comportamiento de las ondas y de la modificación que reciben al pasar por el VDF.

A pesar de encontrar un método que permite poder calcular la potencia eléctrica que consume el motor eléctrico para evitar estimar la eficiencia del VDF, no fue posible obtener la eficiencia exacta del motor trabajando a esta frecuencia. Sin embargo, la eficiencia del motor se debe haber visto afectada dentro de 1 a un 7 [%] en el peor de los casos para esos niveles de THD.

Para efectos de este trabajo no se cuantifican las pérdidas de eficiencias del motor producto de la generación de armónicos, sin embargo, existen métodos para hacerlo y la norma IEC60034 cuenta con esta información.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 Diseño

En cuanto a las características del nuevo método implementado de tomas de presión, tubería y manifold, se puede destacar el hecho de poder tomar las mediciones de presión a una misma altura geométrica, eliminando así el cálculo de corrección por altura, disminuyendo así fuentes de error.

Las nuevas tomas de presión junto con el resto de los accesorios implementados eliminan cantos en tubería y separaciones que afectan la medición, además permite obtener una medición a partir de 4 puntos en una misma sección transversal.

Los materiales utilizados resultaron útiles, pero en las tomas de presión se pueden hacer mejoras para evitar que los hilos del acetal se dañen, ya que este a pesar de funcionar bien en las pruebas, se deterioró rápidamente.

7.2 PLC "Trace"

Los resultados obtenidos mediante el método de adquisición de la plataforma TIA Portal de Siemens fueron rápidos y sencillos, lo que es práctico y fácil de usar para cualquier operador.

La bomba norte presenta una mayor fluctuación de la presión en la succión y en la **tabla 8** se puede apreciar cómo la dispersión de los datos mediante ambos métodos es relativamente mayor, sin embargo, no se le puede atribuir este resultado netamente al sensor de temperatura a pesar de que las condiciones en ambas bombas ensayadas son similares.

La **tabla 18** muestra las fluctuaciones en la succión de ambas bombas, estas se ven aumentadas enormemente al estrangular el flujo mediante la válvula neumática.

Tabla 18: Comparación de fluctuación bomba norte y sur antes de las mejoras.

Bomba	Amplitud fluctuación superior [%]	Amplitud fluctuación inferior [%]	Q [m3/h]
Norte	6	12	24
Norte	22	22	16
Sur	4	5	24
Sur	18	18	16

Si bien no se pude afirmar que la bomba norte tiene una amplitud de fluctuación mayor netamente por efectos del sensor de temperatura, se puede comprobar que la magnitud de las fluctuaciones está por sobre los valores permitidos.

El nuevo sistema de tomas de presión y manifold disminuye la fluctuación de las presiones, sin embargo, el efecto es más notable para la presión en la succión que en la descarga, ver la **figura 6-10.** La **tabla 9** permite ver que la dispersión de los datos disminuye en cuanto a su desviación estándar.

En la **figura 6-11** se puede aprecia que cuando el PLC adquiere datos, modifica los valores adquiridos, ya que la distribución de datos **no se asemeja** una **distribución t-stundent**.

De las **figuras 6-12, 6-14 y 6-15** principalmente se busca evaluar la cantidad de datos que es necesario adquirir para tener una muestra representativa del valor medido, sin tomar demasiado tiempo entre muestras.

Para cada medición se analiza la independencia estadística mediante las figuras 6-12, 6-13 y 6-14.

Tabla 19:Variación del valor promedio a un número de mediciones

Variable	N° mediciones	Variación del promedio
Q	100	1%
P_{in}	100	0.5%
P_{out}	100	0.5%

Si vemos el **ANEXO C-2 en la sección 8.4.2,** se pueden apreciar los valores promedios, error sistemático y fluctuaciones obtenidas en cada punto. Las **fluctuaciones** obtenidas cumplen con la categoría más exigente de la Norma ISO 9906-2012, a excepción del valor **de altura en la succión** que **se excede fuera de los rangos permitidos** de todas las categorías y la medición de caudal más baja que se encuentra en el grado, sin embargo, esto es afectado por la instabilidad del flujo a caudales bajo.

En el mismo **ANEXO C-2** podemos observar los errores sistemáticos para las magnitudes medidas. La medición de **caudal y velocidad de rotación** cumplen con las exigencias de la norma en cuanto a incertidumbre sistemática para la **categoría 1** y más exigente de la norma.

El **error sistemático de mayor magnitud** medido es el de altura en la succión que toma valores desde 30 % hasta un 300 %, esto es aportado en un 99,9 % por el sensor de presión en la succión, que a su vez afecta indirectamente y en menor cantidad a la altura total calculada.

La **altura en la descarga** tiene valores de error sistemático desde los 2,8 % hasta 4,0 % aproximadamente, los cuales se encuentran **fuera de las exigencias de la norma** del grado menos exigente

La **altura total de la bomba** se compone de las mediciones de ambos sensores de presión por lo que tampoco cumple con las exigencias de la norma.

7.2.1 Prueba de aceptación

Si bien las condiciones de fluctuación y error sistemático no cumplen con las exigencias de la norma, se contrasta la curva obtenida con el PLC con 2 puntos de garantía.

La curva calculada mediante las mediciones obtenidas por el PLC para el punto de garantía 1 **cumple** con la **prueba de aceptación,** según las tolerancias estrictas 1E.

La **prueba de aceptación** en un punto de garantía a un caudal menor resulta en la **aceptación**. Sin embargo, se debe mencionar que no se cuenta con las 2 mediciones exigidas dentro del rango obligatorio cercano al punto de garantía.

Si bien la bomba cumple con la prueba de aceptación en ambos puntos de garantía y para ambas exigencias en cuanto a tolerancias, se puede observar que a bajos caudales el punto medido comienza a diferir en mayor cantidad con el punto de garantía, lo cual probablemente es debido al sistema de medición, que a caudales bajo comienza a perder exactitud y precisión.

En la **figura 6-35** se puede observar la curva calculada a partir de las mediciones del PLC en comparación con una curva asemejada a la dada por el fabricante. En esta figura se puede apreciar que la curva obtenida por PLC se asemeja bastante a la curva dada por el fabricante a excepción de 2 tramos. El primero es en caudales entre 17 y 22 [m3/h] donde la curva medida es levemente superior que la esperada, y el otro es para caudales inferiores a los 13[m3/h] donde la curva medida es inferior de lo esperado, donde la diferencia aumenta acorde disminuye el caudal.

La diferencia producida a caudales bajos puede ser producto, en parte, de las pérdidas de temperatura. Esto se considera debido a que la curva fue calcula sin efectuar mediciones de temperatura posterior al inicio de la prueba, por lo que no se hicieron correcciones de la densidad con el tiempo. Además, los puntos fueron tomados desde la válvula totalmente abierta hasta cerrase completamente, produciendo un aumento la temperatura en los puntos de caudales inferiores.

Otro motivo que influye en la diferencia de la curva para caudales bajos es que, en estos puntos de operación, la amplitud de fluctuación del sensor de caudal y de presión en la succión aumenta enormemente, además de aumentar porcentualmente el error sistemático para la presión de succión.

Para las diferencias producidas en las curvas en el otro rango de caudales, se aprecia que es de menor en magnitud que la para caudales bajos y si apreciamos bien el gráfico, es **1 punto** a un caudal de aproximadamente 19 [m3/h] el que produce esta diferencia. Al ser 1 medición, puede haberse producido por efecto del sistema de medición y/o que la bomba produce caudales superiores a los dados por el fabricante, si a esto sumamos el desgaste que tiene el rodete puede generar ese fenómeno.

7.3 LabJack.

Las pruebas realizas en LabJack son similares a las hechas en el PLC, con el objetivo de tener otra visión de los resultados obtenidos mediante el PLC.

En las **figuras 6-18 y 6-19** se puede apreciar que mediante LabJack, la amplitud de las fluctuaciones en la succión de ambas bombas es similar antes de implementar las mejoras. Estos valores son hasta casi 4 veces mayor que los obtenidos mediante el PLC.

Se puede apreciar como las mejoras implementadas en la parte de diseño reflejan una disminución notable tanto en las fluctuaciones de la presión de succión como en la descarga. También se puede visualizar en la mejora de su distribución estandar.

Las fluctuaciones antes y después de las mejoras disminuyen, se puede apreciar en la **figura 6-20** como estas cambian en la **succión desde un 40 % a un 5%** y de **7% a un 2% en la descarga**.

En las mediciones posteriores a las implementaciones de mejoras en las gráficas de se puede ver unas líneas horizontales y unos puntos sobre y bajo de estas horizontales. Al ver el eje "y" se aprecia que el espacio entre línea horizontales es de 0,01 [bar], equivalente a la resolución del instrumento. En la **descarga** al implementar las mejoras se ve que los puntos parecen seguir una tendencia que se asemeja a una "sinusoidal" con bastante ruido, antes de esto solo se veían puntos sin ningún orden en los gráficos. Del gráfico también se puede apreciar que las variaciones en el eje "y" tiene concordancia con la resolución de 0,006 [bar] aproximadamente.

En la **figura 6-22** se puede ver que las frecuencias que predominan se encuentran cercana a los 20 [Hz], esto nos dice que el fluido está sufriendo una variación cíclica en la presión cada 50 [ms] aproximadamente. El rodete gira cerca de las 2880 [rpm] dando una vuelta cerca de los 20 [ms], si suponemos que cuenta con 6 alabes, las alzas de presión producto de esto sucede cercano a los 3[ms], por lo que se descarta que las alzas visibles en la FFT sea producto de esto.

El rango de fluctuación de las mediciones se reduce posterior a las mejoras en las tomas de presión, y en las variables de medición con la instrumentación actual es difícil detectar la distribución t-student.

Tabla 20: Variación máxima porcentual del valor promedio a un N° determinado de mediciones.

Variable	N° mediciones	Variación del promedio
Q	2000	0.025%
P_{in}	2000	0.5%
P_{out}	2000	0.5%

Del **ANEXO C-1 en la sección 8.4.1,** se pueden apreciar los valores promedios, error sistemático y fluctuaciones obtenidas en cada punto al medir con LabJack.

Con respecto a las **fluctuaciones**, se puede ver en las tablas lo siguiente:

- **Altura en la succión: No cumple** con los requisitos de la norma para ningún punto medido. Las fluctuaciones porcentuales bajan en magnitud con respecto a las mediciones hechas mediante el PLC. Estas toman valores máximos de hasta 8 veces el permitido por la norma para el **grado 3** y se ve para caudales bajos. Para caudales altos se reducen debido a que el valor promedio de altura en la succión aumenta. Si bien se cumple con todas las exigencias de la norma para asegurar cierta estabilidad en el flujo, hay algo que está perturbandolo. Las alternativas más probables son:
    1. Fallas en el nuevo sistema de tomas de presión
    2. Fallas en el sistema de transporte y almacenamiento del fluido

    En cuanto a la primera alternativa, sería ideal probar con un diámetro de perforación levemente mayor en las tomas de presión, además aumentar la sección de las mangueras flexibles de conexión, así se permite amortiguar las variaciones bruscas de presión entre las distintas tomas. También se puede probar aumentar el diámetro de la perforación pasante que tiene el manifold de 2 [mm].

    Con respecto a la segunda alternativa, puede ser que algo este afectando el flujo desde el estanque de almacenamiento y la succión hacia el sistema. Por este motivo se debe corroborar que la descarga del sistema al tanque de almacenamiento se encuentre distanciado de la tubería de succión de este. De no ser así, es necesario implementar una separación en el tanque que permita tener espacio sin perturbación cerca de la tubería de succión.

- **Altura en la descarga**: Las fluctuaciones de altura en la descarga se encuentran **dentro de los límites permitidos por la norma**, en la mayoría de los puntos medidos se encuentra en el **grado 2**. Se ve un aumento en la magnitud de la fluctuación en comparación con los valores obtenidos mediante el PLC, esto es producto del filtrado de la señal que realiza el PLC, que cumple la función de eliminar valores demasiado lejanos al promedio de mediciones.

- **Altura total**: Las fluctuaciones de altura total de la bomba, se encuentran **dentro del rango permitido** por el **grado 1** de la norma, la magnitud de la fluctuación es similar en magnitud a que se presenta en la descarga, sin embargo, la exigencia de la norma es levemente más tolerante para esta variable.

- **Caudal**: Las fluctuaciones de esta magnitud tiene un comportamiento cambiante, ya que, a caudales altos, **cumplen con el grado 1**. Sin embargo, a caudales inferiores a los

16[m3/h] las fluctuaciones comienzan a estar **dentro del grado 2**, mientras que para caudales inferiores a 9[m3/h] las fluctuaciones caen **dentro del grado 3** de la norma. La última medición realizada en el punto 1, medido a un caudal aproximado **de 2,5 [m3/h]**, se encuentra **fuera del rango permitido** de la norma.

- **Velocidad de rotación**: La velocidad de rotación sufre fluctuaciones leves y se encuentra dentro del **grado 1.**

Los **errores sistemáticos** que se pueden apreciar en las **tablas de la sección 8.4.1** toman valores muy semejantes a los que se presentan en las mediciones del PLC, ya que la instrumentación es la misma.

Las pequeñas diferencias que se presentan en ambos métodos, es producto netamente a que el error sistemático es calculado sobre un valor promedio, pudiendo tener una diferencia producto del valor promedio medido.

7.3.1 Prueba de aceptación.

Ya analizados los requerimientos del sistema para el cumplimiento de la norma, se evalúa la **aceptación de la prueba hidráulica para 2 puntos de garantía** considerando que el cliente requiere la prueba, conoce y está de acuerdo con las diferencias que tiene el banco con respecto a las exigencias de la norma.

Los valores promedios obtenidos son levemente inferiores que los obtenidos para el PLC para los mismos puntos, sin embargo, las incertidumbres toman valores similares ya que la componente que mayor influencia tiene es la sistemática.

Para el **primer punto de garantía** resulta en la **aceptación de la prueba rendimiento hidráulico** bajo las tolerancias más exigentes de la norma**.**

Para el **segundo punto de garantía** el resultado es positivo para la bomba, es decir, es aceptada la prueba de rendimiento hidráulico para la altura de la bomba para el segundo **punto de garantía** para la tolerancia más exigente de la norma (1E)

Cabe destacar que para la tolerancia 1E la curva calculada cruza la tolerancia de altura muy cercano al límite inferior. Además, se debe mencionar que no se realizan las 2 mediciones cercanas al punto de garantía que son exigidas por la norma.

La **figura 6-34** muestra la comparación de la curva calcula mediante LabJack en comparación con una curva similar a la curva dada por el fabricante de la bomba Vogt H 620. Se puede apreciar que la curva se asemeja bastante, tomando valores cercanos y levemente inferior en algunos casos.

Se puede apreciar que para caudales bajo los 16 [m3/h] la diferencia entre curva se hace mayor. Comienza con una diferencia cerca de 0,5 [m] en un caudal de 16 [m3/h] y llega a valores cercanos

de 2 [m] de diferencia a caudales cercanos a los 2,5 [m3/h]. Esta diferencia se produce a caudales bajos, probablemente por el aumento de la temperatura en el fluido, ya que a caudales bajos la energía en forma de temperatura transmitida al agua puede tomar magnitudes representativas.

La pequeña diferencia que se produce en los puntos 7 y 8 de la curva a caudales altos, puede tener una leve mejora si se consideran las pérdidas de carga en la tubería, sin embargo, es una magnitud de un orden menor. Otro motivo que puede estar causando esta diferencia es el notorio desgaste que tiene el rodete y sus alabes, sin embargo, esto sería reflejado a lo largo de la totalidad de la curva. La última opción que puede estar afectando en el resultado de la curva, son las pérdidas de tensión en las señales de los sensores de medición, lo cual afecta tanto la diferencia de la curva en caudales bajos, como altos.

7.4 Medición de potencia

De las mediciones tomadas eléctricamente para el cálculo de potencia se puede concluir que mediante el analizador de redes utilizados se podría calcular la potencia para el banco de pruebas en el grado de exigencia 2 o 3 de la norma si se cuantifican las pérdidas de eficiencia que se producen en el motor producto de la modulación de las señales.

Sin embargo, es importante evaluar la posibilidad de diseñar la modificación de los ejes de las bombas para la instalación de un sensor de torque que puede ir acoplado al eje. Este método podría dar la posibilidad de medir potencia en la categoría más exigente de la norma.

7.4.1 LabVIEW

Este método presento falla producto del hardware del PLC, sin embargo, el método de adquisición es el mismo que TIA Portal, las ventajas que puede presentar este método son en el área de control del banco, en la comunicación con próximos controladores y en la automatización del banco, ya sea para la totalidad de la prueba o para partes de esta.

7.4.2 Curvas

En la figura **6-32** se puede ver las curvas calculadas mediante LabJack y PLC. Se puede apreciar que todos los puntos medidos mediante LabJack presentan un valor levemente inferior para caudal y la altura, lo cual se repite para todos los puntos medidos dando una curva resultante similar a la curva obtenida por el PLC, pero levemente desplazada en el eje “x” e “y”.

Este desplazamiento puede estar siendo producido por la suma de 3 motivos. El primero es la aproximación que se utilizó en la resistencia para el escalado de la señal, ya que se utilizó resistencias genéricas de 470 [Ω], sin embargo, para los distintos canales esta magnitud varia levemente, por lo que es recomendable medir cada una de las resistencias o utilizar unas de precisión, para luego poder modificar el escalado. La segunda causa y que probablemente es la que aporta mayor error a la medición, son las pérdidas de tensión en las líneas, que pueden ser producidas por el largo, la sección y el recubrimiento de los conductores utilizados. La tercera causa que está generando error y seria idóneo cuantificar, es la magnitud y la frecuencia de los ruidos que están interfiriendo en las señales proveniente de los sensores.

Si junto con la información anterior apreciamos nuevamente las **figuras 6-32 y 6-33,** se puede ver que las curvas medidas mediante ambos métodos de adquisición se asemejan a la curva “real” de la bomba. La curva medida con el PLC sobrepasa por exceso en algunos puntos la curva real, mientras que la de LabJack es levemente inferior. Si a esto agregamos las hipótesis planteadas para las pérdidas de altura, probablemente la curva medida en óptimas condiciones serias totalmente superior que la dada por el fabricante.

7.4.3 Instrumentos

Si bien el mayor inconveniente en cuanto a la instrumentación fue con los sensores de presión, es importante recordar que el banco carece de algunos instrumentos esenciales para realizar pruebas normalizadas, **los de mayor requerimiento son el densímetro y viscosímetro**. Estos permitirían dar una mayor certeza en los cálculos de pérdidas de carga y altura de la bomba.

El utilizar un densímetro que permita calcular la densidad en contacto directo con el fluido y en función del tiempo nos daría una mayor información y permitirá reducir los errores presentes en los calculo, sin embargo, no es una exigencia.

Cabe mencionar que se debe solucionar la reubicación del sensor de temperatura, y evaluar la posibilidad de instalar un segundo sensor.

Por otra parte, si apreciamos la **tabla 17** y los resultados de la **sección 6.3.3,** podemos ver la magnitud del error sistemático que deben tener los sensores para poder cumplir con la norma en la categoría de **grado 1**.

Si además agregamos la información de la tabla 10, en cuanto a los rangos de operación del banco de pruebas y los sensores, se pueden evaluar múltiples alternativas que permitan solucionar este problema.

Por otra parte, sería recomendable poder contar con un instrumento que permita tener información de la altura del tanque de almacenamiento de agua.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se realiza un levantamiento de información la cual incluye todos los componentes mecánicos, eléctrico y electrónicos que componen el banco de pruebas.

Se diseñan nuevas tuberías, sistema de tomas de presión y un manifold, las cuales permiten realizar las mediciones de presión de diferentes partes del sistema en un mismo instrumento, además de disminuir las fluctuaciones en comparación con el método anterior. Esto permite cumplir con las exigencias de diseño del grado 1 de la norma ISO 9906-2012.

Se implementar 2 nuevos métodos de adquisición de datos que permiten obtener lecturas de las variables de interés en tiempo y almacenarlas. Además, se crea un programa en Matlab que permite realizar el cálculo de datos rápidamente.

Actualmente el banco cuenta con las condiciones de diseño exigida por la norma y se comprueba mediante LabJack, uno de los métodos de adquisición probados, que las mejoras implementadas presentan un cambio notable en las condiciones del flujo que es favorable, sin embargo, es recomendable evaluar este nuevo sistema implementado con el objetivo de mejorar las fluctuaciones de las mediciones de presión y funcionalidad del sistema.

El banco en su totalidad <u>no cumple</u> con los requerimientos de la Norma ISO 9906-2012 para realizar pruebas de rendimiento hidráulico de altura y potencia.

Los problemas presentados para el cálculo de altura son la instrumentación necesaria, las fluctuaciones, incertidumbre sistemática e incertidumbre general de las variables de altura de succión, altura de descarga y altura total de la bomba.

Se plantean 2 hipótesis que pueden estar produciendo esa magnitud de fluctuaciones, una tiene que ver con el nuevo sistema de tomas de presión y otra con el tanque de almacenamiento de agua. Las incertidumbres se solucionar al adquirir nuevos instrumentos de medición que deben cumplir valores ideales de precisión de 0,005[bar] para la succión y de 0,02[bar] para la descarga. La instrumentación requerida es la siguiente:

1. Densímetro: El rango de medición debe ser de 950 [kg/m3] a 1050[kg/m3] con una resolución cercana a 1[kg/m3]
2. Viscosímetro: Que permita medir viscosidad cinemática o dinámica del agua que tiene una densidad dentro del rango de medición del densímetro.

Para las mediciones de potencia idealmente se requiere un nuevo instrumento de medición instalado en el eje que permita medir torque, para esto se requiere intervenir el conjunto motor bomba. Otra opción válida y bastante llamativa, es adquirir un analizador de redes y cuantificar las pérdidas de eficiencia en el motor eléctrico producto de los harmónicos generados por el VDF.

Anexo a las recomendaciones de la norma, adquirir un nuevo módulo o tarjeta de adquisición de datos es fundamental. Se recomienda adquirir un módulo de adquisición de datos compuesto por “NI 9203 Datasheet” (permite la lectura de las señales de corriente de los sensores con una

resolución hasta 4 veces superior que la actual del PLC y hasta 13 veces mejor que la utilizada actualmente el LabJack. Además, permitirá una frecuencia de muestreo más rápida que ambos métodos probados) y “NI cDAQ-9171” que permite la comunicación del Datasheet con la computadora mediante USB y sin perder las características de funcionamiento como por ejemplo la frecuencia de muestreo.

Un tema interesante para evaluar es la fuente real de las fluctuaciones de presión, la perdida de eficiencia del motor eléctrico producto de los harmónicos y la posibilidad de automatizar el banco para realizar pruebas de rendimiento hidráulico en tiempo real para experiencias de laboratorio. Esto permitiría a los alumnos poder visualizar una gran cantidad de funciones que puede realizar un banco de pruebas, permitiendo observar las consecuencias producto de utilizar un VDF y un método de solucionarlas.

Otro tema de interés a evaluar es las posibilidades de que el banco de ensayos pueda realizar pruebas de rendimiento hidráulico de NPSH con fines académicos, o bajo norma. Para eso se propone evaluar a profundidad el tanque de almacenamiento de agua.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

British Standards Institue. (2012). "BS EN ISO 9906:2012 Rotodynamic pumps - Hydraulic performance acceptance test - Grades 1, 2 and 3"

ISO, British Standards Institue. (1998). "Measurement of conductive liquid flow in closed conduits — Flanged electromagnetic flowmeters"

ISO, British Standards Institue. (2004). "Measurement of total discharge in open channels — Electromagnetic method using a full-channel-width coi".

Publication, B. S. I. S. (2017). "BSI Standards Publication Liquid pumps and installation — General terms , definitions , quantities , letter symbols and units Part 2 : Pumping System".

Sterling SIHI. (2003). "Principios basicos para el diseño de instalaciones de bombas centrifugas"

www.weg.net. (2017). " Motores de inducción alimentados por convertidor de frecuencia PWM"

Laroze.L, Porras N, Fuster G. (2013). "Conceptos y magnitudes en Física"

U.T.F.S.M . (s.f). "ANÁLISIS Y TEORÍA DEL ERROR EXPERIMENTAL: ANEXO B: ERROR EXPERIMENTAL.

Oda-Noda. (2005). " Introducción al análisis gráfico de datos experimentales".

Ruiz A, García J, Mesa J. (2010). "Error, incertidumbre, precisión y exactitud, terminos asociados a la calidad espacial del dato geográfico"

KSB, compañía sudamericana de bombas S.A. (2002). "Manual de entrenamiento, Selección y aplicación de bombas centrífugas". obtenido de http://www.hidroterm.com.ve/documentacion/tutoriales/Manual_Entrenamiento_KSB_CSB

https://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt1/fb-11/fb-11-sis.html

https://new.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial.html

http://support.automation.siemens.com. (s.f). Manual de sistema S7 1200

https://www.parker.com/literature/o_ring.pdf

https://en.wika.com/

https://labjack.com/products/u3

http://www.ni.com/es-es.html

https://www.aemc.com/products/

https://www.rhona.cl/

DIN 13, ISO 261. (1999). Metric ISO thread

DIN 2999, ISO 7-1. (1994). British Standard Pipe Taper

NPT, ASME B 1.20.1. (1983). American Taper Pipe Thread.

10. ANEXOS

10.1 ANEXO A

10.1.1 ANEXO A-1: Intervalo de calibración de instrumentos.

La frecuencia con la cual deben ser calibrados lo instrumento va a depender de qué tipo de instrumentos son, es decir de que principio de medición utilizan para obtener la medición.

La norma establece periodos máximos entre calibración de instrumentos, además exige que sean calibrados bajo una de las normas reconocidas actualmente a nivel internación en la calibración de instrumentos.

Si bien la norma establece estos periodos, nombra que si uno de los instrumentos nombrados aquí posee características particulares que le permiten tener un periodo mayor, serán aceptados, siempre y cuando existan valores históricos de esto o pruebas que lo comprueben.

Tabla 21: Tabla de periodo de calibración de los instrumentos de medición para cumplir con las exigencias de la norma.

Variable por medir	Instrumento	Periodo [Años]
Caudal	electromagnético	1
Velocidad de rotación	Tacómetro óptico	10
Altura	transductores	0.33
Temperatura	eléctricos	2

Equipment	Period	Equipment	Period
Rate of flow		**Input power**	
Weigh tank	1	Dynamometer	0,5
Volumetric tank	10	Torque meter	1
Venturi, nozzle, Orifice, weir	[a]	Calibrated motor	NR[c]
Turbine	1	Wattmeter	1
Electromagnetic	1[b]	Gears	10
Ultrasonic	0,5	**Head**	
Current meter	2	Bourdon tube	0,33
Pump speed		Dead weight	NR
Tachometer	3	Manometer	NR
Electronic (gear teeth)	NR[c]	Transducers	0,33
Frequency responsive Devices		**Temperature**	
Magnetic	10	Electric	2
Optical	10	Mercury	5
Stroboscopes	5		

[a] Not required, unless a change of a critical dimension is suspected.
[b] Secondary (electronic processor). The primary section should be recalibrated every five years.
[c] Unless electrical or mechanical failure.

Figura 10-1: Periodo calibración de instrumentos. [Norma ISO 9906, 2012]

10.1.2 ANEXO A-2: Datos extras del motor eléctrico.

Eficiencia (η)	-0,15 (1-η) para Pnom ≤ 150 kW
	-0,1 (1-η) para Pnom > 150 kW
	Siendo η un numero decimal
Factor de potencia	$\frac{1 - \cos Ø}{6}$
	Como mínimo 0,02 y máximo 0,07
Deslizamiento	± 20% para Pnom ≥ 1 kW and ± 30 % para Pnom < 1 kW
Corriente de arranque	20% (sin límite inferior)
Par de arranque	- 15% + 25%
Par máximo	- 10 %
Momento de inercia	± 10 %

Figura 10-2: Tolerancias motor eléctrico Weg

Potencia		Carcasa	Full Load Torque (Kgfm)	Corriente con rotor trabado I/ In	Par con rotor trabado TI/Tn	Break-down Torque Tb/Tn	Momento de Inercia J (Kgm²)	Tiempo máximo con rotor trabado (s)		Peso (kg)	Nivel de ruido dB (A)	400 V							
												RPM	% de la potencia nominal						Corriente nominal In (A)
													Rendimiento			Factor de potencia			
kW	HP							Caliente	Frio				50	75	100	50	75	100	
II Polos High-output design																			
0,37	0,5	63	0,132	5,0	2,2	2,2	0,0002	7	15	7,2	52	2740	60,0	62,0	64,0	0,58	0,73	0,80	1,04
0,55	0,75	80	0,194	5,1	2,6	2,6	0,0004	21	46	8,0	59	2755	64,5	68,5	69,0	0,60	0,74	0,83	1,39
0,75	1	71	0,267	5,5	2,8	2,8	0,0005	12	26	9,0	56	2740	71,0	72,0	72,1	0,70	0,82	0,89	1,69
0,75	1	90S	0,257	6,3	2,7	2,7	0,0012	15	33	26,0	64	2840	74,2	76,2	76,2	0,63	0,76	0,82	1,73
1,1	1,5	90S	0,372	6,3	2,7	2,6	0,0015	7	15	15,0	64	2880	74,5	76,5	76,5	0,63	0,76	0,83	2,50
1,5	2	80	0,532	5,5	2,8	2,7	0,0009	15	33	15,0	59	2745	76,0	77,0	77,2	0,71	0,82	0,87	3,22
1,5	2	90L	0,511	6,3	2,7	2,6	0,0020	7	15	19,5	64	2860	77,5	78,0	78,5	0,63	0,76	0,83	3,32
2,2	3	100L	0,749	7,5	2,2	2,7	0,0053	13	29	27,0	67	2860	81,0	81,5	81,5	0,73	0,83	0,88	4,33
2,2	3	90S	0,763	6,8	2,8	2,9	0,0021	9	20	16,7	64	2810	81,0	81,5	81,5	0,63	0,77	0,85	4,58
3	4	112M	1,02	7,2	2,4	2,8	0,0063	20	44	37,0	64	2875	83,0	83,5	83,5	0,75	0,84	0,89	5,83
3	4	90L[2]	1,04	6,0	3,4	3	0,0025	7	15	23,5	64	2820	81,0	81,5	81,5	0,57	0,71	0,80	6,64
4	5,5	100L	1,35	8,4	3,2	3,4	0,0064	8	18	32,0	67	2885	83,0	84,0	83,5	0,69	0,81	0,87	7,95
4	5,5	132S	1,34	6,5	2,3	2,8	0,0187	13	29	61,0	68	2910	83,0	84,0	84,0	0,67	0,78	0,85	8,09
5,5	7,5	112M	1,87	7,7	2,5	3	0,0094	10	22	40,0	64	2870	85,5	86,0	86,0	0,79	0,86	0,89	10,3
5,5	7,5	132M	1,84	6,5	2,4	3	0,0180	11	24	42,0	68	2910	85,0	86,0	86,0	0,71	0,81	0,87	10,6
7,5	10	112M[2]	2,54	7,2	3,1	3,2	0,0094	8	18	42,0	64	2875	85,5	86,5	86,5	0,64	0,77	0,84	14,9
7,5	10	132M	2,52	6,4	2,3	2,6	0,0234	11	24	65,0	68	2900	85,5	86,5	86,5	0,72	0,82	0,87	14,4
9,2	12,5	160M	3,06	6,6	1,8	2,5	0,0335	13	29	93,0	67	2925	87,5	88,1	88,0	0,73	0,83	0,87	17,3
11	15	132M	3,66	8,0	3	3,4	0,0270	8	18	74,0	68	2925	87,5	89,3	89,3	0,67	0,79	0,85	20,9
15	20	160L	4,99	7,2	2,2	2,8	0,0517	9	20	108	67	2930	89,5	89,8	89,5	0,71	0,81	0,86	28,1
22	30	160L	7,29	7,8	2,6	3,3	0,0800	7	15	140	67	2940	90,5	91,0	91,0	0,73	0,82	0,87	40,1
22	30	180L	7,26	7,3	2,2	3,1	0,1084	7	15	156	67	2950	90,7	91,0	90,8	0,76	0,84	0,88	39,7
30	40	180L	9,94	8,2	2,2	2,9	0,1301	8	18	194	76	2940	91,5	91,8	91,5	0,78	0,86	0,89	52,9
30	40	200M	9,89	6,9	2,5	2,7	0,1526	18	40	220	72	2955	91,6	92,0	91,6	0,76	0,84	0,87	54,3
37	50	200M	12,2	6,7	2,6	2,6	0,1950	16	35	232	72	2955	92,0	92,5	92,0	0,76	0,84	0,87	66,7
45	60	200L	14,8	7,0	2,3	2,5	0,2204	13	29	272	72	2955	92,3	92,6	92,5	0,77	0,85	0,88	79,8
55	75	225S/M	18,1	7,2	2,1	2,7	0,3238	9	20	394	75	2960	92,2	93,0	92,8	0,81	0,87	0,89	96,1
75	100	250S/M	24,6	7,8	2,6	3	0,4924	9	20	457	75	2965	93,0	93,5	93,3	0,78	0,86	0,89	130
110	150	280S/M	36,0	7,0	2	2,8	1,10	20	44	702	77	2975	93,5	94,2	94,0	0,79	0,86	0,89	190
132	180	280S/M	43,2	7,2	1,9	2,7	1,33	16	35	759	77	2975	94,0	94,3	94,3	0,81	0,86	0,89	227
132	180	280S/M	43,2	7,2	1,9	2,7	1,33	16	35	759	77	2975	94,0	94,3	94,3	0,81	0,86	0,89	227
200	270	315S/M	65,4	7,7	2,1	2,8	2,46	17	37	1135	77	2980	94,4	94,7	94,6	0,80	0,87	0,90	339
200	270	355M/L	65,3	7,4	1,7	2,7	3,66	28	62	1430	80	2985	94,5	94,8	94,7	0,82	0,87	0,89	343
220	300	355M/L	71,8	7,7	1,8	2,8	4,09	20	44	1496	80	2985	94,5	94,8	94,7	0,83	0,88	0,90	373
250	340	355M/L	81,6	7,9	2,1	2,8	4,63	20	44	1592	80	2985	94,5	94,8	94,7	0,86	0,88	0,90	423
260	350	355M/L	85,0	7,8	2,3	2,6	4,85	20	44	1665	80	2980	94,5	94,8	94,8	0,89	0,92	0,93	426
280	380	355M/L	91,5	7,6	2	2,6	5,06	17	37	1663	80	2980	94,6	94,9	94,8	0,86	0,90	0,91	468
300	400	355M/L	97,9	8,5	2,5	2,7	5,60	22	48	1770	80	2985	94,6	94,8	94,8	0,87	0,90	0,91	502

Notas:
[2] Motores con elevación de temperatura "F" ΔT 105 K.

Figura 10-3: Características eléctricas del motor Weg W22 112M

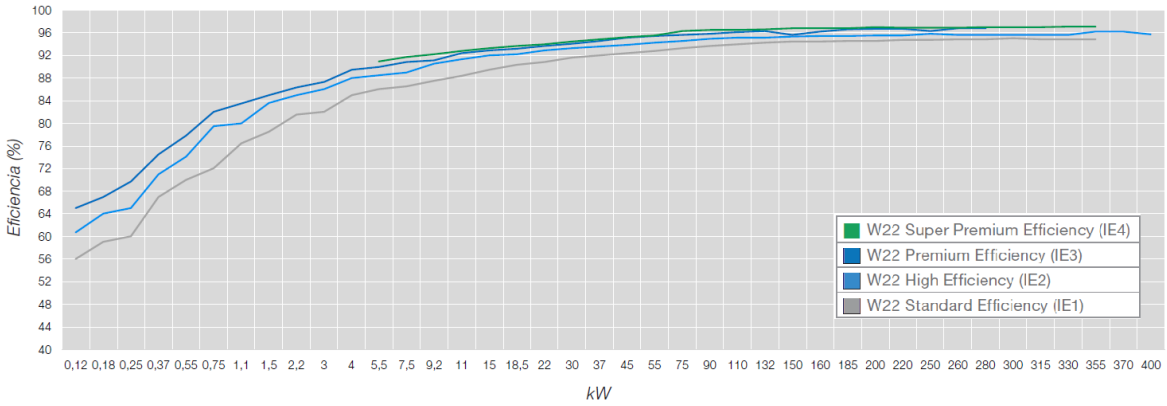


Figura 10-4: Eficiencia motor eléctrico en función de la potencia a condiciones nominales.

10.1.3 ANEXO A-3: Planos PLC, instrumentación y bombas.

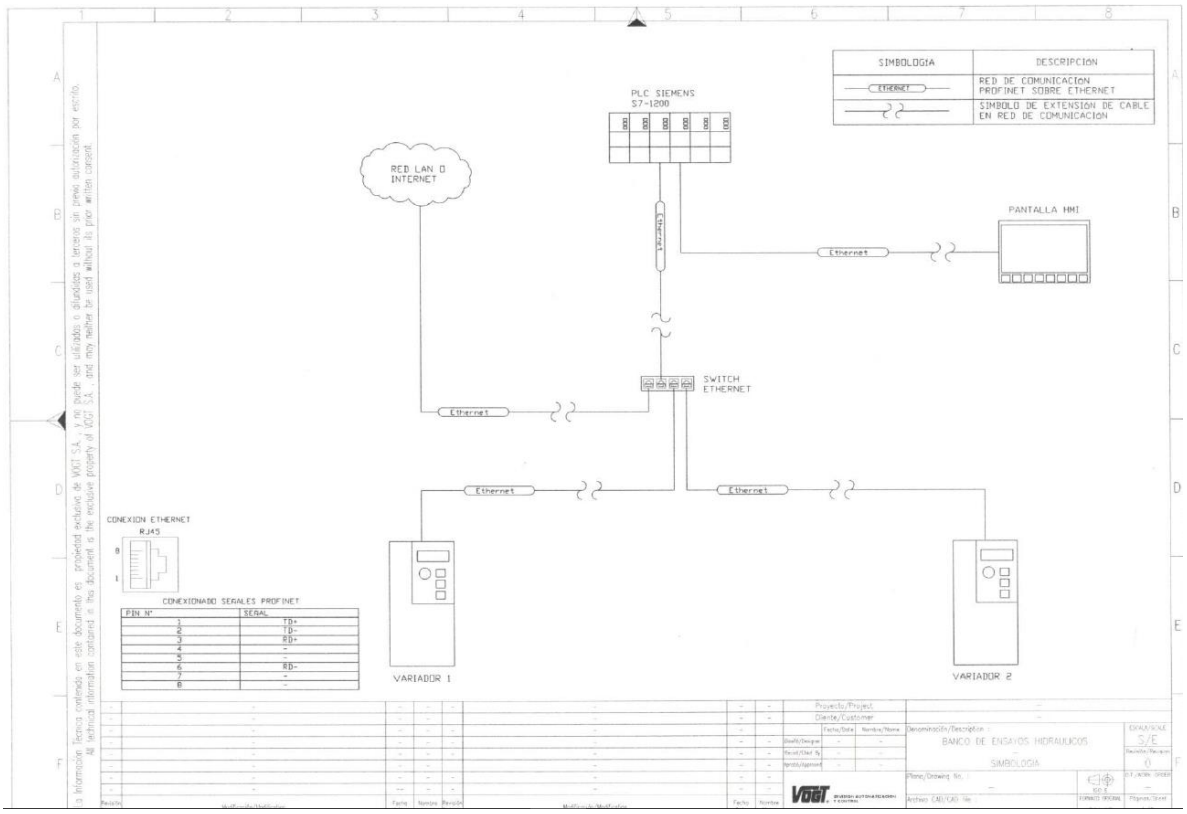


Figura 10-5: Plano de conexión entre VDFs, pantalla HMI y PLC. []

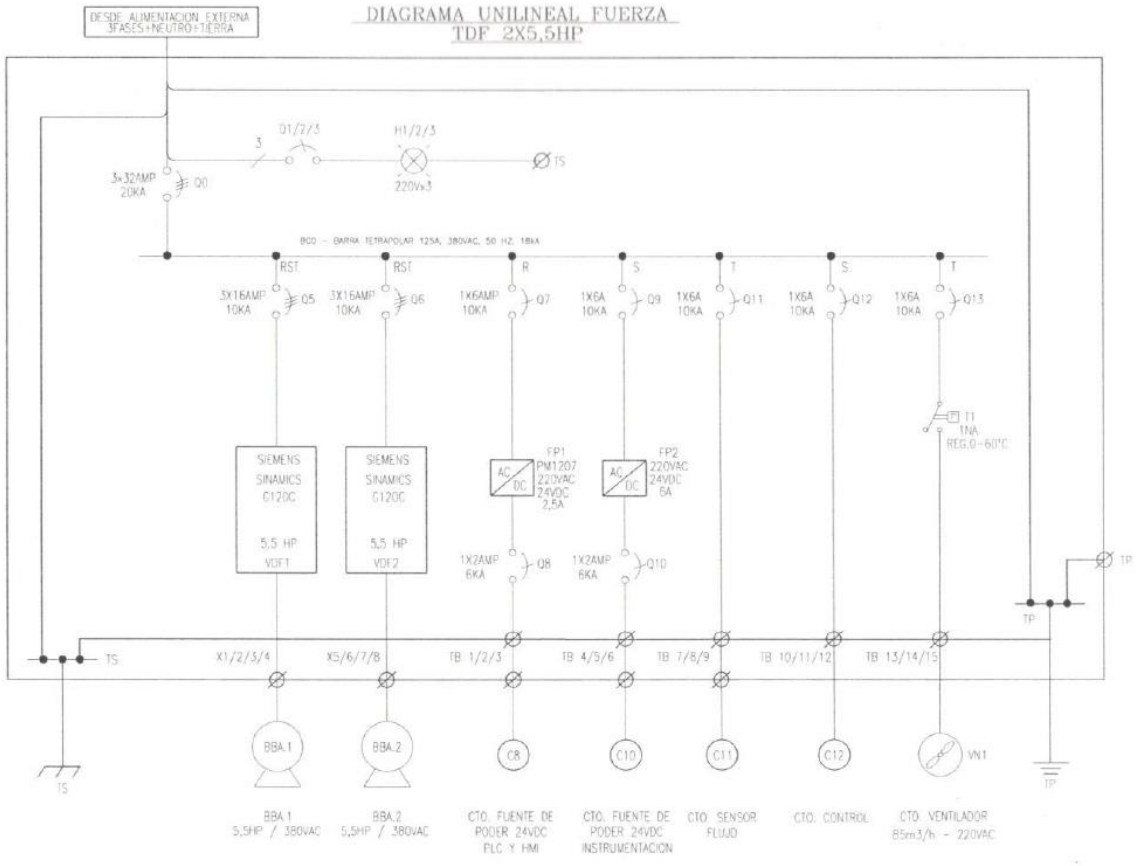


Figura 10-6: Diagrama unilineal electrico de fuerza.

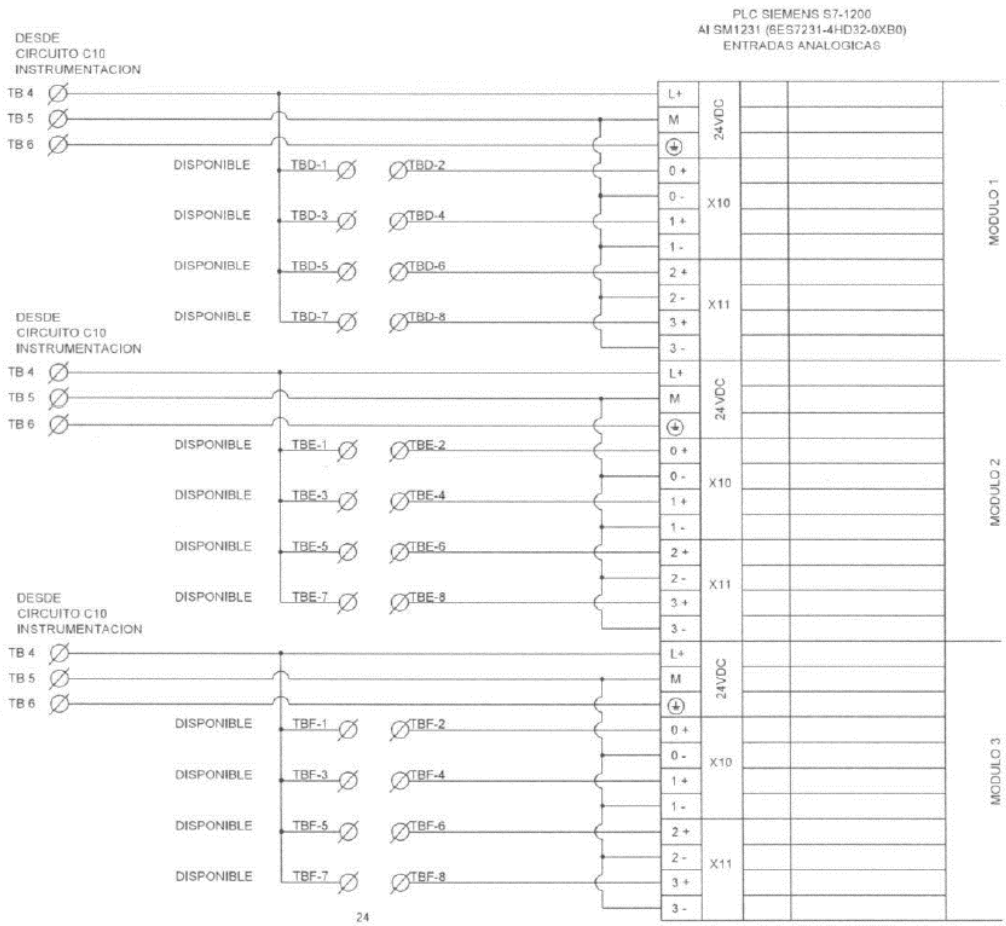


Figura 10-7: Conexiones de la instrumentación al PLC.

10.1.4 ANEXO A-4 (Instrumentación)

Datos técnicos		Modelo S-10 / S-11										
Rango de medición	bar	0.1	0.16	0.25	0.4	0.6	1	1.6	2.5	4	6	10
Límite de sobrecarga	bar	1	1.5	2	2	4	5	10	10	17	35	35
Presión de rotura	bar	2	2	2.4	2.4	4.8	6	12	12	20.5	42	42
Rango de medición	bar	16	25	40	60	100	160	250	400	600	1000 [1]	
Límite de sobrecarga	bar	80	50	80	120	200	320	500	800	1200	1500	
Presión de rotura	bar	96	96	400	550	800	1000	1200	1700 [2]	2400 [2]	3000	
		{Vacío, rangos compuestos +/-, presión absoluta										
Material												
■ Piezas en contacto con el medio		Acero inoxidable (para otros materiales consultar programa de sellos separadores)										
➢ Modelo S-10		Acero inoxidable										
➢ Modelo S-11		Acero inoxidable {Hastellov C4}										
		Junta tórica: NBR [3] {Viton o EPDM}										
■ Carcasa		Acero inoxidable										
Líquido interno de transmisión		Aceite sintético,										
		Solamente para rangos hasta 0 ... 25 bar o para S-11 (membrana aflorante)										
		{Halocarbono para versiones de oxígeno} [4]										
		{Listado en FDA para industria alimenticia}										
Energía auxiliar U_B	DC V	$10 < U_B \leq 30$ (14 ... 30 con señal de salida 0 ... 10 V)										
Señal de salida v		4 ... 20 mA, 2-hilos $R_A \leq (U_B - 10\ V) / 0.02\ A$ con R_A en Ohm y U_B en Volt										
Carga máxima admisible R_A		0 ... 20 mA, 3-hilos $R_A \leq (U_B - 3\ V) / 0.02\ A$ con R_A en Ohm y U_B en Volt										
		{0 ... 5 V, 3-hilos} $R_A > 5$ kOhm										
		{0 ... 10 V, 3-hilos} $R_A > 10$ kOhm {otras señales de salida a petición}										
Posibilidad de ajuste cero/span	%	± 10 mediante potenciómetros dentro del equipo										
Tiempo de respuesta (10 ... 90 %)	ms	≤ 1 (≤ 10 ms con temperaturas por debajo de -30 °C para rangos hasta 25 bar										
		o con membrana aflorante)										
Precisión [5]	% del span	≤ 0.5 {0.25} [6] (ajuste del punto límite)										
	% del span	≤ 0.25 {0.125} [6] (BFSL)										
Histéresis	% del span	≤ 0.1										
Repetibilidad	% del span	≤ 0.05										
Estabilidad al año	% del span	≤ 0.2 (con condiciones de referencia)										
Permissible temperature of												
■ Medio		-30 ... +100 °C {-40 ... +125 °C}						-22 ... +212 °F {-40 ... +257 °F}				
		S-11 elemento refrigeración -20 ... +150 °C						S-11 elemento refrigeración -4 ... +302 °F				
■ Entorno		-20 ... +80 °C						-4 ... +176 °F				
		S-11 elemento refrigeración -20 ... +80 °C						S-11 elemento refrigeración -4 ... +176 °F				
■ Almacenamiento		-40 ... +100 °C						-40 ... +212 °F				
		S-11 elemento refrigeración -20 ... +100 °C						S-11 elemento refrigeración -4 ... +212°F				
Rango de temperatura compensado		0 ... +80 °C						32 ... +176 °F				
Coeficientes de temperatura en el												
cango de temperatura compensado												
■ CT medio del punto cero	% del span	≤ 0.2 / 10 K (< 0.4 para rangos de medición < 250 mbar)										
■ CT medio del span	% del span	≤ 0.2 / 10 K										
CE-Indicativo		89/336/EWG emisión perturbaciones y resistencia a interferencias ver EN 61 326										
		97/23/EG Directiva para aparatos de presión, (Módulo H)										
Resistencia a choques	g	1000 conforme a IEC 60068-2-27 (impacto mecánico)										
Resistencia a vibraciones	g	20 conforme a IEC 60068-2-6 (vibración con resonancia)										
Protección eléctrica		Protección contra polaridad inversa, sobretensión y cortocircuito										
Clase de protección		Conforme a IEC 60529 / EN 60529, ver página 3										
Peso	kg	Aprox. 0.2										
	kg	Aprox. 0.3 con opción precisión 0.25% del span debido a la carcasa más alta										

Figura 10-8: Ficha técnica sensor de presión Wika S10.

Rendimiento (EN 60770)

Precisión (incluye no linealidad, histéresis y repetibilidad)		≤ ±0,5 % FS (típ.)
		≤ ±1,0 % FS (máx.)
No linealidad, BFSL (conformidad)		≤ ±0,2 % FS
Histéresis y repetibilidad		≤ ±0,1 % FS
Desplazamiento del punto cero térmico		≤ ±0,1 % FS/10 K (típ.)
		≤ ±0,2 % FS/10 K (máx.)
Desplazamiento de la sensibilidad térmica (intervalo térmico)		≤ ±0,1 % FS/10 K (típ.)
		≤ ±0,2 % FS/10 K (máx.)
Tiempo de respuesta		< 4 ms
	Aire y gases (MBS 1750)	< 35 ms
Presión de sobrecarga (estática)		6 × FS (1500 bar, máx.)
Presión de rotura		6 × FS (2000 bar, máx.)
Durabilidad, P: 10 – 90 % FS		> 10 × 10^6 ciclos

Especificaciones eléctricas

Señal de salida nom. (con protección contra cortocircuito)	4 – 20 mA
Tensión de alimentación [U_B], con polaridad protegida	9 – 32 V c.c.
Alimentación (consumo de corriente)	–
Dependencia de la tensión de alimentación	≤ ±0,1 % FS/10 V
Límite de corriente	28 mA (típ.)
Impedancia de salida	–
Carga [R_L] (conectada a 0 V)	$R_L \leq (U_B - 9\,V)/0{,}02\,A\,[\Omega]$

Figura 10-9: Características técnica Sensor MBS 1750.

Modo de Medición	Rango	Resolución
Foto Tacómetro	5 a 99,999 rpm	0,1 RPM (0,5 a 999,9 rpm) y 1 rpm (sobre 1000 rpm)
Tacómetro Contacto	0,5 a 19.999 rpm	0,1 RPM (0,5 a 999,9 rpm) y 1 rpm (sobre 1000 rpm)
Velocidad Superficial	0,05 a 1.999,9 m/min	0,01 m/min (0,05 a 99.99 m/min) y 0,1 m/min (sobre 100 m/min)
Velocidad Superficial	0,2 a 6.560 pies/min	0,1 pies/min (0,1 a 999,9 pies/min) y 1 pies/min (sobre 1000 pies/min)

Display	Cristal líquido de 5 dígitos de 0,4" de alto, reversible.	Batería	4 pilas tipo AA de 1,5 V
		Temperatura de Operación	0 a 50° C
Exactitud	±(0,05% + 1 dígito)	Dimensiones	215 x 65 x 38 mm
Tiempo de muestreo	Sin contacto: 1 segundo sobre 60 rpm. Con contacto: 1 segundo sobre 6 rpm.	Memorias	Último valor leído Máximo valor leído Mínimo valor leído
Foto Tacómetro: Distancia de detección	50 a 150 mm típico Máximo 300 mm, según luminosidad ambiente		

Figura 10-10: Características técnica tacómetro DT-2236.

Precisión de medida	0,4 % ± 1 mm/s
Salidas	1 salida de intensidad 1 salida digital 1 salida de relé
Comunicación	HART
Pantalla	Retroiluminación con texto alfanumérico, 3 x 20 caracteres
Grados de protección	IP67 (NEMA 4x/6) IP20 (NEMA 2)
Fuente de alimentación	12-24 V AC/DC 115-230 V AC
Temperatura ambiente	De -20 a 50 °C (de -4 a 122 °F)
Homologaciones	MI-001 Danak PTB OIML R49
Homologaciones Ex	FM/CSA Class 1, Div 2

Figura 10-11: Características de sensor y transmisor de caudal Sitrans F.M MAG 5000.

Datos técnicos

	6ES7 215-1BG31-0XB0 CPU 1215C AC/DC/relé	6ES7 215-1AG31-0XB0 CPU 1215C DC/DC/DC	6ES7 215-1HG31-0XB0 CPU 1215C DC/DC/relé
Información general Ingeniería con • Paquete de programación	STEP 7 V11.0 SP2 o superior	STEP 7 V11.0 SP2 o superior	STEP 7 V11.0 SP2 o superior
Tensión de alimentación 24 V DC		SI	SI
120 V AC	SI		
230 V AC	SI		
Pérdidas Pérdidas, tip.	12 W	12 W	12 W
Memoria Memoria de trabajo • Integrada	100 kbyte	100 kbyte	100 kbyte
Memoria de carga • Integrada	4 Mbyte	4 Mbyte	4 Mbyte
Respaldo • sin pila	SI	SI	SI
Tiempos de ejecución de la CPU para operaciones de bits, tip.	0,085 µs; /instrucción	0,085 µs; /instrucción	0,085 µs; /instrucción
para operaciones de palabras, tip.	1,7 µs; /instrucción	1,7 µs; /instrucción	1,7 µs; /instrucción
para aritmética en coma flotante, tip.	2,5 µs; /instrucción	2,5 µs; /instrucción	2,5 µs; /instrucción
Áreas de datos y su remanencia Marcas • Cantidad, máx.	8 kbyte; Tamaño del área de marcas	8 kbyte; Tamaño del área de marcas	8 kbyte; Tamaño del área de marcas
Área de direcciones Imagen del proceso • Entradas, configurables • Salidas, configurables	1 kbyte 1 kbyte	1 kbyte 1 kbyte	1 kbyte 1 kbyte
Hora Reloj • Reloj por hardware (reloj tiempo real)	SI	SI	SI

Figura 10-12: Datos técnico PLC Siemens CPU 1215 DC/DC/relé.

Característica	Datos
Alimentación de 24 V	Existen dos posibilidades para la alimentación de 24 V: • El convertidor genera su alimentación de 24 V a partir de la tensión de red • El convertidor recibe su alimentación de 24 V a través de los bornes 31 y 32 con 20,4 V ... 28,8 V DC. Consumo típico: 0,5 A
Tensiones de salida	• 24 V (máx. 100 mA) • 10 V ± 0,5 V (máx. 10 mA)
Resolución de consigna	0,01 Hz
Entradas digitales	• 6 entradas digitales, DI 0 ... DI 5, con aislamiento galvánico • Tensión: ≤ 30 V • Tensión para el estado "low": < 5 V • Tensión para el estado "high": > 11 V • Intensidad con tensión de entrada de 24 V: 2,7 mA ... 4,7 mA • Intensidad mínima para el estado "high": 1,8 mA ... 3,9 mA • Compatible con salidas SIMATIC • Tiempo de reacción con tiempo de inhibición de rebote p0724 = 0: 5,5 ms ± 1 ms
Entrada analógica (entrada diferencial, resolución de 12 bits)	• AI 0, conmutable: – 0 V ... 10 V o -10 V ... +10 V: consumo típico: 0,1 mA, tensión máxima 35 V – 0 mA ... 20 mA: Tensión máxima 10 V, intensidad máxima 80 mA • Tiempo de reacción: 10 ms ± 2 ms • Si AI 0 está configurada como entrada digital adicional: Tensión máxima 35 V, low < 1,6 V, high > 4,0 V, tiempo de reacción 13 ms ± 1 ms con tiempo de inhibición de rebote p0724 = 0.
Salidas digitales/salidas de relé	• DO 0: Salida de relé, 30 V DC/≤ 0,5 A con carga óhmica • DO 1: Salida de transistor, 30 V DC/≤ 0,5 A con carga óhmica, protección contra inversión de polaridad • Tensión de salida de DO1 con estado "low": ≤ 0,5 mA • Tiempo de actualización de todas las DO: 2 ms
Salida analógica	• AO 0, conmutable: – 0 V ... 10 V – 0 mA ... 20 mA – Resolución 16 bits – Tiempo de actualización: 4 ms

Figura 10-13: Datos técnico Variador de frecuencia G120C.

Tensión de alimentación	
24 V DC	Sí
Intensidad de entrada	
Consumo típ.	45 mA
De bus de fondo 5 V DC, típ.	80 mA
Pérdidas	
Pérdidas, típ.	1,5 W
Entradas analógicas	
Nº de entradas analógicas	4 ; Entradas diferenciales tipo corriente o tensión
Tensión de entrada admisible para entrada de intensidad (límite de destrucción), máx.	± 35 V
Tensión de entrada admisible para entrada de tensión (límite de destrucción), máx.	35 V
Intensidad de entrada admisible para entrada de intensidad (límite de destrucción). máx	40 mA
Intensidad de entrada admisible para entrada de corriente (límite de destrucción). máx	40 mA
Tiempo de ciclo (todos los canales), máx.	625 µs
Rangos de entrada	
Tensión	Sí ; ±10 V, ±5 V, ±2,5 V
Intensidad	Sí ; 4 a 20 mA, 0 a 20 mA
Termopar	No
Termorresistencias	No
Resistencia	Sí
Rangos de entrada (valores nominales), tensiones	
-10 V a +10 V	Sí
Resistencia de entrada (-10 V a +10 V)	≥ 9 MOhm
-2,5 V a +2,5 V	Sí
Resistencia de entrada (-2,5 V a +2,5 V)	≥ 9 MOhm
-5 V a +5 V	Sí
Resistencia de entrada (-5 V a +5 V)	≥ 9 MOhm
Rangos de entrada (valores nominales), intensidades	
0 a 20 mA	Sí
Resistencia de entrada (0 a 20 mA)	280 Ω
4 a 20 mA	Sí
Salidas analógicas	
Nº de salidas analógicas	0
Formación de valores analógicos	
Tiempo de integración y conversión/resolución por canal	
Resolución con rango de rebase (bits incl. signo), máx.	12 bit ; + signo
Tiempo de integración parametrizable	Sí
Supresión de perturbaciones de tensión para frecuencia perturbadora f1 en Hz	40 dB, DC a 60 V para frecuencia de perturbación 50/60 Hz
Filtrado de valores medidos	
parametrizable	Sí
Nivel: ninguno	Sí
Nivel: débil	Sí
Nivel: medio	Sí
Nivel: intenso	Sí
Error/precisiones	
Error de temperatura (referido al rango de entrada), (+/-)	25 °C ±0,1 % a 55 °C ±0,2 % todo el rango de medida
Límite de error básico (límite de error práctico a 25 °C)	
Tensión, referida al rango de entrada, (+/-)	0,1 %
Intensidad, referida al rango de entrada, (+/-)	0,1 %
Supresión de tensiones perturbadoras para (f1 +/- 1%), f1 = frecuencia perturbadora	

Figura 10-14: Datos técnico módulos analógicos SM1231.

Input Characteristics

Number of channels.....8 analog input channels

ADC resolution.....16 bits

Type of ADC.....Successive approximation register (SAR)

Nominal input
- Unipolar.....0 mA to 20 mA
- Bipolar.....±20 mA

Minimum overrange
- Unipolar.....6.5%
- Bipolar.....5.5%

Overvoltage protection, channel-to-COM.....±30 V max on one channel at a time

Sample rate
- R Series Expansion chassis.....192 kS/s max
- All other chassis.....200 kS/s max

Conversion time
- R Series Expansion chassis.....5.2 µs min
- All other chassis.....5 µs min

Table 1. Unipolar Accuracy

	Measurement Conditions	Percent of Reading (Gain Error)	Percent of Range[1] (Offset Error)
Calibrated	Maximum (-40 °C to 70 °C)	±0.18%	±0.06%
	Typical (25 °C, ±5 °C)	±0.04%	±0.02%
Uncalibrated	Maximum (-40 °C to 70 °C)	±0.66%	±0.54%
	Typical (25 °C, ±5 °C)	±0.49%	±0.46%

Figura 10-15: Datos técnicos datasheet NI 9203.

Analog Input

Input FIFO size	127 samples
Maximum sample rate[1]	Determined by the C Series module
Timing accuracy[2]	50 ppm of sample rate
Timing resolution[2]	12.5 ns
Number of channels supported	Determined by the C Series module

Analog Output

Number of channels supported	
Hardware-timed task	
Onboard regeneration	16
Non-regeneration	Determined by the C Series module
Non-hardware-timed task	Determined by the C Series module
Maximum update rate	
Onboard regeneration	1.6 MS/s (multi-channel, aggregate)
Non-regeneration	Determined by the C Series module
Timing accuracy	50 ppm of sample rate
Timing resolution	12.5 ns
Output FIFO size	
Onboard regeneration	8,191 samples shared among channels used
Non-regeneration	127 samples
AO waveform modes	Non-periodic waveform, periodic waveform regeneration mode from onboard memory, periodic waveform regeneration from host buffer including dynamic update

Digital Waveform Characteristics

Waveform acquisition (DI) FIFO	
Parallel modules	511 samples
Serial modules	63 samples
Waveform generation (DO) FIFO	
Parallel modules	2,047 samples
Serial modules	63 samples
Digital input sample clock frequency	
Streaming to application memory	System-dependent
Finite	0 MHz to 10 MHz
Digital output sample clock frequency	
Streaming from application memory	System-dependent
Regeneration from FIFO	0 MHz to 10 MHz
Finite	0 MHz to 10 MHz
Timing accuracy	50 ppm

General-Purpose Counters/Timers

Number of counters/timers	4
Resolution	32 bits
Counter measurements	Edge counting, pulse, semi-period, period, two-edge separation, pulse width
Position measurements	X1, X2, X4 quadrature encoding with Channel Z reloading; two-pulse encoding
Output applications	Pulse, pulse train with dynamic updates, frequency division, equivalent time sampling
Internal base clocks	80 MHz, 20 MHz, 100 kHz
External base clock frequency	0 MHz to 20 MHz
Base clock accuracy	50 ppm
Output frequency	0 MHz to 20 MHz
Inputs	Gate, Source, HW_Arm, Aux, A, B, Z, Up_Down
Routing options for inputs	Any module PFI, analog trigger, many internal signals
FIFO	Dedicated 127-sample FIFO

Frequency Generator

Number of channels	1
Base clocks	20 MHz, 10 MHz, 100 kHz
Divisors	1 to 16 (integers)
Base clock accuracy	50 ppm
Output	Any module PFI terminal

Module PFI Characteristics

Functionality	Static digital input, static digital output, timing input, and timing output
Timing output sources[3]	Many analog input, analog output, counter, digital input, and digital output timing signals
Timing input frequency	0 MHz to 20 MHz
Timing output frequency	0 MHz to 20 MHz

Digital Triggers

Source	Any module PFI terminal
Polarity	Software-selectable for most signals

Figura 10-16: Datos técnico NI cDAQ- 9171

Parámetro	Condiciones de Referencia
Temperatura ambiente	73°F ± 5°F (23°C ± 3°C)
Humedad	45%
Presión atmosférica	25.4" Hg a 31.3" Hg (860 a 1060 hPa)
Voltaje de fase	230Vrms y 110Vrms ±2% sin CD
Voltaje de entrada del circuito de corriente de tenaza	0.03V a 1Vrms sin CD (<0.5%)
Voltaje de entrada del circuito de corriente AmpFlex®	11.8mV a 118mVrms sin CD (<0.5%)
Frecuencia de la red eléctrica	50 y 60Hz ± 0.1Hz
Corrimiento de fase V/I	0° potencia activa / 90° potencia reactiva
Armónicos	<0.1%

Función	Rango	Resolución del Display	Exactitud
Frecuencia	40 a 69Hz	0.01Hz	±0.01Hz
Voltajes RMS monofásicos (Vrms, Vdem)	15V a 480V	0.1V	±0.5% ± 2cts
Voltaje RMS Fase-a-fase (Urms, Udem)	15V a 960V	0.1V	±0.5% ± 2cts
Componente de voltaje CD	15V a 680V	0.1V	±1% ± 5cts
Voltajes de pico monofásicos (Vpp, Vpm)	15V a 680V	0.1V	±1% ± 5cts
Voltajes de pico fase-a-fase (Upp, Upm)	15V a 1360V	0.1 V si I < 1000 V 1 V si I ≥ 1000 V	±1% ± 5cts
Sensores de corriente (Arms, Adem)	Inom/1000 a 1.2 Inom	0.1 A si I < 1000 A 1 A si I ≥ 1000 A	±0.5% ± 2cts
AmpFlex® (Arms, Adem)	10A a 6500A	0.1 A si I < 1000 A 1 A si I ≥ 1000 A	±0.5% ± 1A
Corriente CD (MR193)	1A a 1400A	0.1 A si I < 1000 A 1 A si I ≥ 1000 A	±(1% + 1A)
Corriente de pico (App, Apm)	0 a 1.7 x Inom	0.1 A si I < 1000 A 1 A si I ≥ 1000 A	±(1% + 1A)
Corriente de pico (AmpFlex®)	10 a 9190A	0.1 A si I < 1000 A 1 A si I ≥ 1000 A	±(1% + 1A)
Factor de Cresta (Vcf, Ucf, Acf)	1.00 a 9.99	0.01	±1% ± 2cts
Potencia Real (W) Tenaza y AmpFlex® *Tenaza* AmpFlex®	0W a 9999kW Cos φ ≥ 0.8 Cos φ 0.2 a < 0.8 Cos φ 0.5 a < 0.8	4 dígitos (10000cuentas)	±1% ± 1ct ±1.5% ± 10cts ±1.5% ± 10cts
Potencia Reactiva (VAR) Tenaza y AmpFlex® *Tenaza* AmpFlex®	0W a 9999kW Sin Φ ≥ 0.5 Cos φ 0.2 a < 0.8 Cos φ 0.5 a < 0.8	4 dígitos (10000cuentas)	±1% ± 1ct ±1.5% ± 10cts ±1.5% ± 10cts
Potencia Aparente (VA)	0VA a 9999kVA	4 dígitos	±1% ± 1ct
Factor de Potencia (PF, DPF)	-1.000 a 1.000 Cos φ ≥ 0.5 Cos φ 0.2 a < 0.5	0.001	±1.5% ± 1ct ±1.5% ± 1ct
Tangente (Tan) de VA ≥ 50VA	-32.76 a 32.76	0.001 Tan φ < 10 0.01 Tan φ < 10	±1° en φ ±1° en φ
Energía Activa (Wh) Tenaza y AmpFlex® Tenaza AmpFlex®	0Wh to 9999MWh Cos φ ≥ 0.8 Cos φ 0.2 a < 0.8 Cos φ 0.5 a < 0.8	4 dígitos (10000cuentas)	±1% ± 1ct ±1.5% ± 1ct ±1.5% ± 1ct
Energía Reactiva (VARh) Tenaza	0VARh a 9999MVARh Sin Φ ≥ 0.5 Sin Φ 0.2 a < 0.5	4 dígitos	±1.5% ± 1ct ±2.5% ± 1ct
Energía Reactiva (VARh) AmpFlex®	0VARh a 9999MVARh Sin Φ ≥ 0.5 Sin Φ 0.2 a < 0.5	4 dígitos	±1.5% ± 1ct ±2.5% ± 1ct

Figura 10-17: Especificaciones de exactitud del analizador de redes AEMC 3945-B

10.1.5 Prueba de aceptación de eficiencia

Para realizar la verificación de las pruebas según algún grado de aceptación para potencia y eficiencia se debe tener dibuja las curvas de altura, potencia y eficiencia en función del caudal en un mismo gráfico.

En este grafico con las 3 curvas de interés se traza una recta entre el origen y el punto de garantía, extendiendo la recta más allá del punto de garantía.

La intersección entre la curva de prueba ajustada y esta línea recta formará la nueva tasa de flujo que se utiliza para evaluar la eficiencia o la potencia. La potencia de entrada medida o la eficiencia calculada en este punto se compararán con el valor garantizado y los factores de tolerancia de potencia o eficiencia aplicables.

Se puede ver la aplicación en las Figuras 9-17, 9-18 y 9-19, donde las curvas 1, 2 y 3 representan el caudal eficiencia y potencia respectivamente.

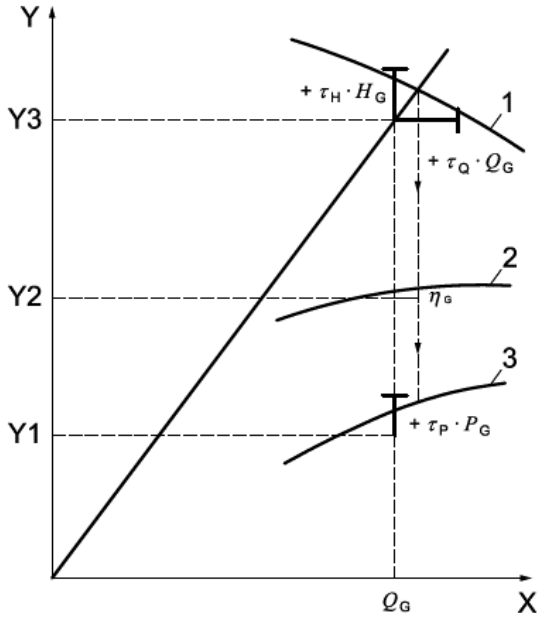


Figura 10-18: Tolerancias para grados 1 y 2 unilaterales. [Norma ISO9906, 2012]

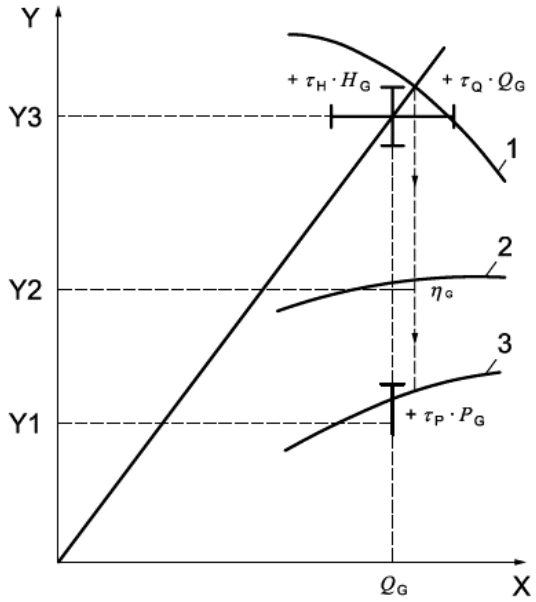


Figura 10-19:Tolerancias para el grado 1E de eficiencia energética. [Norma ISO9906, 2012]

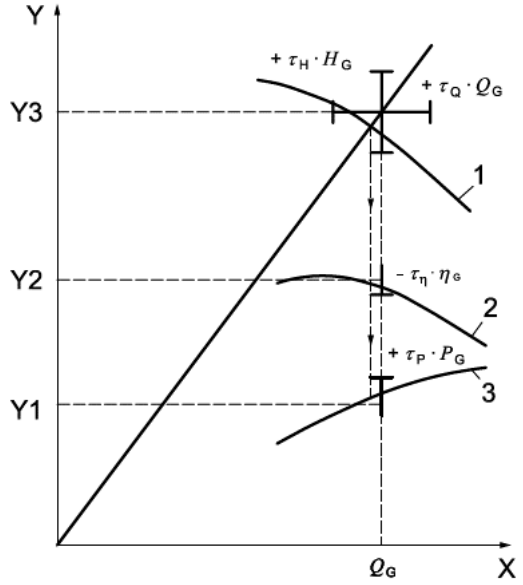


Figura 10-20:Tolerancias para grados 1, 2 y 3 bilaterales. [Norma ISO9906, 2012]

10.2 ANEXO B

10.2.1 ANEXO B-1

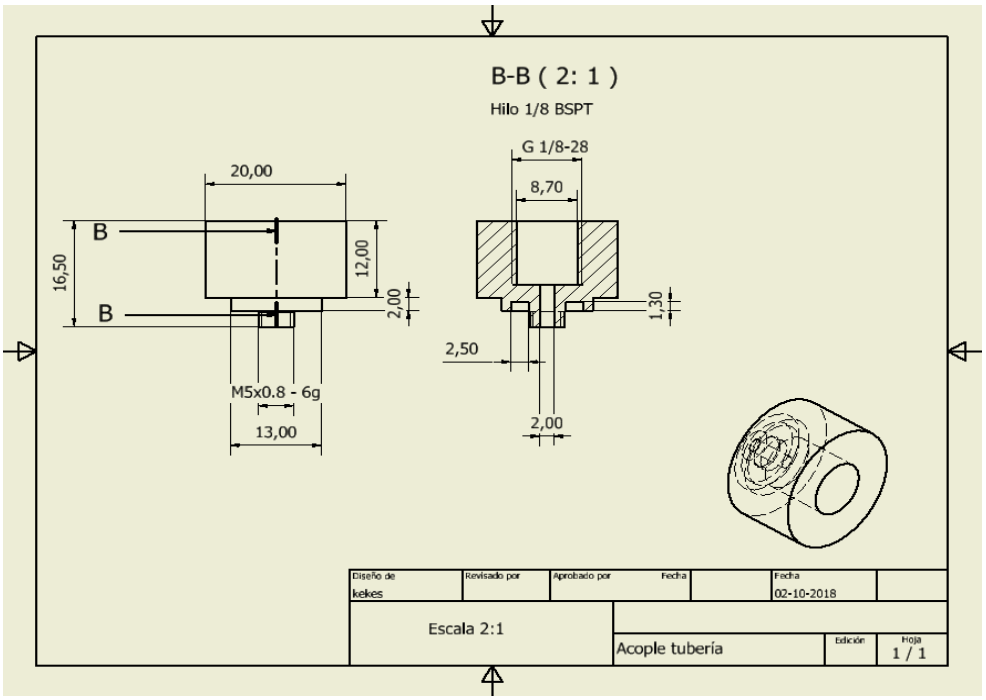


Figura 10-21 Planos de la pieza diseñada para las tomas de presión.

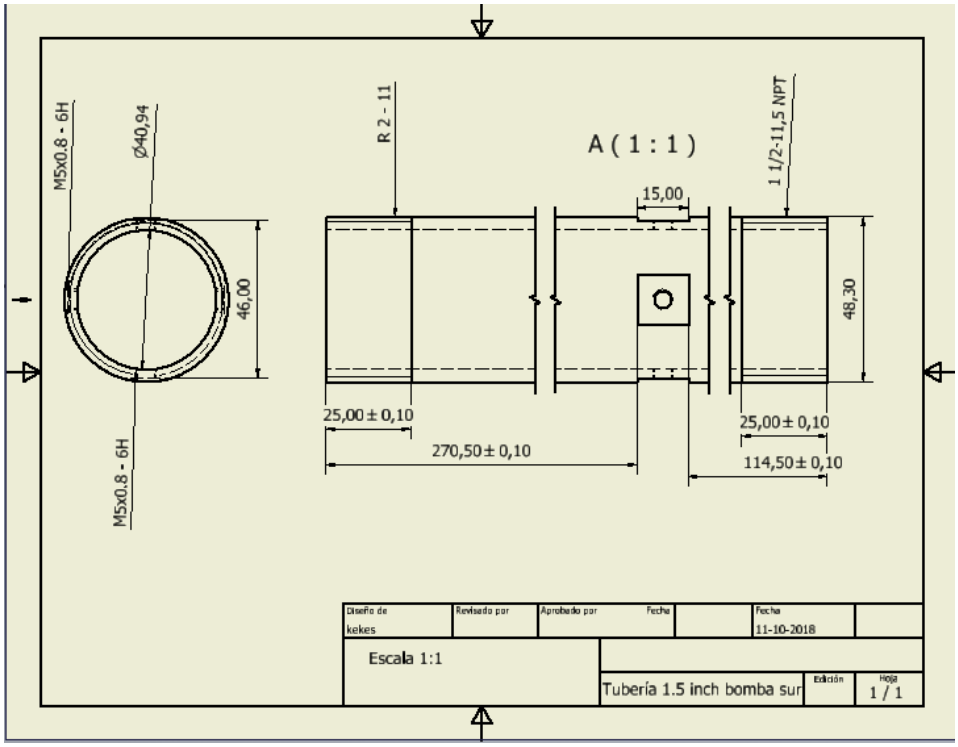


Figura 10-22 Planos de la nueva tubería descarga de la bomba sur.

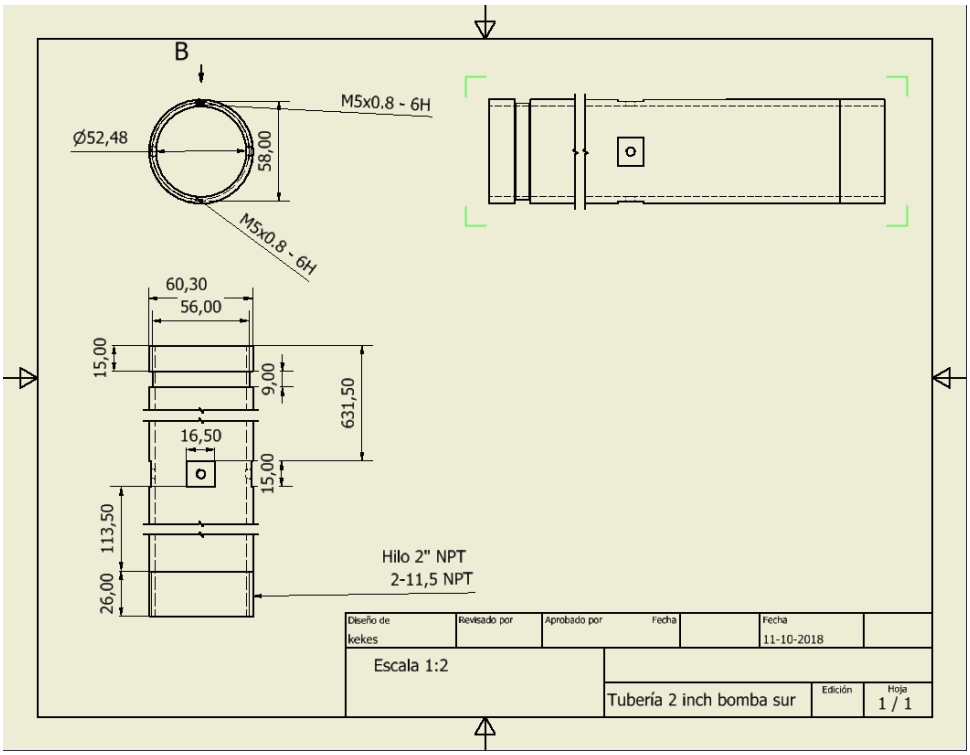


Figura 10-23: Planos de la nueva tubería de succión de la bomba sur.

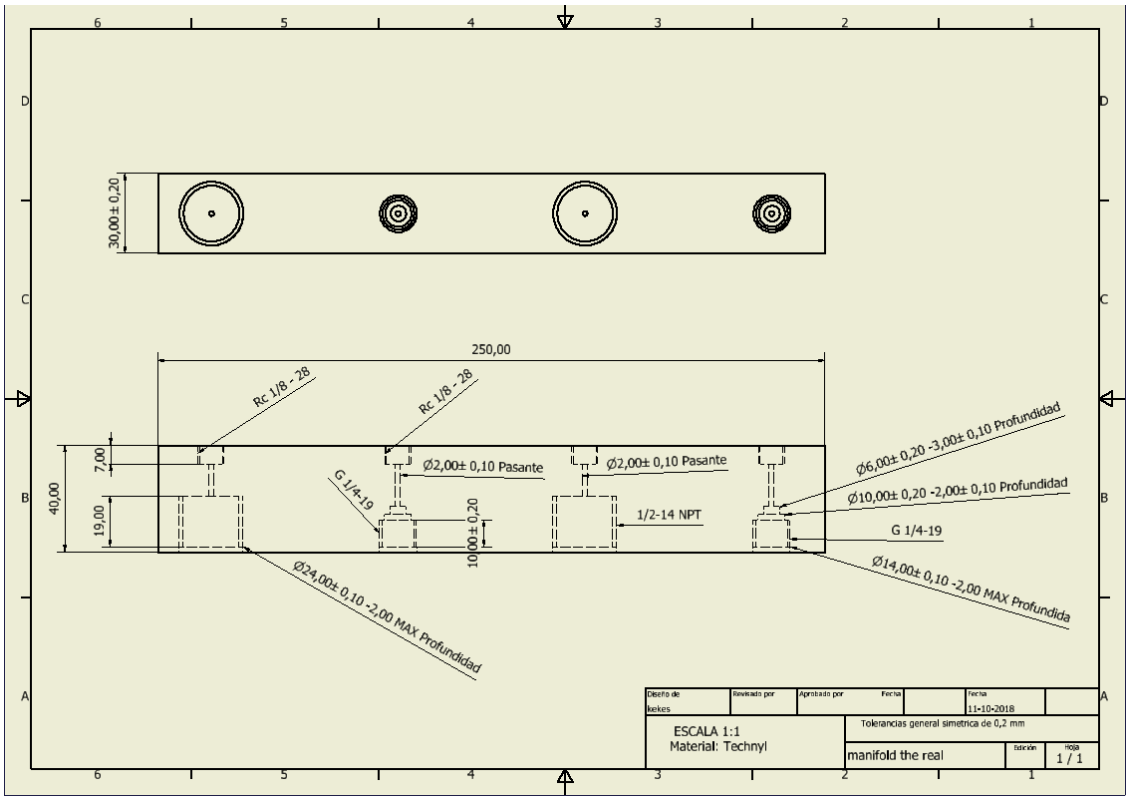


Figura 10-24 Planos Manifold diseñado para tomas de presión.

10.2.2 ANEXO D-2

10.2.2.1 CODIGO DE "tomadedatos" (LabJack).

```
function A= toma_datos(tiempomuestra)
clc
clear
variabletiempo= (tiempomuestra*1000)/1.7;
format long;
% Make the UD .NET assembly visible in MATLAB.
ljasm = NET.addAssembly('LJUDDotNet');
ljudObj = LabJack.LabJackUD.LJUD;

try

   % Open the first found LabJack U3.
   [ljerror, ljhandle] = ljudObj.OpenLabJackS('LJ_dtU3', 'LJ_ctUSB', '0', true, 0);

   % Start by using the pin_configuration_reset IOType so that all pin
   % assignments are in the factory default condition.
   ljudObj.ePutS(ljhandle, 'LJ_ioPIN_CONFIGURATION_RESET', 0, 0, 0);

   %Set the timer/counter on FIO4
    ljudObj.AddRequestSS(ljhandle, 'LJ_ioPUT_CONFIG', 'LJ_chTIMER_COUNTER_PIN_OFFSET', 4, 0, 0);
   % Use the 48 MHz timer clock base with divider (LJ_tc48MHZ_DIV).  Since we are using clock with divisor
   % support, Counter0 is not available.
   LJ_tc48MHZ_DIV = ljudObj.StringToConstant('LJ_tc48MHZ_DIV');
   ljudObj.AddRequestSS(ljhandle, 'LJ_ioPUT_CONFIG', 'LJ_chTIMER_CLOCK_BASE', LJ_tc48MHZ_DIV, 0, 0);
   ljudObj.AddRequestSS(ljhandle, 'LJ_ioPUT_CONFIG', 'LJ_chTIMER_CLOCK_DIVISOR', 48, 0, 0);


   % Enable 1 timer. It will use FIO4.
   ljudObj.AddRequestSS(ljhandle, 'LJ_ioPUT_CONFIG', 'LJ_chNUMBER_TIMERS_ENABLED', 1, 0, 0);


   % Configure Timer0 as 8-bit PWM (LJ_tmPWM8). Frequency will be 1M/256 = 3906 Hz.
   LJ_tmPWM8 = ljudObj.StringToConstant('LJ_tmPWM8');
   ljudObj.AddRequestS(ljhandle, 'LJ_ioPUT_TIMER_MODE', 0, LJ_tmPWM8, 0, 0);
   ljudObj.AddRequestS(ljhandle, 'LJ_ioPUT_TIMER_VALUE', 0, 32768, 0, 0);



      ljudObj.AddRequestS(ljhandle, 'LJ_ioPUT_COUNTER_ENABLE', 1, 1, 0, 0);


   %ENTRADAS ANALOGICAS

   ljudObj.AddRequestS(ljhandle, 'LJ_ioGET_AIN', 0, 0, 0, 0);
   ljudObj.AddRequestS(ljhandle, 'LJ_ioGET_AIN', 1, 0, 0, 0);
   ljudObj.AddRequestS(ljhandle, 'LJ_ioGET_AIN', 2, 0, 0, 0);
   ljudObj.AddRequestS(ljhandle, 'LJ_ioGET_AIN', 3, 0, 0, 0);

   LJ_ioGET_AIN = ljudObj.StringToConstant('LJ_ioGET_AIN');
   LJ_ioGET_AIN_DIFF = ljudObj.StringToConstant('LJ_ioGET_AIN_DIFF');
```

```
LJ_ioGET_DIGITAL_BIT = ljudObj.StringToConstant('LJ_ioGET_DIGITAL_BIT');
LJ_ioGET_DIGITAL_PORT = ljudObj.StringToConstant('LJ_ioGET_DIGITAL_PORT');
LJ_ioGET_COUNTER = ljudObj.StringToConstant('LJ_ioGET_COUNTER');
LJE_NO_MORE_DATA_AVAILABLE = ljudObj.StringToConstant('LJE_NO_MORE_DATA_AVAILABLE');

[ljerror, dblValue] = ljudObj.eGetS(ljhandle, 'LJ_ioGET_COUNTER', 1, 0, 0);
ljudObj.GoOne(ljhandle);


A(6,6)=0;
requestedExit = false;
tiempo0 = 0;
tiempo1= 0;
str = 1;

while requestedExit == false
   ljudObj.GoOne(ljhandle);
   tiempo1 = tiempo0 + tiempo1;
   [ljerror, ioType, channel, dblValue, dummyInt, dummyDbl] = ljudObj.GetFirstResult(ljhandle, 0, 0, 0, 0,
0);
   finished = false;
   while finished == false
      switch ioType
         case LJ_ioGET_AIN
            switch int32(channel)
               case 0
                  value0 = dblValue;
               case 1
                  value1 = dblValue;
               case 2
                  value2 = dblValue;
               case 3
                  value3 = dblValue;
            end

         case LJ_ioGET_COUNTER
            tiempo0 = dblValue;

         case LJ_ioGET_DIGITAL_BIT
            valueDIBit = dblValue;
         case LJ_ioGET_DIGITAL_PORT
            valueDIPort = dblValue;
      end


      try
         [ljerror, ioType, channel, dblValue, dummyInt, dummyDbl] = ljudObj.GetNextResult(ljhandle, 0, 0, 0,
0, 0);
      catch e
         if(isa(e, 'NET.NetException'))
            eNet = e.ExceptionObject;
            if(isa(eNet, 'LabJack.LabJackUD.LabJackUDException'))
```

```
                if(int32(eNet.LJUDError) == LJE_NO_MORE_DATA_AVAILABLE)
                    finished = true;
                end
            end
        end

        if(finished == false)
            throw(e)
        end
    end
end

%disp([num2str(str)]) (Para ver mientras itera elprograma)

A(str,1)= str;
A(str, 2)= value0;
A(str, 3)= value1;
A(str, 4)= value2;
%A(str, 5)= value3;  ( desactivada)
A(str, 6)= tiempo1*(1/3906);

% variables a leer

str = str + 1;
if(str == variabletiempo)
    requestedExit = true;
end
end

catch e
    showErrorMessage(e)
end
disp 'fin'

end
```

10.2.2.2 CODIGO DE PROGRAMA "calculodedatos".

```
% cálculo de fluctuaciones, errores, y curva de bomba.
clc
clear all
close all

format long

DAQ=menu('Sistema de adquisición','LabJack(0)','PLC(1)');


if DAQ == 1
   archivo= input('Nombre del archivo para calcular:','s');
   n=input('Porcentaje de apertura de válvula para lectura de revoluciones: ');
   A= csvread(archivo);
   rpmlj(n);
   escaladolj(A);
else
   s1= 'D:\MATLAB INS\bin\';
   s2= input('Nombre del archivo para calcular:','s');
   s = strcat(s1,s2);
   filename = s;
   delimiter = ';';
   formatSpec = '%f%f%f%f%[^\n\r]';
   fileID = fopen(filename,'r','n','UTF-8');
   fseek(fileID, 3, 'bof');
   dataArray = textscan(fileID, formatSpec, 'Delimiter', delimiter, 'TextType', 'string',  'ReturnOnError', false);
   A = [dataArray{1:end-1}];
   clearvars filename delimiter formatSpec fileID dataArray ans;
   n=input('Porcentaje de apertura de válvula para lectura de revoluciones: ');
   rpmplc(n);
   escaladoplc(A);
end

diametros();

ealt(ESCA);

Vin= velocidad(Q,A2f);

Vout= velocidad(Q,A15f);

fluctuacion(ESCA,rpm,A2f,A15f);

esistematico(ESCA,A2f,A15f,rpm);

alturabomba(Ps,Pd,Vin,Vout,rpm);

%perdidas(Q,Ds,Dd,Vin,Vout);

hq2900rpm(Hg,Q,rpm);

disp('');
```

```
disp('A continuación se muestran las fluctuaciones. Las columnas 1,2,3,4 y 5 muestran las variables
Q,Hdif,Hd,Hs y rpm');
disp(' mientras que las filas 1,2 y 3 enseñan el valor promedio, % amplitud superior y % amplitud inferior')
disp('')
disp(FLU);
disp('');

disp(' A continuación se puede ver el error sistemático')
disp(' En las columnas 1,2,3 y 4 se puede los valores de Hs,Hd,Hdif y Q')
disp(' La fila 1 muestra su valor promedio , la 2 el error sistemático asociado al valor calculado, y la fila 3 el
error sistematico porcentual')
disp('')
disp(Es);

disp('Los valores de H y Q calculados para la velocidad de rotación nominal de 2900 RPM es')

HQp=[HQ(1,1),HQ(2,1)]

disp(' Y su incertidumbre general de medición para la altura y caudal es')

HQe=[HQ(1,4),HQ(2,4)]

QPOR=(HQ(2,4)/HQ(2,1))*100;
HPOR=(HQ(1,4)/HQ(1,1))*100;
POR=[HPOR,QPOR];

disp('Porcentualmente el valor equivalente es :%')

disp(POR);


disp('Las pérdidas de carga son');

%disp(Hjs);

%disp(Hjd);
```

10.2.2.3 FUNCIONES EXTRAS USADAS EN "calculodedatos".

```
function B = escaladoplc(A)
format long;
B=A;
B(:,2)=((B(:,2)*(16/27648))-1)*100000;
B(:,3)=(B(:,3)*(10/27648))*100000;
B(:,4)=(B(:,4)*(60/27648));

assignin('base','ESCA',B)


function C = escaladolj(A)
format long;
C=A;
C(:,2)=(((C(:,2)+1.84)*(16/-7.36))-1)*100000;
C(:,3)=((C(:,3)+1.84)*(10/-7.36))*100000;
C(:,4)=((C(:,4)+1.84)*(60/-7.36));

assignin('base','ESCA',C)


function V = velocidad(Q,Area)
caudal=Q;
Qprom=caudal(1,1);
esq=caudal(2,1);
erq=caudal(3,1);
etq=caudal(4,1);



A=Area;
Aprom=A(1,1);
esa=A(2,1);
era=A(3,1);
eta=A(4,1);


Vprom=(Qprom/Aprom)/(3600);

Evs=Vprom*sqrt(((esq/Qprom)^2)+(esa/Aprom)^2);
Evr=Vprom*sqrt(((erq/Qprom)^2)+(era/Aprom)^2);
Evt=Vprom*sqrt(((etq/Qprom)^2)+(eta/Aprom)^2);

V=[Vprom;Evs;Evr;Evt];
assignin('base','Velo',V)
end
```

```
function [xprom,et] = ealt(A)
format long
c1 = A(:,2);
xprom1 = mean(c1);
desv1 = std(c1);
n1= length(c1);
er1 =(2.09*desv1)/(xprom1*sqrt(n1));

es1=0.08*100000;
et1=sqrt(er1^2+es1^2);
Ps=[xprom1;es1;er1;et1];
assignin('base','Ps',Ps)

c2 = A(:,3);
xprom2 = mean(c2);
desv2 = std(c2);
n2= length(c2);
er2 =(2.09*desv2)/(xprom2*sqrt(n2));

es2=0.1*100000;
et2=sqrt(er2^2+es2^2);
Pd=[xprom2;es2;er2;et2];
assignin('base','Pd',Pd)

c3 = A(:,4);
xprom3 = mean(c3);
desv3 = std(c3);
n3= length(c3);
er3 =(2.09*desv3)/(xprom3*sqrt(n3));

es3=0.005*xprom3;
et3=sqrt(er3^2+es3^2);
Q=[xprom3;es3;er3;et3];
assignin('base','Q',Q)


end


function y = diametros()
D2in=[52.89;52.74;53.19;52.92;52.74];
D2prom=mean(D2in);
D2prom2=D2prom/1000;%m
D2desv=std(D2in);
n2=length(D2in);
er2 =((2.78*D2desv)/(D2prom*sqrt(n2)))/(1000);%
es2=(0.01)/(1000); % m
et2=sqrt(er2^2+es2^2);% m
D2=[D2prom;D2desv;er2;et2];
A2prom=((pi*D2prom2^2)/4);%m
A2prom2=((pi*D2prom^2)/4);%mm
```

```
A2er=((A2prom*2*er2)/(D2prom2));
A2es=((A2prom*2*es2)/(D2prom2));
A2et=((A2prom*2*et2)/(D2prom2));

A2f=[A2prom;A2es;A2er;A2et];



D15in=[41.03;41.16;40.76;41.23;41.36];
D15prom=mean(D15in);
D15prom2=D15prom/1000;%m

D15desv=std(D15in);
n15=length(D15in);

er15 =((2.78*D15desv)/(D15prom*sqrt(n15)))/(1000);
es15=0.01/(1000);
et15=sqrt(er15^2+es15^2);%m

D15=[D15prom;D15desv;er15;et15];

A15prom=((pi*D15prom^2)/4);%mm
A15prom2=((pi*D15prom2^2)/4);%m

A15es=((A15prom2*2*es15)/(D15prom2));
A15er=((A15prom2*2*er15)/(D15prom2));
A15et=((A15prom2*2*et15)/(D15prom2));

A15f=[A15prom2;A15es;A15er;A15et];


assignin('base','A2f',A2f)
assignin('base','A15f',A15f)

assignin('base','Ds',D2prom2)
assignin('base','Dd',D15prom2)
end


function H = alturabomba(Ps,Pd,Vin,Vout,rpm)
format short

RPMprom=mean(rpm);
esrpm=0.0005*RPMprom;
RPMdesv= std(rpm);
nrpm= length(rpm);
errpm =(4.3*RPMdesv)/(RPMprom*sqrt(nrpm));
etrpm=sqrt(esrpm^2+errpm^2);

rho=1000;
etrho=5;

g=9.794099;
```

```
etg=0.000037;

%componente presión

esps=Ps(2,1);
erps=Ps(3,1);
etps=Ps(4,1);

espd=Pd(2,1);
erpd=Pd(3,1);
etpd=Pd(4,1);

ppromsuc=Ps(1,1);
ppromdes=Pd(1,1);

Pprom=ppromdes-ppromsuc;

esp=sqrt(esps^2+espd^2);
erp=sqrt(erps^2+erpd^2);
etp=sqrt(etps^2+etpd^2);

Cpp= (Pprom/(rho*g));

escpp=Cpp*sqrt(((etrho/rho)^2)+(etg/g)^2+(esp/Pprom)^2);
ercpp=Cpp*sqrt(((etrho/rho)^2)+(etg/g)^2+(erp/Pprom)^2);
etcpp=Cpp*sqrt(((etrho/rho)^2)+(etg/g)^2+(etp/Pprom)^2);

CP=[Cpp;escpp;ercpp;etcpp];
assignin('base','CP',CP)

% componente velocidad

Vinprom=Vin(1,1);
Voutprom=Vout(1,1);
Vdif= Voutprom-Vinprom;

esvin=Vin(2,1);
ervin=Vin(3,1);
etvin=Vin(4,1);

esvout=Vout(2,1);
ervout=Vout(3,1);
etvout=Vout(4,1);

esvdif=sqrt(esvin^2+esvout^2);
ervdif=sqrt(ervin^2+ervout^2);
etvdif=sqrt(etvin^2+etvout^2);


Cvp= ((Vdif)^2)/(2*g);

escvp= Cvp*sqrt(((2*esvdif/Vdif)^2)+(etg/g)^2);
ercvp= Cvp*sqrt(((2*ervdif/Vdif)^2)+(etg/g)^2);
```

```
etcvp= Cvp*sqrt(((2*etvdif/Vdif)^2)+(etg/g)^2);


CV=[Cvp;escvp;ercvp;etcvp];
assignin('base','CV',CV)
%Componente altura

Deltaz=0;

esz=0.02;
erz=0.01;
etz= 0.03;

CZ=[Deltaz;esz;erz;etz];
assignin('base','CZ',CZ)

%Altura general

Hprom= Cpp+Cvp+Deltaz;

esh= sqrt(escpp^2+escvp^2+esz^2);
erh= sqrt(ercpp^2+ercvp^2+erz^2);
eth= sqrt(etcpp^2+etcvp^2+etz^2);

Hg=[Hprom;esh;erh;eth];

assignin('base','Hg',Hg)

end


function H = hq2900rpm(H,Q,n)
format short
Nnominal=2900;
nprom =mean(n);
RPMdesv= std(n);
nrpm= length(n);

esn=0.0005*nprom;
ern =(4.3*RPMdesv)/(nprom*sqrt(nrpm));
etn=sqrt(esn^2+ern^2);

Qprom=Q(1,1);

esq= Q(2,1);
erq= Q(3,1);
etq= Q(4,1);

Hprom= H(1,1);

esh=H(2,1);
erh=H(3,1);
eth=H(4,1);
```

```
Q2900=Qprom*(Nnominal/nprom);

esqn= Q2900*sqrt(((esq/Qprom)^2)+(esn/nprom)^2);
erqn= Q2900*sqrt(((erq/Qprom)^2)+(ern/nprom)^2);
etqn= Q2900*sqrt(((etq/Qprom)^2)+(etn/nprom)^2);

H2900= Hprom*((Nnominal/nprom)^2);

eshn= H2900*sqrt(((esh/Hprom)^2)+(2*esn/nprom)^2);
erhn= H2900*sqrt(((erh/Hprom)^2)+(2*ern/nprom)^2);
ethn= H2900*sqrt(((eth/Hprom)^2)+(2*etn/nprom)^2);

MA=[H2900,eshn,erhn,ethn;Q2900,esqn,erqn,etqn];

assignin('base','HQ',MA)
end


function W = fluctuacion(A,rpm,A2,A15)
format short
Psprom= mean(A(:,2));
Pdprom=mean(A(:,3));
Qprom=mean(A(:,4));
rpmprom= mean(rpm);
Area2=A2(1,1);
Area15=A15(1,1);

T=A(:,6);
Tprom=mean(T);

Q= A(:,4);
Vin=(Q/Area2)/3600;
Vout=(Q/Area15)/3600;

Vinprom=mean(Vin);
Voutprom=mean(Vout);

Pdif= A(:,3)-A(:,2);
Pdifprom= mean(Pdif);

Hdif= (Pdif)/(1000*9.794099)+(((Vout-Vin).^2)/(2*9.794099));
assignin('base','Hdif',Hdif)

Hs=((A(:,2))/(9.794099*1000))+(((Vin).^2)/(2*9.794099));

Hd=((A(:,3))/(9.794099*1000))+(((Vout).^2)/(2*9.794099));


Hsprom= (Psprom/(1000*9.794099))+(((Vinprom)^2)/(2*9.794099));
Hdprom= (Pdprom/(1000*9.794099))+(((Voutprom)^2)/(2*9.794099));
Hdifprom= (Pdifprom/(1000*9.794099))+(((Voutprom-Vinprom)^2)/(2*9.794099));
```

```
Amplitudmaxrpm= max(rpm)-rpmprom;
AmplitudmaxQ= max(A(:,4))-Qprom;
AmplitudmaxHs= max(Hs)-Hsprom;
AmplitudmaxHd= max(Hd)-Hdprom;
AmplitudmaxHdif= max(Hdif)-Hdifprom;

Amplitudminrpm= rpmprom - min(rpm);
AmplitudminQ= Qprom - min(A(:,4));
AmplitudminHs= Hsprom - min(Hs);
AmplitudminHd= Hdprom-min(Hd);
AmplitudminHdif= Hdifprom-min(Hdif);

Amplitudmaxrpmp= ((max(rpm)-rpmprom)/(rpmprom))*100;
AmplitudmaxQp= ((max(Q)-Qprom)/Qprom)*100;
AmplitudmaxHsp= ((max(Hs)-Hsprom)/Hsprom)*100;
AmplitudmaxHdp= ((max(Hd)-Hdprom)/Hdprom)*100;
AmplitudmaxHdifp= ((max(Hdif)-Hdifprom)/Hdifprom)*100;

Amplitudminrpmp= ((rpmprom - min(rpm))/rpmprom)*100;
AmplitudminQp= ((Qprom - min(Q))/Qprom)*100;
AmplitudminHsp= ((Hsprom - min(Hs))/Hsprom)*100;
AmplitudminHdp= ((Hdprom-min(Hd))/Hdprom)*100;
AmplitudminHdifp= ((Hdifprom-min(Hdif))/Hdifprom)*100;



FLU=
[Qprom,Hdifprom,Hdprom,Hsprom,rpmprom;AmplitudmaxQp,AmplitudmaxHdifp,AmplitudmaxHdp,Amplit
udmaxHsp,Amplitudmaxrpmp;AmplitudminQp,AmplitudminHdifp,AmplitudminHdp,AmplitudminHsp,Amplit
udminrpmp];
FLU2=[Qprom,Hdifprom,Hdprom,Hsprom,rpmprom;AmplitudmaxQp,AmplitudmaxHdifp,AmplitudmaxHdp,A
mplitudmaxHsp,Amplitudmaxrpmp;AmplitudminQp,AmplitudminHdifp,AmplitudminHdp,AmplitudminHsp,A
mplitudminrpmp];

assignin('base','FLU',FLU)% Valor porcentual

assignin('base','FLU2',FLU2) % Valor numérico
end



function Es = esistematico(A,Ain,Aout,n)
format short
Q= A(:,4);
Ps=A(:,2);
Pd=A(:,3);
rho=1000;
g=9.794099;
```

```
Psprom= mean(Ps);
Pdprom=mean(Pd);
Qprom= mean(Q);
Ainprom=Ain(1,1);
Aoutprom=Aout(1,1);

Vin=(Q/Ainprom)/3600;
Vout=(Q/Aoutprom)/3600;

eAin= Ain(2,1);
eAout= Aout(2,1);

Vinprom= mean(Vin);

Voutprom= mean(Vout);

Vdif=Voutprom-Vinprom;

cpin=(Psprom/(rho*g));
cvin=((Vinprom^2)/(2*g));
Hinprom= cpin+cvin;


cpout=(Pdprom/(rho*g));
cvout=((Voutprom^2)/(2*g));
Houtprom=cpout+cvout;

cpdif=(Pdprom-Psprom)/(rho*g);
cvdif=((Vdif)^2/(2*g));
Hdifprom= cpdif+cvdif;


espd=0.1*100000;%precisión de los sensores descarga
esps=0.08*100000;%precisión de los sensores descarga
esrho=1;
esg=0.000037;
esq=0.005*Qprom;


evin= Vinprom*sqrt((esq/Qprom)^2+(eAin/Ainprom)^2);
evout= Voutprom*sqrt((esq/Qprom)^2+(eAout/Aoutprom)^2);

escpin=cpin*sqrt((esps/Psprom)^2 +(esrho/rho)^2+(esg/g)^2);
escvin=cvin*sqrt((2*evin/Vinprom)^2 +(esg/g)^2);


esHin= sqrt(escpin^2+escvin^2);

escpout=cpout*sqrt((espd/Pdprom)^2 +(esrho/rho)^2+(esg/g)^2);
escvout=cvout*sqrt((2*evout/Voutprom)^2 +(esg/g)^2);
```

```
esHout= sqrt(escpout^2+escvout^2);

esHdif= sqrt(esHout^2+esHin^2);

esq=0.005*Qprom;

Esqp= (esq/Qprom)*100;
Eship=(esHin/Hinprom)*100;
Eshop=(esHout/Houtprom)*100;
Eshdifp=(esHdif/Hdifprom)*100;


OUT= [Hinprom,Houtprom,Hdifprom,Qprom;esHin,esHout,esHdif,esq;Eship,Eshop,Eshdifp,Esqp];

assignin('base','Es',OUT)


Nnominal=2900;
nprom =mean(n);
RPMdesv= std(n);
nrpm= length(n);

esn=0.0005*nprom;
ern =(4.3*RPMdesv)/(nprom*sqrt(nrpm));
etn=sqrt(esn^2+ern^2);

Q2900=Qprom*(Nnominal/nprom);

esqn= Q2900*sqrt(((esq/Qprom)^2)+(esn/nprom)^2);

H2900= Hdifprom*((Nnominal/nprom)^2);

ethn= H2900*sqrt(((esHdif/Hdifprom)^2)+(2*etn/nprom)^2);


end

%revoluciones LJ por punto
function R= rpmlj(n)

if n ==100
   rpm=[2889;2885;2886];
elseif n ==75
   rpm=[2885;2885;2886];
elseif n==50
   rpm=[2885;2885;2884];
elseif n==42
   rpm=[2884;2883;2883];
elseif n==35
   rpm=[2884;2882;2883];
elseif n==30
   rpm=[2881;2881;2882];
elseif n==26
```

```
   rpm=[2881;2880;2881];
elseif n==15
   rpm=[2880;2880;2879];
else
   rpm=[2879;2879;2879];
end

assignin('base','rpm',rpm)

end


%revoluciones de PLC punto a punto

function QE= rpmplc(n)

if n ==100
   rpm=[2884;2884;2884];
elseif n ==75
   rpm=[2883;2884;2884];
elseif n==50
   rpm=[2884;2883;2884];
elseif n==42
   rpm=[2883;2883;2883];
elseif n==35
   rpm=[2882;2882;2883];
elseif n==30
   rpm=[2881;2882;2881];
elseif n==26
   rpm=[2880;2880;2881];
elseif n==15
   rpm=[2879;2880;2879];
else
   rpm=[2879;2879;2879];
end

assignin('base','rpm',rpm)

end
```

10.2.3 ANEXO B-3 (Calculo de pérdidas de carga)

A continuación, se deja el cálculo de pérdidas de carga máximas para el caudal de 24 $\frac{m^3}{h}$, siendo el mayor caudal que se puede obtener por condiciones del sistema.

$$Q = 24 \left[\frac{m^3}{h}\right] = 0.067 \ \frac{m^3}{s}$$

$$L_s = 0.13 \ [m]$$

$$L_d = 0.10 \ [m]$$

$$U_d = 5 \ [\frac{m}{s}]$$

$$U_s = 3 \ [\frac{m}{s}]$$

$$Re = \frac{U * D * \rho}{\mu} \ [-]$$

Utilizamos el coeficiente de perdida de carga dado por la Norma para una tubería de acero galvanizado $k = 0.15 \ [mm]$ y viscosidad dinámica promedio para el agua a 20 [°C] de 0.001 $[\frac{kg}{m*s}]$, obtenemos los siguientes números de Reynolds para la succión y descarga:

$$Re_s = 1.57 * 10^5 \ [-]$$

$$Re_d = 2.00 * 10^5 \ [-]$$

Al utilizar la **ecuación 1.26** obtenemos lo siguientes resultados:

$$\lambda_s = 0.0266$$

$$\lambda_d = 0.0283$$

Al remplazar los valores obtenidos en la **ecuación 1.25**, obtenemos los siguientes valores:

$$H_{js} = 0.027 \ [m]$$

$$H_{jd} = 0.084 \ [m]$$

10.3 ANEXO C

10.3.1 ANEXO C-1 (Tabla de cálculos LABJACK)

Válvula 15 %	Q [m3/h]	Diferencia Altura[m]	Altura Descarga[m]	Altura Succión[m]	Revoluciones [rpm]
Valor promedio	2.3	37.1	36.3	-0.7	2879
Amplitud fluctuación Superior [%]	10.2	2.8	2.6	33.2	0.1
Amplitud fluctuación Inferior [%]	11.0	1.9	1.5	44.2	0.1
Es [%]	0.5	3.5	2.8	113	0.1
Fluctuación norma grado 1 [%]	±2	±3	±2	±2	±0.5
Fluctuación norma grado 2 [%]	±3	±4	±3	±3	±1
Fluctuación norma grado 3 [%]	±6	±10	±6	±6	±2

Tabla 22 Fluctuaciones y error sistemático para medición punto 1 LabJack.

Válvula 26%	Q [m3/h]	Diferencia Altura[m]	Altura Descarga[m]	Altura Succión[m]	Revoluciones [rpm]
Valor promedio	6.6	37.4	36.5	-1.0	2880
Amplitud fluctuación Superior [%]	4.4	2.3	2.1	33.0	0.1
Amplitud fluctuación Inferior [%]	4.9	2.2	2.0	33.6	0.1
Es [%]	0.5	3.5	2.8	81.0	0.1
Fluctuación norma grado 1 [%]	±2	±3	±2	±2	±0.5
Fluctuación norma grado 2 [%]	±3	±4	±3	±3	±1
Fluctuación norma grado 3 [%]	±6	±10	±6	±6	±2

Tabla 23 :Fluctuaciones y error sistemático para medición punto 2 LabJack

Válvula 30%	Q [m3/h]	Diferencia Altura[m]	Altura Descarga[m]	Altura Succión[m]	Revoluciones [rpm]
Valor promedio	8.9	36.5	36.5	-1.3	2881
Amplitud fluctuación Superior [%]	3.0	1.7	1.7	21.6	0.1
Amplitud fluctuación Inferior [%]	3.9	2.2	2.2	23.3	0.1
Es [%]	0.5	3.5	2.8	65.3	0.1
Fluctuación norma grado 1 [%]	±2	±3	±2	±2	±0.5
Fluctuación norma grado 2 [%]	±3	±4	±3	±3	±1
Fluctuación norma grado 3 [%]	±6	±10	±6	±6	±2

Tabla 24:Fluctuaciones y error sistemático para medición punto 3 LabJack

Válvula 35%	Q [m3/h]	Diferencia Altura[m]	Altura Descarga[m]	Altura Succión[m]	Revoluciones [rpm]
Valor promedio	11.9	37.503	35.764	-1.6	2883
Amplitud fluctuación Superior [%]	2.2	1.8	1.6	15.2	0.1
Amplitud fluctuación Inferior [%]	2.3	2.1	1.9	19.5	0.1
Es [%]	0.5	3.5	2.8	50.3	0.1
Fluctuación norma grado 1 [%]	±2	±3	±2	±2	±0.5
Fluctuación norma grado 2 [%]	±3	±4	±3	±3	±1
Fluctuación norma grado 3 [%]	±6	±10	±6	±6	±2

Tabla 25: Fluctuaciones y error sistemático para medición punto 4 LabJack

Válvula 42 %	Q [m3/h]	Diferencia Altura[m]	Altura Descarga[m]	Altura Succión[m]	Revoluciones [rpm]
Valor promedio	16.0	36.7	34.6	-2.4	2885
Amplitud fluctuación Superior [%]	2.4	2.6	2.6	12.9	0.1
Amplitud fluctuación Inferior [%]	2.5	2.2	2.1	11.0	0.1
Es [%]	0.5	3.6	3.0	34.4	0.1
Fluctuación norma grado 1 [%]	±2	±3	±2	±2	±0.5
Fluctuación norma grado 2 [%]	±3	±4	±3	±3	±1
Fluctuación norma grado 3 [%]	±6	±10	±6	±6	±2

Tabla 26: Fluctuaciones y error sistemático para medición punto 5 LabJack

Válvula 50 %	Q [m3/h]	Diferencia Altura[m]	Altura Descarga[m]	Altura Succión[m]	Revoluciones [rpm]
Valor promedio	19.1	35.6	32.8	-3.1	2885
Amplitud fluctuación Superior [%]	1.4	2.3	2.60	11.0	0.1
Amplitud fluctuación Inferior [%]	1.4	1.9	2.00	10.7	0.1
Es [%]	0.5	3.7	3.1	26.3	0.1
Fluctuación norma grado 1 [%]	±2	±3	±2	±2	±0.5
Fluctuación norma grado 2 [%]	±3	±4	±3	±3	±1
Fluctuación norma grado 3 [%]	±6	±10	±6	±6	±2

Tabla 27: Fluctuaciones y error sistemático para medición punto 6 LabJack.

Válvula 75 %	Q [m3/h]	Diferencia Altura[m]	Altura Descarga[m]	Altura Succión[m]	Revoluciones [rpm]
Valor promedio	22.6	33.3	29.9	-4.0	2885
Amplitud fluctuación Superior [%]	1.3	2.0	1.8	8.0	0.1
Amplitud fluctuación Inferior [%]	1.4	1.9	2.0	8.9	0.1
Es [%]	0.5	3.9	3.4	20.5	0.1
Fluctuación norma grado 1 [%]	±2	±3	±2	±2	±0.5
Fluctuación norma grado 2 [%]	±3	±4	±3	±3	±1
Fluctuación norma grado 3 [%]	±6	±10	±6	±6	±2

Tabla 28: Fluctuaciones y error sistemático para medición punto 7 LabJack.

Válvula 100 %	Q [m3/h]	Diferencia Altura[m]	Altura Descarga[m]	Altura Succión[m]	Revoluciones [rpm]
Valor promedio	23.4	32.6	29.0	-4.2	2887
Amplitud fluctuación Superior [%]	1.3	1.8	1.9	8.4	0.1
Amplitud fluctuación Inferior [%]	1.5	2.3	2.2	7.5	0.1
Es [%]	0.5	4.0	3.5	19.4	0.1
Fluctuación norma grado 1 [%]	±2	±3	±2	±2	±0.5
Fluctuación norma grado 2 [%]	±3	±4	±3	±3	±1
Fluctuación norma grado 3 [%]	±6	±10	±6	±6	±2

Tabla 29: Fluctuaciones y error sistemático para medición punto 8 LabJack.

10.3.2 ANEXO C-2 (Tablas cálculo PLC)

Válvula 15 %	Q [m3/h]	Diferencia Altura[m]	Altura Descarga[m]	Altura Succión[m]	Revoluciones [rpm]
Valor promedio	2.5	37.4	37.1	-0.3	2879
Amplitud fluctuación Superior [%]	2.4	2.3	2.4	48.7	0.1
Amplitud fluctuación Inferior [%]	4.2	1.3	1.2	141.1	0.1
Es [%]	0.5	3.5	2.8	320.0	0.1
Fluctuación norma grado 1 [%]	±2	±3	±2	±2	±0.5
Fluctuación norma grado 2 [%]	±3	±4	±3	±3	±1
Fluctuación norma grado 3 [%]	±6	±10	±6	±6	±2

Tabla 30:Fluctuaciones y error sistemático para medición punto 1 mediante PLC.

Válvula 26%	Q [m3/h]	Diferencia Altura[m]	Altura Descarga[m]	Altura Succión[m]	Revoluciones [rpm]
Valor promedio	6.9	37.8	37.3	-0.5	2880
Amplitud fluctuación Superior [%]	0.9	1.6	1.5	19.3	0.1
Amplitud fluctuación Inferior [%]	1.6	1.9	1.9	53.5	0.1
Es [%]	0.5	3.5	2.7	150.0	0.1
Fluctuación norma grado 1 [%]	±2	±3	±2	±2	±0.5
Fluctuación norma grado 2 [%]	±3	±4	±3	±3	±1
Fluctuación norma grado 3 [%]	±6	±10	±6	±6	±2

Tabla 31:Fluctuaciones y error sistemático para medición punto 2 mediante PLC.

Válvula 30%	Q [m3/h]	Diferencia Altura[m]	Altura Descarga[m]	Altura Succión[m]	Revoluciones [rpm]
Valor promedio	9.2	38.0	37.3	-0.8	2881
Amplitud fluctuación Superior [%]	0.6	1.7	1.2	20.4	0.1
Amplitud fluctuación Inferior [%]	0.8	1.2	1.2	56.0	0.1
Es [%]	0.5	3.4	2.7	105.5	0.1
Fluctuación norma grado 1 [%]	±2	±3	±2	±2	±0.5
Fluctuación norma grado 2 [%]	±3	±4	±3	±3	±1
Fluctuación norma grado 3 [%]	±6	±10	±6	±6	±2

Tabla 32:Fluctuaciones y error sistemático para medición punto 3 mediante PLC.

Válvula 35%	Q [m3/h]	Diferencia Altura[m]	Altura Descarga[m]	Altura Succión[m]	Revoluciones [rpm]
Valor promedio	12.2	37.9	36.9	-1.2	2882
Amplitud fluctuación Superior [%]	0.5	1.4	1.0	8.0	0.1
Amplitud fluctuación Inferior [%]	0.6	1.1	1.2	33.3	0.1
Es [%]	0.5	3.5	2.8	69.63	0.1
Fluctuación norma grado 1 [%]	±2	±3	±2	±2	±0.5
Fluctuación norma grado 2 [%]	±3	±4	±3	±3	±1
Fluctuación norma grado 3 [%]	±6	±10	±6	±6	±2

Tabla 33:Fluctuaciones y error sistemático para medición punto 4 mediante PLC.

Válvula 42%	Q [m3/h]	Diferencia Altura[m]	Altura Descarga[m]	Altura Succión[m]	Revoluciones [rpm]
Valor promedio	16.3	37.0	35.4	-1.9	2883
Amplitud fluctuación Superior [%]	1.2	1.3	1.2	6.7	0.1
Amplitud fluctuación Inferior [%]	0.9	1.7	1.6	19.8	0.1
Es [%]	0.5	3.5	2.9	43.2	0.1
Fluctuación norma grado 1 [%]	±2	±3	±2	±2	±0.5
Fluctuación norma grado 2 [%]	±3	±4	±3	±3	±1
Fluctuación norma grado 3 [%]	±6	±10	±6	±6	±2

Tabla 34:Fluctuaciones y error sistemático para medición punto 5 mediante PLC.

Válvula 50%	Q [m3/h]	Diferencia Altura[m]	Altura Descarga[m]	Altura Succión[m]	Revoluciones [rpm]
Valor promedio	19.5	35.8	33.6	-2.6	2884
Amplitud fluctuación Superior [%]	0.3	1.5	1.4	5.2	0.1
Amplitud fluctuación Inferior [%]	0.6	1.5	1.3	11.1	0.1
Es [%]	0.5	3.7	3.0	31.3	0.1
Fluctuación norma grado 1 [%]	±2	±3	±2	±2	±0.5
Fluctuación norma grado 2 [%]	±3	±4	±3	±3	±1
Fluctuación norma grado 3 [%]	±6	±10	±6	±6	±2

Tabla 35:Fluctuaciones y error sistemático para medición punto 6 mediante PLC.

Válvula 75 %	Q [m3/h]	Diferencia Altura[m]	Altura Descarga[m]	Altura Succión[m]	Revoluciones [rpm]
Valor promedio	23.0	33.5	30.6	-3.5	2884
Amplitud fluctuación Superior [%]	0.4	1.3	1.3	3.8	0.1
Amplitud fluctuación Inferior [%]	0.6	0.9	0.9	9.0	0.1
Es [%]	0.5	3.9	3.3	23.4	0.1
Fluctuación norma grado 1 [%]	±2	±3	±2	±2	±0.5
Fluctuación norma grado 2 [%]	±3	±4	±3	±3	±1
Fluctuación norma grado 3 [%]	±6	±10	±6	±6	±2

Tabla 36:Fluctuaciones y error sistemático para medición punto 7 mediante PLC.

Válvula 100 %	Q [m3/h]	Diferencia Altura[m]	Altura Descarga[m]	Altura Succión[m]	Revoluciones [rpm]
Valor promedio	23.8	32.8	29.7	-3.7	2884
Amplitud fluctuación Superior [%]	0.3	1.4	1.6	4.9	0.1
Amplitud fluctuación Inferior [%]	0.6	1.2	1.2	8.9	0.1
Es [%]	0.5	4.0	3.4	21.9	0.1
Fluctuación norma grado 1 [%]	±2	±3	±2	±2	±0.5
Fluctuación norma grado 2 [%]	±3	±4	±3	±3	±1
Fluctuación norma grado 3 [%]	±6	±10	±6	±6	±2

Tabla 37:Fluctuaciones y error sistemático para medición punto 8 mediante PLC.