

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
VICEPRESIDENCIA DE INVESTIGACIÓN**



**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS
RENOVABLES**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA HIDRÁULICO DE
BOMBEO POR MULTI ETAPA Y MONITOREADO CON SISTEMA
AUTOMATIZADO EN TIEMPO REAL PARA BOMBAS
SUMERGIBLES**

INVESTIGACIÓN APLICADA

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: HIDRÁULICA

Informe final de Investigación

Presentado por:

Ing. ELMER RODRIGO AQUINO LARICO

Mg. EDDY OLINDA LUDEÑA CUBA

JULIACA – PERÚ

2017

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
VICEPRESIDENCIA DE INVESTIGACIÓN

COMISION ORGANIZADORA

Dr. Edwin Catacora Vidangos
Presidente de la Comisión Organizadora

Dra. Roxana del Carmen Medina Rojas
Vicepresidenta Académica

Dr. Jorge Marcelino Aranibar Aranibar
Vicepresidente de Investigación

DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIÓN

M.Sc. Gustavo Luis Vilca Colquehuanca
Director General de Investigación

EQUIPO DE INVESTIGACIÓN

Ing. Elmer Rodrigo Aquino Larico
Investigador Principal

Mg. Eddy Olinda Ludeña Cuba
Responsable del Equipo de Investigación

Enrique Americo Puraca Calapuja

Luis Miguel Pizarro Ramos

José Felipe Supo Halanoca

Dalthon Valentín Choque Calcina

Gabriel Angel Jordan Curasi

Joel Ivan Choque Huanca

Estudiantes de la UNAJ

DEDICATORIA

Mg. Eddy Olinda:

A mi familia por apoyarme y estar a mi lado en todo momento, ellos son mi inspiración en todo momento.

Ing. Elmer Rodrigo:

A mi querida esposa Karencita y mi linda hija Valeska Killary, por toda la fuerza que me dieron para realizar esta investigación.

A la Universidad Nacional de Juliaca:

Por la gran oportunidad que nos dio al poder desarrollar este proyecto con éxito y concretarlo en hechos para aplicarlo en esta Universidad en beneficio de los estudiantes de Ingeniería en Energías Renovables.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a la Universidad Nacional de Juliaca, por el financiamiento y la oportunidad para poder investigar en esta área de la Ingeniería.

Agradecer a los docentes de la escuela profesional de Ingeniería en Energías Renovables: Dr. Norman Jesús Beltrán Castañón, Ing. Reynaldo Condori Yucra, M. Sc. Alejandro Mateo Salinas Mena.

Agradecer a los estudiantes de la escuela Profesional de Ingeniería en Energías Renovables que participaron en el proyecto de investigación.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
Contenido	
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTOS.....	5
ÍNDICE GENERAL.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS.....	10
RESUMEN.....	11
INTRODUCCIÓN.....	12
CAPITULO I	14
PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN	14
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.1.1 Descripción del Problema.	14
1.1.2 Formulación del problema.	15
1.1.2.1 Problema General:	15
1.1.2.2 Problema Específico:	15
1.2 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	15
1.2.1 Justificación Técnica:.....	16
1.2.2 Justificación Económica:.....	16
1.2.3 Justificación Social:.....	16
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	16
1.3.1 Objetivo General:.....	16
1.3.2 Objetivos Específicos:	17
1.4 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	17
1.4.1 Hipótesis General:.....	17
1.4.2 Hipótesis Específicas:.....	17
1.5 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	18
CAPITULO II	19
MARCO TEÓRICO	19
2.1 ANTECEDENTES	19
2.2 MARCO REFERENCIAL.....	22
2.2.1 Dinámica de Fluidos.	22
2.2.2 Flujo Laminar.	23
2.2.2.1 Flujo Turbulento:.....	23

2.2.2.2	Flujo y Caudal:	23
2.2.3	Maquina Hidráulica.	24
2.2.3.1	Representación de una Turbo maquina:	25
2.2.4	Bombas.	25
2.2.4.1	Elementos Constitutivos:	26
2.2.4.2	Tipos de Bombas:.....	27
2.2.4.3	Altura útil o Efectiva de una Bomba:	30
2.2.4.4	Perdidas de una Bomba:	31
2.2.5	Rodete Impulsor.	32
2.2.5.1	Clasificación de Rodetes:.....	33
2.2.5.2	Número Específico de Revoluciones:	34
2.2.6	Sistema de Control, Supervisión y Monitoreo.....	35
2.2.6.1	Introducción:.....	36
2.2.6.2	Variable Controlada y Manipulada:.....	36
2.2.6.3	Clasificación de un Sistema de Control:	38
2.2.6.4	Modelado de Procesos:.....	41
2.2.6.5	Función de transferencia:.....	42
2.2.6.6	Programación Industrial:	43
CAPITULO III	.....	45
METODOLOGÍA	.....	45
3.1	CARACTERÍSTICA DE LA ZONA.	45
3.1.1	Ámbito de Estudio:	45
3.1.2	Ubicación Geográfica:	45
3.2	PROCEDIMIENTO DEL MÉTODO.	45
3.2.1	Calculo Justificativo del Sistema Hidráulico:.....	45
3.2.2	Modelamiento matemático de la Electrobomba Centrifuga:.....	49
3.2.3	Modelamiento matemático de la Electrobomba Axial:.....	52
3.2.4	Construcción del Módulo Hidráulico:	53
CAPITULO III	.....	56
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	.....	56
4.1	ELECTROBOMBA CENTRIFUGA.	56
4.2	ELECTROBOMBA AXIAL.	58
4.3	DISCUSIÓN.	60
CONCLUSIONES	.....	61
RECOMENDACIONES	.....	62
BIBLIOGRAFÍA	.....	63

ANEXOS..... 64

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	6
Figura 1: Flujo Laminar y Turbulento, (Grubelnik & Marhl, 2005).	23
Figura 2: Flujo Laminar y Turbulento, (Grubelnik & Marhl, 2005).	24
Figura 3: Rodete de una Bomba Centrífuga a).Corte Meridional b).Corte Transversal,(Mataix, 1993).	25
Figura 4: Elementos constructivos de una Bomba Hidráulica (Mataix, 1993).	27
Figura 5: Bomba hidráulica con impulsores multi etapa, Fuente: FRANKLIN ELECTRIC – USA.	29
Figura 6: Bomba hidráulica Centrífuga, Fuente: PEDROLLO – Italia.	29
Figura 7: (Bomba hidráulica Centrífuga, Fuente: PEDROLLO - Italia).	32
Figura 8: Flujo Laminar y Turbulento, (Grubelnik & Marhl, 2005).	33
Figura 09: Clasificación de Rodetes,(Mataix, 1993).	34
Figura 10: Rodete de experimentación,(Liu, Wang, Liu, Yuan, & Wang, 2013).	34
Figura 11: Rodete de experimentación, (Mataix, 1993).	35
Figura 12: Esquema de un sistema de Control, (TECSUP, 2014).	38
Figura 13: Sistema de Control de Procesos, (TECSUP, 2014).	38
Figura 14: Entrada y Salida en un Sistema de Lazo Abierto, (TECSUP, 2014).	39
Figura 15: Sistema de Control de Lazo Abierto en Procesos, (TECSUP, 2014).	40
Figura 16: Sistema de Control de Lazo Cerrado, (TECSUP, 2014).	40
Figura 17: Sistema de Control de Lazo Cerrado en Procesos, (TECSUP, 2014)	41
Figura 18: Sistema de Supervisión, (TECSUP, 2014).	43
Figura 19: Lenguaje de Programación Ladder, (TECSUP, 2014).	44
Figura 20: Diagrama de Moody.	46
Figura 21: Modelado de la Electrobomba Centrífuga.	51
Figura 22: Respuesta de la Electrobomba Centrífuga.	51
Figura 23: Modelado de la Electrobomba Axial.	52
Figura 24: Respuesta de la Electrobomba Axial.	53
Figura 25: Control ON OFF Sistema Centrífugo.	57
Figura 26: Control PID Sistema Centrífugo.	58
Figura 27: Control ON OFF Sistema Axial.	59
Figura 28: Control PID sistema Axial:	60

RESUMEN

El presente trabajo de investigación detalla el diseño y construcción de un módulo hidráulico de bombeo en forma convencional y por multi etapa, que consta: de un Controlador Lógico programable (PLC) de gama alta, un sistema de control de velocidad por variación de frecuencia con interfaz inalámbrica a Bluetooth, instrumentos de medición Industrial de Campo de alta precisión para la medición de Nivel, medición de Presión y Caudal, medición de Velocidad, medición de parámetros eléctricos y dos Analizadores de Redes Industriales para estimar la eficiencia energética. Además, se realiza la comparación de dos sistemas hidráulicos de bombeo, donde se pudo observar que el sistema hidráulico axial posee la mayor eficiencia hidráulica y eléctrica. Los resultados de esta investigación nos permitirán reducir el número de fallas mecánicas y eléctricas, aumentar la productividad del equipo en cuanto a la utilización de caudal, en el entorno de supervisión SCADA para monitorear el caudal, presión, nivel, velocidad, frecuencia, potencia, tensión, intensidad. Además, hace el uso eficiente de la energía con un ahorro energético de hasta un 70%.

Palabras Claves: PLC, SCADA, axial, sumergible, radial.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación se refiere al tema del diseño del sistema hidráulico de bombeo por multi etapa que es controlado por un PLC y accionado por dos variadores de frecuencia para la regulación de la velocidad y por ende la regulación de caudal con la finalidad de comparar la eficiencia hidráulica del flujo axial y radial, el modulo hidráulico es construido en las instalaciones de la Universidad Nacional de Juliaca. Para el diseño se utilizó la Ecuación de Bernoulli y el balance de energía en función a la presión, altura y gravedad; para después dimensionar la estructura del sistema hidráulico según los estándares mecánicos, además de dimensionar las electrobombas estacionaria y sumergible que se va requerir para fines experimentales y pruebas de laboratorio.

Para realizar una buena toma de datos en el proceso de operación y funcionamiento se emplearon instrumentos de medición sofisticados de campo e industriales correctamente dimensionados para: el control de Nivel por Ultrasonido con señal estandariza analógica de (4-20) mA, sensor de Presión y Caudal de (0-10) Bar, sensor de velocidad para medir la rotación de las bombas en sincronismo, también cuenta con dos Analizadores de Redes Industriales de Campo para medir la mayor cantidad de parámetros eléctricos; todo esta instrumentación es controlada y procesada por un PLC (Controlador Lógico programable) de última generación que soporta cinco lenguajes de programación respetando la norma IEC – 1131-3 con sus respectivos módulos de expansión analógicas.

El sistema Hidráulico de Bombeo por multi etapa tiene una regulación de caudal variable que se ha logrado con variadores de frecuencia ALTIVAR 32 con interfaz a Bluetooth y configuración por PC, es el encargado de realizar la regulación de caudal por medio de la variación de velocidad con entrada monofásica y salida trifásica.

En el módulo se puede controlar eficientemente un sistema Hidráulico comparando la eficiencia energética de las bombas convencionales y las bombas actuales, además de realizar un control de Nivel Proporcional, Integral y Derivativo, evaluando parámetros hidráulicos para su posterior análisis y finalmente llegar a toma de decisiones.

El sistema de bombeo usado en la actualidad con electrobombas estacionarias o centrifugas en la región no es la adecuada; porque es un sistema convencional, esto ha conllevado a tener problemas hidráulicos en el transporte del fluido a mayores alturas

de impulsión (Altura Dinámica Total), pierde su eficiencia hidráulica con el desgaste de su impulsor mecánico (corrosión por el uso de Aluminio), consume más energía eléctrica por el desgaste del sello mecánico cuando hay ausencia del fluido o contacto externo con el fluido en el eje del mismo y si el sistema no está cebado simplemente no succiona el fluido causando recalentamiento prematuro de la electrobomba generando fallas por fricción en el eje; además no cuenta con un sistema automatizado hidráulico que es muy necesario para establecer un dialogo entre hombre y maquina fiable y sin riesgo de peligros.

En la actualidad es muy importante el menor impacto ambiental, por ello con este sistema hidráulico convencional que hace el mal uso de la eficiencia energética eléctrica e hidráulica conllevando a una facturación en tarifa eléctrica muy elevada, además de tener sistemas hidráulicos que funciones con energía Solar Fotovoltaica o los llamados sistemas híbridos.

El problema general se da en la siguiente pregunta: ¿Cuáles son los factores tecnológicos del sistema hidráulico de bombeo convencional y el uso de un sistema de accionamiento por lógica cableada que tiene relación con la construcción de un módulo hidráulico de bombeo por multi etapa monitoreado y automatizado en tiempo real en la UNAJ?

CAPITULO I

PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1 Descripción del Problema.

El sistema de bombeo usado en la actualidad con electrobombas estacionarias o centrifugas en la región no es la adecuada; porque es un sistema convencional, esto ha conllevado a tener problemas hidráulicos en el transporte del fluido a mayores alturas de impulsión (Altura Dinámica Total), pierde su eficiencia hidráulica con el desgaste de su impulsor mecánico (corrosión por el uso de Aluminio), consume más energía eléctrica por el desgaste del sello mecánico cuando hay ausencia del fluido o contacto externo con el fluido en el eje del mismo y si el sistema no está cebado simplemente no succiona el fluido causando recalentamiento prematuro de la electrobomba generando fallas por fricción en el eje; además no cuenta con un sistema automatizado hidráulico que es muy necesario para establecer un dialogo entre hombre y maquina fiable y sin riesgo de peligros.

En la actualidad es muy importante el menor impacto ambiental, por ello con este sistema hidráulico convencional que hace el mal uso de la eficiencia energética eléctrica e hidráulica conllevando a una facturación en tarifa eléctrica muy elevada.

Además de tener sistemas hidráulicos que funciones con energía Solar Fotovoltaica o los llamados sistemas híbridos.

1.1.2 Formulación del problema.

1.1.2.1 Problema General:

- a) ¿Cuáles son los factores tecnológicos del sistema hidráulico de bombeo convencional y el uso de un sistema de accionamiento por lógica cableada que tiene relación con la construcción de un módulo hidráulico de bombeo por multi etapa monitoreado y automatizado en tiempo real en la UNAJ?

1.1.2.2 Problema Específico:

- a) ¿En qué medida el diseño y modelado del sistema hidráulico de bombeo sumergible por multi etapa se relaciona con el sistema de bombeo convencional o estacionario?
- b) ¿Cuál es la relación existente entre la selección y dimensión de la instrumentación del sistema hidráulico y el funcionamiento, automatización y monitorización en tiempo real?
- c) ¿Cómo se podrá asegurar el óptimo y eficiente funcionamiento del sistema de control y supervisión en tiempo real?
- d) ¿En qué medida la evaluación de parámetros de funcionamiento del sistema hidráulico de bombeo por multi etapa se relaciona con la construcción final del módulo?

1.2 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La implementación del sistema hidráulico de Bombeo por multi etapa automatizado y monitoreado en tiempo real ayudará en muchos aspectos de la investigación porque usará tecnologías actuales, hará uso de la eficiencia energética, tendrá un entorno de supervisión amigable, además contribuirá al desarrollo de la región y en la UNAJ.

1.2.1 Justificación Técnica:

Este trabajo de investigación contribuirá de forma directa a la CPIER a que comprueben la teoría hecha en clase y la lleven al campo de la aplicación en forma rápida fiable y con un mayor énfasis a la investigación.

Conocer el funcionamiento del sistema hidráulico de bombeo por multi etapa permitirá que docentes y estudiantes desarrollen nuevas experiencias y perspectivas para la superación y le sigan dando mayor énfasis a la investigación.

1.2.2 Justificación Económica:

Al no contar con un módulo de un sistema hidráulico, en la actualidad se ve con la necesidad de viajar a otros lugares o universidades que cuenten con este equipo la cual demanda gastos en pasajes y viáticos y sobre tiempo perdido en los viajes.

La implementación de este sistema hidráulico reducirá estos inconvenientes sobre todo el tiempo perdido para las pruebas y nuevas experiencias adquiridas.

1.2.3 Justificación Social:

Con el desarrollo de este trabajo de investigación, se dará un paso más a la aplicación de la tecnología hidráulica en la región.

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 Objetivo General:

- a) Diseñar y construir un sistema hidráulico de bombeo por multi etapa y monitoreado con un sistema automatizado en tiempo real para bombas sumergibles en la UNAJ.

1.3.2 Objetivos Específicos:

- a) Diseñar, Esquematizar, modelar el sistema hidráulico de bombeo sumergible por multi etapa.
- b) Dimensionar y seleccionar la instrumentación apropiada para el funcionamiento y automatización del sistema hidráulico de bombeo sumergible por multi etapa.
- c) Implementar, configurar y programar el sistema de control supervisado y monitoreado en tiempo real.
- d) Evaluar los parámetros de funcionamiento del módulo del sistema hidráulico de bombeo sumergible por multi etapa monitoreado con un sistema automatizado en tiempo real.

1.4 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Hipótesis General:

- a) Con el diseño y la construcción de un sistema hidráulico de bombeo por multi etapa y monitoreado con un sistema automatizado en tiempo real se solucionará el problema de eficiencia hidráulica, energética, supervisión y control en tiempo real del sistema de bombeo sumergible por multi etapa en comparación con un sistema de bombeo convencional radial.

1.4.2 Hipótesis Específicas:

- a). El problema del sistema hidráulico de Bombeo convencional se ha solucionado mediante la esquematización, modelamiento matemático (Matlab) y la implementación del sistema hidráulico de bombeo por multi etapa automatizado y monitoreada en tiempo real.
- b). Se ha hecho el correcto dimensionamiento y la selección de la instrumentación adecuada para que permitan ver los indicadores y parámetros (variable dependiente e independiente) de funcionamiento en

tiempo real.

- c). La implementación, configuración y programación del sistema de control supervisado y monitoreado en tiempo real se ha logrado, gracias al uso del lenguaje de programación estandarizado establecido en la norma IEC 1131-3 que menciona todos procedimientos correctos para una programación adecuada y fiable en el sistema de control del proceso; además el monitoreo y análisis de datos van a permitir evaluar los parámetros de funcionamiento del sistema hidráulico.

- d). La evaluación de parámetros eléctricos e hidráulicos son muy energéticos en comparación de un bombeo por un sistema centrífugo.

1.5 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Se darán muchas limitaciones en el camino, las cuales son:

- Cotizaciones por los fabricantes y proveedores de estos equipos.
- El tiempo de entrega para algunos equipos las cuales son de importación.
- Los trámites administrativos en la UNAJ.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

Las bombas de flujo mixto son dispositivos importantes con la ventaja de una región de operación amplia y de alta eficiencia; Estas bombas se utilizan ampliamente en ingeniería hidráulica, ingeniería petroquímica, suministro de energía, riego agrícola y otros campos. El impulsor es el componente clave que realiza la conversión de energía y ejerce un efecto marcado en el rendimiento de la bomba. El flujo turbulento en un impulsor es altamente complicado especialmente cuando hay un espacio libre de la punta de la cuchilla. La holgura de la punta de la cuchilla es la separación entre la punta de la pala y la cubierta del impulsor y es indispensable debido a la rotación del impulsor. El grado de holgura de la punta es extremadamente pequeño, usualmente de 0,1-2 mm; Sin embargo, esta separación de la punta provoca el flujo de fuga y el movimiento del vórtice, que afectan directamente al flujo de casi el 50% del área en el paso del impulsor y por lo tanto afectan la eficiencia y estabilidad del impulsor. Los fenómenos de flujo debidos a la holgura de la punta de la pala son extremadamente complicados e implican flujo de fuga, desprendimiento de vórtice y cavitación. Se investigó el efecto de la configuración de la separación de la punta sobre el patrón de flujo y el rendimiento de la cavitación de una turbomáquina y encontró que una configuración de hueco ligeramente divergente proporcionaba un pobre rendimiento de cavitación de hueco. Propuso una geometría de holgura óptima al redondear el lado de presión de la hoja para eliminar la cavitación de holgura. Ellos utilizaron una gran simulación de remolinos para estudiar las estructuras de vórtices, la dinámica y las regiones de baja presión asociadas en el aclaramiento de la punta, y encontraron que la ranura de la pared final puede suprimir el vórtice de fuga de la punta. Realizando una serie de experimentos utilizando mediciones de la velocidad de la imagen de partícula para estudiar las estructuras de flujo en la región de punta de un rotor de bomba de chorro de agua, incluyendo el flujo de separación de punta, vórtice de fuga de punta y flujo de cavitación; Encontraron que el vórtice de fuga de la punta empezó a formarse cerca del borde del lado de succión de una punta de la pala y apareció como un

chorro de remolino, que migró hacia el centro del paso de la cuchilla (Yue et al., 2017).

Los requerimientos de presión y rendimiento de las bombas de pistones axiales y la proporción de pérdidas de batido en las bombas de pistones axiales aumentan significativamente con el aumento de la velocidad. Para investigar la distribución primaria de las pérdidas de agitación en las bombas de pistones axiales a diversos rangos de velocidad, se instaló una plataforma de ensayo en la que se pueden eliminar otras pérdidas por fricción, lo que permite investigar las pérdidas netas de batido en una bomba de pistón axial. La influencia del bloque de cilindros giratorios y de los pistones en las pérdidas de agitación se analiza en base a una evaluación cualitativa de los diferentes regímenes de flujo de fluido a diferentes velocidades de ensayo en una bomba de pistón axial. Los resultados analíticos indican que los pistones tienen menos influencia sobre las pérdidas de agitación que el bloque de cilindros rotativos más allá de la velocidad crítica en las bombas de pistones axiales, porque la disipación total de energía transforma las pérdidas de fricción viscosas laminares en pérdidas turbulentas de esfuerzo cortante. Se concluye que se debe prestar más atención al efecto del bloque de cilindros giratorio sobre las pérdidas de batido en las bombas de pistón axial a alta velocidad de rotación (Junhui, Ying, Bing, Min, & Fei, 2017).

El rendimiento energético y las fluctuaciones de presión en una bomba centrífuga con álabes guía de entrada (IGVs) se investigan experimental y numéricamente en un rango de ángulo pre-torbellino de -24° a 24° y en un rango de distancia axial de 280 mm, 380 mm y 460 mm. La fiabilidad y precisión del método numérico se validan por el acuerdo satisfactorio entre los datos experimentales y los resultados numéricos. La regulación pre-turbulencia con IGVs puede aumentar significativamente el rendimiento energético y ampliar el rango de operación eficiente para la bomba centrífuga debido a la mejora del patrón de flujo en la entrada del impulsor (Yabin, Lei, Ming, Yue, & Yun, 2017).

El documento considera las tendencias recientes en el desarrollo de accionamiento hidráulico accionado eléctricamente. Se especifican los principales requisitos para las características dinámicas de las bombas de pistones axiales variables con control eléctrico y la necesidad de buscar maneras de mejorarlas. Los resultados de la investigación muestran las características dinámicas del proceso de control de la capacidad de la bomba de pistones axiales electrohidráulicos en diferentes parámetros de señal de modulación de ancho de pulso (PWM). Se encontró la regularidad entre la frecuencia de la señal PWM y el

tiempo de establecimiento del desplazamiento adecuado de la bomba (Zalogin & Noskov, 2016).

En el análisis numérico Radial de Bombas Centrifugas el flujo bidireccional sólido-líquido en la bomba centrífuga de tornillo se simula durante una revolución utilizando el software CFD. Las fluctuaciones de presión en la salida de la voluta, la distribución del empuje radial y el empuje axial en la bomba centrífuga del tornillo durante una revolución se dan en el papel. Los resultados muestran que el valor de presión mínimo en la salida de la voluta ocurre cuando el radio máximo del impulsor acaba de girar la lengüeta de la voluta y el valor máximo ocurre cuando el radio máximo del impulsor que acaba de girar entre la sección VI y VII se supone el empuje radial en el impulsor. La distribución de la circunferencia aproximadamente durante una revolución. A medida que la fracción de volumen sólido aumenta, el empuje radial aumenta gradualmente. La dirección del empuje radial es inversa al valor máximo de presión en la salida de la bomba; La posición máxima del radio tiene mucha influencia en los cambios del empuje axial, el valor máximo del empuje axial ocurre cuando el radio máximo del impulsor acaba de girar la lengua de la voluta y el valor mínimo ocurre cuando el radio máximo del impulsor está alejado de la lengua de la voluta (Han, Maa, Li, & Li, 2012).

En la Investigación titulada: Diseño de una Bomba por multi etapa Radial, los aspectos de la cuestión para reducir la posibilidad de cantidad específica de metal de flujo de bomba multi etapa en términos de reducción de las dimensiones radiales mientras se mantiene un alto nivel de rendimiento energético. Una solución a este problema es utilizar impulsores de dos hileras. Sin embargo, el diseño de una hoja de sistema de dos hileras y la predicción de sus características se asocia con una serie de cuestiones que están actualmente en la investigación que implica el uso de modelado por computadora del flujo de fluido en el flujo de la bomba (Tverdokhleba, Knyazeva, Birukov, & Lugovaya, 2012).

El objetivo de esta literatura es investigar el rendimiento y el campo de flujo tridimensional en una bomba de flujo axial CW y observar el fenómeno de cavitación en situaciones específicas. Fluido computacional software dinámico FLUENT 6.3 fue utilizado para simular el campo de flujo completo de la bomba para capturar todas las características en el dominio. El modelo RNG $k-\epsilon$ combinado con funciones de pared estándar se utiliza para tratar la naturaleza turbulenta del problema. Se verifican dos dominios principales: 1) el dominio del rotor que incluye cuatro impulsores móviles. 2) el dominio del estator que incluye nueve álabes estáticos. Por lo tanto, la interacción rotor-estator se trató con la

técnica de marco de referencia móvil (MRF). Aquí se muestra el contorno de presión y las líneas de corriente de la simulación. La curva de rendimiento del modelo está en buen acuerdo con los datos de la central de referencia. Finalmente, se demuestra la región de cavitación definida con la presión de vaporización para casos con diferentes caudales (Vazifeshenas, Farhadi, Sedighi, & Shafaghat, 2016).

El enfoque sugerido se estableció sobre la idea de que el valor de tiempo adimensional en la parada de bombeo que sirve como valor de coincidencia se obtiene mediante RFBCM. El enfoque propuesto es sencillo de aplicar; Que no requiere refinamiento de datos, parámetro adicional y coincidencia visual. El rendimiento del método propuesto fue probado con varias condiciones del acuífero incluyendo datos sintéticos homogéneos, simulación de acuíferos heterogéneos y aplicaciones de campo real. Los resultados confirman que el método propuesto tiene una capacidad de estimación de parámetros tan alta como las técnicas disponibles en la literatura y proporciona a los profesionales para comprender una representación más precisa de los efectos de la heterogeneidad en los parámetros hidráulicos durante el proceso de prueba. Además, la metodología sugerida para la interpretación de la prueba de recuperación del acuífero puede evaluarse para ser empleada como una herramienta de diagnóstico para identificar condiciones no ideales. El uso potencial de la RBFCM en este estudio también se presentó como el suplemento de la evaluación de la interpretación de la prueba del acuífero (Sahin, 2016).

En el ámbito local de la ciudad de Juliaca, se conoce muy poco sobre el bombeo por multi etapa y su eficiencia energética e hidráulica en el uso de pozos tubulares.

2.2 MARCO REFERENCIAL

2.2.1 Dinámica de Fluidos.

La dinámica de fluidos estudia los fluidos en movimiento y es una de las ramas más complejas de la mecánica. Aunque cada gota de fluido cumple con las leyes del movimiento de Newton las ecuaciones que describen el movimiento del fluido pueden ser extremadamente complejas. En muchos casos prácticos, sin embargo el comportamiento del fluido se puede representar por modelos ideales sencillos que permiten un análisis detallado (Mataix, 1993).

2.2.2 Flujo Laminar.

Se llama flujo laminar al tipo de movimiento de un fluido cuando éste es perfectamente ordenado, estratificado, suave, de manera que el fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse. Las capas adyacentes del fluido se deslizan suavemente entre sí. El mecanismo de transporte es exclusivamente molecular. Se dice que este flujo es aerodinámico. Ocurre a velocidades relativamente bajas o viscosidades altas como veremos (Grubelnik & Marhl, 2005).

2.2.2.1 Flujo Turbulento:

Se llama flujo turbulento mostrado en la figura 1; cuando se hace más irregular, caótico e impredecible, las partículas se mueven desordenadamente y las trayectorias de las partículas se encuentran formando pequeños remolinos aperiódicos. Aparece a velocidades altas o cuando aparecen obstáculos abruptos en el movimiento del fluido (Grubelnik & Marhl, 2005).

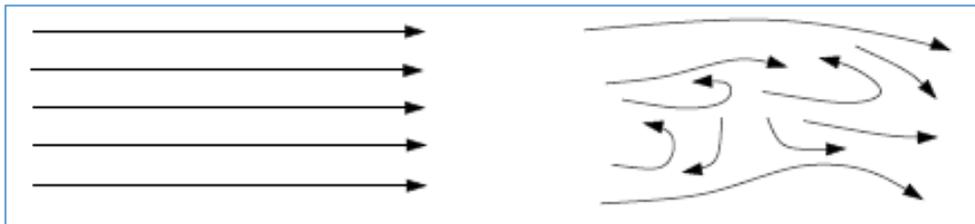


Figura 1: Flujo Laminar y Turbulento, (Grubelnik & Marhl, 2005).

2.2.2.2 Flujo y Caudal:

Queremos determinar el ritmo a que fluye la masa de fluido que atraviesa cierta superficie fija S a su paso. Si la velocidad a la que viaja el elemento de fluido es v en un tiempo dt , el volumen de fluido que atraviesa una superficie elemental dS (Figura 2) es:

$$dV = v \cdot dt \cdot dS \cdot \cos(\theta) \dots \dots \dots (1)$$

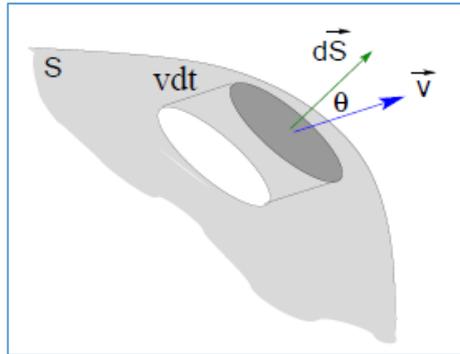


Figura 2: Flujo Laminar y Turbulento, (Grubelnik & Marhl, 2005).

- Flujo másico elemental a través de $d\dot{S}$ como:

$$d\phi = \frac{dm}{dt} = \rho \vec{v} \cdot d\vec{S} \dots \dots \dots (2)$$

- Flujo másico total será:

$$\phi = \int_S \rho \vec{v} \cdot d\vec{S} \dots \dots \dots (3)$$

- Flujo volúmico o caudal será:

$$\psi = \int_S \vec{v} \cdot d\vec{S} \dots \dots \dots (4)$$

- De donde la variación con el tiempo es:

$$\frac{dm_{interior}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_V \rho \cdot dV = \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \dots \dots \dots (5)$$

2.2.3 Máquina Hidráulica.

Máquina hidráulica es aquella en que el fluido que intercambia su energía no varía sensiblemente de densidad en su paso a través de la máquina, por lo cual en el diseño y estudio de la misma se hace la hipótesis de que $p = cte$ (Mataix, 1993).

Máquinas de fluido son aquellas máquinas en que el fluido, o bien proporciona la energía que absorbe la máquina (por ejemplo, el agua que se suministra a una turbina posee una energía preferentemente de presión, proveniente de la energía geodésica que poseía en el embalse y que a su vez la turbina transforma en energía mecánica) o bien aquellas en que el fluido es el receptor de energía,

al que la máquina restituye la energía mecánica absorbida (Mataix, 1993).

2.2.3.1 Representación de una Turbo máquina:

Los dos planos de representación de una turbo máquina mostrados: en el corte meridional (figura 3a) y en el corte transversal (figura 3b). Estos planos son mostrados en cortes que representan una bomba radial.

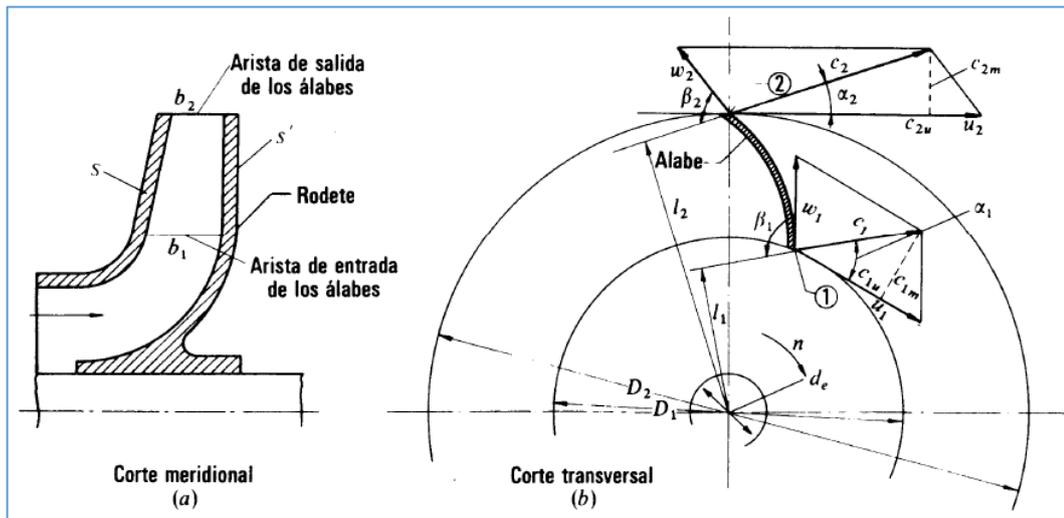


Figura 3: Rodete de una Bomba Centrífuga a).Corte Meridional b).Corte Transversal,(Mataix, 1993).

2.2.4 Bombas.

Bomba es una máquina que absorbe energía mecánica y restituye al líquido que la atraviesa energía hidráulica. Las bombas se emplean para impulsar toda clase de líquidos (agua, aceites de lubricación, combustibles, ácidos; líquidos alimenticios: cerveza, leche, etc.; estas últimas constituyen el grupo importante de las bombas sanitarias). También se emplean las bombas para bombear líquidos espesos con sólidos en suspensión, como pastas de papel, melazas, fangos, desperdicios, etc (Mataix, 1993).

Las Bombas se Clasifican en:

- a) *Bomba roto dinámica*. Todas y solo las bombas que son turbo máquinas pertenecen a este grupo, del cual nos ocuparemos en el presente capítulo. — Estas son siempre rotativas. Su funcionamiento se basa en la ecuación

de Euler; y su órgano transmisor de energía se llama rodete.

— Se llaman roto dinámicas porque su movimiento es rotativo y la dinámica de la corriente juega un papel esencial en la transmisión de la energía.

b) *Bombas de desplazamiento positivo*. A este grupo pertenecen no solo las bombas alternativas, sino las rotativas llamadas roto estáticas porque son rotativas, pero en ellas la dinámica de la corriente no juega un papel esencial en la transmisión de la energía. Su funcionamiento se basa en el principio de desplazamiento positivo.

2.2.4.1 Elementos Constitutivos:

Se representa una bomba radial de eje horizontal en la cual pueden verse los elementos siguientes (Figura 4):

- **Rodete**, que gira solidario con el eje de la máquina y consta de un cierto número de álabes que imparten energía al fluido en forma de energía cinética y energía de presión.
- **Corona directriz** o corona de álabes fijos, que recoge el líquido del rodete y transforma la energía cinética comunicada por el rodete en energía de presión, ya que la sección de paso aumenta en esta corona en la dirección del flujo. Esta corona directriz no existe en todas las bombas; porque encarece su construcción; aunque hace a la bomba más eficiente.
- **Caja espiral**, que transforma también la energía dinámica en energía de presión, y recoge además con pérdidas mínimas de energía el fluido que sale del rodete, conduciéndolo hasta la tubería de salida o tubería de impulsión.
- **Tubo difusor troncocónico**, que realiza una tercera etapa de difusión o sea de transformación de energía dinámica en energía de presión.

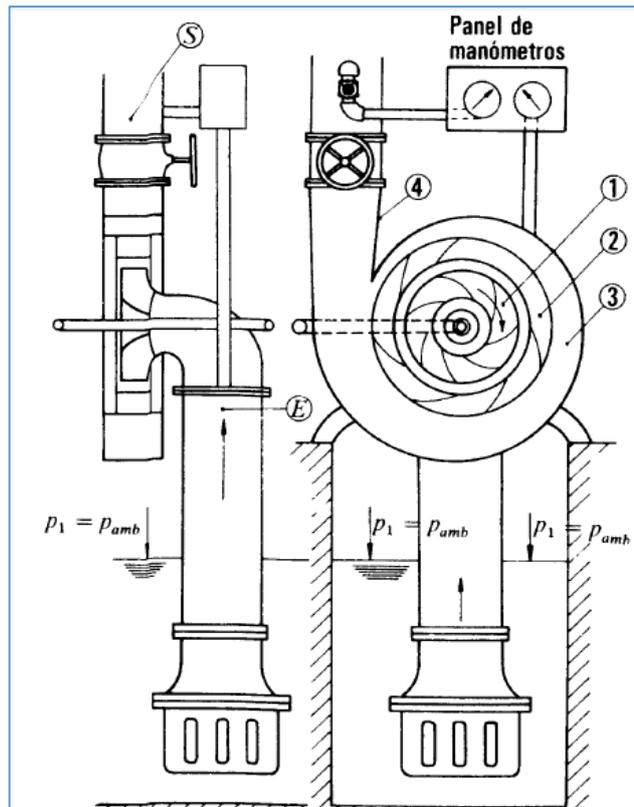


Figura 4: Elementos constructivos de una Bomba Hidráulica (Mataix, 1993).

2.2.4.2 Tipos de Bombas:

- a) **Bomba de carcasa seccionada;** representa una de estas bombas construida por la casa Sulzer. Esta bomba está dividida por un plano axial horizontal. Las tuberías de aspiración y descarga, así como el conducto de conexión entre el primero y segundo escalonamiento se encuentran en la parte inferior de la carcasa. El acceso al interior de la bomba para su- inspección se consigue desmontando la mitad superior de la carcasa, sin tocar para nada las tuberías de aspiración y descarga, ni los manómetros, ni alterar el alineamiento de la bomba. Por esta razón las bombas de cámara seccionada han tenido en los últimos años mucha aceptación el cual se muestra en la figura 6.

- b) **Bomba monobloc;** como la construida también por la casa Worthington, si la anterior es muy popular por su accesibilidad, ésta también lo es en grupos pequeños por formar un grupo compacto con un solo apoyo para el motor eléctrico y la bomba, la cual está instalada en voladizo.

- c) **Bomba de doble aspiración**; esta bomba es semiaxial o de flujo mixto y resulta adecuada para grandes caudales, lo que se consigue gracias a la doble aspiración sin aumentar mucho las dimensiones de la máquina.
- d) **Bomba axial**; es una bomba de riego y está construida por la casa Escher Wyss para Egipto. El rodete tiene forma de hélice y es adecuada para grandes caudales y pequeñas alturas de elevación.
- e) **Bomba horizontal de múltiples escalonamientos**; La bomba de múltiples escalonamientos, construida por la casa KSB de Alemania es en contraste con las dos anteriores más adecuada para pequeños caudales y grandes alturas efectivas. Las bombas de alimentación de calderas se construyen para presiones por encima de 300 bar. En este campo de aplicación las bombas roto dinámicas han desplazado modernamente casi por completo a las bombas de émbolo.
- f) **Bombas verticales de múltiples escalonamientos**; representa una de estas bombas. Está construida por la casa Weise und Monski, Alemania, que las ofrece para caudales hasta de 400 m³/h y presiones superiores a los 300 bar.
- g) **Bombas de pozo profundo**; son análogas a las anteriores y se instalan en el interior del pozo, y a veces sumergidas. El motor eléctrico de accionamiento se instala fuera del pozo, pudiendo tener el eje varios metros de longitud, con apoyos de trecho en trecho en cojinetes intermedios mostrado en la figura 5.
- h) **Grupo moto-bomba sumergible**; estos grupos gracias a los modernos progresos en la técnica de los aislamientos, se instalan totalmente sumergidos, sin excluir el motor eléctrico. Estas bombas permiten la extracción de agua sin la construcción del pozo ancho convencional, pues basta una perforación de diámetro suficiente para introducir la bomba.



Figura 5: Bomba hidráulica con impulsores multi etapa, Fuente: FRANKLIN ELECTRIC – USA.



Figura 6: Bomba hidráulica Centrifuga, Fuente: PEDROLLO – Italia.

2.2.4.3 Altura útil o Efectiva de una Bomba:

La altura útil o efectiva de una Bomba se da:

$$H = H_u - H_{r-int} \dots \dots \dots (6)$$

Dónde: H = Altura

H_u = Altura Teórica

H_{r-int} = Perdidas en el Rodete

a) Primera Expresión Altura Útil y Energía Útil:

$$\frac{P_E}{\rho g} + Z_E + \frac{v_E^2}{2g} + H = \frac{P_S}{\rho g} + Z_S + \frac{v_S^2}{2g} \dots \dots \dots (7)$$

$$H = \frac{P_S - P_E}{\rho g} + Z_S - Z_E + \frac{v_S^2 - v_E^2}{2g} \dots \dots \dots (8)$$

Dónde: H = Altura Dinámica Total

P_E = Presión de Entrada

P_S = Presión de Salida

v_E = Velocidad de Entrada

v_S = Velocidad de Salida

Z_E = Altura de Entrada

Z_S = Altura de Salida

ρ = Densidad del agua

g = gravedad

2.2.4.4 Pérdidas de una Bomba:

Todas las pérdidas en la bomba se pueden clasificar en tres grupos:

- Pérdidas hidráulicas.
- Pérdidas volumétricas.
- Pérdidas mecánicas.

a) Pérdidas Hidráulicas.

Las pérdidas hidráulicas disminuyen la energía específica útil que la bomba comunica al fluido y consiguientemente la altura útil. Son de dos clases: pérdidas de superficie y pérdidas de forma, las pérdidas de superficie se producen por el rozamiento del fluido con las paredes de la bomba (rodete, corona directriz...) o de las partículas del fluido entre sí; las pérdidas de forma se producen por el desprendimiento de la capa límite, en los cambios de dirección y en toda forma difícil al flujo, en particular a la entrada del rodete si la tangente del álabe no coincide con la dirección de la velocidad relativa a la entrada, o a la salida del rodete si la tangente del álabe de la corona directriz no coincide exactamente con la velocidad absoluta a la salida.

b) Pérdidas Volumétricas.

Las pérdidas volumétricas exteriores que constituyen una salpicadura de fluido al exterior, que se escapa por el juego entre la carcasa y el eje de la bomba, que la atraviesa. Para reducirlas se utiliza la caja de empaquetadura, que se llena de estopa o material de cierre, provista de su correspondiente tapa o prensaestopas con pernos, que permiten comprimiendo los prensaestopas contra el eje de la máquina mejorar el cierre. Esta presión, sin embargo, no puede ser excesiva para no aumentar las pérdidas mecánicas. Como material de cierre se utiliza mucho el amianto grafitado.

Si la máquina ha de bombear líquidos calientes, o las presiones son grandes, o los líquidos corrosivos, radiactivos, etc., existen multitud de soluciones a base de anillos de cierre, resortes, etc., que reducen las

pérdidas q_e a un mínimo y hasta a 0, si es necesario. El cierre de la bomba evidentemente se encarece.

c) **Perdidas mecánicas.**

Las pérdidas mecánicas incluyen las pérdidas por:

- a) Rozamiento de los prensaestopas con el eje de la máquina, mostrado en la figura 7.
- b) Rozamiento del eje con los cojinetes.
- c) Accionamiento de auxiliares (bomba de engranajes para lubricación, cuentarrevoluciones, etc.).



Figura 7: (Bomba hidráulica Centrífuga, Fuente: PEDROLLO - Italia).

2.2.5 Rodete Impulsor.

El rodete o impulsor es un elemento móvil, formado por unas paletas o álabes divergentes unidos a un eje que recibe energía del exterior como podemos observar en la figura 8 que nos muestra el despiece de una bomba centrífuga.

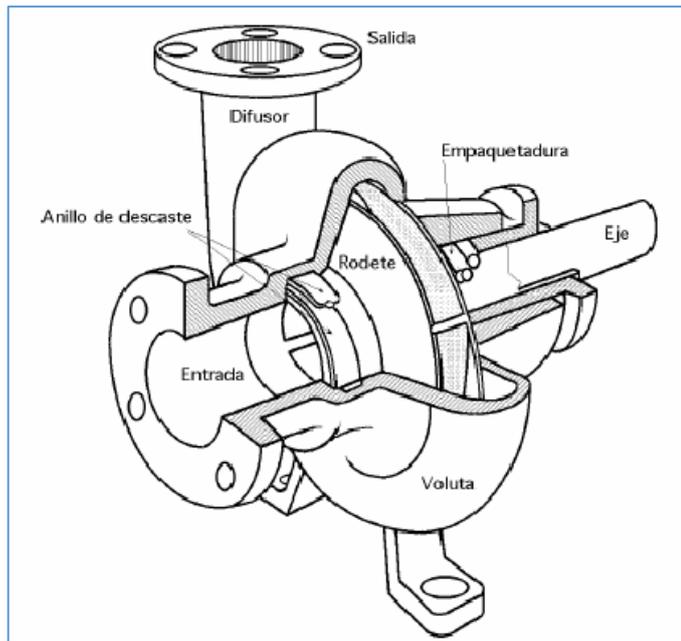


Figura 8: Flujo Laminar y Turbulento, (Grubelnik & Marhl, 2005).

2.2.5.1 Clasificación de Rodetes:

Los Rodetes se clasifican en 4 grandes grupos:

- a) **Rodete cerrado de simple aspiración** (Figura 9a); las caras anterior y posterior forman una caja: entre ambas caras se fijan los álabes.
- b) **Rodete cerrado de doble aspiración**. (Figura 9b).
- c) **Rodete semi abierto de simple aspiración** (Figura 9c); sin la cara anterior, los álabes se fijan solo en la cara posterior.
- d) **Rodete abierto de doble aspiración sin cara anterior ni posterior** (Figura 9d); los álabes se fijan en el núcleo o cubo de rodete.

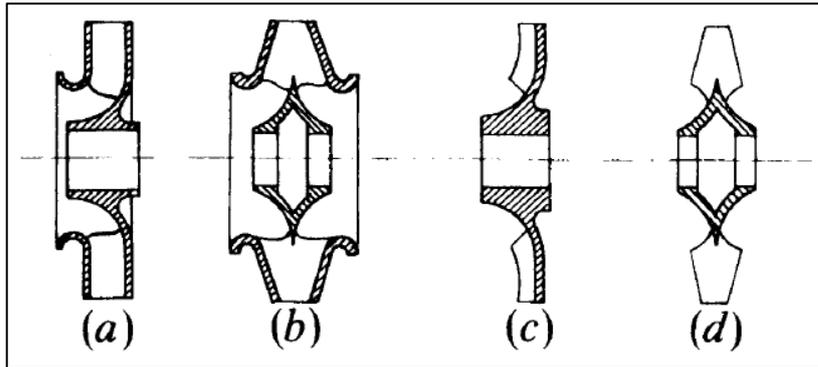


Figura 09: Clasificación de Rodetes, (Mataix, 1993).



Figura 10: Rodete de experimentación, (Liu, Wang, Liu, Yuan, & Wang, 2013).

2.2.5.2 Número Específico de Revoluciones:

La clasificación más precisa de las bombas roto dinámicas es una clasificación numérica, asignando a toda la familia de bombas geoméricamente semejantes un número, a saber, el NUMERO ESPECIFICO DE REVOLUCIONES.

En las bombas este número oscila entre **35 y 1800** aproximadamente.

$$n_s = n \cdot P^{1/2} H^{-5/4} \dots\dots\dots(9)$$

- n_s = Número Específico de Revoluciones.
- n = Velocidad del Rotor en rpm.
- P = Potencia en Cv.

- H = Altura en m.

$$P = \frac{Q \cdot \rho \cdot H}{75} \dots\dots\dots(10)$$

- ρ = Densidad del agua.
- Q = Caudal en m.
- P = Potencia en Cv.
- H = Altura en m.

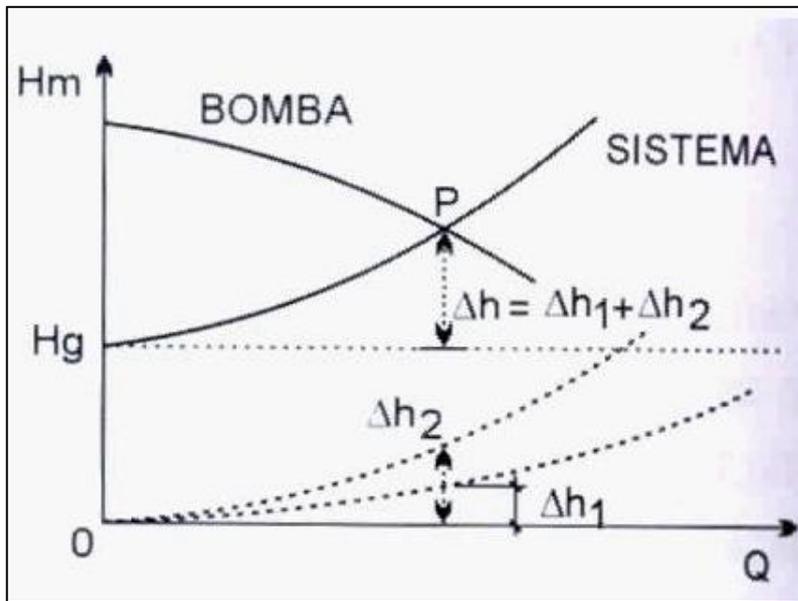


Figura 11: Rodete de experimentación, (Mataix, 1993).

2.2.6 Sistema de Control, Supervisión y Monitoreo.

El ser humano siempre ha buscado la creación de herramientas y máquinas que le faciliten la realización de tareas peligrosas, pesadas y repetitivas. En los últimos tiempos, la aparición de máquinas altamente sofisticadas ha dado lugar a un gran desarrollo del campo de la automatización y el control de las tareas, aplicado ya en muchas máquinas que se manejan diariamente.

2.2.6.1 Introducción:

El control automático ha desempeñado una función vital en el avance de la ingeniería y la ciencia. Además de su extrema importancia en los sistemas de vehículos espaciales, de guiado de misiles, robóticos y similares; el control automático se ha vuelto una parte importante e integral de los procesos modernos industriales y de manufactura. Por ejemplo, el control automático es esencial en el control numérico de las máquinas-herramienta de las industrias de manufactura, en el diseño de sistemas de pilotos automáticos en la industria aeroespacial, y en el diseño de automóviles y camiones en la industria automotriz. También es esencial en las operaciones industriales como el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad y flujo en las industrias de proceso. Debido a que los avances en la teoría y la práctica del control automático aportan los medios para obtener un desempeño óptimo de los sistemas dinámicos, mejorar la productividad, aligerar la carga de muchas operaciones manuales repetitivas y rutinarias, así como de otras actividades, casi todos los ingenieros y científicos deben tener un buen conocimiento de este campo (Ogata, 2005).

2.2.6.2 Variable Controlada y Manipulada:

La variable controlada es la cantidad o condición que se mide y controla. La variable manipulada es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada. Por lo común, la variable controlada es la salida (el resultado) del sistema. Controlar significa medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar una desviación del valor medido a partir de un valor deseado (Ogata, 2005).

- a) **Plantas.** Una planta puede ser una parte de un equipo, tal vez un conjunto de las partes de una máquina que funcionan juntas, el propósito de la cual es ejecutar una operación particular, llamaremos planta a cualquier objeto físico que se va a controlar (tal como un dispositivo mecánico, un horno de calefacción, un reactor químico o una nave espacial).

- b) **Procesos.** Define un proceso como una operación o un desarrollo natural progresivamente continuo, marcado por una serie de cambios graduales que se suceden uno al otro en una forma relativamente fija y que conducen a un resultado o propósito determinados; o una operación artificial o voluntaria progresiva que consiste en una serie de acciones o movimientos controlados, sistemáticamente dirigidos hacia un resultado matlabque se va a controlar. Algunos ejemplos son los procesos químicos, económicos y biológicos.

- c) **Sistemas.** Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado. Un sistema no necesariamente es físico. El concepto de sistema se aplica a fenómenos abstractos y dinámicos, tales como los que se encuentran en la economía. Por tanto, la palabra sistema debe interpretarse como una implicación de sistemas físicos, biológicos, económicos y similares.

- d) **Perturbaciones.** Una perturbación es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se denomina interna, en tanto que una perturbación externa se produce fuera del sistema y es una entrada.

- e) **Control realimentado.** El control realimentado se refiere a una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia y lo continúa haciendo con base en esta diferencia. Aquí ~610 se especifican con este término las perturbaciones impredecibles, dado que las perturbaciones predecibles o conocidas siempre pueden compensarse dentro del sistema (Figura 12 y 13).

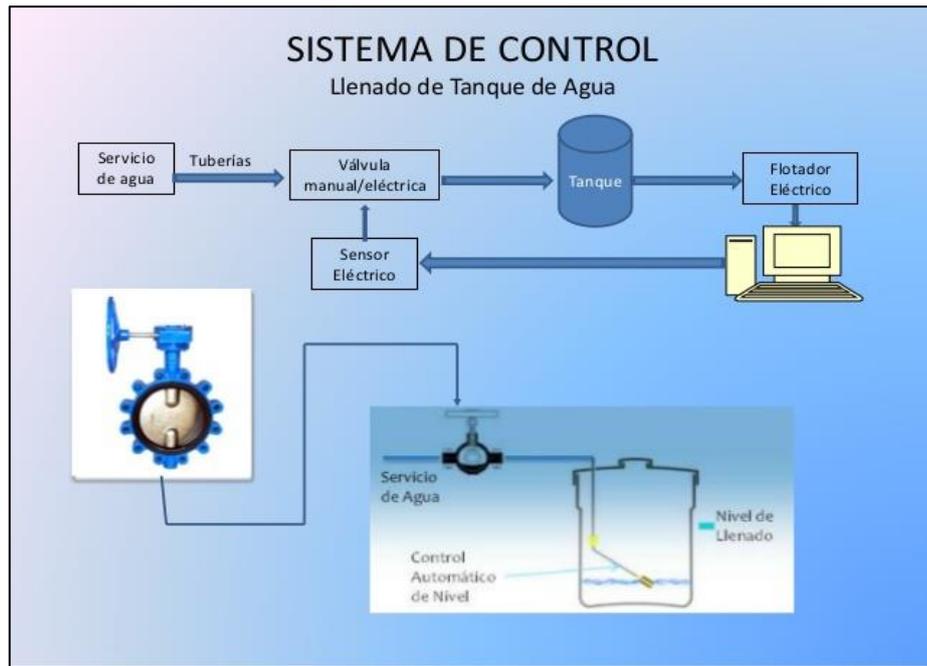


Figura 12: Esquema de un sistema de Control, (TECSUP, 2014).

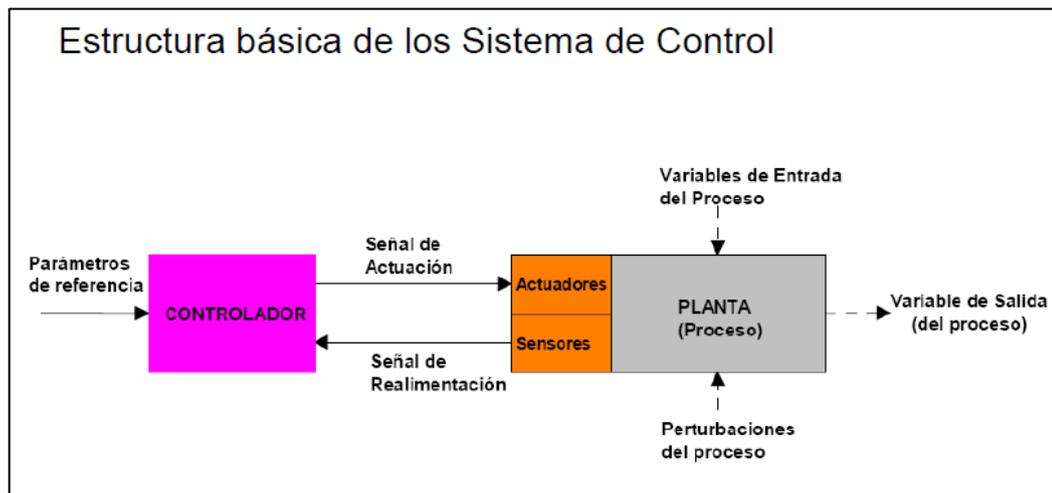


Figura 13: Sistema de Control de Procesos, (TECSUP, 2014).

2.2.6.3 Clasificación de un Sistema de Control:

Los podemos clasificar en dos grupos, según el objeto de control:

Control de Movimiento.

Se conocen también como servomecanismos, controlan posición, velocidad, aceleración, dirección y sentido. Son los de uso más habitual en aplicaciones mecatrónicas.

Control de Procesos.

Controlan variables físicas o químicas tales como: temperatura, presión, caudal, nivel de líquido, PH (acidez), humedad, o composición química.

Son de uso habitual en la industria.

a) Sistema de Control de lazo Abierto.

La salida se realiza sin tener en cuenta si lo que se pide se hace bien o mal, normalmente el tiempo es la variable que controla el sistema. (Figura 14 y 15)

- La salida no tiene efecto sobre el controlador
- No se compara la salida del sistema con la entrada de referencia.
- Para cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fijada.
- La exactitud de la salida del sistema depende de la calibración del controlador.
- En presencia de perturbaciones estos sistemas de control no cumplen su función adecuadamente.

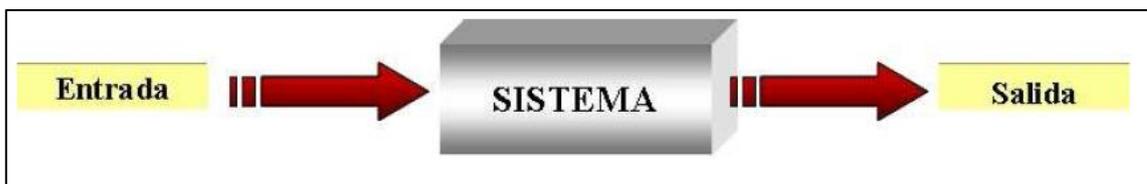


Figura 14: Entrada y Salida en un Sistema de Lazo Abierto, (TECSUP, 2014).

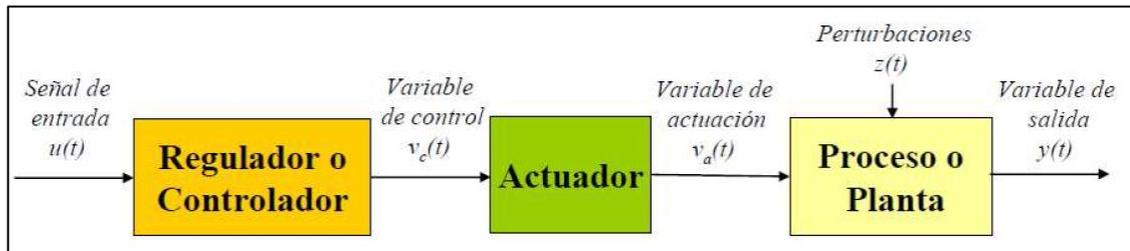


Figura 15: Sistema de Control de Lazo Abierto en Procesos, (TECSUP, 2014).

b) Sistema de Control de lazo Cerrado.

La salida se compara con la entrada de forma que se comprueba en todo momento que la salida es la esperada y si no es así el sistema se corrige. La salida del sistema se mide por medio de un Sensor, y se compara con el valor de la entrada de referencia $u(t)$ (TECSUP, 2014).

Características de un Sistema de Control en Lazo Cerrado

- Operación que en presencia de perturbaciones tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia.
- Esta reducción se logra manipulando alguna variable de entrada del sistema, siendo la magnitud de dicha variable de entrada función de la diferencia entre la variable de referencia y la salida del sistema.

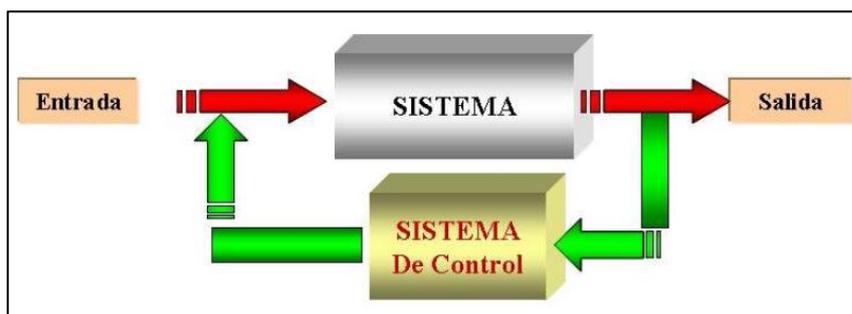


Figura 16: Sistema de Control de Lazo Cerrado, (TECSUP, 2014).

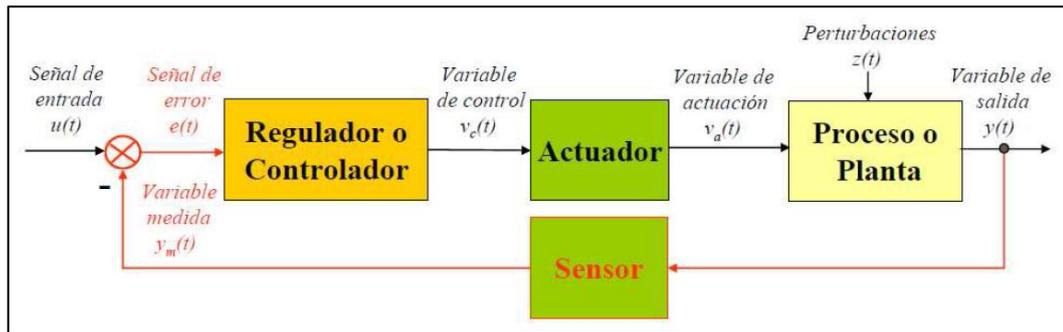


Figura 17: Sistema de Control de Lazo Cerrado en Procesos, (TECSUP, 2014)

2.2.6.4 Modelado de Procesos:

El modelo matemático de un sistema puede ser usado para simular la respuesta dinámica de un sistema resolviendo las ecuaciones en un computador.

Ya que los sistemas son dinámicos, los modelos matemáticos están constituidos por sistemas de ecuaciones diferenciales. Se desea que dichos modelos describan los procesos de la manera más precisa posible, sin embargo, siempre existen incertidumbres en los sistemas, errores en las predicciones de parámetros, etc. (TECSUP, 2014).

Para dimensionar y calcular las características de un sistema de control es necesario que se conozca la relación entre las señales de entrada y de salida de los bloques que lo constituyen. Esta relación se puede expresar como ecuaciones diferenciales o como funciones de transferencia. Existen dos formas básicas para obtener esta relación:

- Modelado teórico
- Identificación experimental

a) **Modelado Teórico**; A partir de leyes físicas (leyes básicas de la física, química, termodinámica, biología, etc) se encuentra la función de transferencia. Las leyes son normalmente en la forma de ecuaciones diferenciales, la relación entre las señales de entrada y salida son también una ecuación diferencial. Esta última se puede transformar con la ayuda de la Transformada de Laplace para obtener la función de

transferencia. Requiere un buen conocimiento del fenómeno físico por el que rige el sistema.

- b) **Modelado Experimental;** A partir de diferentes experimentos prácticos se encuentra la función de transferencia para diferentes procesos.

2.2.6.5 Función de transferencia:

Una **función de transferencia** es un modelo matemático que a través de un cociente relaciona la respuesta de un sistema a una señal de entrada o excitación, esto se puede supervisar en un sistema de gráficos del PLC Modicon TM-241, SCADA. Mostrado en la figura 18.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \dots\dots\dots(11)$$

Donde:

G(s) es la función de transferencia

Y(s) es la transformada de laplace de la respuesta

X(s) es la transformada de laplace de la señal de entrada



Figura 18: Sistema de Supervisión, (TECSUP, 2014).

2.2.6.6 Programación Industrial:

El entorno de programación es muy amigable, y cumple con el estándar de lenguajes de programación la IEC 1131-3; el cual nos habla de los cinco lenguajes de programación: Diagrama de bloques funcionales, Ladder o escalera, graficet, texto estructurado y lista de instrucciones (Ogata, 2005).

La IEC 61131-3, una norma internacional abierta para controladores lógicos programables (PLC), define varios lenguajes específicos de dominio para la automatización industrial y de procesos. Dominio lenguajes específicos tienen varias características, construcciones de programación y notaciones que son diferentes de lenguajes de propósito general y por lo tanto las métricas de código fuente tradicionales para lenguajes de programación de propósito general no se pueden aplicar directamente a los lenguajes específicos de dominio para la escritura de programas de control en el área de la automatización industrial (Andri, Ida Bagus Alit, & Agung, 2016).

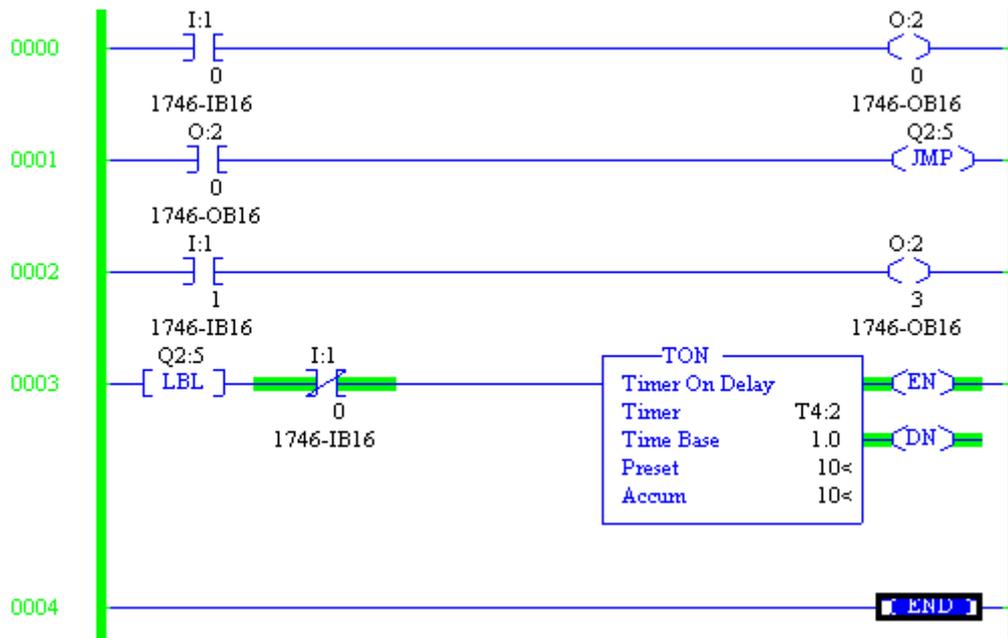


Figura 19: Lenguaje de Programación Ladder, (TECSUP, 2014).

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1 CARACTERÍSTICA DE LA ZONA.

3.1.1 Ámbito de Estudio:

El presente trabajo es desarrollado en la ciudad de Juliaca a 3850 msnm, en las instalaciones del Laboratorio de Control y Automatización de la Escuela profesional de Ingeniería en Energías Renovables de la Universidad Nacional de Juliaca.

3.1.2 Ubicación Geográfica:

Juliaca (en quechua: *Hullaqa*) es la capital de la provincia de San Román y del distrito homónimo, ubicada en la jurisdicción de la región Puno, en el sudeste de Perú. Cuenta con una población de 270 340 habitantes (2014), situada a 3824 msnm en la meseta del Collao, al noroeste del Lago Titicaca. Es el mayor centro económico de la región Puno, y una de las mayores zonas comerciales del Perú.

3.2 PROCEDIMIENTO DEL MÉTODO.

3.2.1 Calculo Justificativo del Sistema Hidráulico:

Dimensionamiento del Reservorio, Bomba y Sistema:

a) *Altura Geodésica:*

$H = 3m$ En el Modulo Hidráulico máx. (80m).

b) Caudal:

$$Q_{Max} = 360L / \text{min} = 6L / s = 0.006m^3 / s$$

c) Diagrama de Moody:

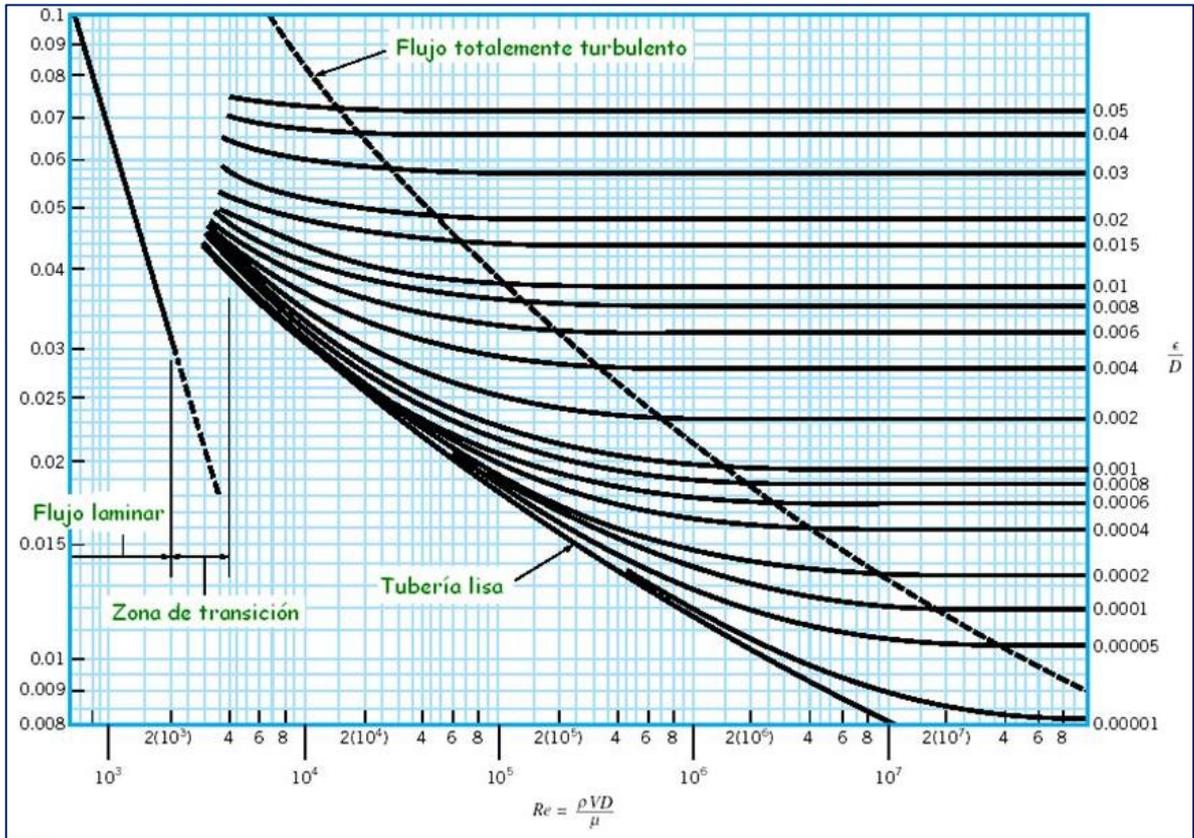


Figura 20: Diagrama de Moody.

d) Evaluación de pérdida:

$$Q_{Max} = 360L / \text{min} = 6L / s = 0.006m^3 / s$$

$L = 4m$, Longitud de la tubería máx. Del módulo Hidráulico.

$f = 0.0018$, Coeficiente de fricción de tubería

$D = 1" = 2.54cm = 0.0254m$, Diámetro de la tubería y accesorios.

- Velocidad Media (V_m):

$$V_m = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4 \times 0.006}{\pi (0.0254)^2} = 11.8411m / s$$

- Pérdida por Fricción (h_f):

$$h_f = \frac{f \times L \times V_m^2}{D \times 2 \times g} = \frac{0.0018 \times 4 \times 11.8411^2}{0.0254 \times 2 \times 9.81} = 2.0257m$$

- Pérdida por Accesorios (h_k):

$$K_1 = 0.8, \text{ Válvula Check (Una Unidad).}$$

$$K_2 = 0.23, \text{ Codos (Una Unidad):}$$

$$\sum K = 1.03$$

$$h_f = (\sum K) \frac{V_m^2}{2 \times g} = \frac{(1.03) \times 11.8411^2}{2 \times 9.81} = 7.36m$$

- Pérdida Total por Accesorios (h_p):

$$h_p = h_f + h_k$$

$$h_p = 2.0257 + 7.36 = 9.3857m$$

e) Altura Dinámica Total (ADT):

$$ADT = H + h_p = 4 + 9.3857 = 13.3857m$$

f) Potencia de la Bomba:

$$P_B = \frac{\gamma \times Q \times H}{76 \times n_B}, n_B = 78\%, \text{ en Hp}$$

$$P_B = \frac{1000 \times 0.006 \times 14}{76 \times 0.78} = 1.41HP$$

g) Potencia del Motor + Bomba (Electrobomba):

$$P_E = \frac{P_B}{n_m} = \frac{1.41}{0.8} = 1.77HP, \text{ en el mercado hay electrobombas de 1.5HP y}$$

2HP; para lo cual elegimos una Electrobomba **Centrifuga y Axial de 2HP**

Todos estos cálculos son para un determinado caso en un punto específico, que se utiliza para la construcción del módulo hidráulico.

h) Selección de la Electrobomba Hidráulica:

- Para la selección de la Electrobomba Centrifuga o estacionaria, se optará por la potencia de 2HP, 220v con sistema Trifásico y una eficiencia del 80% con un factor de servicio de 1.15, para el control y la regulación de la velocidad.
- Para la selección de la Electrobomba Axial y Sumergible, se optará por la potencia de 2HP, 220v con sistema Trifásico y una eficiencia del 80% con un factor de servicio de 1.15 y con 7 etapas de impulsión, para el control y la regulación de la velocidad.

- ***¿Por qué la selección de una electrobomba de 2HP?***
 - Haciendo el estudio de mercado en las diferentes Empresas del País y enviando las cotizaciones respectivas, se encontró la electrobomba más pequeña siendo de 2HP en alimentación trifásica.
 - Para el control de velocidad y caudal es vital que la electrobomba sea de alimentación trifásica y sea un motor de inducción rotor jaula de ardilla una de las más usadas en el sector industrial; por tener un costo económico y ser muy comercial.

A.- ELECTROBOMBA CENTRIFUGA:

Características:

- Marca : PEDROLLO
- Suministro : Trifásico
- Tipo : Centrifugo
- N° de serie : 142626 T1
- Potencia : 2hp
- Voltaje : 220
- Intensidad : 6.8A en Triangulo
- Frecuencia : 60Hz
- F.D.P. : 0.85
- Tipo de Serv. : S1
- Factor de Serv. : 1.15
- Clase de Aislamiento : F
- Altura : 4000msnm
- Tipo de Ser. : Continuo
- Tubería de Succión : 1 ¼"
- Tubería de Impulsión : 1"

B.- ELECTROBOMBA CENTRIFUGA:

Características:

- Marca : PEDROLLO
- Suministro : Trifásico
- Tipo : Axial
- N° de serie : 142626 T1
- Potencia : 2hp
- Voltaje : 220
- Intensidad : 6.8A en Triangulo
- Frecuencia : 60Hz
- F.D.P. : 0.85
- Tipo de Serv. : S1
- Factor de Serv. : 1.15
- Clase de Aislamiento : F
- Altura : 4000msnm
- Tipo de Ser. : Continuo
- Tubería de Succión : 1"
- Tubería de Impulsión : 1"

3.2.2 Modelamiento matemático de la Electrobomba Centrifuga:

Para el modelamiento matemático se usará el Software **MatLab 2016** para el procesamiento de datos y como rango máximo se tomará el 100% para todos los parámetros.

Tomando la teoría de Ingeniería de Control, la **Función de Transferencia de 1º Orden** cuando es un sistema de control de Nivel de Líquidos (Integrador), se tiene la siguiente respuesta en el tiempo.

- N = Nivel en (%)
- Cv = Frecuencia (%) de 40Hz, Máximo Valor 60Hz
- θ = Tiempo de Retardo en seg.
- τ = Cte. De Tiempo en seg.

$$K = \frac{\text{Re respuesta}}{\text{Señal}} = \frac{N_{(\max)} - N_{(\min)}}{Cv_{Max} - Cv_{Min}} \dots\dots\dots(12)$$

$$K = \frac{100 - 0}{66.67 - 0} = 1.5$$

El tiempo máx. Para llenar el tanque del reservorio es de 79 seg. a una frecuencia de 40Hz o una velocidad de 2400RPM, con un tiempo de retardo de 2 seg.

$$G_{(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} (e^{-\theta s}) \dots\dots\dots(13)$$

$$\boxed{G_{(s,B1)} = \frac{1.5}{19.25s + 1} (e^{-2s})}$$

(Modelo matemático de la Electrobomba Centrifuga.)

Modelando el comportamiento de la Electrobomba Centrifuga en **MatLab** para una señal tipo Escalón:

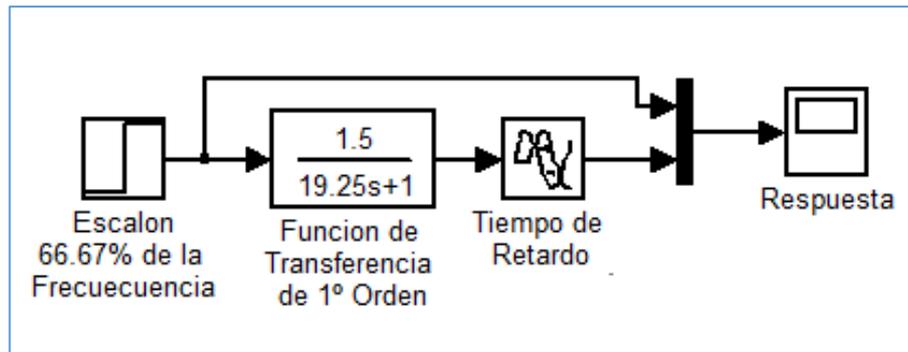


Figura 21: Modelado de la Electrobomba Centrifuga.

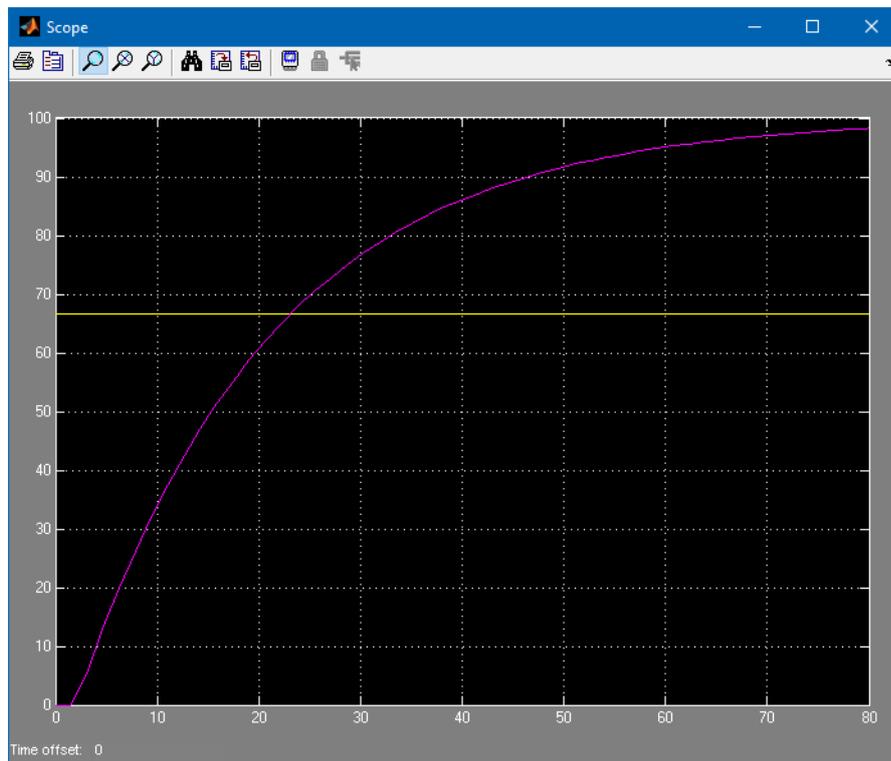


Figura 22: Respuesta de la Electrobomba Centrifuga.

La respuesta respecto al tiempo de estabilización de la variable de entrada (Frecuencia - Velocidad) en función al nivel (Porcentaje - volumen) que es más lenta con una diferencia de 36 segundos para estabilizarse frente a una electrobomba axial.

3.2.3 Modelamiento matemático de la Electrobomba Axial:

Tomando la teoría de Ingeniería de Control, la **Función de Transferencia de 1º Orden** cuando es un sistema de control de Nivel de Líquidos (Integrador), se tiene la siguiente respuesta en el tiempo.

$$K = \frac{\text{Respuesta}}{\text{Señal}} = \frac{N_{(\max)} - N_{(\min)}}{Cv_{\text{Max}} - Cv_{\text{Max}}}$$

$$K = \frac{100 - 0}{66.67 - 0} = 1.5$$

El tiempo max. Para llenar el tanque del reservorio es de 43 seg. a una frecuencia de 40Hz o una velocidad de 2400RPM, con un tiempo de retardo de 1 seg.

$$G_{(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} (e^{-\theta s})$$

$$G_{(s,B1)} = \frac{1.5}{10.5s + 1} (e^{-1s})$$

(Modelo matemático de la Electrobomba Axial.)

Modelando el comportamiento de la Electrobomba Centrífuga en **MatLab** para una señal tipo Escalón:

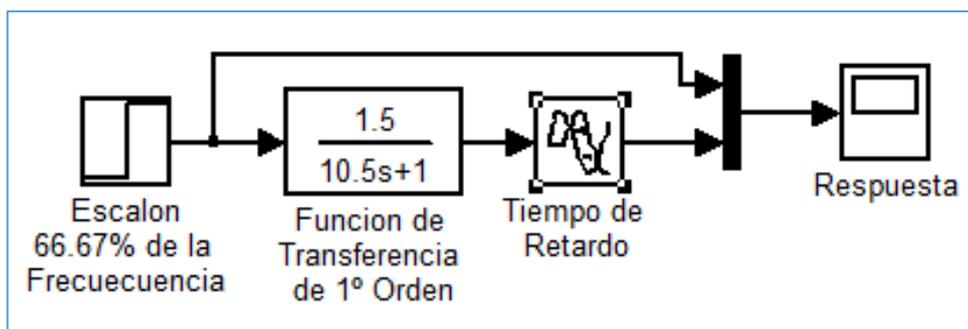


Figura 23: Modelado de la Electrobomba Axial.

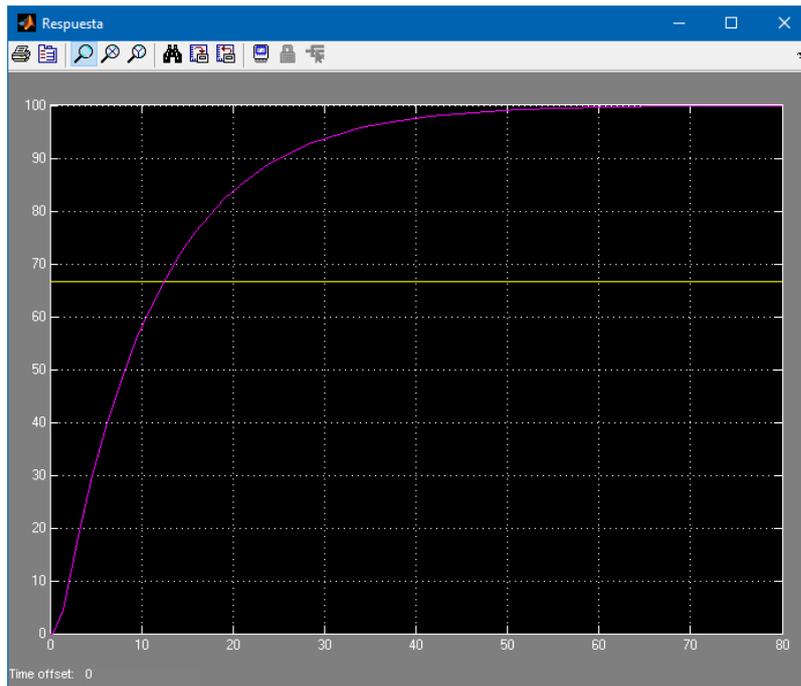


Figura 24: Respuesta de la Electrobomba Axial.

La respuesta respecto al tiempo de estabilización de la variable de entrada (Frecuencia - Velocidad) en función al nivel (Porcentaje - volumen) que es más rápida con una diferencia de 36 segundos para estabilizarse frente a una electrobomba radial.

3.2.4 Construcción del Módulo Hidráulico:

Para la construcción del Módulo Hidráulico de Bombeo por Multi etapa se siguieron los siguientes procesos.

a). Accesorios y Equipos de Mecánicos.

En la construcción del módulo hidráulico, se ha utilizado acero ASTM en: Planchas de 2mm, tubos de 2"x2" con espesor de 2mm para el soporte. Tubo cuadrado de 2" con 2mm de espesor de acero ASTM. Además de tuberías de alta Presión Hidrostática con reforzamiento de acero helicoidal para un coeficiente de fricción del agua de 0.002.

b). **Accesorios y Equipos en la parte Eléctrica.**

Todo lo referente a la parte eléctrica, se considera el sistema eléctrico según el Código Nacional de Electricidad. Con conductores eléctricos N° 12 y 14 AWG y 4x14 NLT conductor con reforzamiento para superficie externa.

El sistema de Protección esta con Interruptores Termo magnéticos, Guarda motores Magnéticos de categoría C y D y Fusible de Protección Ultrarrápido gG.

c). **Accesorios y Equipos en la parte de Instrumentación y Control de Procesos.**

Los Sensores e Instrumentos de Medición de Campo son adquiridos en la marca Schneider Electric, para la medición de Nivel, Presión, Frecuencia, Tensión, Caudal, Intensidad, Potencia, Temperatura.

Para el accionamiento de las electrobombas estacionaria y sumergible se usará variadores de frecuencia de Gamma alta con Interfaz de comunicación MODBUS y Blueetooth, con control de velocidad, rampa de aceleración y desaceleración, con protección integral de sobrecarga y perdida de fase.

d). **Confección de instrumentos de recolección de datos.**

- **Técnicas e Instrumentos de recolección de datos:**

Con el fin de lograr los objetivos planteados se han elegido las siguientes técnicas e instrumentos:

Técnicas	Sensores e Instrumentos
<p>A. Medición.- Permite identificar y establecer datos reales.</p>	<p>Sensores Hidráulicos: Sensor de presión analógico, sensor ultrasónico analógico, caudalímetros, sensor de Nivel de líquidos.</p> <p>Sensores e instrumentos de medición eléctrica: Analizador de redes trifásicas (voltaje, intensidad, frecuencia, potencia, THD), sensor de velocidad, y muchos más instrumentos de medición.</p>
<p>B. Hojas de datos.- Los datos serán llenados en formatos debidamente diseñados y estructurados técnicamente.</p>	<p>- Consignación de datos experimentales para el equipo, hojas estructuradas de datos y técnicos del equipo.</p>

CAPITULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los gráficos mostrados en los resultados son obtenidos en el Controlador Lógico Programable Modelo: TM241 de gama alta instalado en el módulo Hidráulico, con el Software SOMACHINE CENTRAL, utilizando la programación en el lenguaje LADDER, los TRENDS o TRAZA para visualización de Gráficos en tiempo real y la implementación del sistema SCADA.

4.1 ELECTROBOMBA CENTRIFUGA.

Analizando los resultados de Control de Nivel ON OFF de la Figura N° 25 para la Electrobomba Centrifuga se observa los siguiente:

- En la parte inferior en tiempo en min, en el eje vertical se muestra el Nivel en Porcentaje de (0 - 100) % equivalente en volumen (0 - 144) Litros; según al nivel de llenado.
- La línea amarilla representa el Punto de Referencia o Set Point que se muestra en un 80% equivalente a 115.2 Litros (es el proceso ideal), la línea verde representa la Variable de Proceso (es el proceso real), las líneas rojo y azul representan la histéresis del proceso de control de Nivel.
- Observando el grafico para alcanzar un SP de 50% o llenar un volumen de 72 Litros a una frecuencia de 30 Hz (1800) RPM con un caudal de 98L/seg. demora 145 segundos con una histéresis de $\pm 10\%$ y una perturbación máxima.
- En comparación con la Bomba Axial representa un 50% menos en eficiencia hidráulica por usar un impulsor cerrado de tres canales.

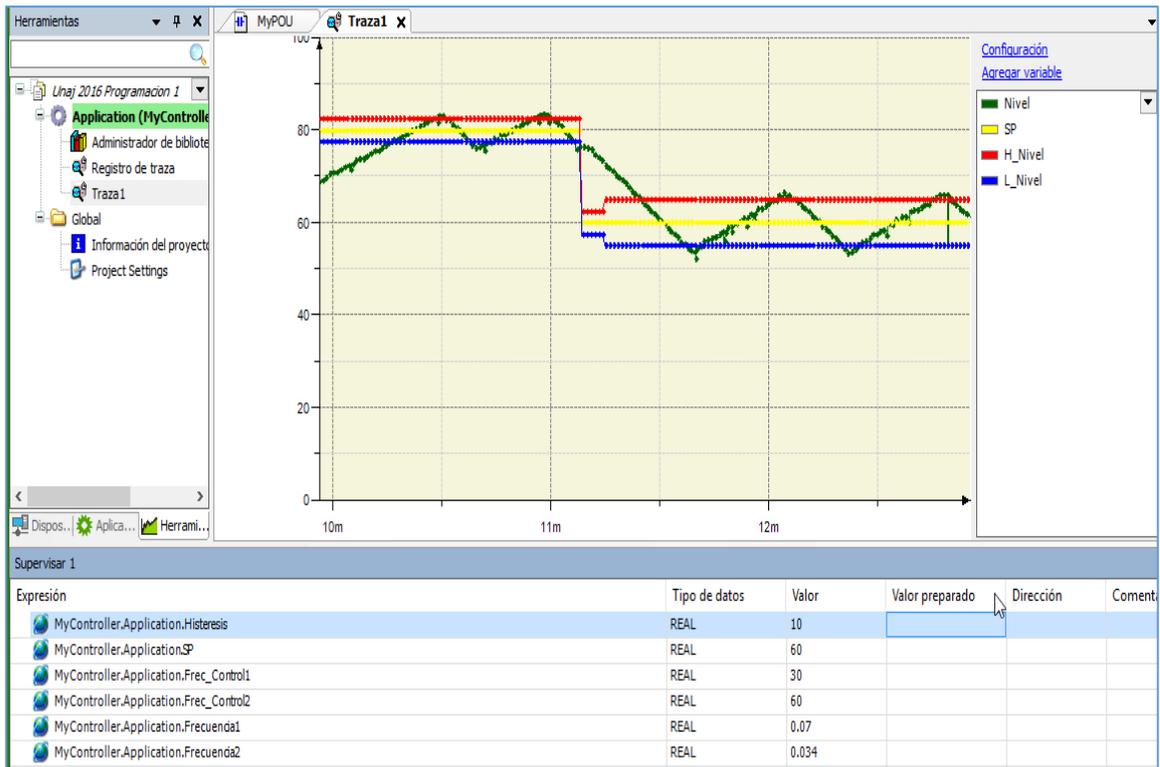


Figura 25: Control ON OFF Sistema Centrifugo.

Analizando los resultados de Control de Nivel PID de la Figura N° 26 para la Electrobomba Centrifuga se observa los siguiente:

- En la parte inferior en tiempo en min, en el eje vertical se muestra el Nivel en Porcentaje de (0 - 100) % equivalente en volumen (0 - 144) Litros; según al nivel de llenado.
- La línea amarilla representa el Punto de Referencia o Set Point que se muestra en un 80% equivalente a 115.2 Litros (es el proceso ideal), la línea verde representa la Variable de Proceso (es el proceso real, el nivel de llenado), la línea roja representa la variable de proceso (la velocidad de rotación de la electrobomba en RPM y el caudal en L/seg.).
- Observando el grafico el sistema hidráulico responde con un error del 2% para un SP de 70% a una perturbación variable.
- En control de frecuencia y velocidad es muy variable porque es directamente proporcional con la perturbación.
- El motor asíncrono rotor jaula de ardilla de la Electrobomba Centrifuga es de clase de aislamiento F el cual soporta la pulsación de la frecuencia de modulación en el sistema de control proporcionado por el Variador de Frecuencia.



Figura 26: Control PID Sistema Centrifugo.

4.2 ELECTROBOMBA AXIAL.

Analizando los resultados de Control de Nivel ON OFF de la Figura N° 27 para la Electro bomba Sumergible se observa los siguiente:

- En la parte inferior en tiempo en min, en el eje vertical se muestra el Nivel en Porcentaje de (0 - 100) % equivalente en volumen (0 - 144) Litros; según al nivel de llenado.
- La línea amarilla representa el Punto de Referencia o Set Point que se muestra en un 50% equivalente a 72 Litros (es el proceso ideal), la línea verde representa la Variable de Proceso (es el proceso real), las líneas rojo y azul representan la histéresis del proceso de control de Nivel.
- Observando el grafico para alcanzar un SP de 50% o llenar un volumen de 72 Litros a una frecuencia de 30 Hz (1800) RPM demora 53 segundos con una histéresis de $\pm 10\%$ y una perturbación máxima.
- En comparación con la Bomba Axial representa un 50% mayor en eficiencia hidráulica por usar cuatro impulsores cerrados de tres canales.

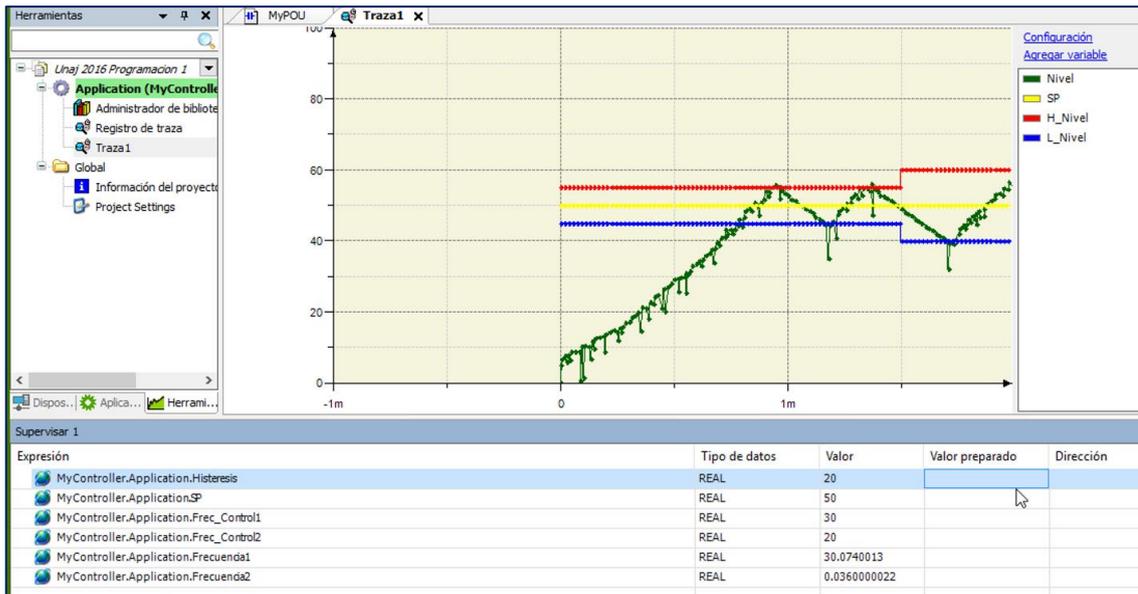


Figura 27: Control ON OFF Sistema Axial.

Analizando los resultados de Control de Nivel PID de la Figura N° 28 para la Electrobomba Sumergible se observa lo siguiente:

- En la parte inferior en tiempo en min, en el eje vertical se muestra el Nivel en Porcentaje de (0 - 100) % equivalente en volumen (0 - 144) Litros; según al nivel de llenado.
- La línea amarilla representa el Punto de Referencia o Set Point que se muestra en un 80% equivalente a 115.2 Litros (es el proceso ideal), la línea verde representa la Variable de Proceso (es el proceso real, el nivel de llenado), la línea roja representa la variable de proceso (la velocidad de rotación de la electrobomba en RPM y el caudal en L/seg.).
- Observando el grafico el sistema hidráulico responde con un error del 2% para un SP inicial de 50% a una perturbación variable.
- En control de frecuencia y velocidad es muy variable porque es directamente proporcional con la perturbación.
- El motor asíncrono rotor jaula de ardilla de la Electrobomba Centrifuga es de clase de aislamiento F el cual soporta la pulsación de la frecuencia de modulación en el sistema de control proporcionado por el Variador de Frecuencia.

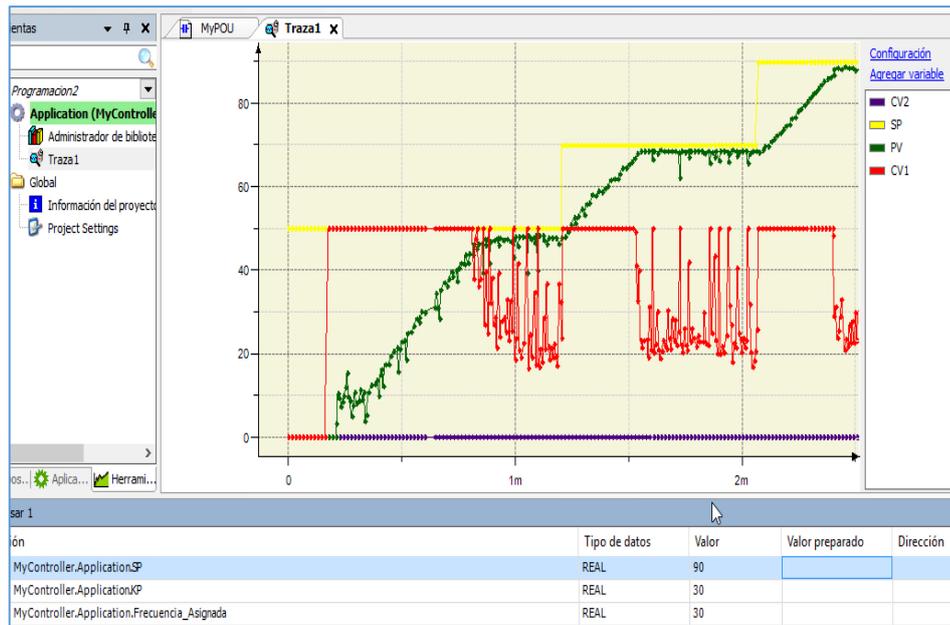


Figura 28: Control PID sistema Axial:

4.3 DISCUSIÓN.

Analizando la respuesta del control PID para ambas electrobombas, el sistema axial se estabiliza más rápido generando ruido en la PV en comparación con el sistema radial que genera menos ruido mostrado en el gráfico N° 26 y 28.

En comparación con la Bomba Axial sumergible de cuarto impulsores en serie cerrados de tres canales usado en el sistema hidráulico se hace uso una eficiencia hidráulica del 50% más que el sistema radial de una sola etapa para una potencia de 2HP. Según (Jiandong et al., 2017). Los resultados muestran que cuando la anchura de entrada del difusor es menor que el ancho de la toma del rodete, un aumento en la anchura de entrada del difusor siempre causa una reducción en la altura de presión de la bomba y la eficiencia de la bomba aumenta con un caudal pequeño, pero disminuye con un gran caudal.

Con las bombas centrífugas convencionales (CEN), menos del 50% de los agricultores del sur de Bangladesh invierten en riego, en parte debido a los altos costos de energía diesel. Las nuevas políticas están dando prioridad a la intensificación sostenible de los cultivos en el delta de Bangladesh. Este objetivo es poco probable que se logre sin cambios fundamentales en la energía y la economía del riego. Cuando se dispone de agua superficial, las bombas de flujo axial (AFP) pueden comprender parte de la solución a este problema. Al comparar los resultados hidráulicos, energéticos y económicos de los prototipos de AFP y bombas CEN, estos últimos produjeron tasas de descarga aún menos consistentes que las AFPs en todas las cabezas. (Krupnik et al., 2015).

CONCLUSIONES

- Para la construcción del módulo Hidráulico se ha diseñado la estructura y el soporte mecánico para un reservorio de 144 litros y acumulador de 360 litros, integrando el sistema de bombeo axial, radial y el sistema de control por PLC y Variador de Frecuencia.
- Se ha seleccionado la instrumentación adecuada para el modelamiento matemático de las Bombas Sumergible y su respectivo Control de procesos, los sensores de Nivel Ultrasónicos de alta precisión con un rango de trabajo de 3000 a 30000 en números enteros para el control dándonos como resultado la evaluación del nivel de 0 a 100% incluidos los sensores de presión analógicos para el control de caudales y los sensores de velocidad en tiempo real que interactúan muy bien con el PAC Modicon TM241 y el Variador de frecuencia Altivar 32.
- La programación del sistema de control y supervisión de las Electrobombas se ha realizado en el lenguaje ANSI ISA 1131-3 usando el lenguaje Ladder y BDF, además del sistema de Monitorización Trazas o TREND (Gráficos de Monitorización en tiempo Real); el Controlador Automata Programable soporta control Numérico, PID y Control Binario o booleano; toda la programación del sistema de control se ha realizado en el Software SOMACHINE y la simulación en MATLAB.
- El caudal mínimo de la electrobomba centrífuga es a 10 Hz con 0 L/seg. y el caudal máximo es de 1.75938 l/seg. a 60 Hz, el caudal mínimo de la electrobomba axial es a 7 Hz con 0 L/seg. y el caudal máximo es de 3.9377414 L/seg. a 60 Hz, considerando el sistema axial una eficiencia del 40% mayor al de una bomba centrífuga siendo ambas electrobombas de 2HP. En el sistema de control y monitoreo de estabilidad las dos electrobombas responden bien cuando trazo un Set Point entre 0 y 100%, pero el sistema axial responde rápidamente en cuanto al control de Nivel (Llenado más rápido) en un 30% más rápido.

RECOMENDACIONES

- Recomendamos investigar más sobre estos temas por razones de eficiencia energética para que este sistema hidráulico se suministre de energía renovable solar Fotovoltaica.
- Investigar para la interacción con sistemas de energía solar fotovoltaica en plantas de bombeo solar.
- Proporcionar una PC o Laptop para poder monitorear completamente las variables de entradas y salidas (Parámetros de Control e Indicadores).

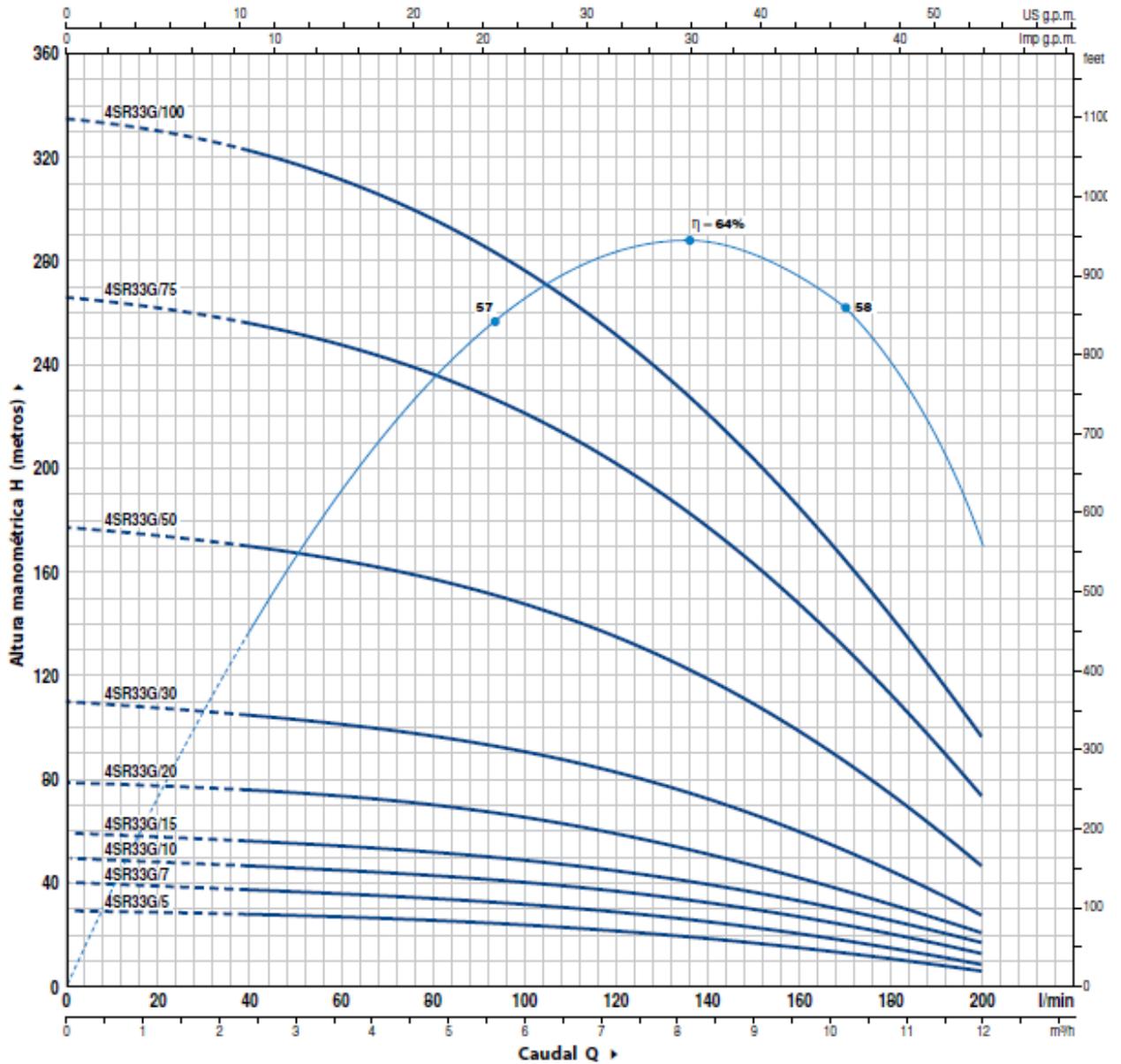
BIBLIOGRAFÍA

- Andri, F., Ida Bagus Alit, S., & Agung, I. G. A. P. R. (2016). Rancang Bangun Sistem Pencahayaan Otomatis Berbasis Pemrograman Ladder PLC (Programmable Logic Controller) Zelio. *Majalah Ilmiah Teknik Elektro, Vol 15, Iss 2, Pp 87-92* (2016)(2), 87. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsdoj&AN=edsdoj.f72301a7eee74b07979361da38842721&lang=es&site=eds-live&scope=site>
- Grubelnik, V., & Marhl, M. (2005). Drop formation in a falling stream of liquid. *American Journal of Physics, 73*(5), 415-419. doi:doi:<http://dx.doi.org/10.1119/1.1866100>
- Han, W., Maa, W., Li, R., & Li, Q. (2012). The Numerical Analysis of Radial Thrust and Axial Thrust in the Screw Centrifugal Pump. *Procedia Engineering, 31*, 176-181. doi:10.1016/j.proeng.2012.01.1009
- Jiandong, L., Tao, P., Deliang, C., Xiuji, Z., Qiang, Y., Flerchinger, G. N., . . . Yanbo, S. (2017). An Improved Ångström-Type Model for Estimating Solar Radiation over the Tibetan Plateau. *Energies (19961073), 10*(7), 1-28. doi:10.3390/en10070892
- Junhui, Z., Ying, L., Bing, X., Min, P., & Fei, L. (2017). Experimental Study on the Influence of the Rotating Cylinder Block and Pistons on Churning Losses in Axial Piston Pumps. *Energies (19961073), 10*(5), 1-15. doi:10.3390/en10050662
- Krupnik, T. J., Santos Valle, S., Islam, M. S., Hossain, A., Gathala, M. K., & Qureshi, A. S. (2015). ENERGETIC, HYDRAULIC AND ECONOMIC EFFICIENCY OF AXIAL FLOW AND CENTRIFUGAL PUMPS FOR SURFACE WATER IRRIGATION IN BANGLADESH. *Irrigation & Drainage, 64*(5), 683-693. doi:10.1002/ird.1940
- Liu, H., Wang, Y., Liu, D., Yuan, S., & Wang, J. (2013). Assessment of a turbulence model for numerical predictions of sheet-cavitating flows in centrifugal pumps? *Journal of Mechanical Science and Technology, 27*(9), 2743-2750. doi:10.1007/s12206-013-0720-8
- Mataix, C. (1993). Mecanica de Fluidos y Maquinas Hidraulicas. *Turbomaquinas*, 1-651.
- Ogata, K. (2005). Ingenieria de Control Moderna. 5^o Edicion, 1-987.
- Sahin, A. (2016). A New Inverse Solution Assessment for the Recovery Test Using Radial Basis Function Collocation Method. *Water Resources Management, 30*(3), 947-962. doi:10.1007/s11269-015-1201-x
- TECSUP. (2014). Estrategias de Control Automatico. *Instrumentacion, Automatizacion y Control de procesos, 5^o Edicion*, 1-365.
- Tverdokhle, I., Knyazeva, E., Birukov, A., & Lugovaya, S. (2012). About Designing the Flow Part of a Multi-Stage Pump with a Minimum Radial Dimensions. *Procedia Engineering, 39*, 84-90. doi:10.1016/j.proeng.2012.07.011
- Vazifeshenas, Y., Farhadi, M., Sedighi, K., & Shafaghat, R. (2016). Turbulent flow analysis and cavitation prediction in axial cooling water pump. *International Journal of Multiphysics, Vol 6, Iss 4 (2016)*(4). doi:10.1260/1750-9548.6.4.365
- Yabin, L., Lei, T., Ming, L., Yue, H., & Yun, X. (2017). Influence of Prewhirl Angle and Axial Distance on Energy Performance and Pressure Fluctuation for a Centrifugal Pump with Inlet Guide Vanes. *Energies (19961073), 10*(5), 1-14. doi:10.3390/en10050695
- Yue, H., Lei, T., Yabin, L., Yun, X., Jinsong, Z., & Baoshan, Z. (2017). Energy Performance and Radial Force of a Mixed-Flow Pump with Symmetrical and Unsymmetrical Tip Clearances. *Energies (19961073), 10*(1), 1-13. doi:10.3390/en10010057
- Zalogin, O. V., & Noskov, A. S. (2016). On the Study of Setting Dynamics of Axial Piston Pumps with Electro Hydraulic Proportional Control. *Procedia Engineering, 150*, 289-293. doi:10.1016/j.proeng.2016.07.005

ANEXOS

A. Electrobomba Sumergible (Axial):

a. Curva de Datos y Prestaciones, 3450rpm - 60Hz



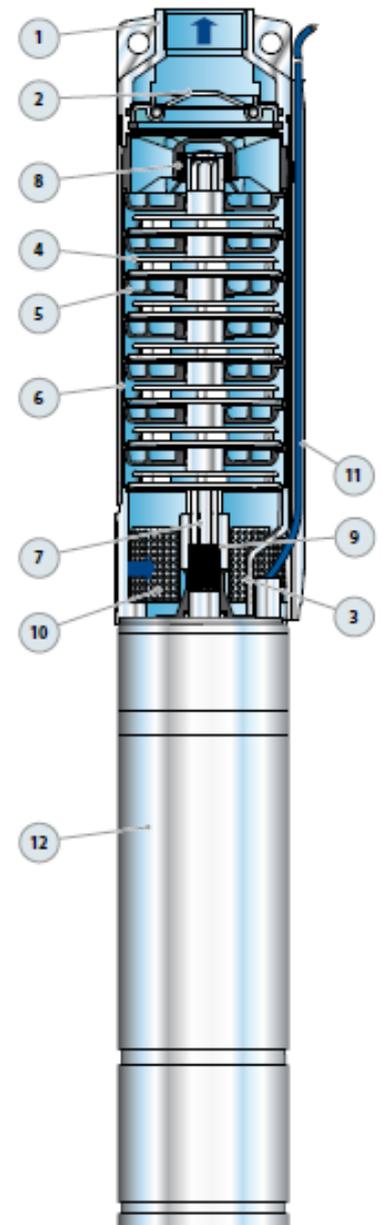
MODELO		POTENCIA		Q	H metros												
Monofásica	Trifásica	kW	HP		0	2.4	3.6	4.8	6	7.2	8.4	9.6	10.8	12			
				l/min	0	40	60	80	100	120	140	160	180	200			
4SR33Gm/5	4SR33G/5	0.37	0.50	H metros	30	28	27	25	23.5	21.5	19	16	12.5	7			
4SR33Gm/7	4SR33G/7	0.55	0.75		41	38	36	34.5	32.5	30	25.5	21.5	16.5	10			
4SR33Gm/10	4SR33G/10	0.75	1		50	47	45	43	41.5	38	33	28	21	14			
4SR33Gm/15	4SR33G/15	1.1	1.5		60	56	54	51.5	49	45	40	33	25	17			
4SR33Gm/20	4SR33G/20	1.5	2		79	76	73	70.5	65.5	59.5	52	43	33	22			
4SR33Gm/30	4SR33G/30	2.2	3		110	105	101	97	90	83	73	60	46	29			
-	4SR33G/50	3.7	5		177	170	165	158	147	135	118	98	76	48			
-	4SR33G/75	5.5	7.5		265	257	248	236	222	204	179	148	112	75			
-	4SR33G/100	7.5	10		335	322	312	297	280	254	224	185	142	96			

Q = Caudal H = Altura manométrica total

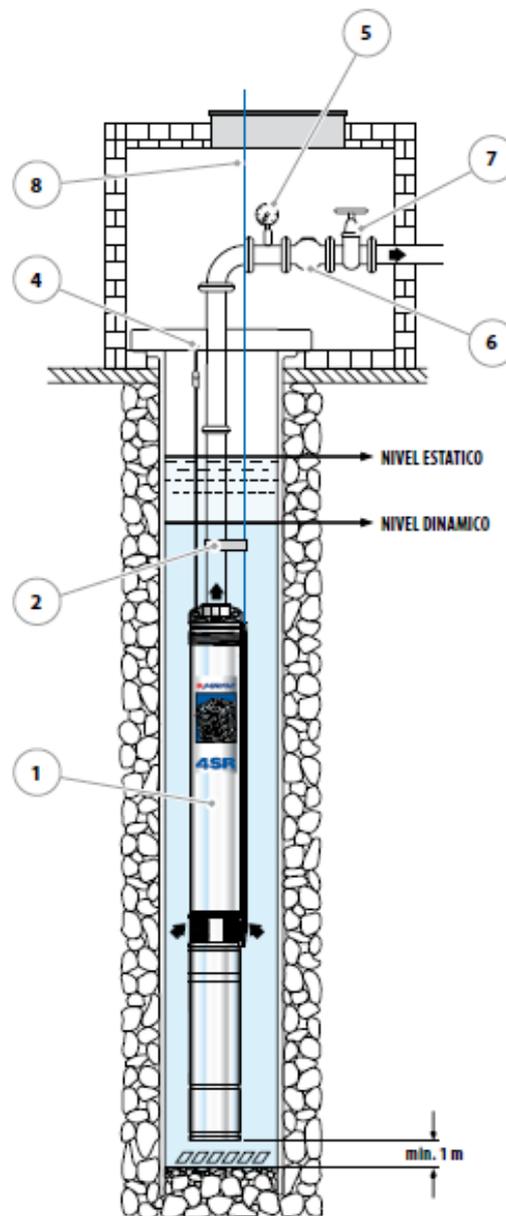
Tolerancia de las curvas de prestación según EN ISO 9906 Grade 3.

b. Componentes Mecánicos de la Electrobomba Sumergible.

POS. COMPONENTE	CARACTERISTICAS CONSTRUCTIVAS
1 CUERPO DE IMPULSION	Acero inoxidable micro fundido AISI 304 dotado de boca de impulsión roscada NPT ANSI B 1.20.1
2 VALVULA DE RETENCION	Acero inoxidable AISI 304
3 SOPORTE	Acero inoxidable AISI 304, con dimensiones según norma NEMA
4 RODETE	Lexan 141-R
5 DIFUSOR	Noryl GFN2V
6 CAJA PORTA DIFUSOR	Acero inoxidable AISI 304
7 EJE BOMBA	Acero inoxidable AISI 304
8 RODAMIENTOS BOMBA	Parte fija en tecnopolmero especial y parte rotatoria en acero inoxidable AISI 316 revestida de óxido de cromo para resistir a la arena
9 CASQUILLO	Acero inoxidable AISI 316L hasta 2.2 kW; Acero inoxidable AISI 304 para potencias superiores
10 FILTRO	Acero inoxidable AISI 304
11 PROTECTOR DE CABLE	Acero inoxidable AISI 304
12 MOTOR 4"	4PD = "PEDROLLO"



c. Instalación de la Electrobomba Sumergible.



COMPONENTES

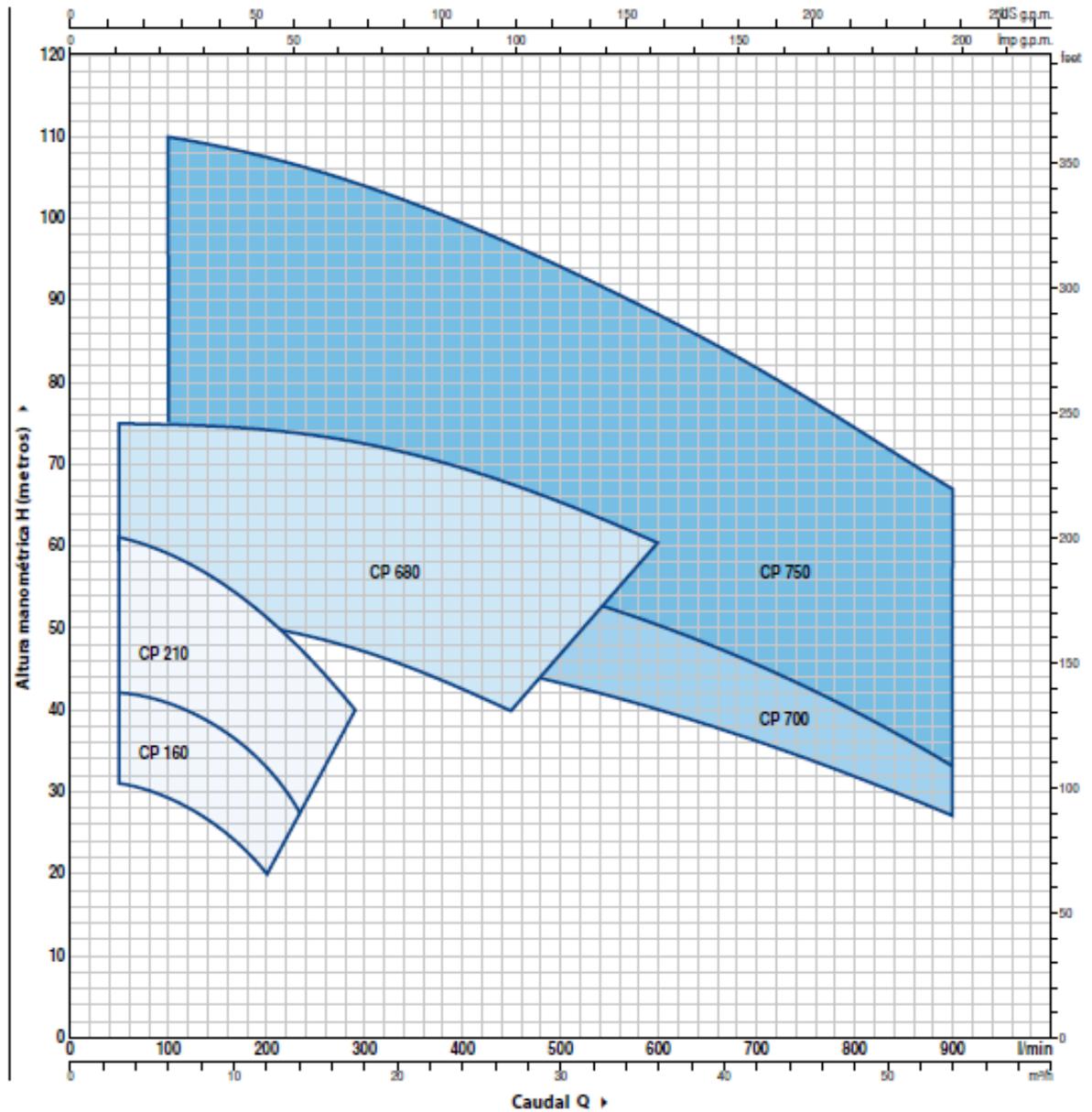
- | | |
|--|---------------------------------------|
| 1) Electrobomba sumergida | 8) Cable de alimentación eléctrica |
| 2) Cintas para fijar el cable de alimentación | 9) Cuadro eléctrico |
| 3) Sondas control nivel contra la marcha en seco | 10) Depósito autoclave |
| 4) Abrazadera de anclaje | 11) Presostato |
| 5) Manómetro | 12) Electro-válvula/electro-compresor |
| 6) Válvula de retención | |
| 7) Válvula de compuerta del caudal | |

B. Electrobomba Estacionaria (Centrifuga):

a. Curva de Datos y Prestaciones, 3450rpm - 60Hz

CAMPO DE PRESTACIONES

60 Hz n= 3450 rpm HS= 0 m



MODELO		POTENCIA (P2)			Q	H metros																
Monofásica	Trifásica	kW	HP	▲		m³/h	0	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.2	14.4	15	16.2	16.8			
					l/min	0	50	75	100	125	150	175	200	220	240	250	270	280				
CPm 160C	CP 160C	1.1	1.5	IE2	H metros	32	31	30.5	29.5	28	26	23	20									
CPm 160B	CP 160B	1.5	2	IE3		37	36	35.5	34.5	33.5	31.5	29	26.5	23								
-	CP 160A	2.2	3			43	42	41.5	40.5	39.5	38	35.5	33	30	26							
CPm 210C	CP 210C	2.2	3			46	45.5	44.5	43.5	42	40	37.5	34.5	32	28.5	27						
-	CP 210B	3	4			54	53	52	51	49.5	48	45.5	43	40	38.5	37	34					
-	CP 210A	4	5.5			61	61	60	59	57.5	56	53.5	51	49	46.5	45	42	40				

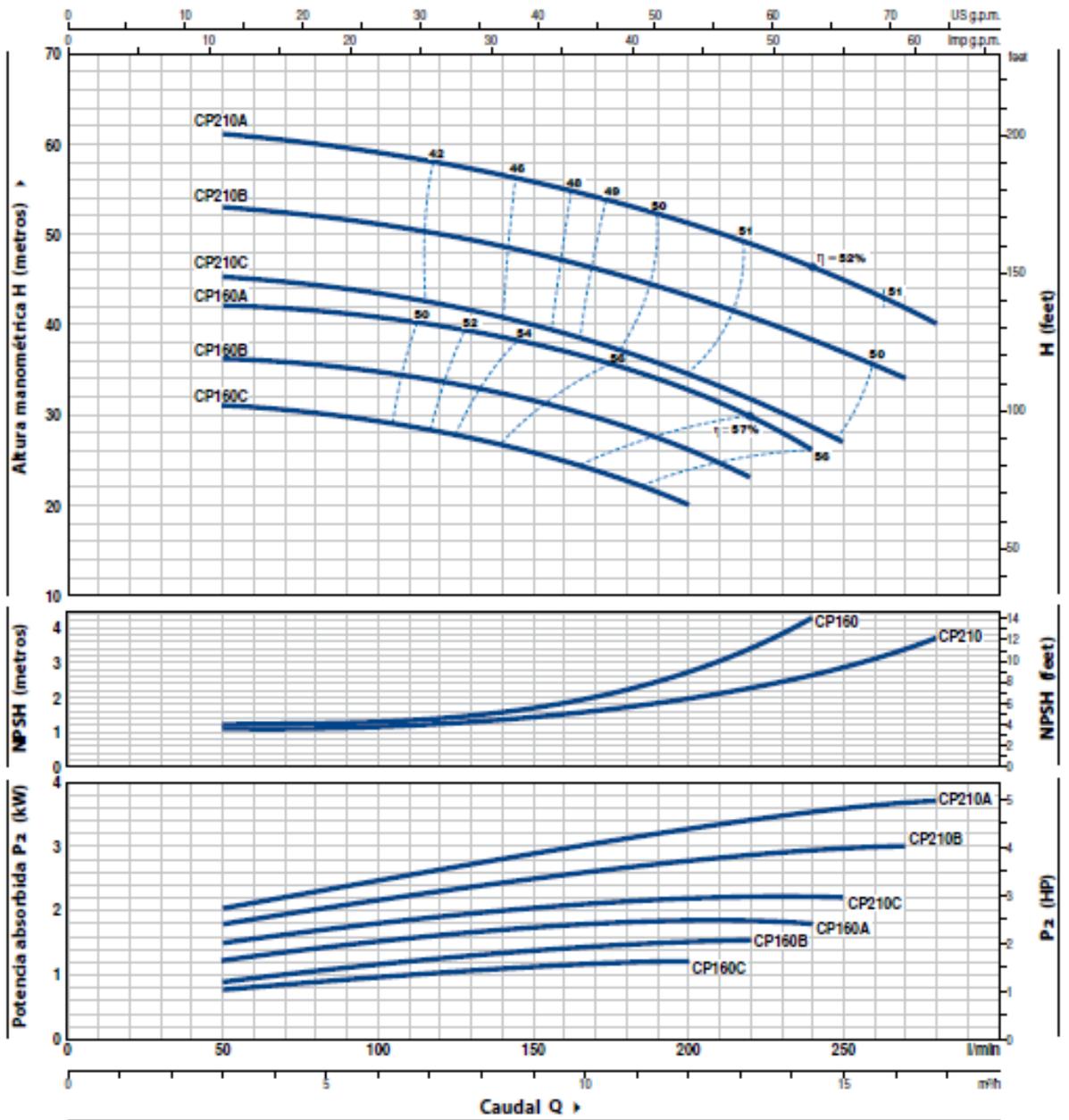
Q = Caudal H = Altura manométrica total HS = Altura de aspiración

Tolerancia de las curvas de prestación según EN ISO9906 Grado 3B.

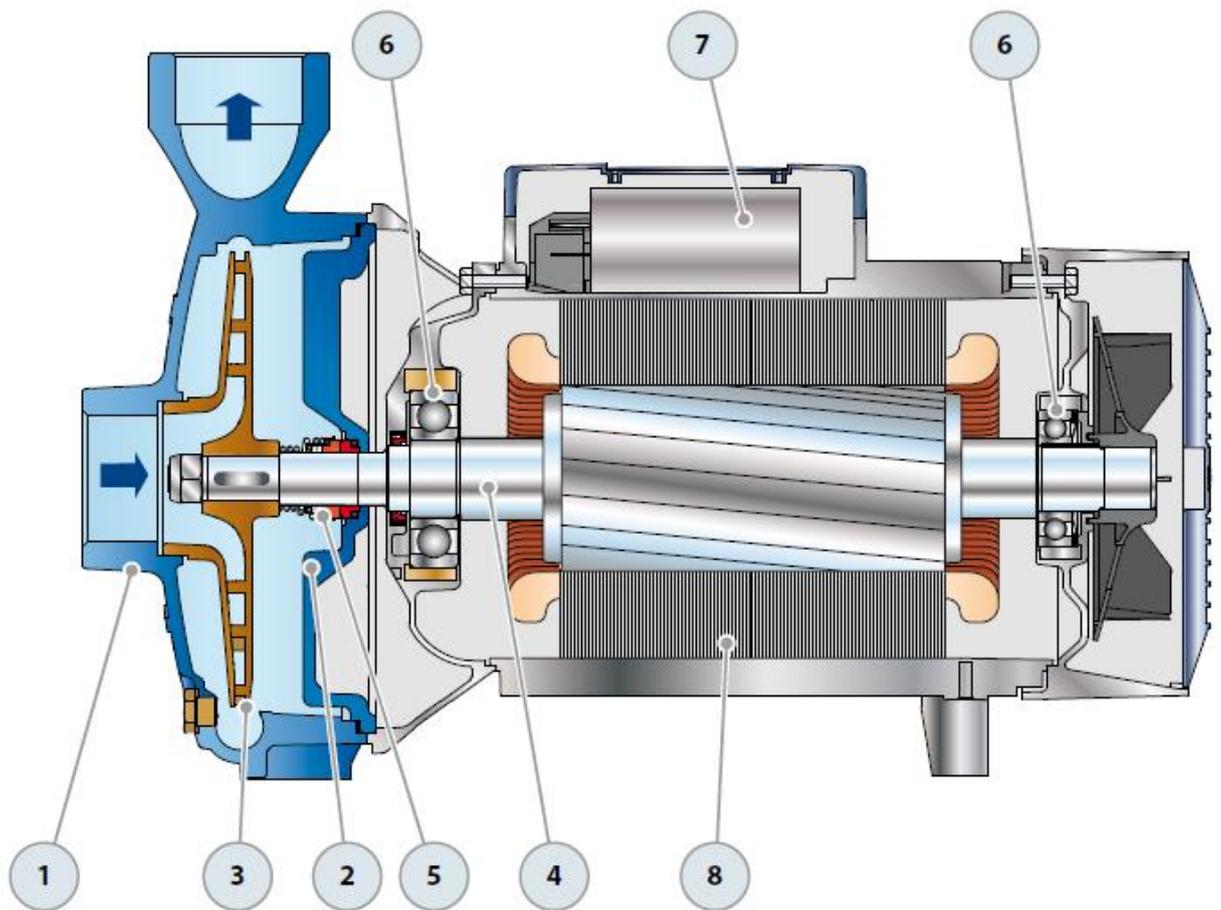
▲ Clase de rendimiento del motor trifásico (IEC 60034-30)

CURVAS Y DATOS DE PRESTACIONES

60 Hz n= 3450 rpm HS= 0 m



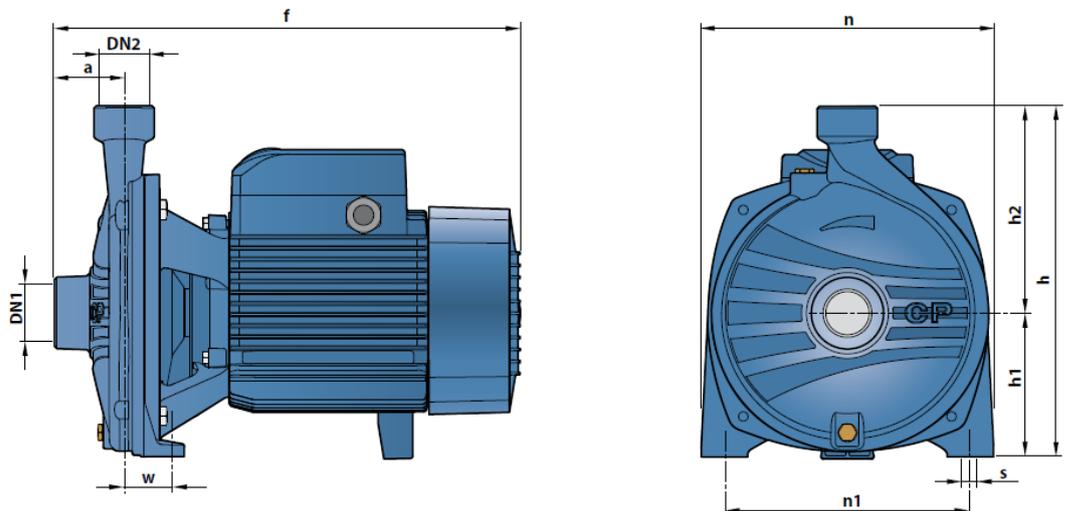
b. Componentes Mecánicos de la Electrobomba Sumergible.



POS. COMPONENTE	CARACTERISTICAS CONSTRUCTIVAS					
1 CUERPO BOMBA	Hierro fundido con bocas roscadas ISO 228/1					
2 TAPA	Hierro fundido					
3 RODETE	Latón para CP 680, CP 700 Hierro fundido para CP 750					
4 EJE MOTOR	Acero inoxidable EN 10088-3 - 1.4104					
5 SELLO MECANICO	<i>Electrobomba</i>	<i>Sello</i>	<i>Eje</i>	<i>Materiales</i>		
	<i>Modelo</i>	<i>Modelo</i>	<i>Díámetro</i>	<i>Anillo fijo</i>	<i>Anillo móvil</i>	<i>Elastómero</i>
	CP 680	FN-24	Ø 24 mm	Grafito	Cerámica	NBR
	CP 700	FN-32 NU	Ø 32 mm	Grafito	Cerámica	NBR
6 RODAMIENTOS	<i>Electrobomba</i>	<i>Modelo</i>				
	CP 680	6307 ZZ - C3 / 6206 ZZ - C3				
	CP 700	6310 ZZ - C3 / 6308 ZZ - C3				
	CP 750	6310 ZZ - C3 / 6308 ZZ - C3				
7 CONDENSADOR	<i>Electrobomba</i>	<i>Capacidad</i>				
	<i>Monofásica</i>	<i>(220 V)</i>				
	CPm 680C	90 µF - 450 VL				
8 MOTOR ELECTRICO	CPm: monofásica 220 V - 60 Hz. CP: trifásica 220/380 V - 60 Hz o 220/440 V - 60 Hz. ➔ Las electrobombas trifásicas están equipadas con motores de alto rendimiento en clase IE3 (IEC 60034-30) - Aislamiento: clase F - Protección: IP X5					

c. Dimensión y Peso de Electrobomba Estacionaria.

DIMENSIONES Y PESOS



MODELO		BOCAS		DIMENSIONES mm									kg	
Monofásica	Trifásica	DN1	DN2	a	f	h	h1	h2	n	n1	w	s	1~	3~
CPm 160C	CP 160C	1½"	1"	54	373	260	110	150	207	165	44.5	11	19.7	17.7
CPm 160B	CP 160B												21.0	21.0
-	CP 160A												-	21.0
CPm 210C	CP 210C			60	402	305	125	180	252	210	39.5	11	26.0	27.5
-	CP 210B												-	30.0
-	CP 210A												-	32.0

CONSUMO EN AMPERIOS

MODELO	TENSION		
	220 V	110 V	127 V
CPm 160C	9.0 A	18.0 A	16.5 A
CPm 160B	10.5 A	21.0 A	19.3 A
CPm 210C	15.0 A	-	-

MODELO	TENSION			
	220 V	380 V	220 V	440 V
CP 160C	6.1 A	3.5 A	5.5 A	3.0 A
CP 160B	6.9 A	4.0 A	6.9 A	3.7 A
CP 160A	9.5 A	5.5 A	9.2 A	4.9 A
CP 210C	9.0 A	5.1 A	8.6 A	4.8 A
CP 210B	13.0 A	7.5 A	11.5 A	6.0 A
CP 210A	18.2 A	10.5 A	16.0 A	9.0 A

C. Variador de Frecuencia:

a. Altivar 32:

- El variador Altivar 32 es un convertidor de frecuencia para motores asíncronos trifásicos de 200...240 V de potencia comprendida entre 0,18 kW y 4 kW.
- La sencilla instalación de Altivar 12, basada en el principio de "plug & play" (enchufar y usar), su tamaño compacto, sus funciones integradas y su versión sin radiador lo hacen especialmente adecuado para aplicaciones que impliquen el uso de máquinas industriales simples y ciertas máquinas de consumidor.
- Al tomar en consideración las limitaciones que gobiernan la instalación y el uso en la etapa de diseño, hemos sido capaces de ofrecer una solución fiable y rentable a fabricantes de máquinas simples compactas (OEMs) e instaladores.
- Ejemplos de soluciones ofrecidas:
- Variador configurado en fábrica para arranque sin necesidad de ajuste.

- Herramienta de configuración "Multi-Loader" para cargar una configuración en el variador sin sacarlo de su embalaje.
- Terminales etiquetados para reducir el tiempo de cableado; identificación del variador en el panel frontal. Opción de entrega de múltiples unidades en un solo paquete especial. Al igual que los variadores que se envían individualmente, es posible cargar una configuración en cada variador sin sacarlos de su embalaje.
- **Altivar 32** está especialmente indicado para su uso en aplicaciones con maquinaria industrial sencilla o ciertas máquinas de consumo. Gracias a su tamaño reducido, su elevado rendimiento y su aspecto discreto es especialmente adecuado para los siguientes sectores:

Industria alimentaria (ventilación de cocinas de servicios de catering, máquinas de embolsado, máquinas de amasado en panaderías, invernaderos, etc.)

Pequeñas aplicaciones de manipulación (túneles de lavado para coches, transportadores, etc.)

El sector médico y sanitario (camas de hospital, aparatos de ejercicio).

Máquinas con toma monofásica (aplicaciones para corte y tratamiento de madera, máquinas pulidoras y de limpieza de superficies, bombas para piscinas o de riego, bañeras de hidromasaje, etc.) Nuevos mercados (aplicaciones de energía solar, etc.)

Aplicaciones mecánicas sencillas (motores de 2 velocidades, transmisiones mecánicas, etc.)

Diseño e Integración:

Modo de Actualización de máquinas, haciéndolas más competitivas gracias a sus funciones avanzadas (PID integrado, velocidad múltiple) Altivar 12 aumenta su productividad.

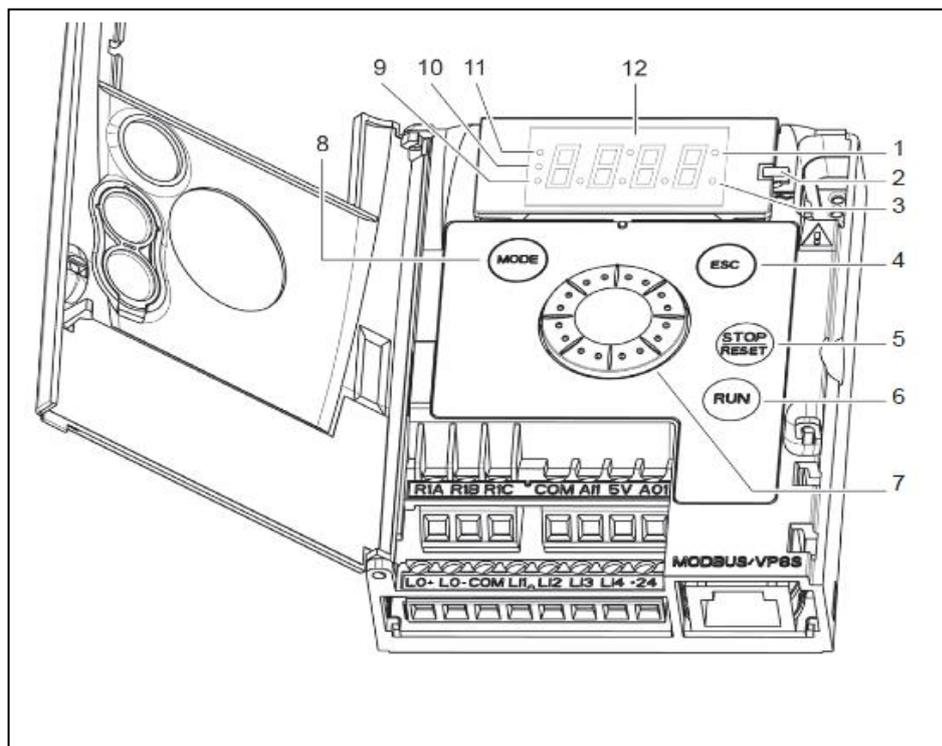
Comunicación fácil con el resto de componentes de su máquina a través del enlace en serie Modbus universal integrado.

Reducción de la profundidad de su equipo: la versión sin radiador disipa el calor hacia el bastidor de la máquina.

Funciones:

Además de las funciones normalmente disponibles en este tipo de variador, el variador Altivar 12 también ofrece lo siguiente:

- a) Cambio entre control local y control a través de los terminales.
- b) Leyes de control de motor: estándar, prestaciones y bomba/ventilador.
- c) Frecuencias ocultas.
- d) Velocidades preseleccionadas.
- e) Regulador PID.
- f) Rampa en S, rampa en U, conmutación de rampa.
- g) Parada en rueda libre, parada rápida.
- h) Marcha Jog.
- i) Configuración de las entradas/salidas lógicas y analógicas.
- j) Detección de subcarga y sobrecarga.
- k) Visualización del estado de las entradas lógicas en la pantalla del variador.
- l) Configuración del modo de visualización de los parámetros.
- m) Registro de errores, etc.



PARTES DE UN VARIADOR DE VELOCIDAD.

1. LED de valor (a) (b).
2. LED de carga
3. LED de unidad (c)
4. Botón ESC: sale de un menú o parámetro, o cancela el valor mostrado para volver al valor previo de la memoria. En la configuración LOCAL, al pulsar el botón ESC durante 2 segundos se alterna entre los modos de control y programación.
5. Botón STOP/RESET: detiene el motor (puede estar escondido tras una cubierta si la función está desactivada). **botones "RUN/STOP"**. Se utiliza para rearmar tras un fallo detectado.
6. Botón RUN: Se pone en marcha en la configuración LOCAL y en la configuración REMOTA si la función está configurada (puede estar escondido tras una cubierta si la función está desactivada).
7. Selector giratorio:
8. Actúa como potenciómetro en la configuración LOCAL y en la configuración REMOTA si la función está configurada.
9. Navegación por las distintas opciones al girarlo hacia la derecha y hacia la izquierda.
10. Selección/validación al pulsarlo.
11. Esta acción se representa mediante este símbolo:
12. Botón MODE:
13. Alternar entre los modos de control y programación. Al pulsar el botón MODE durante 3 segundos se alterna entre las configuraciones REMOTA y LOCAL. Sólo se puede acceder al botón MODE con la puerta del HMI abierta.
14. LED de modo CONFIGURACIÓN (b)
15. LED de modo SUPERVISIÓN
16. LED de modo REFERENCIA
17. 4 visualizadores de "7 segmentos"

Nota: En la configuración LOCAL, los tres LED 9, 10, 11 parpadean simultáneamente en el modo de programación y lucen alternativamente en el modo de control.

Control Remoto:

El funcionamiento y la programación remota por el HMI son posible utilizando el módulo HMI remoto opcional VW3A1006. Las dimensiones son 70 mm (2,76 in) x 50 mm (2,76 in).

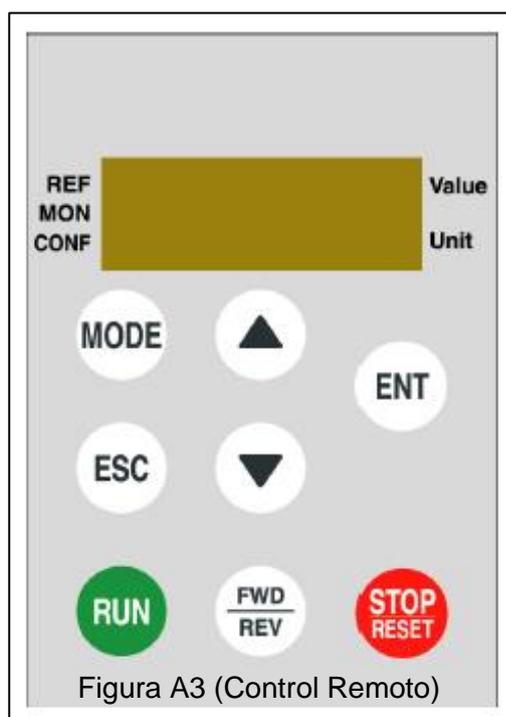
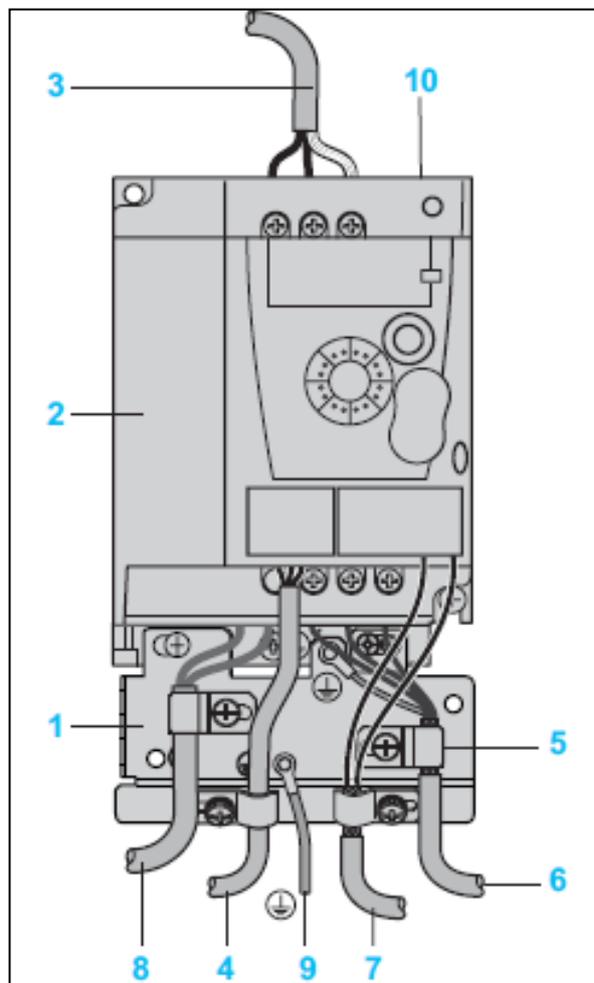


Diagrama de Instalación:

1. Placa de metal a montar en el variador (plano de masa).
2. Variador Altivar 12.
3. Cables de tensión de alimentación no apantallados.
4. Cables no apantallados para la salida de los contactos del relé del fallo.
5. Apantallado de cables **6** y **7** unidos y puestos a tierra lo más cerca posible del variador:
6. Pelar el cable para exponer el apantallado.
7. Fijar el cable a la placa **1** apretando la abrazadera en la parte desnuda del apantallado. El apantallado se debe sujetar con el suficiente apriete a la superficie metálica para garantizar un contacto adecuado.

Para los cables **6** y **7**, el apantallado se debe conectar a tierra y a ambos extremos. El apantallado debe ser continuo y, si se usan terminales intermedios, se deben colocar en cajas metálicas apantalladas de CEM.

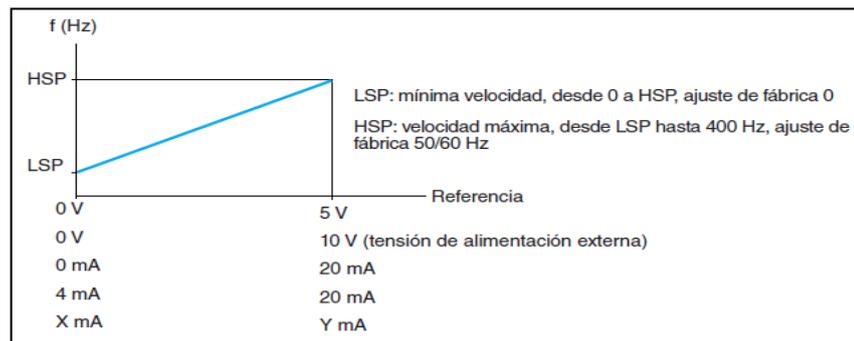
8. Cable apantallado para conectar el motor.
9. Cable apantallado para conectar los cables de señalización de control. Para aplicaciones que requieran varios conductores, use cables con una sección transversal pequeña (0,5 mm²).
10. Cable no apantallado para conectar la unidad de frenado.
11. Cable PE (verde-amarillo).
12. Conmutador selector para desconectar el filtro CEM integrado en variadores ATV 12ppppM2.



FUNCIONES.

Rangos de Velocidad de Funcionamiento:

Determina los dos límites de frecuencia que definen el rango de la velocidad permitido por la maquina en condiciones operativas reales dentro de los límites del par especificados.



Modos de Control:

Hay varios canales de control y referencia que pueden ser independientes.

Los comandos (avance, retroceso, etc.) y las referencias de velocidad se pueden enviar a través de los siguientes canales:

Terminales (entrada/salida lógica y analógica).

Modo local (botones **STOP/RESET** y **RUN** y rueda de navegación).

Terminal de visualización remoto.

Enlace serie Modbus.

Los canales de control y referencia pueden estar separados (modo separado).

Ejemplo: El control Run/Stop (Funcionamiento/Parada) proviene de los terminales y la referencia de velocidad del enlace en serie de Modbus.

Los canales de control y referencia también pueden provenir de la misma fuente (modo no separado).

Control y supervisión con SCADA.

SCADA proviene de las siglas de **S**upervisory **C**ontrol **A**nd **D**ata **A**cquisition (Adquisición de

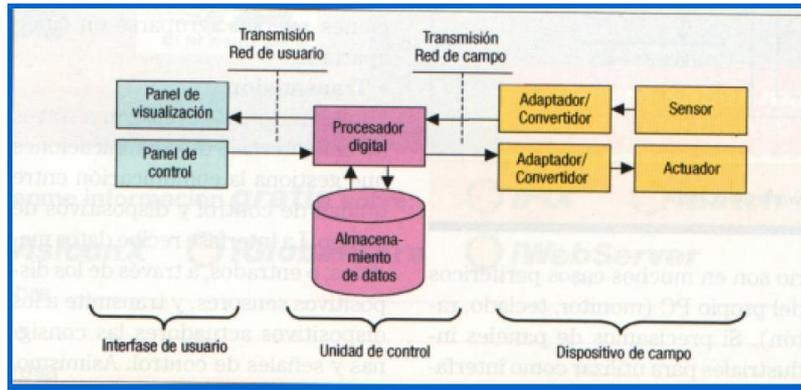
Datos y supervisión de control). Es una aplicación software de control de producción, que se comunica con los dispositivos de campo y controla el proceso de forma automática desde la pantalla del ordenador.

Proporciona información del proceso a diversos usuarios: operadores, supervisores de control de calidad, supervisión, mantenimiento, etc.

Los sistemas de interfaz entre usuario y planta basados en paneles de control repletos de indicadores luminosos, instrumentos de medida y pulsadores, están siendo sustituidos por sistemas digitales que implementan el panel sobre la

Pantalla de un ordenador.

El control directo lo realizan los controladores autónomos digitales y/o autómatas programables y están conectados a un ordenador que realiza las funciones de diálogo con el operador, tratamiento de la información y control de la producción, utilizando el SCADA.

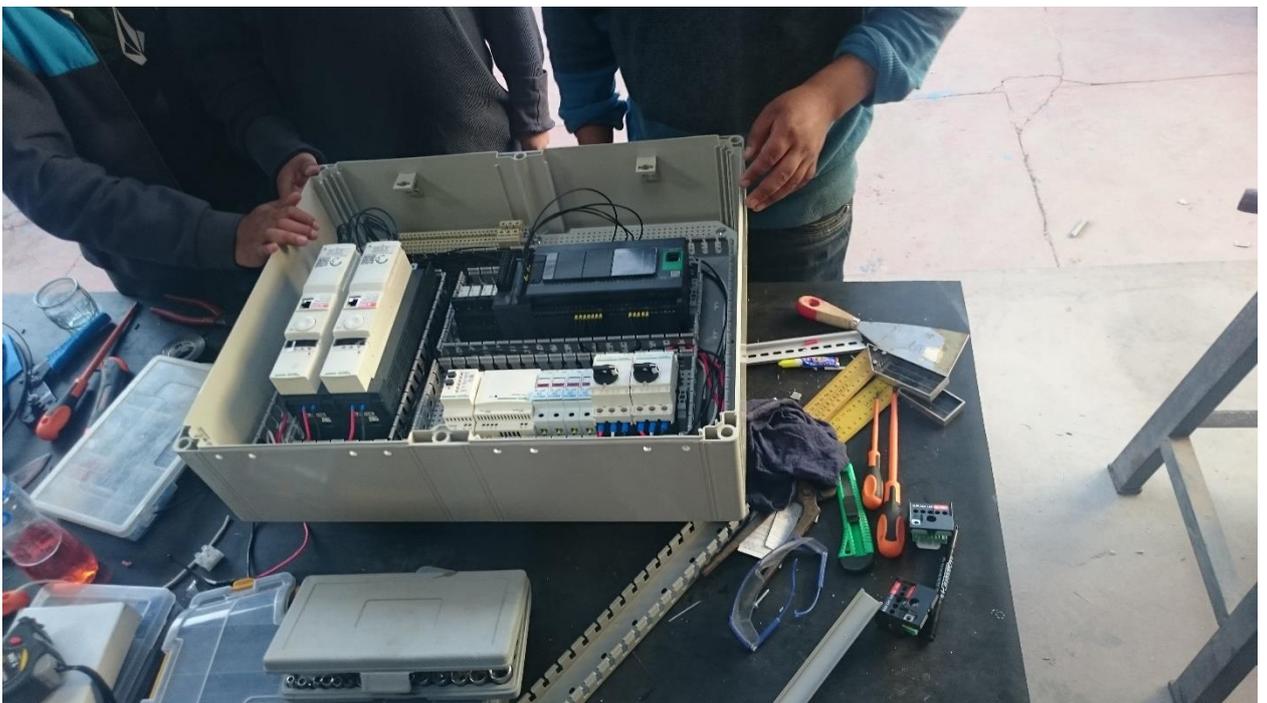


D. Fotos de Construcción del Módulo:

Lugar: Taller Mecánico e Instalaciones de la EPIER – UNAJ, Juliaca.



Instalación del tablero de Control del sistema Hidráulico, Variador de Frecuencia, mayo del 2016



Instalación del tablero de Control del sistema Hidráulico, PLC, mayo del 2016



Instalación del tablero de Control del sistema Hidráulico, PLC, mayo del 2016



Instalación del tablero de Control del sistema Hidráulico, Tapa de Control, junio del 2016



Construcción del Acumulador, Soldadura, junio del 2016



Construcción del Acumulador, Doblado, junio del 2016



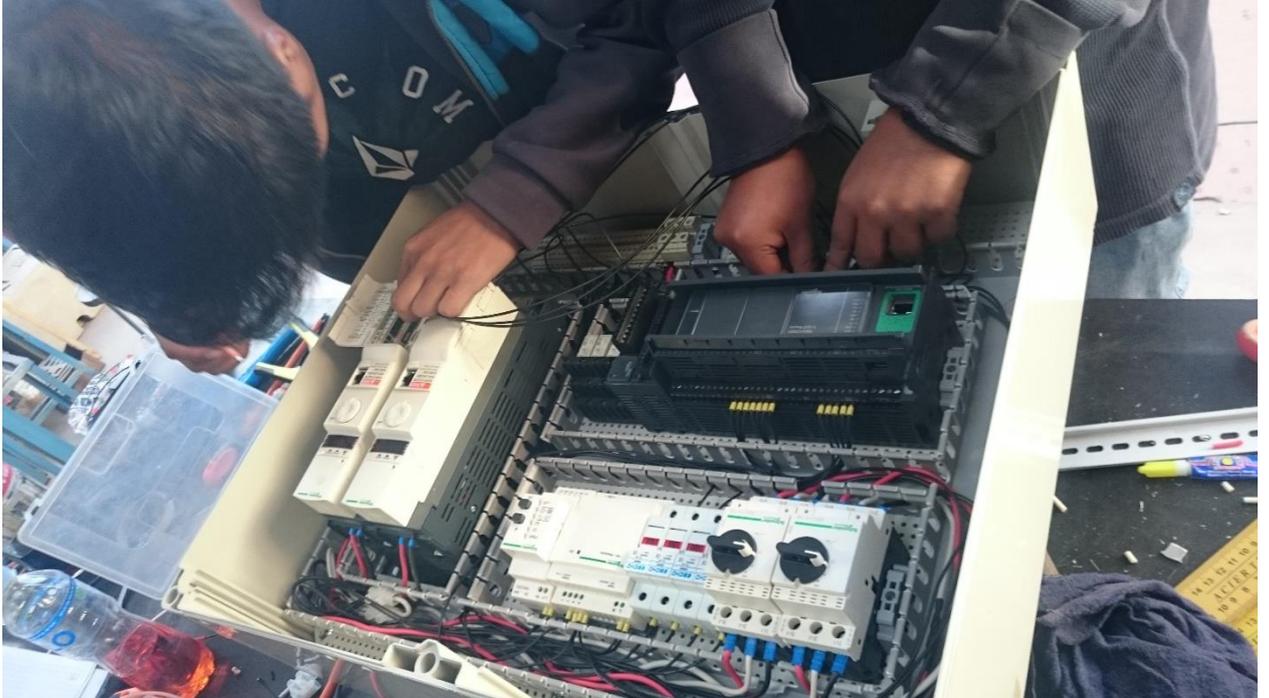
Instalación del tablero de Control del sistema Hidráulico, Cableado, junio del 2016



Reunión con los estudiantes de la EPIER, del equipo de investigación, junio del 2016



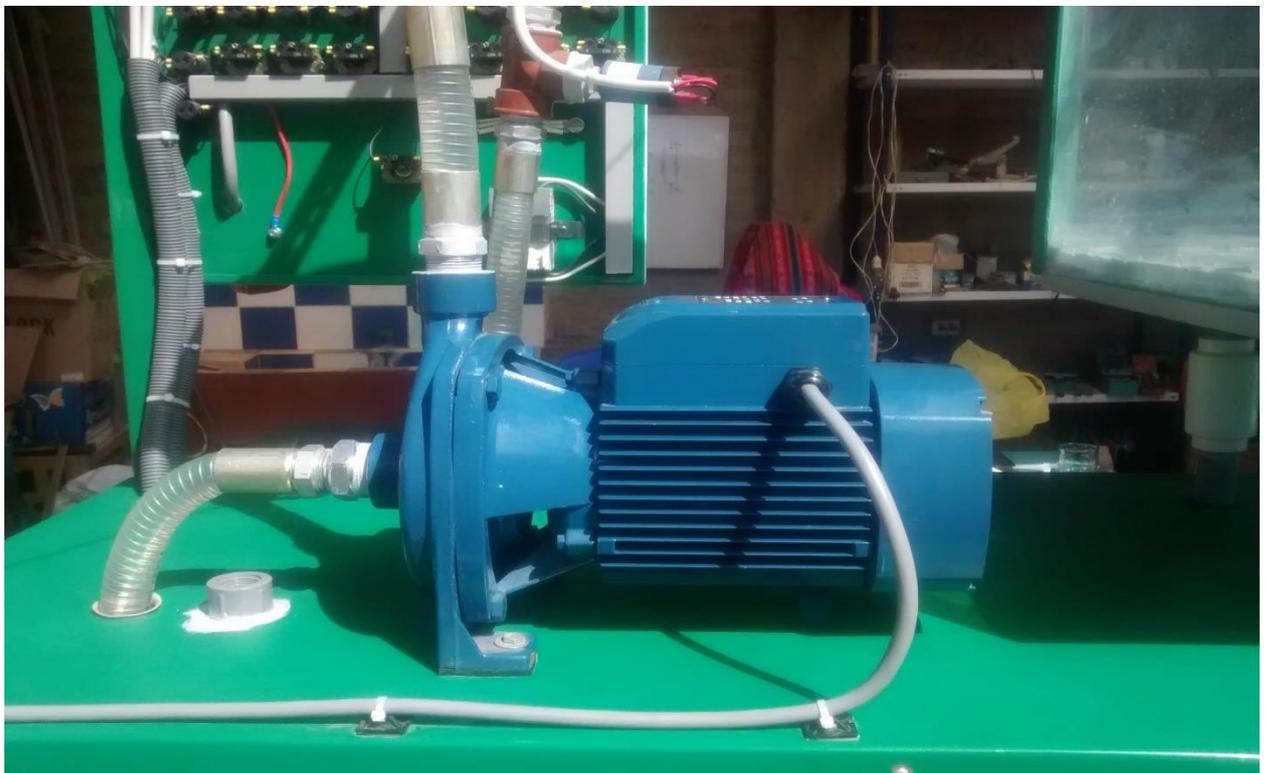
Dimensionamiento de la estructura metálica, acumulador, junio del 2016



Instalación del tablero de Control del sistema Hidráulico, Cableado, junio del 2016



Tablero de Control y cámara de la Electrobomba Sumergible, julio del 2016



Electrobomba Estacionaria, julio del 2016



Panel de Control del Módulo Hidráulico, agosto del 2016



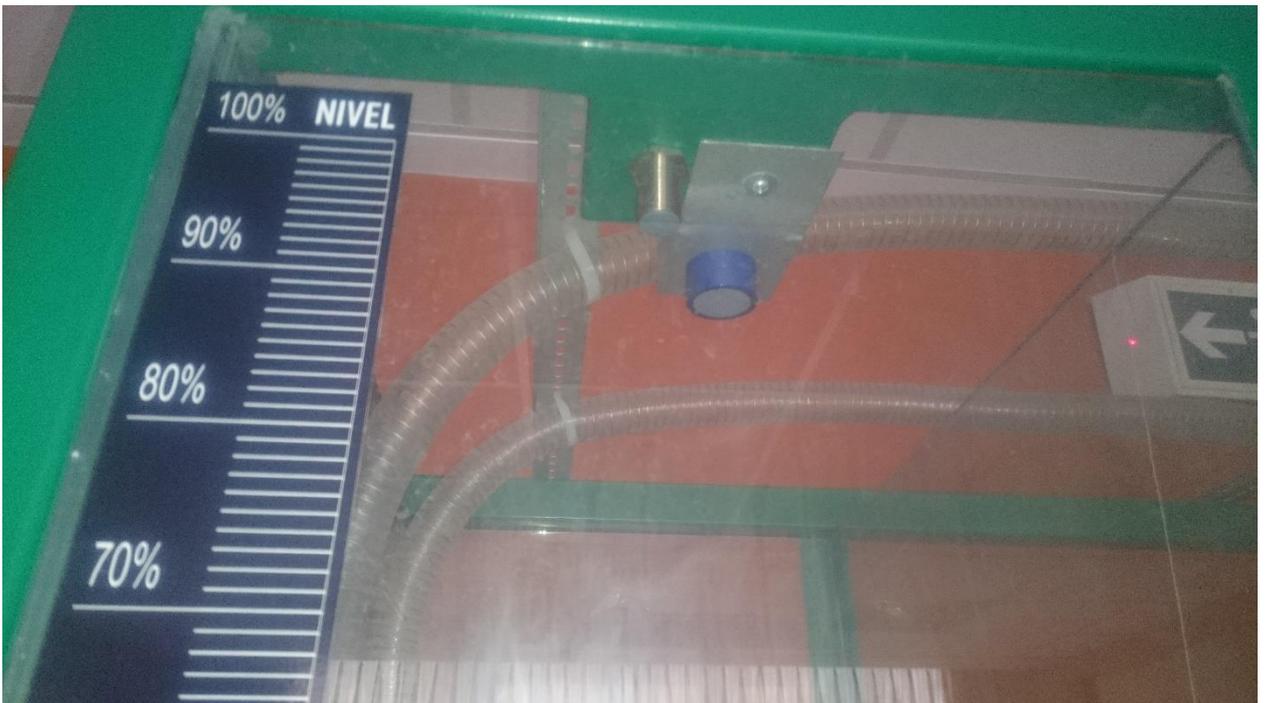
Pruebas preliminares con el equipo de investigación EPIER Módulo Hidráulico, agosto del 2016



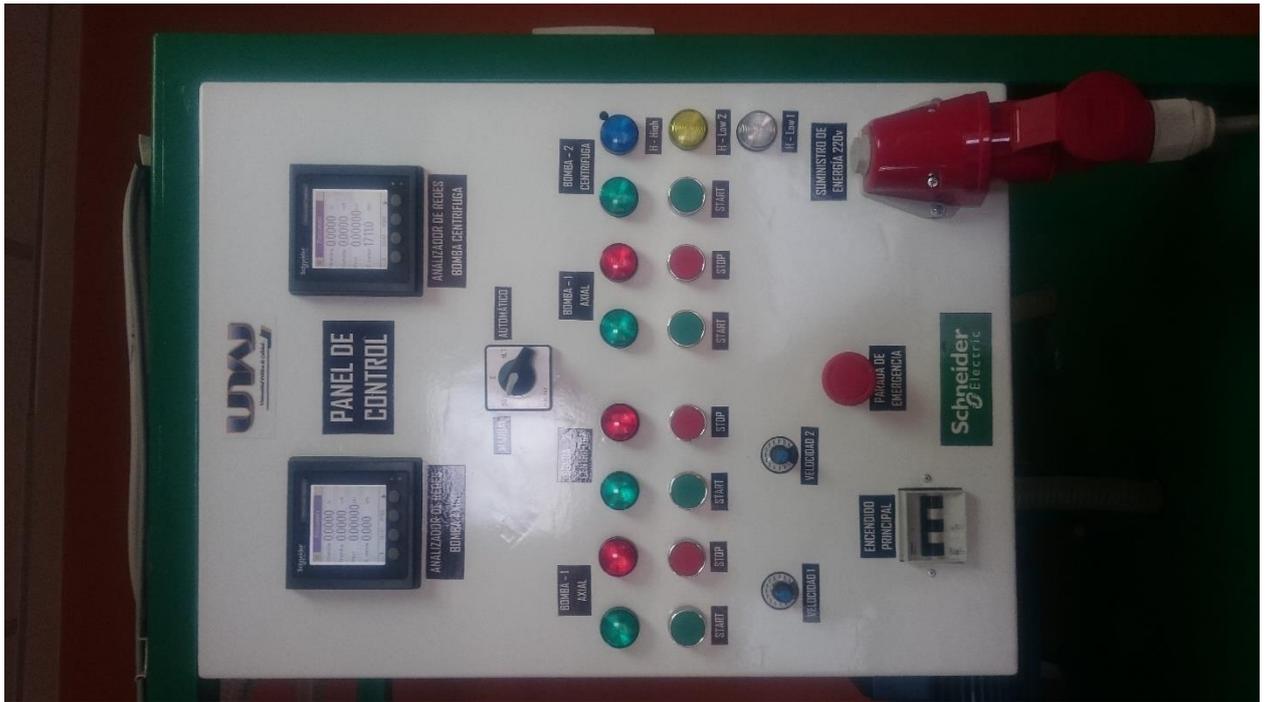
Módulo Hidráulico en su construcción final, agosto del 2016



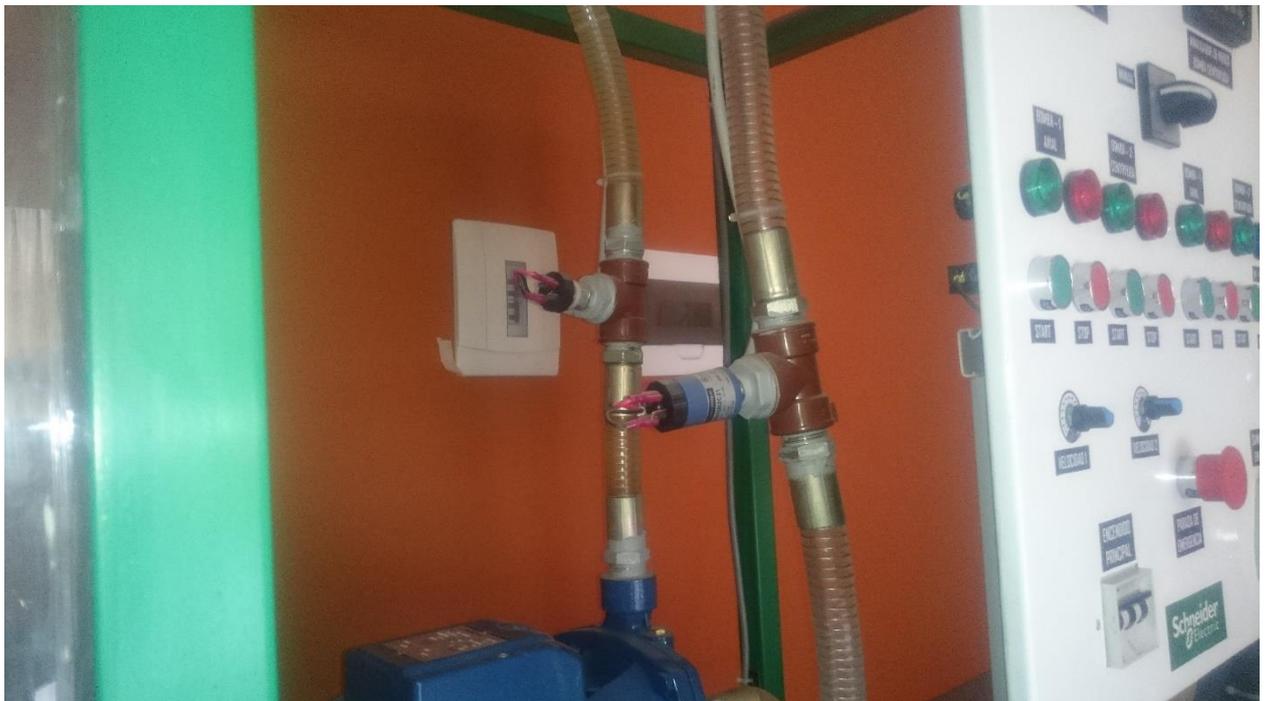
Sensores de Nivel, agosto del 2016



Reservorio del Módulo Hidráulico, agosto del 2016



Panel de Control en su etapa final, agosto del 2016



Sensores de presión y caudal, setiembre del 2016



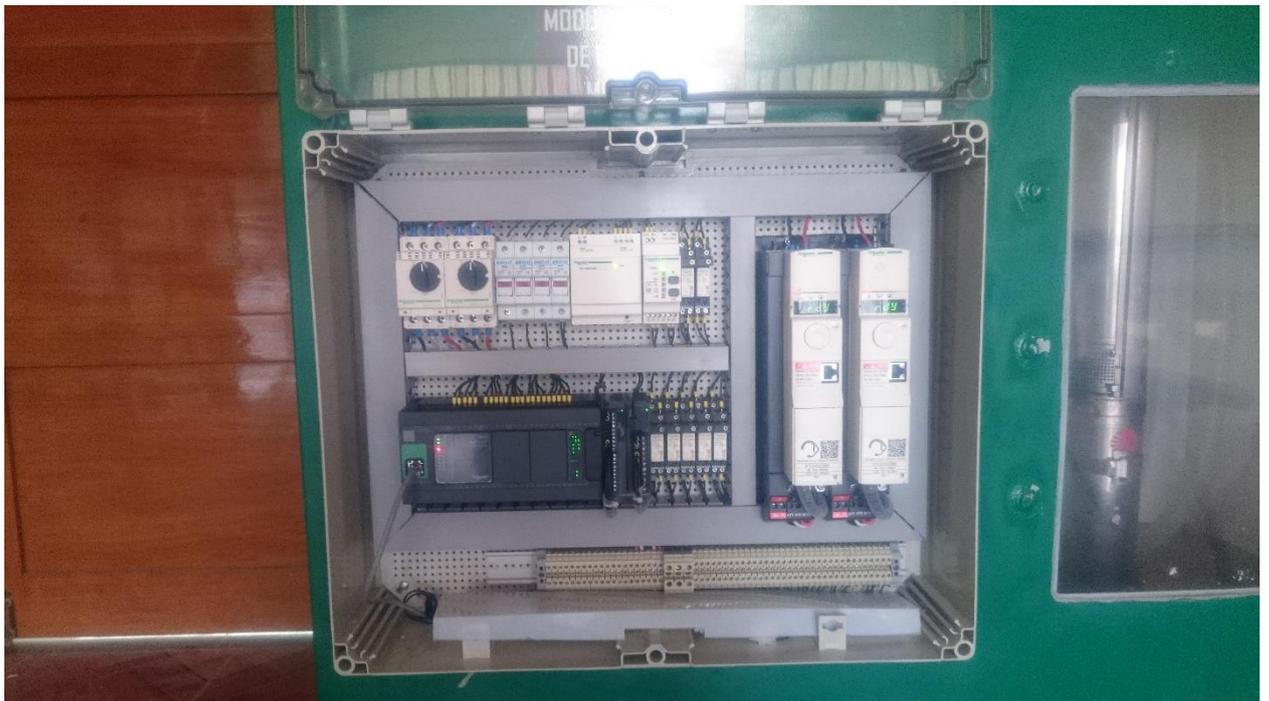
Verificando el sistema de Monitorización del Módulo Hidráulico, abril del 2017



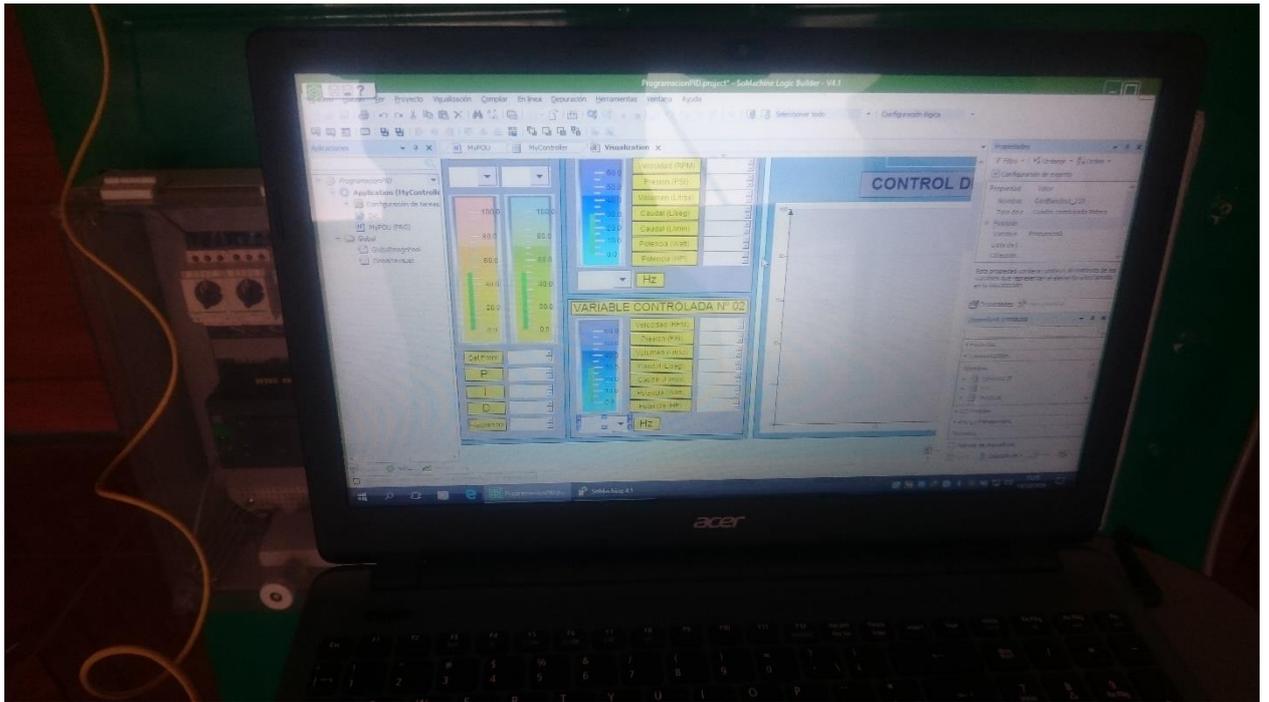
Módulo Hidráulico, abril del 2017



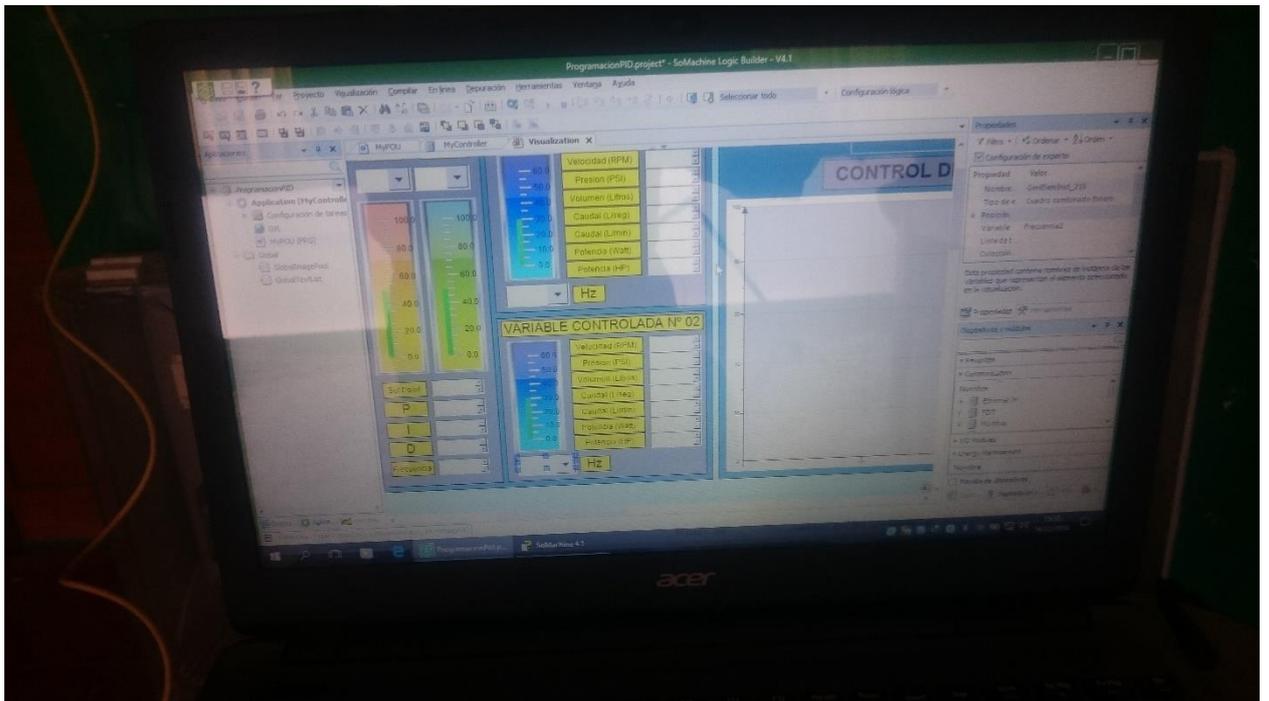
Módulo Hidráulico Parte Superior, abril del 2017



Módulo Hidráulico Parte Inferior, mayo del 2017



Sistema SCADA del Módulo Hidráulico, Julio del 2017



Sistema SCADA del Módulo Hidráulico (TRENDS), julio del 2017.



Participación en la II Jornada Científica “Fortalecimiento de Competencias Científica”

13 de septiembre 2017



Etapla final del proyecto de investigación – octubre 2017