



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

UNIDAD DE POSGRADOS

**TESIS EN OPCIÓN AL GRADO
ACADÉMICO DE MAGISTER EN
GESTIÓN DE ENERGÍAS**

TÍTULO:

“EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE LA ESTACIÓN DE NIVEL PARA DISMINUIR EL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA, EN EL LABORATORIO DE REDES INDUSTRIALES Y CONTROL DE PROCESOS EN LA ESPE-L, 2013. PROPUESTA DE UN SISTEMA DE CONTROL BASADO EN ACCIONAMIENTOS EFICIENTES”.

Autor: Ing. Escobar Anchaguano Ivón Patricia

Tutor: Dr. C. Secundino Marrero Ramírez

**LATACUNGA – ECUADOR
Diciembre – 2013**



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
UNIDAD DE POSGRADO
Latacunga – Ecuador

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de Miembros del Tribunal de Grado aprueban el presente Informe de investigación de posgrados de la Universidad Técnica de Cotopaxi; **“Evaluación Energética de la Estación de Nivel para Disminuir el Consumo de Energía Eléctrica, en El Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos en la ESPE-L, 2013, Propuesta de un Sistema de Control Basado en Accionamientos Eficientes”**. Por cuanto, la maestrante: Escobar Anchaguano Ivón Patricia, con el título de tesis: Ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Defensa de Tesis.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga Diciembre - 2013.

Para constancia firman:

.....
Msc. Nelson Corrales
PRESIDENTE

.....
Msc. Edison Yépez
MIEMBRO

.....
Msc. Gabriel Hernández
MIEMBRO

.....
Dr. C. Angel Columbie
OPOSITOR

AVAL DEL DIRECTOR DE TESIS

Latacunga, Diciembre del 2013

En mi calidad de Director de Tesis presentado por la Ing. Escobar Anchaguano Ivón Patricia. Egresada de la Maestría en Gestión de Energías, previa a la obtención del mencionado grado académico, cuyo título es. **“Evaluación Energética de la Estación de Nivel para Disminuir el Consumo de Energía Eléctrica, en el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos en la ESPE-L, 2013, Propuesta de un Sistema de Control Basado en Accionamientos Eficientes”**.

Considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos necesarios suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del tribunal examinador.

Atentamente

Dr. C. Secundino Marrero Ramírez

DIRECTOR DE TESIS

RESPONSABILIDAD POR LA AUTORÍA DE LA TESIS

DECLARO QUE:

El proyecto de grado denominado; **“Evaluación Energética de la Estación de Nivel para Disminuir el Consumo de Energía Eléctrica, en el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos en la ESPE-L, 2013, Propuesta de un Sistema de Control Basado en Accionamientos Eficientes”**. Ha sido desarrollado con base a una investigación, exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de página, en las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente, este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración me responsabilizo, del contenido, veracidad, y alcance científico de proyecto de grado, en mención

Latacunga, diciembre del 2013

Ivón Patricia Escobar Anchaguano
0502878135

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Universidad Técnica de Cotopaxi, a los coordinadores del programa de maestrías y de manera especial a mi tutor el Dr. Secundino Marrero, ya que gracias a su amplio conocimiento y vocación de enseñanza, me ayudo en la ejecución del presente trabajo.

A mi amado esposo por su comprensión y apoyo incondicional, ya que él ha sido un pilar importante para poder culminar esta nueva meta.

A mi mami y a mi hermana por su ayuda desinteresada quienes me han apoyado en cada momento de mi vida.

DEDICATORIA

A mi pequeño hijo quien es mi inspiración para seguir adelante y no rendirme, por su comprensión y apoyo, por los momentos que hemos tenido que sacrificar para que esta meta se lleve a cabo, pero que sin embargo ha sabido asimilar y regalarme una palabrita de aliento.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

UNIDAD DE POSGRADOS

MAESTRÍA EN GESTIÓN DE ENERGÍAS

TÍTULO: “Evaluación Energética de la Estación de Nivel para Disminuir el Consumo de Energía Eléctrica, en el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos en la ESPE-L, 2013, Propuesta de un Sistema de Control Basado en Accionamientos Eficientes”.

Autor: Ing. Ivón Patricia Escobar Anchaguano
Tutor: Dr. C. Marrero Ramírez Secundino

RESUMEN

En este trabajo, se realiza la evaluación energética de la estación de Nivel así como se investigó el accionamiento eficiente a ser implementado en miras de disminuir el consumo eléctrico, se desarrollaron las pruebas de funcionamiento y mediciones de los consumos eléctricos tanto para regulación con bomba como para la regulación con variador de frecuencia. Se encontró el modelo matemático de la estación de nivel para evaluar el sistema en forma real y simulada y obtener una relación en cuanto al funcionamiento y a los valores de las constantes utilizadas para la sintonía de los diferentes controladores. En la estación de Nivel se realizó el control automático del proceso utilizando los controladores Proporcional, proporcional integral y proporcional integral derivativo, analizando la respuesta de cada uno de ellos ante un proceso de respuesta rápida. El reemplazo de la válvula proporcional por un variador de frecuencia genera una disminución significativa del consumo eléctrico proporcionando mayores prestaciones que el sistema actual.

DESCRIPTORES: Eficiencia energética, controladores, variador de velocidad, evaluación energética, estación de nivel.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI UNIT GRADUATE

MASTER OF ENERGY MANAGEMENT

TITLE: “Energy Evaluation of Level Station to Diminish the Electric Consumption in the Laboratory of Industrial Nets and Control of Processes in the ESPE-L, 2013. System Proposal Control about efficient action”.

**Author: Ing. Escobar Anchaguano Ivón Patricia
Tutor: Dr. C. Marrero Ramírez Secundino**

ABSTRACT

This study makes an energy evaluation of the level station and the efficiency procedure to be implemented in order to decrease the electricity use. Functioning tests and electric measurements were made for the pump regulation and also for the regulation with the frequency oscillator. A mathematical model was found of the level station in order to evaluate the system in a simulated and real situation and to obtain a relationship between the functioning and the value of the used coefficients for the tuning of the different controllers. In the level station, an automatic control of the process was made using the controllers: proportional, integral proportional, and derivative integral; analyzing the responses of each of them in a rapid response process. The replacement of the proportional valve for a frequency oscillator generated a meaningful reduction of the electric consumption giving better performance to the actual system.

KEY WORDS: Energy Efficiency, Controllers, Speed Variation, Energy Evaluation, Level Station

Aval del traductor:

**Lcdo. Pablo S. Cevallos
Coordinador del idioma Inglés de la UTC
0502592371**

INDICE GENERAL

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	II
AVAL DEL DIRECTOR DE TESIS	III
RESPONSABILIDAD POR LA AUTORÍA DE LA TESIS	IV
AGRADECIMIENTO	V
DEDICATORIA	VI
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
INDICE GENERAL.....	ix
INDICE DE FIGURAS.....	xiii
INDICE DE TABLAS	xvi
INDICE DE GRAFICAS	xvii
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I.....	2
EL PROBLEMA	2
1.1 Planteamiento del problema.	2
1.2 Formulación del problema.....	3
1.3 Justificación y significación.	3
1.4 Hipótesis	4
1.5 Objetivos.....	4
1.6 Enfoque de la investigación.....	5
CAPÍTULO II	6
MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 Antecedentes de la Investigación	6
2.2 Fundamento teórico	9
2.2.1 Eficiencia energética.....	9
2.2.2 Estaciones de Procesos Industriales	10
2.2.3 Componentes de la Estación de Nivel	11
2.2.3.1 Transmisores.....	11

2.2.3.2	Controladores	13
2.2.3.3	Válvulas de control	13
2.2.3.4	Bombas	16
2.2.3.4.1	Curva característica	18
2.2.4	Métodos de Regulación de bombas	22
2.2.4.1	Control por válvulas	23
2.2.5	Variadores de frecuencia	24
2.2.5.1	Principio de Funcionamiento.....	24
2.2.5.2	Control de bombas con variadores de velocidad.....	25
2.2.5.3	Comparación de los Controles con válvula vs Controles con variadores de velocidad.....	27
2.3	Marco conceptual.	32
2.3.1	Banco de Bomba Centrífuga Controlado desde Computador (PC), con SCADA.....	32
2.3.1.1	Características Importantes del Equipo PBCC.....	34
CAPÍTULO III.....		36
METODOLOGÍA		36
3.1	Diseño de la investigación.....	36
3.1.1	Modalidad de la investigación.....	36
3.1.1.1	De campo.....	36
3.1.1.2	Bibliográfica - Documental	36
3.1.2	Tipo de Investigación	37
3.1.2.1	Descriptiva:.....	37
3.1.2.2	Experimental:.....	37
3.2	Operacionalización de las variables	37
3.3	Descripción de la metodología	38
3.3.1	Tipo de flujo requerido.....	40
3.3.2	Funcionamiento del proceso.....	40
3.3.2.1	Componentes de la Estación de Nivel:	41
3.3.3	Requerimientos del proceso.....	43
3.3.3.1	Registrador Trifásico Fluke 1735	43

3.3.4	Características de operación de la bomba.....	45
3.3.5	Regulación por control de válvula.....	45
3.3.5.1	Implementación de los diferentes modos de control utilizando como elemento de control final la válvula proporcional.	46
3.3.5.1.1	Implementación del control proporcional.....	46
3.3.5.1.2	Pasos para la configuración y programación del PLC para realizar el control Proporcional.	46
3.3.5.2	Medición de potencia implementado los diferentes modos de control.	54
3.3.5.2.1	Implementación del control Proporcional a la estación de nivel del laboratorio.....	54
3.3.5.2.2	Implementación del control Proporcional Integral a la estación de nivel del laboratorio.....	54
3.3.5.2.3	Implementación del control Proporcional Integral Derivativo a la estación de nivel del laboratorio.....	55
3.3.6	Regulación mediante variación de frecuencia.....	56
3.3.6.1	Componentes utilizados en el sistema propuesto:.....	57
3.3.6.2	Diagrama de de tuberías e instrumentación del sistema propuesto.	57
3.3.6.3	Medición de la potencia utilizando como elemento de control final el sistema variador-bomba centrífuga.	59
3.3.7	Medición de potencia implementando los diferentes modos de control, utilizando como elementos de control final el sistema variador-bomba centrífuga.....	59
3.3.7.1	Implementación del control proporcional.....	59
3.3.7.2	Mediciones realizadas implementando los diferentes tipos de control	60
3.3.7.2.1	Implementación del control Proporcional a la estación de nivel del laboratorio.....	60
3.3.7.2.2	Implementación del control Proporcional Integral a la estación de nivel del laboratorio.....	60
3.3.7.2.3	Implementación del control Proporcional Integral Derivativo a la estación de nivel del laboratorio.....	61
3.3.8	Determinación del Ahorro de Energía	62
3.3.8.1	Tarifas Ordinarias.....	62

CAPÍTULO IV	63
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	63
4.1 Datos obtenidos de la potencia de la estación de procesos mediante regulación por control de válvula.	63
4.2 Datos obtenidos de la potencia de la estación de procesos mediante regulación por el sistema variador-bomba centrifuga.	64
4.3 Demanda de potencia mediante regulación de caudal por válvula de control vs regulación de caudal por variador de frecuencia.	65
4.4 Simulación de un sistema variador de frecuencia-motor trifásico de 3Hp.	66
4.5 Datos obtenidos de la potencia de la estación de procesos utilizando válvula de control vs variador de frecuencia, implementado los diferentes modos de control.....	69
4.5.1 Datos obtenidos de la potencia de la estación de procesos utilizando válvula de control vs variador de frecuencia, implementado el modo de control proporcional.	69
4.5.2 Datos obtenidos de la potencia de la estación de procesos utilizando válvula de control vs variador de frecuencia, implementado el modo de control proporcional integral	71
4.5.3 Datos obtenidos de la potencia de la estación de procesos utilizando válvula de control vs variador de frecuencia, implementado el modo de control proporcional integral derivativo	74
4.5.4 Análisis de los datos obtenidos de energía consumida por la estación de procesos utilizando válvula de control vs variador de frecuencia, implementado los diferentes modos de control.	76
4.5.5 Análisis de la energía consumida por la estación de procesos utilizando válvula con cada uno de los modos de control.	78
4.5.6 Análisis de la energía consumida por la estación de procesos utilizando variador de frecuencia con cada uno de los modos de control.	79

CAPITULO V.....	80
LA PROPUESTA	80
5.1 Título de la propuesta	80
5.2 Objetivo de la propuesta	80
5.3 Justificación de la propuesta.....	80
5.4 Estructura de la propuesta.....	81
5.5 Análisis de la propuesta.....	81
5.6 Evaluación socio-económico-ambiental de la propuesta.....	82
5.6.1 Social.	82
5.6.2 Económica..	82
5.6.3 Ambiental.	82
5.7 Resultados de la valoración económica de la propuesta.....	83
5.7.1 Calculo del VAN	83
CONCLUSIONES	85
RECOMENDACIONES	87
BIBLIOGRAFIA	88
ANEXOS	90

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Comparación de Energía consumida	8
Figura 2.2 Estación de Nivel.....	11
Figura 2.3 Evolución de las señales de transmisión.....	12
Figura 2.4 Válvula de control típica	13
Figura 2.5 Válvulas de movimiento lineal	15
Figura 2.7 Altura de elevación de una bomba	16
Figura 2.8 Bomba axial.....	17
Figura 2.10 Bomba centrífuga.....	17
Figura 2.11 Curva característica de una bomba centrífuga.....	18
Figura 2.12 Curva característica de una bomba axial	18
Figura 2.13 Combinación de bomba y sistema	20
Figura 2.14 Grupo motor-bomba	21

Figura 2.15 Bomba con descarga estrangulada.....	23
Figura 2.16 Curva modificada del sistema mediante la válvula de control	23
Figura 2.17 Bomba con succión estrangulada.....	24
Figura 2.18 Curvas características a diferentes velocidades	26
Figura 2.19 Relación entre las curvas correspondientes a dos velocidades	27
Figura 2.20 Comparación de distintos métodos de control de flujo	28
Figura 2.21 Control todo-nada	29
Figura 2.22 Control proporcional.....	29
Figura 2.23 Respuesta del controlador PI a un cambio de carga	30
Figura 2.24 Control proporcional + derivativo	31
Figura 2.25 Control proporcional + integral + derivativo	17
Figura 2.26 Equipo PBCC. Banco de Bomba Centrífuga.....	33
Figura 2.27 Diagrama del proceso y disposición de los elementos del equipo.....	35
Figura 3.2 Diagrama de tuberías e instrumentación de la estación de nivel	42
Figura 3.3 Diagrama de bloques del sistema	43
Figura 3.4 Registrador Trifásico Fluke 1735	44
Figura 3.6 Datos de fabricante de la bomba de la estación de nivel	45
Figura 3.7 Pantalla que indica el asistente de operaciones	47
Figura 3.8 Pantalla que indica la selección del control PID	47
Figura 3.9 Pantalla que indica el número de lazo de control a utilizar	48
Figura 3.10 Pantalla que indica los límites a utilizar en la consigna del lazo.....	48
Figura 3.11 Pantalla de configuración de los parámetros de escalado.....	49
Figura 3.12 Pantalla de habilitación de alarmas.....	50
Figura 3.13 Pantalla de selección de la memoria ser utilizada para la ejecución del algoritmo del control	50
Figura 3.14 Pantalla de cambio de nombre de las subrutinas.	51
Figura 3.15 Pantalla de finalización de la configuración del asistente PID.....	51
Figura 3.16 Programación desarrollada en microwin	52
Figura 3.17 Pantalla de utilización del panel de sintonía.....	53
Figura 3.18 Gráfica de la señal de un control Proporcional.....	53
Figura 3.20 Diagrama de tuberías e instrumentación de la estación de nivel, utilizando el variador de velocidad en reemplazo de la válvula de control.	58

Figura 4.1 Diagrama estructural del sistema variador bomba	67
Figura 4.2 Señales de velocidad del rotor y torque electromagnético inducido al sistema.....	68
Figura 5.1 Software que permite calcular el nivel de CO2 por KW/h.....	83

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Energía consumida por diferentes métodos de control de flujo.....	27
Tabla 3.1 Cuadro de la Operacionalización de la variable Independiente.....	37
Tabla 3.2 Cuadro de la Operacionalización de la variable Dependiente	38
Tabla 4.1 Valores obtenidos de las mediciones realizadas en la estación de nivel insertando corrientes de excitación para regular el estrangulamiento de la válvula.	63
Tabla 4.2 Valores obtenidos de las mediciones realizadas en la estación de nivel insertando voltaje de excitación para regular el caudal del sistema.....	64
Tabla 4.3 Comparación de la demanda de potencia utilizando regulación por válvula y regulación por variador.	65
Tabla 4.4 Datos de las mediciones realizadas en la estación de nivel con los accionamientos válvula de control y variador de frecuencia e implementado el modo de control proporcional	69
Tabla 4.5 Datos de las mediciones realizadas en la estación de nivel con los accionamientos válvula de control y variador de frecuencia e implementado el modo de control proporcional integral.....	72
Tabla 4.6 Datos de las mediciones realizadas en la estación de nivel con los accionamientos válvula de control y variador de frecuencia e implementado el modo de control proporcional integral derivativo.....	74
Tabla 4.7 Energía anual consumida por la estación de nivel con los diferentes modos de control utilizando válvula de control vs variador de frecuencia.....	77
Tabla 5.1 Desglose de los costos fijos para la implementación del sistema variador-bomba para el control automático de la estación de nivel.....	81

INDICE DE GRAFICAS

Gráfica 4.1 Comparación de la demanda de potencia al mismo caudal de regulación por válvula vs variador de frecuencia	66
Grafica 4.2 Demanda de potencia de la estación de procesos utilizando válvula de control vs variador de velocidad e implementando el modo de control proporcional.	70
Grafica 4.3 Demanda de potencia de la estación de procesos utilizando válvula de control vs variador de velocidad e implementando el modo de control proporcional integral.	72
Grafica 4.4 Demanda de potencia de la estación de procesos utilizando válvula de control vs variador de velocidad e implementando el modo de control proporcional integral derivativo	75
Gráfica 4.5 Energía anual consumida por la estación de nivel con los diferentes modos de control utilizando válvula de control vs variador de frecuencia.....	77
Grafica 4.6 Porcentaje del consumo de energía de la estación de nivel con cada modo de control aplicado.	78
Gráfica 4.7 Porcentajes del consumo de energía de la estación de nivel con cada modo de control aplicado	79

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como propósito evaluar la estación de nivel para determinar el consumo energético de los distintos accionamientos en miras de disminuir el consumo eléctrico en el Laboratorio de Redes Industriales y control de procesos, así como también evaluar los diferentes tipos de controles y determinar los más eficientes tanto en consumo eléctrico como el tipo de control del proceso, además investigar los accionamientos más eficientes en consumo energético integrales a la estación de procesos con mayores prestaciones y menor consumo energético.

Para la estructura de la tesis, los capítulos se encuentran distribuidos de la siguiente manera: En el Capítulo 1, se realiza el planteamiento del problema, la formulación del problema, desarrollando la hipótesis y los objetivos a realizar para obtener la solución al problema.

En el capítulo 2 está desarrollado el estado del arte investigando diferentes fuentes bibliográficas relacionadas con el problema en miras de encontrar una solución, así como también se documentan los componentes de la estación de nivel y las fórmulas a ser utilizadas en los diferentes cálculos relacionados con la investigación.

El capítulo 3 corresponde a la metodología, técnicas y procedimientos relacionados con la investigación, aquí se menciona la operacionalización de las variables, así como se explica las mediciones a realizar con el fin de conocer cuál es el accionamiento que consume menor energía.

En el capítulo 4 se realiza las comparaciones entre las mediciones realizadas tanto con el accionamiento actual como con el accionamiento eficiente, así como también se realiza la comparación de los diferentes modos de control para determinar el control más eficiente en el proceso de nivel. Se cuantifica el ahorro de energía anual con la implementación de la nueva tecnología.

El capítulo 5 presenta la propuesta a la solución del problema planteado, así como se determina la factibilidad técnico-económica de la propuesta.

Finalmente se formulan las conclusiones y recomendaciones pertinentes basadas en los resultados de la investigación.

CAPITULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema.

Se ha determinado que en los últimos años el consumo de energía eléctrica ha aumentado a un ritmo superior al crecimiento económico, esto debido a que las empresas tienen trabajando al 100% sus máquinas pagando energía eléctrica que no ha sido aprovechada adecuadamente por estar su maquinaria sobredimensionada de acuerdo al trabajo que realiza.

Esto provoca que las generadoras eléctricas se incrementen, por lo tanto existe mayor emanación de gases debido a los combustibles que algunas de ellas utilizan para cumplir su objetivo.

Con solo reducir la velocidad en bombas y ventiladores y motores a la necesaria para que desarrollen su trabajo, se ahorrará aproximadamente un 10% hasta un 50% de energía, esto representará una disminución en el consumo eléctrico.

Las estaciones de procesos industriales son instalaciones didácticas, cuyo objetivo es que los estudiantes desarrollen prácticas correspondientes a las áreas de instrumentación industrial y control de procesos industriales, por ello están en funcionamiento constante y continuo desde hace más de diez años en el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos.

El consumo de energía eléctrica en la estación de nivel es alto debido a que posee un accionamiento eléctrico que trabaja con señal neumática, por ello se necesita un compresor para el suministro de aire, así como también cuenta con un accionamiento eléctrico que trabaja de forma constante existiendo un desperdicio de energía eléctrica.

La investigación se realizará específicamente en el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos de la ESPE-L, localizado en la ciudad de Latacunga, por las facilidades para realizar la investigación, lo que no sucede con las empresas de producción.

El presente trabajo investigativo se lo realizará en el año 2013, en la estación de nivel en el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Proceso de la ESPE-L, para determinar las causas existentes en cuanto al consumo energético de la estación de control de nivel, en caso de existir inconvenientes se buscará alternativas para mejorar el inconveniente, se analizarán las mismas y se propondrá una solución.

1.2 Formulación del problema.

Elevado consumo de energía eléctrica de la estación de nivel en el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos

1.3 Justificación y significación.

En la actualidad a nivel mundial se han lanzado políticas de ahorro de energía, una de ellas es el compromiso de reducir las emisiones de carbono, estas se lograran reduciendo el consumo de energía en las industrias, específicamente se debe analizar el funcionamiento de los motores ya que existen una gran cantidad de motores en la industria utilizados para el funcionamiento de ventiladores, bombas, compresores y representan más del 60% del consumo de electricidad.

La utilización de equipos de bombeo abarca casi todas las esferas de una industria, siendo parte esencial, la energía utilizada para su accionamiento uno de los factores determinantes para el ahorro de energía, por lo cual resulta conveniente implementar un sistema que permita generar ahorros en el consumo eléctrico pero en mira de que existan mejoras en el sistema o su vez siga brindando las mismas características del sistema anterior.

Al realizar la investigación se pretende buscar alternativas para evitar que el accionamiento eléctrico funcione a su capacidad máxima, así como también determinar la viabilidad de utilizar tecnología alternativa para integrar accionamiento eficientes lo cual se ve afectado significativamente en el consumo de energía eléctrica.

Las estaciones de procesos industriales tienen un enfoque didáctico por lo que siempre serán utilizadas en las aplicaciones prácticas, siendo los equipos que mayor consumo eléctrico presentan en el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos.

1.4 Hipótesis

Si se incorporan accionamientos más eficientes para el sistema de control de la estación de nivel se disminuye el consumo eléctrico de la estación de nivel.

1.5 Objetivos

General

- Evaluar el consumo energético de la estación de nivel en miras de reducir el consumo de energía del laboratorio de redes industriales y control de procesos de la ESPE-Latacunga.

Específicos

- Analizar el estado del arte relacionado con la eficiencia energética en los accionamientos variador motor bomba para la estación de control de nivel.
- Determinar los índices de consumo en la estación de nivel.
- Proponer un sistema de control utilizando accionamientos eficientes.
- Analizar la factibilidad de la propuesta de utilización de accionamientos eficientes en la estación de nivel.

1.6 Enfoque de la investigación.

El presente trabajo está enfocado a la investigación de campo y documental, debido a que se trabajará directamente en la estación de procesos industriales del Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos de la ESPE-Latacunga.

Se revisará información en documentos donde se pueda obtener información sobre el proceso de nivel así como también se realizará el análisis de los componentes que son utilizados como partes de la estación de procesos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO.

2.1 Antecedentes de la Investigación

De las investigaciones realizadas en el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos no se ha encontrado ninguna investigación que tenga relación directa con el tema de investigación.

En otras instituciones y laboratorios dedicados a la enseñanza superior no se ha realizado este tipo de investigación.

Como la estación de nivel es un sistema didáctico de entrenamiento similar a las estaciones de bombeo industriales, se han analizado proyectos relacionados a los sistemas de bombeo industriales como se detallan a continuación:

1. “Auditoría energética de la estación de bombeo de esmeraldas del poliducto esmeraldas-quito” realizada en el año 2009 autores: Brown Espinoza Damián Antonio y Charcopa Caicedo Ricardo José; en cuya auditoria los autores realizan una Auditoría Energética en Petrocomercial de la estación de bombeo cabecera del Poliducto Esmeraldas-Quito, con la finalidad de mejorar la administración de la energía en esta planta, para lo cual evalúan la eficiencia energética de los equipos que consumen mayor potencia en el complejo industrial.

Con estos resultados, detectan deficiencias energéticas en: motores de combustión interna a diesel, motores eléctricos, bombas centrífugas simples y multietapa, sistema de aire comprimido y edificaciones complementarias.

De acuerdo a las debilidades energéticas encontradas sugieren tres medidas de ahorro y eficiencia energética que implica cambios en la operación y disposición de la planta. La primera es la implementación de un variador de

frecuencia para los motores de las bombas booster. La segunda es la adaptación de un By-pass en la descarga de las bombas principales. Y la última es una combinación de ambas. [6]

2. “Eficiencia Energética En Sistemas De Bombeo De La Entidad Prestadora De Servicio Y Saneamiento De Sedajuliaca” realizada en el año 2011 por José Carlos Aracayo cuya investigación está relacionada con fines de mejorar y renovar los equipos de la planta de tratamiento de la EPS Sedajuliaca, para dar la solución al suministro no adecuado a sus clientes, problemas sobre baja presión y menos caudal del fluido en sus domicilios.

Es por el cual el estudio está enfocado a la eficiencia energética en sistemas de bombeo, esto consiste en conseguir más resultados con menos recursos, lo cual se traduce en menores costos de producción, más productos con menos desperdicios y menores consumos de energía.

Trata sobre el desarrollo tecnológico de la empresa prestadora de servicio de agua y desagüe teniendo en cuenta la implementación de la tecnología en industrias es un proceso productivo definido y es un pilar importante para conseguir el incremento productivo que se pretende tener el desenlace, para conseguir la mejor calidad de vida en los clientes [3]

3. La empresa ERION en su “NOTA DE APLICACIÓN VARIADORES DE VELOCIDAD AHORRO ENERGETICO EN SISTEMAS DE BOMBEO” [7], realiza una comparación del consumo de energía entre un sistema de bombeo con regulación de caudal por recirculación y el mismo sistema de bombeo con regulación de caudal por aplicación de un variador de velocidad al motor de la bomba.

En esta comparación se analiza el caudal de bombeo de acuerdo a la demanda del usuario en función de horas durante un año. Y se establece un ahorro significativo de energía, como se muestra en la figura 2.1

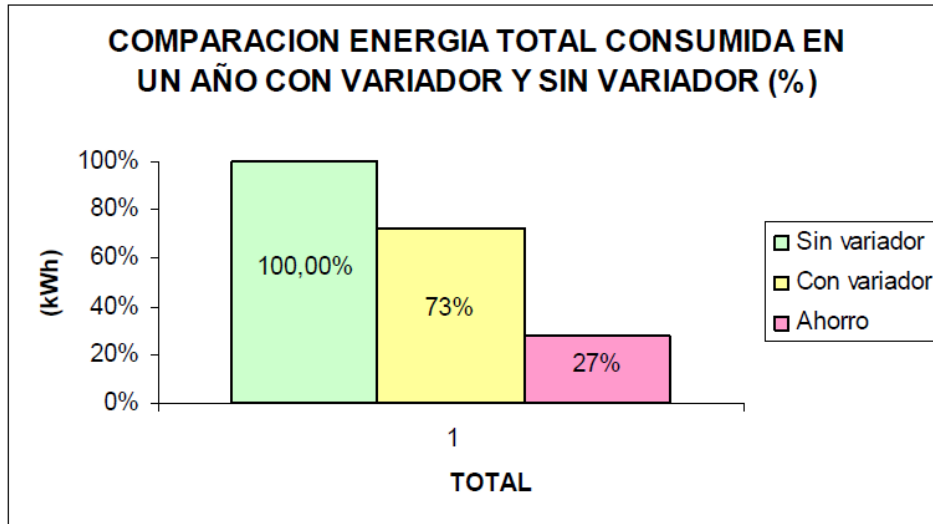


Figura 2.1 Comparación de Energía consumida

4. “Gestión Energética de los motores eléctricos: mejora de la eficiencia de los accionamientos con el uso de variadores de velocidad “, de Mantilla L. y Cardona J. [8], realizan un caso práctico en una industria química donde se elabora negro de carbono (o negro de humo), componente utilizado en la fabricación de neumáticos, tintas de imprenta, recubrimientos industriales, conductores eléctricos, sellantes de construcción, etc. Para la elaboración de estos productos la planta está dividida por productos, de tal forma que los motores que manejan ventiladores y bombas tendrán un régimen de carga distinto.

En el desarrollo de esta investigación se tomaron medidas de cada uno de los motores y bombas utilizados para la fabricación, y se evaluó el consumo de cada uno de ellos. Considerando el método basado en la Guía de Aplicación editada por EPRI (Electric Power Research Institute), los investigadores dividieron el análisis en dos tipos el energético y el económico.

Llegando a la conclusión que la sustitución de los métodos tradicionales de regulación de flujo por variadores de velocidad es más eficiente en este tipo de procesos.

2.2 Fundamento teórico

2.2.1 Eficiencia energética

La eficiencia energética es el consumo inteligente de la energía.

La eficiencia energética es el hecho de minimizar la cantidad de energía necesaria para satisfacer la demanda sin afectar a su calidad; supone la sustitución de un equipo por otro que, con las mismas prestaciones, consuma menos electricidad. No supone, por tanto, cambios en los hábitos de consumo (el comportamiento del usuario sigue siendo el mismo), pero se consume menos energía ya que el consumo energético para llevar a cabo el mismo servicio es menor. Eficiencia energética es, por ejemplo, utilizar una lavadora de “clase energética A” (la que menos consume) en lugar de una lavadora de “clase energética G” (la que más consume). No se cambia la pauta de consumo, se sigue lavando lo mismo (asiduidad, programa de lavadora), pero se consume menos energía; se logra un ahorro porque, haciendo lo mismo, una lavadora de clase energética A consume menos que una de clase G.

Para reducir al máximo el consumo energético habría que aunar medidas de ahorro y eficiencia energética.

Una acción que combina ambas medidas sería, por ejemplo, utilizar una lavadora de “clase energética A”; a la vez que se usan los programas cortos de lavado, se llena la lavadora (no se hace un lavado con la lavadora medio vacía) y se utiliza agua fría (todas estas medidas permiten ahorrar energía al utilizar las lavadoras). De esta forma conseguiremos un ahorro doble: estamos ahorrando porque con nuestro comportamiento se reduce el consumo y, además, cuando ponemos la

lavadora en marcha, ahorramos electricidad al estar usando un equipo más eficiente.

Las fuentes de energía son finitas, y por lo tanto, su correcta utilización se presenta como una necesidad del presente para que podamos disfrutar de ellas en un futuro.

Ser más eficiente no significa renunciar a nuestro grado de bienestar y calidad de vida. Simplemente se trata de adoptar una serie de hábitos responsables, medidas e inversiones a nivel tecnológico y de gestión.

La Eficiencia Energética se logra por medio de la aplicación de una serie de acciones, procedimientos y capacitaciones que logran optimizar la correlación entre la energía consumida y los productos o servicios finales. La implementación de medidas e inversiones de equipos tecnológicos de bajo consumo, de gestión y de hábitos culturales en la comunidad.

Las evaluaciones en eficiencia energética consisten en un examen sistemático de las aplicaciones de bombas y ventiladores más importantes, lo que incluye monitorizar la energía consumida tanto antes como después de comenzar a utilizar al control inteligente.

2.2.2 Estaciones de Procesos Industriales

Las estaciones de procesos utilizadas en el laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos de la Escuela Politécnica del Ejército Extensión Latacunga son puestos de trabajo autónomos diseñados para desarrollar prácticas de control de procesos de temperatura presión, flujo y nivel. Las estaciones pueden operar independientemente, o pueden ser interconectadas en varias configuraciones para simular. En estas estaciones se puede realizar los siguientes tipos de control: proporcional, integral, derivativo y PID. Procesos más complejos. La estación de Flujo y Nivel; utilizan el agua como medio de comunicación del proceso, mientras la estación de presión y de temperatura utilizan aire.

La estación de nivel consiste en una bomba centrífuga, un tanque reservorio de agua, un depósito de agua de 20cm de diámetro. Tiene una tubería indicadora del proceso hecha en termoplástico. La columna nivelada es hecha de plexiglás. Al fondo de la columna hay dos válvulas que permiten la conexión con el transmisor.



Figura 2.2 Estación de Nivel

2.2.3 Componentes de la Estación de Nivel

2.2.3.1 Transmisores

Los transmisores captan la variable de proceso a través del elemento primario y la transmiten a distancia en forma de señal neumática, electrónica o digital.

La señal neumática es de 3 a 15 psi (libras por pulgada cuadrada) (equivale a 0,206– 1,033 bar o 0,21– 1,05 kg/cm²) adoptada en Estados Unidos y los países

de habla inglesa, o 0,2 -1 bar empleada en los países que utilizan el sistema métrico decimal.

La señal electrónica normalizada es de 4mA a 20mA de corriente continua, si bien se utilizan de 1 a 5mA c.c., de 10 a 50mA c.c. y de 0 a 20mA c.c.

La señal digital consiste en una serie de impulsos en forma de bits. Cada bit consiste en dos signos, el 0 y el 1, (código binario) y representa el paso (1) o no (0) de una señal a través de un conductor. Si la señal digital que maneja el microprocesador del transmisor es de 32 bits entonces puede enviar 32 señales binarias (0 y 1) simultáneamente.

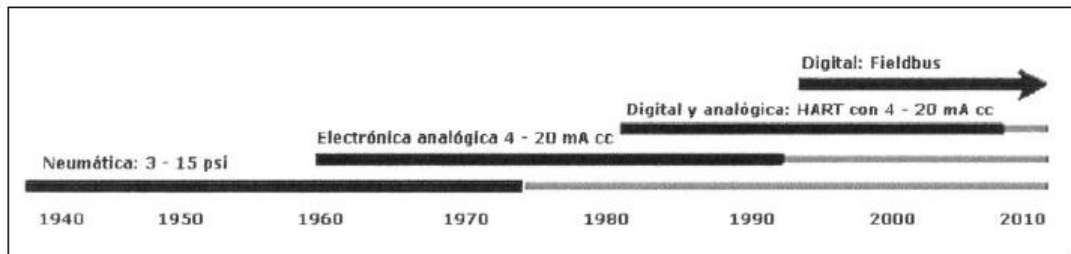


Figura 2.3 Evolución de las señales de transmisión

Las necesidades de los usuarios son el motor que impulsa el desarrollo de la instrumentación. Entre estas necesidades se encuentran:

- Aumento de la productividad. Aumento de la calidad del proceso.
- Repetibilidad de características de los productos fabricados, es decir, el cliente no recibe un producto con mayor calidad de la indicada en sus especificaciones ni debe reclamar por recibir un producto de peor calidad de la especificada. (Normas ISO 9000).
- Reducción de los costos de fabricación (ahorro energético, etc.).
- Seguridad (se evitan malas maniobras que pueden causar pérdidas de producto).
- Normalización de los instrumentos.

2.2.3.2 Controladores

El controlador permite al proceso cumplir su objetivo de transformación del material y realiza dos funciones esenciales:

- a) Compara la variable medida (temperatura de salida del intercambiador) con la de referencia o deseada (punto de consigna) para determinar el error.
- b) Estabiliza el funcionamiento dinámico del lazo o bucle de control mediante circuitos especiales (acciones de control, o modos de control, o algoritmos de control) para reducir o eliminar el error.

2.2.3.3 Válvulas de control

Generalidades

En el control automático de los procesos industriales la válvula de control juega un papel muy importante en el bucle de regulación. Realiza la función de variar el caudal de fluido de control que modifica a su vez el valor de la variable medida comportándose como un orificio de área continuamente variable. Dentro del bucle de control tiene tanta importancia como el elemento primario, el transmisor y el controlador. En la figura 2.4 se observa una válvula de control típica. Se compone básicamente del cuerpo y del servomotor.

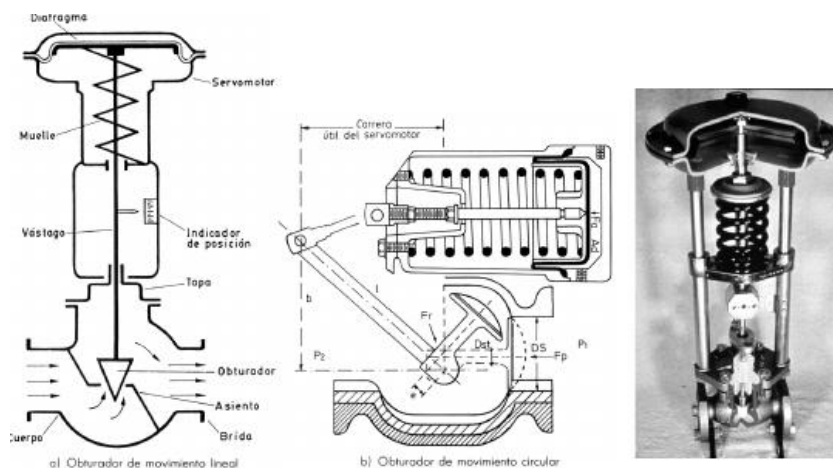


Figura 2.4 Válvula de control típica

La válvula de control neumática consiste en un servomotor accionado por la señal neumática de 3psi – 15psi (ó 0,2 kg/cm²– 1kg/cm²). El servomotor está conectado directamente a un vástago que posiciona el obturador con relación al asiento. La posición relativa entre el obturador y el asiento permite pasar el fluido desde un caudal nulo (o casi nulo), hasta el caudal máximo, y con una relación entre el caudal y la carrera que viene dada por las curvas características de la válvula.

El cuerpo de la válvula de control contiene en su interior el obturador y los asientos y está provista de rosca o de bridas para conectar la válvula a la tubería. El obturador es quien realiza la función de control de paso del fluido y puede actuar en la dirección de su propio eje o bien tener un movimiento rotativo. Está unido a un vástago que pasa a través de la tapa del cuerpo y que es accionado por el servomotor.

Tipos de válvulas

Las válvulas pueden ser de varios tipos según sea el diseño del cuerpo y el movimiento del obturador. Básicamente se clasifican en dos grandes grupos: Válvulas con obturador de movimiento lineal y válvulas con obturador de movimiento rotativo.

Válvulas con obturador de movimiento lineal

Las válvulas de movimiento lineal en las que el obturador se mueve en la dirección de su propio eje se clasifican en válvula de globo, válvula en ángulo, válvula de tres vías mezcladora o diversora, válvula de jaula, válvula de compuerta, válvula en Y, válvula de cuerpo partido, válvula Saunders y válvula de compresión.

OBTURADORES DE MOVIMIENTO LINEAL

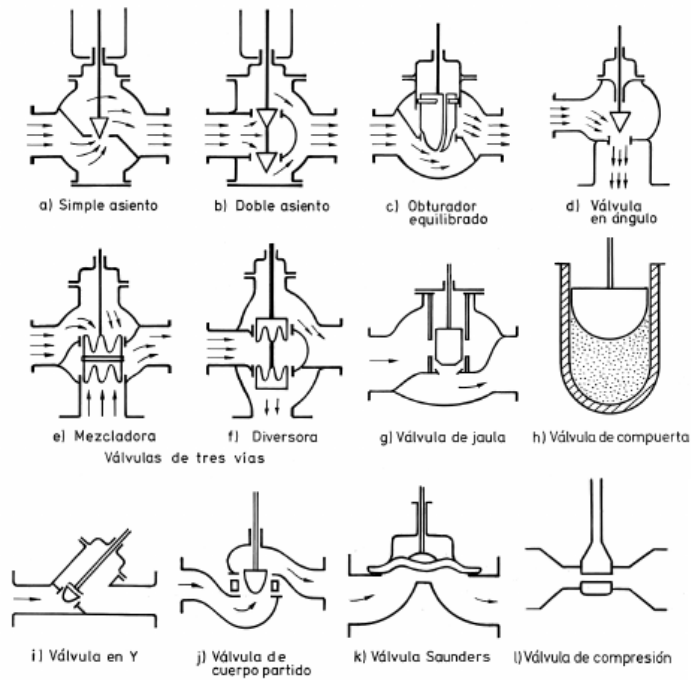


Figura 2.5 Válvulas de movimiento lineal

Válvulas con obturador de movimiento circular

Las válvulas en las que el obturador tiene un movimiento circular se clasifican en: válvula de obturador excéntrico rotativo (Camflex), válvula de obturador cilíndrico excéntrico, válvula de mariposa, válvula de bola, válvula de macho, válvula de orificio ajustable y válvula de flujo axial.

OBTURADORES DE MOVIMIENTO CIRCULAR

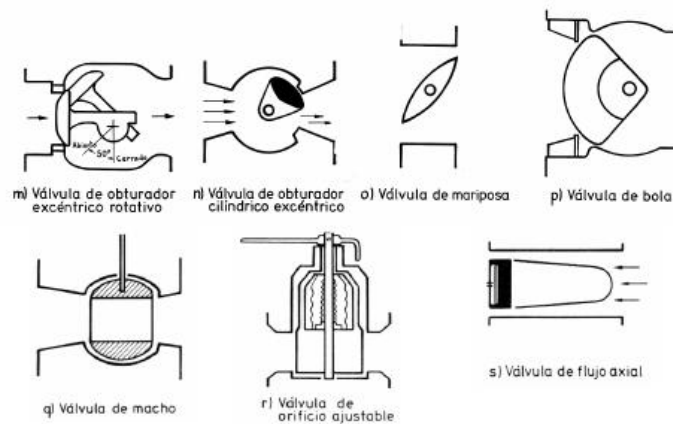


Figura 2.6 Válvulas de movimiento circular

2.2.3.4 Bombas

Las bombas son los elementos que aportan energía para vencer las pérdidas de carga y la diferencia de alturas entre dos puntos. Fuerzan al fluido a circular en un determinado sentido.

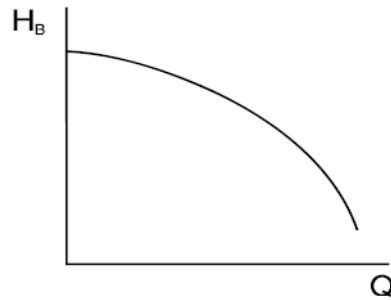


Figura 2.7 Altura de elevación de una bomba

Las bombas más utilizadas en los sistemas de bombeo convencionales son las centrífugas y las axiales. Estas bombas pueden impulsar un caudal mayor a medida que disminuye la resistencia o diferencia de altura que deben vencer.

Tipos y características

Bombas rotodinámicas

La primera clasificación posible de las bombas es separarlas en el grupo de bombas de desplazamiento positivo y bombas rotodinámicas. Las primeras operan de forma volumétrica: desplazan un determinado volumen por unidad de tiempo, independientemente de la presión.

Son bombas de émbolos, paletas, engranajes, etc., utilizadas en oleohidráulica, donde se requieren unos caudales ínfimos con presiones muy elevadas.

Las bombas rotodinámicas, en cambio, consiguen incrementar la energía del fluido a base de aumentar la energía cinética por medio de la deflexión y el efecto centrífugo que provocan los álabes del rodete recuperando esta energía posteriormente en forma de presión.

La principal forma de clasificación de las bombas rotodinámicas es separarlas en bombas axiales, mixtas y radiales, según la dirección de salida del flujo con respecto al eje.

El nombre común para las radiales es bombas centrífugas.

La utilización de bombas axiales está indicada cuando se necesitan grandes caudales con pequeñas alturas de elevación. Las centrífugas, cuando se necesitan grandes alturas y pequeños caudales. Las bombas mixtas constituyen un caso intermedio.

Hay otras muchas características que hacen a las bombas susceptibles de clasificaciones distintas, y así se pueden tener bombas de una o varias etapas, bombas de cámara partida, bombas autoaspirantes, bombas sumergibles, bombas horizontales o verticales, etc.

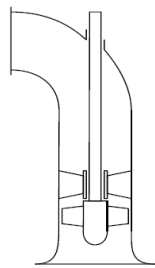


Figura 2.8 Bomba axial

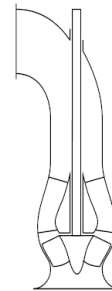


Figura 2.9 Bomba mixta

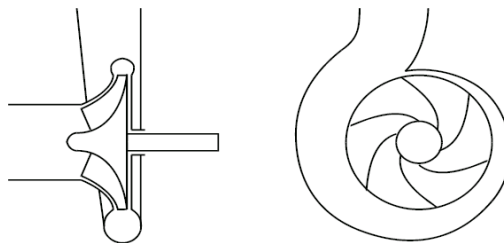


Figura 2.10 Bomba centrífuga

2.2.3.4.1 Curva característica

La altura de elevación de una bomba rotodinámica depende fundamentalmente del caudal que circula por ella, lo que quiere decir que va a estar definida por su acoplamiento con el sistema. Si se considera la bomba de forma aislada, la curva que representa la altura proporcionada por la bomba en función del caudal se llama curva característica.

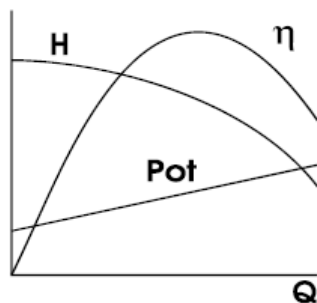


Figura 2.11 Curva característica de una bomba centrífuga

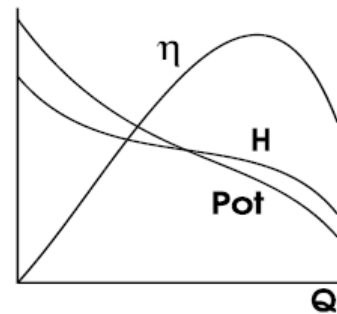


Figura 2.12 Curva característica de una bomba axial

La figura 2.11 muestra una curva característica típica de una bomba centrífuga, y la figura 2.12 la de una bomba axial. La pendiente de ambas curvas es negativa, lo que quiere decir que cuanto mayor sea la altura que el sistema exija, menor es el caudal que la bomba puede proporcionar.

Algunas bombas tienen curvas $H-Q$ con pendiente positiva en la zona de caudales inferiores. Es conveniente alejarse de esas zonas porque se puede producir un funcionamiento inestable de la instalación.

La potencia requerida por la bomba también depende del caudal. Tiende a aumentar con él en las bombas centrífugas y a disminuir en las axiales.

La potencia hidráulica, es decir, la suministrada por la bomba al fluido, es:

$$Pot_H = \rho g Q H \quad (2.1)$$

Donde:

Q : caudal (m^3/s)

H : carga total (m)

ρ : densidad del fluido (kg/m^3)

g : aceleración de la gravedad (m/s^2)

Y el rendimiento de la bomba viene definido por:

$$\eta_B = \frac{\rho g Q H}{Pot_B} \quad (2.2)$$

Donde Pot_B es la potencia que consume la bomba.

El rendimiento es máximo en el punto llamado *de diseño* de la bomba, y disminuye tanto para caudales superiores como inferiores. Normalmente, tanto la potencia como el rendimiento se refieren únicamente a la bomba, sin tener en cuenta el motor que se utiliza para accionarla. Los valores máximos de rendimiento se encuentran entre el 85 y el 90%.

Punto de operación

Combinación con el sistema

El caudal que circula por la bomba y, por tanto, la altura de elevación que proporciona, están condicionados por la interacción bomba-sistema.

El punto de funcionamiento (Q_B, H_B) vendrá dado por el corte de la curva resistente del sistema con la curva característica de la bomba. En el ejemplo de la figura 2.13 se utiliza una bomba para subir fluido del depósito inferior A al superior B. La altura que proporciona la bomba se emplea en vencer la pérdida de carga y en superar la diferencia de altura entre los depósitos.

Si la resistencia de la tubería fuese mayor una válvula en serie algo más cerrada, por ejemplo, la bomba tendría que proporcionar más altura, y esto repercutiría en un menor caudal. Lo contrario sucede si se disminuye la resistencia.

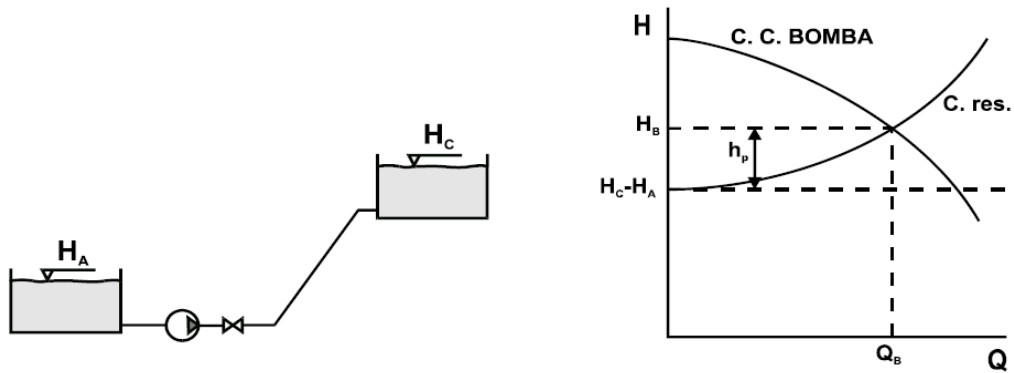


Figura 2.13 Combinación de bomba y sistema

A menudo se modeliza la curva característica de la bomba por un polinomio, normalmente una parábola. Esto se hace con fines didácticos y también para resolver los sistemas con la ayuda del ordenador. Así, la solución del ejemplo anterior vendría dada por el siguiente sistema de dos ecuaciones:

$$\begin{cases} H_1 + H_B - h_p = H_2 \\ H_B = A + B Q + C Q^2 \end{cases} \quad \text{Sistema de ecuaciones (2.3)}$$

Donde A , B y C serán los coeficientes de ajuste de la curva característica.

También habría que sustituir h_p por la expresión correspondiente, $h_p = k Q^2$ y, en su caso, hacer las iteraciones adecuadas. Cuando se opere de esta manera debe prestarse atención al sentido físico: la ecuación de ajuste no es válida para alturas ni caudales negativos. Tampoco será muy adecuada en puntos alejados del de diseño de la bomba.

Consideraciones sobre la presión y sobre la potencia

La altura de elevación generada en una bomba se puede conocer midiendo la presión a la entrada y a la salida. Pero hay que tener en cuenta que la altura, además de la diferencia de presión, incluye la diferencia de energía cinética, de cota, y las pérdidas entre los puntos de medida:

$$H_B = \frac{P_2}{\rho g} - \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} + z_2 - z_1 + h_{p_{1,2}} \quad (2.4)$$

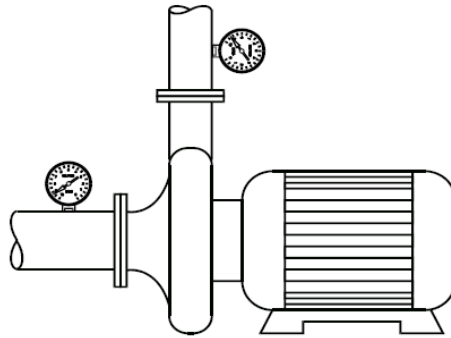


Figura 2.14 Grupo motor-bomba

Potencia eléctrica

En el caso de que la bomba esté accionada por un motor eléctrico, la potencia eléctrica se puede calcular a partir de la potencia hidráulica generada, teniendo en cuenta los rendimientos de la bomba y el motor:

$$Pot_{el} = \frac{\rho g Q H}{\eta_B - \eta_M} \quad (2.5)$$

Arranque y potencia máxima

Debe procurarse arrancar las bombas en el punto de funcionamiento que requiera menor potencia, para no sobrecargar el motor. En las bombas centrífugas esto se consigue con el caudal mínimo, y en las axiales con el caudal máximo.

Los motores suministrados por los fabricantes suelen no cubrir todo el rango de caudales. Se supone que no van a trabajar muy lejos del punto de máximo rendimiento.

Esto implica que no deben funcionar de forma continua con caudales máximos las bombas centrífugas, ni con caudales mínimos las axiales. Las bombas mixtas consumen la máxima potencia en una zona intermedia de la curva característica, por lo que presentan menos problemas.

Inercia

El momento de inercia de las partes giratorias de la bomba y el motor respecto de su eje es calculado u obtenido experimentalmente por el fabricante para determinar el par de arranque máximo necesario en el motor. También se utiliza en el cálculo del golpe de ariete producido al parar la bomba.

2.2.4 Métodos de Regulación de bombas

Los procesos productivos de las empresas requieren condiciones de bombeo diferentes a las del caudal nominal, por lo tanto, es necesario aplicar algún tipo de control o regulación de caudal.

Los métodos de regulación del caudal se obtienen mediante:

- 1) Control por válvulas
- 2) Control con variadores de frecuencia

2.2.4.1 Control por válvulas

Regulación en la descarga.

Para realizar este tipo de control es necesario colocar una válvula de control en la salida de la bomba, la cual regulará el flujo proporcionado por la bomba como se muestra en la figura 2.15.

El objetivo de este método de control es modificar la curva del sistema, ya que mediante la posición de la válvula, el sistema incrementa o disminuye las pérdidas de presión (figura 2.16).

Al variar esta curva también se modifica la posición del punto de operación del sistema, mediante este sistema de control se adapta la bomba a los requerimientos del proceso. La válvula de descarga puede ser usada para alcanzar cualquier punto de operación en la curva del sistema tan largo como del punto debajo de la curva de la bomba.

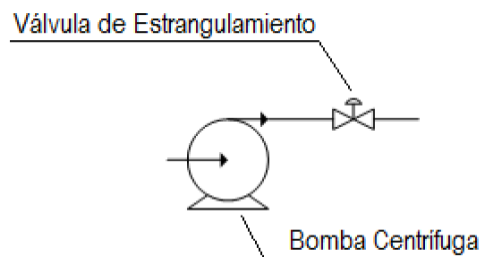


Figura 2.15 Bomba con descarga estrangulada

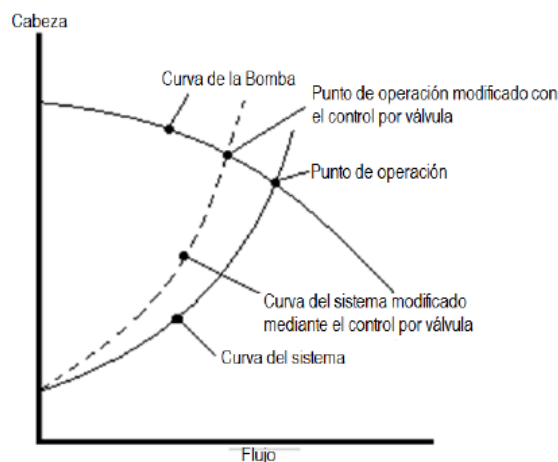


Figura 2.16 Curva modificada del sistema mediante la válvula de control

Regulación en la entrada.

La segunda posibilidad de control usando válvulas es colocar la válvula en línea de succión de la bomba (figura 2.17). Esto puede tener un efecto idéntico en la curva característica, pero este método puede resultar ineficiente debido a la cavitación que puede generarse. La cavitación es un fenómeno que ocurre cuando la presión de un líquido es reducida por debajo de la presión de vapor generando burbujas de vapor que al acoplarse generan erosión que daña al sistema.

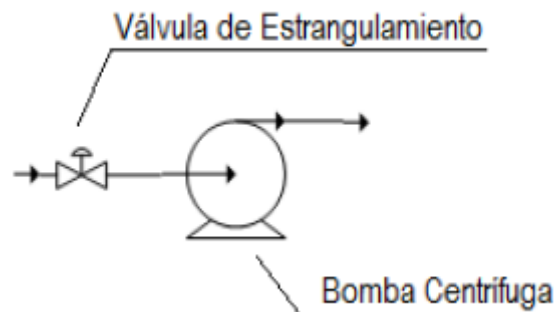


Figura 2.17 Bomba con succión estrangulada

2.2.5 Variadores de frecuencia

Un variador de frecuencia es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna (AC) por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor. Un variador de frecuencia es un caso especial de un variador de velocidad.

2.2.5.1 Principio de Funcionamiento

Los dispositivos variadores de frecuencia operan bajo el principio de que la velocidad síncrona de un motor de corriente alterna (CA) está determinada por la frecuencia de CA suministrada y el número de polos en el estator, de acuerdo con la relación:

$$V_s = \frac{f \times 120}{\text{Número de polos}} \quad (2.6)$$

Donde:

V_s = Velocidad síncrona, [rpm]

f = Frecuencia, [Hz]

Las cantidades de polos más frecuentemente utilizadas en motores síncronos o en Motor asíncrono son 2, 4, 6 y 8 polos que, siguiendo la ecuación citada, resultarían en 3000 RPM, 1500 RPM, 1000 RPM y 750 RPM respectivamente para motores sincrónicos únicamente y a la frecuencia de 60 Hz.

2.2.5.2 Control de bombas con variadores de velocidad

Una forma sencilla de obtener una amplia gama de prestaciones consiste en cambiar la velocidad de giro de la bomba. Esto se puede conseguir si se utiliza un motor de corriente continua, uno de alterna con variador de frecuencia, o un convertidor hidráulico, por ejemplo.

Al variar únicamente la velocidad, no sólo se respeta la semejanza, sino que al ser la bomba la misma, $D1=D2$, y las ecuaciones que relacionan las curvas características a una y a otra velocidad se reducen a:

$$Q_2 = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right) Q_1 \quad (2.7)$$

$$H_2 = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 H_1 \quad (2.8)$$

$$Pot_2 = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^3 Pot_1 \quad (2.9)$$

El rendimiento, teóricamente, se mantiene constante entre puntos homólogos, aunque en realidad irá disminuyendo al alejarse de la velocidad de diseño.

En los dibujos de las curvas características se suele representar el rendimiento en forma de curvas de isomagnitud como en la figura 2.18.

Al aplicar la variación de velocidad en un sistema, no deben confundirse los puntos de operación a diferente velocidad con puntos semejantes. Dado un sistema con una curva resistente, y las curvas características a dos velocidades ω_1 y ω_2 , en la figura 2.19 el punto de funcionamiento en cada caso se halla buscando el corte de las curvas correspondientes. Si se aplicaran las fórmulas anteriores al punto de funcionamiento a velocidad ω_1 , A , se obtendría el punto C , que es su homólogo, y no el B . Esas fórmulas nos permiten transformar una curva característica en otra, pero no calcular directamente los puntos de funcionamiento.

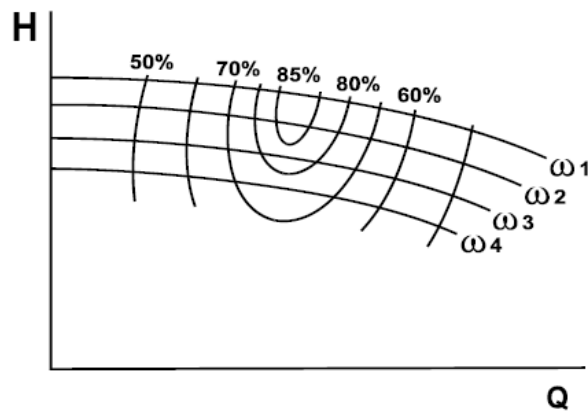


Figura 2.18 Curvas características a diferentes velocidades

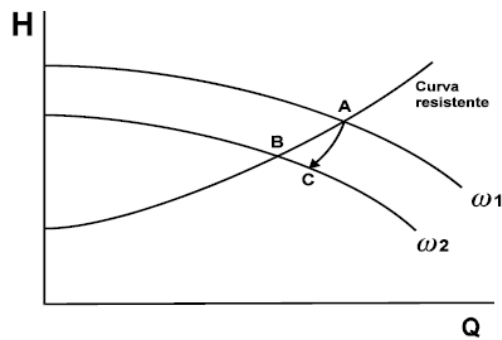


Figura 2.19 Relación entre las curvas correspondientes a dos velocidades

2.2.5.3 Comparación de los Controles con válvula vs Controles con variadores de velocidad.

El control con variador de velocidad es uno de los más eficientes, ya que como elemento de control se utiliza un variador de frecuencia, con lo cual se logra mantener siempre un control en la potencia eléctrica de alimentación del motor, y de esta manera mantener un control del flujo impulsado por la bomba. En la tabla 2.1 se muestra una comparativa entre los distintos métodos de control o regulación en base a la energía consumida por cada uno de ellos.

Tabla 2.1 Energía consumida por diferentes métodos de control de flujo

CONTROL	ENERGÍA
Estrangulamiento	89 %
Recirculación	82 %
Control ON-OFF	70 %
Control de velocidad	45 %

Este tipo de control es el más eficiente porque permite mantener controlados los parámetros eléctricos de alimentación del motor que impulsa la bomba, así como un control constante del flujo; además de generar grandes ahorros a nivel de consumo eléctrico con respecto a otros métodos de control como se observa en la figura 2.20.

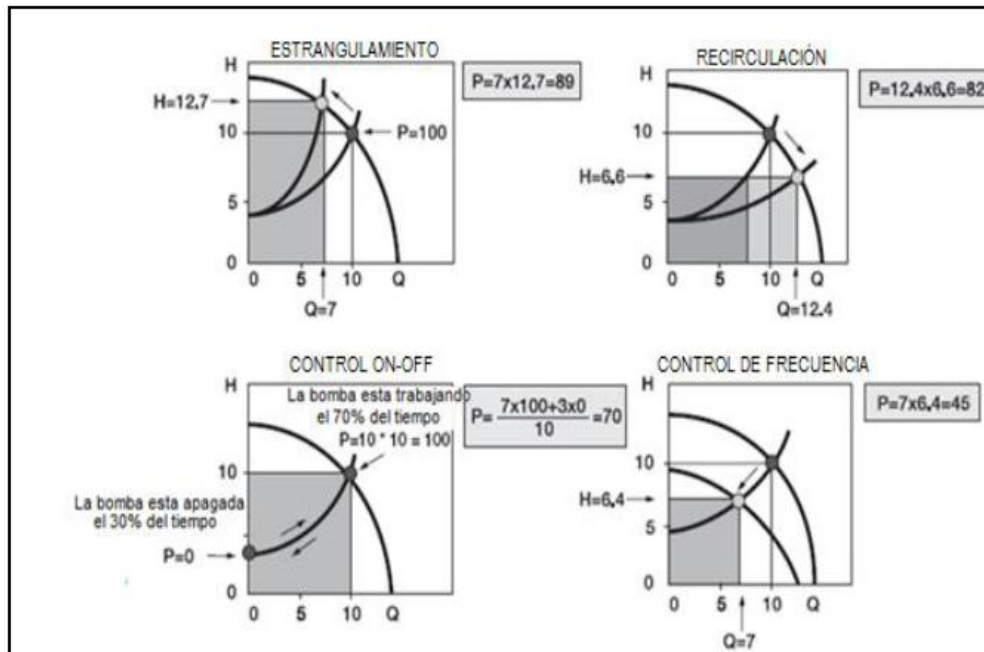


Figura 2.20 Comparación de distintos métodos de control de flujo

2.2.6 Modos de Control

Control todo-nada

En la regulación todo-nada el actuador adopta únicamente dos posiciones o abierta o cerrada, para un valor único de la variable controlada. Este tipo de control se caracteriza por un ciclo continuo de variación de la variable controlada.

El control todo-nada funciona satisfactoriamente si el proceso tiene una velocidad de reacción lenta y posee un tiempo de retardo mínimo. Se caracteriza porque las dos posiciones extremas del actuador permiten una entrada y salida de energía al proceso ligeramente superior e inferior respectivamente a las necesidades de la operación normal.

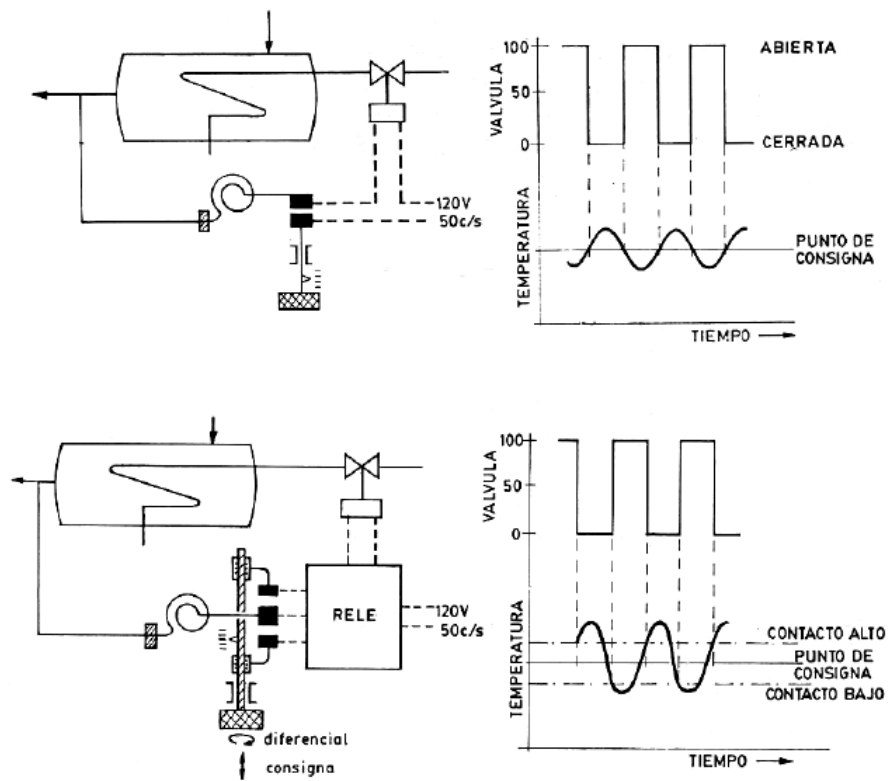


Figura 2.21 Control todo-nada

Control proporcional

En el sistema de posición proporcional, existe una relación lineal continua entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control (dentro de la banda proporcional). Es decir, el actuador se mueve el mismo valor por cada unidad de desviación.

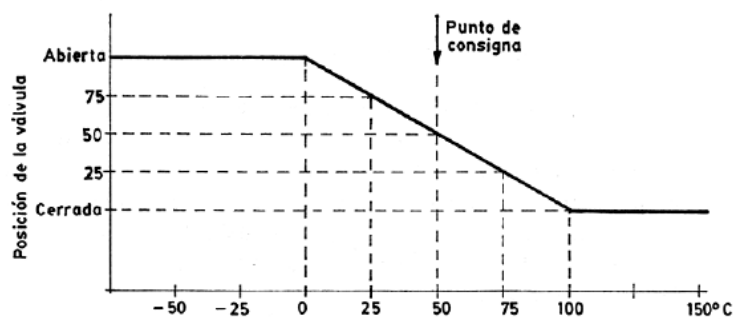


Figura 2.22 Control proporcional

Control proporcional + integral

El control integral actúa cuando existe una desviación entre la variable y el punto de consigna, integrando dicha desviación en el tiempo y sumándola a la acción de la proporcional.

Se caracteriza por el llamado tiempo de acción integral en minutos por repetición (o su inversa: repeticiones por minuto) que es el tiempo en que, ante una señal en escalón, el actuador repite el mismo movimiento correspondiente a la acción proporcional. Como esta acción de control se emplea para obviar el inconveniente del offset (desviación permanente de la variable con respecto al punto de consigna) de la banda proporcional, se utiliza sólo cuando es preciso mantener un valor de la variable que iguale siempre al punto de consigna.

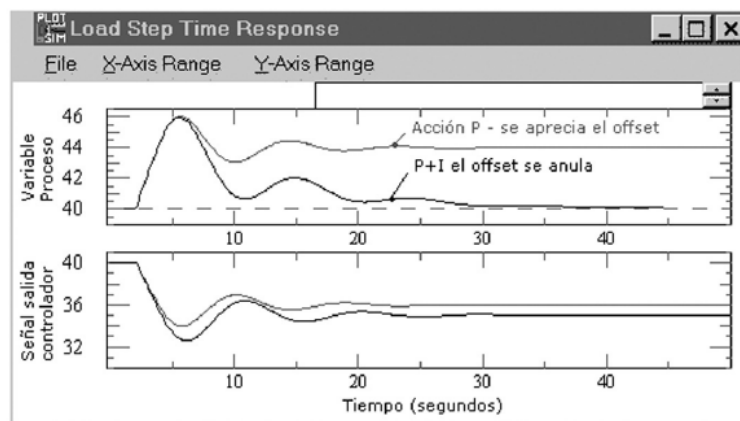


Figura 2.23 Respuesta del controlador PI a un cambio de carga

Control proporcional + derivado

En la regulación derivada existe una relación lineal continua entre la velocidad de variación de la variable controlada y la posición del elemento final de control. Es decir, el control derivativo actúa cuando existen cambios en la variable. Esta actuación es proporcional a la pendiente de la variable, es decir a su derivada.

La acción derivada se caracteriza por el llamado tiempo de acción derivada en minutos de anticipo que es el intervalo durante el cual, la variación de la señal de salida del controlador, debida a la acción proporcional, iguala a la parte de

variación de la señal debida a la acción derivativa, cuando se aplica al instrumento una señal en rampa.

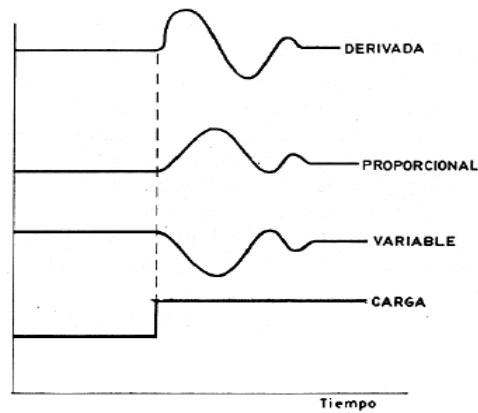


Figura 2.24 Control proporcional + derivativo

Control proporcional + integral + derivado

La unión en un controlador de las tres acciones proporcional, integral y derivativa (PID) forma un instrumento controlador que presenta las siguientes características, comentadas tomando como ejemplo el controlador de temperatura del intercambiador de calor de la figura 2.25, donde suponemos que se presenta un cambio de carga por aumento de la demanda de agua caliente:

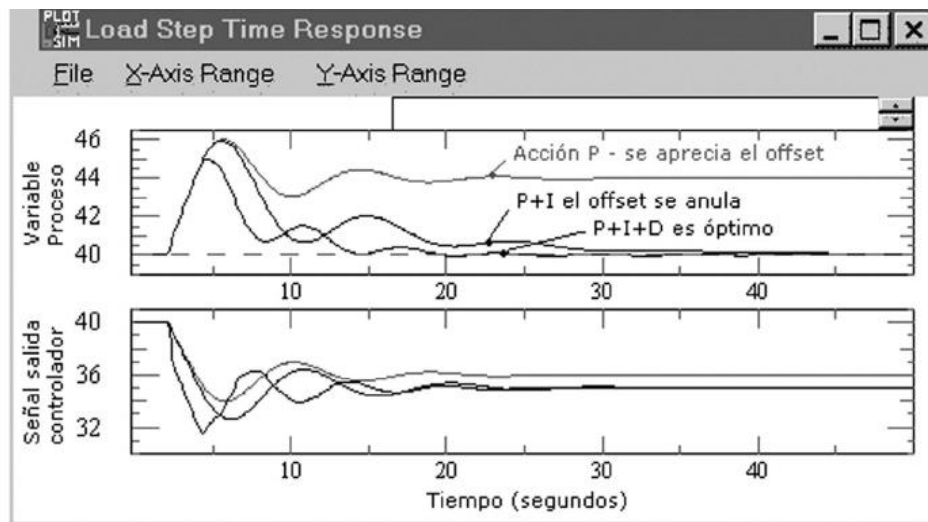


Figura 2.25 Control proporcional + integral + derivativo

2.3 Marco conceptual.

Se va a realizar la evaluación del consumo energético de la estación de nivel en el laboratorio de Redes Industriales y Control de procesos ubicada en la Ciudad de Latacunga- Ecuador.

La estación de nivel en la actualidad es utilizada para el desarrollo de aplicaciones prácticas sobre el conocimiento de instrumentación y control de procesos industriales por parte de los estudiantes de las carreras técnicas de la institución, para ello se utiliza la estación con todos los componentes descritos anteriormente.

En la actualidad el mismo control conservando todas las prestaciones y características se lo puede realizar con nuevos componentes más eficientes y desde el punto de vista del consumo de la energía eléctrica.

2.3.1 Banco de Bomba Centrífuga Controlado desde Computador (PC), con SCADA.

La empresa *edibon* líder en equipamiento didáctico técnico, ofrece un Banco de Bomba centrífuga el **PBCC**, es un equipo de sobremesa que consta de una bomba centrífuga controlada desde computador (PC), un depósito de alimentación de agua, tuberías de circulación, válvulas de regulación, así como los elementos de control suficientes para los experimentos con la bomba: 2 sensores de presión y un sensor de caudal.

La bomba está instalada en un sistema de tuberías que evitan el gasto permanente de agua durante el funcionamiento, ya que es un circuito cerrado.

PBCC dispone instrumentación y sensores que permiten medir, desde el computador (PC), los parámetros más representativos de la bomba centrífuga:

- Velocidad del motor.

- Caudal total impulsado.
- Presión de admisión y descarga.
- Par.
- Valores calculados:
 - Altura total.
 - Potencia hidráulica.
 - Potencia mecánica.
 - Eficiencia.
- Parámetros ajustables, como:
 - Velocidad del motor y caudal.
 - Posición de la válvula.

Este Equipo Controlado desde Computador se suministra con el Sistema de Control desde Computador (SCADA) de EDIBON, e incluye: el propio Equipo + una Caja-Interface de Control + una Tarjeta de Adquisición de Datos + Paquetes de Software de Control y Adquisición de Datos, para el control del proceso y de todos los parámetros que intervienen en el proceso.

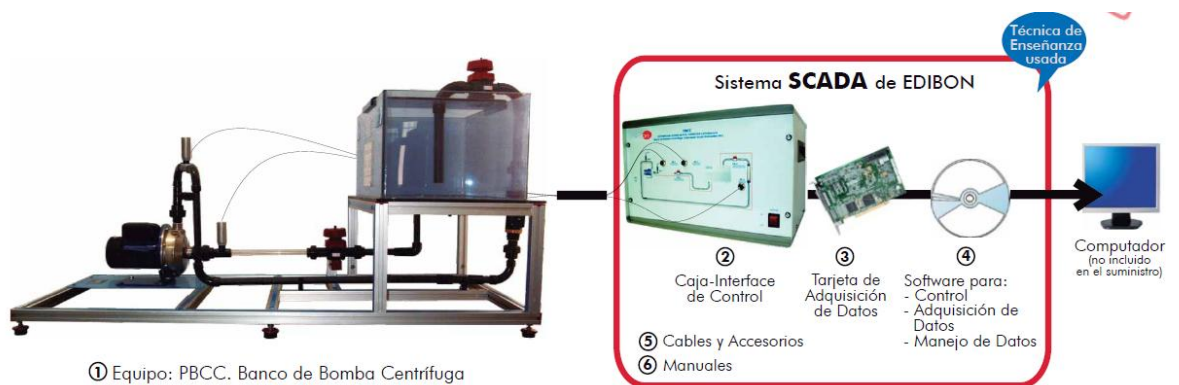


Figura 2.26 Equipo PBCC. Banco de Bomba Centrífuga

2.3.1.1 Características Importantes del Equipo PBCC

- Sistema SCADA con Control Avanzado en Tiempo Real.
- Control Abierto + Multicontrol + Control en Tiempo Real.
- Software de Control EDIBON específico, basado en Labview.
- Tarjeta de Adquisición de Datos de National Instruments (250 KS/s, kilo muestras por segundo).
- Ejercicios de calibración, incluidos, que enseñan al usuario cómo calibrar un sensor y la importancia de comprobar la precisión de los sensores antes de realizar las mediciones.
- Compatibilidad del equipo con un proyector y/o una pizarra electrónica, que permiten explicar y demostrar el funcionamiento del equipo a toda la clase al mismo tiempo.
- Preparado para realizar investigación aplicada, simulación industrial real, cursos de formación, etc.
- El usuario puede realizar las prácticas controlando el equipo a distancia, y además es posible realizar el control a distancia por el departamento técnico de EDIBON.
- El equipo es totalmente seguro, ya que dispone de 4 sistemas de seguridad (mecánico, eléctrico, electrónico y por software).
- Diseñado y fabricado bajo varias normas de calidad.
- Software opcional CAL, que ayuda al usuario a realizar los cálculos e interpretar los resultados.
- Este equipo se ha diseñado para poder integrarse en futuras expansiones.
- Una expansión típica es el Sistema SCADA NET de EDIBON (ESN) que permite trabajar simultáneamente a varios estudiantes con varios equipos en una red local.

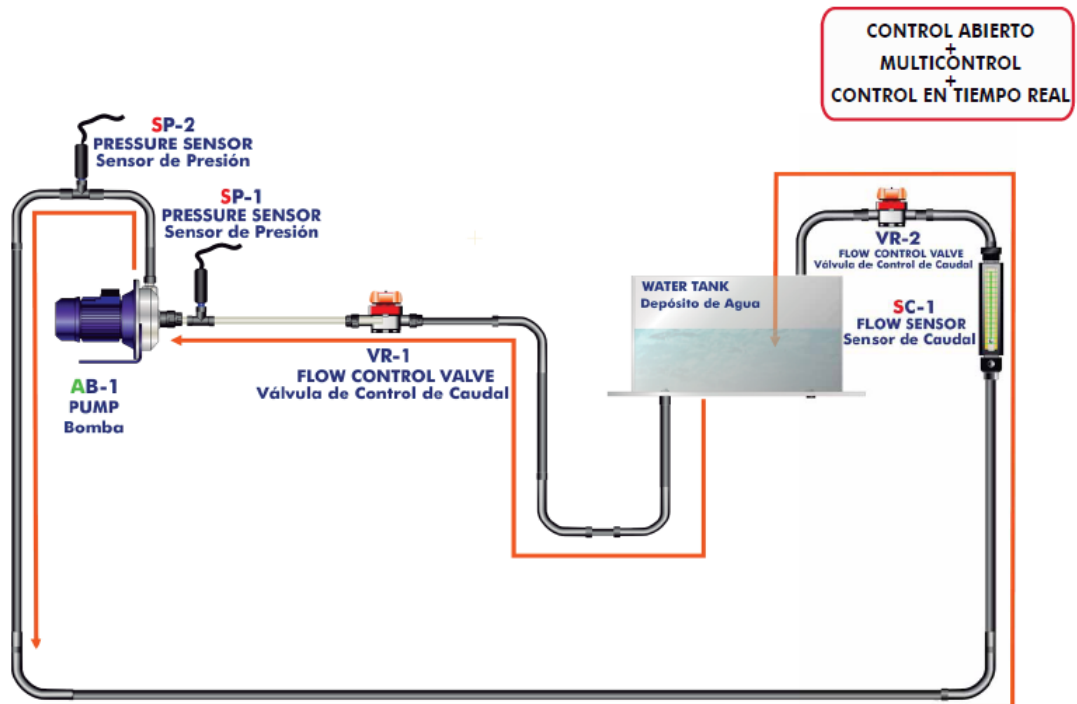


Figura 2.27 Diagrama del proceso y disposición de los elementos del equipo

Este equipo posee todas las características y prestaciones de un sistema de bombeo que se puede encontrar en la industria, además que permite realizar el control del sistema y posee alrededor de 16 prácticas didácticas que se pueden realizar en el PBCC.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología para realizar la investigación: el enfoque metodológico, la modalidad, el tipo de investigación, el nivel y las técnicas e instrumentos a utilizar.

3.1 Diseño de la investigación

Se refiere a los tipos de investigación que se adoptan en la tesis, se toman los elementos metodológicos que describen las etapas desarrolladas.

3.1.1 Modalidad de la investigación

Se trata de una modalidad de investigación de campo, tomando como base la Escuela Politécnica del Ejército Extensión Latacunga, específicamente el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos.

3.1.1.1 De campo

La modalidad de la investigación es de campo ya que se estudiará sistemáticamente el consumo de energía eléctrica en la estación de nivel, para ello se realizará la investigación del funcionamiento de la estación de procesos industriales de forma particular la estación de nivel, esta información se obtiene de la guía de usuario de la estación de procesos proporcionada por el fabricante.

3.1.1.2 Bibliográfica - Documental

En la presente investigación existe bibliografía de apoyo: textos, módulos, documentos, páginas de Internet relacionadas a la temática, que han servido para sustentar teóricamente el problema de investigación, a través del análisis documental.

3.1.2 Tipo de Investigación

3.1.2.1 Descriptiva:

Se realizará investigación descriptiva al recolectar información relacionada con el control automático de la estación de nivel, la información de los accionamientos eficientes existentes que pueden ser implementados para el control de dicha estación.

3.1.2.2 Experimental:

Teniendo en cuenta la variable independiente referida al control del proceso, se realizan experimentos buscando su vínculo con la variable dependiente.

3.2 Operacionalización de las variables

Cuadro 1. Operacionalización de variables

Variable Independiente:

Accionamientos eficientes

Tabla 3.1 Cuadro de la Operacionalización de la variable Independiente

Concepto	Categoría	Indicadores	Item	Técnicas	Instrumentos
Son actuadores que cumplen la función de regular a la variable manipulada de forma proporcional con el fin de controlar el sistema	Variador de frecuencia	Velocidad angular	Rpm	Medición	Software
	Bomba centrífuga	Velocidad de circulación de caudal	Gpm	Medición	Transmisor
	Consumo energético	Energía consumida	kWh	Medición y cálculo	Medidor de potencia software

Variable dependiente:

Consumo eléctrico

Tabla 3.2 Cuadro de la Operacionalización de la variable Dependiente

Concepto	Categoría	Indicadores	Item	Técnicas	Instrumentos
Número de kWh utilizados para que funcione un aparato eléctrico durante un tiempo.	Consumo de la estación	Consumo de energía eléctrica	kWh	Medición	Medidor de Potencia
	Consumo del accionamiento eléctrico	Consumo de energía eléctrica	kWh	Medición	Medidor de Potencia
	Consumo del compresor	Consumo de energía eléctrica	kWh	Medición	Medidor de Potencia
	Consumo de la válvula neumática	Consumo de energía eléctrica	kWh	Medición	Medidor de Potencia
	Nivel	Nivel del Tanque	Pulgadas	Medición	Transmisor de nivel

3.3 Descripción de la metodología

En la figura 3.1 se muestra un diagrama de flujo de la metodología que se llevara a cabo para la evaluación del consumo energético de la Estación de Nivel del Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos de la ESPE extensión Latacunga, utilizando dos tipos de control de regulación en miras de encontrar el accionamiento más eficiente en el consumo de energía.

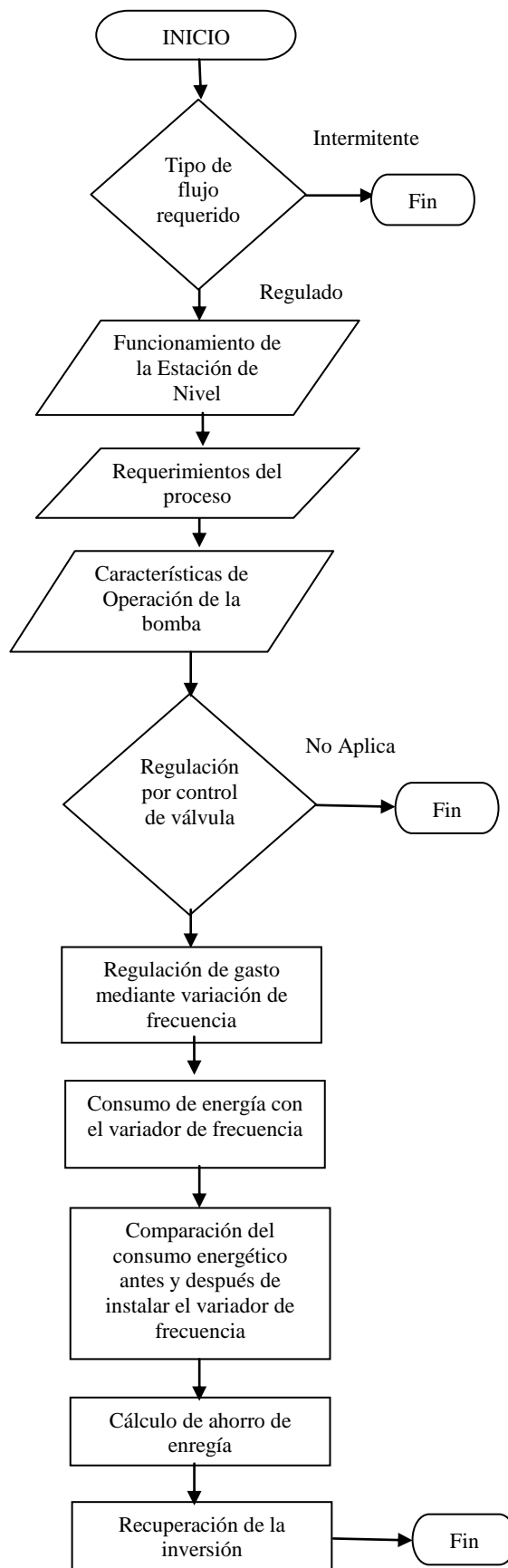


Figura 3.1 Metodología para la evaluación del ahorro de energía en la Estación de Nivel

3.3.1 Tipo de flujo requerido.

Para implementar un tipo de control en un sistema de bombeo es necesario definir qué tipo de flujo se puede aplicar al sistema y pueden ser:

- 1) **Intermitente:** Para satisfacer este tipo de flujo, es necesario el accionamiento o desactivación del equipo de bombeo, o bien mediante la aplicación de una válvula de control con la apertura o cierre de la misma (control on/off).
- 2) **Regulado:** Al presentarse este tipo de demanda el flujo requerido varía constantemente a lo largo del proceso, solo se utiliza un porcentaje del flujo máximo del equipo. Para satisfacer estas necesidades se emplea un control basado en la apertura de válvulas, o bien la implementación de un variador de frecuencia el cual modificará la velocidad de la bomba, y por consiguiente el flujo proporcionado por la misma.

Después de haber establecido el tipo de flujo requerido, se procede a la recolección de datos de los componentes que intervienen en el sistema de bombeo que es la parte central de la estación de nivel, de esta manera se determinara si es aplicable implementar un variador de frecuencia como elemento de control, lo cual generara un ahorro de energía en el sistema.

3.3.2 FUNCIONAMIENTO DEL PROCESO

El proceso consiste en el monitoreo y control de la variable nivel de agua, para realizar dicho monitoreo y control existe un transmisor de corriente Smart que genera una señal de 4mA - 20mA cc, que corresponde a un valor de altura de 20cm - 60cm, esta señal es insertada hacia el controlador lógico programable en el mismo se realizan los diferentes modos de control de acuerdo a las prácticas que se vayan a ejecutar (Control proporcional, proporcional integral, proporcional derivativo, proporcional integral derivativo), después de implementar el algoritmo de control se genera una señal de salida de 4mA-20mA esta señal va hacia el conversor de corriente a presión que se encarga de

generar una señal neumática de presión de 3 a 15 PSI que se conecta a una válvula reguladora proporcional, la cual genera una regulación proporcional de caudal en relación a la altura deseada. Para el funcionamiento de la válvula proporcional existe un compresor el cual suministra la fuente neumática de 20PSI necesaria para el correcto funcionamiento del convertidor de corriente a presión que es un equipo indispensable para el correcto control de dicha válvula.

De acuerdo al valor que se introduzca en la consigna el control automático debe ser capaz de regular al valor requerido en la menor cantidad de tiempo.

La recolección de datos se va a realizar evaluando el consumo energético de la estación de procesos en la actualidad, para ello se presentan los componentes de dicha estación.

3.3.2.1 Componentes de la Estación de Nivel:

- 1) **Transmisor de nivel tipo radar.** Capta la variable del proceso y la transmite a largas distancias en forma de señal eléctrica de corriente de 4-20mA.
- 2) **Controlador lógico programable.** Compara la variable medida con la de referencia o deseada para determinar el error y estabiliza el funcionamiento dinámico del lazo o bucle de control para reducir o eliminar el error.
- 3) **Bomba centrífuga.** Las bombas son los elementos que aportan energía para vencer las pérdidas de carga y la diferencia de alturas entre dos puntos. Fuerzan al fluido a circular en un determinado sentido.
- 4) **Válvula proporcional.** Realiza la función de variar el caudal de fluido de control que modifica a su vez el valor de la variable medida comportándose como un orificio de área continuamente variable. Para el

funcionamiento de una válvula proporcional es necesario que exista una fuente de alimentación neumática, por ello es necesario un compresor.

- 5) **Compresor neumático.** Su función es suministrar aire comprimido de acuerdo a los requerimientos del sistema.

A continuación se presenta el diagrama de tuberías e instrumentación del proceso nivel.

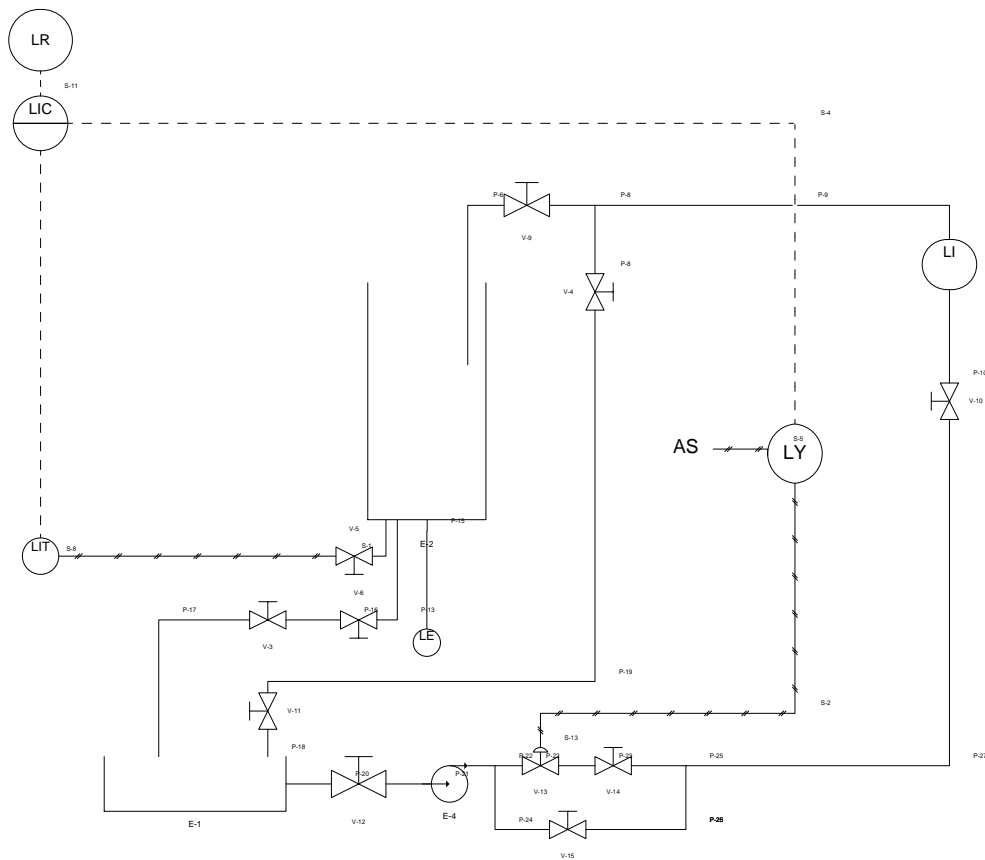


Figura 3.2 Diagrama de tuberías e instrumentación de la estación de nivel

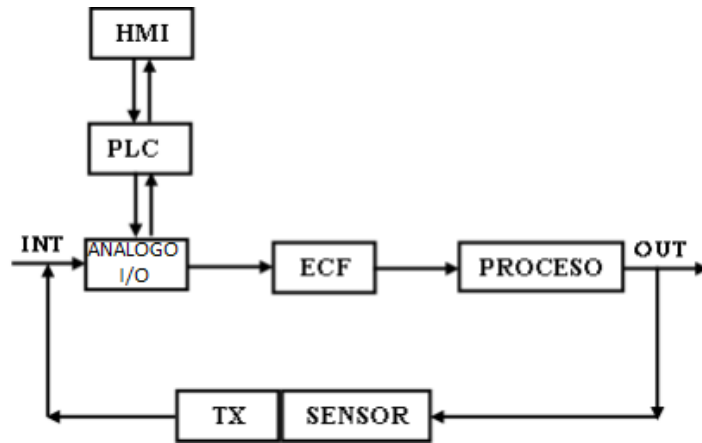


Figura 3.3 Diagrama de bloques del sistema

3.3.3 REQUERIMIENTOS DEL PROCESO.

Para evaluar la estación de nivel, es necesario realizar mediciones, las cuales se tomarán cuando la estación está en operación normal. Se registrarán las mediciones con los diferentes tipos de control, representando el promedio de las muestras tomadas, ya que de esto dependerá la precisión y confiabilidad de la evaluación.

3.3.3.1 Registrador Trifásico Fluke 1735

El registrador Fluke 1735 es un medidor de voltaje, corriente y potencia que permite realizar estudios de la energía eléctrica y registros de datos básicos de la calidad eléctrica.

Entre sus características se presenta:

- Supervisión de la demanda máxima de potencia a lo largo de periodos medios definidos por el usuario.
- Comprobaciones de consumo de energía para evidenciar las ventajas aportadas por las mejoras realizadas.



Figura 3.4 Registrador Trifásico Fluke 1735

La implementación de este equipo permitirá realizar la evaluación del consumo de energía eléctrica de la estación.

A continuación se presenta el esquema de conexión realizado para las mediciones requeridas, tomando en cuenta que la estación de procesos utiliza para su funcionamiento una señal bifásica de 220 VAC.

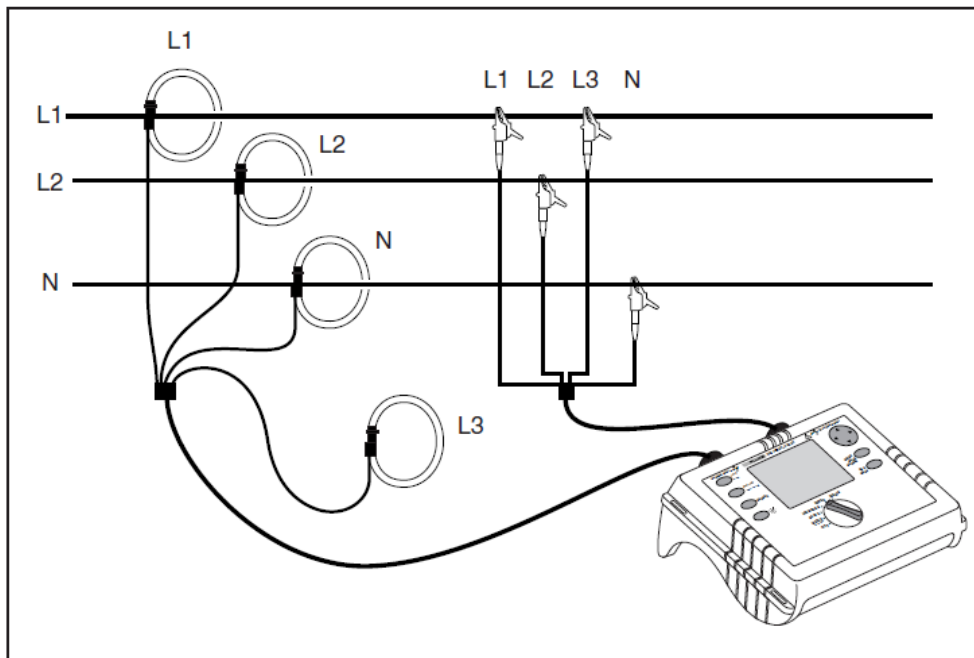


Figura 3.5 Conexión de fase dividida

3.3.4 CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DE LA BOMBA

Para la evaluación del ahorro energético, es necesario tomar en cuenta las bases teóricas que determinan las condiciones del sistema de bombeo.

Los datos de placa que posee la bomba de la estación de nivel, son un factor importante para poder evaluar el consumo energético de la estación.

La bomba es de la marca Thebe, posee un motor acoplado de 3HP y sus datos de placa se presentan en la figura 3.6.

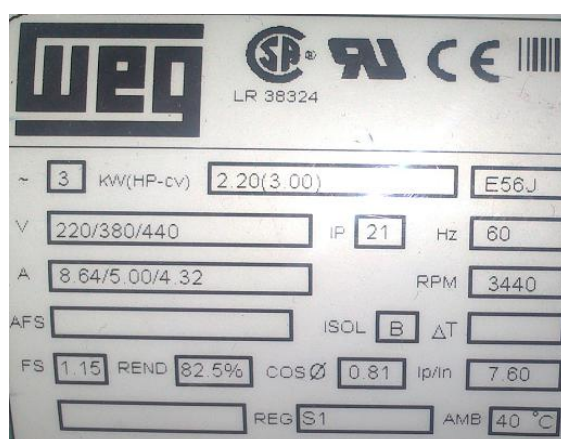


Figura 3.6 Datos de fabricante de la bomba de la estación de nivel

3.3.5 REGULACIÓN POR CONTROL DE VÁLVULA

Para evaluar el consumo energético de la estación de nivel se procedió a conectar el analizador de red como se muestra en la figura 3.5, la válvula de control es neumática por lo que posee un convertor de corriente a presión necesario para que proporcione una regulación de 3PSI a 15PSI que equivale a un movimiento del vástago del 0% a 100%.

En el convertor de corriente a presión se insertaron señales de corriente de 4mA a 20mA cc para evaluar el porcentaje de apertura de la válvula y obtener los niveles de caudal generados por el estrangulamiento de la misma. Se realizaron varias mediciones del funcionamiento de la válvula como regulador de caudal, las cuales se presentaran en el capítulo 4 para su discusión.

3.3.5.1 Implementación de los diferentes modos de control utilizando como elemento de control final la válvula proporcional.

Se procede a poner en funcionamiento la estación de procesos implementando los diferentes modos de control, en los cuales se toman los datos en varios días por 6 horas diarias, realizando la medición de la demanda de potencia.

3.3.5.1.1 Implementación del control proporcional.

Para la implementación del control proporcional es necesario realizar las conexiones eléctricas como se presenta en la figura 3.2.

Para el control automático se utiliza el controlador lógico programable (PLC) S7-200, a continuación se procede a realizar la programación en el controlador, al cual se le configura y realiza el escalamiento necesario para realizar el control proporcional.

La programación del PLC se realizó en el lenguaje de programación KOP en el software de alto nivel Microwin propio de Siemens.

3.3.5.1.2 Pasos para la configuración y programación del PLC para realizar el control Proporcional.

Para realizar el control Proporcional en el microwin se realizan los siguientes pasos:

1. Ir a herramientas y seleccionar el asistente de operaciones.

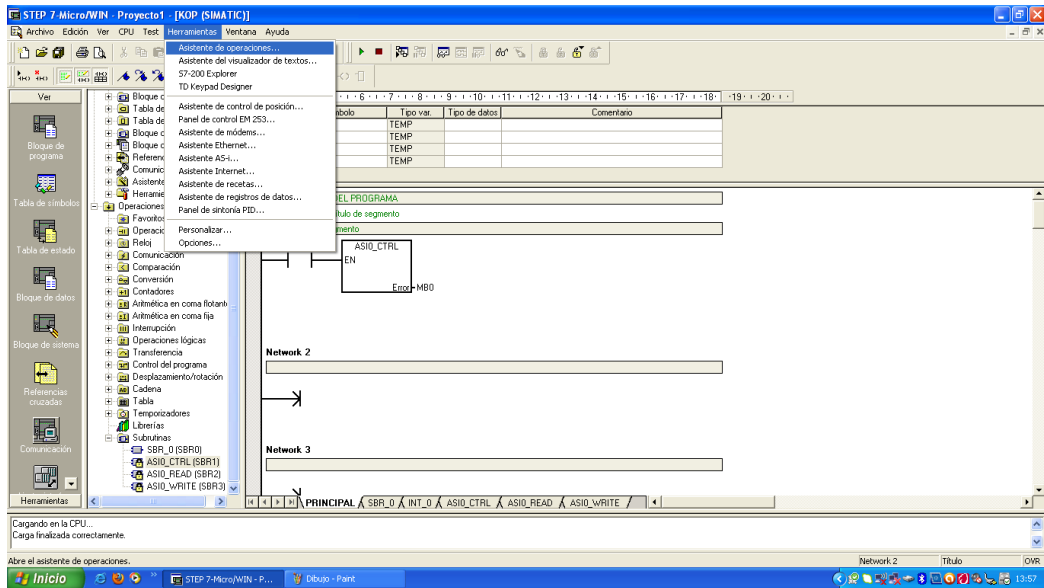


Figura 3.7 Pantalla que indica el asistente de operaciones

2. Seleccionado el asistente operaciones elegir la opción de control PID con ello el asistente realiza las operaciones necesarias para integrar el control en lazo cerrado.

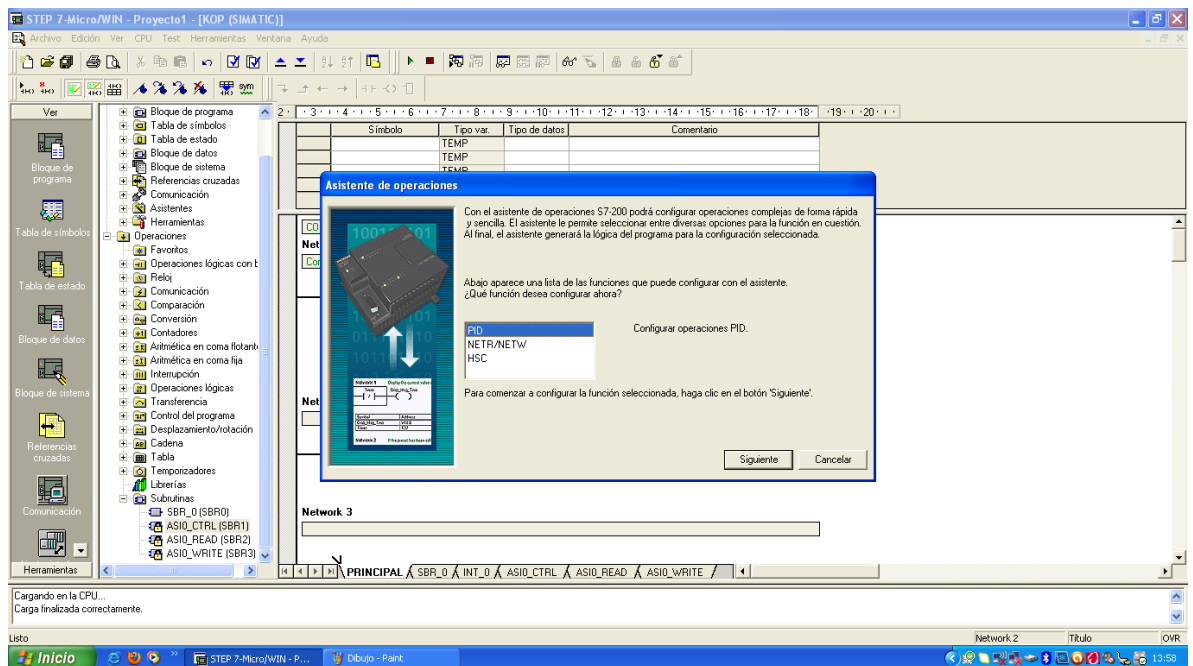


Figura 3.8 Pantalla que indica la selección del control PID

3. El PLC S7-200 tiene la capacidad de desarrollar hasta 8 algoritmos de control PID, en este caso se necesita un solo algoritmo de control, ya que el monitoreo y

control automático a desarrollarse es de una sola variable en este caso el nivel de agua, por lo que se selecciona el PID 0.

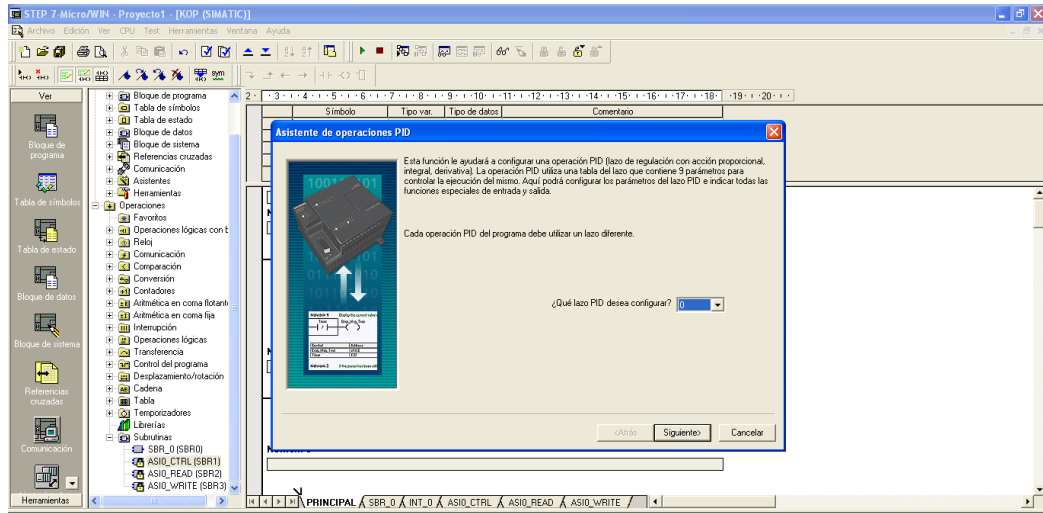


Figura 3.9 Pantalla que indica el número de lazo de control a utilizar

4. A continuación es necesario colocar la consigna de lazo este valor se ubico en porcentaje de 0 a 100%, donde 0% equivale a 20cm y 100% equivale a 60cm

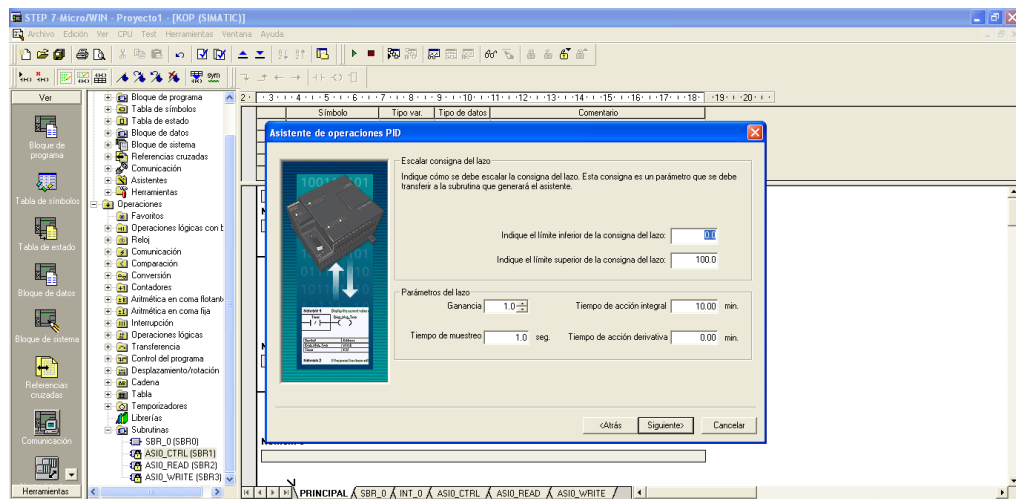


Figura 3.10 Pantalla que indica los límites a utilizar en la consigna del lazo

5. El asistente especifica el tipo de escalamiento a utilizar en este caso se elige unipolar porque el valor del transmisor de nivel es de 4mA-20mA y no es voltaje

diferencial, se utiliza el offset porque este ítem es necesario cuando se utilizan los transmisores de corriente que generan una señal de 4mA-20mA.

También es necesario escalar la variable de proceso, la entrada analógica del PLC, aquí se especifica de acuerdo a lo siguiente, el canal analógico soporta el ingreso de corriente de 4mA-20mA que corresponde a un dato en el PLC de 0 a 32000.

En la salida del lazo de control se configuran los mismos parámetros como son salida analógica, escalamiento unipolar, se utiliza el offset del 20% y se especifica el límite superior en 32000 y el límite inferior en 0, lo cual corresponde a una señal de salida analógica de 4mA-20mA.

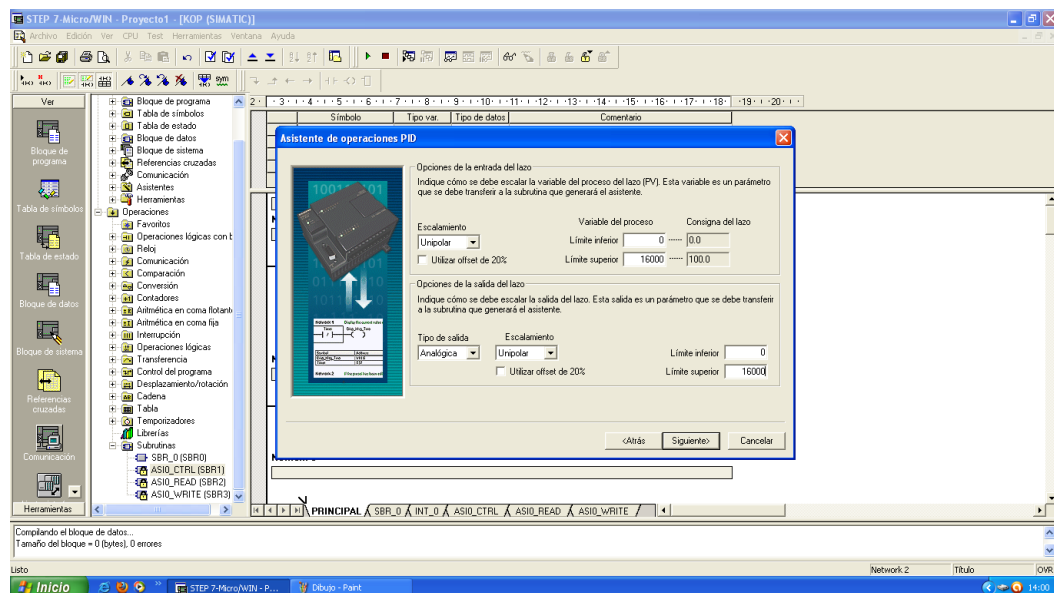


Figura 3.11 Pantalla de configuración de los parámetros de escalado

6. En la siguiente opción se habilitan las alarmas de los niveles alto y bajo en las mismas se configura en porcentaje, para este caso la alarma en bajo se activará cuando el proceso se encuentre por debajo del 10% y la alarma de alto se activará cuando la alarma se encuentre superior al 90%.

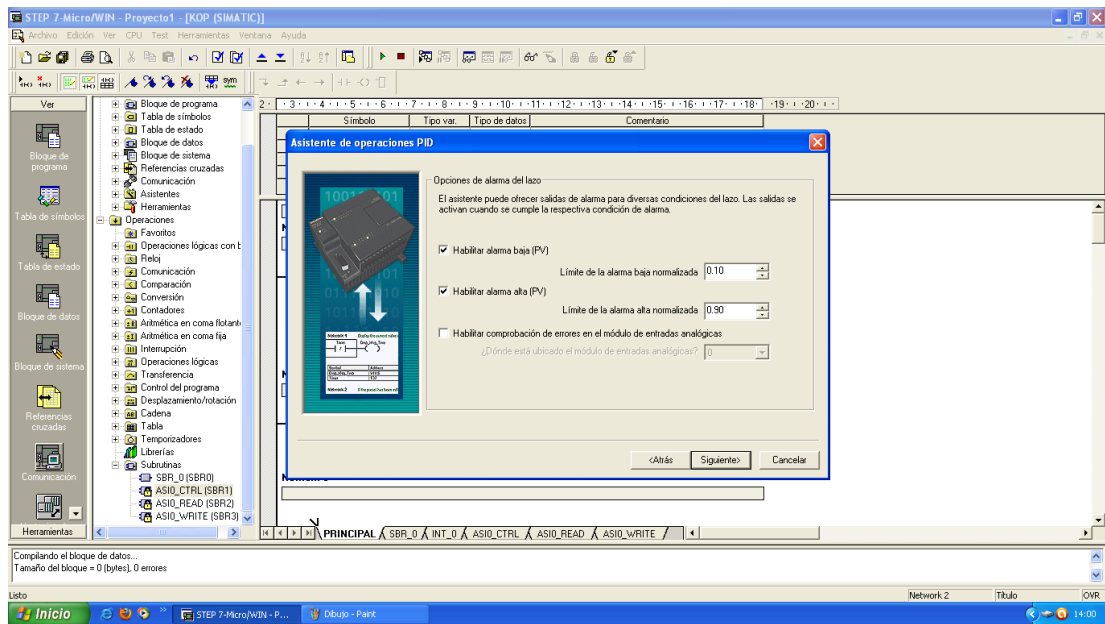


Figura 3.12 Pantalla de habilitación de alarmas

7. Se debe seleccionar un espacio de memoria del PLC que internamente utiliza para realizar las operaciones necesarias para la ejecución del algoritmo del control PID.

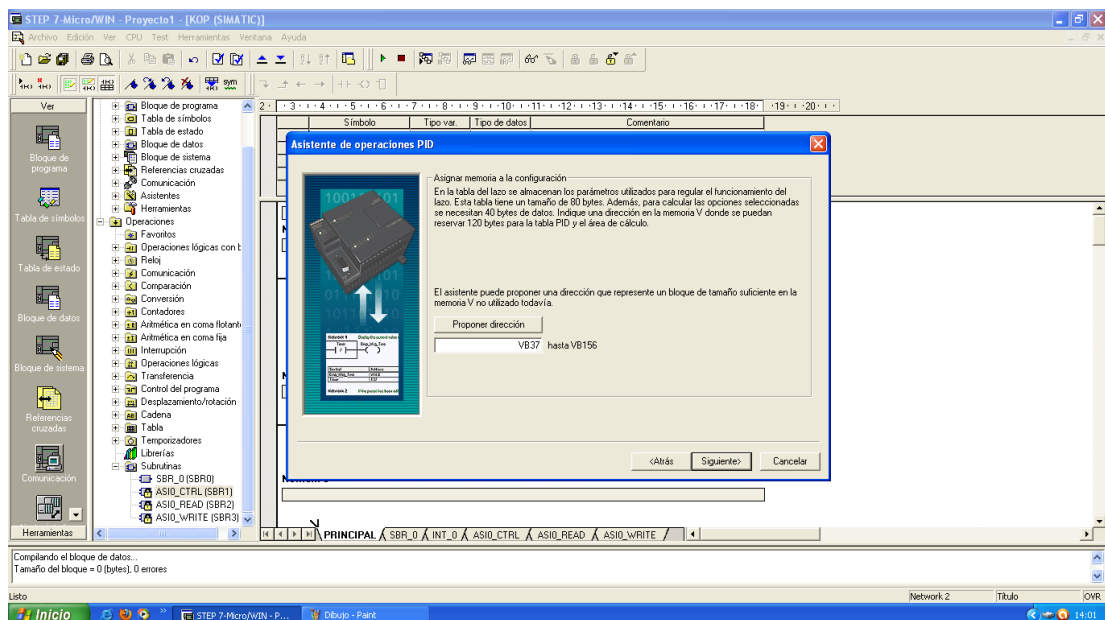


Figura 3.13 Pantalla de selección de la memoria ser utilizada para la ejecución del algoritmo del control

8. También se debe configurar la creación de las subrutinas necesarias para el funcionamiento del diagrama de control PID, existe la opción de personalizar las subrutinas o dejar el nombre por defecto, en este caso se deja el nombre por defecto.

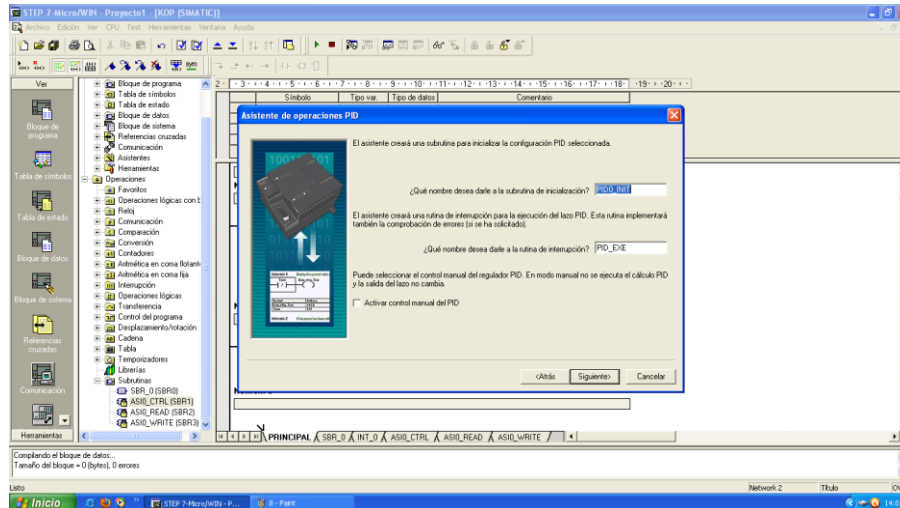


Figura 3.14 Pantalla de cambio de nombre de las subrutinas.

9. Finalmente el asistente activa la opción de finalización del asistente PID, si no existen cambios se habilita la opción finalizar.

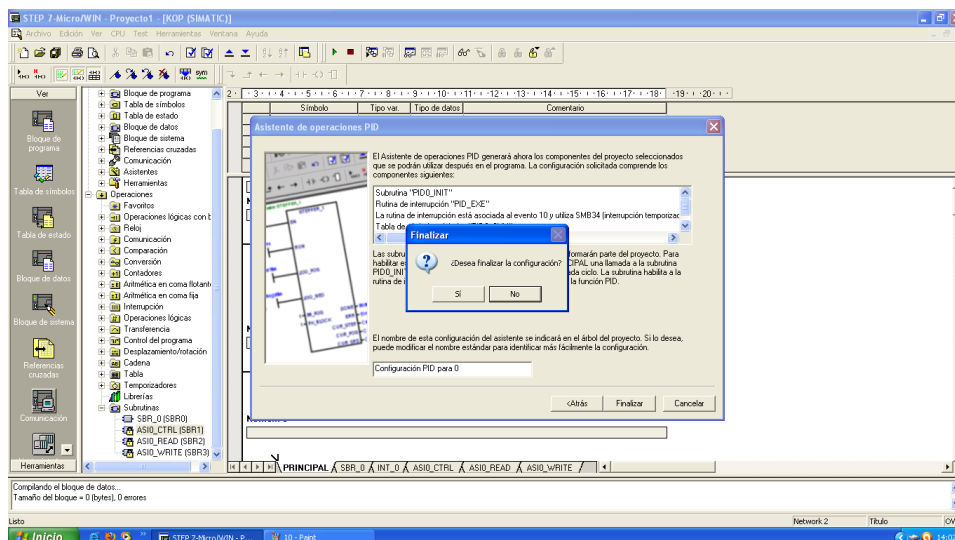


Figura 3.15 Pantalla de finalización de la configuración del asistente PID

En el network se ubica el icono de control PID, en el cual se insertan las siguientes instrucciones:

PV. Es el process value está asociado a la señal del transmisor de corriente que corresponde al AIW0.

SP. Corresponde al valor deseado ingresado por el usuario

Output. Corresponde a la señal de salida que debe ir conectado al proceso.

Alarma en alto. Se configura para que se active cuando el valor del proceso exceda del 90% del rango dinámico.

Alarma en bajo. Se configura para que se active cuando el valor del proceso se encuentre por debajo del rango dinámico.

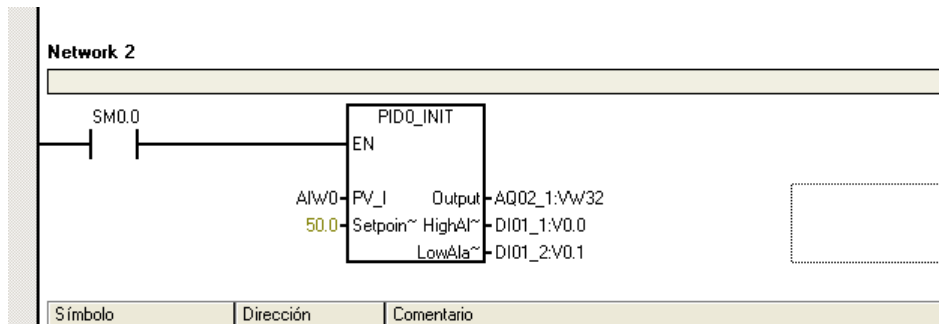


Figura 3.16 Programación desarrollada en microwin

11. Se utilizó el panel de sintonía en el mismo que se realizará la sintonía del proceso de nivel, para ello existen dos opciones sintonía manual y sintonía automática, en este caso se utilizó la sintonía manual, porque el fin de la implementación de los diferentes controles es evaluar el control más eficiente desde el punto de vista energético.

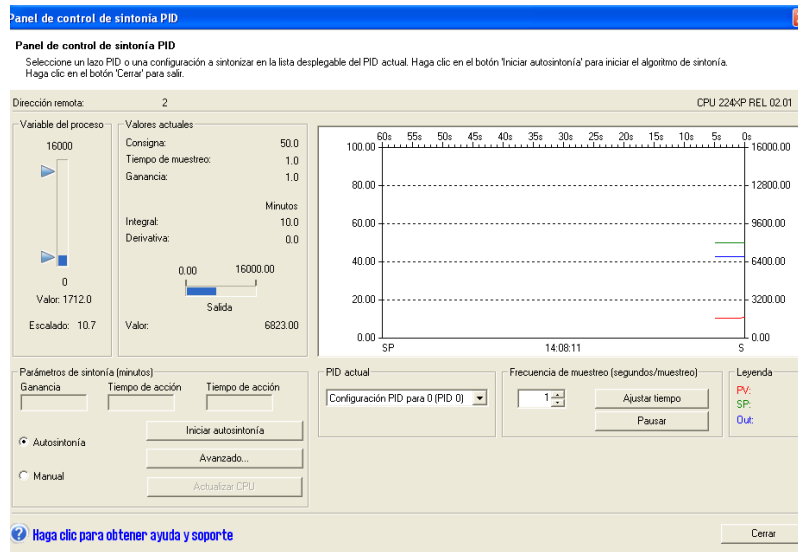


Figura 3.17 Pantalla de utilización del panel de sintonía

Para la sintonía del controlador se procede a realizar el método de ganancia límite el mismo que se basa en aumentar gradualmente la ganancia con los ajustes de integral y derivativa en su valor más bajo, mientras se crean pequeños cambios en el punto de consigna, hasta que el proceso empiece a oscilar de modo continuo.

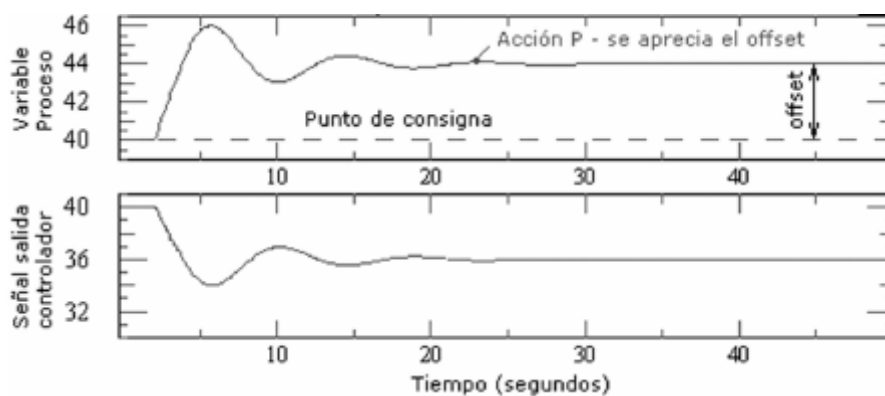


Figura 3.18 Gráfica de la señal de un control Proporcional

3.3.5.2 Medición de potencia implementado los diferentes modos de control.

3.3.5.2.1 Implementación del control Proporcional a la estación de nivel del laboratorio.

Una vez realizada la programación, conexión del proceso y sintonizado el controlador se procede a variar el Set point con entradas tipo escalón, la variación se la realiza en intervalos del 10%, por lo que existen 10 variaciones. Los valores obtenidos se presentan en el capítulo 4 para su análisis.

3.3.5.2.2 Implementación del control Proporcional Integral a la estación de nivel del laboratorio.

La conexión realizada al proceso para la implementación de un control en lazo cerrado se presenta en el diagrama P&ID de la figura 3.2.

A continuación se procede a realizar la programación en el controlador, siendo el controlador un PLC S7-200 CPU 226, al cual se le configura y realiza el escalamiento necesario para realizar el control proporcional integral. Para la implementación del control proporcional integral se procede de la misma manera que para la implementación del control proporcional, ya que en la sintonía se habilita simplemente las acciones proporcional e integral y se deshabilita la acción derivativa.

Para la sintonía del controlador se procede a realizar el método de ganancia límite el mismo que se basa en aumentar gradualmente la ganancia con los ajustes de integral y derivativa en su valor más bajo, mientras se crean pequeños cambios en el punto de consigna, hasta que el proceso empiece a oscilar de modo continuo.

Luego se añade el tiempo integral con ello se elimina el error de estado estable que posee el sistema al trabajar solo con el controlador proporcional, finalmente se realizan cambios en el set point para evaluar la respuesta del proceso.

Una vez realizadas la programación y conexión del proceso y sintonizado el mismo se procede a variar el Set point con entradas tipo escalón, la variación se la realiza en intervalos del 10%, por lo que existen 10 variaciones.

3.3.5.2.3 Implementación del control Proporcional Integral Derivativo a la estación de nivel del laboratorio.

La conexión realizada al proceso para la implementación de un control en lazo cerrado se presenta en el diagrama P&ID de la figura 3.2.

A continuación se procede a realizar la programación en el controlador, siendo el controlador un PLC S7-200 CPU 226, al cual se le configura y realiza el escalamiento necesario para realizar el control proporcional integral derivativo.

Para la implementación del control proporcional integral derivativo se procede de la misma manera que para la implementación del control proporcional.

Para la sintonía del controlador se procede a realizar el método de ganancia límite el mismo que se basa en aumentar gradualmente la ganancia con los ajustes de integral y derivativa en su valor más bajo, mientras se crean pequeños cambios en el punto de consigna, hasta que el proceso empiece a oscilar de modo continuo. Luego se añade el tiempo integral con ello se elimina el error de estado estable que posee el sistema al trabajar solo con el controlador proporcional, después se realiza el ajuste de la acción derivativa siendo un valor recomendado 1/8 del tiempo integral y finalmente se realizan cambios en el set point para evaluar la respuesta del proceso.

Una vez realizadas la programación y conexión del proceso y sintonizado del mismo se procede a variar el Set point con entradas tipo escalón, la variación se la realiza en intervalos del 10%, realizando 10 mediciones.

3.3.6 REGULACIÓN MEDIANTE VARIACIÓN DE FRECUENCIA

De acuerdo a Acedo Sánchez Jorge en el libro Control Avanzado de procesos específica que una de las alternativas para realizar el control de una bomba centrífuga es controlar la velocidad de giro del motor indicando que este tipo de control se utiliza para minimizar el consumo de energía cuando el caudal a bombear disminuye respecto al nominal.

Realizando un análisis del sistema de estrangulamiento utilizando válvula de control produce un aumento en la potencia necesaria, aunque se reduzca el caudal de bombeo.

En el control de la velocidad de giro cuando se disminuye la velocidad de la bomba se reduce el caudal de paso al mismo tiempo se reduce la altura de elevación y como consecuencia el consumo energético, para conseguir esta reducción utilizan los motores eléctricos con reguladores de velocidad.

De acuerdo a la investigación de actuadores utilizados para el control de nivel existe la alternativa de reemplazar la válvula de control proporcional que cumple la función de regular el caudal de la tubería para así tener el control de nivel del sistema, la bomba que se encuentra en la estación posee una velocidad constante por lo que se puede realizar el control automático de nivel utilizando un variador de frecuencia para regular la velocidad de bomba con lo que se disminuye el caudal de impulsión, con ello realizar la misma función que es el control del nivel de un tanque con menor consumo energético.

La alternativa es utilizar un variador de velocidad para la bomba centrífuga y realizar las pruebas del control automático de nivel utilizando los tres controles implementados en el anterior sistema.

3.3.6.1 Componentes utilizados en el sistema propuesto:

1. Transmisor de nivel tipo radar. Capta la variable del proceso y la transmite a largas distancias en forma de señal eléctrica de corriente de 4mA-20mA.

2. Controlador lógico programable. Compara la variable medida con la de referencia o deseada para determinar el error y estabiliza el funcionamiento dinámico del lazo o bucle de control para reducir o eliminar el error.

3. Bomba centrífuga. Las bombas son los elementos que aportan energía para vencer las pérdidas de carga y la diferencia de alturas entre dos puntos. Fuerzan al fluido a circular en un determinado sentido.

4. Variador de velocidad. Pueden reducir significativamente el consumo de energía de motores múltiples en una fábrica, reduciendo el costo de la energía, con los motores eléctricos, la fuerza impulsora está detrás de la mejora de la producción, por lo que la mejora del control del rendimiento del motor y la eficiencia del motor se traduce en una mayor eficiencia en la producción global.

3.3.6.2 Diagrama de de tuberías e instrumentación del sistema propuesto.

A continuación se presenta el diseño del diagrama de tuberías e instrumentación del sistema de nivel propuesta en miras de lograr un menor consumo energético.

según lo demande el proceso, con lo que los puntos de operación del sistema también varían, haciendo que la potencia consumida por el sistema cambie.

3.3.6.3 Medición de la potencia utilizando como elemento de control final el sistema variador-bomba centrífuga.

Para evaluar el consumo energético de la estación de nivel se procedió a conectar el analizador de red como se muestra en la figura 3.5, a continuación se utilizó un generador de voltaje DC de 0 a 10V, el mismo que es conectado al variador para que en relación a la tensión introducida se varié la frecuencia con ello la velocidad del motor-bomba y obtener el mismo fin de regulación que es regular el caudal del proceso.

Se realizaron varias mediciones del funcionamiento del variador de frecuencia como regulador de caudal, las cuales se presentaran en el capítulo 4 para su discusión.

3.3.7 Medición de potencia implementando los diferentes modos de control, utilizando como elementos de control final el sistema variador-bomba centrífuga.

3.3.7.1 Implementación del control proporcional.

Para la implementación del control proporcional es necesario realizar las conexiones eléctricas como se presenta en la figura 3.20.

Para realizar la programación en el controlador se procede de la misma manera que en la sección 3.3.5.1, lo que va a variar son las constantes de sintonía de los diferentes controles.

Para la sintonía del controlador se procede a realizar el método de ganancia límite el mismo que se basa en aumentar gradualmente la ganancia con los ajustes de

integral y derivativa en su valor más bajo, mientras se crean pequeños cambios en el punto de consigna, hasta que el proceso empiece a oscilar de modo continuo.

3.3.7.2 Mediciones realizadas implementando los diferentes tipos de control

Para realizar las mediciones es necesario utilizar el analizador de red Fluke 1735, la conexión se la realiza como se presenta en la figura 3.5.

Una vez realizadas la programación y conexión del proceso y sintonizado el mismo se procede a variar el Set point con entradas tipo escalón, la variación se la realiza en intervalos del 10%.

3.3.7.2.1 Implementación del control Proporcional a la estación de nivel del laboratorio.

En el capítulo 4 se presenta el consolidado de la potencia total consumida por la estación de nivel conectada a una red bifásica, realizando una práctica típica del control automático utilizando el sistema variador-bomba e implementando el modo de control proporcional.

3.3.7.2.2 Implementación del control Proporcional Integral a la estación de nivel del laboratorio.

La conexión realizada al proceso para la implementación de un control en lazo cerrado se presenta en el diagrama P&ID de la figura 3.20

A continuación se procede a realizar la programación en el controlador, siendo el controlador un PLC S7-200 CPU 226, al cual se le configura y realiza el escalamiento necesario para realizar el control proporcional integral.

Para la implementación del control proporcional integral se procede de la misma manera que para la implementación del control proporcional, ya que en la sintonía

se habilita simplemente las acciones proporcional e integral y se deshabilita la acción derivativa.

Para la sintonía del controlador se procede a realizar el método de ganancia límite el mismo que se basa en aumentar gradualmente la ganancia con los ajustes de integral y derivativa en su valor más bajo, mientras se crean pequeños cambios en el punto de consigna, hasta que el proceso empiece a oscilar de modo continuo.

Luego se añade el tiempo integral con ello se elimina el error de estado estable que posee el sistema al trabajar solo con el controlador proporcional, finalmente se realizan cambios en el set point para evaluar la respuesta del proceso.

Una vez realizadas la programación y conexión del proceso y sintonizado el mismo se procede a variar el Set point con entradas tipo escalón, la variación se la realiza en intervalos del 10%.

En el capítulo 4 se detalla el consolidado de la potencia total consumida por la estación de nivel conectada a una red bifásica, realizando una práctica típica del control automático utilizando el sistema variador-bomba e implementando el modo de control proporcional integral.

3.3.7.2.3 Implementación del control Proporcional Integral Derivativo a la estación de nivel del laboratorio.

La conexión realizada al proceso para la implementación de un control en lazo cerrado se presenta en el diagrama P&ID de la figura 3.20

A continuación se procede a realizar la programación en el controlador, siendo el controlador un PLC S7-200 CPU 226, al cual se le configura y realiza el escalamiento necesario para realizar el control proporcional integral derivativo.

Para la implementación del control proporcional integral derivativo se procede de la misma manera que para la implementación del control proporcional.

Para la sintonía del controlador se procede a realizar el método de ganancia límite el mismo que se basa en aumentar gradualmente la ganancia con los ajustes de integral y derivativa en su valor más bajo, mientras se crean pequeños cambios en el punto de consigna, hasta que el proceso empiece a oscilar de modo continuo. Luego se añade el tiempo integral con ello se elimina el error de estado estable que posee el sistema al trabajar solo con el controlador proporcional, después se realiza el ajuste de la acción derivativa siendo un valor recomendado 1/8 del tiempo integral y finalmente se realizan cambios en el set point para evaluar la respuesta del proceso.

Una vez realizadas la programación y conexión del proceso y sintonizado el mismo se procede a variar el Set point con entradas tipo escalón, la variación se la realiza en intervalos del 10%.

En el capítulo 4 se presenta el consolidado de la potencia total consumida por la estación de nivel conectada a una red bifásica, realizando una práctica típica del control automático utilizando el sistema variador-bomba e implementando el modo de control proporcional integral derivativo.

3.3.8 Determinación del Ahorro de Energía

3.3.8.1 Tarifas Ordinarias.

El ahorro de energía se determina multiplicando el ahorro en demanda (kW) por las horas de operación (horas al año).

Ahorro en consumo (kWh)=Ahorro en demanda (kW) x hrs de operación al año
(3.1)

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta el resultado de la investigación desarrollada en el capítulo anterior para la evaluación energética de la Estación de Nivel del Laboratorio de Redes Industriales y Control de Proceso de la ESPE extensión Latacunga. Se muestra también el análisis económico derivado de la instalación de un variador de frecuencia accionamiento para el control de flujo y de ahorro de energía.

4.1 Datos obtenidos de la potencia de la estación de procesos mediante regulación por control de válvula.

Las mediciones realizadas en la estación de Nivel, generando corriente (4mA-14mA) insertada en el conversor de corriente a presión para evaluar el porcentaje de apertura-cierre de la válvula de control y obtener los niveles de caudal generados por el estrangulamiento de la misma se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Valores obtenidos de las mediciones realizadas en la estación de nivel insertando corrientes de excitación para regular el estrangulamiento de la válvula.

Corriente de excitación (mA)	Caudal m ³ /h	Potencia total (W)
4	2,6	1778,20
5	2,5	1769,91
6	2,4	1755,41
7	2,3	1761,62
8	2,2	1740,90
9	2,0	1703,59
10	1,6	1624,84
11	1,3	1585,46
12	0,9	1533,65
13	0,7	1502,56
14	0,5	1467,33
Promedio de Potencia		1656,68

Análisis: De acuerdo a los datos presentados en la tabla 4.1 la regulación del caudal utilizando la válvula de control no disminuye de forma significativa la demanda de potencia, esto debido a que la bomba centrífuga trabaja a velocidad constante y lo que se realiza es el estrangulamiento en la línea de paso con la válvula proporcional, obteniéndose un valor promedio de potencia de 1656W.

En el anexo 1 se presentan las mediciones realizadas para la obtención de los valores de la tabla 4.1.

4.2 Datos obtenidos de la potencia de la estación de procesos mediante regulación por el sistema variador-bomba centrífuga.

Las mediciones realizadas en la estación de Nivel, generando voltaje de 0V-7V introducido en el variador de frecuencia para evaluar el porcentaje de regulación de velocidad del motor-bomba y obtener los niveles de caudal generados por la regulación de la misma, son mostradas en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Valores obtenidos de las mediciones realizadas en la estación de nivel insertando voltaje de excitación para regular el caudal del sistema.

Voltaje (V)	Caudal m³/h	Potencia total (W)
2,00	0,6	717,08
2,50	0,9	768,90
3,00	1,2	837,29
3,50	1,4	926,41
4,00	1,7	1044,54
4,50	2	1197,91
5,00	2,2	1380,29
5,50	2,4	1612,41
6,00	2,6	1852,82
6,50	2,9	2167,84
7,00	3,2	2520,16
Promedio de Potencia		1365,97

Análisis: De acuerdo a los datos presentados en la tabla 4.2 la regulación del caudal utilizando el sistema variador-bomba centrífuga disminuye de forma significativa la demanda de potencia, esto debido a que la bomba centrífuga trabaja a velocidad variable y lo que se realiza es la regulación de la velocidad del motor y de la impulsión de la bomba generando a la salida caudal variable, obteniendo un valor promedio de potencia de 1365W.

En el anexo 2 se presentan las mediciones realizadas para la obtención de los valores de la tabla 4.2.

4.3 Demanda de potencia mediante regulación de caudal por válvula de control vs regulación de caudal por variador de frecuencia.

Para realizar el análisis de la demanda de potencia de los dos tipos de actuadores se procedió a seleccionar un rango de valores de caudal similares utilizando los dos accionamientos.

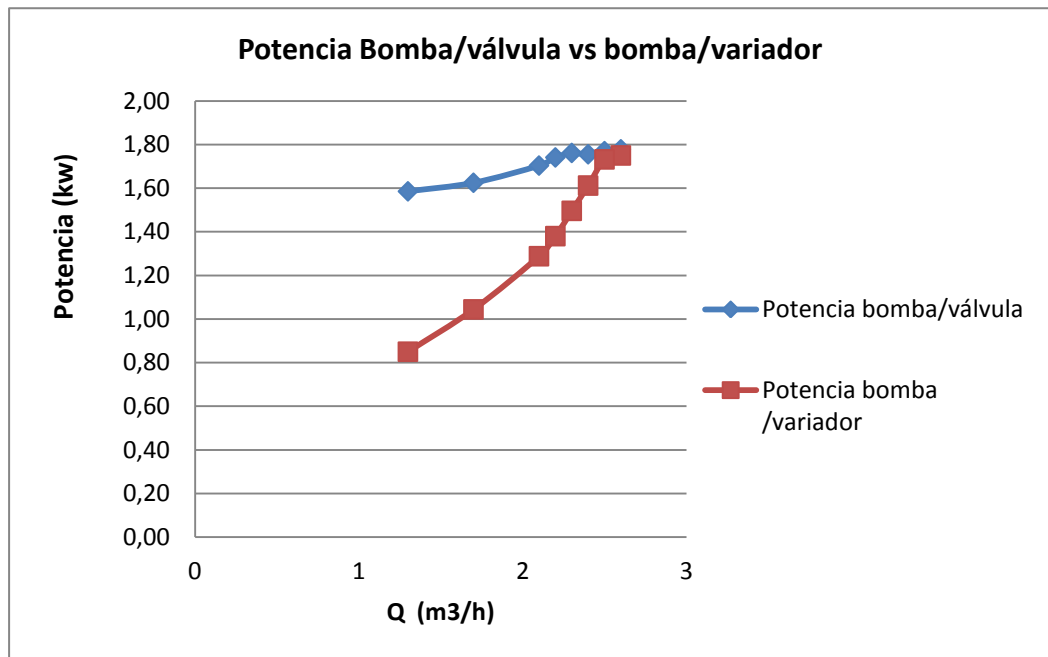
Tabla 4.3 Comparación de la demanda de potencia utilizando regulación por válvula y regulación por variador.

Caudal (m³/h)	Potencia bomba/válvula (kW)	Potencia bomba variador (kW)
2,6	1,78	1,75
2,5	1,77	1,73
2,4	1,76	1,61
2,3	1,76	1,50
2,2	1,74	1,38
2,1	1,70	1,29
1,7	1,62	1,04
1,3	1,59	0,85
Total	13,72	11,25
Promedio	1,71	1,41

Análisis: En la tabla 4.3 se presenta el valor del promedio de potencia consumida por cada accionamiento para proporcionar el mismo caudal de salida, el accionamiento válvula de control no presenta una gran disminución de potencia a

medida que disminuye el caudal esto debido a que la bomba está trabajando a velocidad constante, mientras que con el variador de velocidad existe una gran disminución a medida que se disminuye el mismo caudal de salida.

A continuación se presenta la gráfica de comparación de la potencia consumida por los dos accionamientos.



Gráfica 4.1 Comparación de la demanda de potencia al mismo caudal de regulación por válvula vs variador de frecuencia

4.4 Simulación de un sistema variador de frecuencia-motor trifásico de 3Hp.

Utilizando el software Matlab y simulink se realizó la simulación del proceso, para obtener una relación entre la simulación y la implementación real del sistema.

A continuación se presenta la simulación del variador motor en lazo cerrado implementando el control PI (proporcional integral).

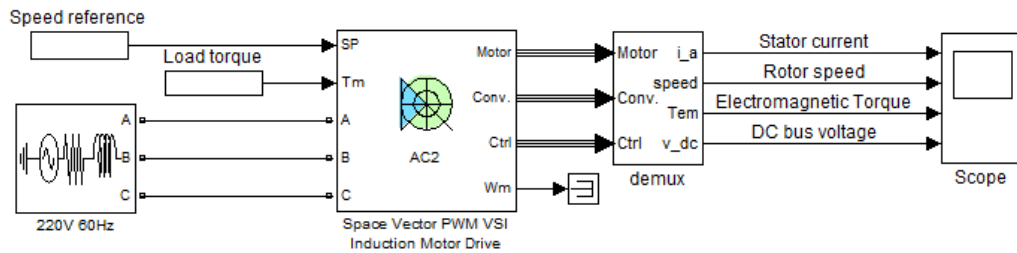


Figura 4.1 Diagrama estructural del sistema variador bomba

Análisis: Se realiza la simulación de un sistema variador motor de 3Hp, el control simulado es en lazo cerrado sintonizado con un controlador Proporcional integral que es equivalente al sistema propuesto (variador-bomba centrífuga), el control de velocidad que simula el variador es del tipo vectorial similar al control que poseen los variadores de velocidad en el mercado, al realizar esta simulación con el modelo matemático del variador-motor, se va a determinar la respuesta del sistema ante perturbaciones para el sistema realizado.

Las perturbaciones se las realizan introduciendo torque electromagnético, asociado al sistema motor variador bomba esto equivale a un perturbación realizada con una válvula manual.

Para este ensayo en el sistema presente en la figura 4.1 se introducen perturbaciones como se detalla a continuación:

Tiempo (s)	Torque
0	0
1	5
2	-5

Se realizo la prueba de estabilidad del sistema para diferentes set points (velocidad angular) mostrados a continuación.

Tiempo(s)	Velocidad angular(RPM)
0	1000
1	2000

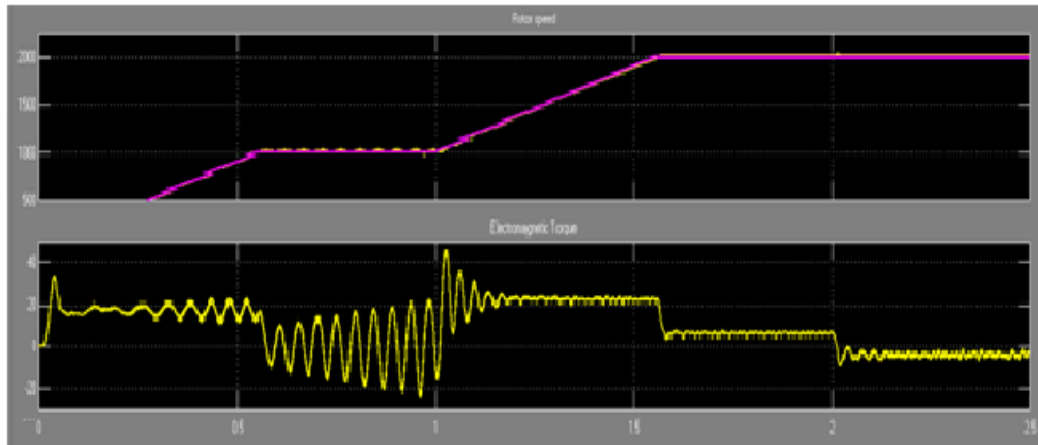


Figura 4.2 Señales de velocidad del rotor y torque electromagnético inducido al sistema.

De acuerdo a la figura 4.2 en el primer segundo en el sistema no existe torque y la velocidad del motor se encuentra trabajando de forma estable, en el segundo instante se produce un torque de magnitud 5 ante el cual el control responde de forma rápida y se estabiliza en 1 segundo, posterior a ello se genera un torque de -5 ante el cual el control responde de forma eficiente ante dicha perturbación, también existe la introducción de una señal de tipo escalón ante este cambio en el set-point, el sistema se estabiliza en un segundo.

El control utilizando variador de frecuencia-control vectorial y Proporcional integral es un control eficiente, ya que fue evaluado introduciéndose carga al sistema y visualizando su estabilidad en cortos periodos de tiempo, por lo dicho anteriormente es factible realizar el control de nivel implementando el variador de velocidad ya que las perturbaciones que se introducirían en este proceso son variaciones en el caudal a causa de la apertura o cierre parcial de válvulas manuales que posee la estación con el fin de perturbar el sistema.

4.5 Datos obtenidos de la potencia de la estación de procesos utilizando válvula de control vs variador de frecuencia, implementado los diferentes modos de control.

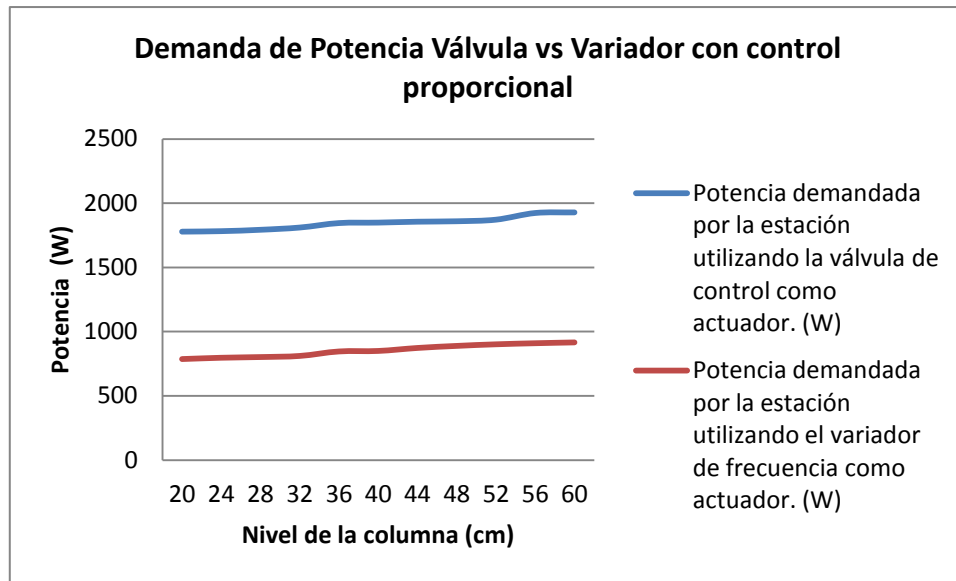
Las mediciones que se realizaron en la estación de procesos utilizando como actuador la válvula de control se van a comparar con las mediciones que se realizaron en la estación de procesos utilizando como actuador el sistema variador de frecuencia-bomba y se presentaran las tendencias del consumo energético, en los tres modos de control implementados.

4.5.1 Datos obtenidos de la potencia de la estación de procesos utilizando válvula de control vs variador de frecuencia, implementado el modo de control proporcional.

A continuación se presenta una tabla de la potencia consumida por la estación de procesos con dos tipos de actuadores la válvula proporcional vs variador de frecuencia y utilizando el modo de control proporcional

Tabla 4.4 Datos de las mediciones realizadas en la estación de nivel con los accionamientos válvula de control y variador de frecuencia e implementado el modo de control proporcional

Fecha de medición	Nivel de la columna (cm)	Potencia consumida por la estación utilizando la válvula de control como actuador. (W)	Potencia consumida por la estación utilizando el variador de frecuencia como actuador. (W)
01/09/2013	20	1778,21	787,55
01/09/2013	24	1781,92	797,72
01/09/2013	28	1792,62	803,16
01/09/2013	32	1810,04	811,82
01/09/2013	36	1844,81	846,83
01/09/2013	40	1848,51	850,77
01/09/2013	44	1855,62	873,96
01/09/2013	48	1858,86	890,10
01/09/2013	52	1871,28	902,52
01/09/2013	56	1923,03	910,80
01/09/2013	60	1927,64	917,24
Promedio de potencia		1844,78	853,86



Grafica 4.2 Demanda de potencia de la estación de procesos utilizando válvula de control vs variador de velocidad e implementando el modo de control proporcional.

Análisis: Se desarrollo la práctica del control automático de nivel del tanque de procesos utilizando el modo de control proporcional, y se determinó el consumo de energía de la estación generando la misma funcionalidad con los dos tipos de accionamientos utilizados, que es el controlar el proceso en mención y se evalúa el consumo de energía de cada sistema.

El primer sistema consiste en controlar el caudal de circulación para el llenado del tanque con una válvula proporcional que dio como promedio de consumo 1844,78 W.

La estación de procesos industriales es utilizada por 6 horas diarias, 5 días a la semana, dando un total de aproximadamente 261 días al año de trabajo con un valor total de 1564,3 horas

Entonces la energía consumida al año es de: 2885,79 kWh

El segundo sistema consiste en controlar el caudal de circulación para el llenado del tanque con un variador de frecuencia y una bomba centrífuga que dio como promedio de consumo 853,86 W.

La estación de procesos industriales es utilizada por 6 horas diarias, 5 días a la semana, dando un total de aproximadamente 261 días al año de trabajo con un valor total de 1564,3 horas

Entonces la energía consumida al año es de: 1335,7 kWh

De la evaluación del consumo energético de la estación de nivel utilizando los dos tipos de accionamientos, se determinó que con ellos se logra desarrollar el mismo fin que es el control automático del nivel. Al utilizar el sistema variador-bomba se generaría un ahorro anual de energía de:

Ahorro de energía= Consumo de energía de la válvula (2885,79 kWh) – Consumo de energía del variador de frecuencia (1335,7 kWh)

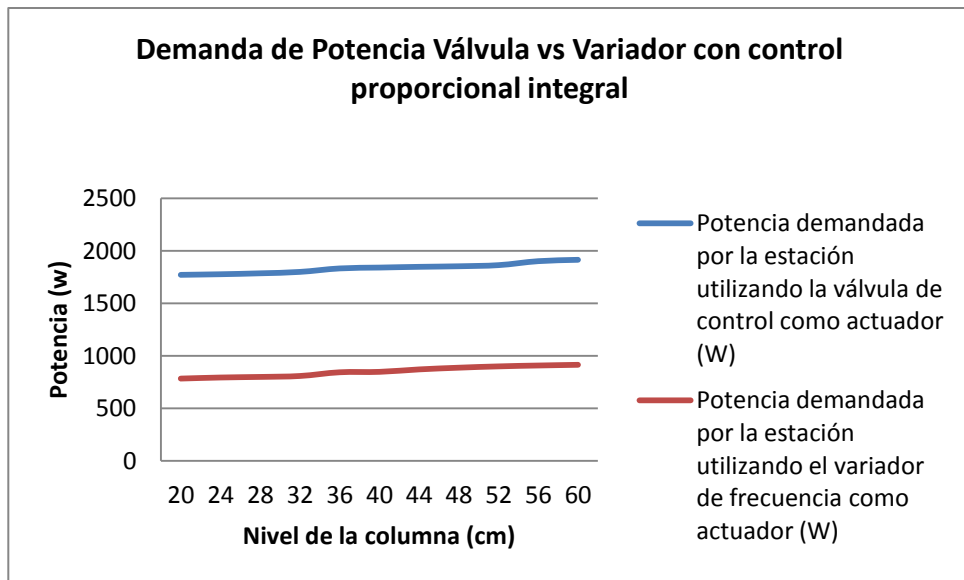
Ahorro de energía anual= 1550,1kWh

4.5.2 Datos obtenidos de la potencia de la estación de procesos utilizando válvula de control vs variador de frecuencia, implementado el modo de control proporcional integral

A continuación se presenta la tabla 4.5 de la potencia consumida por la estación de procesos con dos tipos de actuadores la válvula proporcional vs variador de frecuencia y utilizando el modo de control proporcional integral.

Tabla 4.5 Datos de las mediciones realizadas en la estación de nivel con los accionamientos válvula de control y variador de frecuencia e implementado el modo de control proporcional integral

Fecha de medición	Nivel de la columna (cm)	Potencia demandada por la estación utilizando la válvula de control como actuador (W)	Potencia demandada por la estación utilizando el variador de frecuencia como actuador (W)
10/09/2013	20	1771,99	783,41
10/09/2013	24	1777,78	793,58
10/09/2013	28	1786,41	799,02
10/09/2013	32	1799,69	807,68
10/09/2013	36	1832,39	842,69
10/09/2013	40	1840,23	846,63
10/09/2013	44	1847,33	869,82
10/09/2013	48	1852,65	885,96
10/09/2013	52	1863,00	898,38
10/09/2013	56	1900,26	906,66
10/09/2013	60	1913,15	913,10
Promedio de la Potencia demandada		1834,99	849,72



Grafica 4.3 Demanda de potencia de la estación de procesos utilizando válvula de control vs variador de velocidad e implementando el modo de control proporcional integral.

Análisis: Se desarrollo la práctica del control automático de nivel del tanque de procesos utilizando el modo de control proporcional integral, y se determinó el consumo de energía de la estación generando la misma funcionalidad con los dos tipos de accionamientos utilizados, que es el controlar el proceso en mención y se evalúa el consumo de energía de cada sistema.

El primer sistema consiste en controlar el caudal de circulación para el llenado del tanque con una válvula proporcional que dio como promedio de consumo 1834,99 W.

La estación de procesos industriales es utilizada por 6 horas diarias, 5 días a la semana, dando un total de aproximadamente 261 días al año de trabajo con un valor total de 1564,3 horas

Entonces la energía consumida al año es de: 2870,47 kWh

El segundo sistema consiste en controlar el caudal de circulación para el llenado del tanque con un variador de frecuencia y una bomba centrífuga que da como promedio de consumo 849,72 W.

La estación de procesos industriales es utilizada por 6 horas diarias, 5 días a la semana, dando un total de aproximadamente 261 días al año de trabajo con un valor total de 1564,3 horas

Entonces la energía consumida al año es de: 1329,21 kWh

De la evaluación del consumo energético de la estación de nivel utilizando los dos tipos de accionamientos, se determino que con ellos se logra desarrollar el mismo fin que es el control automático del nivel. Al utilizar el sistema variador-bomba se generaría un ahorro anual de energía de:

Ahorro de energía= Consumo de energía de la válvula (2870,47 kWh) – Consumo de energía del variador de frecuencia (1329,21 kWh)

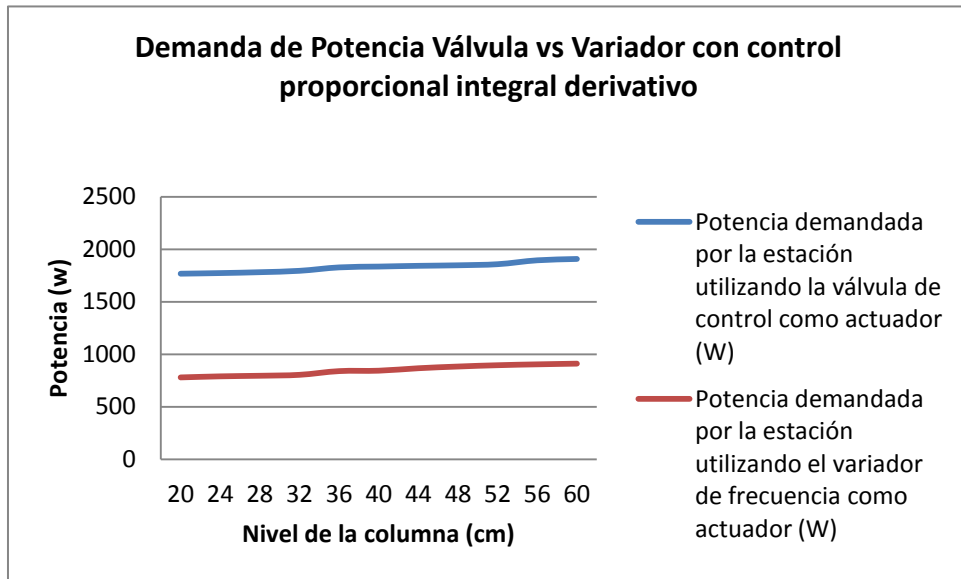
Ahorro de energía anual = 1541.26kWh

4.5.3 Datos obtenidos de la potencia de la estación de procesos utilizando válvula de control vs variador de frecuencia, implementado el modo de control proporcional integral derivativo

A continuación se presenta una tabla de la potencia consumida por la estación de procesos con dos tipos de actuadores la válvula proporcional vs variador de frecuencia y utilizando el modo de control proporcional integral derivativo

Tabla 4.6 Datos de las mediciones realizadas en la estación de nivel con los accionamientos válvula de control y variador de frecuencia e implementado el modo de control proporcional integral derivativo

Fecha de medición	Nivel de la columna (cm)	Potencia demandada por la estación utilizando la válvula de control como actuador (W)	Potencia demandada por la estación utilizando el variador de frecuencia como actuador (W)
16/09/2013	20	1767,85	779,26
16/09/2013	24	1773,63	789,43
16/09/2013	28	1782,27	794,88
16/09/2013	32	1795,55	803,54
16/09/2013	36	1828,25	838,55
16/09/2013	40	1836,09	842,49
16/09/2013	44	1843,19	865,68
16/09/2013	48	1848,51	881,82
16/09/2013	52	1858,86	894,24
16/09/2013	56	1896,12	902,52
16/09/2013	60	1909,00	908,95
	Promedio	1830,85	845,58



Grafica 4.4 Demanda de potencia de la estación de procesos utilizando válvula de control vs variador de velocidad e implementando el modo de control proporcional integral derivativo

Análisis: Se desarrollo el ensayo del control automático de nivel del tanque de procesos utilizando el modo de control proporcional integral derivativo, y se determinó el consumo de energía de la estación generando la misma funcionalidad con los dos tipos de accionamientos utilizados, que es el controlar el proceso en mención y se evalúa el consumo de potencia de cada sistema.

El primer sistema consiste en controlar el caudal de circulación para el llenado del tanque con una válvula proporcional que dio como promedio de consumo 1830,85 W.

La estación de procesos industriales es utilizada por 6 horas diarias, 5 días a la semana, dando un total de aproximadamente 261 días al año de trabajo con un valor total de 1564,3 horas

Entonces la energía consumida al año es de: 2863,99 kWh

El segundo sistema consiste en controlar el caudal de circulación para el llenado del tanque con un variador de frecuencia y una bomba centrífuga que dio como promedio de consumo 845,58W

La estación de procesos industriales es utilizada por 6 horas diarias, 5 días a la semana, dando un total de aproximadamente 261 días al año de trabajo con un valor total de 1564,3 horas

Entonces la energía consumida al año es de: 1322,74 kWh

De la evaluación del consumo energético de la estación de nivel utilizando los dos tipos de accionamientos, se determino que con ellos se logra desarrollar el mismo fin que es el control automático del nivel. Al utilizar el sistema variador-bomba se generaría un ahorro anual de energía de:

Ahorro de energía= Consumo de energía de la válvula (2863,9 kWh) – Consumo de energía del variador de frecuencia (1322,74 kWh)

Ahorro de energía anual= 1541.26 kWh

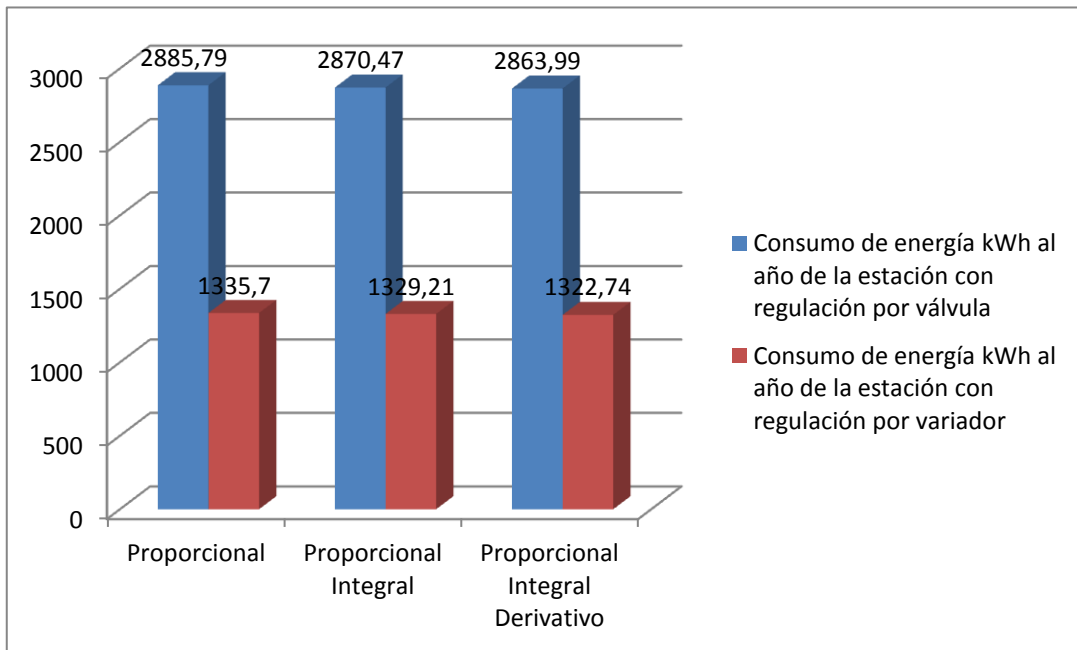
4.5.4 Análisis de los datos obtenidos de energía consumida por la estación de procesos utilizando válvula de control vs variador de frecuencia, implementado los diferentes modos de control.

Al implementar los diferentes modos de control en la estación de nivel se puede evaluar el consumo energético anual que se obtendría al realizar continuas prácticas en el laboratorio pero utilizando como accionamiento un variador de frecuencia, el cuál brinda las mismas prestaciones que la válvula en cuanto al sistema didáctico que se maneja.

La tabla 4.7 Muestra la energía consumida por la estación utilizando válvula de control vs variador de frecuencia, implementado los diferentes modos de control.

Tabla 4.7 Energía anual consumida por la estación de nivel con los diferentes modos de control utilizando válvula de control vs variador de frecuencia

Modo de control	Consumo de energía kWh al año de la estación con regulación por válvula	Consumo de energía kWh al año de la estación con regulación por variador
Proporcional	2885,79	1335,7
Proporcional Integral	2870,47	1329,21
Proporcional Integral Derivativo	2863,99	1322,74
Promedio de la energía consumida	2873,42	1329,22



Gráfica 4.5 Energía anual consumida por la estación de nivel con los diferentes modos de control utilizando válvula de control vs variador de frecuencia

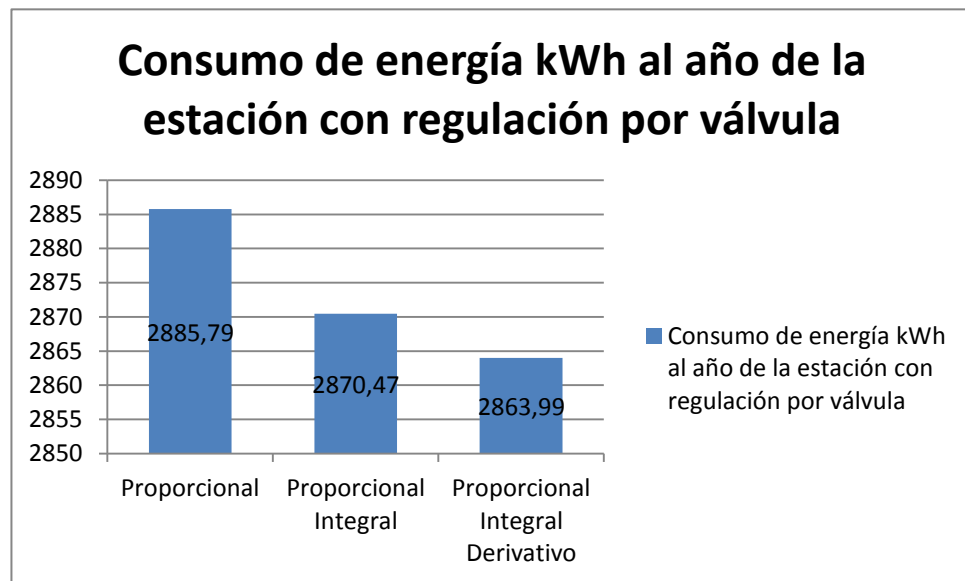
El promedio de la energía consumida por los tres controles utilizando la válvula de control es de 2873,42W y para la regulación por variador de frecuencia es de 1329,22 W, lo que genera un ahorro de consumo de energía de:

$$\text{Ahorro de energía anual} = 2873,42\text{W} - 1329,22 \text{ W} = 1544,20 \text{ kWh}$$

4.5.5 Análisis de la energía consumida por la estación de procesos utilizando válvula con cada uno de los modos de control.

La estación de nivel se utiliza como medio didáctico por lo que conlleva que trabaje frecuentemente implementando los diferentes modos de control es por ello que se analizará el consumo de cada uno de los modos de control implementados usando la válvula proporcional.

En base a la tabla 4.7 se puede relacionar el consumo de energía anual de cada control aplicado a la estación de procesos lo cual se observa en la grafica 4.6 donde se muestra que el de consumo energético anual entre los controles no es significativo. Todo ello debido a que la altura del tanque es pequeña por ser una estación didáctica.



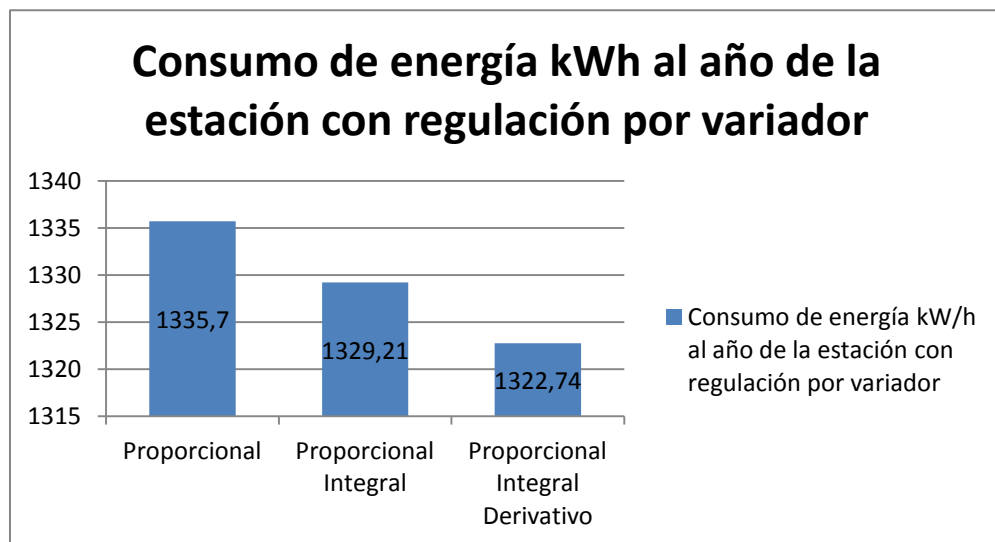
Grafica 4.6 Consumo de energía de la estación de nivel con cada modo de control aplicado.

4.5.6 Análisis de la energía consumida por la estación de procesos utilizando variador de frecuencia con cada uno de los modos de control.

Implementado los diferentes modos de control en la estación de nivel se ha establecido anteriormente que el mayor ahorro de energía anual se obtiene utilizando un variador de frecuencia.

Si se analiza el consumo energético en base a la tabla 4.7, por cada modo de control implementado en la estación de Nivel se observa en la gráfica 4.7, que el consumo de energía anual implementando los diferentes tipos de control, no existe gran diferencia de consumo entre ellos.

Con fines didácticos entonces la estación de procesos representa mayor consumo de energía utilizando como regulación una válvula proporcional, mas no por el modo de control que se utiliza.



Gráfica 4.7 Consumo de energía de la estación de nivel con cada modo de control aplicado.

CAPITULO V

LA PROPUESTA

5.1 Título de la propuesta

Implementación del sistema variador-bomba para el control automático de la estación de nivel en el Laboratorio de Redes Industriales y control de procesos.

5.2 Objetivo de la propuesta

Reducir el consumo de energía eléctrica en la estación de procesos industriales con fines didácticos y de investigación.

5.3 Justificación de la propuesta

Es necesario una propuesta de un Sistema control de la estación de nivel que disminuya el consumo de energía eléctrica para el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos, la estación de procesos tendrá las siguientes características:

- El control del proceso se lo desarrollara de forma similar al sistema inicial ya que la estación permite variar el caudal para controlar el nivel del tanque.
- Permitirá realizar los tipos de control proporcional, proporcional integral, proporcional integral derivativo, que es la parte principal de la estación de procesos.
- Por contar con un PLC es posible implementar nuevos modos de control con el sistema fuzzy logic.
- Permitirá realizar el control manual del tanque ya que el variador de velocidad tiene la opción de regulación analógica mediante un potenciómetro.

- Incorporar el régimen de flujo por variador para la evaluación con relación a las otras técnicas de control de flujo ya existentes en la estación de nivel.

5.4 Estructura de la propuesta

A la estación de nivel regulada actualmente con una válvula proporcional se le incorpora el variador de frecuencia para el control automático de la estación de nivel en el Laboratorio de Redes industriales y control de procesos.

5.5 Análisis de la propuesta

Para que esta propuesta se concrete es necesario contar con los siguientes recursos:

A. Recurso Material

Tabla 5.1 Desglose de los costos fijos para la implementación del sistema variador-bomba para el control automático de la estación de nivel

Cant.	Detalle	Costo \$
1	Variador micromaster 440 1Hp	300
1	Panel de programación	30
1	Cables para conexión	10
	TOTAL	340

B. Recurso Humano

Se considera la mano de obra necesaria para la implementación del variador de frecuencia en la estación de nivel.

Cant.	Detalle	Costo \$
1	Técnico electrónico	30 valor/día
		30

5.6 Evaluación socio-económico-ambiental de la propuesta

La evaluación socioeconómica de un proyecto tiene como propósito conocer la probabilidad de que un proyecto propuesto contribuya en grado significativo al desarrollo de la economía en su conjunto y de que su contribución sea lo bastante grande como para justificar la utilización de los escasos recursos que se necesiten.

El punto de vista que se adopta en el análisis económico es el de la sociedad como un todo.

5.6.1 Social. Al implementar en la estación de nivel un variador de frecuencia el estudiante es beneficiado ya que tecnológicamente está utilizando equipos más eficientes, los cuales permiten de una forma más amigable realizar el control del proceso en miras de dar de forma práctica los métodos de sintonía de los controladores.

Con los elementos incorporados se crean facilidades para el uso del puesto de trabajo como maqueta de investigación.

5.6.2 Económica. Con la implementación del variador de frecuencia se reduce el consumo de energía eléctrica 1332,16 KW/h al año, en la actualidad la empresa que proporciona la energía eléctrica tarifa por \$ 0,09 por KW/h, dando con ello una reducción anual de \$ 120.

5.6.3 Ambiental. Con la implementación del variador de frecuencia se reduce la emisión de CO₂, este cálculo se puede obtener gracias al software gratuito encontrado en la red, como se presenta en la siguiente figura.

Energy kWh	Electricity mix	CO ₂ grammes/kWh	CO ₂ kg Emissions	CO ₂ lb	TOE ton oil equivalent
Cálculo de CO2 para producir electricidad en kWh					
1332		500	666.00 kg	1468.28 lb	0.114531 ton
Las emisiones de CO2 por kWh de electricidad y calor					
1332	Ecuador	388.559	517.56 kg	1141.02 lb	0.114531 ton
Las emisiones de CO2, la comparación entre diferentes fuentes de energía					
1000	Other bituminous coal	840	840.00 kg	1851.88 lb	0.085985 ton

Figura 5.1 Software que permite calcular el nivel de CO2 por KW/h

Con la implementación del proyecto se evitaría generar 517.56 Kg de CO2 de emisión al medio ambiente.

5.7 Resultados de la valoración económica de la propuesta de un Sistema de Monitoreo y control.

Las técnicas de valor descontado son diversas, aunque todas ellas, se basan en el descuento al valor presente de las cantidades futuras o flujos de caja. Los flujos de caja son la diferencia neta entre los beneficios y costos en cada uno de los años, refleja el dinero real en caja. Para su determinación se toma como convenio que las entradas a caja (ingresos) son positivas, y las salidas (gastos) son negativas, lo cual quiere decir que los signos de los flujos de caja resultan del balance anual entre costos y beneficios.

5.7.1 Cálculo del VAN

Es un método de evaluación de proyectos de inversión que consiste en determinar el valor presente de los flujos de fondos del negocio, usando la tasa de descuento acorde al rendimiento mínimo esperado.

La fórmula que permite calcular el VAN (Valor Actual Neto) es la siguiente:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0 \quad (5.1)$$

Donde:

VAN=Valor Actual Neto

Vt: Representa los flujos de caja en cada periodo t.

I₀: Valor del desembolso inicial de la inversión.

n: Número de períodos considerado

k: Tipo de interés

Para el cálculo del VAN se utilizan los siguientes datos:

Inversión: \$ 370

Número de años: 4

Tiempo de vida útil del equipo: 10 años

Interés: 0.09

$$VAN = \sum_{T=1}^4 -370 + \frac{120}{(1+0,09)} + \frac{120}{(1+0,09)^2} + \frac{120}{(1+0,09)^3} + \frac{120}{(1+0,09)^4}$$

VAN= 18.6

Como el VAN es mayor que 0 la inversión produciría ganancias por encima de la rentabilidad exigida.

La propuesta también se justifica si tenemos en cuenta que la modificación del banco de pruebas permitirá ampliar su uso con fines docentes - investigativo, lo que constituye una disminución en las inversiones que tendría que hacer la universidad para adquirir un banco de prueba con características similares, por ejemplo el Banco de Bomba Centrifuga PBCC mostrada en la figura 2.26 tiene un valor de \$25000.

La propuesta analizada se puede llevar a miras de una industria, donde los beneficios en término de consumo de energía y eficiencia energética serian mayores al tener que controlar motores de mayor potencia. En estos casos sin dudas se alcanzaría un mayor VAN.

CONCLUSIONES:

- En la recopilación bibliográfica realizada sobre el control de nivel, se determinó que el sistema variador bomba es el más eficiente, ya que para la regulación de caudal disminuye la altura y la potencia de demanda, mientras que con válvula la regulación continua la misma demanda (cercana al valor nominal) de potencia independientemente del caudal requerido.
- Se evaluó la Eficiencia Energética de la estación de nivel, obteniéndose el índice de $1,25(\text{m}^3/\text{h})/\text{KW}$ para el control con la válvula y $1,52(\text{m}^3/\text{h})/\text{KW}$ en el caso del control con el variador de velocidad, resultando este último el que tiene una menor demanda de consumo eléctrico. Al utilizar el variador de frecuencia en reemplazo de la válvula proporcional se obtiene un ahorro de energía eléctrica promedio anual de $1329,22\text{KW/h}$ lo que pone en manifiesto la factibilidad del uso de este tipo de control.
- Se determinó el consumo energético de la estación utilizando los tres tipos de controles como son: Proporcional (P), Proporcional integral (PI), Proporcional integral derivativo (PID), estableciendo que para la estación de proceso la implementación de estos modos de control no genera variación de consumo de energía entre ellos, debido a que es una estación de uso didáctico, no siendo el caso para la aplicación de estos modos de control en la industria donde sí existiría una gran variación de consumo energético en la implementación de estos controles cuando se trata de potencias mayores.
- Al implementar un variador de frecuencia a la estación de Nivel se generan mejores prestaciones en cuanto a la didáctica de la estación de procesos y amplía su utilización con fines de investigación.

- Con la obtención del modelo matemático de la estación de nivel se pudo comparar la funcionalidad de forma física y simulada, obteniendo una similitud entre la simulación y los ensayos realizados, que pueden ser usadas para el ajuste de los controladores.

RECOMENDACIONES:

- Evaluar la sustitución del motor para lograr un redimensionamiento del mismo en función del accionamiento, para obtener un mayor ahorro de energía.
- Incorporar manómetros a la entrada y a la salida de la bomba centrífuga, para poder obtener las curvas de la bomba y del sistema, en miras de determinar el punto de operación e identificación del sistema.
- Implementar el modo de control Fuzzy Logic al sistema propuesto, ya que el PLC al ser reprogramable permite desarrollar otros algoritmos de control, en función de realizar la comparación de consumo de energía del control PID vs el control Fuzzy Logic.

BIBLIOGRAFIA

1. Acedo J., Control Avanzado de Procesos, Díaz de Santos , Madrid-España, 2003.
2. Acedo J., Control Básico de Procesos, Madrid-España, Díaz de Santos, 2006.
3. Aracayo J., Eficiencia Energética En Sistemas de Bombeo de La Entidad Prestadora de Servicio y Saneamiento de Sedajuliaca , Tesis de Ingeniería, Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez, Facultad de Ingenierías y Ciencias puras, Juliaca-Perú, 2011.
4. Blanco E. & Belarde S., Sistemas de Bombeo, Universidad de Oviedo, Departamento de Energía, Gijón-España, 1994.
5. Creus A., Instrumentación Industrial, Séptima edición, Marcombo, España, 2005.
6. Espinoza D. & Charcopa C., Auditoría energética de la estación de bombeo de esmeraldas del poliducto esmeraldas-quito, Tesis de Ingeniería, Escuela Politécnica del Chimborazo, Facultad de Mecánica Riobamba- Ecuador, 2009.
7. ERION sociedad anónima, Nota de Aplicación Variadores de Velocidad ahorro Energético en Sistemas de bombeo, NA-95, 12,08, 1999. <http://www.erion.com.ar/images/Descargas/Aplicaciones/Hyundai/NA0095BombasAlternativas.pdf>
8. Mantilla I. & Cardona J, Gestión Energética de los motores eléctricos: mejora de la eficiencia de los accionamientos con el uso de variadores de velocidad, Universidad de Cantabria, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética Santander - España, 2010.

9. Ogata K., Ingeniería de Control Moderna, 5ta Edición, Pearson , Madrid-España, 2010.
10. Pinto E., Fundamentos de Control con Matlab, Pearson, Madrid-España, 2010.
11. Salas R., Ahorro De Energía En Bombas Centrífugas Por Medio Del Control De Flujo, Tesis de Ingeniería, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, México 2009.

ANEXOS

ANEXO 1

Mediciones realizadas para Obtener la Potencia con regulación por Válvula

Tabla 1. Valores obtenidos de las mediciones realizadas en la estación de nivel insertando corrientes de excitación para regular el estrangulamiento de la válvula.

Voltaje L1 (V)	Corriente L1 (A)	Potencia L1 (W)	Voltaje L2 (V)	Corriente L2 (A)	Potencia L2 (W)	Potencia total (W)	Corriente de excitación (mA)
207,30	4,28	887,24	207,20	4,30	890,96	1778,20	4
207,30	4,26	883,10	207,20	4,28	886,82	1769,91	5
207,30	4,22	874,81	207,20	4,25	880,60	1755,41	6
207,30	4,24	878,95	207,20	4,26	882,67	1761,62	7
207,30	4,19	868,59	207,20	4,21	872,31	1740,90	8
207,30	4,10	849,93	207,20	4,12	853,66	1703,59	9
207,30	3,91	810,54	207,20	3,93	814,30	1624,84	10
207,30	3,81	789,81	207,20	3,84	795,65	1585,46	11

ANEXO 2

Mediciones realizadas para Obtener la Potencia con regulación por Variador

Tabla 2. Valores obtenidos de las mediciones realizadas en la estación de nivel insertando voltajes de excitación para regular por variador.

Voltaje L1 (V)	Corriente L1 (A)	Potencia L1 (W)	Voltaje L2 (V)	Corriente L2 (A)	Potencia L2 (W)	Potencia total (W)	Voltaje (V)
207,30	1,72	356,56	207,20	1,74	360,53	717,08	2,00
207,30	1,85	383,51	207,20	1,86	385,39	768,90	2,50
207,30	2,01	416,67	207,20	2,03	420,62	837,29	3,00
207,30	2,23	462,28	207,20	2,24	464,13	926,41	3,50
207,30	2,52	522,40	207,20	2,52	522,14	1044,54	4,00
207,30	2,89	599,10	207,20	2,89	598,81	1197,91	4,50
207,30	3,33	690,31	207,20	3,33	689,98	1380,29	5,00
207,30	3,89	806,40	207,20	3,89	806,01	1612,41	5,50

ANEXO 3

Mediciones realizadas utilizando válvula y los diferentes modos de control

Tabla 3. Valores obtenidos de las mediciones realizadas en la estación de nivel utilizando la válvula proporcional

Control proporcional integral

Fecha de medición	Potencia consumida por la estación (W)	Nivel de la columna cm
10/09/2013	1771,99	20
10/09/2013	1777,78	24
10/09/2013	1786,41	28
10/09/2013	1799,69	32
10/09/2013	1832,39	36
10/09/2013	1840,23	40
10/09/2013	1847,33	44
10/09/2013	1852,65	48
10/09/2013	1863,00	52
10/09/2013	1900,26	56
10/09/2013	1913,15	60
Total	20184,874	

ANEXO 4

Características de la bomba



Bomba acoplada em motor monofásico com capacitor ou trifásico de 1/2 cv a 3,0 cv, e também na versão mancalizada. Indicado p/ bombeamento de águas limpas e líquidos quimicamente não agressivo, válidos a 20°C.

Construção:

- Carcaça em ferro fundido GG-20;
- Rotor em alumínio;
- Selo mecânico de cerâmica 5/8" T6, grafite, inox 304, buna N;
- Conexões rosca BSP;
- Montagem "Back-Pull-Out" (não necessita desmontar o encanamento na manutenção);
- Motor elétrico Jet Pump com flange incorporada: II pólos, 60Hz, 3500 rpm, IP-21 para TH-16;
- Motor elétrico Jet Pump: II pólos, 60 hz, 3500 rpm, IP-21 para THA-16.

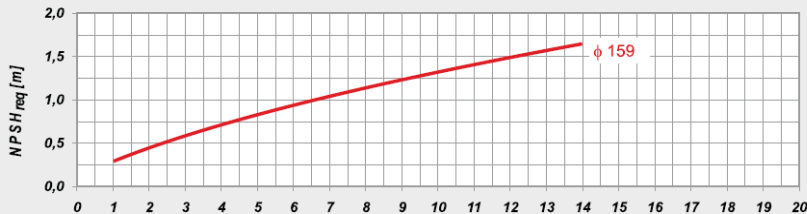
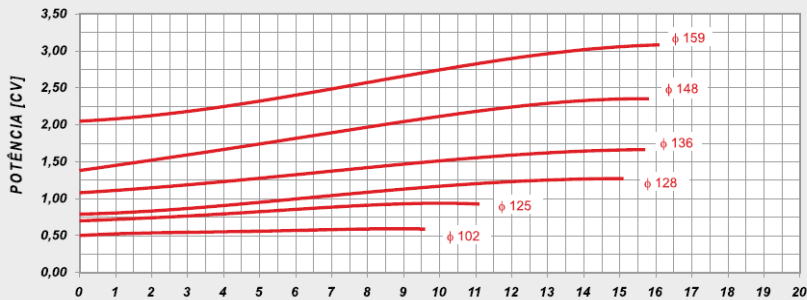
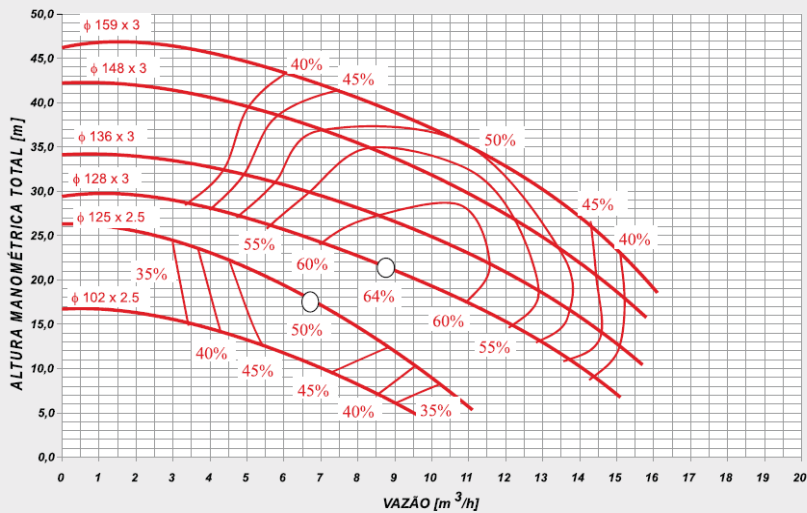
Aplicações:

- Agricultura
- Indústrias
- Residências
- Chácaras
- Prédios
- Construção Civil
- Sistemas de Refrigeração

Opções:

- Rotor em bronze;
- Rotor semi-aberto;
- Bucha de inox ou latão na ponta do eixo;
- Carcaça em bronze para THA-16;
- Sucção e recalque em 1" BSP;
- Motor blindado IP-55 e/ou à prova de explosão para THA-16;
- Kits para motor combustão interna (gasolina 4,0 cv, 3500 rpm).

DIÂMETRO **ROTOR 159/102** mm LARGURA **3/2.5** mm SUÇÃO **1 1/2"** BSP RECALQUE **1"** BSP ROTAÇÃO **3500** rpm ESTÁGIOS Mínimo(1) Máximo (1)



A Bombas com alongamento e intermediário

3500 RPM - 60 Hz

MODELO	CV	ESTÁGIO	SUÇÃO BSP	RECALQUE BSP	ALTURA MANOMÉTRICA TOTAL - EM METROS (M.C.A.)																			ALTURA MANOMÉTRICA MÁXIMA							
					VAZÃO - METROS CÚBICOS POR HORA																										
					5	6	8	10	12	15	17	18	19	20	22	23	24	25	26	28	30	32	34		35	36	38	40	44	45	46
TH-16 AL THA-16	1/2	1	1 1/2"	1"	9.6	9.1	8.1	7.0	5.8	3.6	0																16.7				
	3/4	1	1 1/2"	1"	11.0	10.8	10.3	9.7	9.0	7.9	7.2	6.7	6.3	5.7	4.6	4.0	3.3	2.4	1.0	0							27.0				
	1.0	1	1 1/2"	1"		15.0	14.8	14.0	13.3	12.0	11.2	10.7	10.3	9.7	8.6	8.0	7.4	6.6	6.0	4.1	0						30.0				
	1.5	1	1 1/2"	1"			16.0	15.5	15.0	14.0	13.3	12.9	12.4	12.1	11.2	10.8	10.2	9.6	9.1	7.7	6.0	3.5	0				34.0				
	2.0	1	1 1/2"	1"				16.5	16.0	15.4	15.0	14.7	14.5	14.3	13.8	13.4	13.2	12.9	12.5	11.8	11.1	10.3	9.4	8.6	8.0	6.5	4.0	0	43.0		
	3.0	1	1 1/2"	1"										16.0	15.8	15.3	15.0	14.7	14.4	14.2	13.6	12.9	12.2	11.4	11.0	10.6	9.7	8.5	5.6	4.4	2.0

ANEXO 5

VARIADOR MICROMASTER 440

1.1 EI MICROMASTER 440

La serie MICROMASTER440 es una gama de convertidores de frecuencia (también denominados variadores) para modificar la velocidad de motores trifásicos. Los distintos modelos disponibles abarcan un rango de potencias desde 120 W para entrada monofásica hasta 75 kW con entrada trifásica.

Los convertidores están controlados por microprocesador y utilizan tecnología IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) de última generación. Esto los hace fiables y versátiles. Un método especial de modulación por ancho de impulsos con frecuencia de pulsación seleccionable permite un funcionamiento silencioso del motor. Extensas funciones de protección ofrecen una protección excelente tanto del convertidor como del motor.

El MICROMASTER 440, con sus ajustes por defecto realizados en fábrica, es ideal para una gran gama de aplicaciones sencillas de control de motores. El MICROMASTER 440 también puede utilizarse para aplicaciones más avanzadas de control de motores haciendo uso de su funcionalidad al completo.

El MICROMASTER 440 puede utilizarse tanto en aplicaciones donde se encuentre aislado como integrado en sistemas de automatización.

1.2 Características

Características principales

- Fácil de instalar
- Puesta en marcha sencilla
- Diseño robusto en cuanto a CEM
- Puede funcionar en alimentación de línea IT
- Tiempo de respuesta a señales de mando rápido y repetible
- Amplio número de parámetros que permite la configuración de una gama extensa de aplicaciones
- Conexión sencilla de cables
- relés de salida
- salidas analógicas (0 – 20 mA)
- 6 entradas digitales NPN/PNP aisladas y conmutables
- 2 entradas analógicas:
 - ◆ AIN1: 0 – 10 V, 0 – 20 mA y -10 a +10 V
 - ◆ AIN2: 0 – 10 V, 0 – 20 mA
- Las 2 entradas analógicas se pueden utilizar como la 7ª y 8ª entrada digital
- Tecnología BiCo
- Diseño modular para configuración extremadamente flexible
- Altas frecuencias de pulsación para funcionamiento silencioso del motor
- Información de estado detallada y funciones de mensaje integradas
- Opciones externas para comunicación por PC, panel BOP (Basic Operator Panel), panel AOP (Advanced Operator Panel) y módulo de comunicación PROFIBUS

Prestaciones

- Control vectorial sin sensores (sensorless vector control)
- Control de flujo corriente FCC (flux current control) para una mejora de la respuesta dinámica y control del motor
- Limitación rápida de corriente FCL (fast current limitation) para funcionamiento libre de disparos intempestivos
- Freno por inyección de corriente continua integrado
- Frenado compuesto o combinado para mejorar las prestaciones del frenado
- Tiempos de aceleración/deceleración con redondeo de rampa programable
- Control en lazo cerrado utilizando una función PID (proporcional, integral y diferencial), con autoajuste
- Chopper de frenado incorporado
- rampas de subida y bajada seleccionables
- Alisamiento de rampa con 4 puntos
- Característica V/f multipunto
- Se puede conmutar entre 3 juegos de parámetros, permitiendo a un único convertidor controlar varios procesos de forma alternada

Características de protección

- Protección de sobretensión/mínima tensión
- Protección de sobretemperatura para el convertidor
- Protección de defecto a tierra
- Protección de cortocircuito
- Protección térmica del motor por i^2t
- Protección del motor mediante sondas PTC/KTY

2.4 Instalación eléctrica



ADVERTENCIA

- ◆ Para asegurar el funcionamiento correcto de este equipo, éste deberá instalarse y ponerse en servicio por parte de personal cualificado y cumpliendo plenamente las advertencias especificadas en estas Instrucciones.
- ◆ Considerar especialmente los reglamentos de instalación y seguridad generales y regionales relativos al trabajo en instalaciones con tensión peligrosa (p. ej. EN 50178), al igual que los reglamentos importantes relativos al uso correcto de herramientas y equipos de protección personal.
- ◆ La entrada de red, la continua y los bornes del motor pueden estar sometidos a tensiones peligrosas aunque no esté funcionando el convertidor; antes de efectuar ningún tipo de trabajo de instalación esperar **5 minutos** para permitir a la unidad descargarse tras su desconexión.

PRECAUCIÓN

Es necesario tender por separado los cables de mando, de alimentación y al motor. No llevarlos a través del mismo conducto/canaleta.

2.4.1 Generalidades



ADVERTENCIA

El convertidor debe ponerse siempre a tierra. Si el convertidor no está puesto a tierra correctamente pueden darse condiciones extremadamente peligrosas dentro del convertidor que pueden ser potencialmente fatales.

Funcionamiento con redes no puestas a tierra (IT)

El MICROMASTER puede funcionar alimentado desde una red no puesta a tierra, y continuará funcionando si una de las fases de entrada se pone accidentalmente a tierra. Si una fase de salida se pone accidentalmente a tierra, el MICROMASTER se dispara e indicará F0001.

Para usarlo alimentado desde redes no puestas a tierra es necesario desenchufar o desactivar el condensador 'Y' situado en el interior del convertidor. La forma de retirar o desactivar dicho condensador está descrita en los anexos G a J.

Funcionamiento con dispositivo de protección diferencial

Si está instalado un dispositivo de protección diferencial, los convertidores MICROMASTER funcionarán sin disparos intempestivos siempre que:

- se utilice un dispositivo diferencial de tipo B.
- el límite de sensibilidad del dispositivo diferencial sea 300 mA.
- esté puesto a tierra el neutro de la alimentación.
- sólo se alimente un convertidor desde cada dispositivo diferencial.
- los cables de salida tengan una longitud inferior a 50 m (apantallados) ó 100 m (no apantallados).

Funcionamiento con cables largos

Todos los convertidores funcionarán cumpliendo todas las especificaciones si los cables tienen hasta 50 m de longitud y son apantallados ó 100 m y no disponen de pantalla.

2.4.2 Conexiones de alimentación y al motor



ADVERTENCIA

- ◆ Antes de realizar o cambiar conexiones en la unidad, aislar de la red eléctrica de alimentación.
 - ◆ Asegurarse de que el convertidor está configurado para la tensión de alimentación correcta: los MICROMASTER para 230V monofásicos/trifásicos no deberán conectarse a una tensión de alimentación superior.
 - ◆ Si se conectan motores síncronos o si se acoplan varios motores en paralelo, el convertidor debe funcionar con la características de control tensión/frecuencia (P1300 = 0, 2 ó 3).
-



PRECAUCIÓN

Después de conectar los cables de alimentación y del motor a los bornes adecuados, asegurarse de que estén correctamente colocadas las tapas antes de alimentar con tensión a la unidad.

ATENCIÓN

- ◆ Asegurarse de que entre la fuente de alimentación y el convertidor estén conectados interruptores o fusibles apropiados con la corriente nominal especificada (ver *Capítulo en la página 81 (Capítulo 7)*).
 - ◆ Utilizar únicamente hilo de cobre de Class 1 60/75 °C (para cumplir con UL). Ver valores de pares de apriete en el 7, Tabla 7-2, página83..
-

Aceso a los bornes de red y del motor

Retirando las tapas se accede a los bornes de red y del motor (véanse Anexos D a E).

Las conexiones de red y del motor deben realizarse tal y como se muestra en la Figura 2-6.

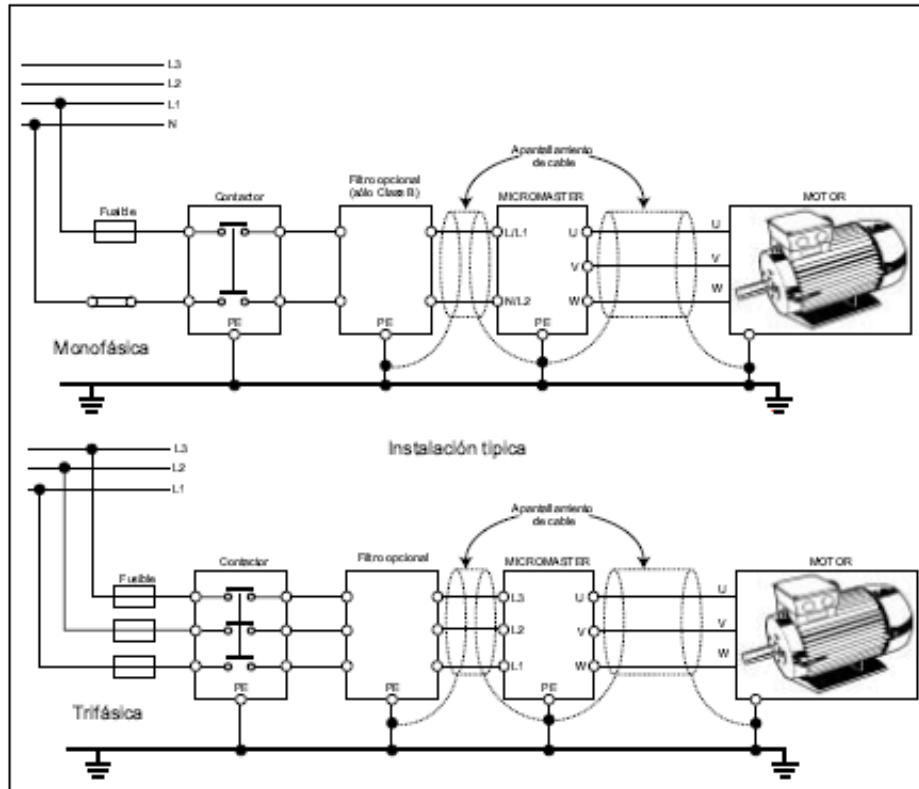


Figura 2-6 Conexiones del motor y la red

Funcionamiento básico con el panel SDP

Si está colocado el panel SDP es posible realizar lo siguiente:

- Arrancar y parar el motor (DIN1 mediante interruptor externo)
- Invertir el sentido de giro del motor (DIN2 mediante interruptor externo)
- Reposición o acuse de fallos (DIN3 mediante interruptor externo)

El control de la velocidad del motor se realiza conectando las entradas analógicas tal y como muestra la Figura 3-4.

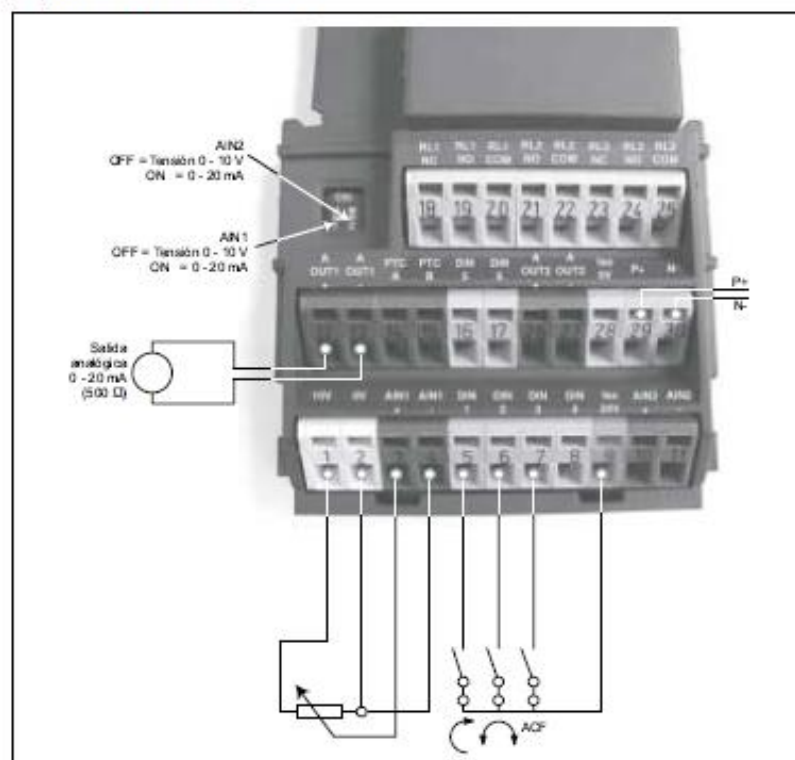


Figura 3-4 Funcionamiento básico con panel SDP

Botones en el panel BOP










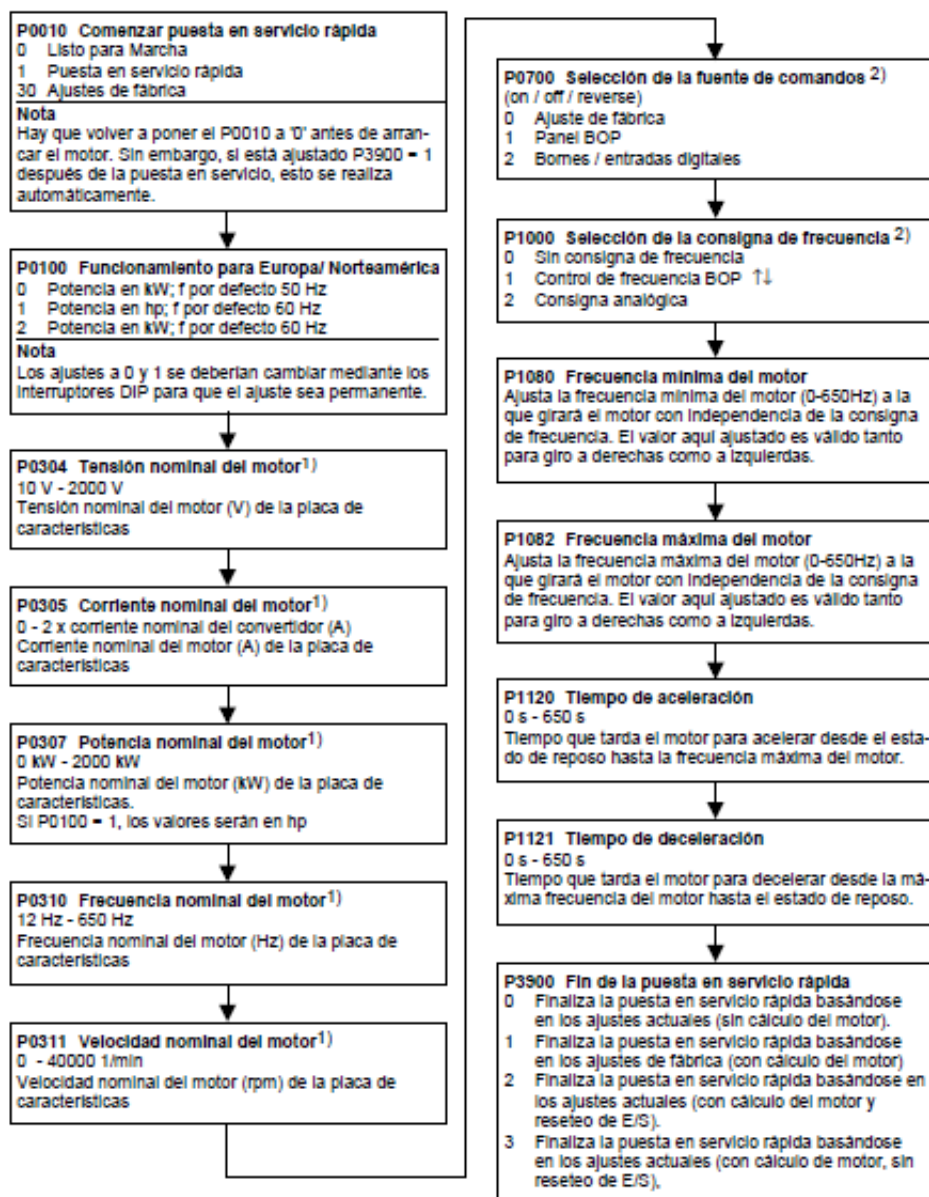
Panel/Botón	Función	Efectos
	Indicación de estado	La pantalla de cristal líquido muestra los ajustes actuales del convertidor.
	Marcha	Al pulsar este botón se arranca el convertidor. Por defecto está bloqueado este botón. Para habilitar este botón, ajustar P0700 = 1.
	Parada	OFF1 Pulsando este botón se para el motor siguiendo la rampa de deceleración seleccionada. Por defecto está bloqueado; para habilitarlo, ajustar P0700 = 1. OFF2 Pulsando el botón dos veces (o una vez prolongada) el motor se para de forma natural (por inercia). Esta función está siempre habilitada.
	Invertir sentido de giro	Pulsar este botón para cambiar el sentido de giro del motor. El Inverso se indica mediante un signo negativo (-) o un punto decimal intermitente. Por defecto está bloqueado; para habilitarlo, ajustar P0700 = 1.
	Jog motor	Pulsando este botón mientras el convertidor no tiene salida hace que el motor arranque y gire a la frecuencia Jog preseleccionada. El motor se detiene cuando se suelta el botón. Pulsar este botón cuando el motor está funcionando carece de efecto.
	Funciones	Este botón sirve para visualizar información adicional. Pulsando y manteniendo este botón apretado durante 2 segundos desde cualquier parámetro durante la operación, muestra lo siguiente: 1. Tensión del circuito intermedio (Indicado mediante d – unidades en V). 2. Corriente de salida. (A) 3. Frecuencia de salida (Hz) 4. Tensión de salida (Indicada mediante o – unidades en V). 5. El valor seleccionado en P0005 (si P0005 está ajustado para mostrar cualquiera de los valores de arriba (3,4 ó 5) entonces este no se muestra de nuevo). Cualquier pulsación adicional hace que vuelva a visualizarse la sucesión indicada anteriormente. Función de salto Pulsando brevemente el botón Fn es posible saltar desde cualquier parámetro (rXXXX o PXXXX) a r0000, lo que permite, si se desea, modificar otro parámetro. Una vez retornado a r0000, si pulsa el botón Fn irá de nuevo a su punto inicial.
	Acceder a parámetros	Pulsando este botón es posible acceder a los parámetros.
	Subir valor	Pulsando este botón se sube el valor visualizado.
	Bajar valor	Pulsando este botón se baja el valor visualizado.

Figura 3-5 Botones en el panel BOP

Organigramme de mise en service rapide (Sólo nivel 1)



1) Parámetros específicos del motor – véase placa de características del motor

2) Estos parámetros ofrecen más posibilidades de configuración de las que se listan aquí. Para otras posibilidades de ajuste consúltese la Lista de Parámetros.

Datos del motor para parametrización

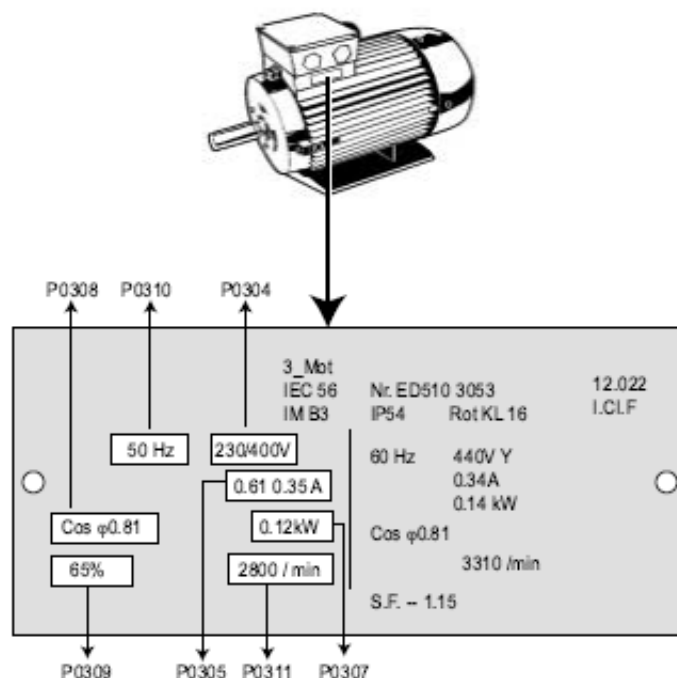


Figura 3-7 Ejemplo placa de características típica motor

ATENCIÓN

- ◆ P0308 y P0309 sólo son visibles si P0003 ≥ 2. Sólo se visualiza uno de los parámetros dependiendo del ajuste de P0100.
- ◆ P0307 indica kW o HP dependiendo del ajuste de P0100. Para información detallada, consultar la Lista de parámetros.
- ◆ No es posible cambiar los parámetros del motor a menos que P0010=1.
- ◆ Asegurarse de que el convertidor esté correctamente configurado con respecto al motor, p. ej. en el ejemplo anterior conexión en triángulo para 230 V.

3.2.3.2 Reajuste a los valores de fábrica

Para reajustar todos los parámetros a los valores de fábrica, los siguientes parámetros se deben ajustar de la siguiente forma (BOP, AOP u opción de comunicación necesarios):

1. Poner P0010=30.
2. Poner P0970=1.

ATENCIÓN

El proceso de reajuste puede durar hasta 3 minutos en completarse.