



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 FLUJO PARA
DISMINUIR EL CONSUMO ELÉCTRICO EN EL LABORATORIO DE REDES
INDUSTRIALES Y CONTROL DE PROCESOS EN LA ESPE-L, 2013.
PROPUESTA DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL”.**

Autor: Ing. Pruna Panchi Edwin Patricio

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 Flujo para Disminuir el Consumo Eléctrico en el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos en la ESPE-L, 2013. Propuesta de un Sistema de Monitoreo y Control”**. Por cuanto, el maestrante: Pruna Panchi Edwin Patricio, con el título de tesis: Han 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:

.....
Lcda. Msc. Rosa Terán
PRESIDENTE

.....
Msc. Edisón 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 el Ing. Pruna Panchi Edwin Patricio. Egresado de la Maestría en Gestión de Energías, previa a la obtención del mencionado grado académico, cuyo título es. **“Evaluación Energética de la Estación de Flujo para Disminuir el Consumo Eléctrico en el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos en la ESPE-L, 2013. Propuesta de un Sistema de Monitoreo y Control”**.

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 Flujo para Disminuir el Consumo Eléctrico en el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos en la ESPE-L, 2013. Propuesta de un Sistema de Monitoreo y Control”**. 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

Edwin Patricio Pruna Panchi
0502651003

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.

DEDICATORIA

A mi familia, por estar siempre junto a mí para la concepción de logros tan importantes en mi vida profesional.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

UNIDAD DE POSGRADOS

MAESTRÍA EN GESTIÓN DE ENERGÍAS

TÍTULO: “Evaluación Energética de la Estación de Flujo para Disminuir el Consumo Eléctrico en el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos en la ESPE-L, 2013. Propuesta de un Sistema de Monitoreo y Control”.

Autor: Ing. Edwin Patricio Pruna Panchi

Tutor: PhD. Secundino Marrero Ramírez

RESUMEN

En este trabajo, se realizó la evaluación energética de los componentes de la estación de flujo así como se investigaron los equipos alternativos a ser implementados en miras de disminuir el consumo eléctrico, se desarrollaron las pruebas de funcionamiento y mediciones de los consumos eléctricos para los equipos que fueron implementados en la estación de flujo. Se encontró el modelo matemático de la estación de flujo 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. Finalmente 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.

DESCRIPTORES: Eficiencia energética, controladores, touch panel, registrador, variador de velocidad, Sistema de primer orden, evaluación energética, estación de flujo, estación multivariable.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI UNIT GRADUATE

MASTER OF ENERGY MANAGEMENT

TITLE: “Energy evaluation of the Flow Station to Diminish the Electric Consumption in the Laboratory of Industrial Nets and Control of Processes in the ESPE-L, 2013. Proposal of a System of Visualization and Control”.

Author: Ing. Pruna Panchi Edwin Patricio

Tutor: PhD. Secundino Marreo Ramírez

ABSTRACT

In this work, the energy evaluation of the station components flow was done as well as the alternative teams were investigated to be implemented in aims of diminishing the electric consumption, electric mensurations tests was done and the consumptions were developed for the teams that were implemented in the station of flow. The mathematical station flow pattern was found in order to evaluate the system in real and feigned form and obtain a relationship as for the operation and to the values of the constants used for the different controllers syntony. Finally the automatic control process by using the P, PI, PID Controllers was done, analyzing the answer of each one of them on a quick answer process.

KEY WORDS: Energy efficiency, controllers, touch panel, inspector, speed variador, first order System, energy evaluation, flow station, multivariable station.

Aval del Traductor:

Lcdo. Pablo S. Cevallos

Coordinador del Idioma Inglés de la UTC.

0502592371

INDICE GENERAL

CONTENIDOS	Páginas.
PORTADA	i
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	ii
AVAL DEL DIRECTOR DE TESIS	iii
AUTORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
INDICE GENERAL	x
INDICE DE FIGURAS	xv
INDICE DE CUADROS	xvii

INDICE GENERAL:	Páginas
Introducción	1
CAPITULO I: 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	4
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	6
2.1 Antecedentes de la investigación	6
2.2 Fundamento teórico	8
2.2.1 Eficiencia energética	8
2.2.2 Estaciones de procesos industriales como medio de enseñanza	10
2.2.3 Componentes de la estación de flujo	10
2.2.3.1 Transmisores	10
2.2.3.2 Controladores	12
2.2.3.3 Variadores de velocidad	12
2.2.3.4 Bombas	13
2.2.3.4.1 Tipos y características	13
2.2.3.4.1.1 Bombas rotodinámicas	13
2.2.3.4.1.2 Curva característica	15
2.2.3.4.2 Punto de operación	16
2.2.3.4.2.1 Combinación con el sistema	16
2.2.3.4.2.2 Consideraciones sobre la presión y sobre la potencia	18
2.2.3.4.3 Potencia eléctrica	19
2.2.3.4.4 Arranque y potencia máxima	19
2.2.3.4.5 Inercia	19
2.2.3.4.6 Introducción a la semejanza en bombas	20
2.2.3.4.6.1 La variación de velocidad	20
2.2.3.4.7 Selección de bombas	22

2.2.3.4.7.1 Selección a partir de los parámetros adimensionales	22
2.2.3.4.7.2 Factores que influyen en la selección	22
2.2.3.4.7.3 Rendimiento óptimo	24
2.2.3.5 Instrumentos registradores	24
2.2.4 Tipos de control	25
2.2.4.1 Control todo o nada	25
2.2.4.2 Control proporcional	26
2.2.4.3 Control proporcional + integral	27
2.2.4.4 Control proporcional + derivativo	28
2.2.4.5 Control proporcional + integral + derivativo	30
2.2.4.6 Control por lógica difusa	31
2.3 Marco conceptual	36
2.3.1 Estación de procesos multivariable	37
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA:	39
3.1 Diseño de la investigación	39
3.1.1 Modalidad de la investigación	39
3.1.1.1 De campo	39
3.1.1.2 Bibliográfica - documental	39
3.1.2 Tipo de investigación	40
3.1.2.1 Descriptiva	40
3.1.2.2 Experimental	40
3.2 Procedimientos de la investigación	40
3.3 Operacionalización de la variables	41
3.4 Funcionamiento del proceso	42
3.4.1 Bomba centrífuga	44
3.4.2 Computador personal	45
3.4.3 Registrador de pluma	45
3.5 Evaluación Energética de la Estación de Flujo en el Laboratorio de Redes Industriales y Control De Procesos.	46

3.5.1 Evaluación del consumo energético de los componentes utilizados en el control automático de la estación de procesos.	47
3.5.1.1 Equipo utilizado	47
3.5.1.2 Medición de la potencia en los componentes actuales utilizados en la estación de procesos.	48
3.5.1.3 Controladores Digitales Industriales.	49
3.5.1.4 Reemplazo del controlador digital universal (Controlador foxboro 761C) por el controlador lógico programable (PLC S7-200) y medición del consumo de potencia del equipo.	49
3.5.1.5 Monitoreo y registro de la variable flujo.	50
3.5.1.6 Reemplazo del controlador digital universal (Controlador foxboro 761C) por el controlador lógico programable (PLC S7-200), reemplazo del computador personal y del registrador de datos por el touch panel red Lion G3 y medición de consumo de potencia de los equipos	51
3.5.2 Obtención experimental de Modelos	52
3.5.3 Implementación del control Proporcional a la estación de flujo del laboratorio.	54
3.5.3.1 Pasos para la configuración y programación del PLC S7-200 para realizar el control Proporcional.	55
3.5.3.2 Pruebas experimentales realizadas.	62
3.5.3.2.1 Implementación del control Proporcional Integral a la estación de flujo del laboratorio.	62
3.5.3.2.2 Pruebas experimentales realizadas.	63
3.5.3.2.3 Implementación del control Proporcional Integral Derivativo a la estación de flujo del laboratorio.	63
3.5.3.2.4 Pruebas experimentales realizadas.	64
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN RESULTADOS:	65
4.1. Resultados de las mediciones de los equipos utilizados en la estación de flujo.	65
4.2 Modelo Matemático de la Estación de flujo.	68
4.2.1 Obtención experimental del modelo matemático de la estación de flujo.	68
4.2.2 Simulación del proceso y sintonía utilizando los controles P, PI, PID.	70
4.2.3 Sintonía de los controladores P, PI, PID.	71
4.2.3.1 Control PID:	71
4.2.3.1.1 Cálculo del tiempo de asentamiento y el valor del sobre impulso.	72

4.2.3.2 Control PI	73
4.2.3.2.1 Cálculo del tiempo de asentamiento y el valor del sobre impulso.	74
4.2.3.3 Control Proporcional.	75
4.2.3.3.1 Cálculo del tiempo de asentamiento y el valor del sobre impulso.	75
4.3 Tipos de controles Implementados.	77
4.3.1 Implementación de los controles P, PI y PID en la estación de flujo.	77
4.4 Análisis de la potencia obtenida por los diferentes tipos de equipos utilizados para el monitoreo y control de flujo.	79
4.4.1 Datos obtenidos de potencia de la estación de procesos con el controlador original y con el controlador S7-200.	79
4.4.2 Datos obtenidos de potencia de la estación de procesos con el controlador, la computadora de escritorio y el registrador tipo pluma vs la estación de procesos con el PLC S7-200 y el touch panel.	82
4.4.3 Datos obtenidos de los modos de control proporcional, proporcional integral y proporcional integral derivativo.	84
4.5 Análisis del consumo de energía de los sistemas	91
CAPÍTULO V: LA PROPUESTA:	92
5.1 Título de la propuesta.	92
5.2 Objetivo de la propuesta.	92
5.3 Justificación de la propuesta.	92
5.4 Estructura de la propuesta.	93
5.5 Desarrollo de la propuesta.	93
5.5.1 Recurso Material.	93
5.5.2 Recurso Humano.	93
5.6 Evaluación socio-económico-ambiental de la propuesta.	94
5.6.1 Social.	94
5.6.2 Económica.	94
5.6.3 Ambiental.	94
5.7 Resultados de la valoración económica de la propuesta de un Sistema de Monitoreo y control.	95
5.7.1 Cálculo del VAN	95

CONCLUSIONES	97
RECOMENDACIONES:	98
BIBLIOGRAFÍA:	99
ANEXOS:	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Evolución de las señales de transmisión	11
Figura 2.2 Diagrama de bloques de un variador de frecuencia	13
Figura 2.3 Altura de elevación de una bomba	13
Figura 2.4 Bomba axial	14
Figura 2.5 Bomba mixta	14
Figura 2.6 Bomba centrífuga	15
Figura 2.7 Curva característica de una bomba centrífuga	15
Figura 2.8 Curva característica bomba axial	15
Figura 2.9 Combinación de bomba y sistema	17
Figura 2.10 Grupo motor-bomba	18
Figura 2.11 Curvas características a diferentes velocidades	21
Figura 2.12 Relación entre las curvas correspondientes a dos velocidades	21
Figura 2.13 Instrumentos Registradores	24
Figura 2.14 Control todo-nada	25
Figura 2.15 Control proporcional	26
Figura 2.16 Control proporcional con offset	27
Figura 2.17 Respuesta a un escalón del controlador PI	28
Figura 2.18 Respuesta del controlador PI a un cambio de carga	28
Figura 2.19 Control proporcional + derivativo	29
Figura 2.20 Minutos de anticipo de la acción derivada	29
Figura 2.21 Control proporcional + integral + derivativo	30
Figura 2.22 Control por lógica difusa del aire acondicionado de una habitación	33
Figura 2.23 Controlador de lógica difusa estático	34
Figura 2.24 Control adaptativo directo de Mamdani	35
Figura 2.25 Control por lógica difusa de un proceso de fermentación.	36
Figura 2.26 Estación de procesos multivariables Labvolt	37
Figura 3.1 Componentes de la estación de flujo.	43
Figura 3.2 Registrador de datos de flujo, equipo integrable a la estación de flujo para el registro de datos.	44
Figura 3.3 Computador de escritorio y monitor, equipos necesario para el diseño del HMI entre la estación y el computador	44
Figura 3.4 Diagrama de lazo del control de la estación de flujo.	45

Figura 3.5 Representación gráfica de las conexiones realizadas para el funcionamiento de la estación del proceso flujo.	46
Figura 3.6 Diagrama de conexión una red monofásica	48
Figura 3.7 Representación gráfica de las conexiones realizadas para el funcionamiento de la estación del proceso flujo, reemplazando el PLC por el controlador Foxboro 761C.	50
Figura 3.8 Representación gráfica de las conexiones realizadas para el funcionamiento de la estación del proceso flujo, reemplazando el PLC por el controlador Foxboro 761C y reemplazando el computador personal y el registrador por el touch panel Red Lion G3.	52
Figura 3.9 Representación de un sistema de primer orden	53
Figura 3.10 Diagrama P&ID de la estación de flujo	54
Figura 3.11 Pantalla que indica el asistente de operaciones	55
Figura 3.12 Pantalla que indica la selección del control PID	56
Figura 3.13 Pantalla que indica el número de lazo de control a utilizar	56
Figura 3.14 Pantalla que indica los límites a utilizar en la consigna del lazo	57
Figura 3.15 Pantalla de configuración de los parámetros de escalado.	58
Figura 3.16 Pantalla de habilitación de alarmas	58
Figura 3.17 Pantalla de selección de la memoria ser utilizada para la ejecución del algoritmo del control	59
Figura 3.18 Pantalla de cambio de nombre de las subrutinas.	59
Figura 3.19 Pantalla de finalización de la configuración del asistente PID	60
Figura 3.20 Programación desarrollada en microwin	60
Figura 3.21 Pantalla de utilización del panel de sintonía	61
Figura 3.22 Grafica de la señal de un control Proporcional	61
Figura 3.23 Grafica del control Proporcional integral	63
Figura 4.1 Valores de las mediciones obtenidas al sistema de flujo	68
Figura 4.2 Representación desarrollada en Simulink del control de flujo.	70
Figura 4.3 Pantalla de visualización de la tendencia del proceso utilizando el control PID.	71
Figura 4.4 Controlador con predictor Smith	72
Figura 4.5 Pantalla que presenta el tiempo de asentamiento y el sobre impulso utilizando el control PID	73

Figura 4.6 Pantalla de visualización de la tendencia del proceso utilizando el control PI	73
Figura 4.7 Pantalla que presenta el tiempo de asentamiento y el sobre impulso utilizando el control PI	74
Figura 4.8 Pantalla de visualización de la tendencia del proceso utilizando el control Proporcional	75
Figura 4.9 Pantalla que presenta el tiempo de asentamiento y el sobre impulso utilizando el control Proporcional	76
Figura 4.10 Consumo de energía de la estación de procesos con la utilización de los diferentes controladores.	80
Figura 4.11 Consumo de energía de la estación de procesos con los componentes actuales vs consumo de energía de la estación de procesos utilizando el PLC y el touch panel.	82
Figura 4.12 Consumo de energía de la estación de procesos con la implementación de los modos de control proporcional, proporcional integral y proporcional integral derivativo.	85
Figura 5.1 Software que permite calcular el nivel de CO2 por kWh	95

INDICE TABLAS Y CUADROS

Tabla 2.1 Guía de selección de sistemas de control	31
Tabla 3.1 Datos del fabricante del la bomba Deyton	45
Tabla 4.1 Valores obtenidos de las mediciones realizadas a los componentes de la estación de procesos: computador, controlador y registrador.	65
Tabla 4.2 Valores obtenidos de las mediciones realizadas a los componentes de la estación de procesos, reemplazando el controlador digital universal por el controlador lógico programable.	66
Tabla 4.3 Valores obtenidos de las mediciones realizadas a los componentes de la estación de procesos, reemplazando el controlador digital universal por el controlador lógico programable y reemplazando el computador personal y el registrador por el touch panel, trabajando al 100% de su potencial.	67
Tabla 4.4 Valores de las constantes obtenidas para los tres tipos de controles implementados.	71

Tabla 4.5 Valores obtenidos de las mediciones realizadas a la estación de flujo utilizando el control proporcional.	77
Tabla 4.6 Valores obtenidos de las mediciones realizadas a la estación de flujo utilizando el control proporcional integral.	78
Tabla 4.7 Valores obtenidos de las mediciones realizadas a la estación de flujo utilizando el control proporcional integral derivativo.	79
Tabla 4.8 Datos de las mediciones realizadas durante 10 días a la estación de procesos.	80
Tabla 4.9 Datos de las mediciones realizadas durante 10 días a la estación de procesos	82
Tabla 4.10 Datos de las mediciones realizadas durante 10 días a la estación de procesos para los tres tipos de control implementados	84
Tabla 4.11 Valor del consumo de energía de la estación de procesos utilizando el controlador + computador + registrador e implementado el control proporcional.	87
Tabla 4.12 Valor del consumo de energía de la estación de procesos utilizando el controlador + computador + registrador e implementado el control proporcional integral.	87
Tabla 4.13 Valor del consumo de energía de la estación de procesos utilizando el controlador + computador + registrador e implementado el control proporcional integral derivativo.	88
Tabla 4.14 Valor del consumo de energía de la estación de procesos utilizando el PLC+computador+registrador e implementado el control Proporcional	88
Tabla 4.15 Valor del consumo de energía de la estación de procesos utilizando el PLC+ computador + registrador e implementado el control proporcional integral.	89
Tabla 4.16 Valor del consumo de energía de la estación de procesos utilizando el PLC+ computador + registrador e implementado el control proporcional integral derivativo	89
Tabla 4.17 Valor del consumo de energía de la estación de procesos utilizando el PLC+ computador + registrador e implementado el control proporcional Integral	90

Tabla 4.18 Valor del consumo de energía de la estación de procesos utilizando el PLC+ computador + registrador e implementado el control proporcional Integral	90
Tabla 4.19 Valor del consumo de energía de la estación de procesos utilizando el PLC+ computador + registrador e implementado el control proporcional integral derivativo	91
Tabla 5.1 Desglose de los costos fijos para la implementación de un PLC, Touch panel en la estación de flujo.	93
Tabla 5.2 Valor del talento humano	94
Cuadro 3.1 Variable Independiente: Monitoreo Y Control Del Proceso.	41
Cuadro 3.2 Variable dependiente: Consumo De Energía Eléctrica	42

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como propósito evaluar la estación de flujo para determinar los mayores consumidores energéticos de la misma 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 en control del proceso, además investigar los equipos de vanguardia existentes en el país que sean integrables a dicha estación 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 flujo 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 explican las mediciones a realizar con el fin de conocer que equipos son los que consumen mayor energía.

En el capítulo 4 se realizan las comparaciones entre las mediciones realizadas tanto con los equipos actuales y con los equipos alternativos, así como también se realiza la comparación de los diferentes modos de control para determinar el control más eficiente en el proceso flujo de agua. Además se cuantifica el ahorro de energía anual con la implementación de la nueva tecnología.

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

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, 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 de cada una de las estaciones es alto debido a que poseen accionamientos eléctricos de tecnología antigua, transmisores electrónicos, compresores, registradores, además de que para la mayoría de aplicaciones prácticas se necesita realizar la comunicación con las computadoras existentes en el laboratorio.

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 flujo en el laboratorio de redes industriales y control de proceso de la ESPE-L, para determinar las causas existentes en cuanto a la eficiencia energética de la estación de control de flujo, en caso de existir inconvenientes se buscarán 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 flujo en el laboratorio de redes industriales y control de Procesos en la ESPE-Extensión Latacunga.

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, este se logrará 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.

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 el monitoreo y control de la estación de flujo 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 de mayor consumo eléctrico en el laboratorio de redes industriales y control de procesos.

1.4. Hipótesis

Si se incorporan tecnologías más eficientes para el monitoreo y control de la estación de flujo entonces se disminuye el consumo eléctrico de la estación de flujo

1.5. Objetivos

General

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

Específicos

- Analizar el estado del arte relacionado con sistemas de monitoreo y control para la estación de flujo.
- Determinar los índices de consumo en la estación de flujo.
- Diseñar un control eficaz para mejorar el comportamiento energético en la estación de flujo del laboratorio de redes industriales y control de procesos de la ESPE-Latacunga.
- Analizar la factibilidad de la propuesta de control de la estación de flujo.

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

Se realizarán las mediciones de la energía consumida, y se determinará de forma independiente el consumo energético de cada elemento.

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 flujo 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 [7].

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.

Por lo 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 en un pilar importante para conseguir el incremento productivo que se pretende tener el desenlace, para conseguir la mejor calidad de vida en nuestros clientes [3].

3. De acuerdo al artículo “Control de eficiencia en accionamiento eléctrico de bombas centrífugas usando lógica difusa desarrollador por: Luis D. Rojas Purón y Dr. Mario Morera Hernández: La modelación difusa de un sistema de accionamiento eléctrico sirve para evaluar con integral aproximación la eficiencia de todo el sistema así como es posible compensar las oscilaciones de cargas de una bomba centrífuga a través del control del torque [7].

4. Existe un artículo relacionado a la simulación del control automático de la estación de flujo utilizando lógica difusa en el cual realiza un análisis entre el

control PID y el control de lógica difusa con la herramienta de simulación de matlab.

Se ejecuta la simulación de los dos controladores como son el PID y el Fuzzy logic (método de mandani) realizando pruebas con señales de tipo escalón, rampa y señal compuesta, utilizando la herramienta de matlab simulink y determinaron que el controlador de lógica difusa obtuvo mejores respuestas ante una entrada de tipo escalón, lo que significa que este controlador se puede utilizar para el arranque de plantas, para señales de tipo rampa el controlador PID presenta una mejor respuesta que el controlador fuzzy logic, para señales tipo rampa invertida el controlador PID no sigue de forma adecuada a la referencia debido a la no linealidad del proceso.

Analizando los resultados de los modelos matemáticos desarrollados, se visualiza que no existe una gran diferencia entre la implementación del controlador PID vs el controlador Fuzzy lógic. Los dos controles responden de una forma eficiente al control del sistema [5].

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 el control inteligente.

2.2.2 Estaciones de Procesos Industriales como medio de enseñanza

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 Proceso de Flujo consiste de una bomba centrífuga, un depósito de agua de 75 litros, variador de frecuencia, válvulas manuales y una tubería indicadora del proceso hecha de termoplástico claro (PVC). La estación también tiene un medidor de flujo, un transmisor de presión diferencial.

El transmisor de presión diferencial está montado en el lado de la estación.

Para el desarrollo de las diferentes aplicaciones prácticas se necesita el registrador de datos el cual funciona con papel milimetrado para el registro de los mismos, así como también se necesita de un computador para realizar el monitoreo y control de la estación utilizando software especializado para el fin requerido.

2.2.3 Componentes de la Estación de Flujo

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 4 a 20 mA de corriente continua, si bien se utilizan de 1 a 5 mA c.c., de 10 a 50 mA c.c. y de 0 a 20 mA 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 [6].

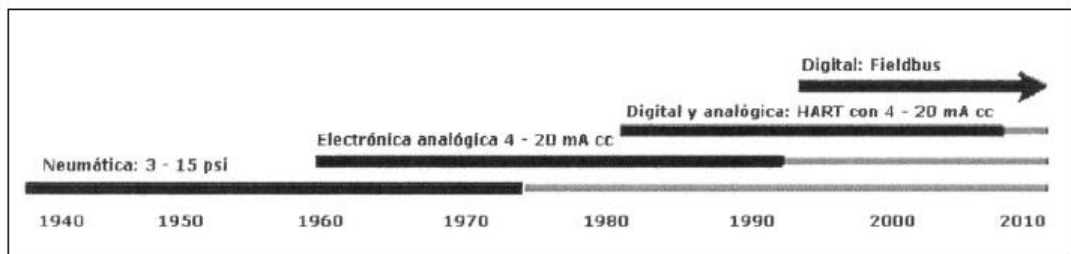


Figura 2.1 Evolución de las señales de transmisión

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 costes de fabricación (ahorro energético, etc.).
- Seguridad (se evitan malas maniobras que pueden causar pérdidas de producto).
- Normalización de los instrumentos [6].

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 [6].

2.2.3.3 Variadores de velocidad

Los variadores de velocidad de eficiencia energética 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.

Las tecnologías que están detrás del control inteligente de los motores son especialmente los variadores de velocidad variable, el software inteligente y los dispositivos de vigilancia de la condición de motor son capaces de proporcionar un impacto inmediato y medible del uso de energía y eficiencia operativa.

La ecuación 2. 1 permite determinar la velocidad de giro del motor utilizando un variador de velocidad.

$$\text{Velocidad de giro (rpm)} = f \left(\frac{\text{Frecuencia}}{\text{Pares de polos}} \right) * 60 \quad (2.1)$$

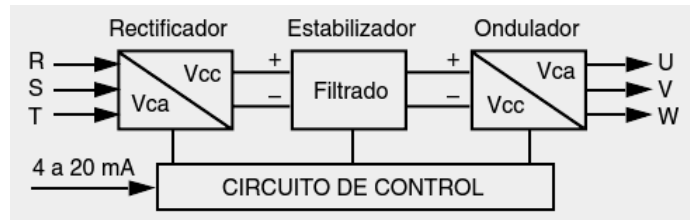


Figura 2.2. Diagrama de bloques de un variador de frecuencia

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.

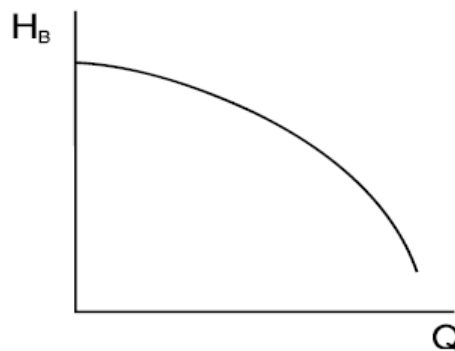


Figura 2.3-Altura de elevación de una bomba

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 [4].

2.2.3.4.1 Tipos y características

2.2.3.4.1.1 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 [4].

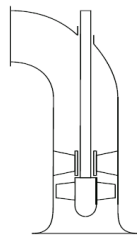


Figura 2.4-Bomba axial

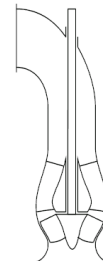


Figura 2.5-Bomba mixta

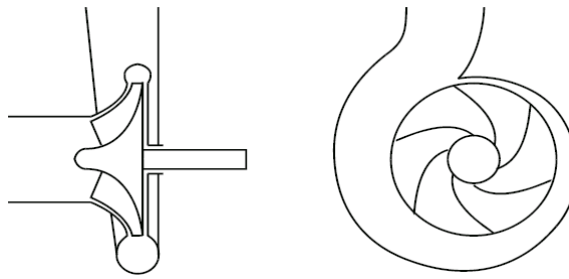


Figura 2.6-Bomba centrífuga

2.2.3.4.1.2 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.

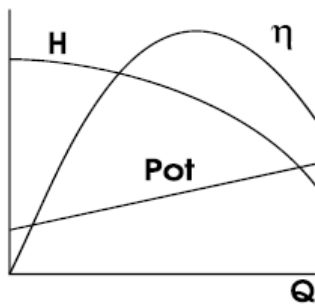


Figura 2.7-Curva característica de una bomba centrífuga

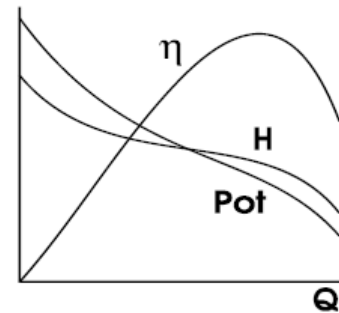


Figura 2.8-Curva característica de una bomba axial

La figura 2.7 muestra una curva característica típica de una bomba centrífuga, y la figura 2.8 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:

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

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% [4].

2.2.3.4.2 Punto de operación

2.2.3.4.2.1 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 2.9 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.

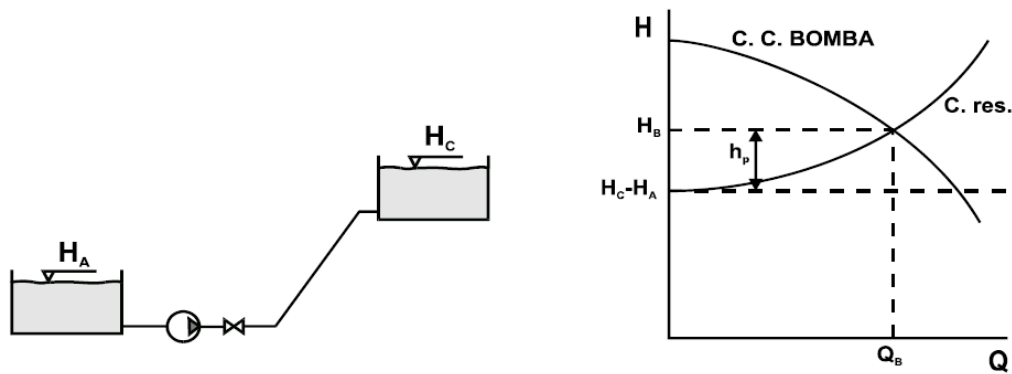


Figura 2.9-Combinación de bomba y sistema

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:

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

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 diseño de la bomba [4].

2.2.3.4.2 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 [4]:

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

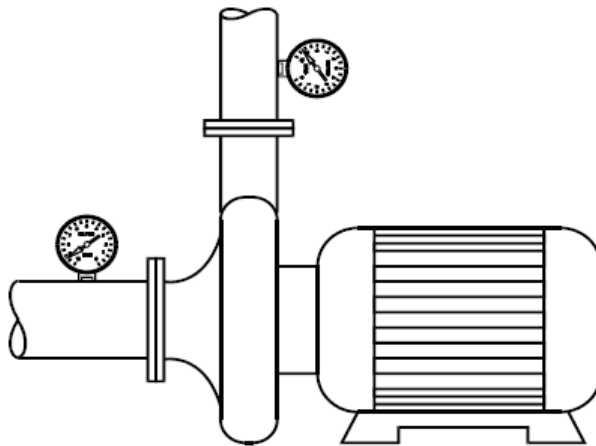


Figura 2.10-Grupo motor-bomba

2.2.3.4.3 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 [4].

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

2.2.3.4.4 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 [4].

2.2.3.4.5 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 [4].

2.2.3.4.6 Introducción a la semejanza en bombas

2.2.3.4.6.1 La variación de la 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 la ecuaciones 2.6 [4].

$$\begin{aligned} Q_2 &= \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right) Q_1 \\ H_2 &= \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 H_1 \\ Pot_2 &= \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^3 Pot_1 \end{aligned} \tag{2.6}$$

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 2.11.

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 2.12 el punto de funcionamiento en cada caso se halla buscando el corte de las curvas correspondientes. Si se aplicaran las fórmulas 3.8 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 [4].

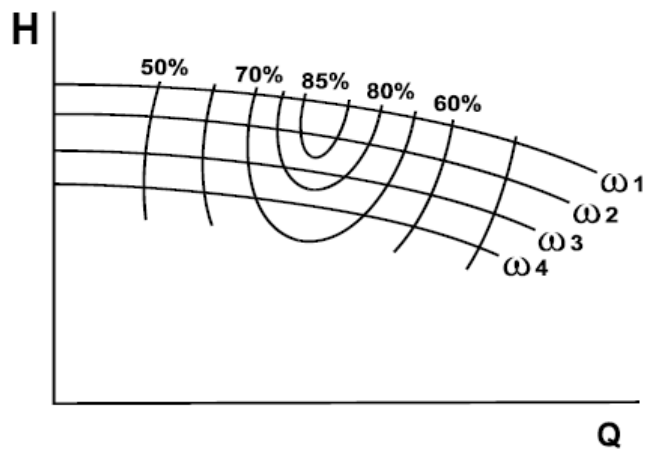


Figura 2.11-Curvas características a diferentes velocidades

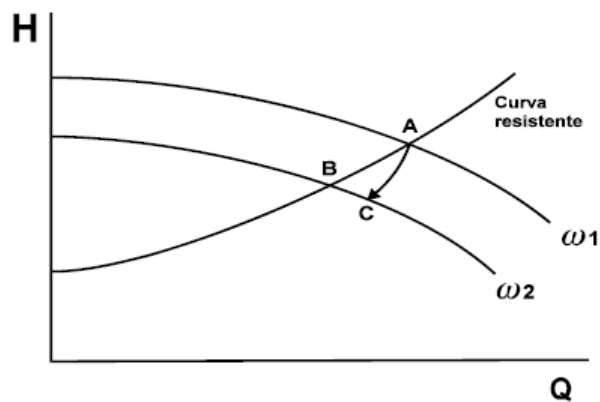


Figura 2.12-Relación entre las curvas correspondientes a dos velocidades

2.2.3.4.7 Selección de bombas

2.2.3.4.7.1 Selección a partir de los parámetros adimensionales

Teóricamente la selección de bombas es un proceso similar al de definición de las dimensiones principales en el diseño. Se parte de la altura de elevación, el caudal y el *NPSH*.

Con el caudal y el *NPSH* se define el diámetro de entrada y la velocidad de giro, que debe estar limitada a valores prácticos: los posibles motores a emplear. Una vez hecho esto y dependiendo de la velocidad específica, se elige un tipo de máquina axial, mixta o radial.

Para ese tipo de máquina se busca el diámetro específico con el mejor rendimiento (teórico) posible y ya se tiene así definido el tamaño.

En este proceso influye también el número de etapas o, en el caso de bombas radiales, el haber elegido una bomba con doble entrada, pues cambia la velocidad específica [4].

2.2.3.4.7.2 Factores que influyen en la selección

En la práctica es necesario un conocimiento completo del sistema y de sus posibles variantes. Por ejemplo, para extraer agua de un pozo se puede utilizar:

- Una bomba en el exterior. Debe tener un *NPSHr* adecuado y ser autocebante. En caso contrario deberá instalarse un sistema de cebado.

- Una bomba vertical con el motor exterior, pero la bomba, o al menos la primera etapa, sumergida. No hay problemas de cavitación, pero la sujeción de la bomba es más complicada.

- Una bomba totalmente sumergida. El motor debe ser estanco.

Es aconsejable hacer una revisión de los catálogos disponibles o, mejor aún, hacer la selección conjuntamente con los fabricantes, para decidir qué producto de su gama se adapta mejor a las necesidades planteadas.

Aparte del caudal y la altura, algunas características del sistema que van a influir en la elección de la bomba son:

- La posición de la bomba, ya comentada, que afecta el *NPSH_d* y al cebado.
- El diámetro de las tuberías, que determinan las pérdidas de carga y, por tanto, el punto de operación.
- El número y disposición serie o paralelo de las bombas.
- El sistema y rango de regulación.
- Bombeo de líquidos viscosos. Afecta al punto de operación y a la potencia.
- Bombeo de pastas o líquidos con sólidos en suspensión. Se necesitan rodetes especiales.
- Bombeo de líquidos corrosivos o similares que exijan materiales o recubrimientos especiales.

El rango de regulación es un parámetro que influye en la pendiente de la curva característica a buscar. Si las variaciones de caudal van a ser grandes, interesa una curva lo más horizontal posible. Sin embargo, si se quiere que el caudal permanezca constante, la curva debe ser vertical. En el primer caso son más adecuadas las máquinas de baja velocidad específica: centrífugas, con doble

aspiración, varias bombas en paralelo. En el segundo caso son mejores las de alta velocidad específica: mixtas o axiales, de varias etapas, bombas en serie [4].

2.2.3.4.7.3 Rendimiento óptimo

Salvo las bombas pequeñas o para aplicaciones especiales, uno de los parámetros más importantes es que la bomba tenga un rendimiento óptimo lo más cerca posible del punto de trabajo habitual. No resulta rentable elegir una bomba sobredimensionada con vistas a posibles ampliaciones futuras del sistema. Las pérdidas, sobre todo en el caso de funcionamiento continuo, pueden ser mucho mayores que el coste de la propia bomba [4].

2.2.3.5. Instrumentos Registradores.

Los instrumentos registradores registran con trazo continuo o puntos la variable, y pueden ser circulares o de gráfico rectangular o alargado, según sea la forma del gráfico.

Los registradores de gráfico circular suelen tener el gráfico de 1 revolución en 24 horas mientras que en los de gráfico rectangular la velocidad normal del gráfico es de unos 20 mm/hora [6].

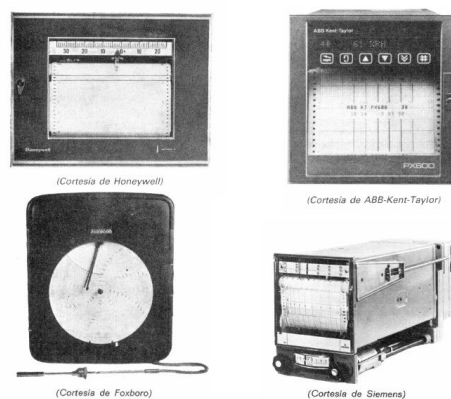


Figura 2.13 Instrumentos Registradores

2.2.4 Tipos de Control

2.2.4.1 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 se emplea usualmente con una banda diferencial o zona neutra, dentro de la cual el elemento final de control permanece en su última posición, para valores de la variable comprendidos dentro de la banda diferencial. Los ajustes de control se basan en variar el punto de consigna y la gama diferencial.

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 [6].

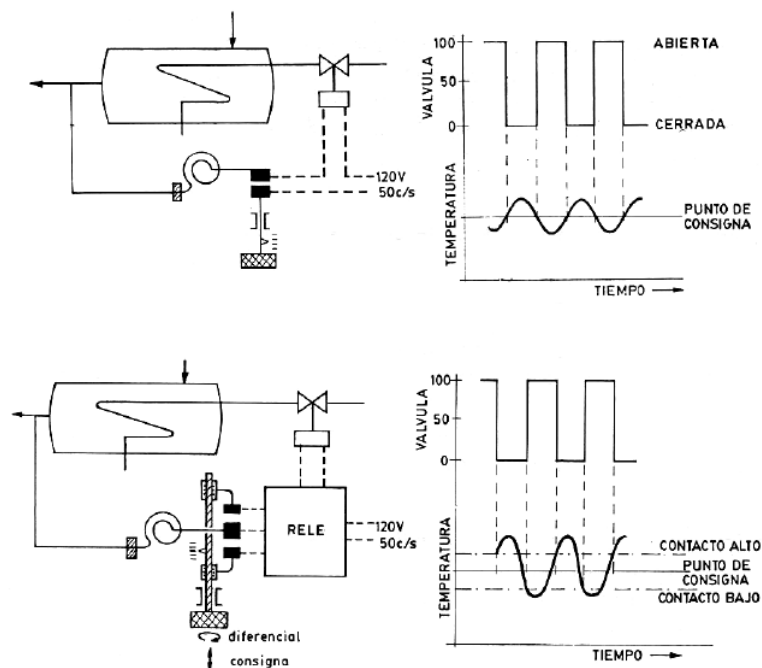


Figura 2.14. Control todo-nada

2.2.4.2. 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.

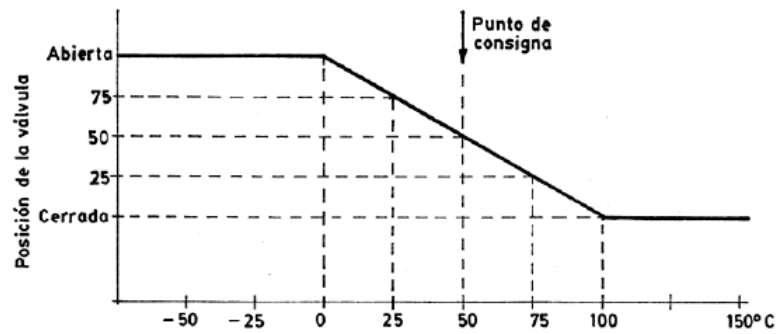


Figura 2.15. Control proporcional

El grado de ajuste del controlador proporcional viene definido por: Ganancia, que es la relación entre la variación de la señal de salida del controlador a la válvula de control y la variación de la señal de entrada procedente del elemento primario o del transmisor.

Banda proporcional, que es el porcentaje del campo de medida de la variable que la válvula necesita para efectuar una carrera completa, es decir, pasar de completamente abierta a completamente cerrada.

La acción proporcional tiene un inconveniente, que es la desviación permanente de la variable una vez estabilizada con relación al punto de consigna, denominada offset.

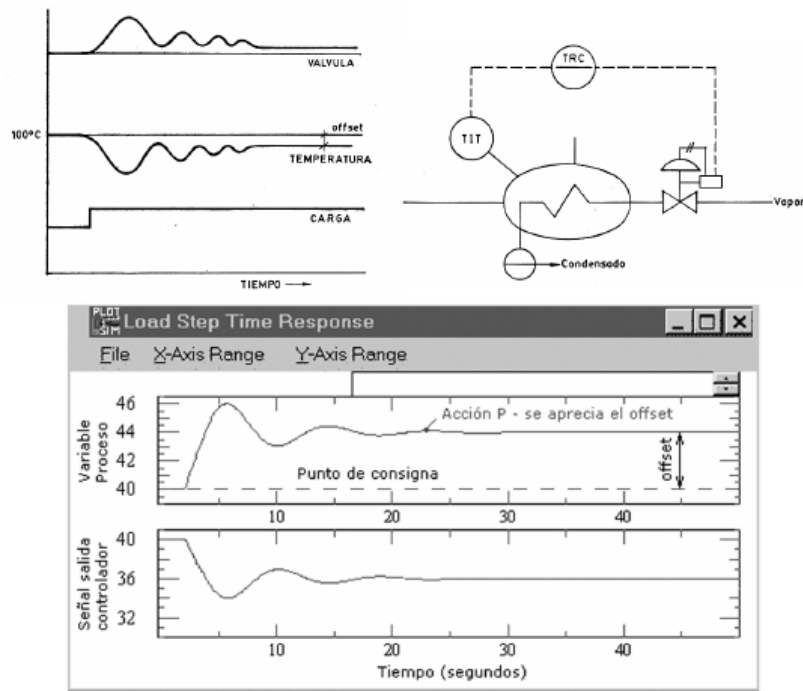


Figura 2.16. Control proporcional con offset

2.2.4.3 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 sigue que se utiliza sólo cuando es preciso mantener un valor de la variable que iguale siempre al punto de consigna.

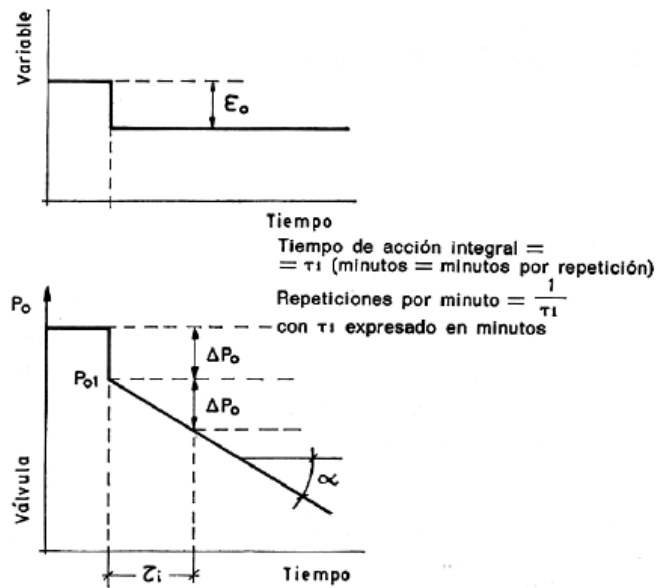


Figura 2.17. Respuesta a un escalón del controlador PI

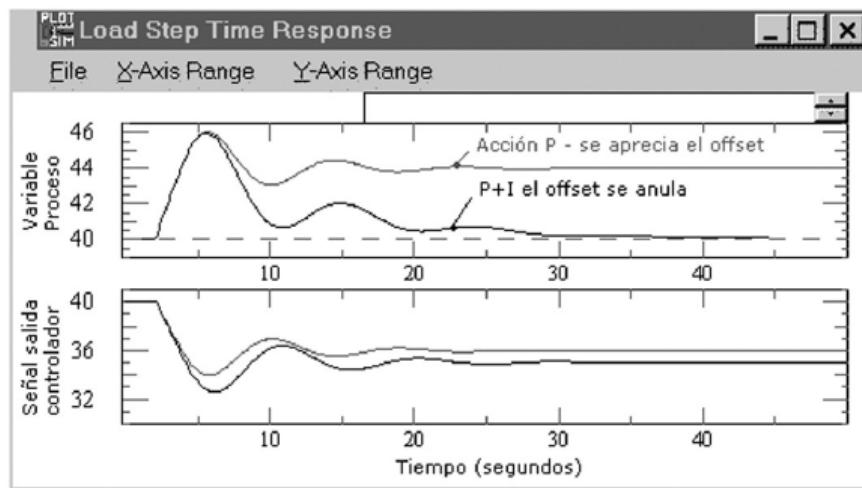


Figura 2.18. Respuesta del controlador PI a un cambio de carga

Existe un fenómeno denominado saturación integral, que se presenta cuando la variable queda fuera de los límites de la banda proporcional.

2.2.4.4. 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, debido a la acción proporcional, iguala a la parte de variación de la señal debido a la acción derivativa, cuando se aplica al instrumento una señal en rampa.

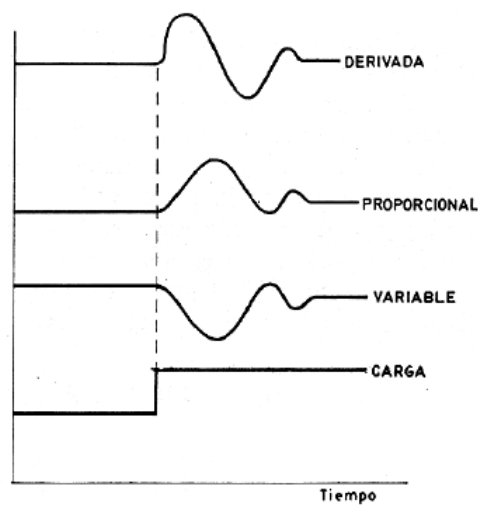


Figura 2.19. Control proporcional + derivativo

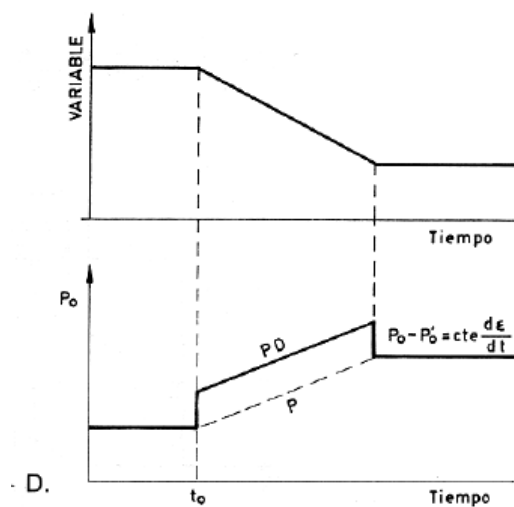


Figura 2.20. Minutos de anticipo de la acción derivada

2.2.4.5. 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 2.16, donde se supone que se presenta un cambio de carga por aumento de la demanda de agua caliente:

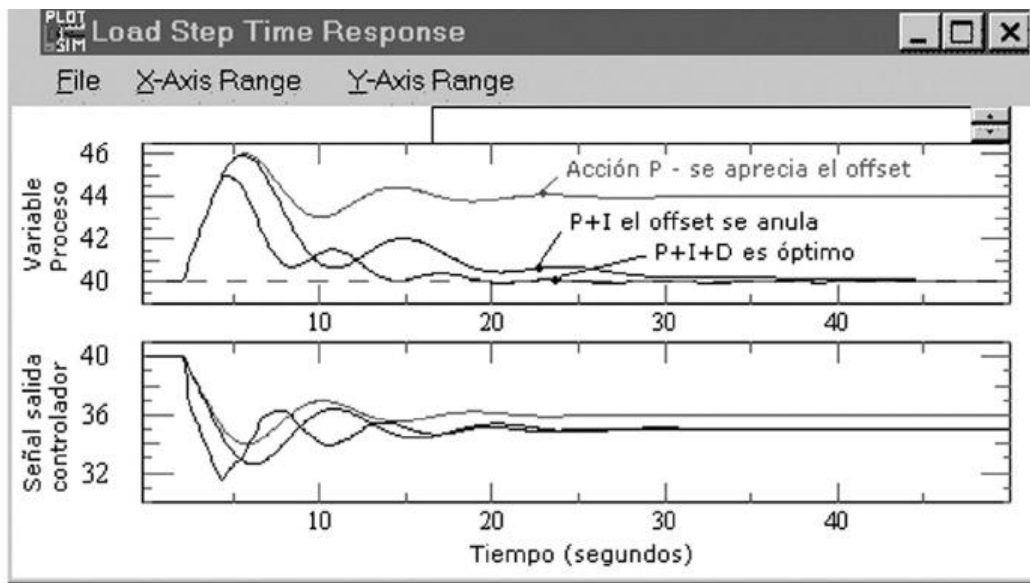


Figura 2.21 Control proporcional + integral + derivativo

1. La acción proporcional cambia la posición de la válvula proporcionalmente a la desviación de la variable con respecto al punto de consigna. La señal P (proporcional) mueve la válvula siguiendo fielmente los cambios de temperatura multiplicados por la ganancia.
2. La acción integral mueve la válvula a una velocidad proporcional a la desviación con respecto al punto de consigna. La señal I (integral) va sumando las áreas de diferencia entre la variable y el punto de consigna repitiendo la señal proporcional según su i (minutos/repetición).

3. La acción derivada corrige la posición de la válvula proporcionalmente a la velocidad de cambio de la variable controlada. La señal D (derivada) es la pendiente (tangente) de la curva descrita por la variable con lo que anticipa la posición de la válvula en el tiempo debida a la acción proporcional según el valor de d (minutos de anticipo).

La señal que llega a la válvula de control es en todo momento la suma de cada una de las señales de las acciones proporcional + integral + derivada del controlador [3].

Tabla 2.1. Guía de selección de sistemas de control

<u>Lazo de control</u>	<u>Capacitancia del proceso</u>	<u>Resistencia del proceso</u>	<u>Cambio de carga del proceso</u>	<u>Aplicaciones</u>
Todo-nada	Grande	Cualquiera	Cualquiera	Control de nivel y temperatura en procesos de gran capacidad
Flotante	Media	Cualquiera	Cualquiera	Procesos con pequeños tiempos de retardo
Proporcional	Pequeña a media	Pequeña	Moderada	Presión, temperatura y nivel donde el offset no es inconveniente
Proporcional + Integral	Cualquiera	Pequeña	Cualquiera	La mayor parte de aplicaciones, incluyendo el caudal
Proporcional + Derivado	Media	Pequeña	Cualquiera	Cuando es necesaria una gran estabilidad con un offset mínimo y sin necesidad de acción integral
Proporcional + Integral + Derivada	Cualquiera	Grande	Rápido	Procesos con cambios rápidos y retardos apreciables (control de temperatura en intercambiador de calor)

2.2.4.6. Control por lógica difusa

La lógica difusa fue desarrollada por Zadeh en 1965 y es adecuada para el control de procesos no lineales y con un comportamiento variable en el tiempo. En 1970, apareció el controlador estático por lógica difusa al que siguió, inmediatamente, el controlador adaptativo.

Mientras en el control digital la señal de salida es un conjunto de bits con dos valores o señales posibles, SI o NO, TODO o NADA, 1 o 0, la lógica difusa o

borrosa utiliza operadores para describir un sistema mediante reglas. Por ejemplo, aplicada al control de temperatura de un producto, afirmaría "el producto está un poco caliente" o "algo frío", "muy caliente" o "justo lo caliente que deseamos".

La lógica difusa hace mucho más humano el control, pues tiene muchos puntos en contacto con el lenguaje corriente.

Un ejemplo de pertenencia de un elemento a un conjunto dado obedece a una lógica multivaluada dentro del intervalo [0,1], es decir, que la transición entre pertenecer o no a un conjunto es gradual.

Así, la lógica difusa indica, por ejemplo, que una persona (dentro del universo Y) de 1,80 m está dentro de las personas (A) comprendidas entre las de 0,5 m [0,0] y las de 2 m [1,0] en que puede dividirse la población según este particular criterio [3].

$$\mu: Y \rightarrow [(0,0) (1,0)]$$
$$\mu(y) = \text{grado de pertenencia de } y \text{ dentro de } A$$

Un simple instrumento muy utilizado en la industria que puede considerarse de lógica difusa es el termostato. Trabaja con dos reglas de decisión (*IF (SI) - THEN (ENTONCES)*), que pertenecen a un modelo lingüístico de proposición difusa:

(1) SI la temperatura es inferior al punto de consigna ENTONCES da calor (IF temperatura < consigna THEN contacto cerrado (da calor)).

(2) SI la temperatura es superior al punto de consigna ENTONCES no da calor (IF temperatura > consigna THEN contacto abierto (no da calor)).

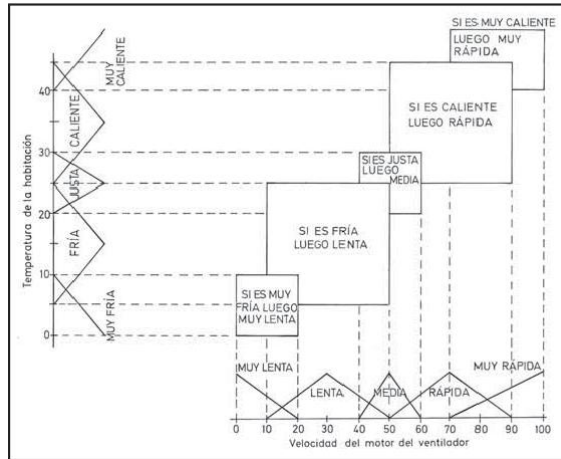


Figura 2.22. Control por lógica difusa del aire acondicionado de una habitación.

En la figura 2.22 puede verse un ejemplo de control por lógica difusa. La relación que existe entre la temperatura de una habitación y las velocidades del motor del ventilador de aire acondicionado, considerando constante su temperatura.

Un algoritmo de lógica difusa que describe la respuesta de un controlador *PID* es:

$$\text{IF } y(t) \text{ es } A \text{ AND } y'(t) \text{ es } B \text{ AND } u(t) \text{ es } C \text{ THEN } \ddot{y}(t) \text{ es } D$$

con:

$$u(t) = \text{señal de entrada}$$

$$y(t) = \text{señal de salida}$$

$$y'(t) = \text{señal de salida derivada}$$

$$\ddot{y}(t) = \text{señal de salida de segunda derivada}$$

A, B, C y D = reglas de lógica difusa de funciones $\mu(Y), \mu(\dot{Y}), \mu(U), \mu(\ddot{Y})$, donde Y, \dot{Y}, U, \ddot{Y} son los universos de las variables

La regla de lógica difusa es:

$$R = A \times B \times C \times D$$

$$\mu(Y, \dot{Y}, U, \ddot{Y}) = \min \{ \mu(Y), \mu(\dot{Y}), \mu(U), \mu(\ddot{Y}) \}$$

Y, componiendo las dos expresiones, resulta como salida del modelo:

$$y'(t + T) = R (u(t) \times y(t) \times y'(t))$$

Existen dos tipos de controladores en lógica difusa, los basados en reglas estáticas y los adaptativos.

Los *estáticos* trabajan minimizando una función de error en la regla:

IF e es E AND de es ΔE AND d^2e es $\Delta^2 E$ THEN du es ΔU

en la que:

e = error entre la salida del proceso y un punto de consigna deseado

de = error de la primera derivada en entre la salida del proceso y un punto de consigna deseado

d^2e = error de la segunda derivada entre la salida del proceso y un punto de consigna deseado

du = derivada de la variable controlada

$E, \Delta E, \Delta^2 E, \Delta U$ = reglas de lógica difusa

En la figura 2.23 puede verse el esquema de un controlador de lógica difusa estático. Los controladores de lógica difusa *adaptativos* aplican una regla inicial, que puede no ser conocida exactamente, y una segunda regla de adaptación a los cambios paramétricos del proceso, lo que permite un control y aprendizaje simultáneos.

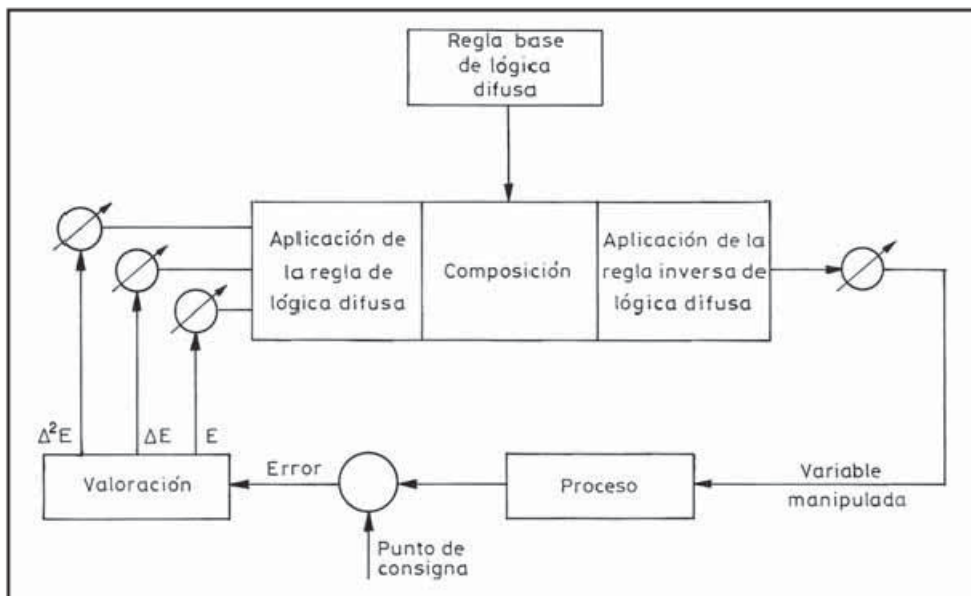


Figura 2.23. Controlador de lógica difusa estático

Existen dos niveles, el del controlador idéntico al estático descrito anteriormente, y el del nivel de adaptación que usa una tabla de comportamiento para gobernar

una regla de modificación del proceso. En lugar de la tabla de comportamiento pueden utilizarse criterios de evaluación del error.

A. Mamdani combinó las ideas de los sistemas basados en reglas con el uso de parámetros difusos para construir un controlador basado en el razonamiento de un operador humano (figura 2.2.4). El método de razonamiento de Mamdani está basado en la superposición de las salidas de cada una de las reglas que componen el modelo difuso para una determinada entrada. La relación difusa es interpretada como una intersección de conjuntos difusos. En el control adaptativo, las reglas son:

- (1) La regla inicial puede no ser conocida exactamente.
- (2) Regla de adaptación a los cambios paramétricos del proceso.

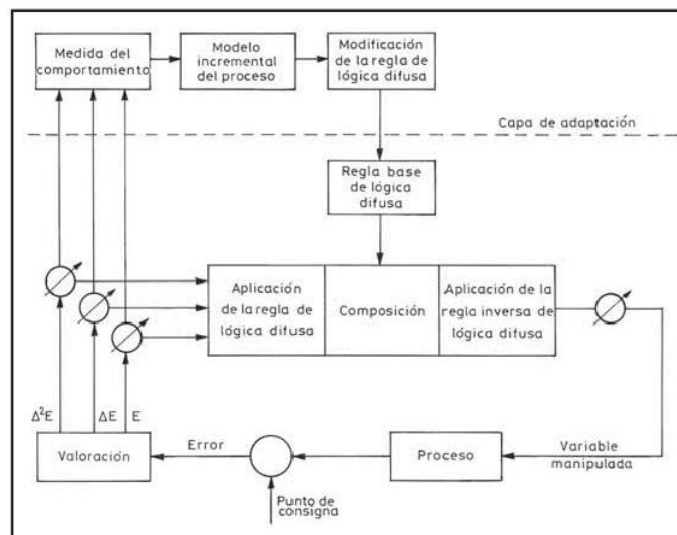


Figura 2.24. Control adaptativo directo de Mamdani

Existen también controladores adaptativos expertos que se adaptan a la dinámica del proceso y del entorno y en los que se usa un índice de comportamiento del proceso. Si éste cambia de características el controlador se adapta, excepto en el caso de que el modelo del proceso se considere no fiable, y entonces se usa el índice relacionado con el pasado del proceso para realizar los ajustes.

En la figura 2.25 puede verse el control por lógica difusa de un proceso de fermentación.

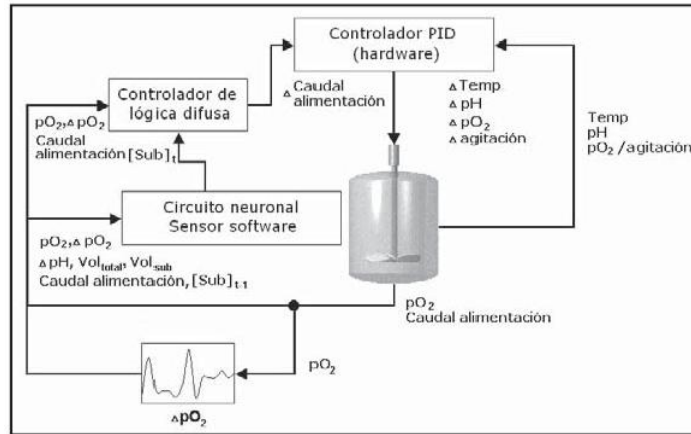


Figura 2.25. Control por lógica difusa de un proceso de fermentación.

El control por lógica difusa, aunque está siendo utilizado desde hace 20 años, todavía no está reconocido totalmente en algunos sectores del control industrial. Existe un área de solape entre el control por lógica difusa y los circuitos neuronales [6].

2.3 Marco conceptual.

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

La estación de flujo 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, así como también se utilizan el registrador y el computador para monitorear y controlar la variable flujo de la estación.

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

A continuación se comentan sobre algunos sistemas que son creados como estaciones de trabajo para el adiestramiento de los estudiantes en las áreas de instrumentación y control [3].

2.3.1. Estación de procesos multivariable

Descripción: Esta estación de procesos es utilizada para realizar prácticas relacionadas con el monitoreo y control de las variables: Temperatura, presión, nivel y caudal.

Como evolución de las estaciones de procesos que existen en el laboratorio se encuentra que los transmisores de las variables físicas son inteligentes, tienen la posibilidad de modificar los parámetros del variador de velocidad mediante el uso de un panel básico de operaciones (BOP), así como el registro y monitoreo de los datos se lo realiza en un touch panel, omitiendo los dos equipos utilizados en la actualidad como son el computador de escritorio, el registrador y modificando las características del variador de velocidad.

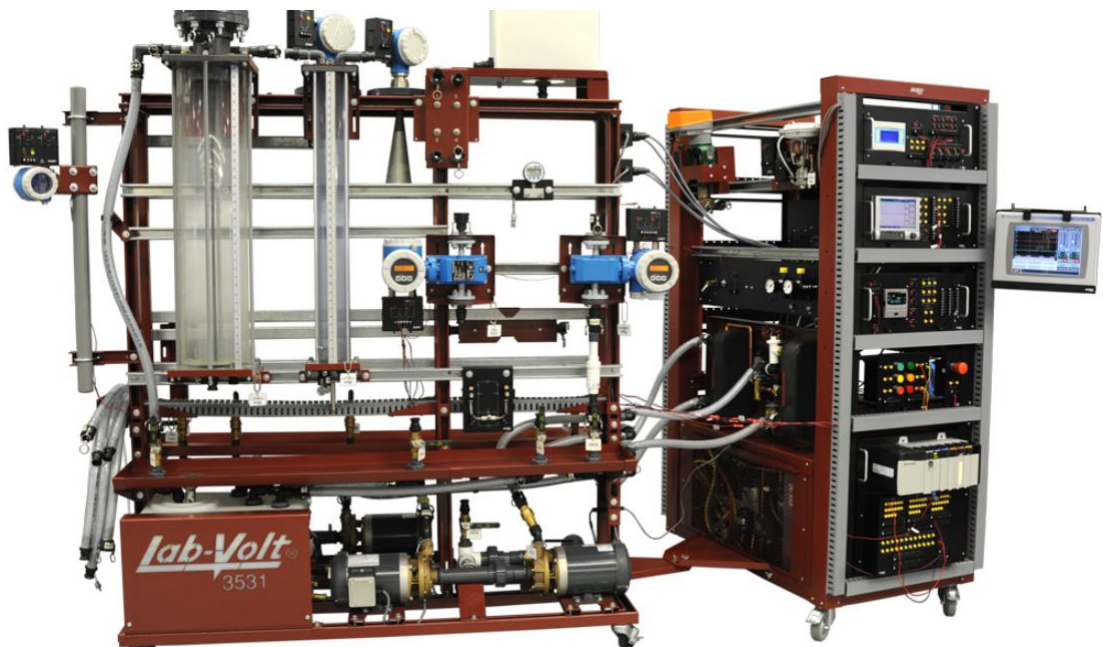


Figura 2.26 Estación de procesos multivariables Labvolt

Lo que se ha investigado en los diferentes fabricantes de estaciones de procesos industriales es que en muchos bancos de prueba didácticos son totalmente remotos, esto quiere decir que tanto el monitoreo y control de las estaciones se las realiza desde un panel de visualización que poseen, por lo que es una forma muy eficiente de realizar el monitoreo y control.

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 flujo, para ello se realizará la investigación del funcionamiento de la estación de procesos industriales de forma particular la estación de flujo del fabricante Labvolt, esta información se obtiene de la guía de usuario de la estación de procesos proporcionada por labvolt.

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 flujo, la información de los modos de control 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 Procedimientos de la investigación.

- Evaluación energética de la estación de flujo utilizando los componentes actuales.
- Reemplazo del controlador universal por el PLC y evaluación del consumo energética de cada componente.
- Reemplazo del computador y el registrador por el Touch panel y evaluación del consumo energético de cada componente.
- Obtención el modelo matemático y simulación del funcionamiento de la estación de flujo para el control automático utilizando los controles P, PI, PID.
- Implementación del control Proporcional, sintonía del controlador utilizando el método de ganancia límite y evaluación del consumo de energía en un rango de 0 a 10GPM.
- Implementación del control Proporcional integral, sintonía del controlador utilizando el método de ganancia límite y evaluación del consumo de energía en un rango de 0 a 10GPM.
- Implementación del control Proporcional integral derivativo, sintonía del controlador utilizando el método de ganancia límite y evaluación del consumo de energía en un rango de 0 a 10GPM.

3.3 Operacionalización de las variables

Cuadro 3.1 Variable Independiente: Monitoreo y Control del Proceso.

Concepto	Categoría	Indicadores	Item	Técnicas	Instrumentos
Visualizar las variables físicas y controlar el accionamiento eléctrico, con el fin de disminuir el consumo eléctrico	Controladores inteligentes	Control de flujo	lt/min	Medición	Transmisor de flujo, PLC
	Pantallas de visualización	Visualización de las variables	lt/min, históricos	Monitoreo	Touch Panel
	Consumo energético	Energía consumida, rendimiento	kW/h, Porcentaje	Medición y cálculo	Medidor de potencia/ software

Cuadro 3.2 Variable dependiente: Consumo De Energía Eléctrica.

Concepto	Categoría	Indicadores	Item	Técnicas	Instrumentos
Es la determinación de la cantidad de energía que consume el sistema	Consumo de la estación	Consumo de energía eléctrica	kW/h	Medición	Medidor de Potencia
	Consumo del accionamiento eléctrico	Consumo de energía eléctrica	kW/h	Medición	Medidor de Potencia
	Consumo de las computadoras	Consumo de energía eléctrica	kW/h	Medición	Medidor de Potencia
	Consumo del registrador	Consumo de energía eléctrica	kW/h	Medición	Medidor de Potencia
	Caudal	Variación del caudal	Pulgadas de H ₂ O	Medición	Transmisor de flujo

3.4 Funcionamiento del proceso

El proceso consiste en el monitoreo y control de la variable flujo de agua, para realizar dicho monitoreo y control existe un transmisor de corriente Smart que genera una señal de 4-20mA, que corresponde a un valor de caudal de 0-10 GPM, esta señal es insertada hacia el controlador Foxboro 761C de flujo 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 integral derivativo), después de implementar el algoritmo de control se genera una señal de salida de 4-20mA esta señal va hacia el variador de velocidad que es

el encargado de regular la frecuencia del motor y la bomba y con ello tener una regulación proporcional de caudal. De acuerdo al valor que se introduzca en el valor de consigna el control automático debe ser capaz de regular al valor requerido en la menor cantidad de tiempo.

Además como complemento de las prácticas de laboratorio se conecta un registrador de tipo pluma, cuya función es registrar los datos de la variable del proceso en una hoja milimetrada. También para la realización del HMI (Interfaz Humano máquina) se interactúa entre el controlador y un software dedicado a los sistemas SCADA esto instalado en un computador.

Todos ellos son los componentes de la estación de flujo en base a cada uno de sus componentes, se analizará el consumo eléctrico de forma individual y conjunta, para obtener los datos.

En la siguiente gráfica se presentan los componentes utilizados en las prácticas en la actualidad en el laboratorio de redes industriales y control de procesos.



Figura 3.1. Componentes de la estación de flujo



Figura 3.2. Registrador de datos de flujo, equipo integrable a la estación de flujo para el registro de datos.



Figura 3.3. Computador de escritorio y monitor, equipos necesario para el diseño del HMI entre la estación y el computador

De acuerdo a la descripción de los elementos que son parte de las prácticas de laboratorio de la estación de flujo se identifican los equipos y accionamientos utilizados y se identifican como mayores consumidores de energía eléctrica la bomba centrífuga, el computador personal, el registrador de variables y el controlador digital, en los cuales se mide la potencia eléctrica utilizando un analizador de red.

3.4.1 Bomba centrífuga. Consumo de corriente de acuerdo al valor del variador, las aplicaciones prácticas que se realizan son didácticas por lo que es necesario investigar los tipos de controles existentes e identificar el control que sea más eficiente desde el punto de vista del control y el ahorro energético.

A continuación se detallan los datos de la bomba utilizada.

Tabla 3.1. Datos del fabricante de la bomba Deyton

MOD: 3N23D	HP: ¾ RPM: 3450
V: 208-220/440	FLA: 2.6 – 2.5/1.25
FR: D56J	HZ: 60 PH: 3 KVA J CODE
INS: A	MAX 40°C DUTY: CONT AMB
SF: 1.0	BRG: BALL
MTR REG: R696950	DATA CODE: E94B

3.4.2 Computador personal. Consumo de corriente alto, ya que para la correcta utilización funcionan en conjunto el monitor y la CPU, y estos computadores son de tecnología antigua por lo que el consumo de energía es mayor que el de las computadoras actuales.

3.4.3 Registrador de pluma. Consumo de corriente superior a los registradores digitales existentes en el mercado.

A continuación se presenta la conexión eléctrica necesaria para el funcionamiento de la estación de procesos industriales.

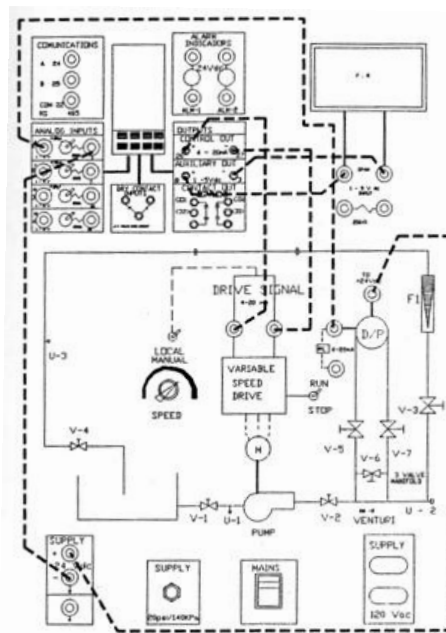


Figura 3.4 Diagrama de lazo del control de la estación de flujo

Simbología:

Línea segmentada gruesa = conexión eléctrica

Línea continua delgada = conexión hidráulica

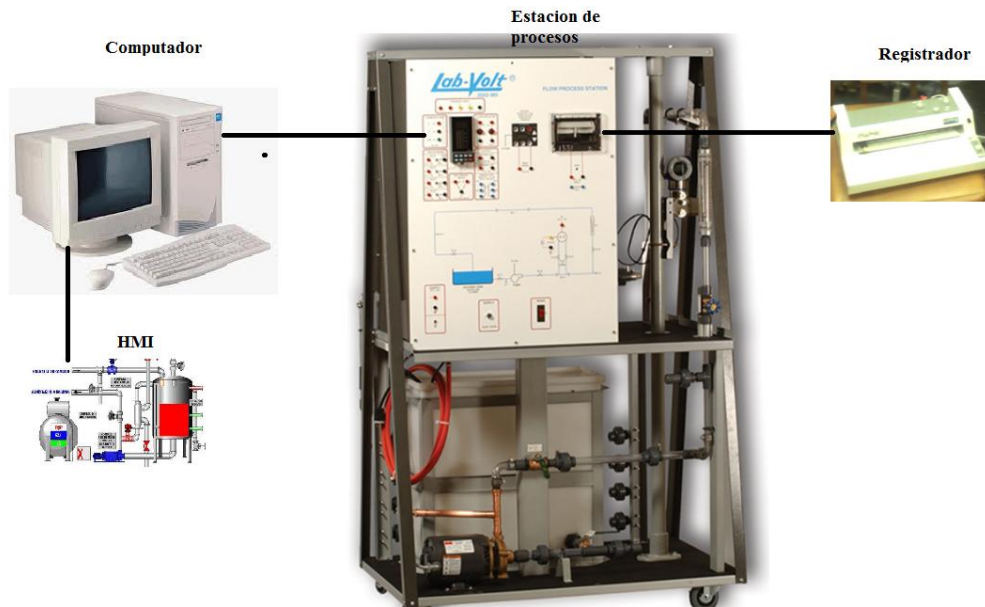


Figura 3.5 Representación gráfica de las conexiones realizadas para el funcionamiento de la estación del proceso flujo.

3.5 Evaluación Energética De La Estación De Flujo En El Laboratorio De Redes Industriales Y Control De Procesos.

Para la evaluación de la energía que consume la estación de procesos se ha realizado en dos partes:

La primera parte consiste en evaluar el consumo energético de cada uno de sus componentes, para determinar el consumo individual de cada uno de ellos, así como reemplazar los equipos mencionados por equipos de la misma funcionalidad pero de menor consumo energético.

La segunda parte consiste en evaluar los controladores existentes para la variable flujo así como determinar el controlador que realice de forma eficiente el control automático así como generar el menor consumo eléctrico del accionamiento como es la bomba centrífuga.

3.5.1 Evaluación del consumo energético de los componentes utilizados en el control automático de la estación de procesos.

3.5.1.1 Equipo utilizado

Power Logger 1735.- Puede realizar estudios de tensión, corriente y potencia para determinar las cargas existentes.

Una vez realizada la conexión del proceso descrito anteriormente se procedió a instalar el registrador 1735 Power Logger el cual permitirá obtener las magnitudes eléctricas en forma específica la energía consumida por la estación de procesos.

Este instrumento de medición se lo implementa al realizar la medición de los componentes de la estación de flujo y detallar el consumo eléctrico de cada uno de ellos, así como también para evaluar el consumo de energía eléctrica de los tres tipos de controles que se van a implementar.

A continuación se presenta el esquema de conexión realizado tomando en cuenta que la estación de procesos utiliza para su funcionamiento una señal monofásica de 127VAC.

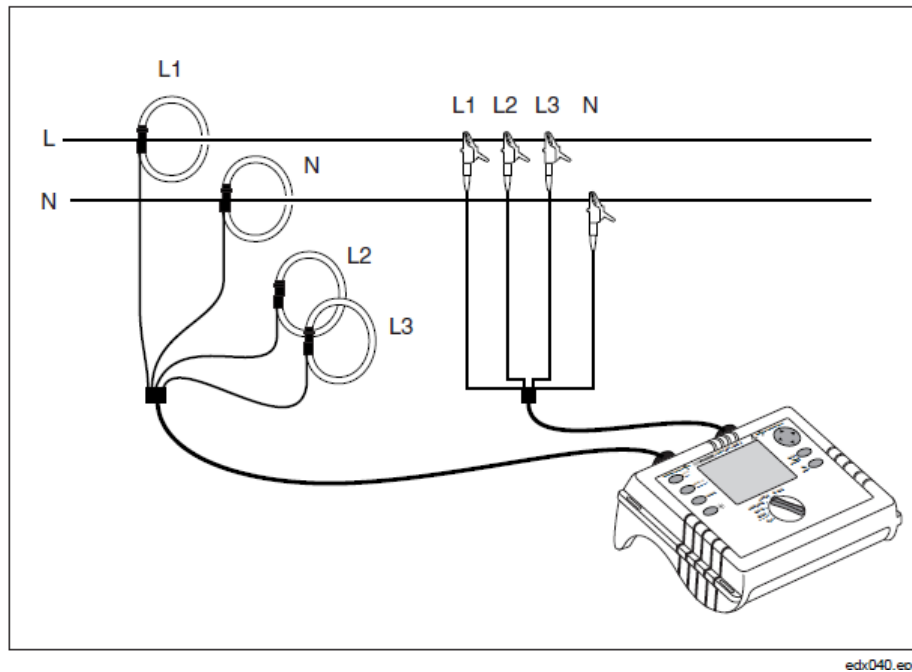


Figura 3.6 Diagrama de conexión una red monofásica

3.5.1.2 Medición de la potencia en los componentes actuales utilizados en la estación de procesos.

Una vez que se realizó la conexión del analizador de red se procede a poner en funcionamiento la estación de procesos desarrollando varias prácticas de laboratorio, en las cuales se toman los datos en varios días por 6 horas diarias, realizando la medición de la demanda de potencia del registrador, el computador de escritorio, el controlador.

Las mediciones se presentarán en el capítulo 4.

Para poder reemplazar el controlador foxboro por un controlador de procesos que cumpla las mismas funcionalidades se opta por utilizar un PLC (Controlador lógico programable) el cual tiene mayores prestaciones y consume menor energía que el controlador foxboro, lo que se va a realizar es reemplazar el controlador antiguo por el PLC y realizar las mediciones con el analizador de red a ver si existe disminución de consumo eléctrico y determinar el nivel de ahorro de energía que proporciona.

3.5.1.3 Controladores Digitales Industriales

Los controladores industriales tienen la robustez para trabajar en ambientes hostiles e industriales, en los cuales estén presentes interferencias como ruido inductivo (generado por todo tipo de motor), ruido capacitivo (generado por las líneas de alta tensión), así como posean la capacidad de realizar los diferentes modos de control existentes.

En la actualidad los controladores lógicos programables son los más utilizados para diferentes aplicaciones entre las más comunes el monitoreo y control de procesos industriales, los fabricantes de estos dispositivos los hacen más eficientes en tipos de programación y en consumo de energía eléctrica que los equipos utilizados años atrás para el monitoreo y control de procesos de manera específica los controladores digitales universales. Por esta razón se opta por reemplazar el controlador Foxboro 761C por el controlador lógico programable.

3.5.1.4 Reemplazo del controlador digital universal (Controlador foxboro 761C) por el controlador lógico programable (PLC S7-200) y medición del consumo de potencia del equipo.

Se van a realizar las mismas pruebas de monitoreo y control del proceso, reemplazando el controlador digital universal por el controlador lógico programable, a fin de visualizar si existe una disminución en el consumo eléctrico. Para realizar las pruebas de funcionamiento se conecta como se presenta en la figura 3.7. Nótese que a diferencia de la evaluación de los componentes del proceso anterior en este proceso se reemplazo el controlador foxboro por el PLC S7-200 CPU 226.

Luego de realizar las conexiones, es necesario colocar el analizador de red de la forma que se explica en la figura 3.6 para las mediciones de demanda de potencia de la estación de flujo.

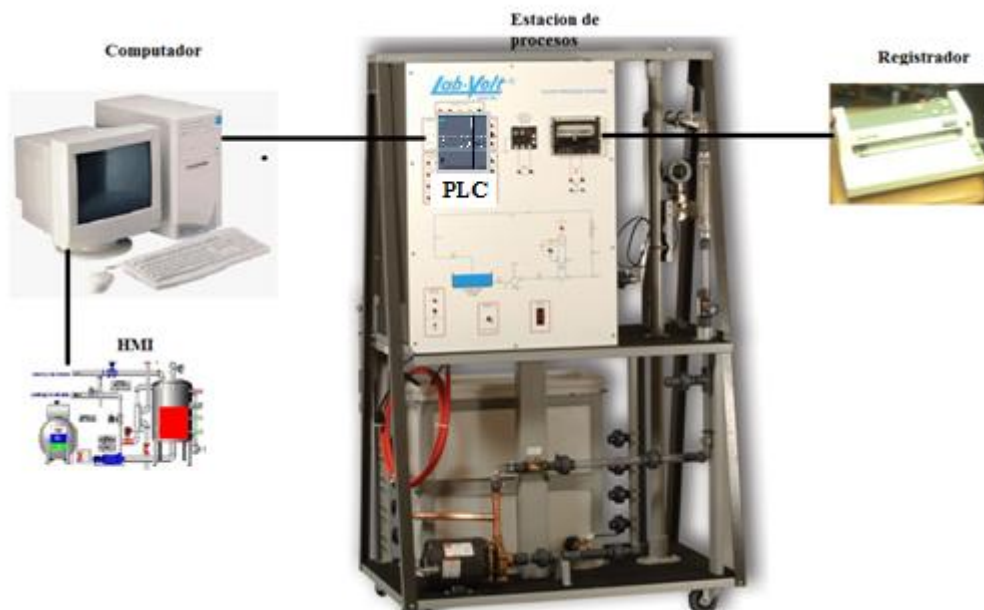


Figura 3.7. Representación gráfica de las conexiones realizadas para el funcionamiento de la estación del proceso flujo, reemplazando el PLC por el controlador Foxboro 761C.

Las mediciones se presentarán en el capítulo 4.

3.5.1.5 Monitoreo y registro de la variable flujo

Para realizar el monitoreo y control de la variable flujo en el laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos se utiliza un computador personal el cual se comunica vía RS-232 con el controlador digital universal o con el controlador lógico programable, en el computador personal se encuentra instalado un software que permite diseñar HMIs para monitorear y controlar el proceso flujo en el cual se presenta la variable flujo, se presenta la opción cambio de set-point, así como el manejo de alarmas, históricos y tendencias.

El registrador es conectado al transmisor del proceso y va dibujando el histórico de los datos en el tiempo.

Las funciones del computador personal y el registrador pueden ser reemplazados por un touch panel el cual posee todas las funciones que se utilizan para el monitoreo y control del proceso.

3.5.1.6 Reemplazo del controlador digital universal (Controlador foxboro 761C) por el controlador lógico programable (PLC S7-200), reemplazo del computador personal y del registrador de datos por el touch panel red Lion G3 y medición de la demanda de potencia de los equipos.

Se va a realizar las mismas pruebas de monitoreo y control del proceso reemplazando el controlador digital universal por el controlador lógico programable el registrador de datos y el computador personal por un touch panel a fin de visualizar si existe una disminución en el consumo eléctrico.

Para realizar las pruebas de funcionamiento se conecta como se presenta en la figura 3.8. Luego de realizar las conexiones, es necesario colocar el analizador de red de la forma que se explica en la figura 3.6 para las mediciones de demanda de potencia de la estación de flujo.



Figura 3.8. Representación gráfica de las conexiones realizadas para el funcionamiento de la estación del proceso flujo, reemplazando el PLC por el controlador Foxboro 761C y reemplazando el computador personal y el registrador por el touch panel Red Lion G3.

Las mediciones se presentarán en el capítulo 4.

3.5.2 Obtención experimental de Modelos

Muchos sistemas en la práctica pueden describirse aproximadamente con un modelo muy simple, de primer o segundo orden. A menudo estos modelos simples son suficientes para realizar un primer diseño de control.

Estos modelos simples pueden obtenerse mediante ensayos experimentales sobre el sistema. La idea es proponer la estructura apropiada, por ejemplo un primer

orden con retardo. Se presenta la ecuación 3.1 que corresponde a un sistema de primer orden con retardo.

$$G(s) = \frac{Ke^{-sT}}{\tau s + 1}, \quad (3.1)$$

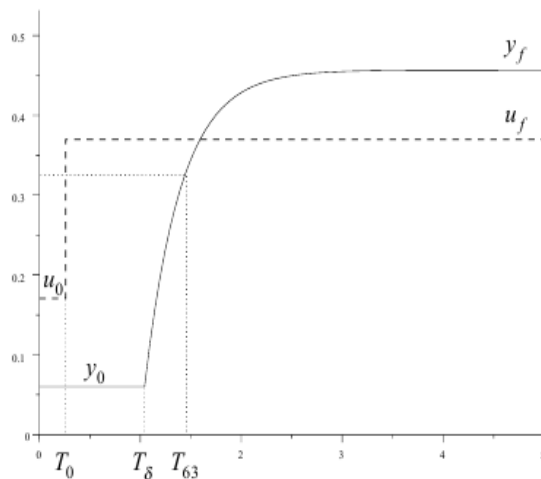
Y luego inferir los valores de los parámetros K, T y τ de la respuesta del sistema a lazo abierto del sistema. Es común emplear la respuesta al escalón.

Existen técnicas más avanzadas de estimación del modelo mediante ensayos experimentales, conocidos como técnicas de identificación de sistemas.

Estas técnicas permiten estimar en forma optimizada tanto los parámetros como la estructura más apropiada para un modelo del sistema, inclusive para sistemas inestables a lazo abierto.

Ahora se verá como identificar en forma experimental un sistema de primer orden a partir de la respuesta al escalón.

Primer orden con retardo



Medir:

- u_0 nivel inicial de entrada.
- u_f nivel final de entrada.
- y_0 nivel inicial de salida.
- y_f nivel final de salida.
- T_0 tiempo de cambio de la entrada.
- T_δ tiempo en que la salida comienza a responder.
- T_{63} tiempo en que la salida alcanza el 63,2% de $y_f - y_0$.

Calcular:

$$\hat{K} = \frac{y_f - y_0}{u_f - u_0}; \quad \hat{\tau} = T_{63} - T_\delta;$$

$$\hat{T}_r = T_\delta - T_0$$

Transferencia estimada:

$$\hat{G}(s) = \frac{\hat{K}e^{-s\hat{T}_r}}{\hat{\tau}s + 1}$$

Figura 3.9. Representación de un sistema de primer orden

3.5.3 Implementación del control Proporcional a la estación de flujo del laboratorio.

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

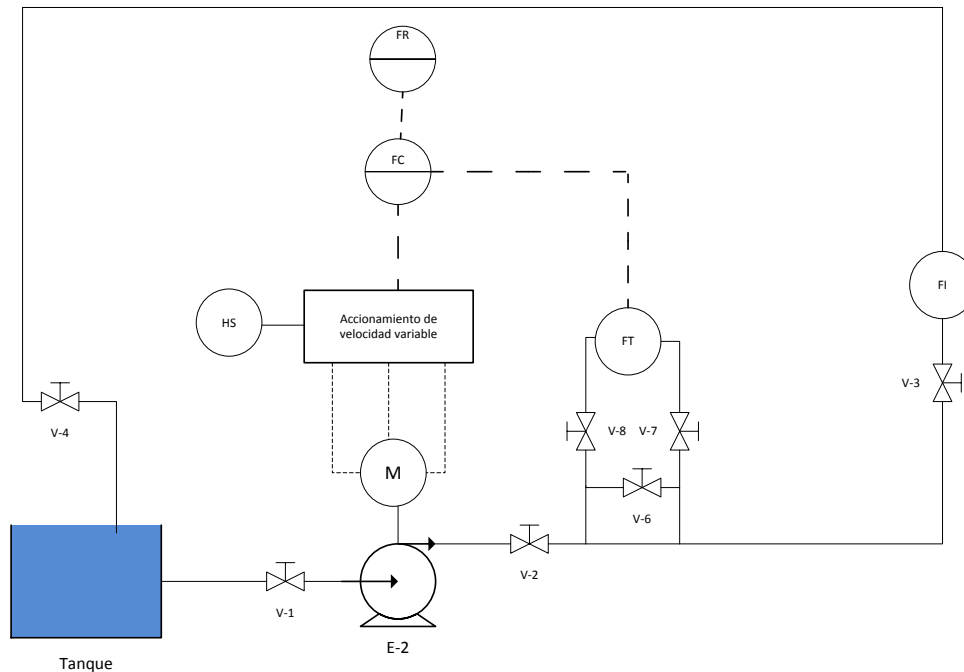


Figura 3.10. Diagrama P&ID de la estación de flujo

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.

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

3.5.3.1 Pasos para la configuración y programación del PLC S7-200 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.

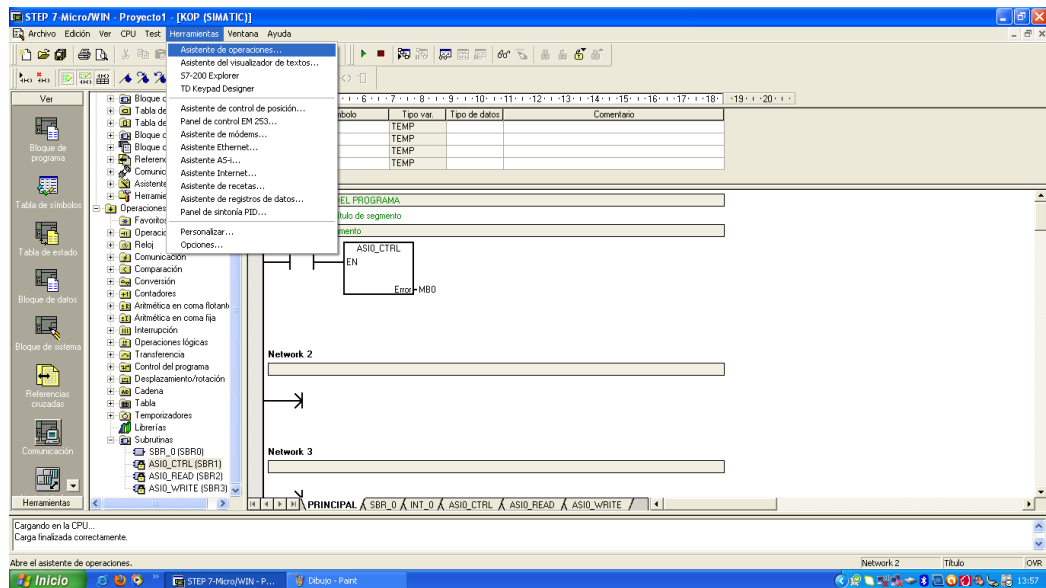


Figura 3.11 Pantalla que indica el asistente de operaciones

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.

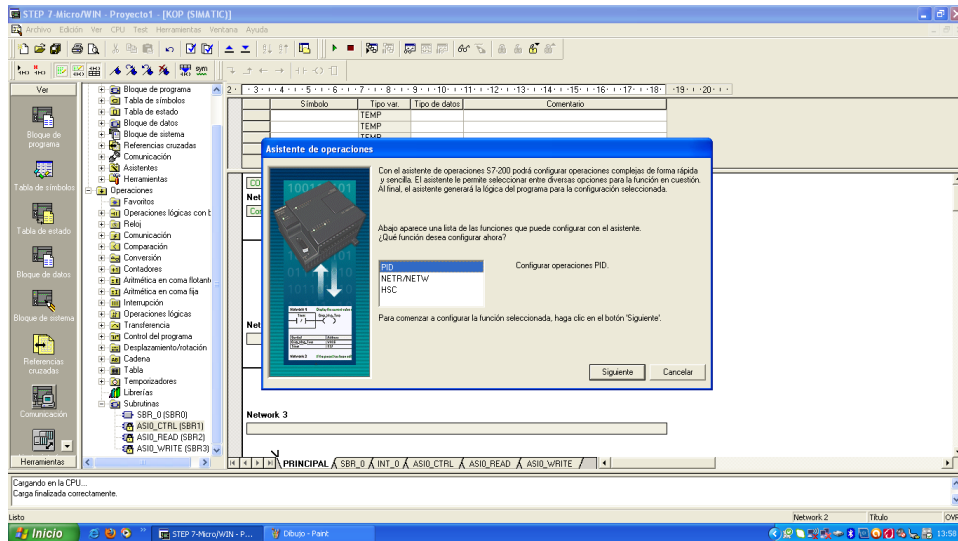


Figura 3.12 Pantalla que indica la selección del control PID

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 flujo de agua, por lo que se selecciona el PID 0.

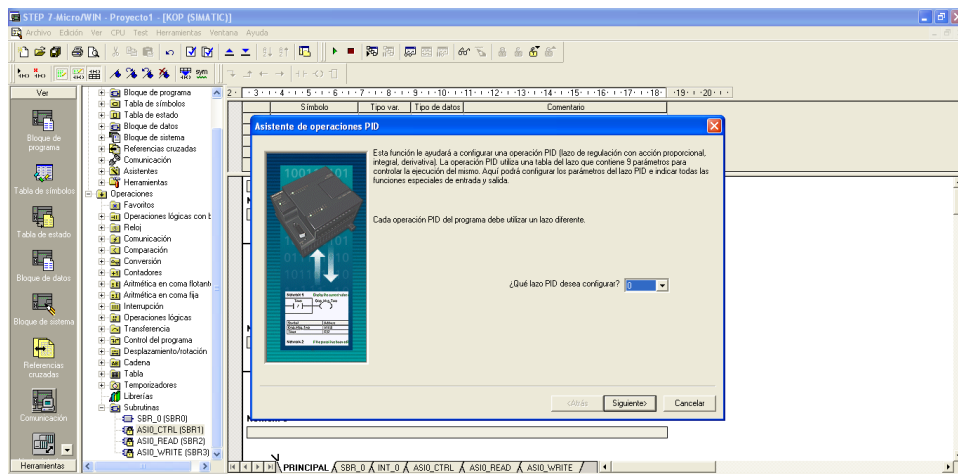


Figura 3.13 Pantalla que indica el número de lazo de control a utilizar

4. A continuación es necesario colocar la consigna de lazo este valor se ubica en porcentaje de 0 a 100%, donde 0% equivale a 0 GPM y 100% equivale a 10 GPM.

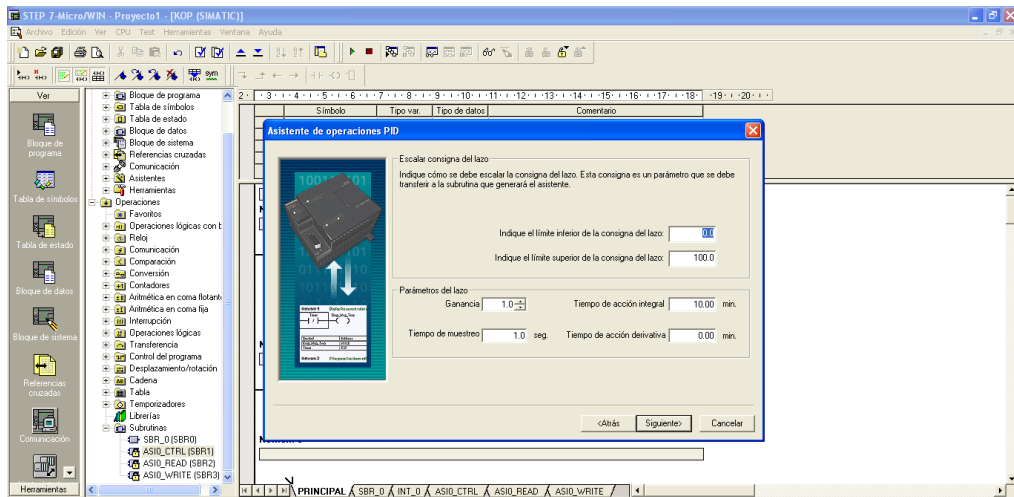


Figura 3.14 Pantalla que indica los límites a utilizar en la consigna del lazo

5. El asistente especifica el tipo de escalamiento a utilizar en este caso se elige unipolar porque el valor del transmisor de flujo es de 4-20mA y no es corriente diferencial, se utiliza el offset porque este ítem es necesario cuando se utilizan los transmisores de corriente que generan una señal de 4-20mA.

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

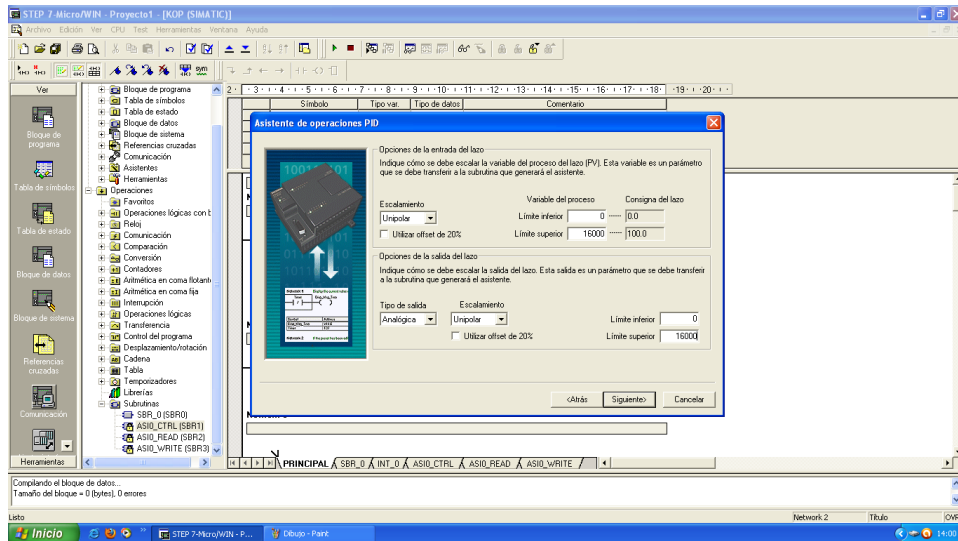


Figura 3.15 Pantalla de configuración de los parámetros de escalado.

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%.

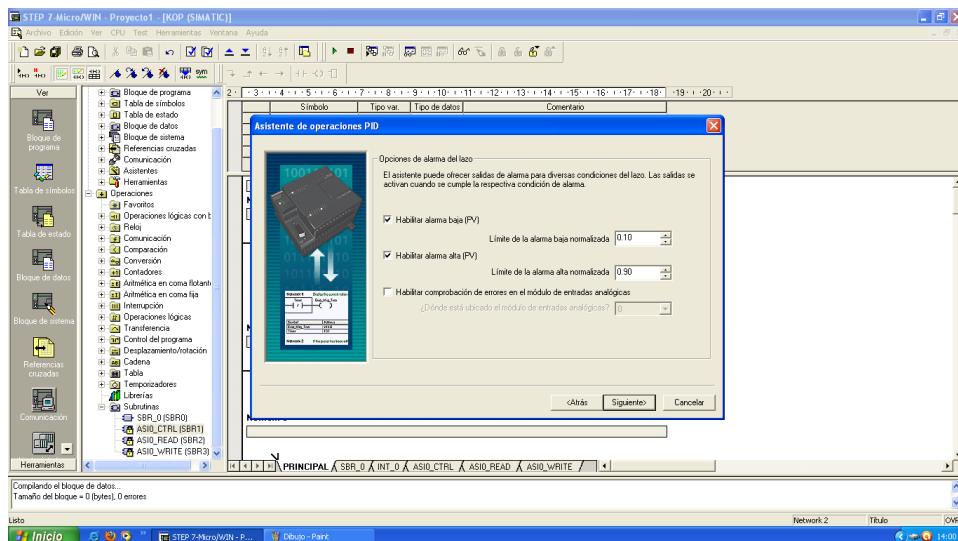


Figura 3.16 Pantalla de habilitación de alarmas

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.

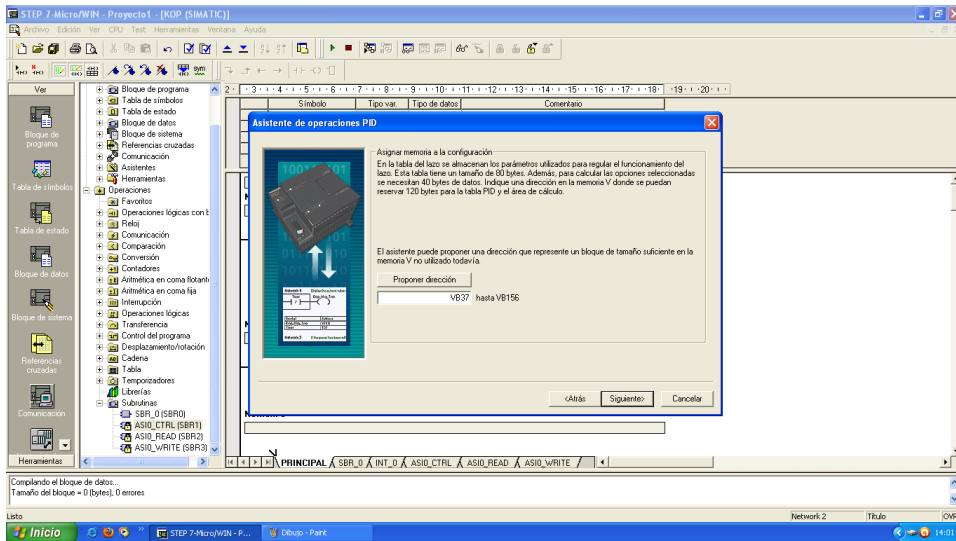


Figura 3.17 Pantalla de selección de la memoria a ser utilizada para la ejecución del algoritmo del control

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.

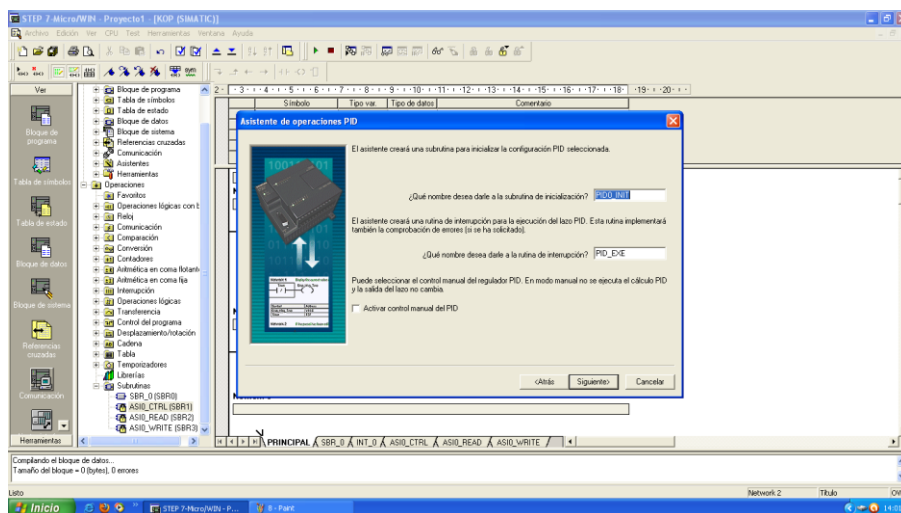


Figura 3.18 Pantalla de cambio de nombre de las subrutinas.

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

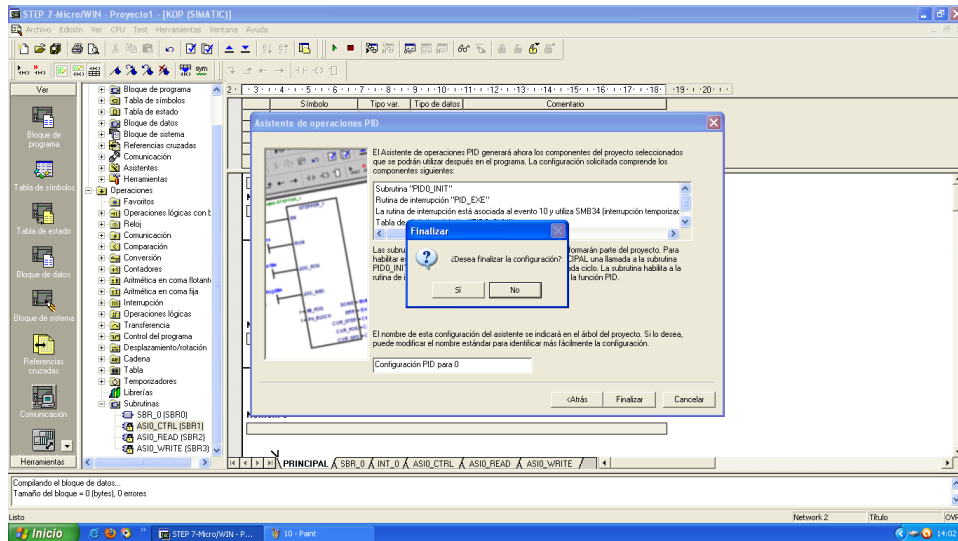


Figura 3.19 Pantalla de finalización de la configuración del asistente PID

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 10% del rango dinámico.

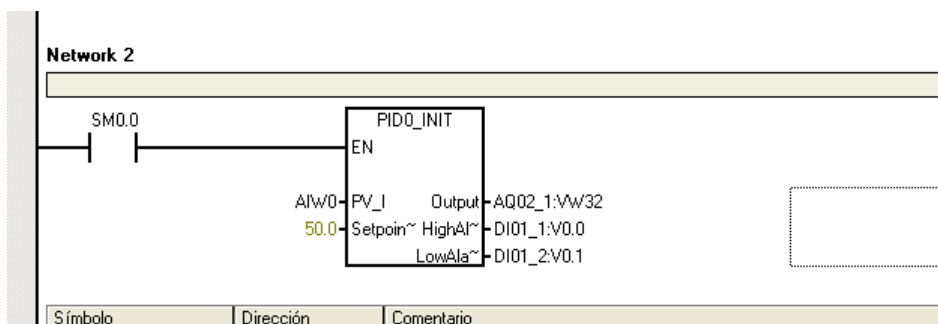


Figura 3.20 Programación desarrollada en microwin

11. Se utilizó el panel de sintonía en el mismo que se realizará la sintonía del proceso de flujo, 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.

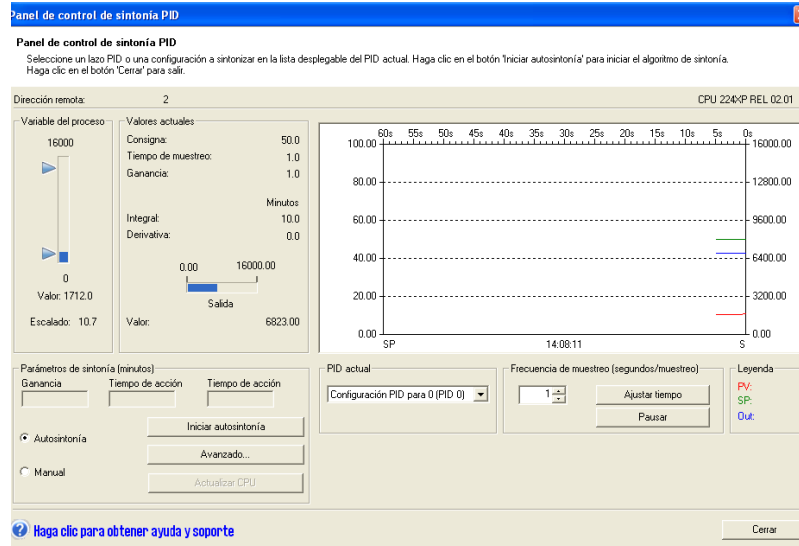


Figura 3.21 Pantalla de utilización del panel de sintonía

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 empieza a oscilar de modo continuo.

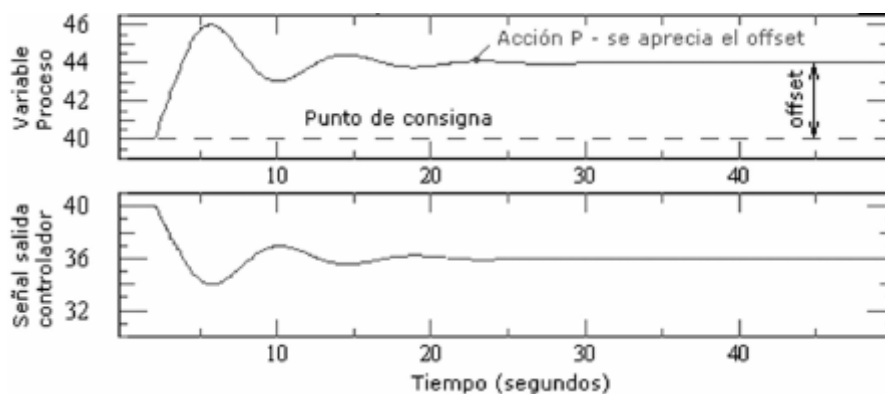


Figura 3.22. Gráfica de la señal de un control Proporcional

3.5.3.2 Pruebas experimentales realizadas.

Una vez realizada 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.

Las mediciones se presentarán en el capítulo 4.

3.5.3.2.1 Implementación del control Proporcional Integral a la estación de flujo 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 3.10

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 habilitan 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.

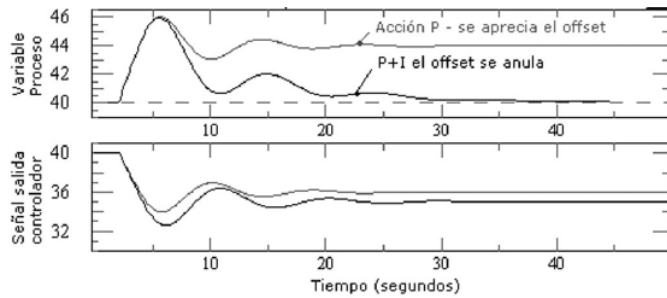


Figura 3.23. Gráfica del control Proporcional integral

3.5.3.2.2 Pruebas experimentales realizadas.

Una vez realizadas la programación, 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.

Las mediciones se presentarán en el capítulo 4.

3.5.3.2.3 Implementación del control Proporcional Integral Derivativo a la estación de flujo 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 3.10

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 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.

3.5.3.2.4 Pruebas experimentales realizadas.

Una vez realizada la programación, 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.

Las mediciones se presentarán en el capítulo 4.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se analizarán los resultados de las mediciones realizadas, se desarrollarán tablas comparativas, así como también se realizará la obtención del modelo matemático y se determinará el sistema más eficiente en consumo eléctrico.

4.1. Resultados de las mediciones de los equipos utilizados en la estación de flujo.

Las mediciones que se realizaron en la estación de procesos trabajando en su estado actual con todos sus componentes son:

Tabla 4.1. Valores obtenidos de las mediciones realizadas a los componentes de la estación de procesos: computador, controlador y registrador.

Fecha de medición	Potencia (W) del registrador de datos	Potencia (W) del computador de escritorio	Potencia (W) del controlador foxboro	Potencia total (W)	Potencia total (kW)	Energía consumida por día (kWh)
01/07/2013	13,2	258	48	319,2	0,3192	1,9152
02/07/2013	13,1	256	48	317,1	0,3171	1,9026
03/07/2013	13,2	253	47	313,2	0,3132	1,8792
04/07/2013	13,2	250	48	311,2	0,3112	1,8672
05/07/2013	13	255	47	315	0,315	1,89
08/07/2013	13,2	256	48	317,2	0,3172	1,9032
09/07/2013	13,2	258	47	318,2	0,3182	1,9092
10/07/2013	13,1	254	48	315,1	0,3151	1,8906
11/07/2013	13,2	252	47	312,2	0,3122	1,8732
12/07/2013	13,1	255	48	316,1	0,3161	1,8966
TOTAL	Consumo total de energía (kWh) de los componentes analizados					18,927

En la tabla 4.1 se presentan los valores de las mediciones realizadas a los equipos que forman parte complementaria de las actividades prácticas de la estación de procesos.

En los procesos industriales el principal objetivo es realizar el control automático de las variables de interés en el caso particular de esta investigación es el control automático del flujo de agua, por ello es que se analizan los diferentes tipos de equipos alternativos que existen en la actualidad con las mismas funcionalidades que los equipos existentes en la estación de procesos.

El consumo de energía diario de los componentes indicados en la tabla 4.1 es de 1,9 kWh, considerando los datos históricos de la utilización diaria del laboratorio con un valor de 6 horas por día, con un periodo de mediciones de 10 días, existiendo en total un consumo de energía de 18,927kWh.

Tabla 4.2. Valores obtenidos de las mediciones realizadas a los componentes de la estación de procesos, reemplazando el controlador digital universal por el controlador lógico programable.

Fecha de medición	Potencia (W) del registrador de datos	Potencia (W) del computador de escritorio	Potencia (W) del controlador foxboro	Potencia total (W)	Potencia total (kW)	Energía consumida por día (kWh)
01/07/2013	13,2	258	12	283,2	0,2832	1,6992
02/07/2013	13,1	256	11	280,1	0,2801	1,6806
03/07/2013	13,2	253	12	278,2	0,2782	1,6692
04/07/2013	13,2	250	12	275,2	0,2752	1,6512
05/07/2013	13	255	12	280	0,28	1,68
08/07/2013	13,2	256	11	280,2	0,2802	1,6812
09/07/2013	13,2	258	12	283,2	0,2832	1,6992
10/07/2013	13,1	254	11	278,1	0,2781	1,6686
11/07/2013	13,2	252	12	277,2	0,2772	1,6632
12/07/2013	13,1	255	12	280,1	0,2801	1,6806
TOTAL	Consumo total de energía (kWh) de los componentes analizados					16,773

Análisis: Utilizando el controlador lógico programable en reemplazo del controlador digital universal se redujo el consumo de energía eléctrica en las mismas condiciones de trabajo de aproximadamente 48 W a 12W, lo cual analizando el consumo anterior que fue de 18,927kWh menos el consumo actual que fue de 16,773kWh, existe una disminución de 2,154 kWh por los 10 días de mediciones realizados.

En la siguiente tabla se presenta la medición del consumo de energía de los equipos reemplazados

Tabla 4.3. Valores obtenidos de las mediciones realizadas a los componentes de la estación de procesos, reemplazando el controlador digital universal por el controlador lógico programable y reemplazando el computador personal y el registrador por el touch panel, trabajando al 100% de su potencial.

Fecha de medición	Potencia (W) del touch panel	Potencia (W) del controlador foxboro	Potencia total (W)	Potencia total (kW)	Energía consumida por día (kWh)
23/07/2013	10	12	22	0,022	0,132
24/07/2013	10	11	21	0,021	0,126
25/07/2013	10	12	22	0,022	0,132
26/07/2013	9,5	12	21,5	0,0215	0,129
27/07/2013	10	11	21	0,021	0,126
28/07/2013	10	12	22	0,022	0,132
29/07/2013	9,8	12	21,8	0,0218	0,1308
30/07/2013	9,7	11	20,7	0,0207	0,1242
31/07/2013	10	12	22	0,022	0,132
01/08/2013	9,7	12	21,7	0,0217	0,1302
TOTAL	Consumo total de energía (kWh) de los componentes analizados				1,294

Utilizando el touch panel en reemplazo del computador personal y del registrador de datos se redujo el consumo de energía eléctrica (consumo del computador personal 258W + consumo del registrador 52W)=310Wh versus 10Wh que consume el touch panel con las mismas prestaciones.

Analizando el consumo de energía eléctrica de la tabla 4.1 versus el consumo de energía eléctrica de la tabla 4.3 existe una diferencia de:

$$18,927\text{kWh} - 1,294\text{kWh} = 17,633\text{kWh}.$$

4.2 Modelo Matemático de la Estación de flujo

Para la obtención del modelo matemático se utiliza el método experimental.

4.2.1 Obtención experimental del modelo matemático de la estación de flujo

Para la obtención experimental del modelo matemático de la estación de flujo se realizan los siguientes pasos:

1. Se procede a dar una respuesta al escalón y evaluar la tendencia de salida obteniéndose la siguiente gráfica:

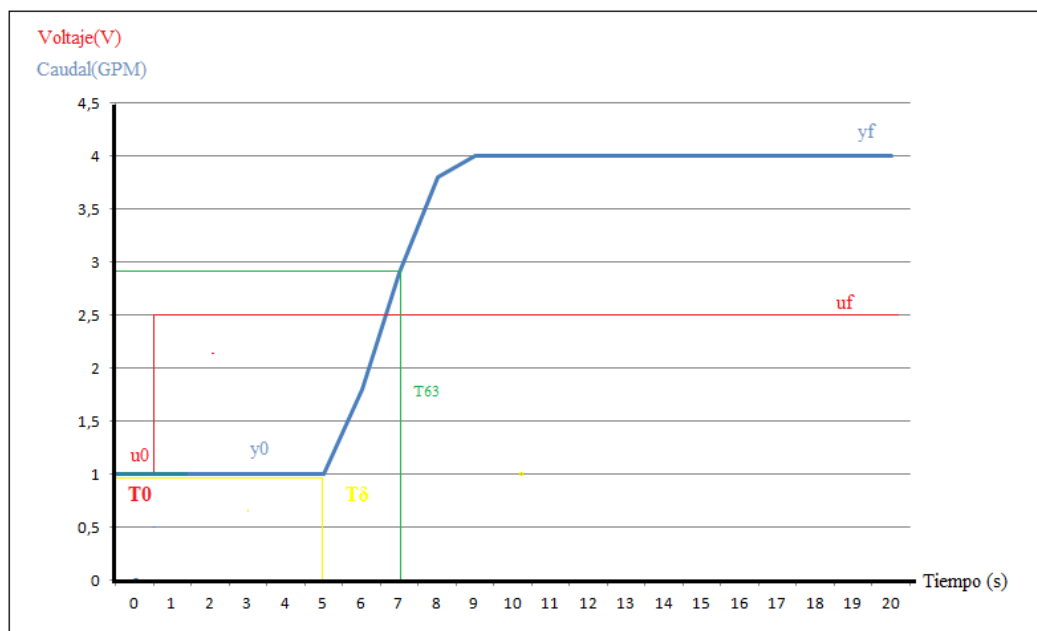


Figura 4.1. Valores de las mediciones obtenidas al sistema de flujo

Análisis: La respuesta dinámica obtenida durante los experimentos realizados para alcanzar el modelo del sistema que se muestra en la figura 4.1, muestra un

retardo de 4,5 segundos que está relacionado con la existencia de un tramo de tubería entre la bomba y recipiente colector. Este tiempo no es significativo en este caso y constituye un retardo de transporte que puede ser representado por la función de transferencia $G(s) = e^{-st}$, donde t representa el tiempo de retardo que estará relacionado con la longitud de la tubería.

2. Se calculan los parámetros K , T y τ , con las fórmulas enunciadas en la gráfica x , y utilizando los datos obtenidos en la medición del sistema.

Cálculo de τ

Datos:

$$T_{63} = 7,5s$$

$$T_{\delta} = 5s$$

$$\hat{\tau} = T_{63} - T_{\delta}$$

$$\tau = 7,5 - 5 = 2,5s$$

Cálculo de k

Datos:

$$Y_f = 4$$

$$Y_0 = 1$$

$$U_f = 2,5$$

$$U_0 = 1$$

$$\hat{K} = \frac{y_f - y_0}{u_f - u_0}$$

$$K = \frac{4 - 1}{2,5 - 1}$$

$$K = 2$$

Cálculo de Tr

Datos:

$$T\delta = 5s$$

$$T0 = 0,5s$$

$$\hat{T}_r = T\delta - T_0$$

$$Tr = 5s - 0,5s$$

$$Tr = 4,5s$$

Solución: La expresión matemática que corresponde al sistema es la siguiente:

$$G(s) = \frac{2e^{-4,5s}}{2,5s+1} \quad (4.1)$$

4.2.2 Simulación del proceso y sintonía utilizando los controles P, PI, PID

Utilizando el software Matlab y simulink se realizó la simulación del proceso, todo ello en miras de obtener una relación entre la simulación y la implementación real del sistema.

A continuación se presenta la simulación del proceso de flujo en lazo cerrado.

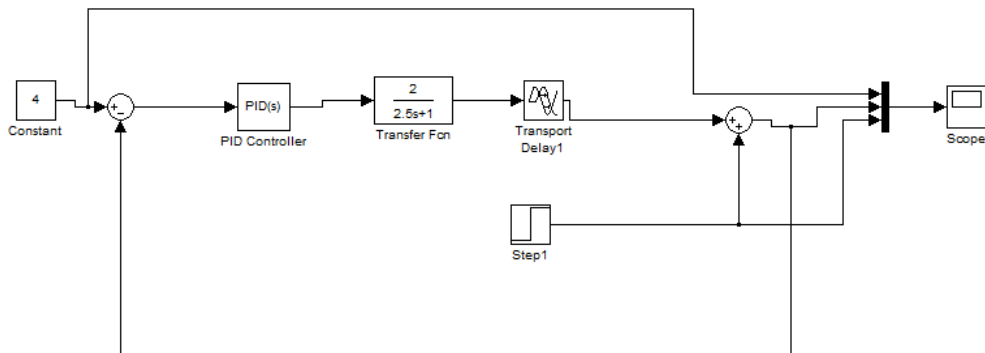


Figura 4.2. Representación desarrollada en Simulink del control de flujo.

4.2.3 Sintonía de los controladores P, PI, PID

Para la sintonía de los controladores, se utilizó el método de ganancia límite y se obtiene como resultado las siguientes constantes:

Tabla 4.4 Valores de las constantes obtenidas para los tres tipos de controles implementados.

Tipo de control	KP	TI	TD
P	0.63	-	-
PI	0.145	0.058	-
PID	0.0432	0.0445	0.0002

4.2.3.1 Control PID:

En la siguiente gráfica se presenta la tendencia del proceso utilizando el control PID.



Figura 4.3. Pantalla de visualización de la tendencia del proceso utilizando el control PID.

Análisis: En la respuesta obtenida durante la simulación con el lazo de control, se observa el retardo del sistema, en los casos que este tiempo es significativo

entonces es posible mejorar la respuesta del control utilizando el predictor Smith para la parametrización, el controlador que es mostrado en la figura 4.4, donde $\bar{G}_0(s)$ constituye la parte racional de la función de transferencia ($G(s)$) del sistema estable a controlar. Como se observa en el esquema se incorpora el inverso $\bar{G}_0(s)$ de la función del sistema a través de la realimentación y la expresión e^{-st} incorpora el retardo en el controlador mejorando así el ajuste.

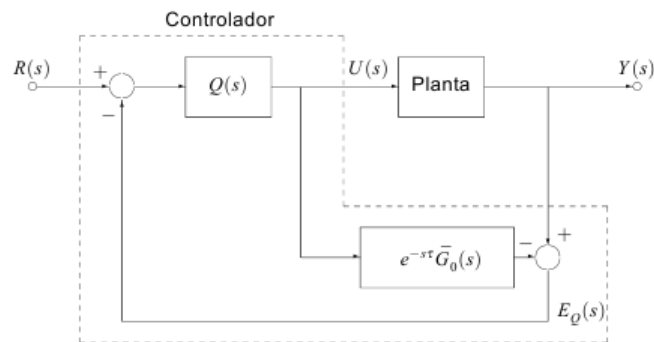


Figura 4.4 Controlador con predictor Smith

El controlador PID presenta una gran respuesta en el proceso flujo, a continuación se realiza el cálculo del tiempo de asentamiento en el control en mención.

4.2.3.1.1 Cálculo del tiempo de asentamiento y el valor del sobre impulso.

Para calcular los parámetros anteriores se considera los siguientes datos, ya que la aplicación tiene fines didácticos.

Datos:

- Porcentaje de desviación permitido en la curva de salida= +/- 5% esto es de 3,98 a 4,02 GPM. Considerando un procesos moderado.
- Porcentaje de sobre impulso permitido en la curva de salida= +15%

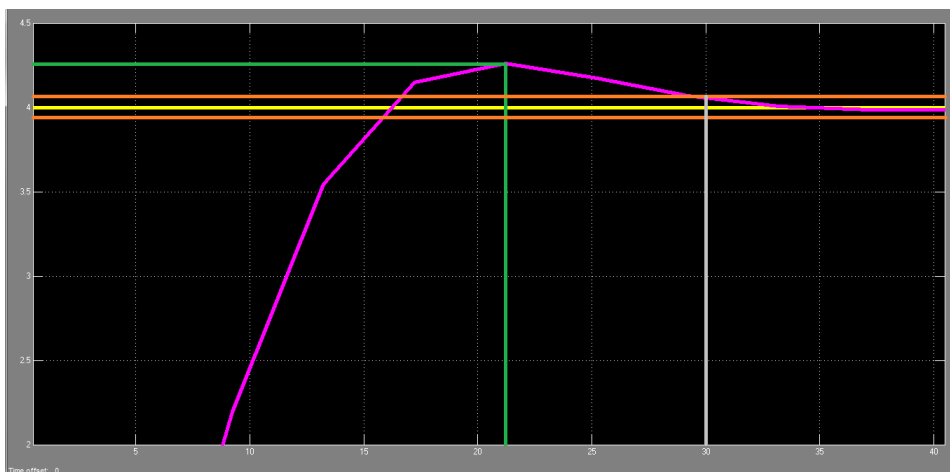


Figura 4.5. Pantalla que presenta el tiempo de asentamiento y el sobre impulso utilizando el control PID

Análisis: El tiempo de asentamiento es de 30 segundos así como el valor del sobre impulso es de 0,22GPM que corresponde al 7,33%. Lo que indica que el control se encuentra dentro de los parámetros deseados, posee una buena respuesta.

4.2.3.2 Control PI

En la siguiente gráfica se presenta la tendencia del proceso utilizando el control PI.

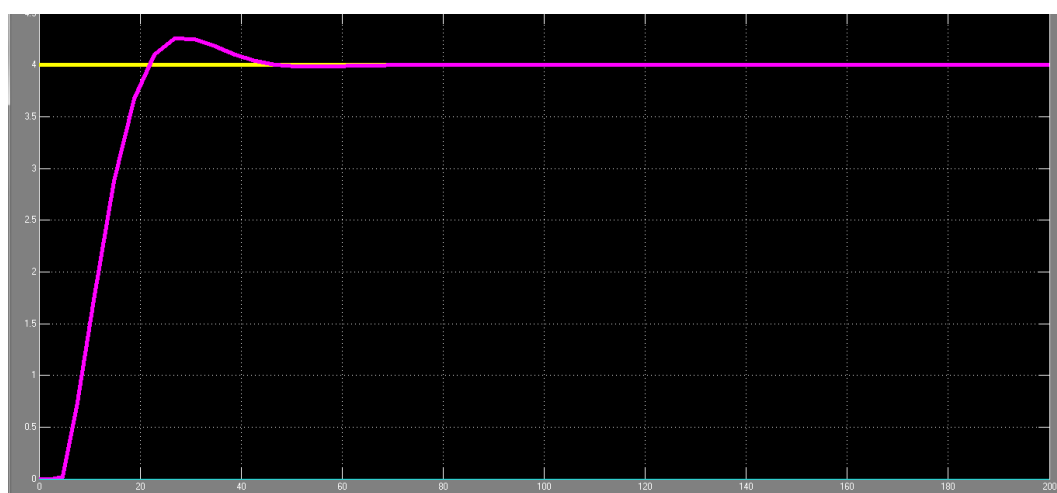


Figura 4.6. Pantalla de visualización de la tendencia del proceso utilizando el control PI

Análisis: El controlador PI presenta una gran respuesta en el proceso flujo, a continuación se realiza el cálculo del tiempo de asentamiento en el control en mención.

4.2.3.2.1 Cálculo del tiempo de asentamiento y el valor del sobre impulso.

Para calcular los parámetros anteriores se consideran los siguientes datos, ya que la aplicación tiene fines didácticos.

Datos:

- Porcentaje de desviación permitido en la curva de salida= +/- 5% esto es de 3,98 a 4,02 GPM. Considerando un procesos moderado.
- Porcentaje de sobre impulso permitido en la curva de salida= +15%

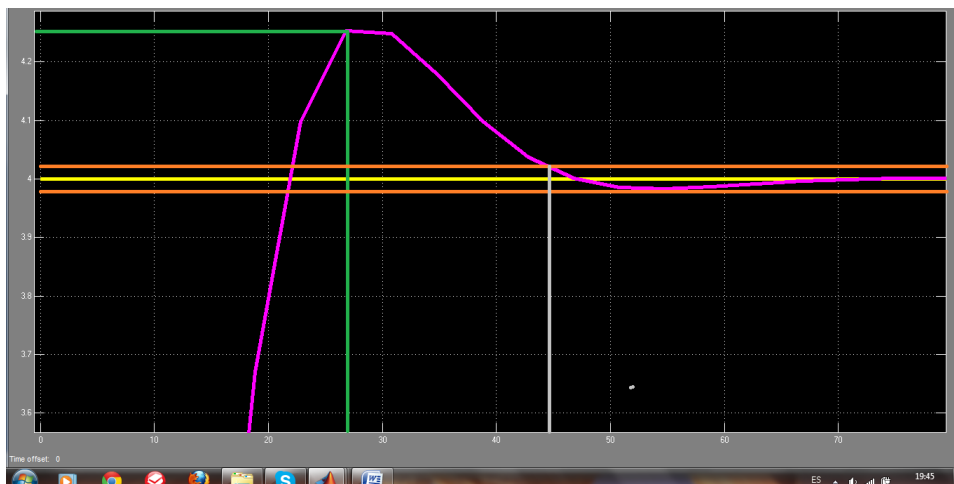


Figura 4.7. Pantalla que presenta el tiempo de asentamiento y el sobre impulso utilizando el control PI

Análisis:

El tiempo de asentamiento es de 45 segundos así como el valor del sobre impulso es de 0,25GPM que corresponde al 8,33%. Lo que indica que el control se encuentra dentro de los parámetros deseados, así como posee una buena respuesta Pero en relación al control PID existe un mayor sobre impulso así como también un mayor tiempo de asentamiento.

4.2.3.3 Control Proporcional

En la siguiente gráfica se presenta la tendencia del proceso utilizando el control Proporcional.

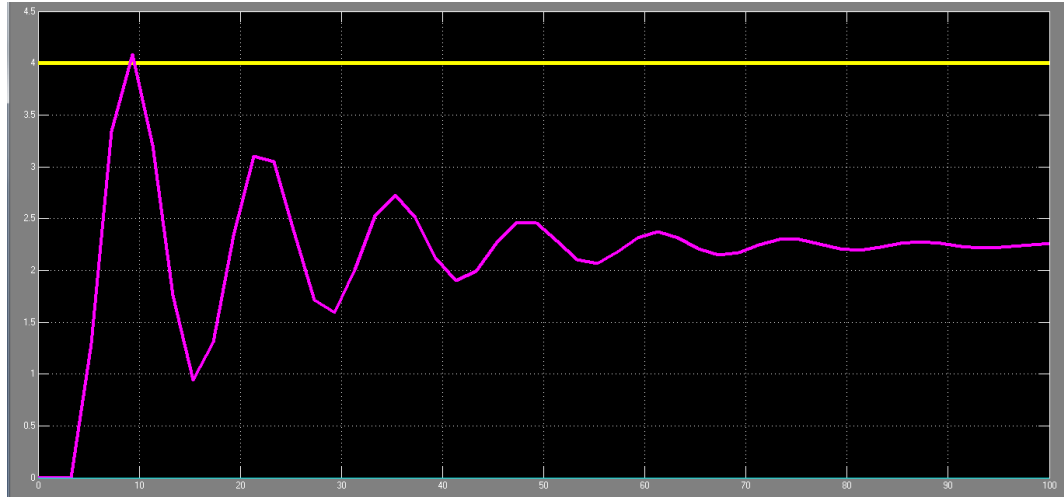


Figura 4.8. Pantalla de visualización de la tendencia del proceso utilizando el control Proporcional

Análisis: El controlador Proporcional presenta una mala respuesta en el proceso flujo, ya que la característica propia de este proceso es considerado rápido. Así como también el parámetro de un control proporcional es que presenta un error de estado estable, por lo que no es recomendado para este tipo de proceso. A continuación se realiza el cálculo del tiempo de asentamiento en el control en mención.

4.2.3.3.1 Cálculo del tiempo de asentamiento y el valor del sobre impulso.

Para calcular los parámetros anteriores se consideran los siguientes datos, ya que la aplicación tiene fines didácticos.

Datos:

- Porcentaje de desviación permitido en la curva de salida= +/- 5% esto es de 3,98 a 4,02 GPM. Considerando un procesos moderado.
- Porcentaje de sobre impulso permitido en la curva de salida= +15%

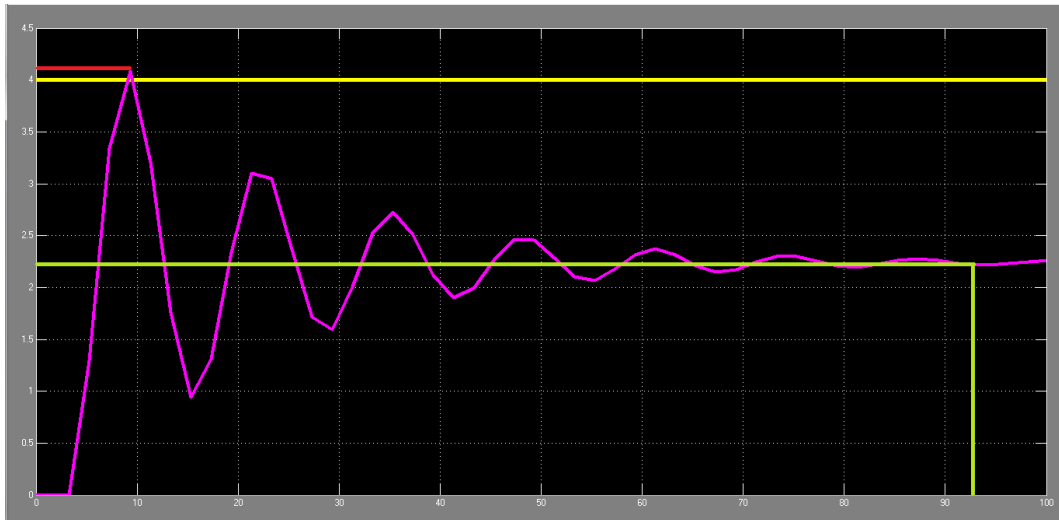


Figura 4.9. Pantalla que presenta el tiempo de asentamiento y el sobre impulso utilizando el control Proporcional

Análisis: El tiempo de asentamiento es de 93 segundos así como el valor del sobre impulso es de 0 GPM que corresponde al 0%.

Este tipo de control no se utiliza en el control de la variable flujo ya que presenta un alto error de estado estable correspondiente al 58.3%, valor no deseado en el control automático.

De acuerdo a la evaluación de los tipos de controles los que poseen una gran respuesta para este tipo de proceso son el control PI y el control PID, el control proporcional genera un error de estado estable que no es permitido en un proceso industrial.

4.3 Tipos de controles Implementados

La estación de flujo consta de un accionamiento que es la bomba centrífuga, la cual consta de un motor trifásico y un variador de velocidad que permite la regulación proporcional de dicho accionamiento.

De los controladores que se pueden utilizar para el control automático del proceso se encuentran el control Proporcional, proporcional integral y proporcional integral derivativo que son los controladores utilizados en sistemas de respuesta lineal como es la estación en estudio, por lo que se va a realizar la implementación y la sintonía de los controladores antes mencionados. Se procedió a implementar los algoritmos de control Proporcional, Proporcional integral y proporcional integral derivativo, así como se realizó la medición del consumo de energía de la estación a los diferentes tipos de controladores.

4.3.1 Implementación de los controles P, PI y PID en la estación de flujo

Tabla 4.5. Valores obtenidos de las mediciones realizadas a la estación de flujo utilizando el control proporcional.

Fecha de medición	Potencia demandada por la bomba (W)	Valor de caudal GPM
08/08/2013	115	1
08/08/2013	120	2
08/08/2013	125	3
08/08/2013	130	4
08/08/2013	138	5
08/08/2013	145	6
08/08/2013	150	7
08/08/2013	158	8
08/08/2013	165	9
08/08/2013	170	10

Se realizaron las mediciones del consumo de energía del accionamiento en escalas ascendente de 10%.

En la siguiente tabla se presentan los valores obtenidos de la medición de potencia utilizando el control proporcional integral.

Tabla 4.6. Valores obtenidos de las mediciones realizadas a la estación de flujo utilizando el control proporcional integral.

Fecha de medición	Potencia demandada por la bomba (W)	Valor de caudal GPM
20/08/2013	100	1
20/08/2013	105	2
20/08/2013	110	3
20/08/2013	115	4
20/08/2013	120	5
20/08/2013	125	6
20/08/2013	130	7
20/08/2013	135	8
20/08/2013	140	9
20/08/2013	145	10

Se realizaron las mediciones del consumo de energía del accionamiento en escalas ascendente de 10%.

En la siguiente tabla se presentan los valores obtenidos de la medición de potencia utilizando el control proporcional integral derivativo.

Tabla 4.7. Valores obtenidos de las mediciones realizadas a la estación de flujo utilizando el control proporcional integral derivativo.

Fecha de medición	Potencia demandada por la bomba (W)	Valor de caudal GPM
28/08/2013	98	1
28/08/2013	103	2
28/08/2013	108	3
28/08/2013	113	4
28/08/2013	118	5
28/08/2013	123	6
28/08/2013	128	7
28/08/2013	133	8
28/08/2013	138	9
28/08/2013	143	10

Se realizaron las mediciones del consumo de energía del accionamiento en escalas ascendente de 10%.

4.4 Análisis de la potencia obtenida por los diferentes tipos de equipos utilizados para el monitoreo y control de flujo.

4.4.1 Datos obtenidos de potencia de la estación de procesos con el controlador original y con el controlador S7-200.

A continuación se presenta una tabla de la energía consumida por la estación de procesos con el controlador foxboro y la energía consumida con el PLC S7-200.

Tabla 4.8. Datos de las mediciones realizadas durante 10 días a la estación de procesos.

Nro. de días muestreados muestras	Energía kWh consumida por la estación con los componentes actuales	Energía kWh consumida por la estación con el reemplazo del controlador
1	1,9152	1,6992
2	1,9026	1,6806
3	1,8792	1,6692
4	1,8672	1,6512
5	1,89	1,68
6	1,9032	1,6812
7	1,9092	1,6992
8	1,8906	1,6686
9	1,8732	1,6632
10	1,8966	1,6806
Promedio	1,89	1,68

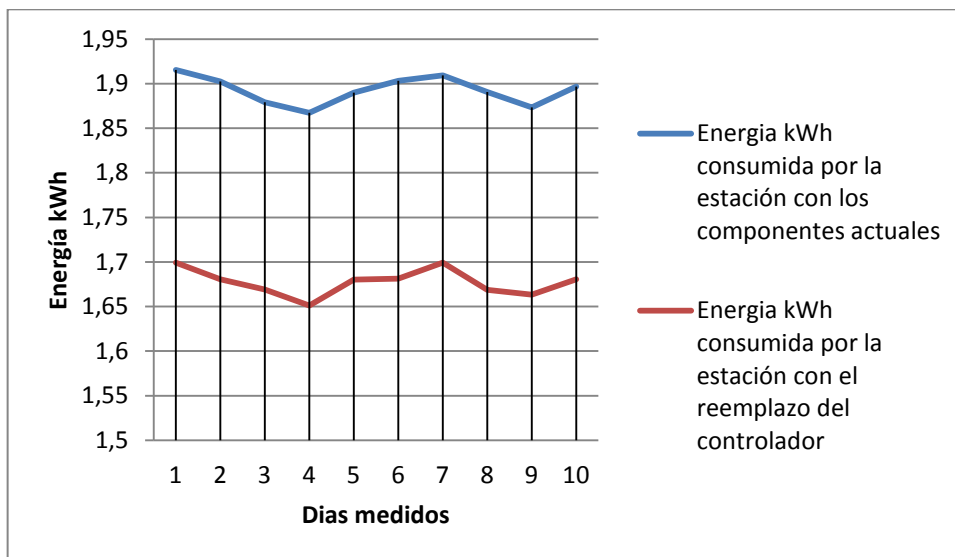


Figura 4.10 Consumo de energía de la estación de procesos con la utilización de los diferentes controladores.

Análisis de los datos: La estación de procesos al realizar el control de procesos con el controlador de procesos más los demás componentes que existen en dicha estación da como promedio de mediciones de 1,89 kWh y la estación de procesos utilizando el controlador lógico programable S7-200 por el controlador foxboro se obtiene como promedio de mediciones de 1,68kWh.

Existe una disminución de 0,21kWh al reemplazar el controlador foxboro por el controlador lógico programable.

De acuerdo a los datos recopilador al Ingeniero encargado del laboratorio las estaciones de procesos industriales trabajan un tiempo aproximado de 6 horas por día 5 días por semana, dando un total de aproximadamente 261 días al año de trabajo con un valor total de 1564,3 horas

Si multiplicamos el consumo de energía en cada caso se obtienen los siguientes valores:

Consumo total de energía al año utilizando el controlador foxboro 761C

$$1,89kW*1564h= 2955,96 kWh$$

Consumo total de energía al año utilizando el controlador lógico programable S7-200 CPU 226

$$1,68kW*1564h=2627,52kWh$$

La disminución aproximada de energía al año es de:

$$2955,96-2627,52=328,44kWh$$

4.4.2 Datos obtenidos de potencia de la estación de procesos con el controlador, la computadora de escritorio y el registrador tipo pluma vs la estación de procesos con el PLC S7-200 y el touch panel.

Tabla 4.9. Datos de las mediciones realizadas durante 10 días a la estación de procesos

No de días muestreados muestras	Energía kWh consumida por la estación con los componentes actuales	Energía kWh consumida por la estación con la utilización del PLC S7-200 y Touch panel
1	1,9152	0,132
2	1,9026	0,126
3	1,8792	0,132
4	1,8672	0,129
5	1,89	0,126
6	1,9032	0,132
7	1,9092	0,1308
8	1,8906	0,1242
9	1,8732	0,132
10	1,8966	0,1302
Promedio	1,89	0,13

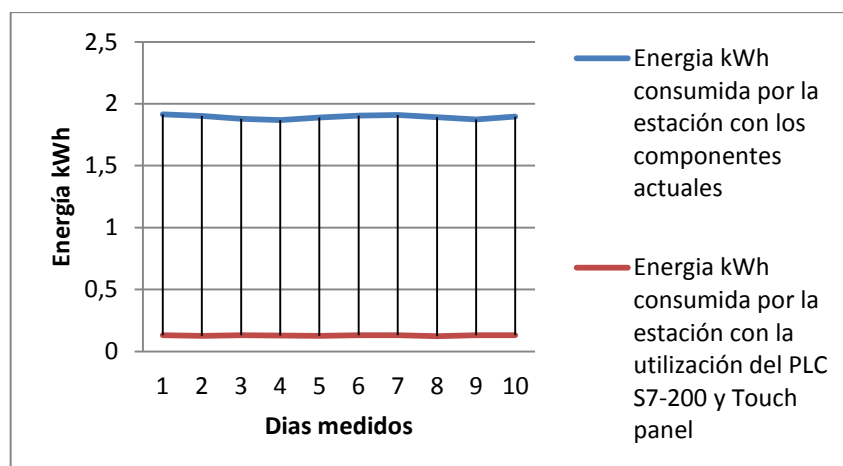


Figura 4.11. Consumo de energía de la estación de procesos con los componentes actuales vs consumo de energía de la estación de procesos utilizando el PLC y el touch panel.

Análisis de los datos: La estación de procesos al realizar el control de procesos con el controlador de procesos + computador personal + registrador de pluma que existen en dicha estación da como promedio de mediciones 1,89 kWh y la estación de procesos utilizando el controlador lógico programable S7-200 por el controlador de procesos y el touch panel en reemplazo del computador personal y el registrador de pluma se obtiene como promedio de mediciones 0,13kWh.

Existe una disminución de 1,877kWh al realizar el reemplazo de los componentes mencionados por el PLC y el Touch panel.

De acuerdo a los datos recopilados al Ingeniero encargado del laboratorio las estaciones de procesos industriales trabajan un tiempo aproximado de 6 horas por día 5 días por semana, dando un total de aproximadamente 261 días al año de trabajo con un valor total de 1564,3 horas

Si multiplicamos el consumo de la energía en cada caso se obtienen los siguientes valores:

Consumo total de energía al año utilizando el controlador foxboro 761C

$$1,89\text{kW} * 1564\text{h} = 2955,96 \text{ kWh}$$

Consumo total de energía al año utilizando el controlador lógico programable S7-200 CPU 226

$$0,13\text{kW} * 1564\text{h} = 203,32\text{kWh}$$

La disminución aproximada de energía al año es de:

$$2955,96 - 203,32 = 2752,64\text{kWh}$$

El valor de 2752,64kWh es el número de kWh que se ahorraría en un año si se reemplazan los equipos actuales por los equipos de alternativos.

4.4.3 Datos obtenidos de los modos de control proporcional, proporcional integral y proporcional integral derivativo.

Tabla 4.10. Datos de las mediciones realizadas durante 10 días a la estación de procesos para los tres tipos de control implementados

Fecha de medición	Potencia (W) demandada por la bomba utilizando el control proporcional	Potencia (W) demandada por la bomba utilizando el control proporcional integral	Potencia (W) demandada por la bomba utilizando el control proporcional integral derivativo	Valor de caudal GPM
08/08/2013	115	100	98	1
08/08/2013	120	105	103	2
08/08/2013	125	110	108	3
08/08/2013	130	115	113	4
08/08/2013	138	120	118	5
08/08/2013	145	125	123	6
08/08/2013	150	130	128	7
08/08/2013	158	135	133	8
08/08/2013	165	140	138	9
08/08/2013	170	145	143	10
Promedios	141,6	122,5	120,5	

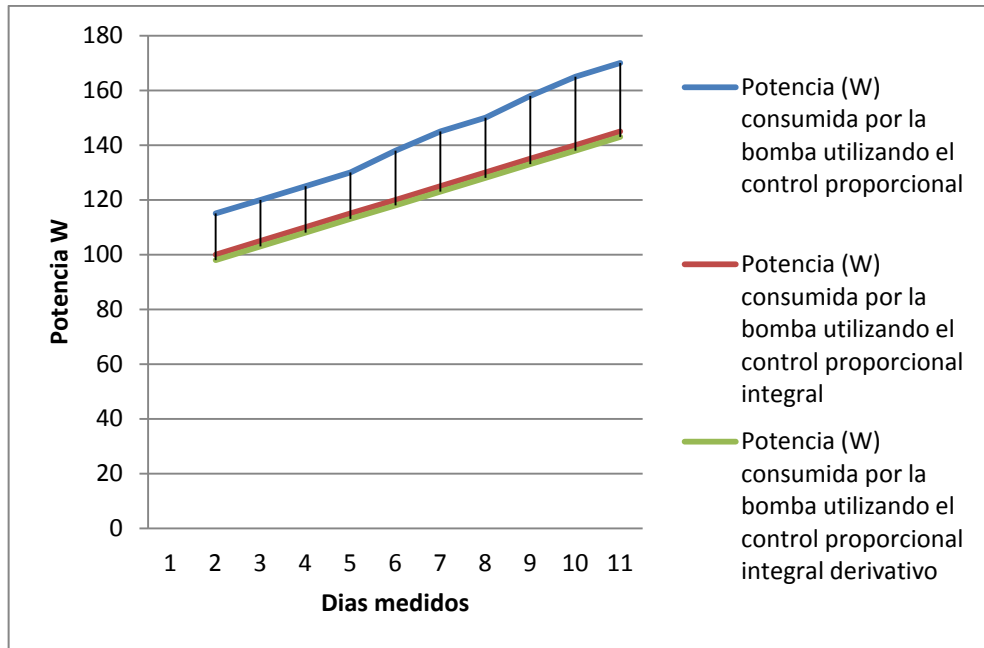


Figura 4.12. Demanda de potencia de la estación de procesos con la implementación de los modos de control proporcional, proporcional integral y proporcional integral derivativo.

Análisis: Se evaluó los 3 tipos de control más comunes: control proporcional, control proporcional integral, control proporcional integral derivativo.

Control Proporcional:

De acuerdo a las mediciones obtenidas el control proporcional en una práctica desarrollada con la inserción de señales de tipo rampa de 0 a 10 galones por minuto, el accionamiento demanda en promedio 141,6W.

El tiempo de utilización de la estación es de 6 horas por día 5 días por semana, dando un total de aproximadamente 261 días al año de trabajo con un valor total de 1564,3 horas

Si multiplicamos el consumo de energía en cada caso se obtienen los siguientes valores:

$$0,1416\text{kW} * 1564,3\text{h} = 220,8\text{kWh}$$

El consumo de energía al año realizando el control proporcional es de 220,8kWh al año.

Control Proporcional Integral:

Realizando la misma práctica pero utilizando el control proporcional integral insertando señales de tipo rampa de 0 a 10 GPM, el accionamiento demanda en promedio 122,5W.

El tiempo de utilización de la estación es de 6 horas por día 5 días por semana, dando un total de aproximadamente 261 días al año de trabajo con un valor total de 1564,3 horas

Si multiplicamos el consumo de energía en cada caso se obtienen los siguientes valores:

$$0,1225\text{kW} * 1564,3\text{h} = 191,63\text{kWh}$$

El consumo de energía al año realizando el control proporcional integral es de

$$191,63 \text{ kWh al año.}$$

Control Proporcional Integral Derivativo:

Y con el control PID insertando señales de tipo rampa de 0 a 10GPM, el accionamiento demanda en promedio 120,5W.

El tiempo de utilización de la estación es de 6 horas por día 5 días por semana, dando un total de aproximadamente 261 días al año de trabajo con un valor total de 1564,3 horas

Si multiplicamos el consumo de energía en cada caso se obtienen los siguientes valores:

$$0,1205\text{kW} * 1564,3\text{h} = 188,49\text{kWh}$$

El consumo de energía al año realizando el control proporcional integral es de 188,49kWh al año.

En las tablas 4.11, 4.12 y 4.13 se presenta el consumo de energía utilizando los tres modos de control proporcional, proporcional integral y proporcional integral derivativo sumado al consumo eléctrico de los equipos actuales.

Tabla 4.11. Valor del consumo de energía de la estación de procesos utilizando el controlador + computador + registrador e implementado el control proporcional.

Consumo de energía kWh al año de los componentes de la estación de procesos	Consumo de energía kWh al año de la bomba centrífuga utilizando el control proporcional	Consumo de energía kWh total de la estación de proceso
2955,96	220,8	3176,76

Análisis: En la actualidad el consumo de energía eléctrica de la estación, desarrollando las prácticas utilizando el modo de control proporcional y los equipos actuales en la estación de procesos durante 6 horas al día por cinco días a la semana es 3176,76 kWh.

Tabla 4.12. Valor del consumo de energía de la estación de procesos utilizando el controlador + computador + registrador e implementado el control proporcional integral.

Consumo de energía kWh al año de los componentes de la estación de procesos	Consumo de energía kWh al año de la bomba centrífuga utilizando el control proporcional integral	Consumo de energía kWh total de la estación de proceso
2955,96	191,63	3147,59

Análisis: En la actualidad el consumo de energía eléctrica de la estación, desarrollando las prácticas utilizando el modo de control proporcional integral y los equipos actuales en la estación de procesos durante 6 horas al día por cinco días a la semana es 3147,59 kWh.

Tabla 4.13. Valor del consumo de energía de la estación de procesos utilizando el controlador + computador + registrador e implementado el control proporcional integral derivativo.

Consumo de energía kWh al año de los componentes de la estación de procesos	Consumo de energía kWh al año de la bomba centrífuga utilizando el control proporcional integral derivativo	Consumo de energía kWh total de la estación de proceso
2955,96	188,49	3144,45

Análisis: En la actualidad el consumo de energía eléctrica de la estación, desarrollando las prácticas utilizando el modo de control proporcional integral derivativo y los equipos actuales en la estación de procesos durante 6 horas al día por cinco días a la semana es 3144,45 kWh.

En las tablas 4.14, 4.15, 4.16 y 4.17 se presentan los consumos de energía de la estación de procesos con la utilización del PLC en reemplazo del controlador y realizando los controles Proporcional, proporcional integral y proporcional integral derivativo.

Tabla 4.14. Valor del consumo de energía de la estación de procesos utilizando el PLC+ computador + registrador e implementado el control proporcional

Consumo de energía kWh al año de los componentes de la estación de procesos si se reemplaza el PLC por el controlador	Consumo de energía kWh al año de la bomba centrífuga utilizando el control proporcional	Consumo de energía kWh total de la estación de proceso
2627,52	220,8	2848,32

Análisis: Existe una disminución representativa en el consumo energético en relación a la utilización del controlador industrial, con este reemplazo es posible realizar el control proporcional con la misma funcionalidad que el controlador foxboro, la estación realizaría un consumo anual de 2848,32kWh

Tabla 4.15. Valor del consumo de energía de la estación de procesos utilizando el PLC+ computador + registrador e implementado el control proporcional integral.

Consumo de energía kWh al año de los componentes de la estación de procesos si se reemplaza el PLC por el controlador	Consumo de energía kWh al año de la bomba centrífuga utilizando el control proporcional integral	Consumo de energía kWh total de la estación de proceso
2627,52	191,63	2819,15

Análisis: Existe una disminución representativa en el consumo energético en relación a la utilización del controlador industrial, con este reemplazo es posible realizar el control proporcional integral con la misma funcionalidad que el controlador foxboro, la estación realizaría un consumo anual de 2819,15kWh

Tabla 4.16. Valor del consumo de energía de la estación de procesos utilizando el PLC+ computador + registrador e implementado el control proporcional integral derivativo

Consumo de energía kWh al año de los componentes de la estación de procesos si se reemplaza el PLC por el controlador	Consumo de energía kWh al año de la bomba centrífuga utilizando el control proporcional integral derivativo	Consumo de energía kWh total de la estación de proceso
2627,52	188,49	2816,01

Análisis: Existe una disminución representativa en el consumo energético en relación a la utilización del controlador industrial, con este reemplazo es posible realizar el control proporcional integral derivativo con la misma funcionalidad que el controlador foxboro, la estación realizaría un consumo anual de 2816,01kWh

Finalmente se realiza la evaluación de la utilización de un PLC para realizar el control y un touch panel para realizar el monitoreo de la estación de flujo, desarrollando los tres tipos de controles implementados en las anteriores tablas.

Tabla 4.17. Valor del consumo de energía de la estación de procesos utilizando el PLC+ touch panel e implementado el control proporcional integral

Consumo de energía kWh al año de los componentes PLC y touch panel de la estación de procesos	Consumo de energía kWh al año de la bomba centrífuga utilizando el control proporcional	Consumo de energía kWh total de la estación de proceso
203,32	220,8	424,12

Tabla 4.18. Valor del consumo de energía de la estación de procesos utilizando el PLC+ touch panel e implementado el control proporcional integral

Consumo de energía kWh al año de los componentes PLC y touch panel de la estación de procesos	Consumo de energía kWh al año de la bomba centrífuga utilizando el control proporcional integral	Consumo de energía kWh total de la estación de proceso
203,32	191,63	394,95

Tabla 4.19. Valor del consumo de energía de la estación de procesos utilizando el PLC+ touch panel e implementado el control proporcional integral derivativo

Consumo de energía kWh al año de los componentes PLC y touch panel de la estación de procesos	Consumo de energía kWh al año de la bomba centrífuga utilizando el control proporcional integral derivativo	Consumo de energía kWh total de la estación de proceso
203,32	188,49	391,81

El sistema más eficiente en consumo de energía es el implementado por los componentes PLC y touch panel así como también la implementación del control PID, los cuales dan como resultado el consumo de energía de 391,81kWh al año.

4.5 Análisis del consumo de energía de los sistemas

La estación de procesos en la actualidad consume: 3176,76kWh año

El sistema propuesto consumirá: 391,81kWh al año.

Existiendo una reducción de energía anual de: 2784.95kWh al año.

CAPITULO V: LA PROPUESTA

5.1- Título de la propuesta

Implementación de un PLC y Touch panel para el monitoreo y control de la estación de flujo

5.2- Objetivo de la propuesta

Utilizar la estación de procesos industriales con fines didácticos pero con un menor consumo de energía eléctrica.

5.3- Justificación de la propuesta

Es necesario una propuesta de un Sistema de Monitoreo y control de la estación de flujo 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 monitoreo y control del proceso se lo realizará con el touch panel y el PLC.
- El registro de los datos considerados de importancia se los almacena en el touch panel ya que tiene la opción de almacenar históricos de las variables de interés.
- La funcionalidad de la estación de procesos será similar a la estación de procesos original e inclusive tendrá mayores prestaciones como el manejo de alarmas en el propio touch panel.
- Permitirá realizar los tipos de control proporcional, proporcional derivativo, proporcional integral derivativo, además como el controlador a utilizar es un PLC permitirá realizar diferentes algoritmos de control en miras de evaluar nuevos tipos de control existentes como son Fuzzy Logic.

- El tiempo de espera para la utilización de la estación de proceso será menor en vista de que el reemplazo del computador es el touch panel el cual funciona en el instante en que es encendido.

5.4- Estructura de la propuesta

La estructura de la propuesta de la implementación de un PLC, Touch panel y los modos de control proporcional, Proporcional integral, Proporcional integral derivativo para el monitoreo y control de la estación de flujo.

5.5- Desarrollo de la propuesta

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

5.5.1. Recurso Material

Tabla 5.1 Desglose de los costos fijos para la implementación de un PLC, Touch panel en la estación de flujo.

Cant.	Detalle	Costo \$
1	PLC S7-200 CPU 224	250
1	Touch panel Red Lion G3	500
1	Cables para conexión	5
1	Fuente de alimentación 24Vdc	10
	TOTAL	765

5.5.2 Recurso Humano

Se considera la mano de obra necesaria para la implementación del PLC y Touch Panel en la estación de flujo.

Tabla 5.2 Valor del talento humano

Cant.	Detalle	Costo \$
1	Técnico electrónico	35 valor/día
		35

5.6 Evaluación socio-económico-ambiental de la propuesta

El propósito de la evaluación socioeconómica de un proyecto es el de 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 flujo un PLC y un Touch panel el estudiante es beneficiado ya que tecnológicamente está utilizando equipos actuales, los cuales permiten de una forma más amigable realizar el monitoreo y 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 PLC y Touch panel se reduce en consumo de energía eléctrica 2785 kWh al año, en la actualidad la empresa que proporciona la energía eléctrica tarifa por \$ 0,09 por kWh, dando con ello una reducción anual de \$ 250,65.

5.6.3 Ambiental. Con la implementación del PLC y touch panel se reduce la emisión de CO2 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 CO ₂ para producir electricidad en kWh ⓘ					
2785		500	1392.50 kg	3069.93 lb	0.239467 ton
Las emisiones de CO ₂ por kWh de electricidad y calor ⓘ					
2785	Ecuador	388.559	1082.14 kg	2385.70 lb	0.239467 ton
Las emisiones de CO ₂ , 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 kWh

Con la implementación del proyecto se evitaría el generar 1082,14Kg 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 Calculo 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

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

I_0 : Es el valor del desembolso inicial de la inversión.

n: Es el número de períodos considerado

k: El tipo de interés

Para el cálculo del VAN se utilizan los siguientes datos:

Inversión: \$ 800

Número de años: 4

Tiempo de vida útil del equipo: 10 años

Interés: 0.09

$$VAN = \sum_{T=1}^4 -800 + \frac{250}{(1+0,09)} + \frac{250}{(1+0,09)^2} + \frac{250}{(1+0,09)^3} + \frac{250}{(1+0,09)^4}$$

$$VAN = 9,92$$

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 la estación de procesos multivariable mostrada en la figura 2.26 tiene un valor de \$100.000).

CONCLUSIONES:

- Se investigó sobre el estado del arte del control de flujo, encontrando que el sistema motor variador bomba es el más eficiente cuando se utiliza el control PI y PID. Sin embargo para aquellos sistemas que poseen características no lineales se recomienda en la actualidad el empleo de técnicas heurísticas en el control como modo de control difuso.
- Se evaluó la Eficiencia Energética de la estación de flujo, obteniéndose menor consumo eléctrico al utilizar equipos como PLC y Touch panel en reemplazo del controlador, registrador y computador. Obteniendo un ahorro de energía eléctrica al año en un intervalo de 328,44kWh hasta 2752,64kWh.
- Se determinó el consumo energético de la estación utilizando los tres tipos de controles como son: Proporcional, Proporcional integral, Proporcional integral derivativo, siendo el control PID el más eficiente para este tipo de proceso logrando un ahorro de energía al año de 32,31kWh
- Con la implementación del PLC y el Touch panel se amplían las prestaciones en cuanto a la didáctica de la estación de procesos y su utilización con fines de investigación. Se logra una disminución total en el consumo de energía de 2785kWh al año.
- Se obtuvo el modelo matemático de la estación de flujo en miras de comparar la funcionalidad de forma física y simulada, obteniéndose una similitud entre la simulación y la práctica, que pueden ser usadas para el ajuste de los controladores.
- Se validó la hipótesis ya que con los valores de energía consumidos por los equipos alternativos (PLC y Touch Panel) existe una disminución del 80% con respecto al consumo actual de la estación de flujo.

RECOMENDACIONES:

- Implementar el modo de control Fuzzy Logic al sistema propuesto, ya que el PLC al ser reprogramable permite desarrollar otros algoritmos de control, todo ello en miras de evaluar el consumo de energía del control PID vs el control Fuzzy Logic.
- Incorporar manómetros a la entrada y la salida de la bomba centrífuga en miras de evaluar la curva característica de la bomba y la curva característica del sistema.

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]. Castro A. & Vera F., Control Difuso de Flujo de Fluidos en una Estación de Laboratorio, Monterrey-México, 2011.
- [6]. Creus A., Instrumentación Industrial, Séptima edición, Marcombo , España,2005.
- [7]. 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.
- [8]. Ogata K., Ingeniería de Control Moderna, 5ta Edición, Pearson , Madrid-España, 2010.
- [9]. Pinto E., Fundamentos de Control con Matlab, Pearson, Madrid-España, 2010.

[10]. Rojas P. y Morera M, Control de eficiencia en accionamiento eléctrico de bombas centrífugas usando lógica difusa, La Habana-Cuba, 2011.

[11]. Salas R., Ahorro de energía en bombas centrífugas por medio del control de flujo, México: Instituto Politécnico Nacional, 2009.

[12]. Zerquera M. & Sánchez J., Operación óptima de bombas en paralelo empleando variadores de velocidad., Ingenierías, Volumen XIII, N°46, Guadalajara-México, 2010.

ANEXOS

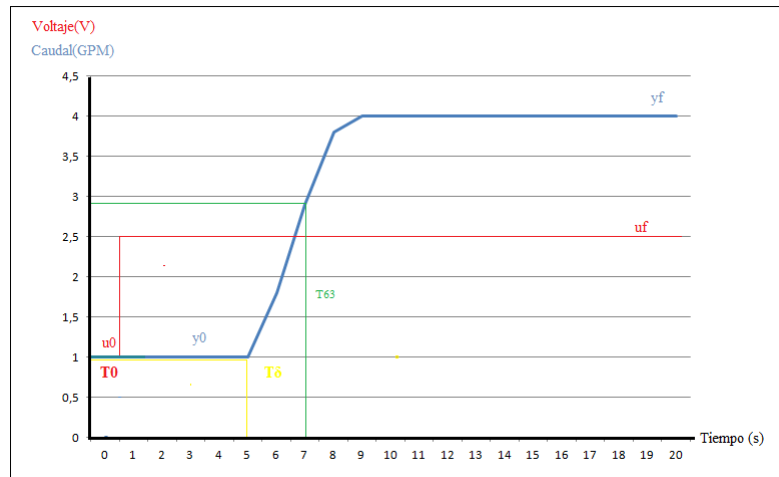
ANEXO 1

Mediciones realizadas para obtener el modelo matemático de la estación de flujo.

Medición 1

Tabla 1. Valores obtenidos de la medición de caudal

Voltaje (V)	Caudal (GPM)	Tiempo (s)
1	1	0
2,5	1	1
2,5	1	2
2,5	1	3
2,5	1	4
2,5	1	5
2,5	1,8	6
2,5	2,9	7
2,5	3,8	8
2,5	4	9
2,5	4	10
2,5	4	11
2,5	4	12
2,5	4	13
2,5	4	14
2,5	4	15
2,5	4	16
2,5	4	17
2,5	4	18
2,5	4	19
2,5	4	20

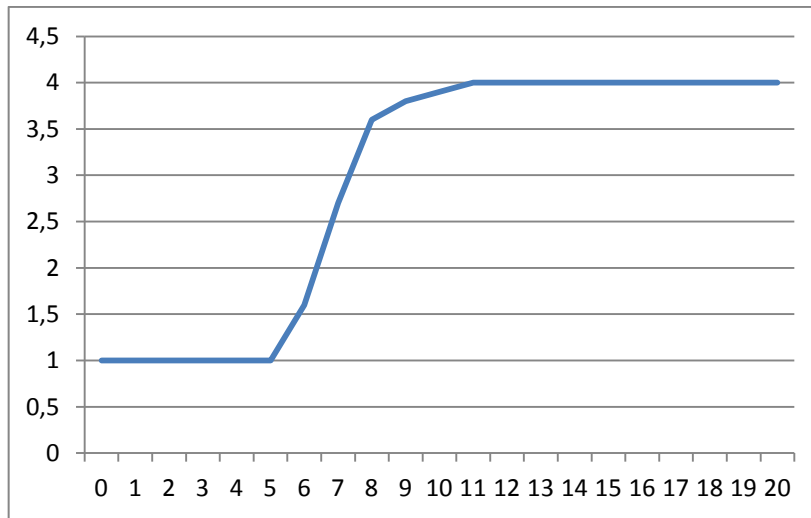


Gráfica 1. Respuesta obtenida de la medición de caudal al generar una entrada tipo escalón utilizando los datos de la tabla 1.

Medición 2

Tabla 2. Valores obtenidos de la medición de caudal

Voltaje (V)	Caudal (GPM)	Tiempo (s)
1	1	0
2,5	1	1
2,5	1	2
2,5	1	3
2,5	1	4
2,5	1	5
2,5	1,7	6
2,5	2,8	7
2,5	3,7	8
2,5	3,9	9
2,5	4	10
2,5	4	11
2,5	4	12
2,5	4	13
2,5	4	14
2,5	4	15
2,5	4	16
2,5	4	17
2,5	4	18
2,5	4	19
2,5	4	20

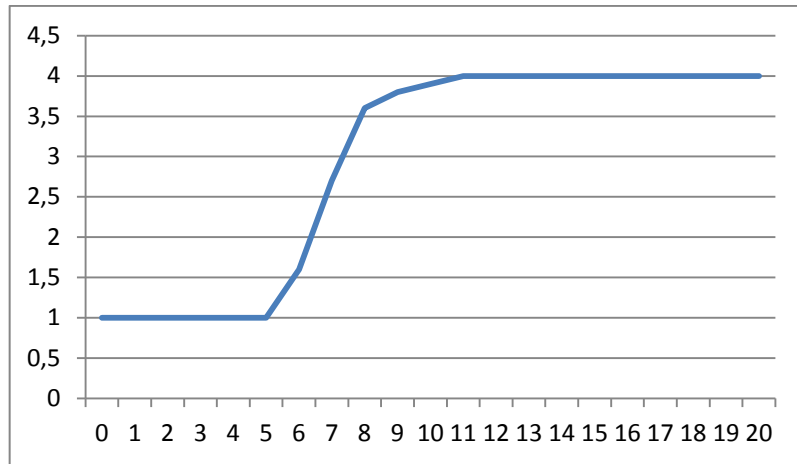


Gráfica 2. Respuesta obtenida de la medición de caudal al generar una entrada tipo escalón utilizando los datos de la tabla 2.

Medición 3

Tabla 3. Valores obtenidos de la medición de caudal

Voltaje (V)	Caudal (GPM)	Tiempo (s)
1	1	0
2,5	1	1
2,5	1	2
2,5	1	3
2,5	1	4
2,5	1	5
2,5	1,6	6
2,5	2,7	7
2,5	3,6	8
2,5	3,8	9
2,5	3,9	10
2,5	4	11
2,5	4	12
2,5	4	13
2,5	4	14
2,5	4	15
2,5	4	16
2,5	4	17
2,5	4	18
2,5	4	19



Gráfica 3. Respuesta obtenida de la medición de caudal al generar una entrada tipo escalón utilizando los datos de la tabla 3.