



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIEROS EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO.**

TEMA:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA EL
CONTROL DE CAUDAL DE LÍQUIDOS EN EL LABORATORIO DE LA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO DE LA
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE, PERIODO 2015.”**

AUTORES: AZA SARAGURO LENNIN RAMIRO

BASTIDAS CARLOSAMA DANILO RAMIRO

DIRECTOR: ING. PABLO MÉNDEZ

**IBARRA – ECUADOR
2016**



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE dentro del proyecto Repositorio Digital determina la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO		
CÉDULA DE IDENTIDAD:	100293252-1	
APELLIDOS Y NOMBRES:	AZA SARAGURO LENNIN RAMIRO	
DIRECCIÓN:	TUNGURAHUA 2-15 Y STA. ISABEL	
E-MAIL:	lennin_@hotmail.es	
TELÉFONO MÓVIL:	0999982977	TELF. FIJO: 062953-157
DATOS DE LA OBRA		
TÍTULO:	“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA EL CONTROL DE CAUDAL DE LÍQUIDOS EN EL LABORATORIO DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE, PERIODO 2015.”	
AUTOR:	AZA SARAGURO LENNIN RAMIRO	
FECHA:	MAYO DEL 2016	
PROGRAMA:	PREGRADO	
TÍTULO POR EL QUE OPTA	INGENIERO EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO.	
DIRECTOR:	ING. PABLO MÉNDEZ	

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	100305979-5
APELLIDOS Y NOMBRES:	BASTIDAS CARLOSAMA DANILO RAMIRO
DIRECCIÓN:	CAP. JOSÉ ESPINOZA DE LOS MONTEROS 11-37 Y JUANA ATABALIPA
E-MAIL:	danilo13011992@gmail.com
TELÉFONO MÓVIL:	0991834098 TELF. FIJO: 062653-192
DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA EL CONTROL DE CAUDAL DE LÍQUIDOS EN EL LABORATORIO DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE, PERIODO 2015.”
AUTOR:	BASTIDAS CARLOSAMA DANILO RAMIRO
FECHA:	MAYO DEL 2016
PROGRAMA:	PREGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA	INGENIERO EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO.
DIRECTOR:	ING. PABLO MÉNDEZ

2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Nosotros, Aza Saraguro Lennin Ramiro, con cédula de identidad No, 100293252-1 y Bastidas Carlosama Danilo Ramiro con cédula de identidad No, 100305979-5 en calidad de autores y titulares de los derechos Patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en forma digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y como apoyo a la educación, investigación y extensión en concordancia con la Ley de Educación Superior, Artículo 144.

3. CONSTANCIA

Los autores manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en la defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Firma

Aza Saraguro Lennin Ramiro

Cédula: 100293252-1

Firma

Bastidas Carlosama Danilo Ramiro

Cédula: 100305979-5

Ibarra, Mayo del 2016



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

**CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO A FAVOR DE LA
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Nosotros, Aza Saraguro Lennin Ramiro, con cédula de identidad No, 100293252-1 y Bastidas Carlosama Danilo Ramiro con cédula de identidad No, 100305979-5 manifestamos nuestra voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los Derechos Patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4,5 y 6 en calidad de autores de la obra o trabajo de grado denominado: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA EL CONTROL DE CAUDAL DE LÍQUIDOS EN EL LABORATORIO DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE, PERIODO 2015.”**. “que ha sido desarrollado para optar por el título de: **INGENIEROS EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO**, en la **UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

Firma

Aza Saraguro Lennin Ramiro

Cédula: 100293252-1

Firma

Bastidas Carlosama Danilo Ramiro

Cédula: 100305979-5

Ibarra, Mayo del 2016



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN

Yo Pablo Danilo Méndez en calidad de Tutor de los señores estudiantes, **AZA SARAGURO LENNIN RAMIRO Y BASTIDAS CARLOSAMA DANILLO RAMIRO** certifico que han cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA EL CONTROL DE CAUDAL DE LÍQUIDOS EN EL LABORATORIO DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE, PERIODO 2015**. Para la obtención del título de Ingenieros en Mantenimiento Eléctrico; aprobando la impresión y empastado.

Ing. Pablo Danilo Méndez
DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

DECLARACIÓN

Nosotros **AZA SARAGURO LENNIN RAMIRO Y BASTIDAS CARLOSAMA DANILO RAMIRO** declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado, ni calificación profesional; y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Firma

Aza Saraguro Lennin Ramiro

Cédula: 100293252-1

Firma

Bastidas Carlosama Danilo Ramiro

Cédula: 100305979-5

Ibarra, Mayo del 2016



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado principalmente a Dios, por haberme dado la salud y la sabiduría para alcanzar cada uno de mis objetivos, a mi madre Fani Saraguro, por haberme apoyado en cada momento, por sus consejos, sus valores, y su motivación constante, los cuales me han permitido llegar a ser una persona de bien, pero más que nada por su infinito amor, a mi padre Ramiro Aza, por cada uno de los ejemplos de perseverancia y constancia que siempre lo han caracterizado, los cuales me han ayudado siempre a seguir adelante y por su amor, a mis hermanos Paola y David con los cuales hemos compartido muchos momentos importantes en nuestras vidas.

Lennin Ramiro



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

DEDICATORIA

Es mi deseo como sencillo gesto de humildad, dedicarles mi trabajo de grado a mis padres, en especial a mi madre, que ha sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores, lo cual me ha ayudado a salir adelante en los momentos más difíciles.

A mis hermanos, quienes estuvieron siempre brindándome su apoyo constante, motivación e inspiración, lo que ha contribuido para la consecución de este logro.

A mi familia en general, porque me han brindado su apoyo incondicional en los buenos y malos momentos. Espero contar siempre con su valioso e incondicional apoyo.

Danilo Ramiro



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

AGRADECIMIENTO

Le agradezco a Dios, por haberme dado la guía a lo largo de mi carrera, por brindarme la fortaleza en mis momentos de debilidad.

A mis padres Ramiro Aza y Fani Saraguro, por apoyarme en cada momento.

A mis hermanos Paola y David, por ser parte importante de mi vida.

A la Universidad Técnica del Norte, por permitirme crecer profesionalmente.

Agradezco a cada uno de los docentes, licenciados e ingenieros, los cuales me brindaron su sabiduría y conocimientos.

Un infinito agradecimiento al Ing. Pablo Méndez, director de este trabajo de grado.

Y un agradecimiento a cada una de las personas que participaron directa e indirectamente en la construcción de este módulo.

Lennin Ramiro



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la fortaleza, la salud y la esperanza para avanzar por mi camino hacia el éxito.

A mis padres: Sr. Fabián Bastidas y Sra. Mariana Carlosama.

A la Universidad Técnica del Norte por brindarme la oportunidad de formarme como profesional, a los diferentes docentes de la carrera que me brindaron sus conocimientos y su apoyo en el transcurso de mi formación académica.

A mis amigos, compañeros y a todas aquellas personas que de forma directa o indirecta ayudaron en la elaboración de este proyecto.

Y en especial al Ing. Pablo Méndez, director de este trabajo de grado.

Danilo Ramiro

RESUMEN

El presente trabajo detalla el diseño e implementación de un módulo para el control de caudal de líquidos, integrado a una interfaz hombre máquina. Este módulo será parte del equipo didáctico para las materias de instrumentación y control industrial, con el fin de complementar el aprendizaje de los estudiantes en sistemas de control, mediante la interacción con la interfaz gráfica y con los diferentes componentes del módulo.

Está estructurado en cinco capítulos, de los cuales en el primer capítulo se plantea el problema de investigación, este hace referencia a la insuficiente aplicación práctica de los conocimientos adquiridos en el aula por parte de los estudiantes, se propone objetivos que estén encaminados a contribuir con una parte de la solución del problema de investigación, y se justifica el trabajo de grado por medio de la implementación de un módulo didáctico para el control de caudal de líquidos.

En el segundo capítulo se describe el marco teórico, este contiene toda la información necesaria para el diseño del módulo didáctico tales como: propiedades de los fluidos, tipos de medidores de caudal, tipos de bombas, cálculo para la selección del sistema de bombeo, conceptos generales sobre los sistemas de control, sintonización del PID por el método de Ziegler-Nichols, una pequeña introducción a la identificación de sistemas para posteriormente aplicarlo en el programa de MATLAB, dispositivos de control, comunicación y programación del PLC, y una breve descripción del entorno grafico de LabVIEW.

En el tercer capítulo se hace referencia a la metodología, explica la investigación documental, tecnológica y práctica. Igualmente de los métodos utilizados en la elaboración del presente trabajo de grado.

En el cuarto capítulo se detalla la propuesta tecnológica, en esta sección se describe: el proceso de diseño e implementación del módulo didáctico, el análisis de las pérdidas en la tubería para el dimensionamiento de la bomba, se justifica la selección de cada uno de sus componentes mediante un criterio técnico, la configuración de los parámetros del variador de frecuencia, la comunicación y configuración del PLC, el cálculo de los coeficientes del controlador PID utilizando el método de Ziegler-Nichols por medio de las herramientas del programa de MATLAB, y la elaboración de la interfaz gráfica para el monitoreo y control del módulo didáctico.

Finalmente en el quinto capítulo se detalla las conclusiones y recomendaciones obtenidas en el transcurso de la elaboración del módulo didáctico.

SUMMARY

This paper details the design and implementation of a module for controlling fluid flow, integrated into a man-machine interface. This module will be part of the teaching materials equipment for instrumentation and industrial control, in order to supplement the student learning control systems, by interacting with graphic interface and the different components of the module.

It is structured in five chapters, the first chapter presents the research problem, this refers to the insufficient practical application of the knowledge acquired in the classroom by students, it proposes objectives that are designed to contribute a part of the solution of the research problem, and the degree work is justified by the implementation of a training module for controlling fluid flow.

The second chapter describes the theoretical frame, this contains all the information needed to design the didactic module such as: fluid properties, types of flowmeters, pump types, calculation for selection of the pump system, general concepts of control systems, PID tuning by the Ziegler-Nichols method, a brief introduction to the identification of systems to apply later in the program MATLAB, control devices, communication and PLC programming, and a brief description of the graphical environment of LabVIEW.

In the third chapter, it refers to the methodology and explains the documentary, technological and practical research, also the methods used in the preparation of this work degree.

In the fourth chapter the technological proposal is detailed, this section describes the design process and implementation of the didactic module, the analysis of losses in the pipeline for dimensioning of the pump, the choice of each of its components are justified by technical criteria, the parameter settings of the variable frequency drive, communication and PLC configuration, calculating the coefficients of the PID controller using the Ziegler-Nichols method by means of the tools of the program MATLAB, and the development of the graphical interface for monitoring and control of the didactic module.

Finally in the fifth chapter, the conclusions and recommendations obtained over the course of the didactic module preparation are detailed.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN	II
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE	V
CERTIFICACIÓN	VI
DECLARACIÓN	VII
DEDICATORIA	VIII
DEDICATORIA	IX
AGRADECIMIENTO	X
AGRADECIMIENTO	XI
RESUMEN.....	XII
SUMMARY	XIII
ÍNDICE DE CONTENIDO	XIV
ÍNDICE DE TABLAS	XXII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XXIII
ÍNDICE DE ECUACIONES	XXVII
CAPÍTULO I.....	1
1 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.4 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.4.1 DELIMITACIÓN TEMPORAL	3
1.4.2 DELIMITACIÓN ESPACIAL	3
1.5 OBJETIVOS.....	4
1.5.1 OBJETIVO GENERAL	4
1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4

1.6 JUSTIFICACIÓN.....	5
CAPÍTULO II.....	6
2 MARCO TEÓRICO	6
2.1 FLUIDOS.....	6
2.2 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS.....	6
2.2.1 VISCOSIDAD.....	6
2.2.2 NÚMERO DE REYNOLDS.....	6
2.2.3 FORMA Y VOLUMEN	7
2.2.4 DENSIDAD	7
2.2.5 FLUIDEZ.....	7
2.2.6 FLUJO	7
2.2.6.1 FLUJO LAMINAR.....	8
2.2.6.2 FLUJO TURBULENTO	8
2.2.7 PRESIÓN.....	8
2.2.8 PRESIÓN HIDROSTÁTICA	8
2.2.9 CAUDAL	9
2.2.10 ECUACIÓN DE BERNOULLI	9
2.2.11 COEFICIENTE DE FRICCIÓN.....	10
2.3 MEDIDORES DE CAUDAL.....	11
2.3.1 MEDIDORES DE ÁREA VARIABLE	12
2.3.2 MEDIDORES DE VELOCIDAD.....	13
2.3.3 MEDIDOR DE TURBINA	13
2.4 BOMBAS	14
2.4.1 CLASIFICACIÓN	14
2.4.1.1 BOMBAS AUTOCEBANTES.....	14
2.4.1.2 BOMBA CENTRIFUGA.....	15
2.4.1.3 BOMBA MULTITETAPA.....	15

2.4.1.4 BOMBAS PERIFÉRICAS	16
2.4.1.5 BOMBAS SUMERGIBLES	16
2.5 CÁLCULO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO	17
2.5.1 VELOCIDAD EN EL SISTEMA DE TUBERÍA	17
2.5.2 PÉRDIDA DE PRESIÓN EN VÁLVULAS Y CONEXIONES	18
2.5.3 CALCULO DE LAS PÉRDIDAS TOTALES EN LA TUBERÍA.....	19
2.5.4 TUBERÍAS Y ACCESORIOS	20
2.5.5 DIMENSIONAMIENTO DE BOMBAS Y MOTORES	21
2.5.5.1 SISTEMAS DE CONTROL.....	21
2.5.6 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE CONTROL	22
2.5.7 TIPOS DE CONTROL.....	22
2.5.7.1 CONTROL MANUAL.....	22
2.5.7.2 CONTROL AUTOMÁTICO.....	22
2.6 SISTEMAS DE LAZO ABIERTO	23
2.7 SISTEMAS DE LAZO CERRADO	23
2.8 ACCIONES BÁSICAS DE CONTROL.....	23
2.8.1 CONTROL ON/OFF	24
2.8.2 CONTROL PROPORCIONAL.....	24
2.8.3 CONTROL PROPORCIONAL DERIVATIVO PD.....	25
2.8.4 CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL PI.....	25
2.8.5 CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO PID	26
2.9 SINTONIZACIÓN PID POR EL MÉTODO DE ZIEGLER – NICHOLS	28
2.9.1 MÉTODO DE LA RESPUESTA EN ESCALÓN.....	28
2.10 SINTONIZACIÓN POR LA GANANCIA CRÍTICA EN LAZO CERRADO.....	30
2.11 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS	31
2.11.1 TIPOS DE MODELOS DE UN SISTEMA.....	32
2.11.2 MODELOS MENTALES, INTUITIVOS O VERBALES.....	32

2.11.3	MODELOS NO PARAMÉTRICOS	32
2.11.4	MODELOS MATEMÁTICOS	32
2.11.5	MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE MODELOS	32
2.11.6	IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS	33
2.11.7	PROCESO DE IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS	33
2.11.8	MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN	33
2.11.9	MÉTODOS NO PARAMÉTRICOS	33
2.11.10	MÉTODOS PARAMÉTRICOS.....	34
2.12	FAMILIAS DE MODELOS DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA.....	34
2.12.1	MODELO ARX.....	34
2.12.2	ESTRUCTURA ARMAX.....	34
2.12.3	ESTRUCTURA ARARX	35
2.12.4	ESTRUCTURA ARARAMAX.....	35
2.12.5	ESTRUCTURA DE ERROR DE SALIDA	35
2.12.6	ESTRUCTURA BOX- JENKINS.....	35
2.13	IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS CON MATLAB	36
2.13.1	INTRODUCCIÓN AL TOOLBOX DE IDENTIFICACIÓN	36
2.13.2	LOS DATOS DE ENTRADA Y SALIDA.....	36
2.13.3	TRATAMIENTO DE DATOS	36
2.13.4	INTERFAZ GRÁFICA DEL TOOLBOX DE IDENTIFICACIÓN	37
2.13.5	ESTRUCTURA DE LA VENTANA PRINCIPAL.....	37
2.14	DISPOSITIVOS DE CONTROL	38
2.14.1	CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC)	38
2.14.2	CONFIGURACIÓN INTERNA DE UN PLC	40
2.14.3	VARIADOR DE VELOCIDAD.....	41
2.15	COMUNICACIÓN Y PROGRAMACIÓN.....	42
2.15.1	COMUNICACIÓN RS- 485.....	42

2.15.2 COMUNICACIÓN ETHERNET	42
2.15.3 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN.....	43
2.16 ENTORNO GRAFICO LABVIEW	43
2.16.1 CARACTERÍSTICAS DE LABVIEW	43
2.16.2 MANEJO Y APLICACIÓN DEL SISTEMA LABVIEW	43
2.16.2.1 PANEL FRONTAL O FRONT PANEL	43
2.16.2.2 DIAGRAMA DE BLOQUES.....	44
2.17 OPC SERVER	46
2.18 GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	46
CAPÍTULO III.....	49
3 METODOLOGÍA	49
3.1 TIPOS DE INVESTIGACIÓN	49
3.1.1 INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL O BIBLIOGRÁFICA	49
3.1.2 INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA	49
3.1.3 INVESTIGACIÓN PRÁCTICA.....	49
3.2 MÉTODOS.....	50
3.2.1 MÉTODO ANALÍTICO - SINTÉTICO	50
3.2.2 MÉTODO INDUCTIVO – DEDUCTIVO.....	50
3.2.3 DISEÑO TECNOLÓGICO.....	50
3.2.4 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.....	50
3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS	51
3.2.1 MEDICIONES	51
3.2.2 SIMULACIÓN.....	51
CAPÍTULO IV	52
4 PROPUESTA TECNOLÓGICA.....	52
4.1 TÍTULO DE LA PROPUESTA.....	52
4.1.1 JUSTIFICACIÓN.....	52

4.1.2 UBICACIÓN SECTORIAL Y FÍSICA	52
4.2 OBJETIVOS.....	52
4.2.1 OBJETIVO GENERAL	52
4.3 DESARROLLO DE LA PROPUESTA	52
4.3.1 COMPONENTES DEL MÓDULO DIDÁCTICO A CONSTRUIR	53
4.3.2 DISEÑO DE LA PLANTA DE CONTROL DE CAUDAL DE LÍQUIDOS (AGUA) ..	54
4.3.2.1 DISEÑO DEL TANQUE	54
4.3.2.2 SELECCIÓN DEL ESPESOR DEL VIDRIO	55
4.3.2.3 ESTRUCTURA METÁLICA.....	56
4.3.2.4 DISEÑO DE LA TUBERÍA.....	56
4.3.3 ANÁLISIS DE PÉRDIDAS.....	57
4.3.3.1 PRIMER TRAMO DE TUBERÍA.....	57
4.3.3.2 SEGUNDO TRAMO DE TUBERÍA.....	59
4.3.3.3 TERCER TRAMO DE TUBERÍA	61
4.3.3.4 PÉRDIDA DE CARGA TOTAL	63
4.3.3.5 CALCULO DE LA POTENCIA DE LA BOMBA DE AGUA	63
4.3.4 SELECCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS	64
4.3.4.1 SELECCIÓN DE LA BOMBA DE AGUA	64
4.3.4.2 SELECCIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA	65
4.3.4.3 SELECCIÓN DEL CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC).....	68
4.3.4.4 SELECCIÓN DE SENSORES.....	69
4.3.5 DESCRIPCIÓN ELÉCTRICA DEL MÓDULO DIDÁCTICO.....	71
4.3.6 CONFIGURACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS.....	72
4.3.6.1 CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL VARIADOR DE FRECUENCIA	72
4.3.6.2 CONFIGURACIÓN PARA OBTENER COMUNICACIÓN ENTRE EL PLC Y EL COMPUTADOR.....	73

4.3.6.3 CONFIGURACIÓN PARA CARGAR UN PROGRAMA EN EL PLC MICROLOGIX 1100	76
4.3.7 TRATAMIENTO DE SEÑALES	77
4.3.7.1 TRATAMIENTO DE LA SEÑAL DEL SETPOINT DEL MODO LOCAL.....	77
4.3.7.2 TRATAMIENTO DE LA SEÑAL DEL SENSOR DE CAUDAL.....	78
4.3.8 DISEÑO DE LA HMI	80
4.3.8.1 CONFIGURACIÓN DEL NI OPC SERVERS.....	80
4.3.8.2 CREACIÓN DE UN NUEVO PROYECTO EN LABVIEW	86
4.3.8.3 IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA DEL VI	90
4.3.9 IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA DE CAUDAL Y CÁLCULO DEL CONTROLADOR PID	93
4.3.10 CALCULO DEL CONTROLADOR PID, MEDIANTE EL MÉTODO DE ZIEGLER – NICHOLS (Z-N)	98
CAPÍTULO V	104
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	104
5.1 CONCLUSIONES	104
5.2 RECOMENDACIONES	105
5.3 BIBLIOGRAFÍA.....	106
5.4 LINKOGRAFÍA.....	109
ANEXOS.....	111
ANEXO A. COEFICIENTE DE RESISTENCIA K EN VÁLVULAS Y ACCESORIOS ...	111
ANEXO B. DIÁMETRO DEL TUBO HIDRO 3	116
ANEXO C. PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA	117
ANEXO D. DIAGRAMA DE MOODY	118
ANEXO E. DIAGRAMA DE FUERZA.....	119
ANEXO F. DIAGRAMA DE CONTROL.....	120
ANEXO G. PANEL FRONTAL DE LABVIEW.....	121
ANEXO H. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LABVIEW	122

ANEXO I. ALGEBRA DE BLOQUES	124
ANEXO J. LÍNEAS DE PROGRAMACIÓN	125
ANEXOS FOTOGRÁFICOS.	138
GUÍA DE PRÀCTICAS.....	143

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: Coeficiente de fricción.....	10
TABLA 2: Rugosidad de los materiales.....	10
TABLA 3: Velocidad mínima y máxima permisible en las tuberías.	17
TABLA 4: Accesorios utilizados en la construcción del sistema hidráulico.	20
TABLA 5: Resumen de las características de acción de control.	26
TABLA 6: Constantes PID.	30
TABLA 7: Valores de K_i y K_d	30
TABLA 8: Reglas de Ziegler y Nichols basada en ganancia crítica y periodo crítico.	31
TABLA 9: Características técnicas del PLC MicroLogix 1100.	39
TABLA 10: Descripción y características de los componentes del módulo didáctico.....	53
TABLA 11: Selección de espesor del vidrio según las dimensiones del tanque.	55
TABLA 12: Cálculo del coeficiente de resistencia [factor K] en el primer tramo.....	57
TABLA 13: Cálculo del coeficiente de resistencia [factor k] en el segundo tramo.....	59
TABLA 14: Cálculo del coeficiente de resistencia [factor K] en el tercer tramo.....	61
TABLA 15: Características de los terminales de control.....	67
TABLA 16: Características del sensor de flujo.	70
TABLA 17: Características del sensor de desplazamiento volumétrico FD 45025.	71
TABLA 18: Comparación del caudal vs señal del setpoint modo local.	77
TABLA 19: Comparación del caudal vs señal del sensor de caudal de efecto Hall.	79

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: Ubicación de la CIMANELE. Av. 17 de Julio 5-21, Ibarra.....	4
FIGURA 2: (a) flujo laminar y (b) flujo turbulento.....	8
FIGURA 3: Principales medidores de caudal volumétricos.	11
FIGURA 4: Rotámetro.....	12
FIGURA 5: Medidor de turbina.....	13
FIGURA 6: Bomba autocebante.	14
FIGURA 7: Bomba centrífuga.	15
FIGURA 8: Bomba multietapa.....	15
FIGURA 9: Bomba periférica.	16
FIGURA 10: Bomba sumergible.....	16
FIGURA 11: Tubería PVC hidro3.....	20
FIGURA 12: Sistema de lazo abierto.	23
FIGURA 13: Sistema de lazo cerrado.....	23
FIGURA 14: Control On/Off.	24
FIGURA 15: Control Proporcional.....	24
FIGURA 16: Control Proporcional Derivativo vs. Control Proporcional.....	25
FIGURA 17: Control integral.	26
FIGURA 18: Comportamiento de sistemas estables.	28
FIGURA 19: Método escalón Ziegler – Nichols.....	29
FIGURA 20: Curva de respuesta de método escalón.....	29
FIGURA 21: Sintonización por la ganancia crítica en lazo cerrado.	31
FIGURA 22. Panel principal del toolbox de identificación.....	37
FIGURA 23: Controlador lógico programable MicroLogix 1100 (PLC).....	38
FIGURA 24: Pasos principales para la operación de un PLC.....	41
FIGURA 25: Panel frontal de LabVIEW.....	44
FIGURA 26: Paleta de controles.....	44

FIGURA 27: Diagrama de bloques.....	45
FIGURA 28: Paleta de funciones.	45
FIGURA 29: Diagrama P&ID del proceso.	53
FIGURA 30: Dimensiones del tanque.	55
FIGURA 31: Características eléctricas de la bomba Pkm 60.	64
FIGURA 32: Curvas y datos de prestaciones.....	65
FIGURA 33: Variador de frecuencia ATV312HU11M2 Schneider panel frontal.....	66
FIGURA 34: Esquema general de cableado.	66
FIGURA 35: MicroLogix 1100 (1763-L16BWA) y módulo de expansión (1762-IF2OF2).....	68
FIGURA 36: Esquema general de cableado (1763-L16BWA).....	68
FIGURA 37: Terminales de conexión (1762-IF2OF2).	69
FIGURA 38: Sensor de flujo de paletas rotativas.	69
FIGURA 39: Conexión del sensor de flujo.....	70
FIGURA 40: Sensor de desplazamiento volumétrico DF 45025.....	71
FIGURA 41: Configuración de la Subnet Mask y Gateway.....	74
FIGURA 42: Configuración de la dirección ethernet (MAC) y de la dirección IP del PLC.....	74
FIGURA 43: Configuración exitosa del BOOTP/DHCP	74
FIGURA 44: Configuración del controlador.	75
FIGURA 45: Configuración del controlador AB_ETH-1.	75
FIGURA 46: Verificación de la comunicación entre el PLC y el computador.	75
FIGURA 47: IO Configuración.....	76
FIGURA 48: Configuración de canales.	76
FIGURA 49: Curva de funcionamiento del setpoint modo local.....	78
FIGURA 50: Curva de funcionamiento del sensor de caudal de efecto Hall.....	79
FIGURA 51: Interface del NI OPC Servers.	80
FIGURA 52: Ventana New Channel – Identification.	80

FIGURA 53: Ventana New Channel – Device Driver.....	81
FIGURA 54: Ventana New Channel – Network Interface.	81
FIGURA 55: Ventana New Channel – Write Optimizations.	82
FIGURA 56: Ventana New Channel – Non-Normalized Float Handling.....	82
FIGURA 57: Ventana New Device – Name.....	82
FIGURA 58: Ventana New Device – Model.....	83
FIGURA 59: Ventana New Device – ID.....	83
FIGURA 60: Ventana New Device – Scan Mode.	84
FIGURA 61: Ventana New Device – Timing.....	84
FIGURA 62: Ventana New Device – Auto-Demotion.....	84
FIGURA 63: Ventana New Device – Database Creation.....	85
FIGURA 64: Ventana New Device - ENI DF1/DH+/CN Gtwy Communications.	85
FIGURA 65: Ventana propiedades de etiqueta.	86
FIGURA 66: Ventana principal del nuevo proyecto.	86
FIGURA 67: Ventana Create New I/O Server.	87
FIGURA 68: Ventana Configure OPC Client I/O Server.	87
FIGURA 69: Creación de una variable.....	88
FIGURA 70: Ventana Shared Variable Properties.....	88
FIGURA 71: Ventana para buscar variables.	89
FIGURA 72: Creación de un nuevo VI.	89
FIGURA 73: Enlazar una variable con la etiqueta.	90
FIGURA 74: Lectura, visualización y generación de registro.....	91
FIGURA 75: Control PID.....	91
FIGURA 76: Exportar el registró de datos a Excel en formato de tabla.	92
FIGURA 77: Listado de las variables utilizadas en el proyecto.	92
FIGURA 78: Datos obtenidos mediante experimentación.	93
FIGURA 79: Creación de una variable en MATLAB.	93

FIGURA 80: Valores de la variable.	94
FIGURA 81: Commando >> ident y el System Identification de Matlab.....	94
FIGURA 82: Importación de datos en system identification.....	95
FIGURA 83: Importación de datos desde el workspace de MATLAB.	95
FIGURA 84: Selección de datos mediante la función Quick star.	95
FIGURA 85: Selección de la función de transferencia.....	96
FIGURA 86: Selección de polos y ceros para la función de transferencia.....	96
FIGURA 87: Curvas de las funciones de transferencia.	97
FIGURA 88: Curvas y resultados de la función de transferencia.....	97
FIGURA 89: Función de transferencia de la planta.	97
FIGURA 90: Código de Matlab para cálculo de Ziegler – Nichols.	98
FIGURA 91: Recta tangente al punto de inflexión en la curva de respuesta.	98
FIGURA 92: Diagrama de bloques del sistema PID y la planta.	99
FIGURA 93: Función de transferencia de la planta con PID sin refinar.	100
FIGURA 94: Diagrama de bloques en Simulink.	101
FIGURA 95: Auto tune del PID.	101
FIGURA 96: Señales del PID refinado vs sin refinar.	102
FIGURA 97: Nuevos valores de las constantes PID.....	102
FIGURA 98: Función del sistema en lazo cerrado.	103

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1.....	7
ECUACIÓN 2.....	8
ECUACIÓN 3.....	9
ECUACIÓN 4.....	9
ECUACIÓN 5.....	18
ECUACIÓN 6.....	18
ECUACIÓN 7.....	19
ECUACIÓN 8.....	21
ECUACIÓN 9.....	21
ECUACIÓN 10.....	27
ECUACIÓN 11.....	34
ECUACIÓN 12.....	34
ECUACIÓN 13.....	35
ECUACIÓN 14.....	35
ECUACIÓN 15.....	35
ECUACIÓN 16.....	35
ECUACIÓN 17.....	36
ECUACIÓN 18.....	54
ECUACIÓN 19.....	57
ECUACIÓN 20.....	58
ECUACIÓN 21.....	59
ECUACIÓN 22.....	61
ECUACIÓN 23.....	78
ECUACIÓN 24.....	79

CAPÍTULO I

1 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La medición de caudal es una rama cuya práctica se remonta a la antigüedad, hace referencia a las mediciones efectuadas en Babilonia para determinar los escurrimientos de los ríos Éufrates y Tigris, así como los surtidores de la antigua Roma. El problema más serio consistía en determinar la velocidad del agua dentro de las corrientes líquidas, tanto en flujos de canales abiertos o en tubos cerrados, limitándose a efectuar comparaciones en la corriente de agua únicamente por las áreas de sus secciones transversales, omitiéndose las cargas y las velocidades de la corriente.

Los principios básicos de los fluidos se empezaron a desarrollar lentamente en los siglos XVI y XIX, como resultado del trabajo de muchos científicos tales como Da Vinci, Galileo, Pascal, entre otros que hicieron aportes importantes a lo que hoy se le denomina hidrodinámica. A finales del siglo XIX la hidrodinámica y la hidráulica experimental presentaban cierta rivalidad.

Por una parte la hidrodinámica aplicaba con rigurosidad principios matemáticos para modelar el comportamiento de los fluidos, para lo cual debía recurrir a simplificar las propiedades de estos. Así se hablaba de un fluido real, esto hizo que los resultados no fueran siempre aplicables a casos reales. Por otra parte la hidráulica experimental acumulaba antecedentes sobre el comportamiento de fluidos reales, sin dar importancia a la formulación de una teoría rigurosa.

Por lo cual, en la época actual se ha considerado a la hidrodinámica como una de las más importantes de la hidráulica debido a que se efectúan medidas de tirantes, variaciones de nivel del agua, secciones de escurrimiento, presiones, velocidades y caudales, para lo cual las industrias han ido aprovechando de esta evolución.

La medición de flujo constituye tal vez, el eje más alto porcentaje en cuanto a medición de variables industriales se refiere. Ninguna otra variable tiene la importancia de esta, ya que sin mediciones de flujo, sería imposible el balance de materiales, el control de calidad y aún la operación de procesos continuos (Villajulca C. 2010).

En muchas áreas de la industria es habitual la presencia de fluidos en movimiento: en sistemas hidráulicos, industria alimenticia, industria química, entre otras. La medida del caudal de fluido es importante por varias razones fundamentales, como son: el conteo, la evaluación del funcionamiento, la investigación, y el control de procesos fundamentales.

El conteo del fluido se hace necesario en muchos casos en los que existe una función de transferencia. En control de procesos, el éxito de una operación continua depende en gran medida de la medición y el control de flujo. En la mayor parte de las operaciones realizadas en los procesos industriales es muy importante la medición de los caudales de líquidos o gases. En el mercado de instrumentación actualmente existen una gran variedad de medidores de caudal.

Los sensores de caudal han sido utilizados en su gran mayoría en operaciones realizadas en los procesos industriales, en las efectuadas en laboratorios y en plantas industriales, en las cuales es muy importante la medición de líquidos y gases los cuales se van a utilizar en el proceso industrial o también pueden ser los que se está trabajando en el mismo.

En nuestro país la educación se desarrolla en un margen competitivo conforme a la demanda que requiere una sociedad, la misma que marca la evolución al pasar el tiempo. Conjuntamente con el cambio de la matriz energética del país la cual nos ha situado en un desarrollo consumista y exportador de bienes primarios de bajo valor, agregando e importando bienes industrializados, generando un gran déficit en la economía ecuatoriana, razón por la cual el gobierno se ha visto en la necesidad de impulsar el desarrollo de nuevos proyectos para lograr el cambio deseado y pasar a ser un país exportador de bienes industrializados.

Razón por la cual, hoy en día la necesidad de aprender y desarrollar más conocimientos prácticos con respecto a ramas técnicas, despierta el interés por investigar casos que llevan a satisfacer las necesidades de un proceso ya sea en las industrias, instituciones, hogares o en el ámbito laboral.

En la actualidad el nivel de investigación y conocimientos que debe poseer un estudiante tiene que estar acorde con la aparición de nuevas tecnologías, donde las instituciones educativas como las universidades juegan un punto muy importante en la educación de los mismos.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, la evolución de la industria ecuatoriana a causa del cambio de la matriz energética, ha obligado a los estudiantes a relacionarse de manera temprana con tecnologías encaminadas al uso industrial, para permitir habituarse con el uso de lenguajes de programación, configuración y mantenimiento de dispositivos industriales, lo que conllevará a que tengan una mejor competitividad en el ámbito laboral.

Para un ingeniero en mantenimiento eléctrico es importante fortalecer sus conocimientos con respecto a sistemas de control industrial, asimismo del mantenimiento de estos. Además de conocer los temas actuales de la industria, también tiene que afianzar sus conocimientos en la medición de variables de control de procesos, ya que estas son de gran importancia en cada industria, esto se procura mejorar mediante la construcción de un módulo didáctico enlazado a un sistema de control industrial, el cual permite a los estudiantes familiarizarse con procesos automáticos, como parte integral la cual facilitara la rápida adaptación al ámbito laboral.

1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo diseñar y construir un módulo didáctico para el control de caudal de líquidos en el Laboratorio de la Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico de la Universidad Técnica del Norte?

1.4 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

1.4.1 DELIMITACIÓN TEMPORAL

La investigación teórico práctica se desarrolló en el transcurso del segundo semestre del periodo 2015 y del primer semestre del periodo 2016; para ello se tomó en cuenta el tiempo estimado de prueba para el correcto funcionamiento del módulo didáctico.

1.4.2 DELIMITACIÓN ESPACIAL

El diseño y la construcción se desarrolló en la provincia de Imbabura, cantón Ibarra, parroquia del Sagrario, en la “Universidad Técnica del Norte”, en la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas (FICA), en el laboratorio de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico (CIMANELE).



FIGURA 1: Ubicación de la CIMANELE. Av. 17 de Julio 5-21, Ibarra.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un módulo didáctico para el control de caudal de líquidos en el Laboratorio de la Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico de la Universidad Técnica del Norte, periodo 2015.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar las propiedades y características de los fluidos, especialmente el agua, y de los diferentes dispositivos existentes para la medición de líquidos.
- Diseñar un módulo didáctico que permita realizar la medición de la variable de caudal utilizando dispositivos comunes.
- Construir un módulo didáctico para el estudio de sensores de caudal de líquidos que conste de un sistema hidráulico con bomba, PLC y variador de velocidad.
- Identificar el modelo matemático del sistema mediante pruebas obtenidas a través de los sensores que actúan dentro de este módulo y diseñar un compensador que permita controlar el caudal de forma manual o automático, implementar en un PLC un control Proporcional Integral Derivativo (PID) de caudal en el sistema construido.
- Diseñar una Interfaz Humano Máquina (HMI) en el computador.

1.6 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, la industria ecuatoriana está encaminada a la modernización y automatización con tecnologías que conlleven a tener una mejor competitividad en el mercado actual. Por ello los estudiantes de la CIMANELE, deben afianzar sus conocimientos con respecto a la nueva tecnología en lo que respecta a su funcionamiento, aplicaciones y mantenimiento.

El estudio y análisis de estos aspectos permitirán a los estudiantes competir en el mercado laboral al culminar sus estudios y ser profesionales con el perfil técnico que exige el mundo moderno. El fin de este proyecto, es implementar en el laboratorio de la Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico (CIMANELE) de la Universidad Técnica del Norte, un módulo didáctico para el control de un sistema hidráulico y monitoreo de la variable de caudal.

Con este módulo los estudiantes podrán realizar el reforzamiento del principio de funcionamiento, modo de operación, formas de manejo, desarrollo de pruebas y experimentos con el sistema hidráulico equipado con sensores de caudal de líquidos; prácticas específicas de control y monitoreo con cada tipo de sensor; la interacción con los sensores de caudal de líquidos, PLC, bomba trifásica e interfaz (HMI); y la incentivación para que las nuevas generaciones implementen el laboratorio de la CIMANELE, a través de la elaboración de sistemas modulares didácticos o proyectos prácticos que vayan en beneficio de los estudiantes y de la carrera.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 FLUIDOS

Teniendo en cuenta la naturaleza de los fluidos, mas no su composición, estos se definen: fluido es aquella sustancia que debido a su poca cohesión intermolecular carece de una forma propia, y cuando este se encuentra en equilibrio no puede soportar fuerzas tangenciales o cortantes, de esta definición podemos decir que los fluidos en reposo no pueden soportar ningún esfuerzo de corte.

2.2 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Las propiedades físicas de un fluido, son las que permiten definir, caracterizar, y cuantificar sus características y comportamiento así como distinguirlos de otros.

2.2.1 VISCOSIDAD

La viscosidad es una propiedad generalmente de los fluidos y de los gases, Mott (2006) la define como: "El esfuerzo cortante, como una fuerza que se requiere para que una unidad de área de una sustancia se deslice sobre otra." (p.27). La cual es una medida de la resistencia que tiene el fluido o el gas al movimiento. La viscosidad dinámica se la puede medir en "poise" o "centipoise", mientras que la viscosidad cinemática se mide en "stokes" o "centistokes".

La viscosidad de los líquidos va a depender de la temperatura, a medida que esta aumenta la viscosidad del fluido disminuye, y a medida que la temperatura baja la viscosidad del fluido va a ser mucho mayor.

2.2.2 NÚMERO DE REYNOLDS

Es una relación combinada entre la densidad y la viscosidad con la velocidad de flujo y las dimensiones de la sección transversal del flujo, y se la describe con la siguiente ecuación

ECUACIÓN 1

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu}$$

De donde:

Re = Numero de Reynolds.

V = Velocidad del flujo media [m/s].

d = Diámetro de la tubería [m].

ρ = Densidad del líquido [Kg/m^3].

μ = Viscosidad absoluta [$kg/m * s$].

2.2.3 FORMA Y VOLUMEN

El volumen de un líquido permanece relativamente constante debido a las intensas fuerzas de cohesión entre ellas (Cengel & Cimbala. 2006).

2.2.4 DENSIDAD

Es la cantidad de masa por unidad de volumen de una sustancia, generalmente en los fluidos se utiliza la masa específica del agua a 4°C como referencial, la cual va a corresponder a 1[g/m³] (Mott, R. 2006).

2.2.5 FLUIDEZ

Característica de los líquidos y gases, la cual les confiere la habilidad de poder pasar por un orificio de cualquier dimensión, siempre que este a un mismo nivel del recipiente contenedor.

2.2.6 FLUJO

Es el movimiento de un fluido que se puede definir como el paso de un fluido por una unidad de superficie en un determinado tiempo.

2.2.6.1 FLUJO LAMINAR

Movimiento de un fluido cuando este es ordenado, estratificado, suave. En este tipo de flujo el fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse mientras que su velocidad promedio sea baja.

2.2.6.2 FLUJO TURBULENTO

Movimiento de un fluido el cual se da en forma caótica y que sus partículas se mueven en forma desordenada y con altas fluctuaciones de velocidad.

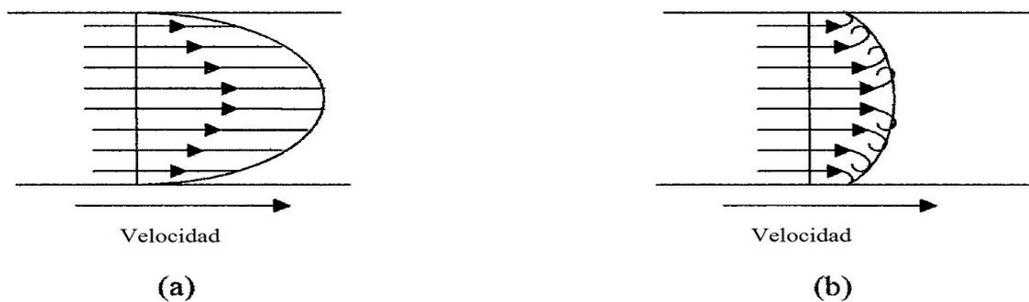


FIGURA 2: (a) flujo laminar y (b) flujo turbulento.

Fuente: Dunn. 2005 p.100

2.2.7 PRESIÓN

La presión se define como el valor absoluto de la fuerza por unidad de superficie a través de una pequeña superficie que pasa por ese punto (Domingo, A. 2011).

2.2.8 PRESIÓN HIDROSTÁTICA

Es la presión debida al peso de un fluido en reposo y el cual determina las fuerzas que actúan sobre cuerpos flotantes o sumergidos, esta se calcula con la siguiente ecuación.

ECUACIÓN 2

$$P = \rho * g * h * P_0$$

De donde:

P = Presión hidrostática [Pa] o [N/m^2].

ρ = Densidad del líquido [Kg/m^3] o [Ns^2/m^4].

g = Aceleración de la gravedad [m/s^2].

h = Altura del fluido [m].

P_0 = Presión atmosférica [Pa].

2.2.9 CAUDAL

Volumen e líquido trasegado por unidad de tiempo que circula por un determinado sistema hidráulico.

ECUACIÓN 3

$$Q = v * A$$

De donde:

Q = Caudal volumétrico [m^3/s].

v = Velocidad del fluido [m/s].

A = Área transversal de paso [m^2].

2.2.10 ECUACIÓN DE BERNOULLI

Es la relación aproximada entre la presión, la velocidad, y la elevación. Cada término en la ecuación de Bernoulli es una forma de energía que posee el fluido por unidad de peso del fluido que se mueve en el sistema.

Esta ecuación toma en cuenta la relación aproximada que existe entre los cambios en la carga de presión, velocidad, y elevación entre dos puntos del sistema (Moot R. 2006).

ECUACIÓN 4

$$h_a + \frac{P_1}{\rho_1 g} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho_2 g} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_c$$

Ecuación general de la conservación de energía.

2.2.11 COEFICIENTE DE FRICCIÓN

Dependerá directamente del tipo de régimen de flujo en el que se encuentra el fluido en cada tubería (Muños L. 2012).Y deberá ser determinado experimentalmente.

TABLA 1: Coeficiente de fricción.

Numero de Reynolds	Tipo de flujo	Coeficiente de fricción
<2000	Flujo laminar. Dependerá únicamente del número de Reynolds.	$f = \frac{64}{R}$ R = número de Reynolds.
>4000	Flujo turbulento. No dependerá únicamente del número de Reynolds, sino también de la rugosidad de la tubería.	$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{D}$ ε_r = rugosidad en las paredes de la tubería. D = diámetro en la tubería.

La rugosidad de las tuberías está dada por los diferentes materiales, y esta será:

TABLA 2: Rugosidad de los materiales.

Materiales	Pies	Metros
Bronce, plomo, estaño, vidrio, tubería fundida, cemento torneado centrifugante y revestimiento bituminoso.	0,000005	0,00000152
Acero comercial y hierro forjado	0,00015	0,000046
Plástico (PE, PVC)	0,0000049	0,0000015
Hierro colado bañado en asfalto	0,00040	0,000122
Hierro galvanizado	0,00050	0,000152
Hierro colado no revestido	0,00085	0,00026
Vara de madera	0,0006- 0,003	0,000183 – 0,00091
Concreto	0,001- 0,01	0,00030 – 0,0030
Acero remachado	0,003 – 0,03	0,00091 – 0,0091

Fuente: Calculo hidráulico de tuberías p. 21.

2.3 MEDIDORES DE CAUDAL

La medición de flujo se refiere a la capacidad de medir la velocidad que posee un flujo ya sea volumétrico o másico de cualquier líquido o gas, la medición de los fluidos es una función importante dentro de cualquier industria que emplee fluidos. La medición de esta variable es de suma importancia ya que con esta se puede realizar operaciones de gran consideración dentro de las industrias, entre las cuales se puede encontrar: el balance de líquidos, el control de calidad, y la operación de procesos continuos.

Existen varias formas de medir el flujo entre las cuales podemos destacar dos métodos importantes empleados en las industrias los cuales son: volumétricos, los cuales determinan el volumen fluido y los de masa, los cuales determinan la cantidad de masa del fluido. Los medidores volumétricos son destinados exclusivamente a la medida de caudal y los de masa son utilizados cuando se requiere mayor precisión en la medición del proceso. Entre los principales de medidores volumétricos más utilizados en la industria podemos destacar los siguientes:

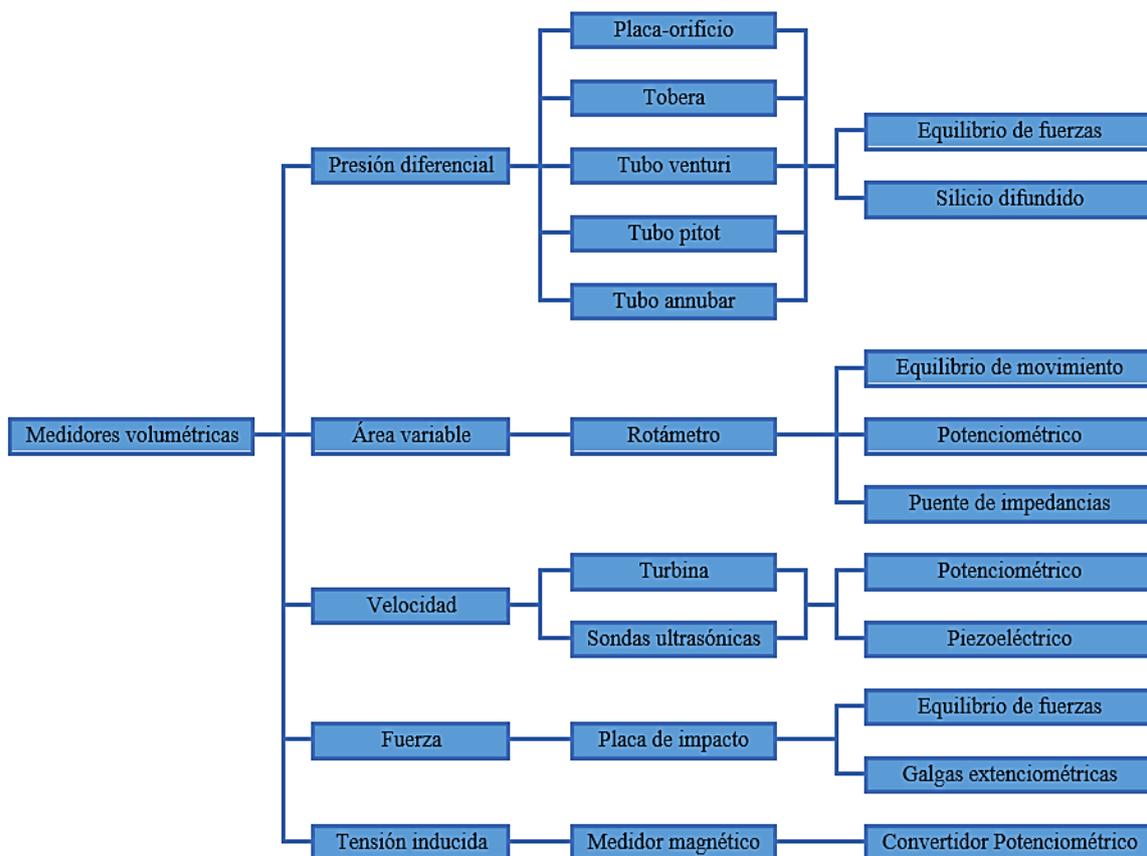


FIGURA 3: Principales medidores de caudal volumétricos.

Fuente: Creus. 2010

El análisis será realizado en base a los medidores de caudal con principio de funcionamiento de velocidad.

2.3.1 MEDIDORES DE ÁREA VARIABLE

Caracterizados por el cambio de área producido entre sus elementos (primario y secundario), en movimiento y el cuerpo del medidor en que se encuentran. Estos medidores utilizan el mismo principio de funcionamiento que los medidores de presión diferencial los cuales mantienen la presión diferencial constante, y la relación entre la energía cinética y la energía debida a la presión.

Existen diferentes tipos de medidores de área variable, pero los más utilizados en la industria son los rotámetros, los cuales basan su operación en la fuerza de empuje del flujo sobre un obstáculo de un peso determinado. El flujo que pasa por el rotámetro indica la posición del mismo flotador, el cual se estaciona en el punto donde las fuerzas de empuje y peso del flotador se estabilizan.

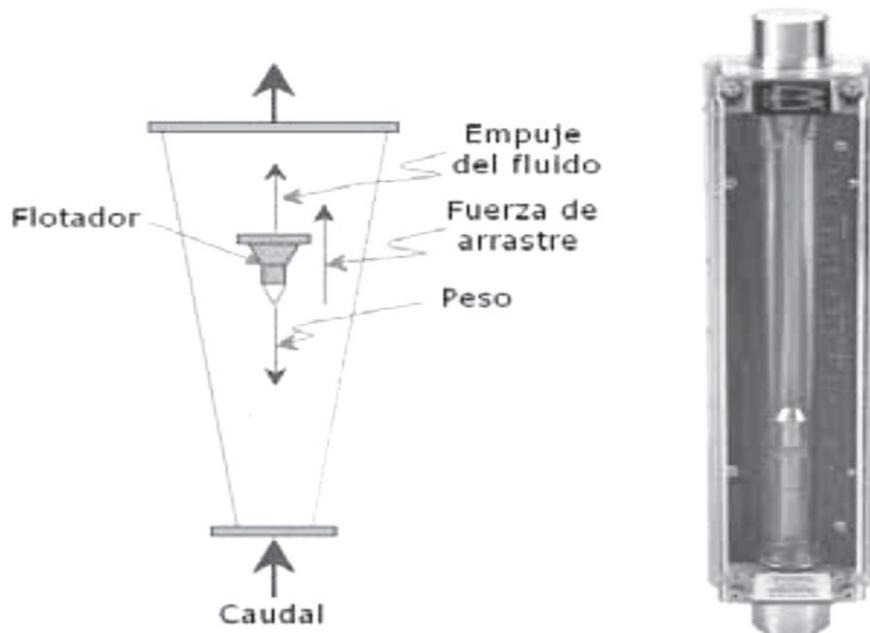


FIGURA 4: Rotámetro.

Fuente: Creus. 2010 p.144

Los rotámetros son instrumentos con buena precisión y repetitividad bajo el mantenimiento y de uso difundido.

2.3.2 MEDIDORES DE VELOCIDAD

Los instrumentos de velocidad basan su operación en función de la velocidad del fluido a ser medido.

2.3.3 MEDIDOR DE TURBINA

Un medidor de turbina consiste en un rotor que gira al paso del fluido con una velocidad directamente proporcional al caudal. El fluido choca contra el borde frontal de las palas del rotor produciendo una baja presión, y como resultado de esta presión diferencial las palas giran (Creus. 2010).

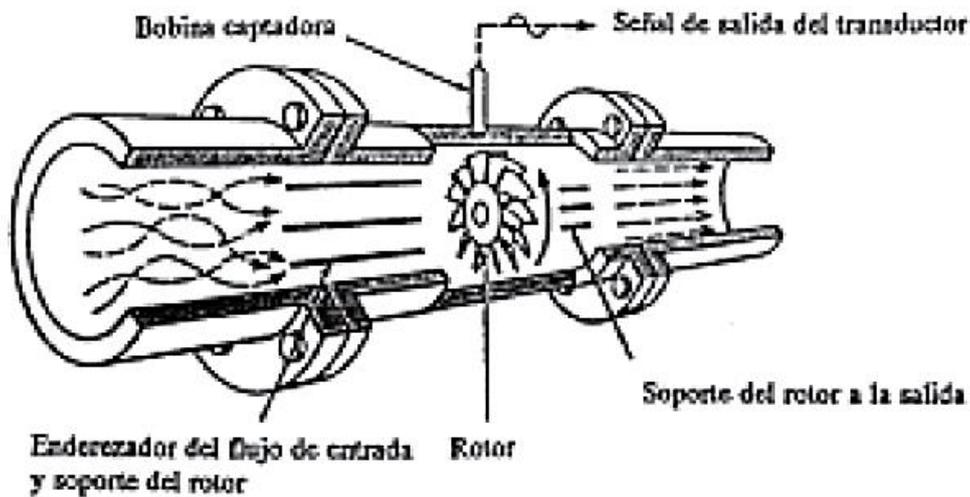


FIGURA 5: Medidor de turbina.

Fuente: Gutiérrez 2004 p.35.

La salida para la medición del sensor tipo turbina viene determinada por una serie de impulsos eléctricos, los cuales son producidos por el paso individual de las paletas de la turbina a través de un campo magnético creado por un imán permanente el cual está montado en una bobina captora ubicada en el exterior. El paso de las palas por el circuito magnético, varía la reluctancia de este, provocando una inducción de corriente alterna en la bobina.

La turbina es un instrumento con buen tiempo de respuesta, normalmente su turbina es fabricada en materiales plásticos por lo tanto se puede utilizar con líquidos corrosivos, una desventaja que tiene este medidor es que si junto con el fluido medido viene gas o aire, este lo va a censar; este medidor no es muy sensible a las variaciones de la densidad.

2.4 BOMBAS

En la industria y la agricultura, en cuanto a circulación de fluidos, de alguna manera se relaciona con las bombas. La bomba es una turbo maquinaria, la cual obtiene energía mecánica y la restablece en energía que un fluido adquiere en forma de presión, de posición o de velocidad. Existen diferentes tipos de bombas para diferentes aplicaciones.

Los factores fundamentales que permiten que un sistema de bombeo este en óptimo funcionamiento son: presión final, presión del proceso, velocidad del fluido, y tipo de fluido, dependiendo del tipo de fluido variara la eficiencia de la bomba.

2.4.1 CLASIFICACIÓN

En la industria las bombas pueden clasificarse como:

- Bombas autocebantes.
- Bombas centrifugas.
- Bombas mutietapa.
- Bombas periféricas.
- Bombas sumergibles.

2.4.1.1 BOMBAS AUTOCEBANTES

Estas bombas poseen una particularidad constructiva en su carcasa la cual es un pequeño reservorio por donde circula parte del líquido bombeado, y cuando la bomba deja de funcionar parte del líquido queda en el reservorio permitiendo a la bomba crear un vacío y empezar la succión del líquido a bombear.



FIGURA 6: Bomba autocebante.

Fuente: <http://pedrollo.com.ec/producto/jsw3/>

2.4.1.2 BOMBA CENTRIFUGA

Es una máquina hidráulica, que intercambia la cantidad de movimiento entre la máquina y el fluido, por medio del impulsor con alabes, que accionado desde el exterior permite que el fluido obtenga la energía necesaria para obtener una presión ideal. El cuerpo de la bomba recibe el líquido que sale del impulsor, y por la construcción especial de la bomba esta transforma su energía cinética en presión, dirigiendo al mismo tiempo al exterior el líquido bombeado.



FIGURA 7: Bomba centrífuga.

Fuente: <http://pedrollo.com.ec/producto/hf/>

2.4.1.3 BOMBA MULTIETAPA

Es aquella que posee dos o más impulsores (turbinas) de agua montadas en un mismo eje, este tipo de bombas son de alto rendimiento debido al número de impulsores que poseen que se utilizan para aumentar la presión del líquido bombeado.



FIGURA 8: Bomba multietapa.

Fuente: <http://pedrollo.com.ec/producto/mk/>

2.4.1.4 BOMBAS PERIFÉRICAS

Conocidas también como bombas tipo turbina, esta produce remolinos en el líquido a través de los alabes de la turbina a velocidades muy altas, y a su vez el líquido va recibiendo impulsos de energía. Son utilizadas para bombear líquidos a grandes alturas, elevando la presión del líquido pero a su vez disminuyendo el caudal.

Uno de los beneficios de estas bombas son su valor comercial el cual es mucho menor al de una bomba centrífuga, y además tienen un bajo consumo eléctrico.



FIGURA 9: Bomba periférica.

Fuente: <http://pedrollo.com.ec/producto/pk/>

2.4.1.5 BOMBAS SUMERGIBLES

Este tipo de bombas son diseñadas para ser sumergidas en el líquido que se necesita bombear, poseen un impulsor sellado en la carcasa, el cual le permite a esta bomba no depender de la presión de aire externa para que el líquido haga, y además de proporcionar una fuerza de elevación significativa.



FIGURA 10: Bomba sumergible.

Fuente: <http://pedrollo.com.ec/producto/mc/>

2.5 CÁLCULO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO

2.5.1 VELOCIDAD EN EL SISTEMA DE TUBERÍA

La velocidad máxima es el límite superior de diseño con el cual se trata de evitar el desgaste de las paredes de las tuberías y estructuras (Calderón, 2011).

A continuación se muestra la tabla con la velocidad permisible en las tuberías.

TABLA 3: Velocidad mínima y máxima permisible en las tuberías.

Material de la Tubería.	Velocidad (m/seg)	
	Max.	Min.
Concreto simple hasta 45mm de diámetro	3.00	0.30
Concreto reforzado de 60mm de diámetro o mayores	3.50	0.30
Concreto reforzado	3.50	0.30
Acero con revestimiento.	5.00	0.30
Acero sin revestimiento	5.00	0.30
Asbesto Cemento	5.00	0.30
Hierro fundido	5.00	0.30
Hierro dúctil	5.00	0.30
Polietileno alta densidad	5.00	0.30
PVC	5.00	0.30

Fuente: Calculo Hidráulico de Tuberías Industriales PDVSA

2.5.2 PÉRDIDA DE PRESIÓN EN VÁLVULAS Y CONEXIONES

Un fluido que se desplaza constantemente en una tubería recta de distancia y longitud constante, posee una forma de configuración característica para el flujo, cualquier cambio u obstáculo en dicha tubería cambiara la dirección de la corriente de flujo parcial o totalmente, cambiando la configuración característica del flujo en tubería recta, provocando una pérdida significativa de presión. Se determina de la siguiente manera:

ECUACIÓN 5

$$hl = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

De donde:

hl = Caída de presión [m].

f = Factor de fricción.

L = Longitud de la tubería [m].

D = Diámetro interno de la tubería [m].

V = Velocidad del fluido [m/s].

g = Aceleración gravitacional [m/s^2].

Para las pérdidas secundarias se utilizara la misma ecuación, pero expresada con el coeficiente "k".

ECUACIÓN 6

$$hf = k * \frac{V^2}{2g}$$

De donde:

hf = Caída de presión [m].

k = constante de resistencia (válvula o conexión).

$\frac{V^2}{2g}$ = energía cinética o presión dinámica.

Nota: la constante K de cada elemento se encuentra en el anexo A.

2.5.3 CALCULO DE LAS PÉRDIDAS TOTALES EN LA TUBERÍA

Para realizar el cálculo de las pérdidas de energía entre dos puntos se utilizara la ecuación general de conservación de energía o teorema de Bernoulli. En la cual se tomara en cuenta las siguientes condiciones para la aplicación al módulo.

$$h_a + \frac{P_1}{\rho_1 g} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho_2 g} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_c$$

De donde:

$P_1 = P_2 = 0$; Por ser un tanque a presión atmosférica.

$Z_1 = Z_2 = 0$; El tanque es el mismo tanto a la succión como a la descarga.

$V_1 = V_2 = 0$; Considerando que la velocidad a la que disminuye el nivel de líquido en el tanque tiende a cero.

Por lo tanto con los parámetros dados se puede deducir que:

$$h_l = h_a$$

Dado que (h_l) es la sumatoria de las pérdidas primarias y secundarias existentes en el sistema de tubería, la ecuación quedara en función de caudal.

ECUACIÓN 7

$$h_l = \frac{1}{2 \times g} \left[\left(\frac{Q_1}{A_1} \right)^2 \left(f_1 \frac{L_1}{D_1} + k_1 \right) + \left(\frac{Q_2}{A_2} \right)^2 \left(f_2 \frac{L_2}{D_2} + k_2 \right) + \left(\frac{Q_3}{A_3} \right)^2 \left(f_3 \frac{L_3}{D_3} + k_3 \right) \right]$$

De donde:

h_l = Sumatoria de las pérdidas [m].

Q = Caudal volumétrico [m^3/s].

A = Área transversal de paso [m^2].

f = Factor de fricción.

L = Longitud de la tubería [m].

D = Diámetro interno de la tubería [m].

K = Coeficiente de resistencia.

g = Aceleración gravitacional [m/s^2].

2.5.4 TUBERÍAS Y ACCESORIOS

Para la instalación del sistema no fue necesario la utilización de tubería de acero galvanizada ya que la presión no es tan elevada, se aplicó tubería de PVC hidro3 de ¾” para la parte de descarga y para la parte de succión accesorios de 1”.

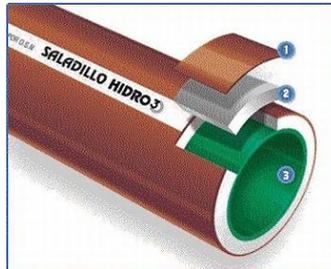


FIGURA 11: Tubería PVC hidro3.

Fuente: http://www.industriassaladillo.com.ar/esp/colombia/h3_ventajas.php

Los accesorios utilizados en el sistema fueron:

TABLA 4: Accesorios utilizados en la construcción del sistema hidráulico.

			
Codo HH 90° ¾”	Unión universal ¾”	Adaptador para tanque c/junta 1” y ¾”	Reductor de 1” a ¾” rosca
			
Neplo c/tuerca 1 y ¾”	Valvula check 1”	Válvula de bola de 1” y ¾”	Acople rápido tipo F 1”
			
Acople rápido tipo D 1”	Unión tipo “T”	Reductor de ¾” a ½”	Amplificador de ½” a ¾”

2.5.5 DIMENSIONAMIENTO DE BOMBAS Y MOTORES

La potencia de la bomba estará determinada por la siguiente ecuación:

ECUACIÓN 8

$$P_{teorica} = h_l \times \rho \times g \times Q_t$$

De donde:

$P_{teorica}$ = Potencia [w].

h_l = Sumatoria de las pérdidas [m].

ρ = Densidad del líquido [Kg/m^3] o [Ns^2/m^4].

Q = Caudal volumétrico [m^3/s].

g = Aceleración gravitacional [m/s^2].

Dado que en la operación existen rangos de eficiencia, se determinara a potencia real de la bomba.

ECUACIÓN 9

$$P_{real} = \frac{P_{teorica}}{\eta}$$

De donde:

η = Eficiencia de la bomba.

En el cual se utilizara el 30% como valor mínimo que podría tener la bomba.

2.5.5.1 SISTEMAS DE CONTROL

Un sistema de control es un conjunto de dispositivos los cuales reciben acciones o variables externas, y cuyas respuestas a estas perturbaciones son denominadas variables de salida, las que se encargan de administrar, ordenar, dirigir, o regular el comportamiento del sistema con la finalidad de reducir las probabilidades de fallas y obtener los resultados deseados.

2.5.6 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE CONTROL

- **Valor de referencia.** Es el valor que se desea obtener en la variable del proceso a la cual el controlador debe mantener estable.
- **Detector de error.** Es el encargado de detectar los errores en las variables del proceso, mediante la comprobación del valor de referencia y el valor medida de la variable.
- **Controlador.** Examina el error en la variable de proceso, y determina las acciones necesarias a realizarse.
- **Actuador.** Ejerce influencia directa en el proceso, ejerce los cambios necesarios en la variable controlada, para que la magnitud de esta sea igual al valor de referencia.
- **Proceso.** Conjunto de actividades que están relacionadas o que al momento de interactuar entre sí, los elementos de entrada se convierten en resultados.
- **Elemento de medida.** Hace referencia a la transducción de una variable a una u otra forma análoga de aquella, empleando para ello un sensor o transductor.

2.5.7 TIPOS DE CONTROL

Los tipos de control pueden ser:

2.5.7.1 CONTROL MANUAL

En este tipo de control, las respuestas de la variable de salida son obtenidas mediante acciones controladas por el hombre sobre el elemento de control.

2.5.7.2 CONTROL AUTOMÁTICO

En este tipo de control las respuestas de la variable de salida son obtenidas automáticamente sin que nadie intervenga sobre el elemento de control. Este tipo de control se puede clasificar en sistemas de lazo abierto y sistemas de lazo cerrado.

2.6 SISTEMAS DE LAZO ABIERTO

Son aquellos en los que las variables de salida no interfieren o no influyen en las variables de entrada, la exactitud de estos sistemas dependerá de la calibración de los mismos.

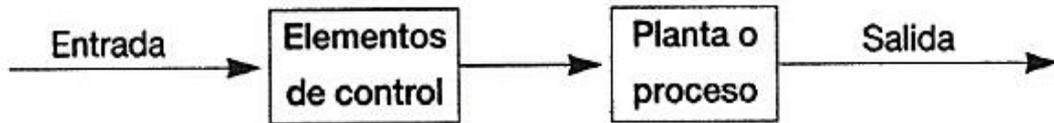


FIGURA 12: Sistema de lazo abierto.

2.7 SISTEMAS DE LAZO CERRADO

Son aquellos en los cuales la acción de control depende en cierta manera de la variable de salida, esto se logra mediante una propiedad del sistema de lazo cerrado la cual se la denomina retroalimentación, la que consiste en comparar la variable de salida con la de entrada, de tal manera que la acción de control este establecida como una función de ambas variables.

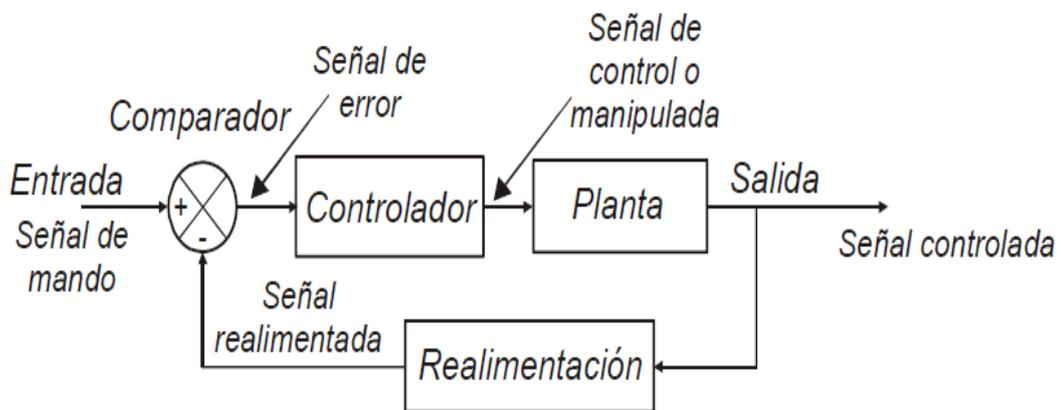


FIGURA 13: Sistema de lazo cerrado

2.8 ACCIONES BÁSICAS DE CONTROL

Las acciones básicas del control pueden ser:

2.8.1 CONTROL ON/OFF

En este tipo de control únicamente posee dos posiciones fijas, la de encendido y la de apagado para su operación. Este controlador es el más simple, barato, y de menor precisión por lo cual su uso se ha extendido al uso industrial y doméstico. El dispositivo corrector posee dos estados de operación en el cual si la señal de error es positiva el dispositivo de corrección recibirá una señal y permanecerá inactivo. Si la señal de error es negativa el dispositivo de corrección recibirá una señal y permanecerá activo.

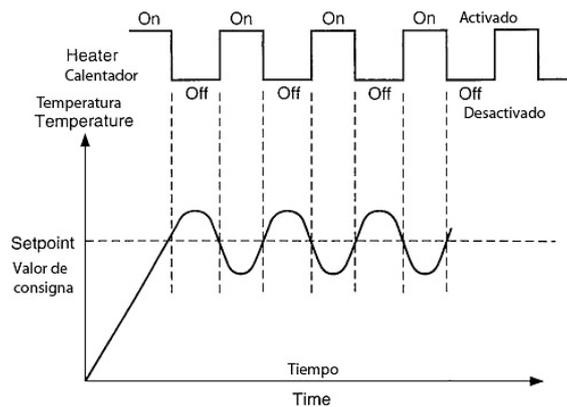


FIGURA 14: Control On/Off.

Fuente: West instruments, 2005

2.8.2 CONTROL PROPORCIONAL

Este tipo de control el valor de referencia es proporcional a la señal de error. El control proporcional es el más simple de todos los tipos de control ya que consiste en amplificar la señal de error antes de aplicarla al sistema o proceso.

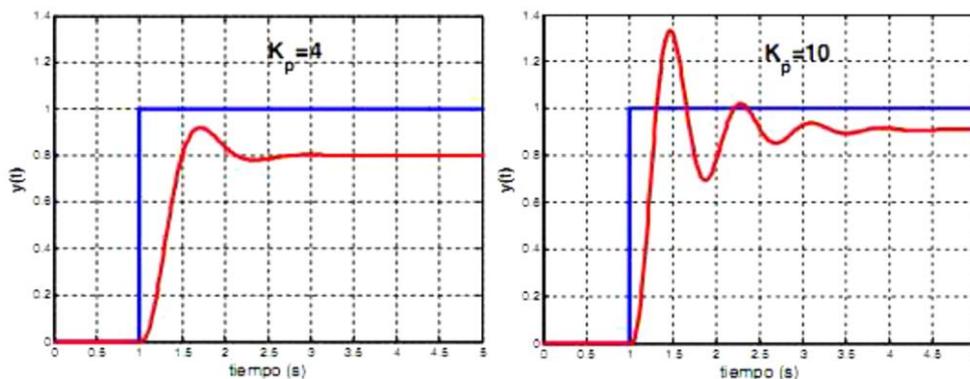


FIGURA 15: Control Proporcional.

Fuente: Andrade, R. & Macas W., O. Tesis de Ingeniería Electrónica y Control. Escuela Politécnica Nacional. Quito – Ecuador. p.28

El control proporcional, posee un problema en el cual la variable del proceso no se estabiliza en el valor deseado, sino que posee un error estacionario, esta es la principal característica de este tipo de control. El error estacionario se puede reducir aumentando la acción proporcional del sistema, pero al aumentar demasiado la acción proporcional el sistema puede volverse oscilatorio, parecido a un control On/Off, y al reducir la acción proporcional el sistema pierde efectividad y no responde rápidamente a las perturbaciones externas, siempre existirá algo de error estacionario.

2.8.3 CONTROL PROPORCIONAL DERIVATIVO PD

El control PD es un control proporcional al cual se le agrega la capacidad de considerar la velocidad de cambio de la variable del sistema, reduce el sobre impulso y el tiempo de estabilización, permitiendo obtener una variable estable y sin oscilaciones.

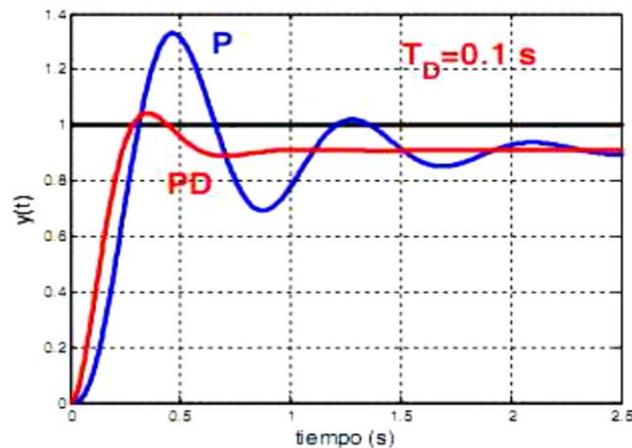


FIGURA 16: Control Proporcional Derivativo vs. Control Proporcional.

Fuente: Andrade, R. & Macas W., O. Tesis de Ingeniería Electrónica y Control. Escuela Politécnica Nacional. Quito – Ecuador. p.29

Se obtiene una respuesta demasiado lenta si la influencia del controlado PD es demasiado grande.

2.8.4 CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL PI

El control PI es un control proporcional el cual agregado una acción integral, le permite corregir la variable de salida tomando en cuenta la magnitud del error y el tiempo que ha permanecido en el sistema. En el control PI se presenta un decremento del tiempo de subida, un incremento en el sobre impulso y el tiempo de estabilización, y posee el efecto de eliminar el error en el estado estable, lo cual empeora la respuesta transigente.

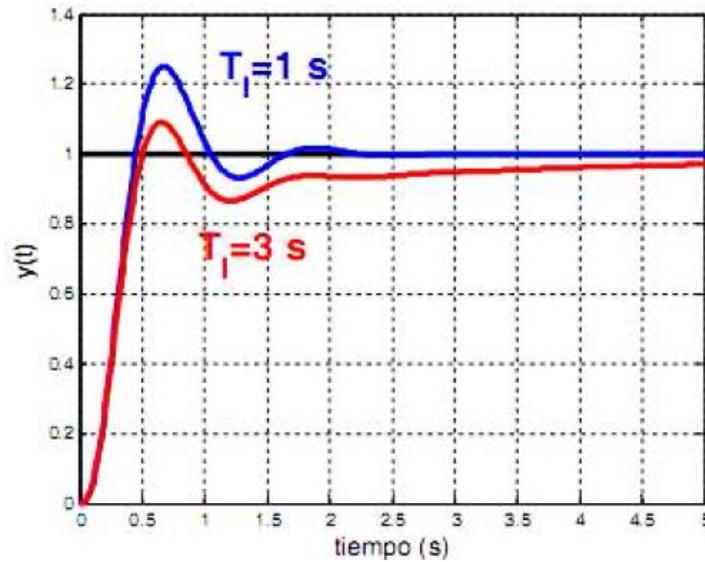


FIGURA 17: Control integral.

Fuente: Andrade, R. & Macas W., O. Tesis de Ingeniería Electrónica y Control Escuela Politécnica Nacional. Quito – Ecuador p.30

2.8.5 CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO PID

Es la combinación de la acción proporcional, la acción integral, y la acción derivativa, simultáneamente superpuestas entre sí. Esta acción tiene las ventajas de cada una de las 3 acciones de control. En la siguiente tabla se resume las características de cada una de las acciones de control.

TABLA 5: Resumen de las características de acción de control.

Tipo de Control	Tiempo de Subida	Sobre Impulso	Tiempo de Estabilización	Error en Estado Estable
Proporcional	Decrece	Crece	Cambio menor	Decrece
Proporcional – Integral	Decrece	Crece	Crece	Se elimina
Proporcional – Derivativo	Cambio menor	Decrece	Decrece	Cambio menor.

La siguiente tabla solo debe ser tomada como referencia ya que los valores de K_p , K_i , y K_d , son relacionadas entre sí, y por ende las correlaciones de la tabla mostrada no son tan precisas. La relación entre la salida del controlador $u(t)$ y la señal de error $e(t)$ de la acción de control proporcional, integral, derivativo está dada por:

ECUACIÓN 10

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

En donde:

K_p = Ganancia Proporcional.

T_i = Tiempo integral.

T_d = Tiempo derivativo.

K_i = Ganancia integral.

K_d = Ganancia derivativa.

El sistema de control tiene que ser estable, por lo cual existen tres tipos de comportamiento bien definidos.

- A. Control sub amortiguado:** Esta condición posee una buena velocidad de respuesta, pero en algunos casos a cierta amplitud se producen varias oscilaciones antes que la variable se estabilice a un determinado valor. Esto sucede cuando la constante derivativa es demasiado pequeña, y la constante integral es grande.

- B. Control con amortiguamiento crítico:** En esta condición corresponden los valores óptimos de P, D, I. Además esta condición posee una mejor velocidad de respuesta, y el sistema es bastante estable.

- C. Control sobre amortiguado:** En esta condición la velocidad de respuesta es muy lenta, pero el sistema es muy estable y no adquiere ningún comportamiento oscilatorio indeseable. También puede deberse a una constante derivativa muy grande.

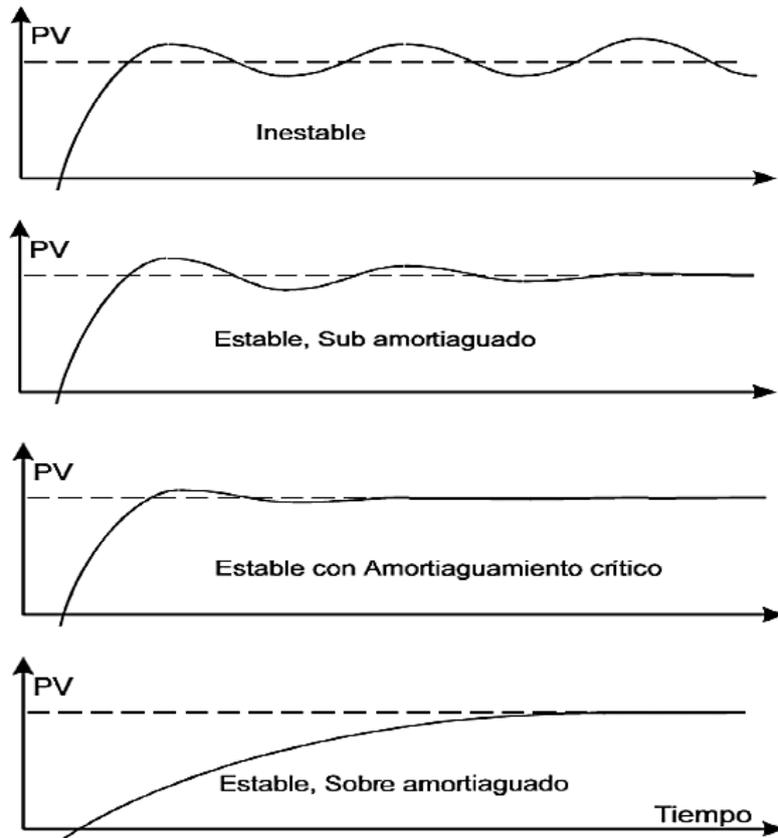


FIGURA 18: Comportamiento de sistemas estables.

Fuente: Andrade, R. & Macas W., O. Tesis de Ingeniería Electrónica y Control. Escuela Politécnica Nacional. Quito – Ecuador. p32

2.9 SINTONIZACIÓN PID POR EL MÉTODO DE ZIEGLER – NICHOLS

El método de Ziegler – Nichols está basado en la determinación de algunas características de la dinámica del proceso. Es ampliamente utilizado ya que permite realizar el ajuste o la sintonización de forma empírica de un regulador PID, de forma en la cual no es necesario conocer las ecuaciones del sistema o de la planta.

2.9.1 MÉTODO DE LA RESPUESTA EN ESCALÓN

Este método está basado en la obtención de la respuesta del proceso en forma de un escalón en lazo abierto, que presentan tiempos de retardos desde que reciben la señal de control hasta que comienzan a actuar. Para poder calcular los parámetros se debe trazar una recta tangente a la señal de salida del sistema.

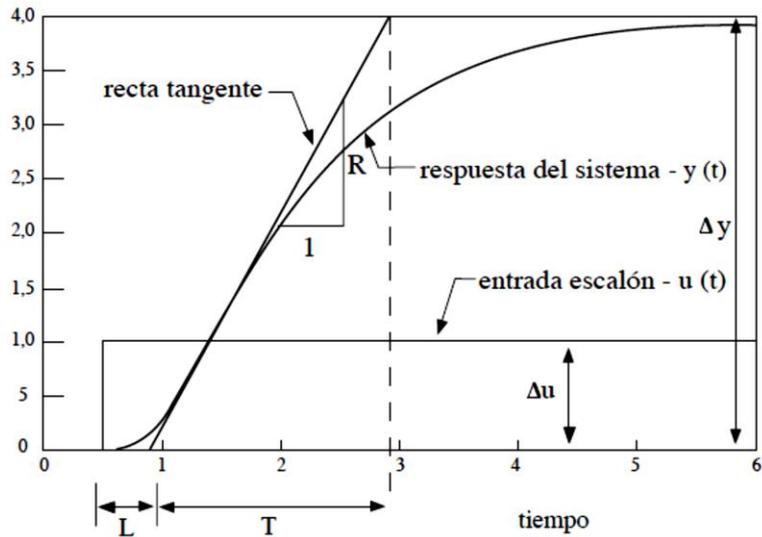


FIGURA 19: Método escalón Ziegler – Nichols.

Fuente: Martínez S. Reglas De Sintonización Para Controladores PID

La curva se caracteriza por dos parámetros que son el tiempo de retardo L y la constante del tiempo T . El tiempo de retardo y la constante del tiempo son determinados por una recta tangente la cual es dibujada en el punto de inflexión de la curva, y determinando las intersecciones de la tangente con el eje del tiempo y la línea de estabilización del sistema o $c(t)=K$.

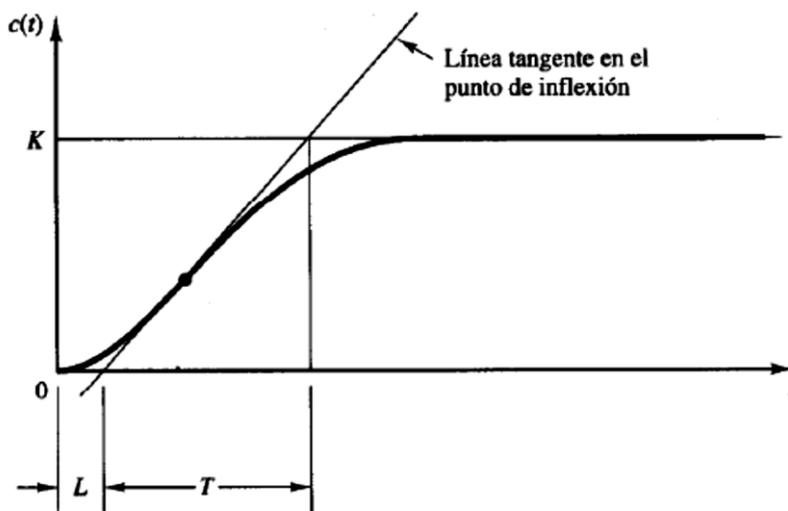


FIGURA 20: Curva de respuesta de método escalón.

Fuente: Martínez S. Reglas De Sintonización Para Controladores PID

De esta manera Ziegler y Nichols establecieron los valores de K_p , T_i y T_d , de acuerdo a las formulas establecidas en la siguiente tabla.

TABLA 6: Constantes PID.

	K_p	T_i	T_d
P	T/L	∞	0
PI	$0,9T/L$	$L/0,3$	0
PID	$1,2*T/L$	$2*L$	$0,5*L$

Fuente: Martínez S. Reglas De Sintonización Para Controladores PID

TABLA 7: Valores de K_i y K_d .

K_i	K_d
K_p/T_i	K_p*T_d

Fuente: Martínez S. Reglas De Sintonización Para Controladores PID

2.10 SINTONIZACIÓN POR LA GANANCIA CRÍTICA EN LAZO CERRADO

En este caso se reduce al mínimo la acción derivativa y la acción integral se considerara como infinita únicamente se utilizara la acción proporcional.

La prueba realizada en lazo cerrado consiste en aumentar la ganancia proporcional hasta lograr que el sistema oscile de forma mantenida ante cualquier perturbación.

La oscilación debe ser lineal, sin saturaciones, momento en el cual se debe proceder a realizar la medición de la ganancia proporcional llamada también ganancia crítica o K_{cr} y el periodo de oscilaciones T_{cr} en segundos.

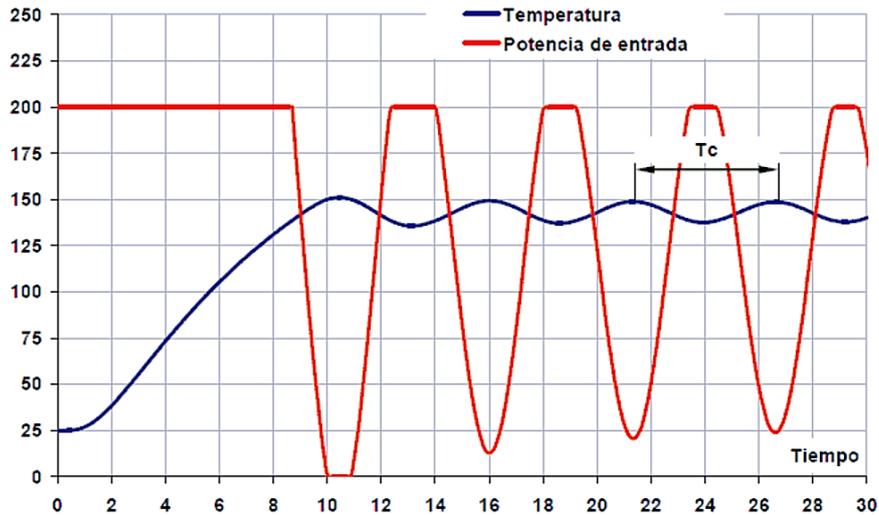


FIGURA 21: Sintonización por la ganancia crítica en lazo cerrado.

Fuente: <http://www.picuino.com/es/arduprog/control-ziegler-nichols.html>

De esta forma experimental pueden ser hallados estos dos parámetros que con los cuales se puede calcular los parámetros del controlador PID.

TABLA 8: Reglas de Ziegler y Nichols basada en ganancia crítica y periodo crítico.

	Kp	Ti	Td
P	$0,50 \cdot K_{cr}$	∞	
PI	$0,45 \cdot K_{cr}$	$0,83 \cdot T_{cr}$	
PID	$0,6 \cdot K_{cr}$	$0,50 \cdot T_{cr}$	$0,125 \cdot T_{cr}$

Fuente: Martínez S. Reglas De Sintonización Para Controladores PID

2.11 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS

Un sistema es donde las variables de diferentes tipos convergen para producir señales visibles al usuario. En donde las señales que son observables serán las salidas del sistema, las señales que el usuario puede manipular serán las entradas del sistema, y las señales que influyen o interfieren en el sistema y que no pueden ser manipuladas se denominan perturbaciones.

2.11.1 TIPOS DE MODELOS DE UN SISTEMA

Un modelo básicamente es una herramienta utilizada para la identificación de sistemas, la cual permite predecir el comportamiento de la planta sin necesidad de experimentar en ella.

2.11.2 MODELOS MENTALES, INTUITIVOS O VERBALES

Carecen de cualquier formalidad matemática.

2.11.3 MODELOS NO PARAMÉTRICOS

Requieren de la utilización de tablas o gráficos para describir sus propiedades dinámicas mediante un número no finito de parámetros.

2.11.4 MODELOS MATEMÁTICOS

Para modelos más avanzados los cuales requieran la descripción de los nexos entre las variables del sistema. Esto pueden clasificarse en:

A. Determinísticos o estocásticos: Expresan una relación entre la entrada y salida mediante una ecuación exacta.

B. Dinámicos o estáticos: La salida depende únicamente de la entrada en el mismo instante, existe una relación directa entre entrada y salida.

C. Continuos o discretos: En ambos casos trabajan con señales continuas y muestreadas respectivamente, y son determinados mediante ecuaciones diferenciales.

2.11.5 MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE MODELOS

Existen dos métodos para la obtención de un modelo del sistema:

A. Modelado teórico: Es un método analítico el cual describe el comportamiento dinámico de un fenómeno o de un proceso, mediante las leyes básicas de la física.

B. Identificación del sistema: Método experimental en el cual se obtiene el modelo del sistema mediante la recolección de datos reales de la planta bajo estudio.

2.11.6 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS

Identificar, es determinar experimentalmente el modelo dinámico de un sistema mediante la obtención de datos de las entradas y salidas, el cual reproducirá dicho modelo con la suficiente exactitud para los fines deseados.

2.11.7 PROCESO DE IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS

La identificación de sistemas comprende los siguientes pasos:

- i. **Obtención de datos de entrada y salida:** Mediante la aplicación de una señal de entrada se procede a excitar el sistema y se registra la evolución de entrada y salida durante un intervalo de tiempo.
- ii. **Tratamiento previo de los datos registrados:** Generalmente los datos registrados están acompañados de ruidos o imperfecciones las cuales tienen que ser corregidos o eliminados antes del proceso de identificación.
- iii. **Elección de la estructura del modelo:** Si se desea obtener un modelo paramétrico, se debe determinar la estructura deseada para dicho modelo.
- iv. **Obtención de parámetros del modelo:** Se estima los parámetros que mejor se ajusten a la respuesta del modelo, y a los datos de entrada y salida obtenidos experimentalmente.
- v. **Validación del modelo:** Determina si la respuesta del modelo obtenido satisface el grado de exactitud para la aplicación en cuestión. Si el modelo no es validado puede a que se deba a que los datos de entrada-salida no proporcionen la suficiente información dinámica del sistema o el criterio de ajustes de los parámetros del sistema.

2.11.8 MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN

Existen diversos métodos de identificación los cuales se los puede clasificar dependiendo del modelo a utilizar.

2.11.9 MÉTODOS NO PARAMÉTRICOS

Se puede definir el modelo mediante el uso de gráficas, tablas o mediante un número no finito de muestras.

2.11.10 MÉTODOS PARAMÉTRICOS

Se utiliza métodos cuantitativos los cuales describen la interacción de las variables de un proceso. Además se requiere de la elección de una posible estructura de modelo, criterio de ajuste de los parámetros, y la estimación de los parámetros que mejor se ajusten al modelo y a los datos experimentales.

2.12 FAMILIAS DE MODELOS DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

2.12.1 MODELO ARX

Kunusch (2003). Menciona que “Probablemente el modelo ARX sea a relación entrada salida más simple que se puede obtener sea la proveniente de una descripción del sistema como una ecuación lineal en diferencias” (p.16).

De manera explícita el modelo ARX se expresa según:

ECUACIÓN 11

$$y(t) + a_2y(t - 1) + a_2y(t - 2) + \dots + a_ny(t - n_a) = b_1u(t - 1) + b_2u(t - 2) + \dots + b_nu(t - n_b) + e(t)$$

Esto dará lugar a un sistema de ecuaciones donde las incógnitas a y b serán los coeficientes de la función de transferencia discreta.

2.12.2 ESTRUCTURA ARMAX

Kunusch (2003) dice que: “La estructura ARMAX, posee una desventaja la cual es la escases y falta de libertad en la descripción del termino de perturbación, pero es posible incorporar una mayor flexibilidad al modelo si se agrega un término conocido como medida en movimiento” (p.17).

ECUACIÓN 12

$$y(t) + a_2y(t - 1) + a_2y(t - 2) + \dots + a_ny(t - n_a) = b_1u(t - 1) + \dots + b_nu(t - n_b) + e(t) + c_1e(t - 1) + \dots + c_ne(t - n_c)$$

Esto da lugar a un sistema de ecuaciones donde las incógnitas son los coeficientes del modelo discreto, cuyas soluciones se obtienen por predicción del error con el método de la máxima Verosimilitud. Para esto se usa la función ARMAX. (Arafet, Chang, Torres, Domínguez, 2008, p.62).

2.12.3 ESTRUCTURA ARARX

De acuerdo a Kunusch (2003): “En lugar de modelar el termino ruido como en la estructura ARX y como una medida en movimiento como en la estructura ARMAX, se puede describir esta perturbación como una auto regresión” (p.18).

ECUACIÓN 13

$$A(q).y(t) = B(q).u(t) + \frac{1}{D(q)}.e(t)$$

2.12.4 ESTRUCTURA ARARAMAX

Kunusch (2003) dice que: “Una forma más general aun es la que introduce la descripción ARMA en la estructura ARARX, dando como resultado el modelo ARARMAX” (p.18).

ECUACIÓN 14

$$A(q).y(t) = B(q).u(t) + \frac{C(q)}{D(q)}.e(t)$$

2.12.5 ESTRUCTURA DE ERROR DE SALIDA

La estructura de error de salida se representa de la siguiente forma.

ECUACIÓN 15

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t - nk) + e(t)$$

Con $F(q) = 1 + f_1q^{-1} + \dots + f_{nf}q^{-nf}$

2.12.6 ESTRUCTURA BOX- JENKINS

Kunusch (2003) afirma que: “el desarrollo del modelo de error de salida es para adicionar al modelo las propiedades del ruido en la salida. Pero si describimos esto mismo en el marco de un modelo ARMAX llegamos al siguiente resultado” (p.18).

ECUACIÓN 16

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t)$$

Kunusch (2003) también dice que: “Las funciones de transferencia G y H son parametrizadas en forma independiente como las funciones racionales” (p18).

ECUACIÓN 17

$$\hat{y}(t, \Theta) = \frac{D(q).B(q)}{C(q).F(q)} \cdot u(t) + \frac{C(q)-D(q)}{C(q)} y(t)$$

2.13 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS CON MATLAB

2.13.1 INTRODUCCIÓN AL TOOLBOX DE IDENTIFICACIÓN

MATLAB dispone de un amplio conjunto de aplicaciones para la identificación de sistemas, las cuales se encuentran agrupadas en el System Identification Toolbox, los que constituyen una gran herramienta al momento de la identificación y modelado de sistemas dinámicos.

Cada una de estas funciones incluye diferentes tipos de algoritmos para el ajuste de parámetros en todo tipo de modelos lineales. Además permiten examinar las propiedades de los modelos obtenidos, realizar un pre procesamiento de los datos utilizados para la identificación, en caso de ser necesario (López E. S/F).

A diferencia de otros toolbox, este proporciona una interfaz gráfica que facilita el trabajo con las funciones anteriores, realizando llamadas a las mismas de forma transparente al usuario (López E. S/F).

2.13.2 LOS DATOS DE ENTRADA Y SALIDA

Cada proceso de identificación parte de un conjunto de datos de entrada y salida los cuales se obtienen de forma experimental a partir de un modelo físico el cual se pretende modelar.

Cada una de las funciones del toolbox de identificación requiere como parámetro general datos de entrada – salida los cuales estarán dados en una matriz de dos columnas y n filas, siendo n el número de muestras (López E. S/F).

2.13.3 TRATAMIENTO DE DATOS

El toolbox de identificación proporciona un conjunto de funciones las cuales permiten realizar diferentes tratamientos de los datos de entrada y salida, para que sean más adecuados para un posible proceso de identificación (López E. S/F).

2.13.4 INTERFAZ GRÁFICA DEL TOOLBOX DE IDENTIFICACIÓN

El toolbox de identificación proporciona una interfaz gráfica en la cual el usuario puede manejar todas las funciones del mismo de una forma transparente sin necesidad de llamarlas desde las líneas de comandos (López E. S/F).

2.13.5 ESTRUCTURA DE LA VENTANA PRINCIPAL

La ventana principal se divide en las siguientes partes:

Los tableros de datos y modelos.

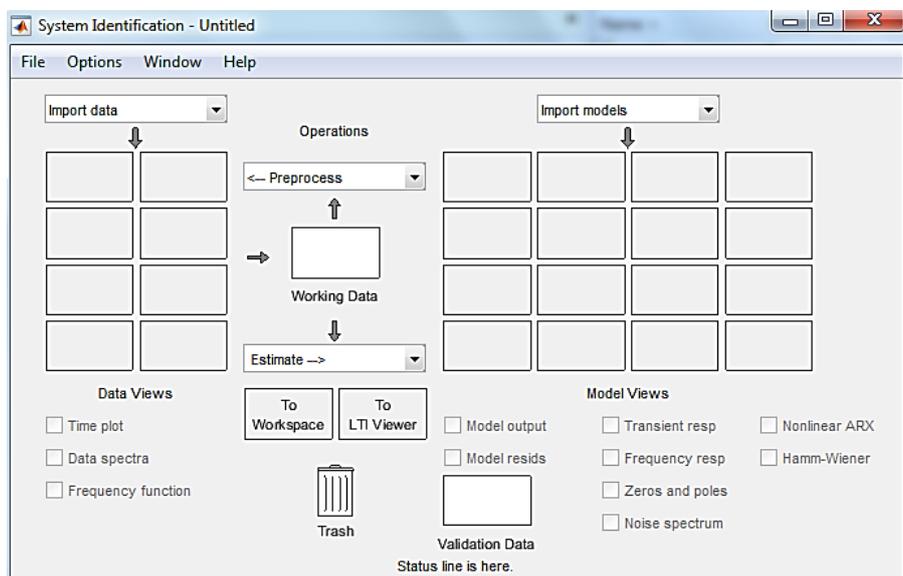


FIGURA 22. Panel principal del toolbox de identificación.

Como se puede apreciar en la figura 22, la ventana dispone de dos zonas con varios recuadros cada una:

- El tablero de datos se ubica en la zona izquierda de la pantalla y permite incluir en cada uno de los recuadros un conjunto distinto de datos de entrada salida, los cuales se los representa por un icono (López E. S/F).
- El tablero de modelos se encuentra en la zona derecha de la pantalla, y contiene en cada uno de sus recuadros diferentes modelos obtenidos a partir de la identificación realizada con el tablero de datos (López E. S/F).

2.14 DISPOSITIVOS DE CONTROL

2.14.1 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC)

PLC, llamado así por sus siglas en inglés de Controlador Lógico Programable, es un conjunto de dispositivos en estado sólido, que operado digitalmente reemplaza los circuitos secuenciales de relés utilizados en el control de máquinas y en el control de procesos. Su funcionamiento está basado en un programa de control creado por el usuario y almacenado en memoria, con el fin de monitorear los equipos conectados a las entradas y controlar el estado de los equipos que están conectados como salidas. En analogía es el cerebro de todo el proceso de automatización.



FIGURA 23: Controlador lógico programable MicroLogix 1100 (PLC).

Fuente: <http://nhbbobb.blogspot.com/2011/11/allen-bradley-micrologix-1100-1200-1762.html>

En la actualidad existe una gran variedad de marcas de PLC's en el mercado, entre las marcas más usadas en la industria tenemos:

- **Siemens.** Es una marca alemana de gran confiabilidad gracias a su robustez ante condiciones no optimas de funcionamiento (polvo, humedad, armónicos, etc.), posee un lenguaje de programación muy versátil, su alta confiabilidad hace sumamente costosa la adquisición.
- **Vipa.** Es una marca alemana, clonada de Siemens, posee un mejor desarrollo tecnológico ya que este PLC utiliza un procesador de mayor velocidad que el de Siemens.

- **Allen Bradley.** Es una marca de gran confiabilidad y de buen desempeño, cuyo principal mercado es Oil & gas, debido a su bajo coste, posee un lenguaje de programación muy sencillo y su software de programación tiene una interfaz intuitiva, mejor interacción con los protocolos de comunicación que posee, además abarca una gran gama de aplicaciones desde las más simples hasta las más complejas. Por el desarrollo en la tecnología de nivel de integridad de seguridad “SIL”, la cual aplica un grado de redundancia en sus componentes electrónicos, lo que le permite seguir trabajando ante la falla de alguno de sus componentes.

TABLA 9: Características técnicas del PLC MicroLogix 1100.

MicroLogix 1100	1763-L16BWA-B
Alimentación de entrada	120/240 VAC
Memoria	RAM no volátil con respaldo de batería
Registro de datos	Hasta 128Kb para registro de datos y 64Kb para recetas
Entradas digitales	6 de 24VCC, 4 rápidas 24 VCC
Entradas analógicas	Incorporadas, 2 en local
Salidas digitales	6 de relé
Puertos en serie	Un Puerto combinado RS-232 y RS-485
Protocolos en serie	DF1 Full Duplex, DF1 half-duplex maestro/esclavo
Protocolos Ethernet	Transmisión de mensajes Ethernet IP solamente
Potenciómetro de ajuste	Dos digitales
Entradas de alta velocidad (captación de pulsos)	4 a 20HZ
Reloj en tiempo real	incorporados
PID	Si(múltiples lazos limitados solo por la memoria del programa y pilas)
Matemática de punto flotante	Si
Edición en línea	Si

Fuente: Manual de usuario MicroLogix 1100

2.14.2 CONFIGURACIÓN INTERNA DE UN PLC

El PLC consiste básicamente en una CPU (Unidad Central de Proceso), áreas de memoria, circuitos apropiados para gestionar los datos de entrada y salida. Es utilizado generalmente para acciones de control, y este control se lo realiza a base de una lógica la cual está definida a través de un programa desarrollado por el usuario. Un PLC está constituido por un conjunto de tarjetas y circuitos impresos, en los cuales se encuentran montados los componentes electrónicos.

La estructura básica de un PLC propia mente está constituido por:

- A. Fuente de alimentación:** Cumple con la función de alimentar al CPU y a los demás elementos electrónicos del PLC.

- B. Unidad central de Proceso (CPU):** Es la parte más imprescindible del PLC, está diseñada a base de microprocesadores y memorias, además contiene la unidad de control, la memoria interna del programa RAM, temporizadores, contadores, memorias internas tipo relé, imágenes del proceso entradas/salidas, entre otras. La principal misión es la de leer los estado de las señales de las entradas de las variables, además del procesamiento de las mismas.

- C. Módulo de interfaces de entradas/salidas E/S:** Son aquellos que permiten el vínculo entre el CPU del controlador lógico programable y los dispositivos instalados en el sistema, a través de estos se puede lograr el intercambio de información para los casos de adquisición de datos o para el control de máquinas del proceso.

Existe una gran variedad de dispositivos externos, entre los que encontramos diferentes tipos de módulos de entradas y de salidas, los cuales nos permiten manejar ciertos tipos de señal, ya sea digital o análoga a un determinado valor de tensión o de corriente.

- Módulos de entradas digitales

- Módulos de salidas digitales

- Módulos de entradas analógicas

- Módulos de salidas analógicas

- D. Módulo de memorias:** Es el dispositivo encargado de almacenar información de manera provisional o permanente. Este módulo cuenta con dos tipos de memorias, memoria volátil (RAM), y memoria no volátil. (EPROM, EEPROM.)
- E. Unidad de programación:** Es el medio de comunicación entre el hombre y a máquina.
- F. Modo de operación de un PLC:** El PLC realiza el barrido continuo de un programa, el cual le permite trabajar correctamente, se entiende que los ciclos de barrido son la ejecución continua de los tres pasos principales.



FIGURA 24: Pasos principales para la operación de un PLC.

- G. Tiempo de respuesta:** El tiempo de respuesta de un PLC es lo más importante a considerar al momento de comprar estos equipos. Así mismo como el cerebro humano al PLC le toma un determinado tiempo para que pueda reaccionar a determinados cambios en el sistema. En algunas operaciones industriales, la velocidad de respuesta no es importante pero en algunos casos la respuesta inmediata es determinante para el sistema. En el tiempo de respuesta del PLC se considera el tiempo necesario que le toma a la señal en llegar a cada uno de los actuadores para realizar el respectivo control.

2.14.3 VARIADOR DE VELOCIDAD

Son dispositivos electrónicos, los cuales permiten el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna (CA), por medio de la variación de frecuencia suministrada al motor. Un variador de frecuencia con capacidad máxima de 1,5HP de potencia 1,1Kw, puede ser conectado a una alimentación monofásica de dos hilos (220V 2Ø input/ output 220V 3Ø).

2.15 COMUNICACIÓN Y PROGRAMACIÓN

Las comunicaciones industriales con fines de control y automatización requieren un amplio conocimiento en los estándares de conexión local para los equipos terminales que permitan la comunicación entre una computadora y sus periféricos tales como sensores, actuadores y controladores lógicos programables (PLC).

La comunicación serial es ampliamente utilizada ya que es un protocolo común para la comunicación de dispositivos que incluyen de manera estándar en cualquier computador, además este protocolo de comunicación es ampliamente utilizado en dispositivos de instrumentación, y también es utilizado en la adquisición de datos.

Típicamente la comunicación serial es utilizada para transmitir datos en formato ASCII, para poder realizar este tipo de comunicación es necesario de la utilización de tres líneas de transmisión, tierra o referencia, transmisor y un emisor.

2.15.1 COMUNICACIÓN RS- 485

Según National Instruments: la comunicación RS-485 es una mejora significativa sobre RS-422 y la RS- 232 ya que se incrementa el número de dispositivos que se pueden conectar (de 10 a 32) y define las características necesarias para asegurar los valores adecuados de voltaje cuando se tiene la carga máxima.

Gracias a esta capacidad, es posible crear redes de dispositivos conectados a un solo puerto RS-485. Esta capacidad, y la gran inmunidad al ruido, hacen que este tipo de transmisión serial sea la elección ideal de muchas aplicaciones industriales que necesitan dispositivos distribuidos en red conectados a una PC u otro controlador para la adquisición de datos, HMI, u otras operaciones.

2.15.2 COMUNICACIÓN ETHERNET

Es un estándar de redes de área local para computadores con acceso al medio por detección de la onda portadora y con detección de colisiones. Se tomó como base para la redacción del estándar internacional IEEE 802.3, siendo usualmente tomados como sinónimos.

Se diferencian en uno de los campos de la trama de datos. Sin embargo, las tramas Ethernet e IEEE 802.3 pueden coexistir en la misma red.

2.15.3 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN

El controlador lógico programable (PLC) MicroLogix 1100 utiliza un paquete de programación de lógica en escalera, el programa RSLogix 500 permite la maximización del tiempo, la reducción del tiempo en el desarrollo del proyecto y en maximizar la productividad. MicroLogix y RSLogix 500 de Allen Bradley fueron los primeros softwares de programación de PLC en ofrecer un óptimo interface al usuario.

2.16 ENTORNO GRAFICO LABVIEW

LabVIEW (Laboratory Visual Instrument Engineering Workbench). Es un entorno de programación gráfico para el diseño de sistemas de adquisición de datos tanto de instrumentación como de control.

Para la creación de programas, utiliza símbolos o lenguaje grafico en lugar de lenguaje contextual para la descripción de acciones, permitiendo el desarrollo de aplicaciones de forma más rápida y sencilla.

2.16.1 CARACTERÍSTICAS DE LABVIEW

Es un instrumento el cual nos permite desarrollar e implementar sistemas complejos de automatización, test, y medida de una forma más sencilla y practica a bajos costos. LabVIEW constituye un sistema revolucionario en programación gráfica, para las aplicaciones en las cuales se involucre la adquisición, control, análisis y representación de datos, ya que es intuitivo y fácil de aprender.

2.16.2 MANEJO Y APLICACIÓN DEL SISTEMA LABVIEW

Los programas realizados por LabVIEW se los conoce como instrumentos virtuales o "VI", por sus siglas en inglés. Cada VI se compone de dos elementos principales:

2.16.2.1 PANEL FRONTAL O FRONT PANEL

Que es donde se realiza la construcción de la interfaz mediante indicadores y controles los cuales permiten generar las respectivas entradas y salidas del sistema.

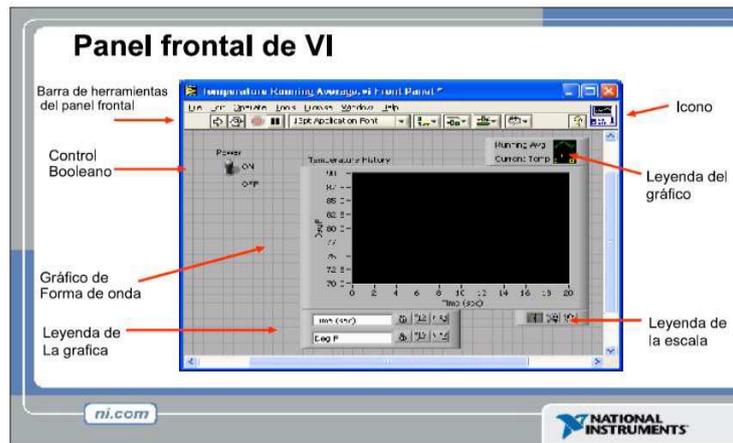


FIGURA 25: Panel frontal de LabVIEW.

Fuente: Sánchez. 2011

Cada elemento en el panel frontal se puede colocar mediante la paleta de controles.

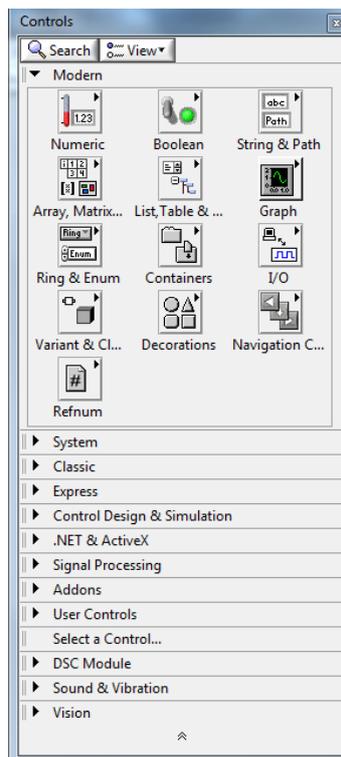


FIGURA 26: Paleta de controles.

2.16.2.2 DIAGRAMA DE BLOQUES

Después de realizar la construcción y personalización de los elementos en el panel frontal, LabVIEW nos permite realizar el código mediante las respectivas representaciones gráficas de las funciones.

El diagrama de bloques contiene el código gráfico, cada objeto realizado en el panel frontal aparecerá como terminal en el diagrama de bloques, además también se permite la inserción de otros idiomas de programación como código C y fórmulas de MATLAB.

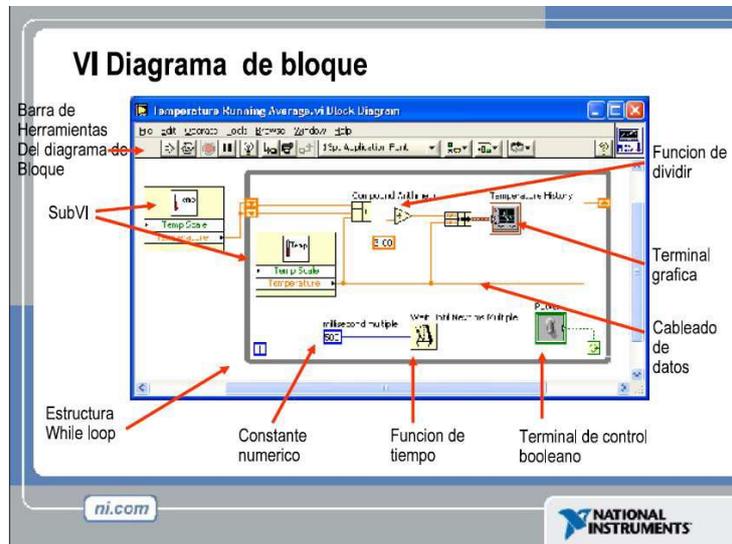


FIGURA 27: Diagrama de bloques.

Fuente: Sánchez. 2011

Cada elemento en el diagrama de bloques se puede colocar mediante la paleta de funciones.

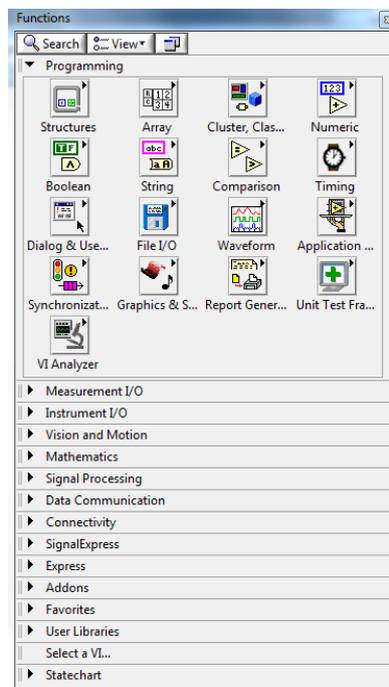


FIGURA 28: Paleta de funciones.

2.17 OPC SERVER

Debido a la conflictividad existente entre distintos sistemas de comunicación, algunas empresas junto con Microsoft desarrollaron una tecnología la cual les permitió incluir equipos de diferentes marcas, en un bus de comunicaciones industriales. De allí surgió un servidor conocido como OPC (Ole Proces Control), el cual se convirtió en un estándar en la comunicación y la supervisión de la mayoría de procesos industriales. El OPC server, ofrece una interfaz común, en la cual los componentes individuales se puedan comunicar y compartir datos de los procesos supervisados. Además el OPC server es una fuente de datos y cualquier aplicación que se base en OPC server puede acceder a dicho servidor para leer/escribir las variables que ofrezca el servidor.

Una de las principales ventajas del OPC server es que los usuarios disponen de más opciones para desarrollar sistemas eligiendo una amplia gama de productos con independencia de marca.

2.18 GLOSARIO DE TÉRMINOS

Banda proporcional. Porcentaje de variación de la variable controlada necesario para provocar una carrera completa del elemento final de control. Es el recíproco de la ganancia.

Bomba hidráulica: Es una máquina generadora que transforma la energía (generalmente energía mecánica) con la que es accionada en energía del fluido incompresible que mueve.

Calibración: Ajuste de la salida de un instrumento a valores deseados dentro de una tolerancia especificada para valores particulares de la señal de entrada.

Campo de medida con supresión de cero. Campo de medida en que el valor cero de la variable o señal medida es menor que el valor inferior del campo.

Caudal crítico: Caudal en condiciones determinadas que se caracteriza porque la velocidad media del fluido es independiente de la presión aguas abajo.

Caudal: Es la cantidad de fluido que pasa en una unidad de tiempo.

Compensación. Provisión de un aparato suplementario o de materiales especiales para contrarrestar fuentes conocidas de error.

Control adaptativo. Controlador que ajusta automáticamente sus parámetros para compensar los cambios que puedan producirse en el proceso. Existe el controlador adaptativo de modelo de referencia y el controlador adaptativo auto sintonizable.

Control anticipativo. Sistema de control en que se miden una o más variables de entrada al proceso que pueden perturbar la variable controlada y se toma una acción de corrección en la variable manipulada a través del elemento final de control. Este tipo de control puede combinarse con otros tipos de control, usualmente con el de realimentación, para reducir las desviaciones de la variable controlada.

Control avanzado. Técnicas que se apartan del control convencional PID y que se aplican en procesos muy complejos, no lineales, con retardos importantes y acoplamiento entre las variables. Se emplean, en general, para mejorar el rendimiento económico del proceso.

Control PID: Un PID es un mecanismo de control por realimentación que calcula la desviación o error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener, para aplicar una acción correctora que ajuste el proceso. Se da en tres parámetros distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo.

Convertidor: Instrumento que recibe una señal estándar y la envía modificada en forma de señal de salida estándar.

Correctores: Aparatos que eliminan el retardo del proceso.

Deriva: Variación de la señal de salida que se presenta en un período de tiempo determinado mientras se mantienen constantes la variable medida y todas las condiciones ambientales. Viene expresada en tanto por ciento del alcance.

Diafragma: Elemento sensible formado por una membrana colocada entre dos volúmenes. La membrana es deformada por la presión diferencial que es aplicada.

Fluido o agente de control: Es el proceso, energía o material correspondiente a la variable manipulada.

Fluido: Se denomina fluido a un tipo de medio continuo formado por alguna sustancia entre cuyas moléculas hay una fuerza de atracción débil.

Función de transferencia: Relación matemática, gráfica o tabular entre las expresiones función del tiempo de las señales de salida y de entrada a un sistema o elemento. Equivale al cociente de las transformadas de Laplace de las funciones de respuesta y excitación.

Presión: Es una magnitud física que mide como la proyección de la fuerza en dirección perpendicular por unidad de superficie (esa magnitud es escalar), y sirve para caracterizar cómo se aplica una determinada fuerza resultante sobre una línea.

CAPÍTULO III

3 METODOLOGÍA

3.1 TIPOS DE INVESTIGACIÓN

En la realización del presente proyecto tecnológico, se dio a conocer uno de los problemas más frecuentes que se detectan en la formación de los estudiantes de la CIMANELE, esto se debe a que el laboratorio de la carrera no cuenta con el suficiente equipo ni material didáctico para realizar el estudio, análisis y prácticas para afianzar los conocimientos adquiridos en las aulas, por tan motivo se utilizará la investigación documental o bibliográfica, la investigación tecnológica y la investigación práctica, las mismas que permitirá el fácil tratamiento del mismo, aportará al desarrollo y ejecución que el proyecto necesite.

3.1.1 INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL O BIBLIOGRÁFICA

Se empleó principalmente en la recopilación de información de diversos tipos de fuentes como son: libros, tesis, páginas de internet, catálogos, manuales, entre otros; la cual permitió tener la información en forma clara y ordenada con la finalidad de ser base fundamental para la construcción de este proyecto tecnológico.

3.1.2 INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA

Este tipo de investigación incorporo al proyecto los conocimientos científicos y tecnológicos ya existentes en el medio, para poder realizar la implementación de un módulo didáctico de control de caudal de líquidos y diferenciar las características de todos elementos que lo conforman.

3.1.3 INVESTIGACIÓN PRÁCTICA

Se basó en la investigación práctica porque se aplicó los conocimientos adquiridos en el transcurso de la elaboración del proyecto teórico, con el fin de poder establecer desde cero hasta la implementación y correcto funcionamiento del módulo didáctico.

3.2 MÉTODOS

Los métodos utilizados en la investigación y realización de este proyecto son los métodos teóricos y empíricos.

Benalcázar M. (2008) dice: “Los métodos empíricos conllevaron al investigador a una serie de procedimientos prácticos con el objeto y los medios de investigación que permitieron revelar las características fundamentales y relaciones esenciales del objeto; que son accesibles a la contemplación sensorial.

La investigación empírica permite al investigador hacer una serie de investigación referente a su problemática, retomando experiencia de otros autores, para desde allí partir con su exploración, también conllevan a efectuar un análisis preliminar de la información, así como verificar y comprobar las concepciones teóricas” (p.42).

3.2.1 MÉTODO ANALÍTICO - SINTÉTICO

Este método se empleó para realizar una simplificación de la información recopilada de la investigación documental para una mejor conceptualización y comprensión de la misma, empleándolo para la elaboración del marco teórico por motivo que la información adquirida de: libros, tesis, páginas de internet, catálogos y manuales es muy extensa.

3.2.2 MÉTODO INDUCTIVO – DEDUCTIVO

Este método se lo utilizo para la deducción de los contenidos generales obtenidos en la previa investigación realizada y de esta manera formular una teoría interpretativa para la explicación del tema que se está investigando.

3.2.3 DISEÑO TECNOLÓGICO

Este método se lo aplicó mediante la observación de prototipos similares, asimilando la tecnología ya existente para determinar las características del funcionamiento del módulo didáctico y de todos los elementos que lo constituyen.

3.2.4 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Mediante pruebas específicas, concretas y exhaustivas se verificó y estableció el correcto funcionamiento de todos los elementos que conforman el modulo didáctico.

3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

Existen varios tipos de técnicas e instrumentos de investigación, pero para la elaboración de este proyecto se utilizaron las siguientes:

3.2.1 MEDICIONES

Se realizaron las respectivas mediciones de los parámetros necesarios para que todos los elementos del módulo didáctico funcionen correctamente.

3.2.2 SIMULACIÓN

Se implementó una interfaz (HMI) en la plataforma gráfica de LabVIEW para la visualización gráfica de la operación y control del módulo didáctico.

CAPÍTULO IV

4 PROPUESTA TECNOLÓGICA

4.1 TÍTULO DE LA PROPUESTA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA EL CONTROL DE CAUDAL DE LÍQUIDOS EN EL LABORATORIO DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE, PERIODO 2015.

4.1.1 JUSTIFICACIÓN

Este proyecto se justificó mediante la implementación de un módulo didáctico, el cual estará constituido con equipos del ámbito industrial, realizando la adquisición de datos por medio de la comunicación entre el PLC y la HMI para el monitoreo y control de caudal (agua), con el fin de realizar clases demostrativas o prácticas en el laboratorio de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico de la Universidad Técnica del Norte.

4.1.2 UBICACIÓN SECTORIAL Y FÍSICA

La investigación se realizó con la implementación de un módulo didáctico para el control de caudal de líquidos en el laboratorio de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico de la Universidad Técnica del Norte.

4.2 OBJETIVOS

4.2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un módulo didáctico para el control de caudal de líquidos en el laboratorio de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico de la Universidad Técnica del Norte, periodo 2015.

4.3 DESARROLLO DE LA PROPUESTA

El modulo didáctico para el control de caudal de líquidos (agua), tiene como propósito el de contribuir al aprendizaje de los estudiantes de la CIMANELE en sistemas de control e instrumentación con equipos del ámbito industrial.

La interacción con la interfaz (HMI) permitirá a los estudiantes realizar la calibración de un controlador PID mediante la visualización gráfica de la operación y control del módulo didáctico, utilizando la variable de caudal en tiempo real.

4.3.1 COMPONENTES DEL MÓDULO DIDÁCTICO A CONSTRUIR

En la siguiente figura se muestra el diagrama P&ID del proceso.

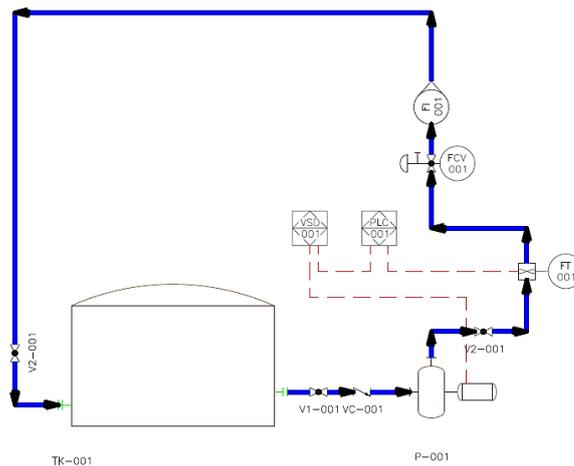


FIGURA 29: Diagrama P&ID del proceso.

TABLA 10: Descripción y características de los componentes del módulo didáctico.

Código	Descripción	Características
TK	Tanque reservorio	39 L de capacidad
P	Bomba	3f, 0.5 Hp, 27 L/Min
FCV	Válvula de control de caudal	Accionamiento manual 3/4"
FT	Sensor transmisor de paletas	1-30 L/M, salida de frecuencia
FI	Rotámetro indicador de caudal	4-40L/M
PLC	Controlador Lógico Programable	MicroLogix 1100
VSD	Variador de Frecuencia	ATV312HU11M2
V1	Válvula de bola	Accionamiento manual 1"
V2	Válvula de bola	Accionamiento manual 3/4"
V3	Válvula de bola	Accionamiento manual 3/4"
VC	Válvula check	Flujo en una sola dirección

4.3.2 DISEÑO DE LA PLANTA DE CONTROL DE CAUDAL DE LÍQUIDOS (AGUA)

En esta sección de la propuesta tecnológica se diseñó la parte mecánica de la planta de control de caudal a implementar, la misma que está conformada por:

- Diseño del tanque.
- Estructura metálica.
- Sistema de tuberías.

4.3.2.1 DISEÑO DEL TANQUE

Como el presente proyecto está dirigido principalmente a su uso didáctico, se opta por construir el tanque con materiales tipo transparentes como lo es el vidrio, para facilitar la visualización de la variable a controlar (agua). Para el dimensionamiento del tanque, se toma en consideración la distribución de los acoples para: la entrada de realimentación, la salida para succión de la bomba y la salida para desagüe de mantenimiento.

Las dimensiones del tanque son las siguientes.

- Ancho: 28 [cm]
- Largo: 42.5 [cm]
- Alto: 33 [cm]

ECUACIÓN 18

$$V = (\text{Ancho} \times \text{Largo} \times \text{Alto}) \frac{L}{1000 \text{ cm}^3}$$

$$V = (28 \text{ cm} \times 42.5 \text{ cm} \times 33 \text{ cm}) \frac{L}{1000 \text{ cm}^3}$$

$$V = 39.27 \text{ L}$$

Con las dimensiones nombradas el tanque tendrá una capacidad de 39.27 [L] aproximadamente, para evitar que el líquido se desborde al ser realimentado y por seguridad se optó por realizar una tapa al tanque, y se optó por trabajar con un 60% de la capacidad del tanque (23.5 L) con una altura de llenado de 20 cm aproximadamente.

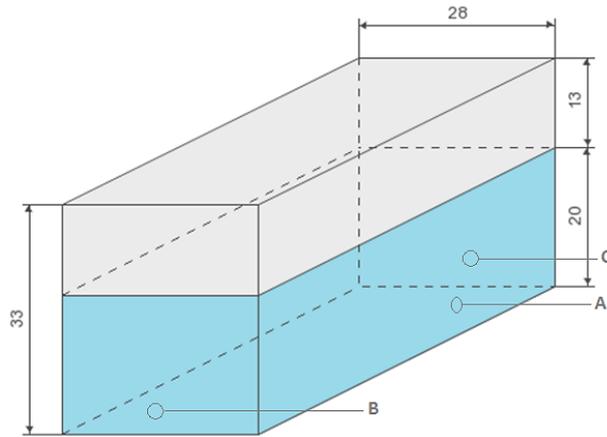


FIGURA 30: Dimensiones del tanque.

- A. Orificio de retorno de agua desde la planta.
- B. Orificio de succión para alimentar a la planta.
- C. Orificio de desagüe para mantenimiento.

4.3.2.2 SELECCIÓN DEL ESPESOR DEL VIDRIO

Para realizar la correcta selección del espesor del vidrio se empleó la siguiente tabla.

TABLA 11: Selección de espesor del vidrio según las dimensiones del tanque.

Altura tanque h [cm]	Longitud del tanque [cm]							
	30		40		50		60	
	Vertical	Base	Vertical	Base	Vertical	Base	Vertical	Base
60	6 mm	10 mm	10 mm	12 mm	10 mm	12 mm	10 mm	12 mm
50	6 mm	10 mm	6 mm	10 mm	6 mm	10 mm	10 mm	12 mm
40	6 mm	10 mm	6 mm	10 mm	6 mm	10 mm	6 mm	10 mm
30	5 mm	6 mm	5 mm	6 mm	6 mm	10 mm	6 mm	10 mm
20	5 mm	6 mm	5 mm	6 mm	5 mm	6 mm	5 mm	6 mm

Fuente: <http://www.ciclidis-mexico.com/CalculoTanque/CalculoTanque.html>

Se puede observar que la tabla anterior no cuenta con valores intermedios, por tal motivo se optó por tomar su valor superior tanto para la altura como para la longitud del tanque, con estos valores se puede evidenciar que es necesario utilizar un vidrio de 6 [mm] de espesor para los vidrios laterales y un vidrio de 10 [mm] de espesor para el vidrio de la base, con ello se asegura que soporte la presión ejercida por el líquido.

4.3.2.3 ESTRUCTURA METÁLICA

La estructura metálica fue diseñada pensando en la óptima ubicación de los elementos que van a conformar el módulo, de tal manera que sean de fácil acceso y manipulación. Sus dimensiones son 0.82 [m] de alto, por 0.6 [m] de ancho, por 1 [m] de largo. El soporte está hecho de tubo cuadrado estructural de $\frac{3}{4}$ " / $\frac{3}{4}$ " / 2 [mm] de espesor y dos planchas metálicas de 2 [mm] de grosor. Este conjunto forma una estructura suficiente para soportar el peso del tablero de control, la bomba centrífuga y el tanque.

4.3.2.4 DISEÑO DE LA TUBERÍA

El primer tramo de la tubería está dedicado a la parte de la succión del agua desde el tanque hacia la bomba. Está constituido por: un adaptador para tanque c/junta de 1", una válvula de bola de 1" para realizar mantenimiento al tanque o al conjunto de tuberías, una válvula check de 1" para evitar que se produzca un reflujo en la entrada de la bomba y por los adaptadores rápidos tipo F y tipo D de 1" para la conexión y desconexión rápida de la bomba.

El segundo tramo de la tubería está dedicado a la descarga del líquido desde la salida de la bomba pasando por toda la tubería hasta su desembocadura en el tanque. Está constituido por: los adaptadores rápidos tipo F y tipo D de 1" para la conexión y desconexión rápida de la bomba, un acople reductor de 1" a $\frac{3}{4}$ ", una tee de $\frac{3}{4}$ ", un manómetro para la visualización de la presión del fluido, una válvula de bola de $\frac{3}{4}$ " para generar perturbaciones en el sistema, un acople reductor de $\frac{3}{4}$ " a $\frac{1}{2}$ " , un acople amplificador de $\frac{1}{2}$ " a $\frac{3}{4}$ ", un sensor de caudal de efecto Hall para la obtención de la variable de proceso (caudal), un sensor de desplazamiento volumétrico para la visualización de la variable de caudal, dos válvulas de bola de $\frac{3}{4}$ " para realizar mantenimiento al tanque o al conjunto de tuberías, un adaptador para tanque c/junta de $\frac{3}{4}$ ", 7 codos HH 90° $\frac{3}{4}$ " ubicados por todo el sistema de tuberías y 2 uniones universal $\frac{3}{4}$ " ubicados estratégicamente para la fácil extracción de los sensores.

4.3.3 ANÁLISIS DE PÉRDIDAS

El análisis de pérdidas se realizó con un caudal de 40 [L/Min] y con las propiedades físicas del agua a una temperatura de 25 [°C].

4.3.3.1 PRIMER TRAMO DE TUBERÍA

El primer tramo esta realizado con tubería de 1", posee una longitud de 0.41 [m] y consta con los siguientes accesorios.

TABLA 12: Cálculo del coeficiente de resistencia [factor K] en el primer tramo.

Accesorio	Cantidad	Factor K	Factor K total
Salida brusca del tanque	1	0.78	0.78
Válvula de bola	1	0.07	0.07
Válvula check	1	1.2	1.2
			2.05

A continuación se realizan los cálculos necesarios para encontrar el coeficiente de fricción del primer tramo de tubería.

- Área de la tubería

ECUACIÓN 19

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

De donde:

d = Diámetro interno de la tubería [m].

A = Área transversal de paso [m^2].

π = Constante matemática.

$$A = \frac{\pi (0.0239 \text{ m})^2}{4}$$

$$A = 4.49 \times 10^{-4} [m^2]$$

- **Velocidad media en la tubería**

Se emplea una variante de la ecuación 3.

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V = \frac{6.67 \times 10^{-4} [m^3/s]}{4.49 \times 10^{-4} [m^2]}$$

$$V = 1.49 [m/s]$$

- **Número de Reynolds**

Se emplea la ecuación 1, la densidad y la viscosidad del agua se obtienen de la tabla de propiedades del agua. (Anexo C)

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu}$$

$$Re = \frac{997 [Kg/m^3] \times 1.49 [m/s] \times 0.0239 [m]}{8.91 \times 10^{-4} [kg/m.s]}$$

$$Re = 39847.55$$

- **Rugosidad relativa**

ECUACIÓN 20

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{d}$$

De donde:

ε = Rugosidad del material [m].

d = Diámetro interno de la tubería [m].

ε_r = Rugosidad relativa.

$$\varepsilon_r = \frac{1.5 \times 10^{-6} [m]}{0.0239 [m]}$$

$$\varepsilon_r = 0.000063$$

- **Coeficiente de fricción**

Con la ayuda del diagrama de Moody (Anexo D) se puede encontrar el coeficiente de fricción.

$$f = 0.02219$$

4.3.3.2 SEGUNDO TRAMO DE TUBERÍA

El segundo tramo esta realizado con una tubería de ¾", posee una longitud de 3.50 [m] y consta con los siguientes accesorios:

TABLA 13: Cálculo del coeficiente de resistencia [factor k] en el segundo tramo.

Accesorio	Cantidad	Factor K	Factor K total
Codo HH 90°	7	0.75	5.25
Tee flujo desviado 90°	1	1.5	1.5
Válvula de bola	3	0.08	0.24
Entrada brusca del tanque	1	1	1
Unión universal	2	0.5	1
Reductor de 1" a ¾"	1	0.18	0.18
Rotámetro calculo estimado	1	1.05	1.05
			10.22

A continuación se realizan los cálculos necesarios para encontrar el coeficiente de fricción del segundo tramo de tubería.

- **Reducción de 1" a ¾"**

ECUACIÓN 21

$$k = 0.5 \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 \right]$$

$$k = 0.5 \left[1 - \left(\frac{0.0191 \text{ m}}{0.0239 \text{ m}} \right)^2 \right]$$

$$k = 0.18$$

- **Área de la tubería**

Se emplea la ecuación 19.

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi (0.0191 \text{ m})^2}{4}$$

$$A = 2.87 \times 10^{-4} [\text{m}^2]$$

- **Velocidad media en la tubería**

Se emplea una variante de la ecuación 3.

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V = \frac{6.67 \times 10^{-4} [\text{m}^3/\text{s}]}{2.87 \times 10^{-4} [\text{m}^2]}$$

$$V = 2.32 [\text{m/s}]$$

- **Número de Reynolds**

Se emplea la ecuación 1, la densidad y la viscosidad del agua se obtienen de la tabla de propiedades del agua. (Anexo C)

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu}$$

$$Re = \frac{997 [\text{Kg/m}^3] \times 2.32 [\text{m/s}] \times 0.0191 [\text{m}]}{8.91 \times 10^{-4} [\text{kg/m.s}]}$$

$$Re = 49583.69$$

- **Rugosidad relativa**

Se emplea la ecuación 20.

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{d}$$

$$\varepsilon_r = \frac{1.5 \times 10^{-6} [\text{m}]}{0.0191 [\text{m}]}$$

$$\varepsilon_r = 0.000079$$

- **Coeficiente de fricción**

Con la ayuda del diagrama de Moody (Anexo D) se puede encontrar el coeficiente de fricción.

$$f = 0,02121$$

4.3.3.3 TERCER TRAMO DE TUBERÍA

El tercer tramo esta realizado con una tubería de ½", posee una longitud de 0.08 [m] y consta con los siguientes accesorios:

TABLA 14: Cálculo del coeficiente de resistencia [factor K] en el tercer tramo.

Accesorio	Cantidad	Factor K	Factor K total
Reductor de ¾" a ½"	1	0.21	0.21
Ampliación de ½" a ¾"	1	0.18	0.18
			0.39

A continuación se realizan los cálculos necesarios para encontrar el coeficiente de fricción del tercer tramo de tubería.

- **Reducción de ¾" a ½"**

Se emplea la ecuación 21.

$$k = 0.5 \left[1 - \left(\frac{d1}{d2} \right)^2 \right]$$

$$k = 0.5 \left[1 - \left(\frac{0.0145 \text{ m}}{0.0191 \text{ m}} \right)^2 \right]$$

$$k = 0.21$$

- **Ampliación de ½" a ¾"**

ECUACIÓN 22

$$k = \left[1 - \left(\frac{d1}{d2} \right)^2 \right]^2$$

$$k = \left[1 - \left(\frac{0.0145 \text{ m}}{0.0191 \text{ m}} \right)^2 \right]^2$$

$$k = 0.18$$

- **Área de la tubería**

Se emplea la ecuación 19.

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi (0.0145 \text{ m})^2}{4}$$

$$A = 1.65 \times 10^{-4} [\text{m}^2]$$

- **Velocidad media en la tubería**

Se emplea una variante de la ecuación 3.

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V = \frac{6.67 \times 10^{-4} [\text{m}^3/\text{s}]}{1.65 \times 10^{-4} [\text{m}^2]}$$

$$V = 4.04 [\text{m/s}]$$

- **Número de Reynolds**

Se emplea la ecuación 1, la densidad y la viscosidad del agua se obtienen de la tabla de propiedades del agua. (Anexo C)

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu}$$

$$Re = \frac{997 [\text{Kg}/\text{m}^3] \times 4.04 [\text{m/s}] \times 0.0145 [\text{m}]}{8.91 \times 10^{-4} [\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}]}$$

$$Re = 65549.11$$

- **Rugosidad relativa**

Se emplea la ecuación 20.

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{d}$$

$$\varepsilon_r = \frac{1.5 \times 10^{-6} [\text{m}]}{0.0145 [\text{m}]}$$

$$\varepsilon_r = 0.0001$$

- **Coefficiente de fricción**

Con la ayuda del diagrama de Moody (Anexo D) se puede encontrar el coeficiente de fricción.

$$f = 0,02010$$

4.3.3.4 PÉRDIDA DE CARGA TOTAL

La pérdida de carga total es la suma de las pérdidas primarias y secundarias en cada tramo de tubería, se emplea la ecuación 7.

$$h_l = \frac{1}{2 \times g} \left[\left(\frac{Q_1}{A_1} \right)^2 \left(f_1 \frac{L_1}{D_1} + k_1 \right) + \left(\frac{Q_2}{A_2} \right)^2 \left(f_2 \frac{L_2}{D_2} + k_2 \right) + \left(\frac{Q_3}{A_3} \right)^2 \left(f_3 \frac{L_3}{D_3} + k_3 \right) \right]$$

$$h_l = \frac{1}{2 \times g} \left[\left(\frac{6.67 \times 10^{-4}}{4.49 \times 10^{-4}} \right)^2 \left(0,02219 \frac{0.41}{0.0239} + 2.05 \right) \right. \\ \left. + \left(\frac{6.67 \times 10^{-4}}{2.87 \times 10^{-4}} \right)^2 \left(0,02121 \frac{3.50}{0.0191} + 10.22 \right) \right. \\ \left. + \left(\frac{6.67 \times 10^{-4}}{1.65 \times 10^{-4}} \right)^2 \left(0,0201 \frac{0.08}{0.0145} + 0.39 \right) \right]$$

$$h_l = \frac{1}{2 \times 9.8} [5.37 + 76.19 + 8.18]$$

$$h_l = 4.58 [m]$$

4.3.3.5 CALCULO DE LA POTENCIA DE LA BOMBA DE AGUA

Se emplea la ecuación 8.

$$P_{teorica} = h_l \times \rho \times g \times Q_t$$

$$P_{teorica} = 4.58[m] \times 997 \left[\frac{Ns^2}{m^4} \right] \times 9.8 \left[\frac{m}{s^2} \right] \times (6.67 \times 10^{-4}) \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$P_{teorica} = 29.85 [w]$$

Si consideramos que 1[HP] equivale a 745 [w] obtenemos:

$$P_{teorica} = \frac{29.85 [w]}{745 [w]}$$

$$P_{teorica} = 0.04 [Hp]$$

Si en la ecuación 9 consideramos para el cálculo de la potencia real un rendimiento mínimo del 30%, se obtiene:

$$P_{real} = \frac{P_{teorica}}{0.3}$$

$$P_{real} = \frac{0.04}{0.3}$$

$$P_{real} = 0.134 [Hp]$$

4.3.4 SELECCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS

4.3.4.1 SELECCIÓN DE LA BOMBA DE AGUA

Para realizar la selección de la bomba de agua es necesario tomar en cuenta la potencia calculada, que en este caso es de 0.134 [Hp]. Visto que no se pudo encontrar una bomba trifásicas de esta potencia, se optó por tomar como referencia la que más se acerque a la potencia requerida y se elige un motor de ½ [Hp] monofásico, el cual cumple satisfactoriamente los requerimientos del sistema.

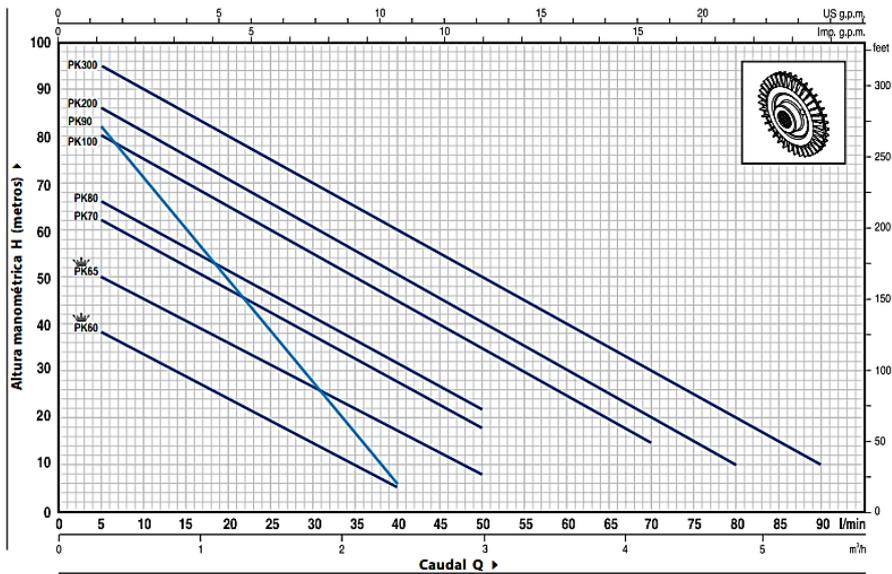


		www.pedrollo.com	
		MADE IN ITALY - HECHO EN ITALIA	
MODELO Pkm 60®			Rel. C
Q 5÷40 l/min	H 38÷5 m	Lote	
Hmax 40 m	H min 5 m	t max 60 °C	
V~ 110	Hz 60	min ⁻¹ 3450	
kW 0.37	HP 0.5	In 5.5 A	W max 550
C. µF 25 - VL 250	I.CL.F	IPX4	
		Protección térmica Funcionamiento continuo 7412	Fabricado por: Pedrollo S.p.A Via E. Fermi, 7 - 37047 San Bonifacio (VR) - Italia

FIGURA 31: Características eléctricas de la bomba Pkm 60.

Fuente: Catálogo general Pkm 60 PEDROLLO

CURVAS Y DATOS DE PRESTACIONES 60 Hz n= 3450 1/min HS= 0 m



MODELO		POTENCIA		Q	Q															
Monofásica	Trifásica	kW	HP		m³/h	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4	
				l/min	0	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90		
		0.37	0.50		40	38	33.5	29	24	19.5	15	10	5							

FIGURA 32: Curvas y datos de prestaciones.

Fuente: Catálogo general Pkm 60 PEDROLLO

Este motor será rebobinado de forma artesanal pasando de ser un motor monofásico a un motor trifásico de 2 polos a 3450 rpm aproximadamente, consume una corriente de 1 [A] a plena carga con un caudal máximo de 27 [L/m]. Estos parámetros fueron obtenidos de forma experimental y se pudo concluir que la bomba perdió un 30% de su rendimiento en relación al caudal inicial que era de 40 [L/m].

4.3.4.2 SELECCIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA

Para realizar el control de la bomba se seleccionó un variador de frecuencia Schneider ATV312HU11M2 con una potencia de 1.5 [Hp], el variador de frecuencia se encuentra sobredimensionado en relación a la potencia de la bomba, pero cabe mencionar que se adquirió este variador por: sus características, su fácil programación, adaptación para realizar futuras practicas con motores de potencia más alta y por ultimo porque se lo pudo adquirir en oferta a un costo menor.

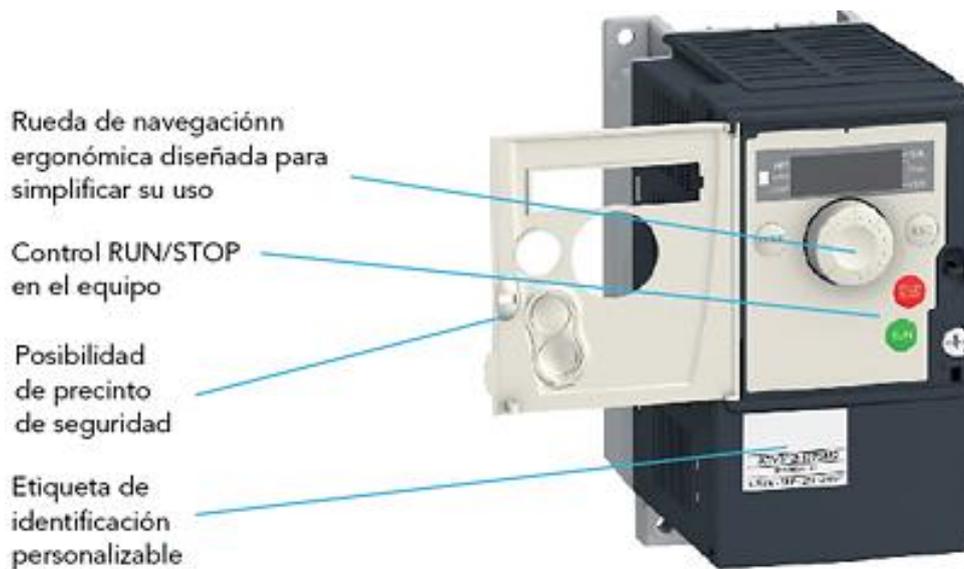


FIGURA 33: Variador de frecuencia ATV312HU11M2 Schneider panel frontal.

Fuente: Guía de programación ATV312HU11M2 Schneider

A continuación se presenta el esquema general para el cableado del variador de frecuencia.

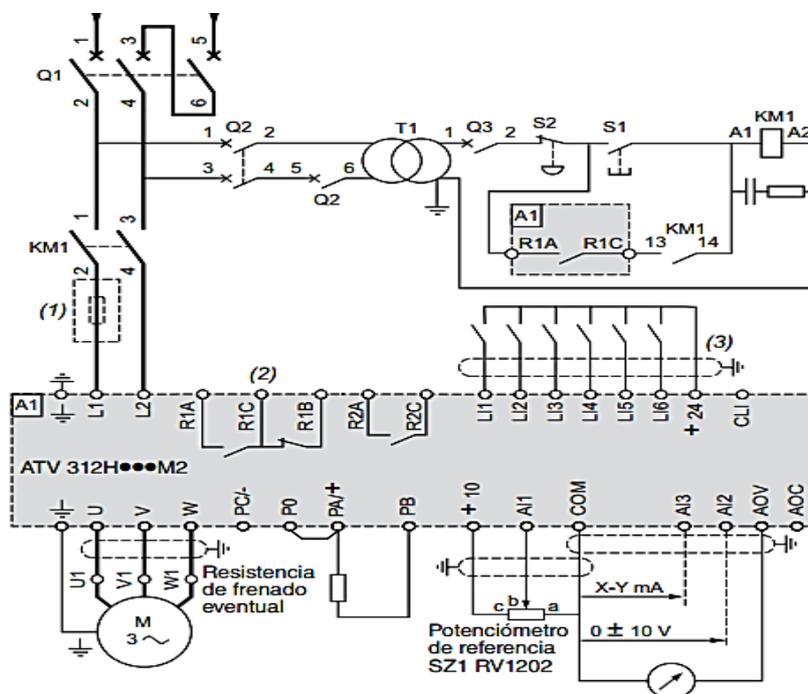


FIGURA 34: Esquema general de cableado.

Fuente: Altivar 312 Catalogo '09

TABLA 15: Características de los terminales de control.

Terminal	Función	Especificaciones eléctricas
COM	Común, E/S analógicas	0 V
AL1	Entrada analógica de tensión	Entrada analógica 0 a +10 V (la tensión máxima de seguridad es 30 V). Impedancia: 30 k Ω Tiempo de muestreo: 8 ms Resolución: 0,01 V, convertidor de 10 bits Precisión: \pm 4,3% Linealidad: \pm 0,2% del valor máximo de la escala
10 V	Fuente de alimentación para el potenciómetro de punto de consigna (1 a 10 k Ω)	+10 V (+ 8% - 0%) Corriente máxima 10 mA, Protegida contra cortocircuitos y sobrecargas
AOV	Salida analógica de tensión. Las salidas AOV y AOC no pueden utilizarse al mismo tiempo	Salida analógica en tensión 0...10 V Impedancia de carga mín. 470 Ω Resolución 8 bits Precisión \pm 1% Linealidad \pm 0,2% del valor máx. de la escala Tiempo de muestreo: 8 ms
LI1	Entrada lógica	Fuente de alimentación de + 24 V (máx. 30 V) Impedancia: 3,5 k Ω Estado 0 si la diferencia de tensión entre LI- y CLI es de < 5 V, estado 1 si la diferencia de tensión entre LI- y CLI es > 11 V Tiempo de muestreo: 4 ms
CI1	Entrada lógica común	
Source	Lógica positiva	Estado 0 si < 5 V o entrada lógica no cableada Estado 1 si > 11 V
R/L1	Fuente de alimentación	200...240 monofásica
S/L2		
U/T1		
V/T2	Salidas al motor	200...240 trifásica
W/T3		
	Terminal de tierra	

Fuente: Altivar 312 Catalogo '09

Si se requiere más información acerca variador de frecuencia ATV312HU11M2 Schneider revisar la guía de programación ATV312HU11M2 Schneider.

4.3.4.3 SELECCIÓN DEL CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC)

Para el control del módulo didáctico se requiere de dos entradas analógicas, una salida analógica, tres salidas tipo relé, tres entradas digitales y un contador de alta velocidad. Con estos datos se optó por de adquirir un PLC Allen Bradley MicroLogix 1100 (1763-L16BWA), que cuenta con 12 entradas (6 a 24V DC, 4 de alta velocidad a 24V DC y 2 analógicas de 0-10V DC), 6 salidas tipo relé, una alimentación de red de 100-240V AC y una fuente de voltaje de 24V DC a 250 mA utilizada para alimentar los dispositivos de entrada como sensores e interruptores.

Además de un módulo de expansión (1762-IF2OF2), que consta de 2 entradas configurables para voltaje o corriente y 2 salidas analógicas de voltaje/corriente, el conjunto de estos dos elementos cubre satisfactoriamente las necesidades para poder implementar el circuito de control.



FIGURA 35: MicroLogix 1100 (1763-L16BWA) y módulo de expansión (1762-IF2OF2).

Fuente: Manual de usuario MicroLogix 1100

A continuación se presenta el esquema general para las conexiones del PLC Allen Bradley MicroLogix 1100 y del módulo de expansión analógico.

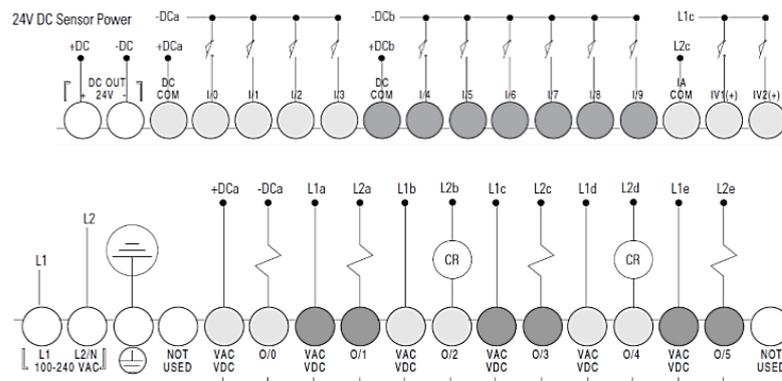


FIGURA 36: Esquema general de cableado (1763-L16BWA).

Fuente: Manual de usuario MicroLogix 1100

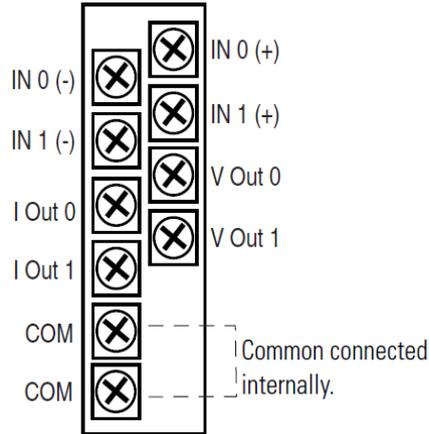


FIGURA 37: Terminales de conexión (1762-IF2OF2).

Fuente: Manual de usuario MicroLogix 1100

Si se requiere más información acerca del PLC MicroLogix 1100 (1763-L16BWA) y de su módulo de expansión (1762-IF2OF2) revisar el manual de usuario MicroLogix 1100.

4.3.4.4 SELECCIÓN DE SENSORES

I. Sensor de paletas rotativas

Para medir la cantidad de agua que pasa por la tubería se utilizó un medidor de flujo de agua YF-S201 que está conformado por: un cuerpo de plástico como válvula, un rotor de agua, y un sensor de efecto Hall. Cuando el agua fluye a través del rotor se genera un tren de pulsos que es proporcional a la velocidad de flujo. La frecuencia del pulso varía dependiendo: de la velocidad de flujo, de la presión del fluido y de la orientación del sensor.



FIGURA 38: Sensor de flujo de paletas rotativas.

Fuente: <http://silicio.mx/sensor-de-flujo-de-agua-1-2>

TABLA 16: Características del sensor de flujo.

Ítem	Parámetro
Material del cuerpo	Plástico
Tipo de sensor	Efecto Hall
Voltaje de operación	5 a 24 [V DC]
Max. Consumo de corriente	15 [mA] @ 5 [V]
Flujo de trabajo	1 a 30 [L/min]
Temperatura de operación	-25° a +80° [C]
Precisión	±10%
Max. Presión del agua	2.0 [MPa]
Ciclo de trabajo de salida	50% ±10%
Tiempo de subida de salida	0.04 [us]
Tiempo de caída de salida	0.08 [us]
Pulso de flujo	Hz = 7.5 * Caudal [L/min]
Pulsos por litro	450 aproximadamente
Durabilidad	Mínimo 300.000 ciclos
Resistencia de aislamiento	>100 [mΩ]
Salida	Digital
Tamaño de interfaz	G ½" o (D=19mm)

Fuente: <http://silicio.mx/sensor-de-flujo-de-agua-1-2>

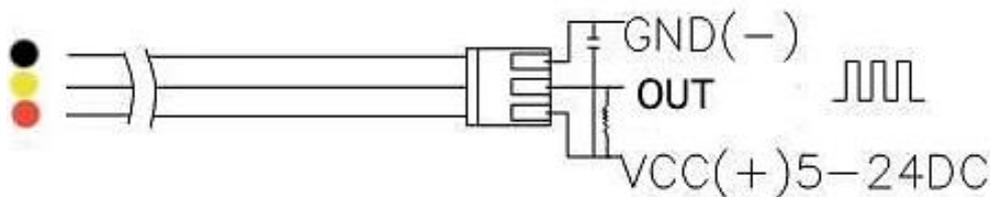


FIGURA 39: Conexión del sensor de flujo.

Fuente: <http://silicio.mx/sensor-de-flujo-de-agua-1-2>

II. Sensor de desplazamiento volumétrico

Para la visualización de la variable de caudal se utilizó un caudalímetro de desplazamiento volumétrico DF 45025 con un cuerpo de policarbonato (PC), en este se puede apreciar visualmente la variación de la variable de caudal por medio del movimiento de su flotador, con una exactitud de 5% de la lectura completa.



FIGURA 40: Sensor de desplazamiento volumétrico DF 45025.

Fuente:http://es.made-in-china.com/co_chinacoalintl/product_Df-4500-Series-Inline-Flow-Meter_essyghoey.html

TABLA 17: Características del sensor de desplazamiento volumétrico FD 45025.

Rango		Instalación				% Exactitud	Presión Trabajo
[LPM]	[GPM]	Unión métrica	Conexión rosca macho	Conexión rosca hembra	Conexión de codo		
4 – 40	1 - 10	32	¾" NPT	¾" G	¾" NPT	5	0.6 MPa

Fuente:http://es.made-in-china.com/co_chinacoalintl/product_Df-4500-Series-Inline-Flow-Meter_essyghoey.html

4.3.5 DESCRIPCIÓN ELÉCTRICA DEL MÓDULO DIDÁCTICO

Primero se realizó la correcta ubicación de los distintos elementos que conforman el modulo didáctico, tomando en cuenta las conexiones de cada elemento y del espacio del tablero de control. Para la fijación de los distintos elementos se utilizó riel din y canaletas plásticas.

Posteriormente en la tapa del tablero de control se realizó un corte rectangular de 33 [cm] de largo por 26 [cm] de ancho para la visualización de los equipos. En la parte de inferior de la tapa del tablero se ubicó: una botonera para el encendido y apagado, una botonera de paro de emergencia tipo hongo, tres luces piloto (run variador, modo local y modo remoto), dos selectores (run-stop variador y para el modo local-remoto) y un potenciómetro para el ingreso del punto de consigna en modo manual.

El circuito de fuerza (Véase Anexo E) estará conformado por un breaker bifásico principal de 6 [A] el cual alimentara todo el modulo didáctico, adicional para la protección se colocó un fusible de 6 [A] que regirá el encendido y apagado del módulo didáctico con su respectivo paro de emergencia, para la alimentación tanto del variador de frecuencia como del PLC [220 V] se instaló contactores independientes tal como especifica en sus respectivos manuales. Además, se realizó el aterramiento de todos los equipos con la carcasa del tablero de control.

La sección de los conductores tendrá una relación directa con la carga a soportar en el módulo didáctico, por tal motivo se lo realizo con conductor THHN número 14 AWG que soporta hasta 25 [A].

El circuito de control (Véase anexo F) esta cableado con conductor TFN número 18 AWG que soporta hasta 10 [A], además cada uno de los conductores posee su respectiva identificación de los terminales de conexión tanto a la entrada como salida para una mejor identificación del circuito implementado.

4.3.6 CONFIGURACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS

4.3.6.1 CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL VARIADOR DE FRECUENCIA

Antes de poner en marcha el variador de frecuencia se debe de tener en cuenta todos los parámetros del motor como son: voltaje, corriente, frecuencia, potencia, factor de potencia y velocidad del motor, estos parámetros fueron obtenidos de forma experimental mediante mediciones.

Con la ayuda del panel frontal se ingresó los siguientes parámetros:

- **Menú [Ajustes] (SEt-)**

LSP	0 Hz	[Velocidad mínima]
HSP	60 Hz	[Velocidad máxima]
ItH	1 A	[Intensidad térmica motor]
CLI	1.7 A	[Limite intensidad]
Ctd	1 A	[Nivel de intensidad del motor]

- **Menú [Control] (drC-)**

bFr	60 Hz	[Frecuencia estándar del motor]
UnS	230 V	[Tensión nominal motor]
Frs	60 Hz	[Frecuencia nominal del motor]
nCr	1.7 A	[Intensada nominal del motor]
nSP	3550 rpm	[Velocidad nominal del motor]
COS	0.81	[Motor 1 cos fi]
tFr	72 Hz	[Frecuencia máxima]

- **Menú [Entradas/Salidas] (I-O-)**

tCC	2C	[Control 2/3]
tCt	trn	[Tipo control 2 hilos]
AOlt	10 U	[Configuración AO1]
dO	Ofr	[Salida analog/logica]

- **Menú [Control] (CtL-)**

Frl	AI1	[Canal referencia 1]
-----	-----	----------------------

4.3.6.2 CONFIGURACIÓN PARA OBTENER COMUNICACIÓN ENTRE EL PLC Y EL COMPUTADOR

Como primer paso se realizó la configuración vía BOOTP (Bootstrap Protocol) que es un protocolo de bajo nivel que los nodos TCP/IP utilizan para obtener información de puesta en marcha, esto se lo efectuó mediante el programa BOOTP/DHCP Server configurando los parámetros **Subnet Mask y Gateway** según la configuración de red que se tenga en el computador.

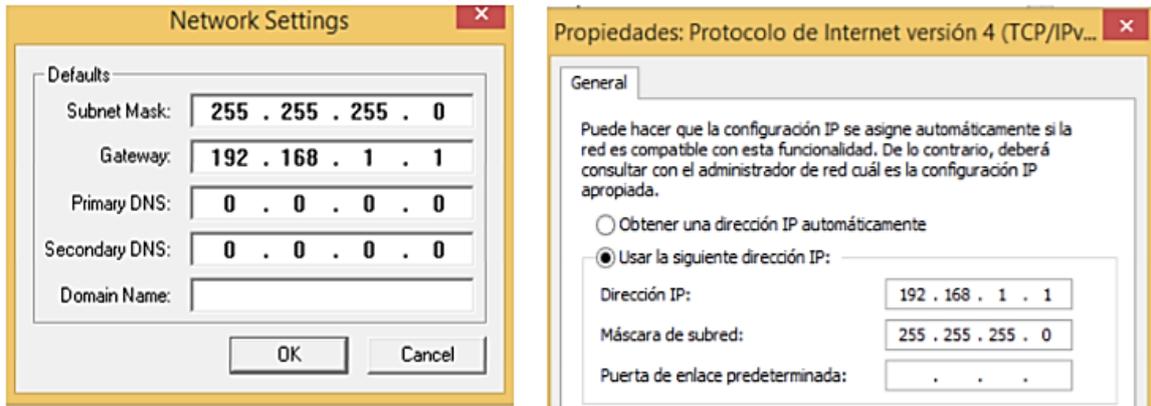


FIGURA 41: Configuración de la Subnet Mask y Gateway.

Se procedió a ingresar la dirección ethernet (MAC) que se tenga en el PLC y se le asignó una dirección IP al PLC (192.168.1.3). La figura 43 muestra la configuración exitosa del BOOTP/DHCP.

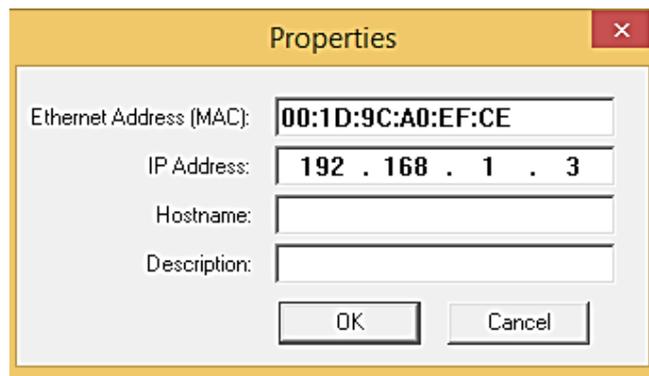


FIGURA 42: Configuración de la dirección ethernet (MAC) y de la dirección IP del PLC.

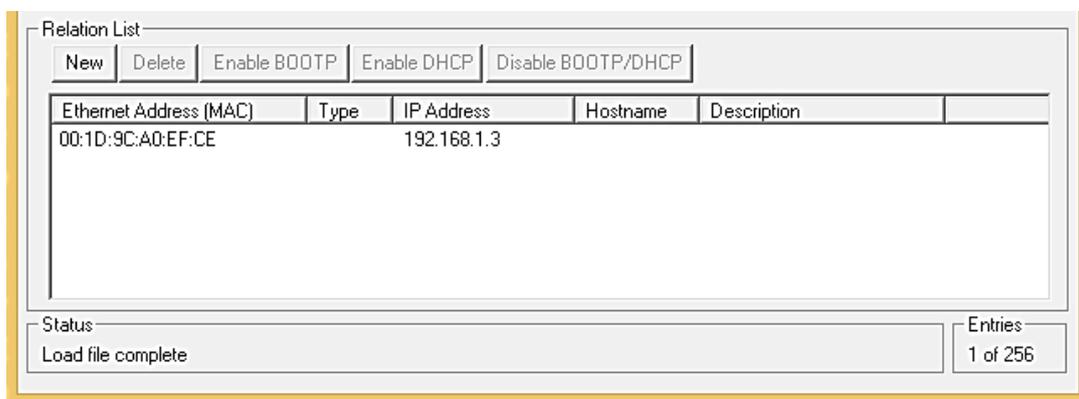


FIGURA 43: Configuración exitosa del BOOTP/DHCP

Como segundo paso se comprobó que exista comunicación entre el PLC y el computador mediante el programa RSlinx Classic. En la ventana principal del programa se hizo clic en **Communications >> Configure Drivers** y se procedió a escoger la opción para realizar la comunicación, en este caso será **Ethernet devices**. Se procedió a pinchar en **Add New** para configurar el controlador **AB_ETH-1** e ingresar la Dirección IP del computador y del PLC.

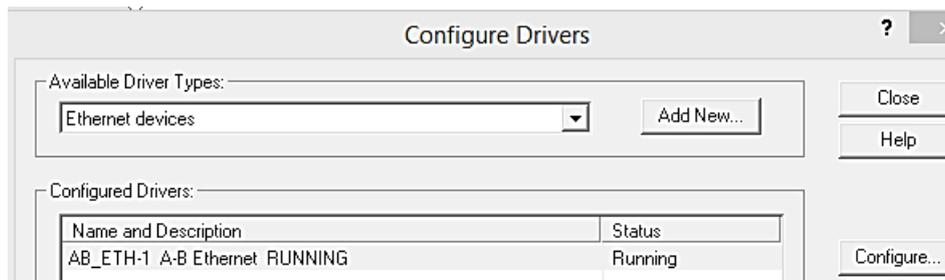


FIGURA 44: Configuración del controlador.

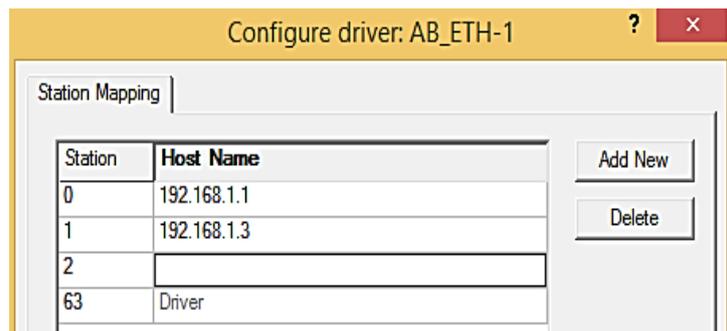


FIGURA 45: Configuración del controlador AB_ETH-1.

Para verificar que exista comunicación se debe dar clic en **Communications >> RSWho >> AB_ETH-1, Ethernet** y verificar que los dos iconos no estén marcados con una "X".

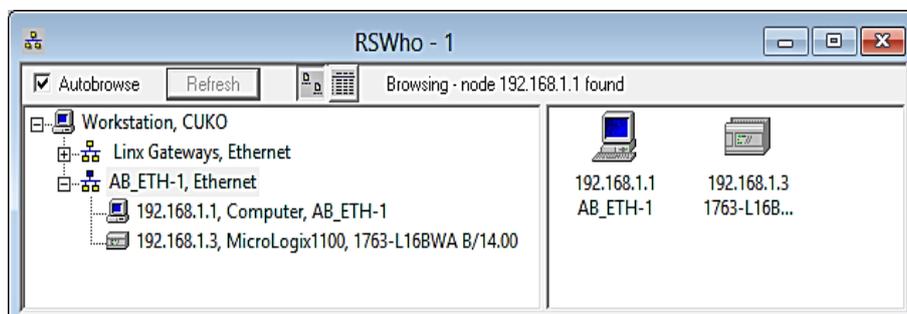


FIGURA 46: Verificación de la comunicación entre el PLC y el computador.

4.3.6.3 CONFIGURACIÓN PARA CARGAR UN PROGRAMA EN EL PLC MICROLOGIX 1100

La programación del PLC se la realizó en el programa RSLogix Micro Starter, creando un programa de control en lenguaje de esquema de contactos o también llamado lógica de escalera (Ladder).

Para la creación de un programa se escogió primero la serie del PLC que es MicroLogix 110 serie B. Una vez en la ventana del programa Ladder se ubicó en el árbol del proyecto y se pinchó en **Controller >> IO Configuration**, se seleccionó el módulo de expansión (1762-IF20F2) para que el programa lo reconozca.

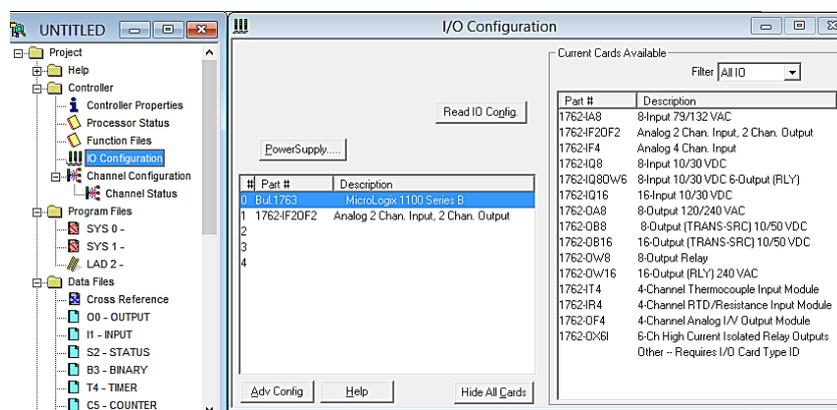


FIGURA 47: IO Configuración.

Posteriormente se dio clic en **Channel Configuration >> Channel 1**, en esta ventana se desactivó el **BOOTP Enable** y se introdujo la dirección IP (192.168.1.3) con la **Subnet Mask** (255.255.255.0) para ser capaz de cargar el programa en el PLC.

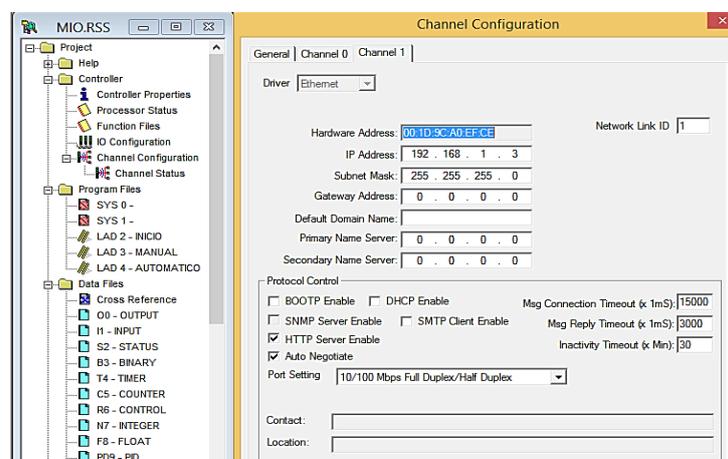


FIGURA 48: Configuración de canales.

4.3.7 TRATAMIENTO DE SEÑALES

4.3.7.1 TRATAMIENTO DE LA SEÑAL DEL SETPOINT DEL MODO LOCAL

La señal del setpoint es proporcionada por el potenciómetro ubicado en el tablero de control, esta alimentado con un voltaje de 10 V DC y conectado a la entrada analógica IV1 del PLC, este suministra una variación de 6-1023 proporcional al caudal que provee la bomba.

A continuación se detalla los datos adquiridos mediante la visualización de la variación de caudal en el sensor de desplazamiento volumétrico y de la señal obtenida del PLC. Se realizaron 50 pruebas antes de proceder a realizar la linealidad.

TABLA 18: Comparación del caudal vs señal del setpoint modo local.

Caudal [LPM]	Dato del PLC
4	156
6	216
8	284
10	368
12	432
14	502
16	569
18	657
20	746
22	810
24	902
26	983
27	1023

Con estos datos se realizó la linealización de la señal utilizando una regresión polinomial por medio de las herramientas del programa de MATLAB, dando como resultado.

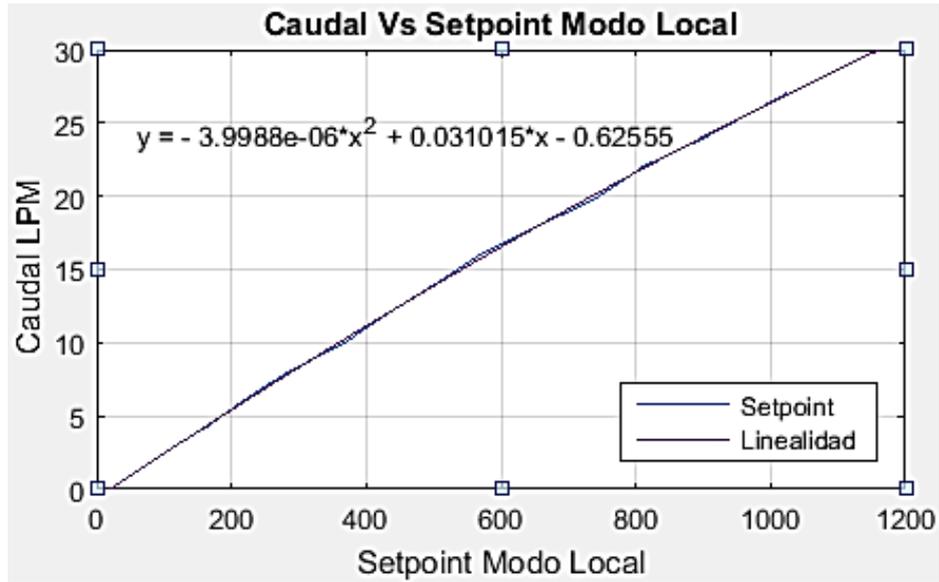


FIGURA 49: Curva de funcionamiento del setpoint modo local.

ECUACIÓN 23

$$Q = -3,9988E-06x^2 + 0,031015x - 0,62555$$

Dónde:

Q: Caudal visualizado en el sensor de desplazamiento volumétrico.

x: Señal del setpoint modo local obtenida del PLC.

4.3.7.2 TRATAMIENTO DE LA SEÑAL DEL SENSOR DE CAUDAL

El sensor de caudal está alimentado con un voltaje de 24 V DC suministrado por el PLC, la señal de tren de pulsos del sensor está conectada a la entrada I/O del PLC para su interpretación. Este suministra una variación de 0-89 pulsos proporcional al caudal que provee la bomba.

A continuación se detalla los datos adquiridos mediante la visualización de la variación de caudal en el sensor de desplazamiento volumétrico y de la señal obtenida del PLC del sensor de caudal, el tiempo de lectura de los pulsos en el PLC se lo realiza cada 50 centésimas de segundo. Se realizaron 50 pruebas antes de proceder a realizar la linealidad.

TABLA 19: Comparación del caudal vs señal del sensor de caudal de efecto Hall.

Caudal [LPM]	Sensor
4	14
6	19
8	25
10	33
12	38
14	45
16	50
18	58
20	65
22	70
24	78
26	84
27	89

Con estos datos se realizó la linealización de la señal utilizando una regresión polinomial por medio de las herramientas del programa de MATLAB, dando como resultado.

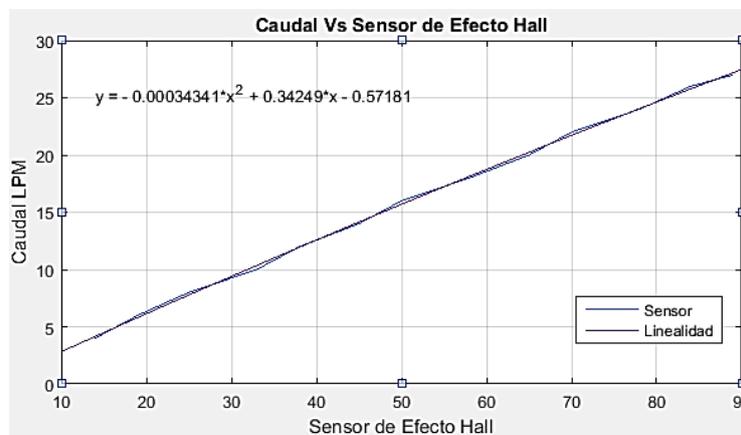


FIGURA 50: Curva de funcionamiento del sensor de caudal de efecto Hall.

ECUACIÓN 24

$$Q = -0,00034341x^2 + 0,34249x - 0,57181$$

Donde:

Q: Caudal visualizado en el sensor de desplazamiento volumétrico.

x: Señal del sensor de caudal de efecto hall obtenida del PLC.

4.3.8 DISEÑO DE LA HMI

Para el diseño de la HMI (Human Machine Interfaz) se optó por utilizar la plataforma de LabVIEW 2014, esta es una herramienta gráfica para pruebas, control y diseño mediante la programación en lenguaje G (Gráfico). La adquisición de datos se realizó mediante la utilización del NI OPC Servers y su configuración se la describe a continuación.

4.3.8.1 CONFIGURACIÓN DEL NI OPC SERVERS

Una vez abierto el programa NI OPC Servers se dio clic en el icono **New Channel** para crear un Nuevo Canal.

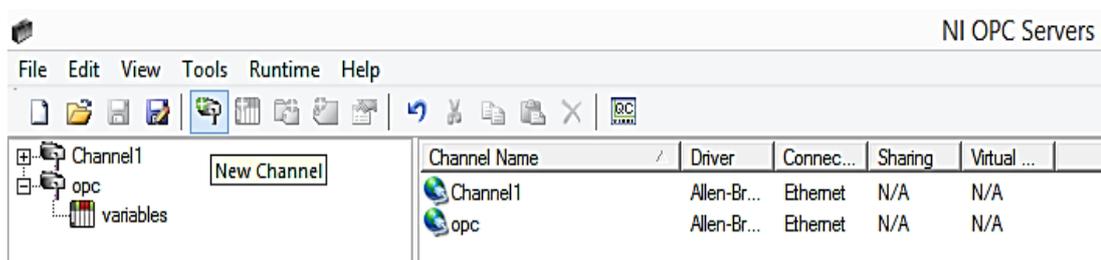


FIGURA 51: Interface del NI OPC Servers.

A continuación se desplegó la ventana **New Channel – Identification** en la cual se asignó un nombre al canal.

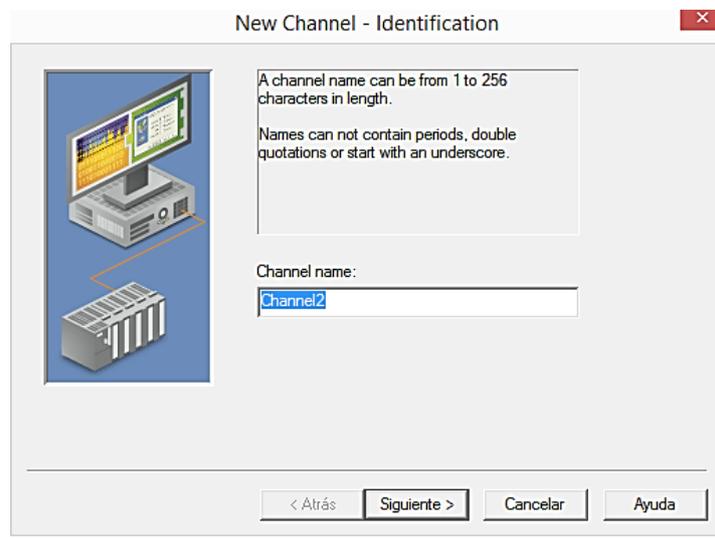


FIGURA 52: Ventana New Channel – Identification.

Seguidamente se desplegó la ventana **New Channel – Device Driver** y se seleccionó **Allen – Bradley ControlLogix Ethernet**.

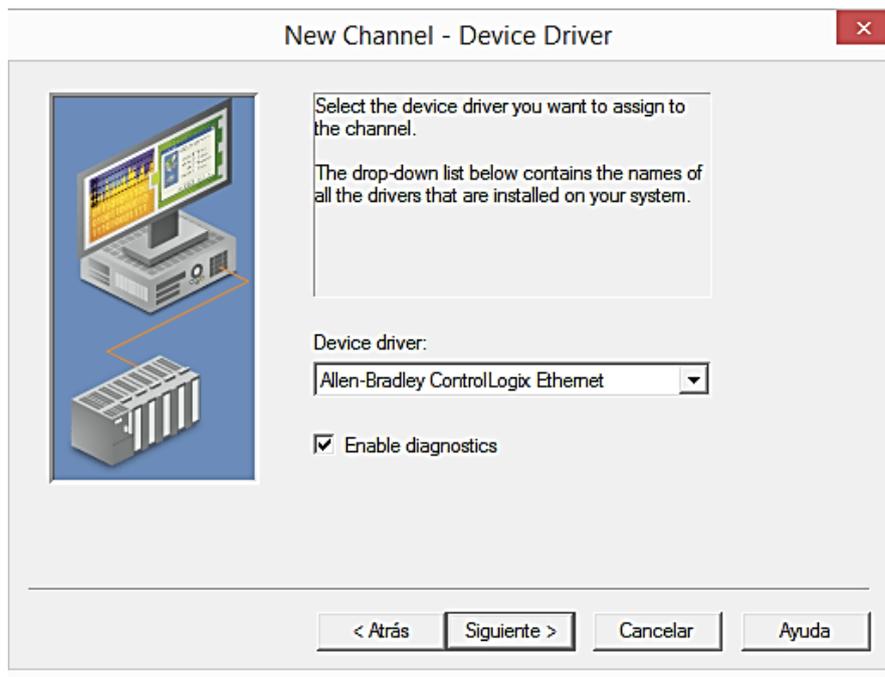


FIGURA 53: Ventana New Channel – Device Driver.

En las siguientes ventanas: **New Channel – Network Interface**, **New Channel – Write Optimizations** y **New Channel – Non-Normalized Float Handling** se debe optar por dejar los parámetros por defecto.

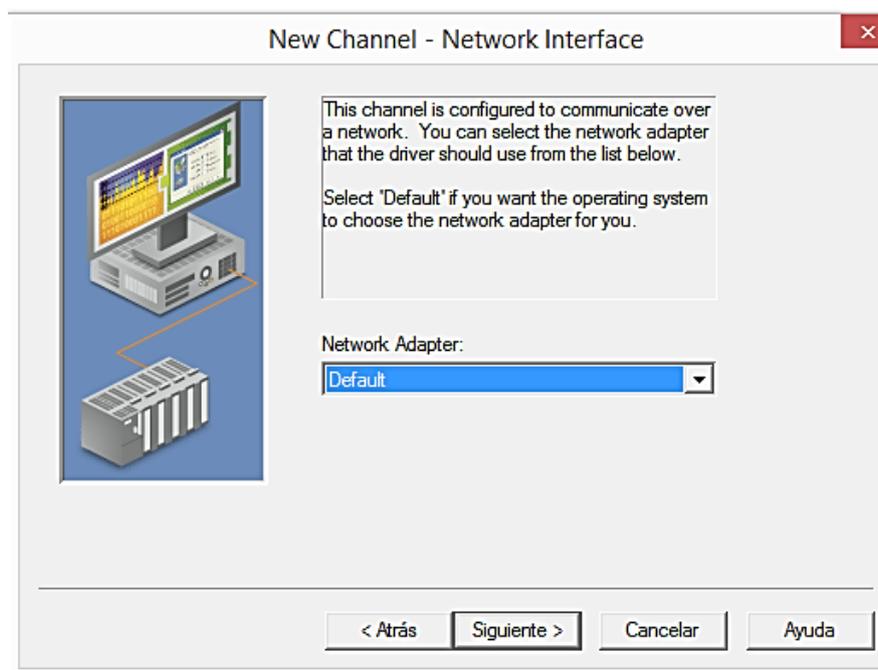


FIGURA 54: Ventana New Channel – Network Interface.

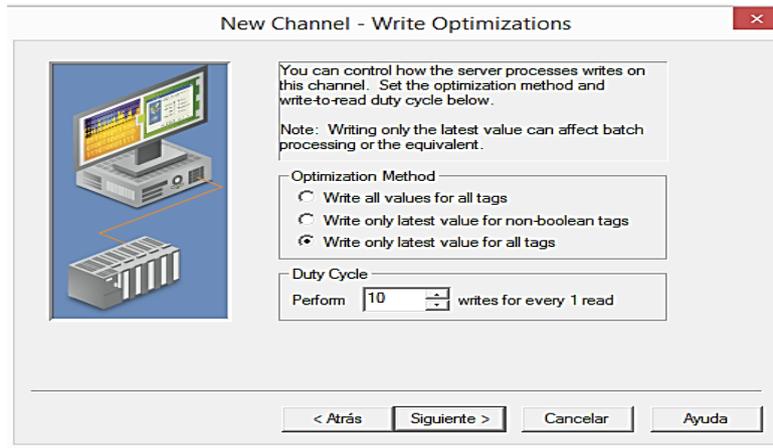


FIGURA 55: Ventana New Channel – Write Optimizations.

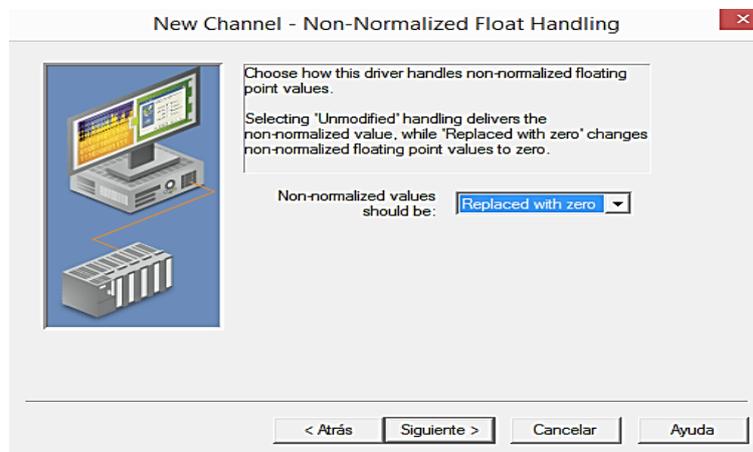


FIGURA 56: Ventana New Channel – Non-Normalized Float Handling.

En el canal que se acabó de crear se pinchó en **Click to add a device** y se desplegó la ventana **New Device - Name**, en esta ventana se asignó un nombre al dispositivo.

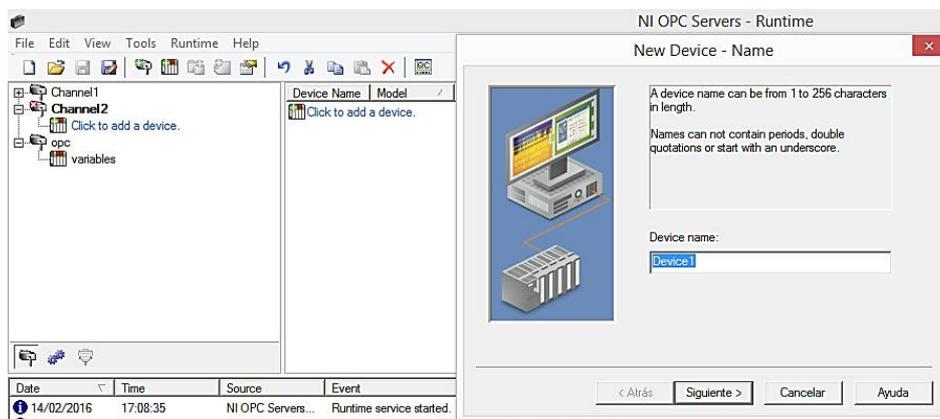


FIGURA 57: Ventana New Device – Name.

Posteriormente se desplegó la ventana **New Device - Model** en la cual se seleccionó el PLC (MicroLogix 1100).

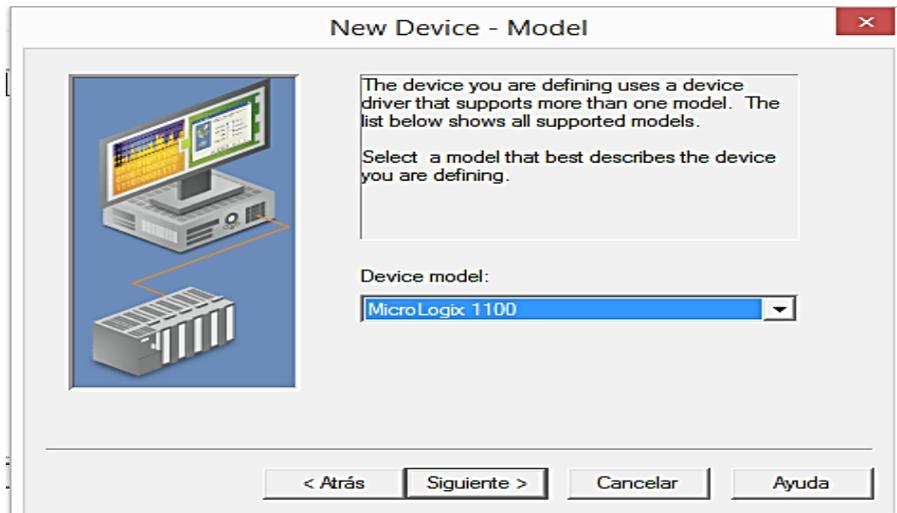


FIGURA 58: Ventana New Device – Model.

A continuación se abrió la ventana **New Device - ID** en la cual se ingresó la dirección IP del PLC que es 192.168.1.3.

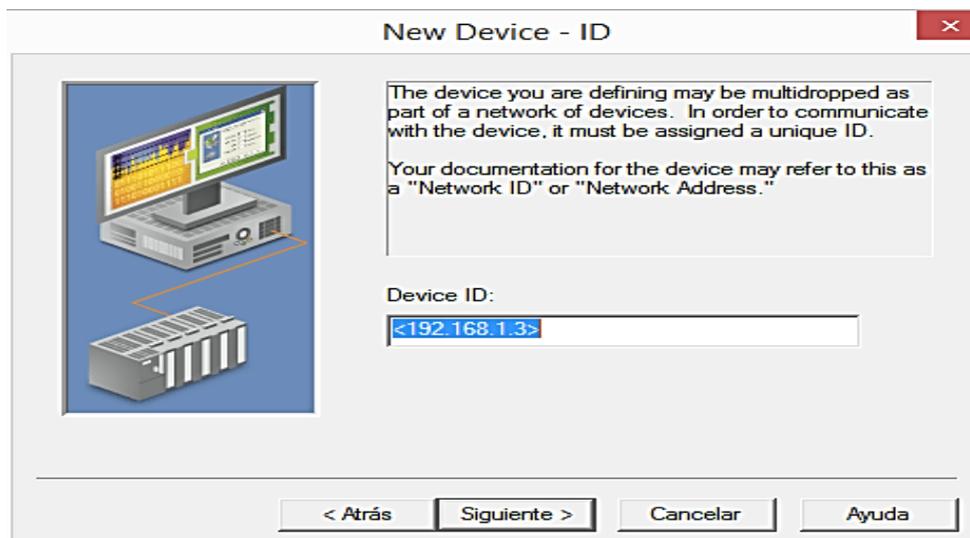


FIGURA 59: Ventana New Device – ID.

En las siguientes ventanas: **New Device – Scan Mode**, **New Device – Timing**, **New Device – Auto-Demotion**, **New Device – Database Creation** y **New Device - ENI DF1/DH+/CN Gtwy Communications**, se debe optar por dejar los parámetros por defecto.

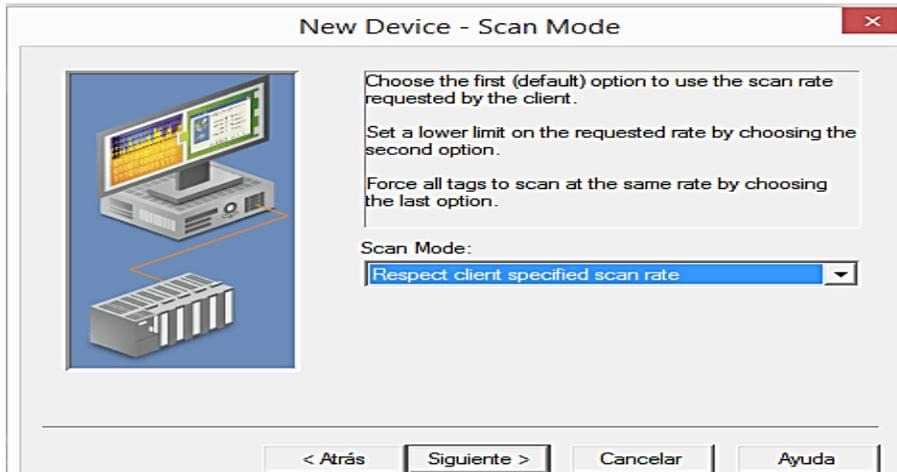


FIGURA 60: Ventana New Device – Scan Mode.

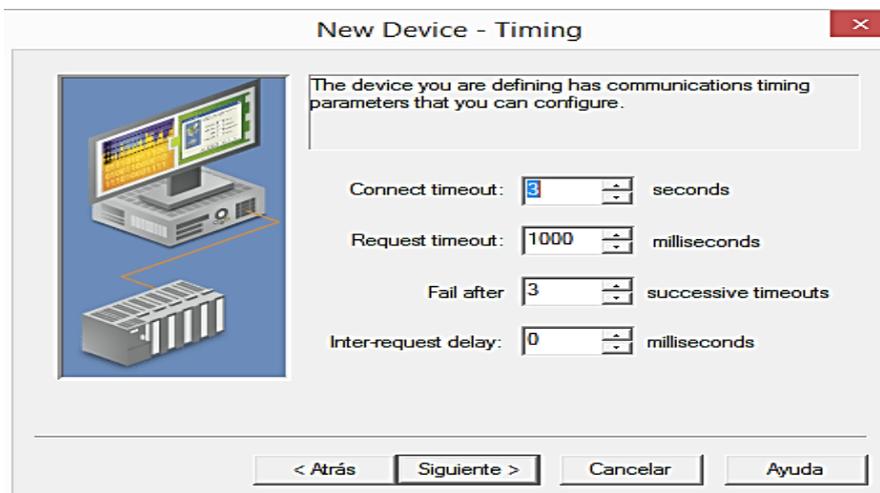


FIGURA 61: Ventana New Device – Timing.

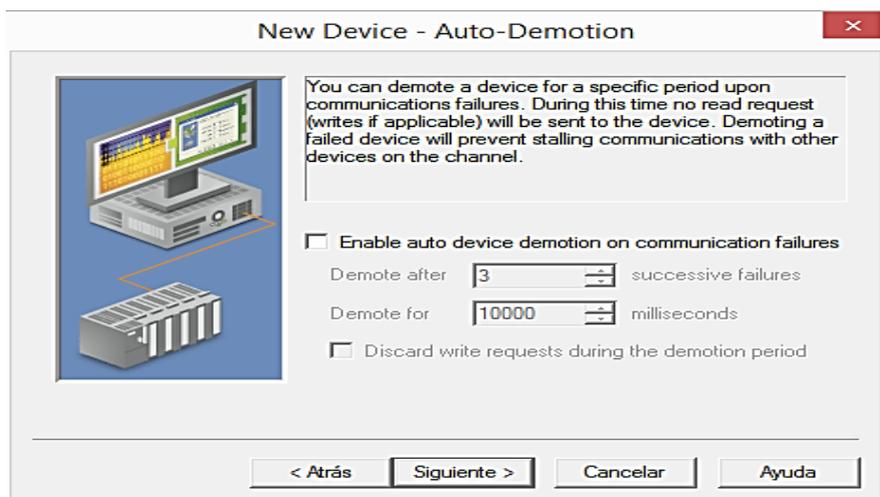


FIGURA 62: Ventana New Device – Auto-Demotion.

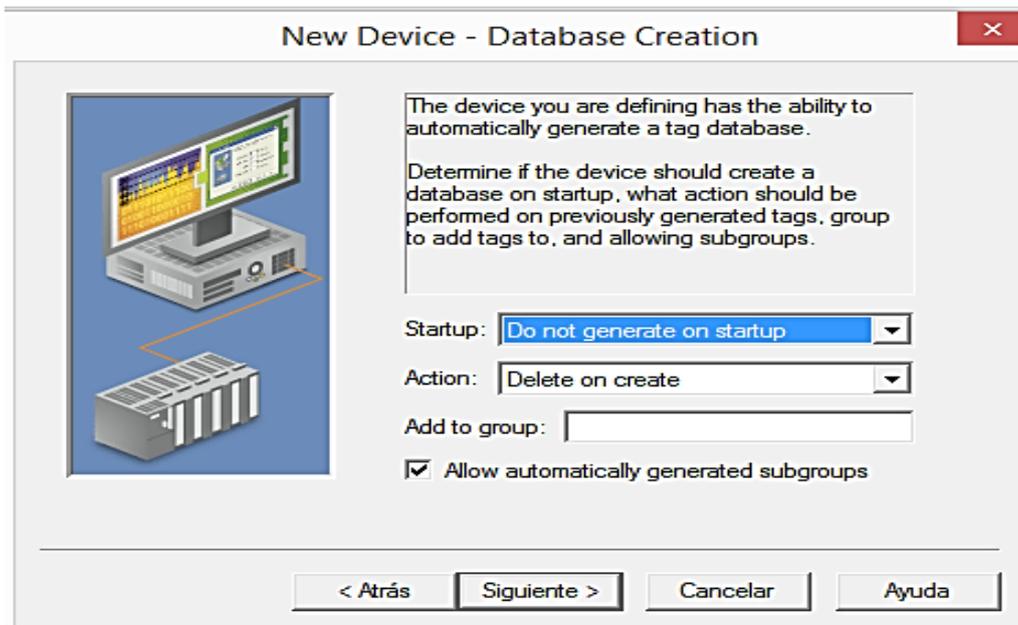


FIGURA 63: Ventana New Device – Database Creation.

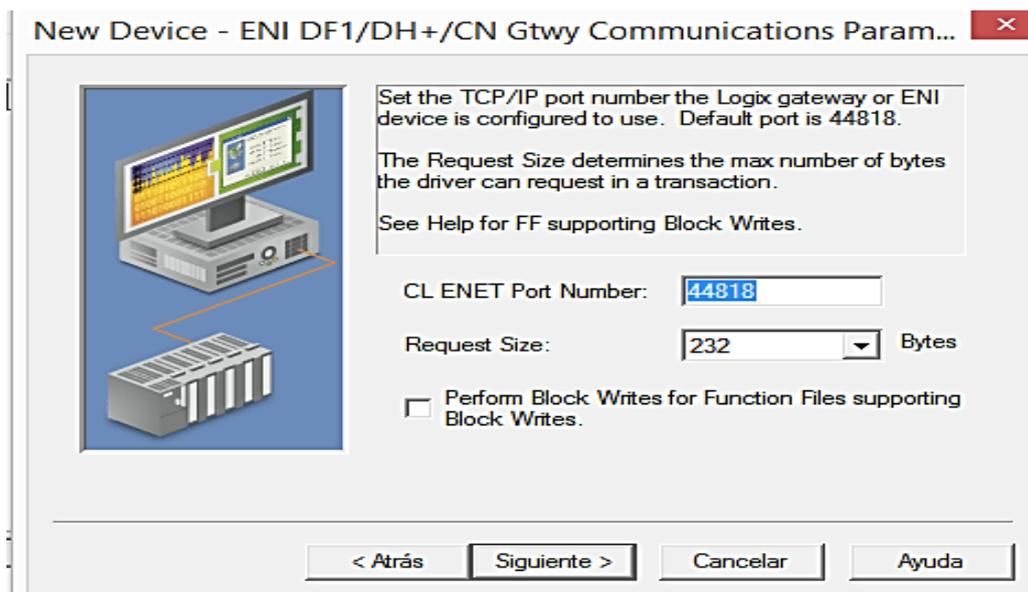


FIGURA 64: Ventana New Device - ENI DF1/DH+/CN Gtwy Communications.

En el dispositivo que se acabó de crear se dio clic en **New Tag** y se desplegó la ventana **Tag Properties** en donde se introdujo los datos correspondientes a la etiqueta a crear: nombre, zona de memoria del PLC, descripción, tipo de dato (Word, bool, byte, carácter, etc.), tipo de acceso (lectura solamente, escritura solamente o lectura/escritura) y el tiempo transcurrido entre cada lectura/escritura.

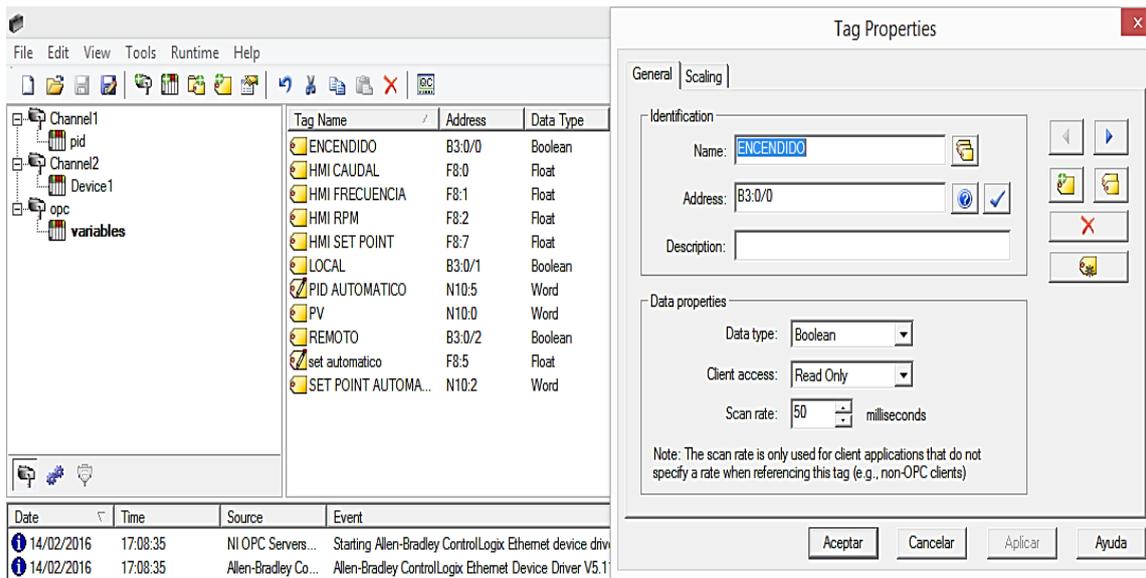


FIGURA 65: Ventana propiedades de etiqueta.

4.3.8.2 CREACIÓN DE UN NUEVO PROYECTO EN LABVIEW

En la ventana principal de LabVIEW se seleccionó **Create Project >> Blank Project**, una vez en la ventana del nuevo proyecto se dio clic en **My Computer >> New >> I/O Server**.

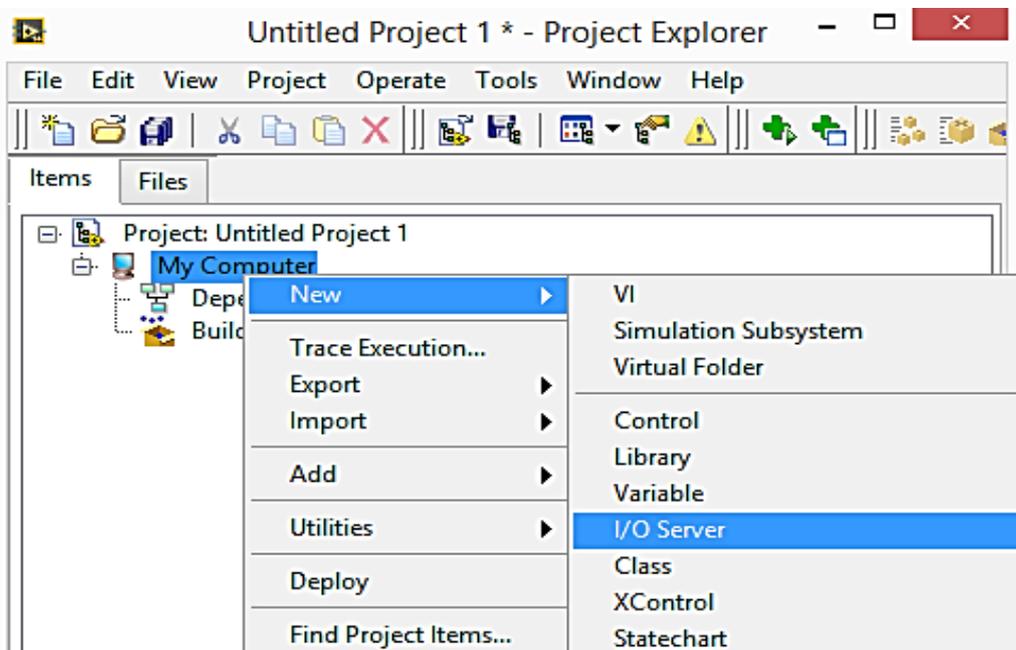


FIGURA 66: Ventana principal del nuevo proyecto.

En seguida se desplegó la ventana **Create New I/O Server** en la cual se escogió la opción de **OPC Client**.

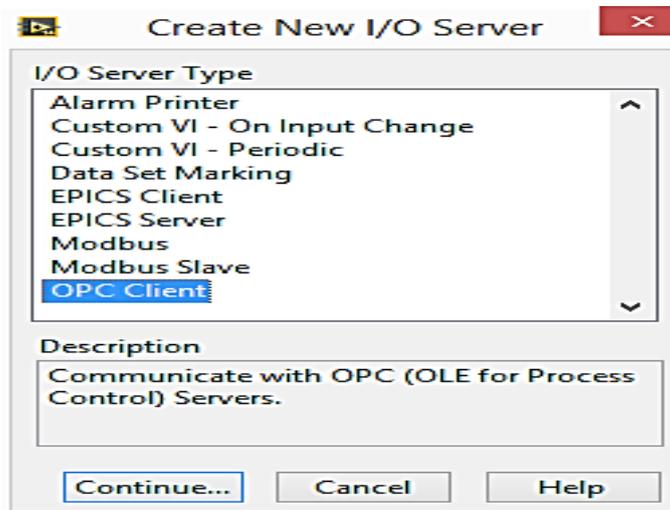


FIGURA 67: Ventana Create New I/O Server.

A continuación se abrió la ventana **Configure OPC Client I/O Server** en la cual se seleccionó la opción **National Instruments.NIOPCServers.V5**, posteriormente se creará una nueva biblioteca sin título.

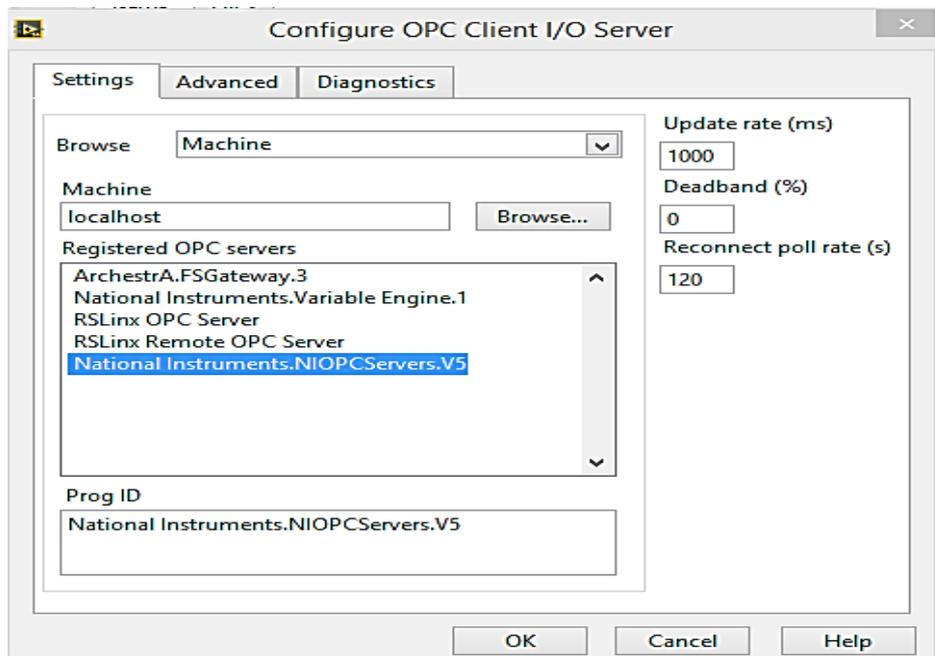


FIGURA 68: Ventana Configure OPC Client I/O Server.

En la ventana principal del nuevo proyecto se pinchó en la biblioteca que se acabó de crear >> **New** >> **Variable**.

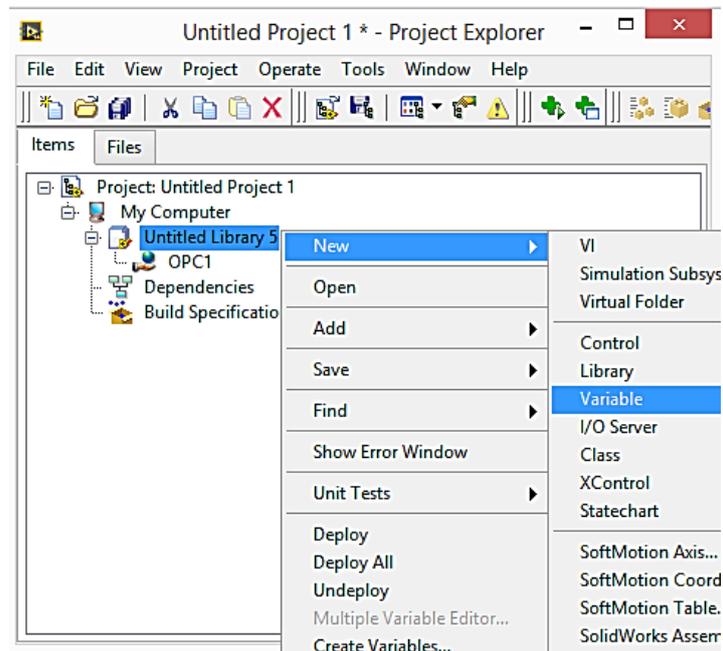


FIGURA 69: Creación de una variable.

Seguidamente se desplegó la ventana **Shared Variable Properties** en donde se introdujo los datos correspondientes a la variable a crear: nombre, el tipo de variable es Network-Published, se dio clic **Enable Aliasing** para ser capaz de buscar la etiqueta que se requiera emplear y por último se seleccionó el tipo de acceso que se requiera utilizar (lectura solamente, escritura solamente o lectura/escritura).

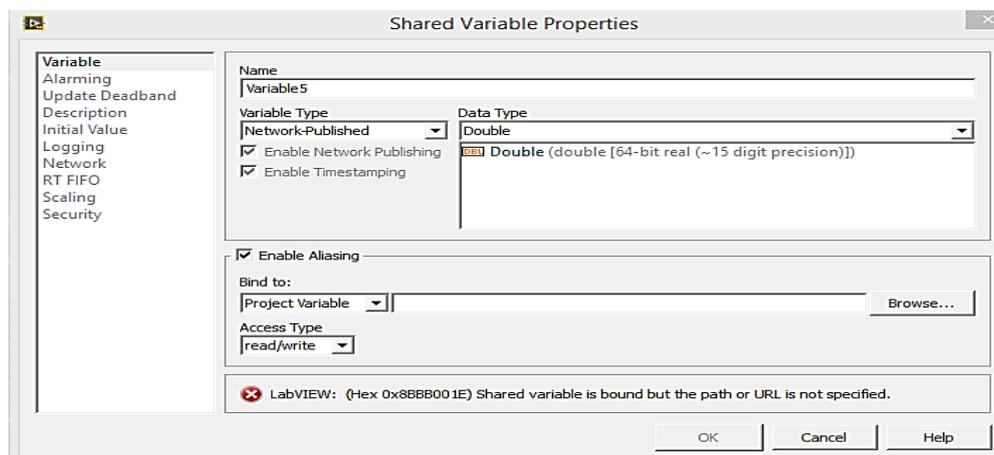


FIGURA 70: Ventana Shared Variable Properties.

Para escoger la etiqueta que se desee emplear se dio clic en **Buscar >> Mi computadora >> Librería creada >> OPC >> Canal creado >> Dispositivo creado** y a continuación se desplegaron todas las etiquetas que se han configurado en el NI OPC Server con anterioridad.

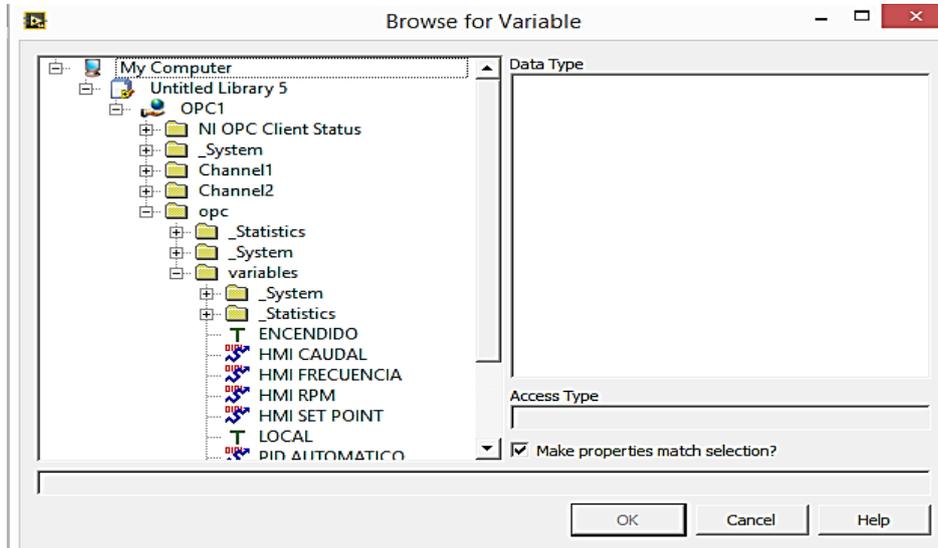


FIGURA 71: Ventana para buscar variables.

En la ventana principal del nuevo proyecto se pinchó en la **Biblioteca >> Nuevo >> VI** para crear la ventana del panel frontal.

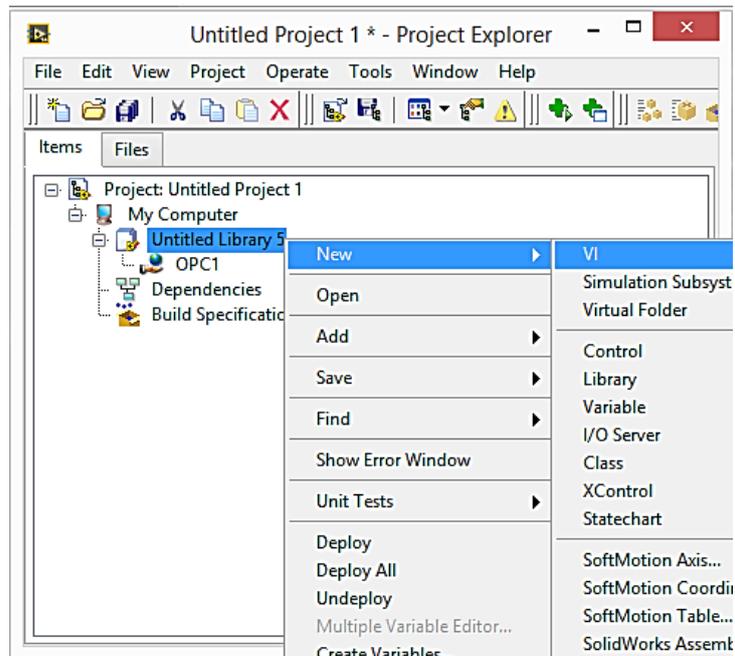


FIGURA 72: Creación de un nuevo VI.

En la ventana principal del panel frontal se realizó el enlazamiento de las variables, para ello se dio clic derecho en la variable y procedió a realizar los siguientes pasos: dar clic en **Properties >> Data Binding >> en Data Binding Selection** y escoger la opción **Shared Variable Engine (NI-PSP) >> en el Tipo de Acceso** se escogió (lectura solamente, escritura solamente o lectura/escritura) >> **Buscar**.

A continuación se desplegó la ventana **Select Source Item** en donde se pinchó en: **el proyecto creado >> Mi Computadora >> la Biblioteca Creada** y se seleccionó la etiqueta que se requiera emplear.

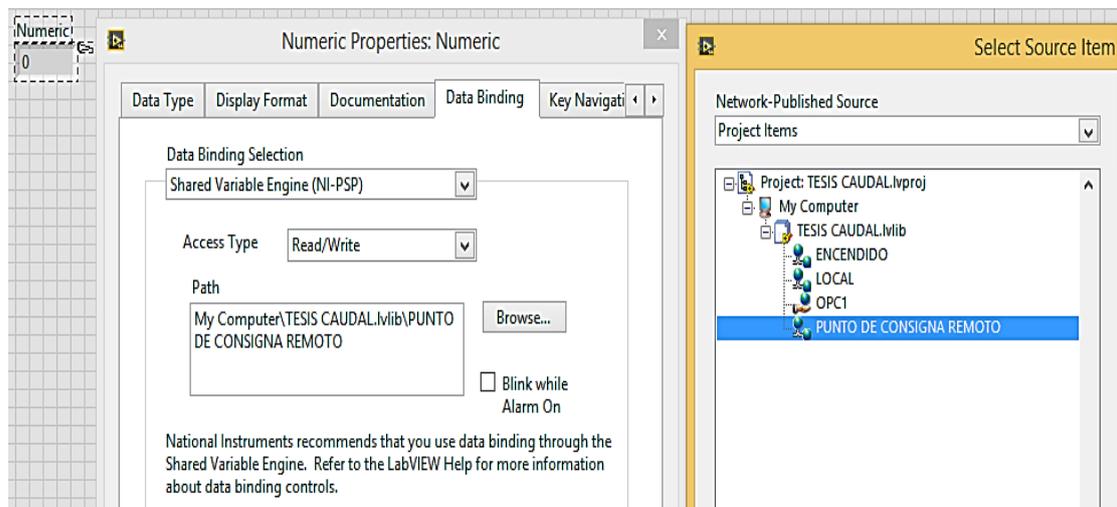


FIGURA 73: Enlazar una variable con la etiqueta.

Se puede verificar el correcto funcionamiento de la etiqueta si el pequeño piloto de forma triangular situado a la derecha de la variable, se pone en verde.

4.3.8.3 IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA DEL VI

I. Lectura, visualización y generación de registro

Para la lectura y visualización de las variables de: caudal, pulsos por minuto del sensor, frecuencia de operación de la bomba y del setpoint, se utilizó indicadores numéricos enlazados respectivamente a su correspondiente etiqueta, el registró de los datos se realizó mediante el indicador **EX Table** ubicado en la paleta de funciones del panel frontal >> **List, Table & Tree**, adicionalmente se realizó un contador con su respectivo reset para obtener el número de datos, se incluyó una pequeña fórmula ($X1/3.7854$) para la transformación de LPM a GPM y por último se utilizó un **Waveform Chart** para la visualización de la señal del caudal y del setpoint.

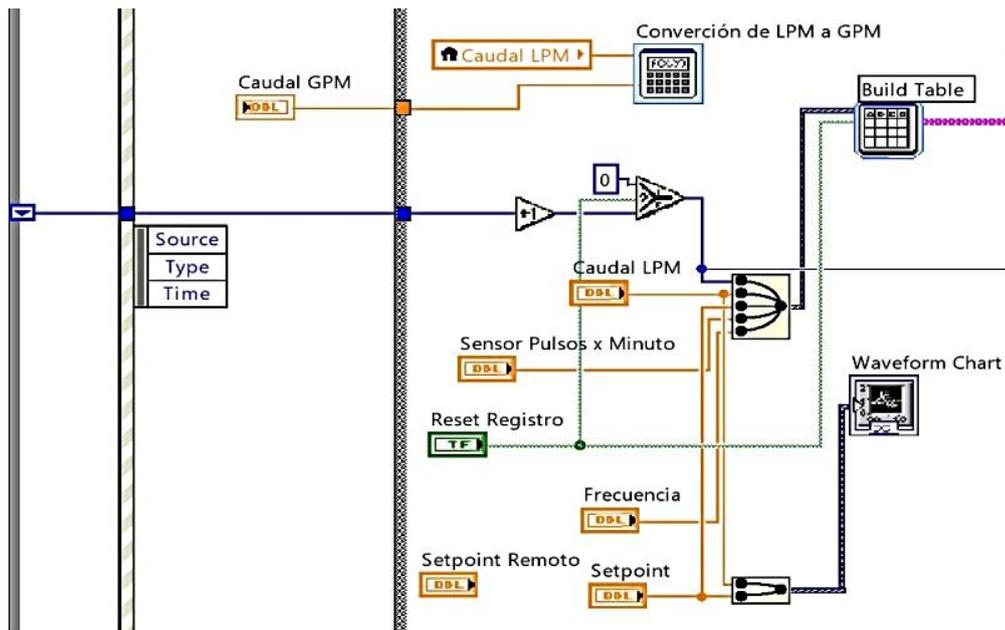


FIGURA 74: Lectura, visualización y generación de registro.

II. Control PID

En el control PID del modo remoto, para el ingreso del setpoint y de la variable de proceso se requiere de una estructura de caso (verdadero), esto se lo consigue mediante un indicador tipo booleano enlazado a la etiqueta de modo remoto. En el panel frontal encontramos los controladores para el ingreso de los coeficientes de PID y del rango de salida, además de los pulsadores para realizar el Autotunig y de reinicio del control PID. Adicionalmente se incluyó una pequeña fórmula $((X1 \cdot 1023) / 27)$ tanto para el setpoint como para la variable de proceso, con ello se consigue transformar de LPM a bits (0-1023).

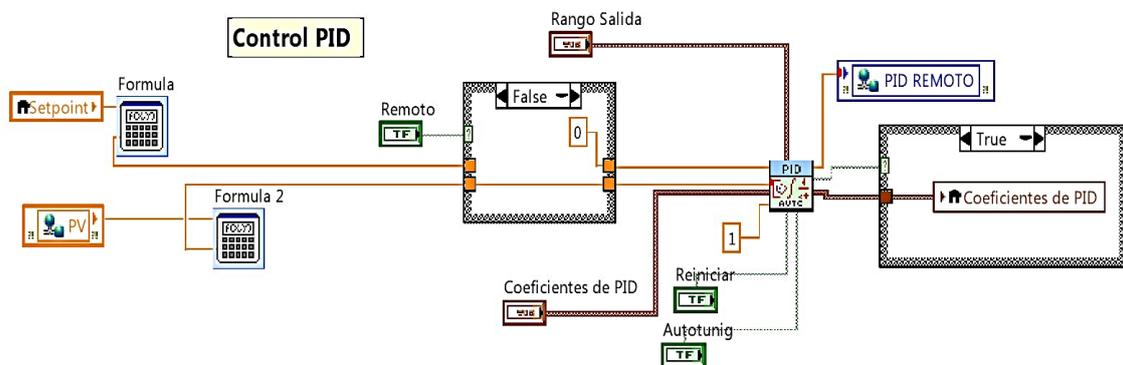


FIGURA 75: Control PID.

III. Exportar el registró de datos a Excel en formato de tabla

La exportación de datos desde LabVIEW a Excel se lo realizó mediante la paleta de funciones del diagrama de bloques >> **Report Generation >> Excel Specific**. A continuación se presentan los arreglos necesarios para realizar la exportación de datos y creación de una gráfica en Excel. Los arreglos se encuentran dentro de una estructura de caso (verdadera) para poder generar la exportación al presionar un controlador tipo booleano.

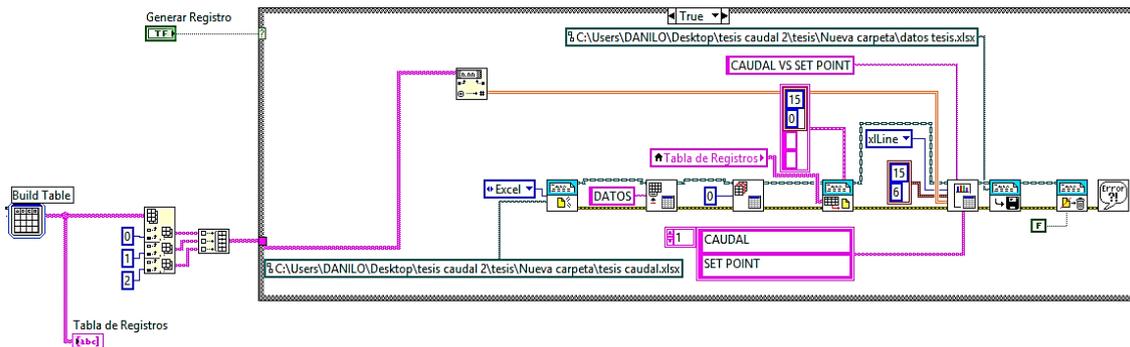


FIGURA 76: Exportar el registró de datos a Excel en formato de tabla.

Todos los arreglos antes mencionados se encuentran dentro de una estructura de caso (verdadera) para su funcionamiento, esto se lo consigue mediante un indicador tipo booleano enlazado a la etiqueta de run variador. A su vez, esta estructura se encuentra dentro de otra estructura de evento que registra datos cada 100 milisegundos, y por último todo se encuentra dentro de una estructura while loop. La siguiente figura muestra las variables utilizadas para la adquisición y envió de datos.

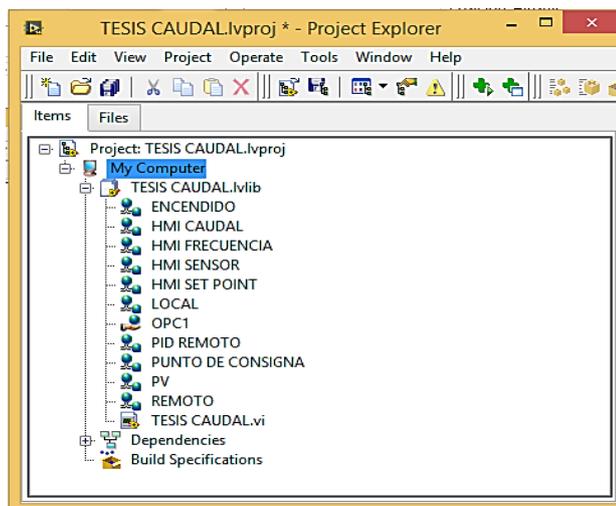


FIGURA 77: Listado de las variables utilizadas en el proyecto.

4.3.9 IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA DE CAUDAL Y CÁLCULO DEL CONTROLADOR PID

Para realizar la identificación del sistema se optó por utilizar la herramienta System Identification de MATLAB, la cual permite hallar la función de transferencia, mediante los datos obtenidos de la planta, esto quiere decir experimentalmente, simplificando la necesidad de grandes cálculos matemáticos.

Para poder utilizar System Identification de MATLAB, primeramente fue necesario crear las variables de entrada y de salida del sistema, las cuales vendrán a ser el setpoint y el caudal respectivamente. Para la creación de estas variables será necesario tener un registro de los valores obtenidos en cada prueba.

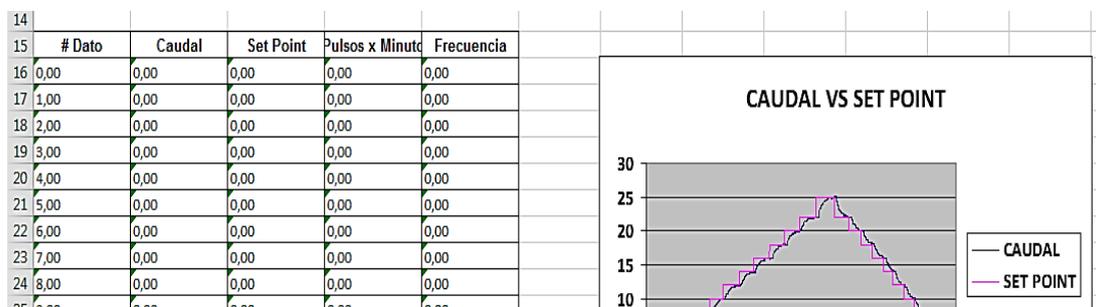


FIGURA 78: Datos obtenidos mediante experimentación.

Una vez obtenidos los datos será necesario copiar las filas y transferirlas al Workspace de MATLAB como se indica en la figura 80.

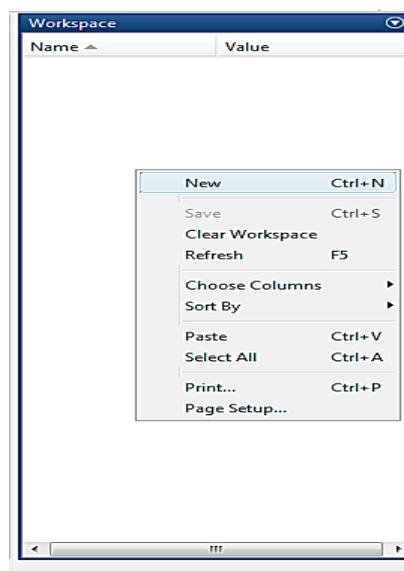


FIGURA 79: Creación de una variable en MATLAB.

En el Workspace se realizó un clic secundario y se seleccionó la opción new para así crear una variable, se debe dar doble clic en la variable creada para desplegar la tabla de valores de la misma, en esta tabla se procederá a introducir los valores de la hoja de Excel.

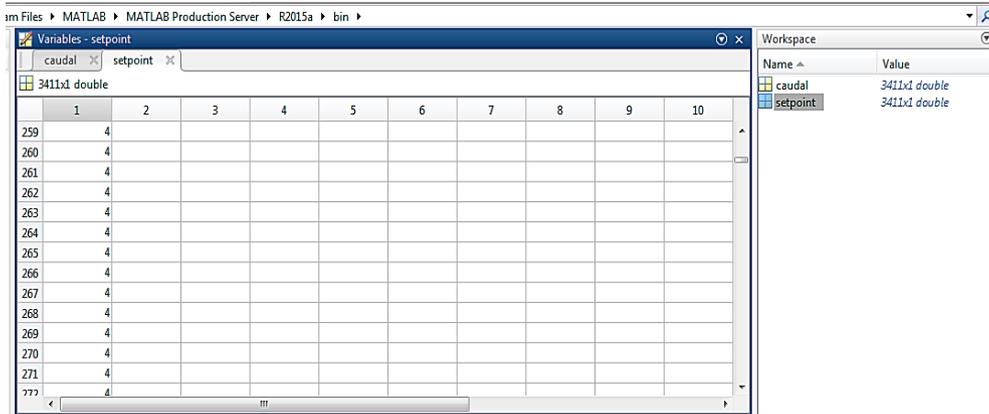


FIGURA 80: Valores de la variable.

Una vez creadas las variables se utilizó el comando `>> ident` en el Comand window de MATLAB para abrir el System Identification.

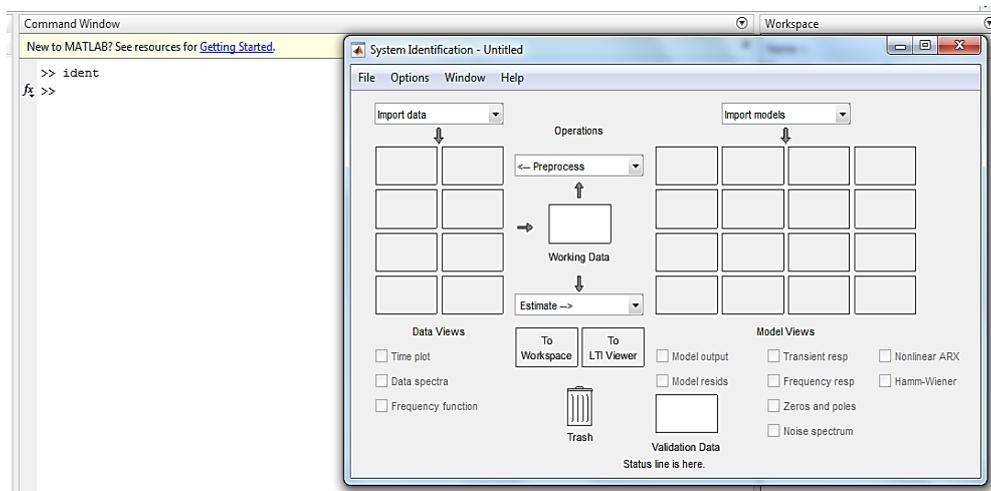


FIGURA 81: Commando `>> ident` y el System Identification de Matlab.

Una vez abierto el System Identification se procedió a la importación de los respectivos datos, para eso se ubicó en la pestaña de **import data** y se escogió la opción **time domain data** porque que los datos obtenidos son en función del tiempo.

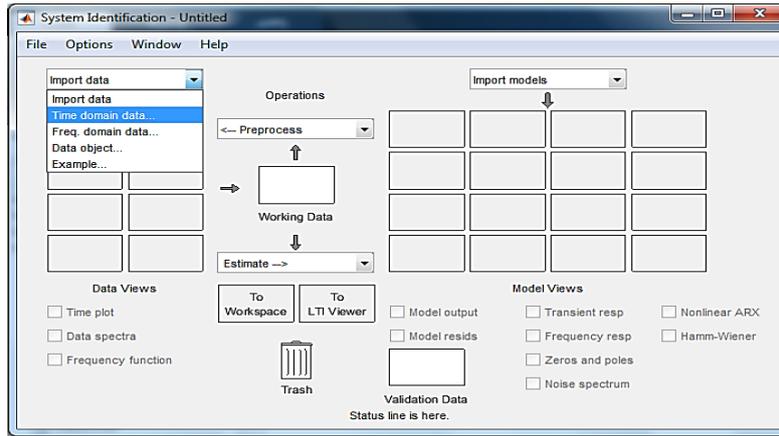


FIGURA 82: Importación de datos en system identification.

Una vez desplegada la ventana de Import data se introdujo los valores de las constantes creadas anteriormente en el Workspace de MATLAB.

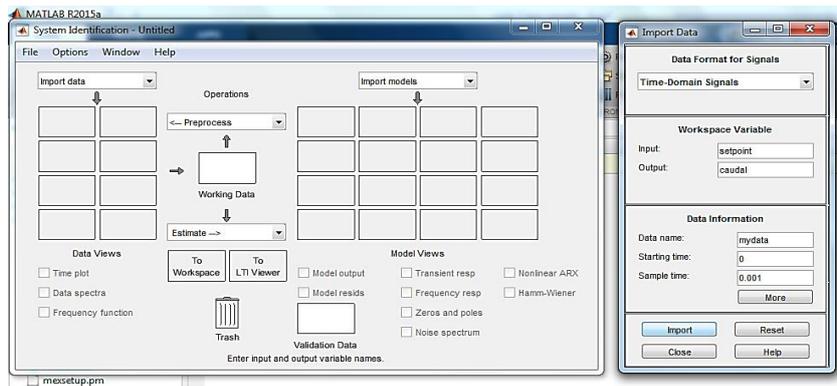


FIGURA 83: Importación de datos desde el workspace de MATLAB.

Realizada la importación de las variables, en la pestaña **Operations** se seleccionó la opción **Quick star**, la cual realiza el tratamiento y selección de los datos.

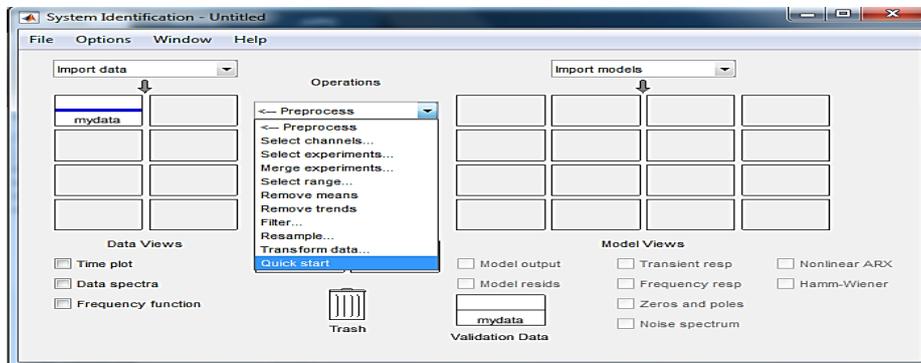


FIGURA 84: Selección de datos mediante la función Quick star.

Una vez realizada la selección de los datos se procedió a escoger en la pestaña **Working data** la opción **Transfer función model**.

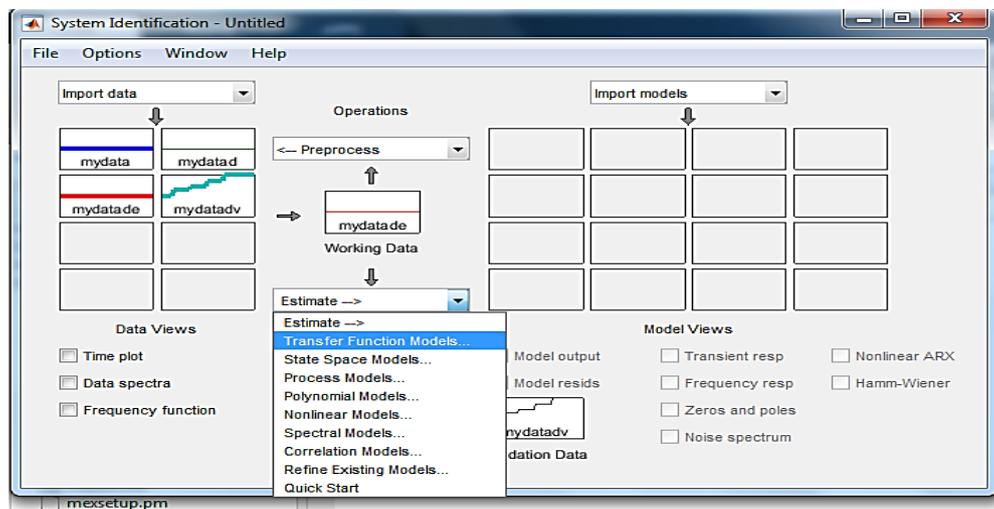


FIGURA 85: Selección de la función de transferencia.

A continuación se desplegó una ventana en la cual se seleccionó el número de polos y ceros que la función de transferencia requiera. En esta parte es recomendable realizar una amplia selección de polos y ceros para poder seleccionar la función de transferencia que mejor se ajuste al sistema.

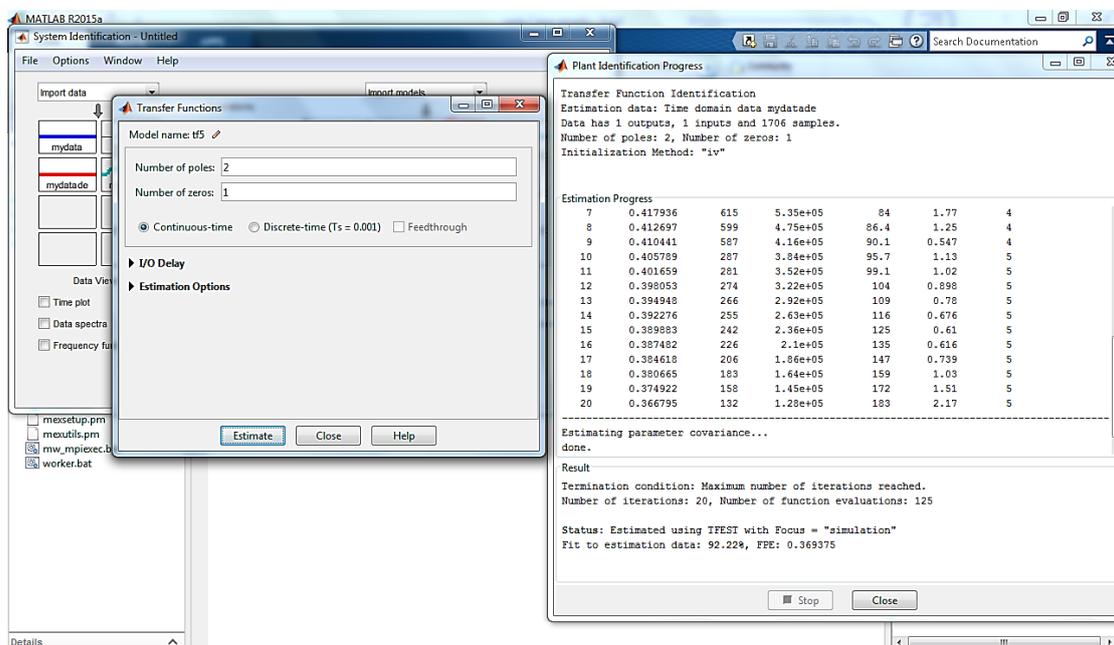


FIGURA 86: Selección de polos y ceros para la función de transferencia.

Una vez que el programa termine de realizar las estimaciones necesarias para cada función de transferencia, se obtuvieron las respectivas curvas de las mismas. Para poder apreciar de mejor manera los resultados se seleccionó la opción **Model output**.

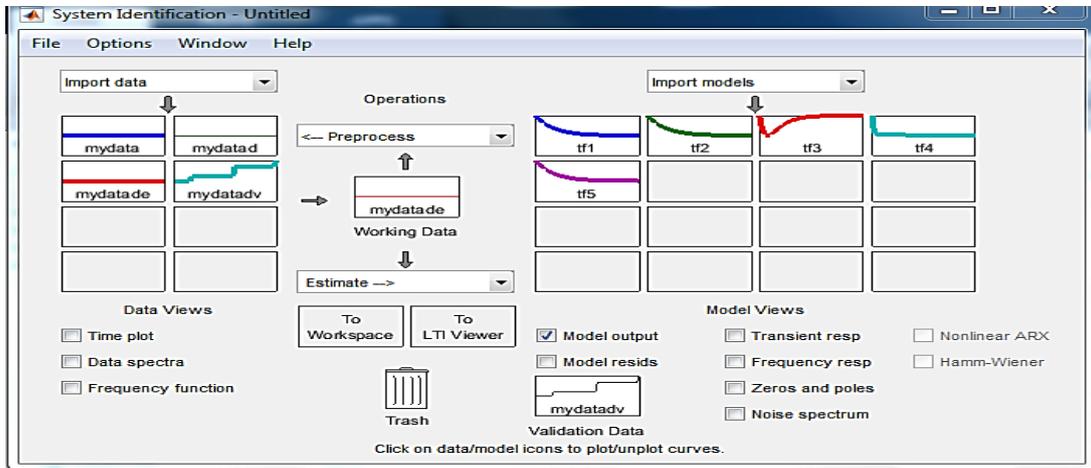


FIGURA 87: Curvas de las funciones de transferencia.

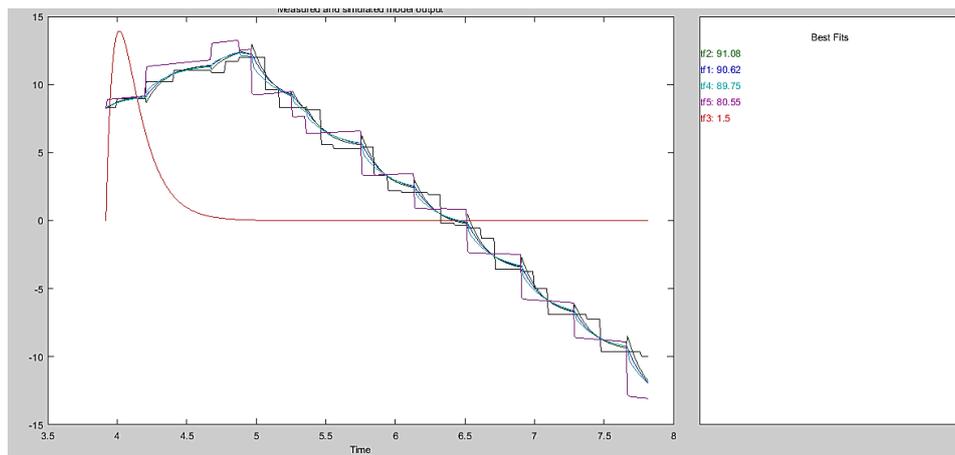


FIGURA 88: Curvas y resultados de la función de transferencia.

Para seleccionar la función de transferencia que se ajuste a la planta diseñada se debe escoger la que tenga un resultado o estimación superior al 60%, en el caso del diseño realizado la estimación es superior al 80% por lo cual se procedió a seleccionar la siguiente función de transferencia.

$$\frac{0.1138s^2 - 4.821s + 48,67}{s^2 + 9.317s + 52.67}$$

FIGURA 89: Función de transferencia de la planta.

4.3.10 CALCULO DEL CONTROLADOR PID, MEDIANTE EL MÉTODO DE ZIEGLER – NICHOLS (Z-N)

Una vez obtenido la función de transferencia por System Identification, se procede al respectivo cálculo del PID mediante el método de Ziegler – Nichols. Para determinar el tiempo de retraso (L) y la constante del tiempo (T) se utiliza el siguiente código de MATLAB.

```
>> H=tf3;%función de transferencia
>> step(H);
>> hold on;
>> dt=0.01;%tiempo de muestreo
>> t=0:dt:2;%vector de tiempo
>> y=step(H,t)';%respuesta en escalón
>> dy=diff(y)/dt;%derivada de la respuesta en escalón
>> [m,p]=max(dy);%punto de inflexión
>> y1=y(p);
>> t1=t(p);
>> L=t1-y1/m;%tiempo de retardo
>> T=(y(end)-y1)/m+t1-L;%constante de tiempo
>> plot(t,y,'b',[0 L L+T t(end)], [0 0 y(end) y(end)], 'k')
>> plot(L,0,'*r')
>> plot(T+L,y(end),'*b')
```

FIGURA 90: Código de Matlab para cálculo de Ziegler – Nichols.

En la siguiente figura se muestra la curva de la función de transferencia, además la respuesta en escalón del sistema, la constante de tiempo (T) y el tiempo de retardo (L).

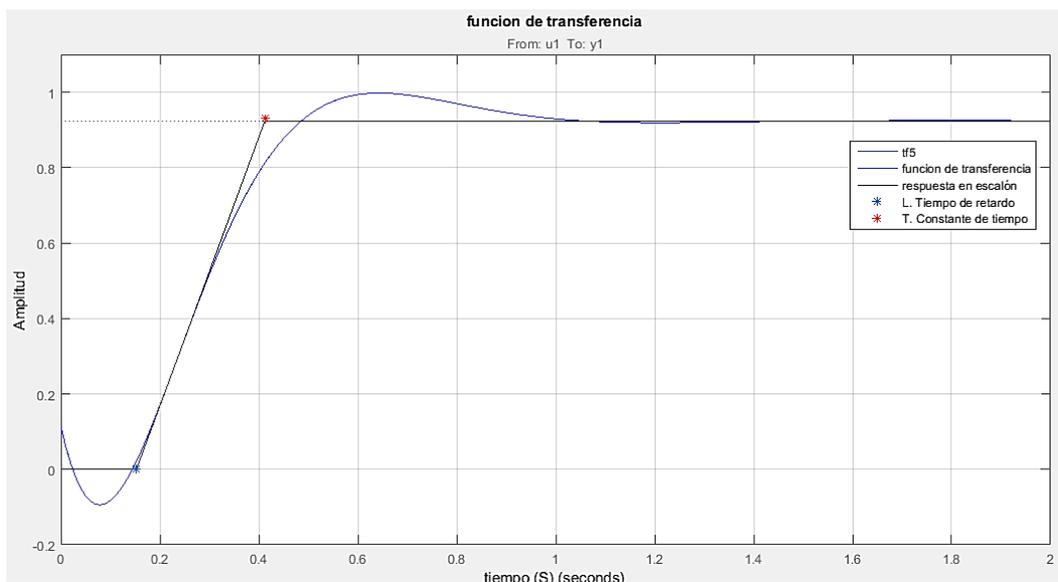


FIGURA 91: Recta tangente al punto de inflexión en la curva de respuesta.

Los valores para L y T son de 0,1527 y 0,26 respectivamente. Para poder determinar los valores de Kp, Ti, y Td, se utilizó los valores de la tabla 6 en referencia a la respuesta en escalón de Z-N.

$$Kp = 1.2 * \frac{T}{L}; \quad Kp = 1.2 * \frac{0.26}{0.1527}; \quad Kp = 2.0432$$

$$Ti = 2 * L; \quad Ti = 2 * 0.1527; \quad Ti = 0.3054$$

$$Td = 0.5 * L; \quad Td = 0.5 * 0.1527; \quad Td = 0.0763$$

Una vez calculados estos valores se podrá determinar las constantes de Ki y Kd, utilizando los datos de la tabla 7 en referencia a Z-N.

$$Ki = \frac{Kp}{Ti}; \quad Ki = \frac{2.0432}{0.3054}; \quad Ki = 6.6902$$

$$Kd = Kp * Td; \quad Kd = 2.0432 * 0.0763; \quad Kd = 0.1558$$

Cuando los valores de Ki y Kd son obtenidos, se puede determinar la función del PID empleando la ecuación 10.

$$G(s) = Kp \left(1 + \frac{1}{Tis} + Tds \right) = Kp + \frac{Ki}{s} * Kds$$

$$G(s) = \frac{Kds^2 + Kps + Ki}{s}$$

$$G(s) = \frac{0.1558s^2 + 2.0432s + 6.6902}{s}$$

Determinada la función del PID se podrá obtener la función de transferencia del sistema en lazo cerrado, en la cual interviene la función del PID (Gs) y la función de la planta (Hs) con retroalimentación.



FIGURA 92: Diagrama de bloques del sistema PID y la planta.

$$H(s) = \frac{0.1138s^2 - 4.821s + 48.67}{s^2 + 9.317s + 52.67}$$

$$G(s) = \frac{0.1558s^2 + 2.0432s + 6.6902}{s}$$

Para encontrar la función del sistema se utilizó el álgebra de bloques que se encuentra en el anexo I.

$$H_{lc} = \frac{G(s) * H(s)}{1 + G(s) * H(s)}$$

La función de MATLAB feedback nos facilita el trabajo, únicamente hay que ingresar el lazo principal y el lazo de retroalimentación como variables, y esta nos devuelve la función de transferencia en lazo cerrado.

>> Hlc=feedback (G*H, 1)

$$H_{lc} = \frac{0.01774s^4 - 0.5186s^3 - 1.507s^2 + 67.18s + 325.6}{0.01774s^4 + 0.4814s^3 + 7.18s^2 + 119.8s + 325.6}$$

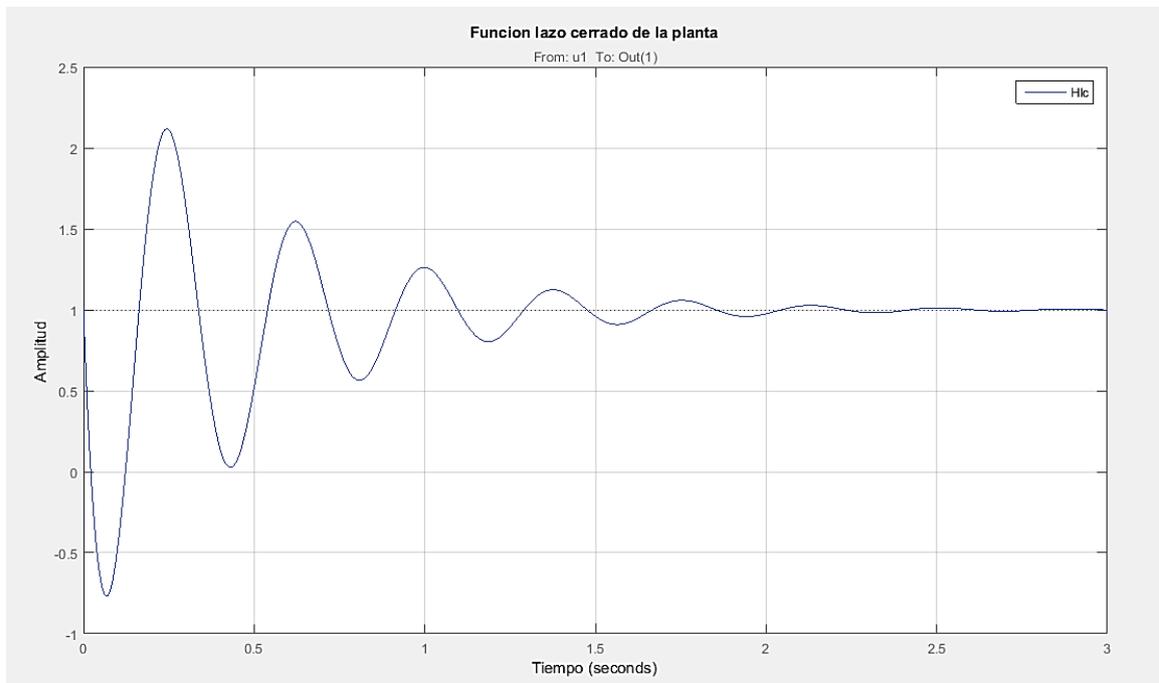


FIGURA 93: Función de transferencia de la planta con PID sin refinar.

En la figura 93 se muestra un control PID que se encuentra fuera de los requerimientos del sistema, por lo tanto se tuvo que realizar un refinamiento del controlador por medio de la herramienta Simulink de MATLAB y el Autotuning del PID. Para refinar la señal obtenida en Simulink fue necesario crear un diagrama de bloques como el de la figura 92 pero reemplazando la función $G(s)$ por un controlador PID.



FIGURA 94: Diagrama de bloques en Simulink.

Para proceder al refinamiento de la señal fue necesario ejecutar doble clic en el bloque del PID en donde se escogió la opción **tune** como se muestra en la figura 95.

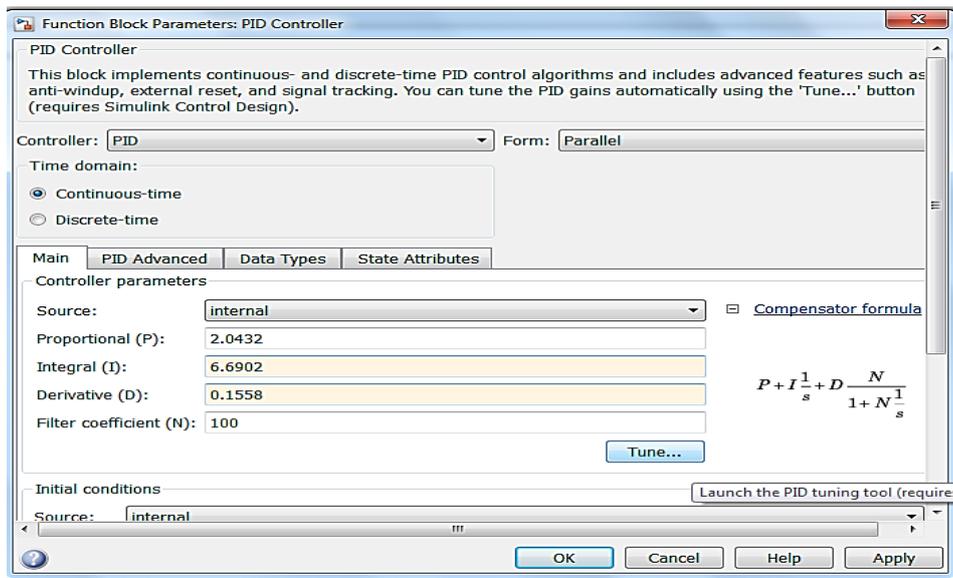


FIGURA 95: Auto tune del PID.

A continuación se desplegó una ventana en la cual se apreció la señal del PID sin refinar, y también la señal del PID refinado.

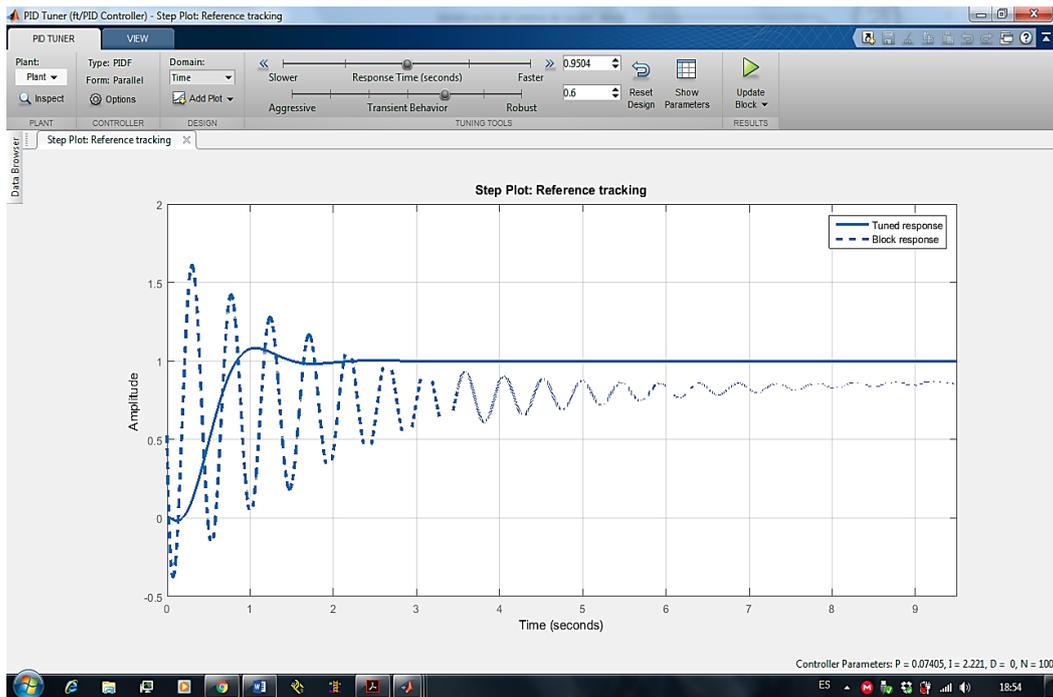


FIGURA 96: Señales del PID refinado vs sin refinar.

Para actualizar los datos del PID refinado solo se dio clic en la opción **Update block**, y se obtuvo los nuevos valores de Kp, Ki, y Kd.

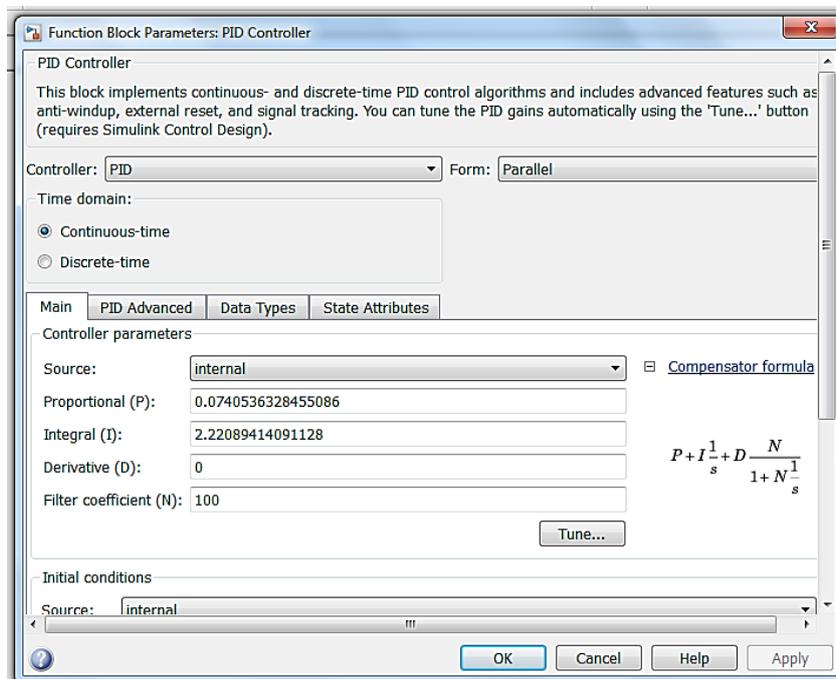


FIGURA 97: Nuevos valores de las constantes PID.

Los nuevos valores serán Kp=0.074122, Ki=2.219902 y Kd=0.

Con estos nuevos valores de las constantes PID se procedió a recalcular los valores de T_i y T_d , y posteriormente a remplazarlos en la función del PID ($G(s)$). Los cuales quedaron de la siguiente manera:

$$T_i = \frac{K_p}{K_i}; \quad T_i = \frac{0.074122}{2.219902}; \quad T_i = 0.0333901$$

$$T_d = \frac{K_d}{K_p}; \quad T_d = \frac{0}{0.074122}; \quad T_d = 0$$

$$G(s) = \frac{0.0741228s + 2.219902s}{s}$$

Una vez encontrada la nueva función del PID, se procedió a recalcular la función de transferencia de la planta en lazo cerrado. La cual será:

$$H_{lc} = \frac{0.008438s^3 - 0.1047s^2 - 7.096s + 108}{1.008s^3 + 9.212s^2 + 45.56s + 108}$$

A continuación se muestra la función de transferencia en lazo cerrado con un control PID refinado.

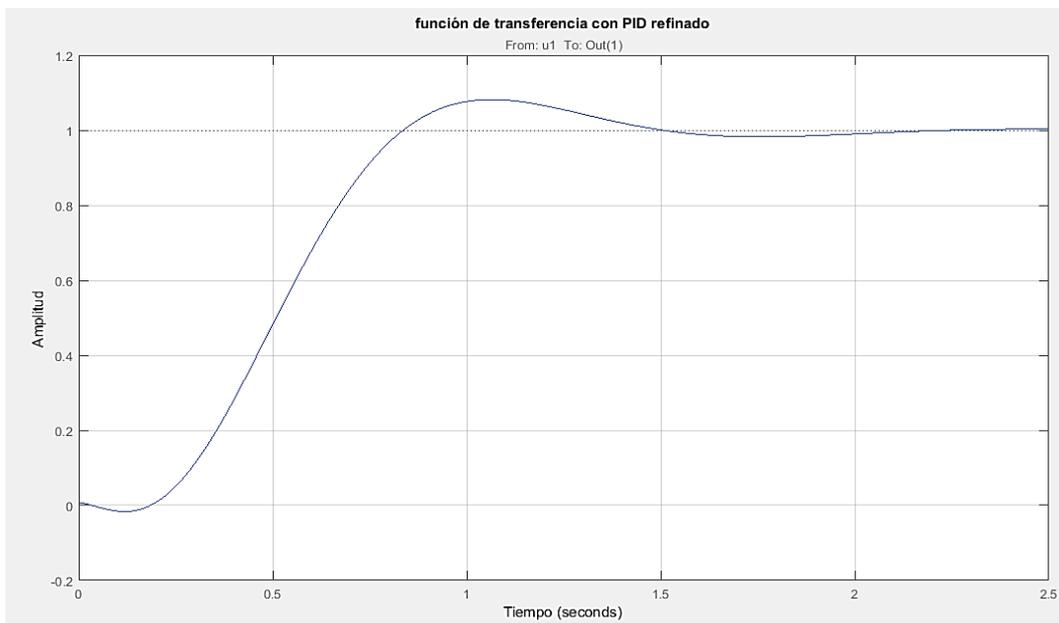


FIGURA 98: Función del sistema en lazo cerrado.

En la figura 98 se puede apreciar que el sobre impulso se encuentra en los rangos adecuados de nuestra planta.

CAPÍTULO V

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Al concluir la implementación y montaje del módulo didáctico, cumpliendo con los objetivos planteados al inicio, y en base a los distintos resultados obtenidos de las pruebas realizadas en el desarrollo del proyecto de titulación se presentan las siguientes conclusiones:

- Debido a las propiedades y características de los fluidos se escogió el agua, ya que esta tiene un bajo grado de viscosidad, en cual no provoca un sobreesfuerzo y desgaste innecesario en la bomba permitiendo mayor durabilidad de la misma.
- Para la medición de caudal se utilizó un sensor de efecto hall el cual entrega una señal de tren de pulsos, que fue necesario realizar una linealidad para obtener un grado de precisión igual al rotámetro utilizado para la comparación de los mismos.
- El PLC permitió realizar el control de la bomba de 0,5 HP mediante un variador de velocidad, permitiendo obtener un caudal entre los rangos de 0 y 27 LPM.
- Se utilizó el system identification de Matlab para poder encontrar el modelo matemático o función de transferencia para poder realizar el ajuste PID mediante el método de Ziegler – Nichols, para posteriormente realizar su debido refinamiento del controlador PID.
- El mejor modelo matemático encontrado mediante el system identification de Matlab es una función de transferencia de dos polo y dos ceros, la cual se ajusta perfectamente al sistema construido.
- Para la implementación del controlador PID, se pudo evidenciar que por trazarse de una planta de proceso corto y las propiedades del fluido utilizado, únicamente era necesario la implementación de un control PI. Además se pudo evidenciar que al implementar un controlador PI se obtuvo un sistema estable con amortiguamiento crítico en lazo cerrado.

- Tanto la HMI como el control local lograron demostrar el cumplimiento de las expectativas, de ser de fácil comprensión y manipulación por parte de los usuarios, logrando ser un sistema amigable y atractivo para su estudio en el laboratorio de la CIMANELE.

5.2 RECOMENDACIONES

Durante la experiencia adquirida en el desarrollo del módulo didáctico, y de los resultados de las diferentes pruebas realizadas al mismo se presentan las siguientes recomendaciones:

- Antes de poner en funcionamiento el módulo didáctico, se deberá verificar que el nivel de líquido en el tanque sea el adecuado y que todas las llaves se encuentren en la posición de abierto para evitar posibles daños en el sistema de tuberías y la bomba.
- Verificar que la alimentación del módulo didáctico sea a 220Vac con su respectiva puesta a tierra, para asegurar el correcto funcionamiento de cada uno de los elementos que lo conforman.
- Cuando se realice algún tipo de perturbación en la planta obviar cerrar al máximo el flujo de agua mediante la válvula de control, para evitar posibles daños en el sistema de tuberías y la bomba.
- Se recomienda que el líquido del tanque sea extraído al finalizar cada práctica para evitar que en el tanque se acumulen impurezas o a su vez realizar cambios ocasionales del líquido.
- Se sugiere utilizar un cable UTP categoría 6A para la transmisión de la señal del sensor de efecto Hall, de esta manera se puede reducir el ruido ocasionado por la planta y obtener una lectura de una señal más nítida en el PLC.
- Se recomienda desactivar la red inalámbrica y la protección del firewall de Windows del computador, para así evitar posibles conflictos entre la dirección IP del PLC y del computador al momento de realizar la comunicación.

5.3 BIBLIOGRAFÍA

- ARAFET, Pedro, CHANG Francisco, y DOMINGUEZ Hugo (2008). *Métodos de identificación Dinámica*. Cuba. Universidad de Oriente
- BOLTON, W. (2004). *Industrial Control and Instrumentation*. Delhi, India: Universities Press.
- CALDERÓN CÓRDOVA, Jaime., y POZO CALVA, Christian. (2011). *Diseño y Construcción de un Banco de Pruebas para Pérdidas de Carga en Tuberías y Accesorios con Simulación*. Tesis de ingeniero no publicada, Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, Ecuador.
- CENGEL, Yunus., y CIMBALA, John. (2006). *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*. México D.F., México: McGraw-Hill.
- CRANE, División de ingeniería. *Flujo de Fluidos en Válvulas Accesorios y Tuberías*. México D.F., México: McGraw-Hill.
- CREUS SOLÉ, Antonio. (2011). *Instrumentación Industrial*. México D.F., México: Alfaomega Grupo editor S.A.
- DÍAS ORTIZ, Jaime E. (2006). *Mecánica de Fluidos e Hidráulica*. Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- DOMINGO, Agustín. (2011). *Apuntes de Mecánica de Fluidos*.
- DUNN, William. (2005). *Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control*. Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.
- GILES, Ranald., EVETT, Jack B., y LIU, Cheng. (1994). *Mecánica de los Fluidos e Hidráulica*. Madrid, España: McGraw-Hill.
- GRATTON, Julio. (2002), *Introducción a la Mecánica de Fluidos*, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.
- HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto., FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos., y BAPTISTA LUCIO, María del Pilar. (2010). *Metodología de la Investigación*. México D.F., México: McGraw-Hill.

- KUNUSCH, Cristian. (2002). *Identificación de Sistemas Dinámicos*. Argentina, Universidad Nacional de la Plata.
- LAJARA VIZCAÍNO, José R., y PELEGRÍ SEBASTIÁ, José. (2011). *LabVIEW: Entorno Gráfico de Programación*. Barcelona, España: MARCOMBO, S.A.
- LJUNG, Lennart. (2015). *System Identification Toolbox: User's Guide*. MathWorks, Inc.
- LOPEZ, Elena. (S/F). *Identificación de Sistemas: Aplicación al Modelado de un Motor de Continua*. Departamento de Electrónica.
- MARTINEZ Samuel (S/F). *Reglas de sintonización para controladores PID*. México. Instituto Tecnológico Superior de Huichapan.
- MATAIX, Claudio. (1986). *Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas*. Madrid, España: Ediciones del castillo, S.A.
- MOTT, Robert. (2006). *Mecánica de Fluidos*. Naucalpan de Juárez, México: Pearson Educación, S.A.
- OGATA, Katsuhiko. (2010). *Ingeniería de Control Moderna*. Madrid, España: Pearson Educación, S.A.
- PADMANABHAN, Tattamangalam R. (2000). *Industrial Instrumentation: Principles and Design*. London, Inglaterra: Springer-Verlag.
- POTTER, Merle C., WIGGERT, David C., y RAMADAN, Bassem. (2015). *Mecánica de Fluidos*. México D.F., México: Cengage Learning Editores, S.A.
- ROCKWELL AUTOMATION. (1996). *Manual de Referencia: Juego de Instrucciones de SLC 500TM y MicroLogixTM 1000*. Milwaukee, Estados Unidos: Publicación 1747-6.15ES.
- ROLDÁN VILORIA, José. (2009). *Neumática, hidráulica y electricidad aplicada*. Madrid, España: Paraninfo.
- SANCHEZ Juan (2011). *Tutorial LabVIEW*. Colombia. Universidad de Ibague

SCHNEIDER ELECTRIC. (2009). *Altivar 312 Variadores de Velocidad para Motores Asíncronos: Guía de Programación*. Recuperado de <http://www.schneider-electric.com/>

SHAMES, Irving H. (1995). *Mecánica de Fluidos*. Bogotá, Colombia, McGraw-Hill
INTERAMERICANA S.A.

5.4 LINKOGRAFÍA

Bob Electrónica. (27 de Abril de 2016). *Allen Bradley AB MicroLogix 1100 1200 1762 1763-IQ16-L16BBB*. Recuperado de <http://nhbbobb.blogspot.com/2011/11/allen-bradley-micrologix-1100-1200-1762.html>

Ciclidis México. (27 de Abril de 2016). *Construcción del tanque*. Recuperado de <http://www.ciclidis-mexico.com/CalculoTanque/CalculoTanque.html>

Documents.mx. (27 de Abril de 2016). *Altivar 312 Variador de Velocidad: Catalogo '09*. Recuperado de <http://documents.mx/documents/catalogo-altivar-312.html>

HIDRO3, Termofusión. (27 de Abril de 2016). *Ventajas*. Recuperado de http://www.industriassaladillo.com.ar/esp/colombia/h3_ventajas.php

PDVSA. (27 de Abril de 2016). *Cálculo Hidráulico de Tuberías*. Recuperado de <http://www.docfoc.com/calculo-hidraulico-de-tuberias-pdvsapdf>

PEDROLLO. (27 de Abril de 2016). *Tipos de Productos*. Recuperado de <http://pedrollo.com.ec/>

PICUINO. (27 de Abril de 2016). *Método de Ziegler-Nichols*. Recuperado de <http://www.picuno.com/es/arduprog/control-ziegler-nichols.html>

PK. (27 de Abril de 2016). *Electrobombas con Rodete Periférico: Catalogo General*. Recuperado de <http://pedrollo.com.ec/wp-content/uploads/2015/02/PK.pdf>

Rockwell Automation. (27 de Abril de 2016). *MicroLogix 1100 Programmable Controllers: Manual de Usuario*. Recuperado de http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/1763-um001_-en-p.pdf

Shandong China Coal Industrial & Mining Supplies Group Co., Ltd. (27 de Abril de 2016). *Contador de Flujo en Línea de la Serie Df-4500*. Recuperado de http://es.made-in-china.com/co_chinacoalintl/product_Df-4500-Series-Inline-Flow-Meter_essyghoey.html

Silicio.mx. (27 de Abril de 2016). *Sensor de Flujo de Agua ½"*. Recuperado de <http://silicio.mx/sensor-de-flujo-de-agua-1-2>

Villajulca José. (3 de septiembre del 2010). *Principios de medición de flujo*. Recuperado de <http://www.instrumentacionycontrol.net/cursoslibres/instrumentacion/medicion-flujos-pract/item/290-principios-de-medici%C3%B3n-de-flujo-introducci%C3%B3n-caudal%C3%ADmetros-de-presi%C3%B3n-diferencial.html>

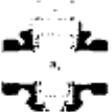
ANEXOS

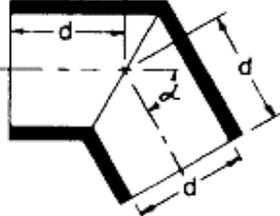
ANEXO A. COEFICIENTE DE RESISTENCIA K EN VÁLVULAS Y ACCESORIOS

Anexo A1 Coeficientes de resistencia K para válvulas

Fitting	L/D	Nominal pipe size											
		½	¾	1	1¼	1½	2	2½-3	4	6	8-10	12-16	18-24
		K value											
Gate Valves 	8	0.22	0.20	0.18	0.18	0.15	0.15	0.14	0.14	0.12	0.11	0.10	0.10
Globe Valves 	340	9.2	8.5	7.8	7.5	7.1	6.5	6.1	5.8	5.1	4.8	4.4	4.1
Angle Valves 	55	1.48	1.38	1.27	1.21	1.16	1.05	0.99	0.94	0.83	0.77	0.72	0.66
Angle Valves 	150	4.05	3.75	3.45	3.30	3.15	2.85	2.70	2.55	2.25	2.10	1.95	1.80
Ball Valves 	3	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04

Anexo A2 Coeficientes de resistencia K para Accesorios

Fitting	L/D	Nominal pipe size													
		½	¾	1	1¼	1½	2	2½-3	4	6	8-10	12-16	18-24		
		K value													
Butterfly Valve 									0.86	0.81	0.77	0.68	0.63	0.35	0.30
Plug Valve straightway 	18	0.49	0.45	0.41	0.40	0.38	0.34	0.32	0.31	0.27	0.25	0.23	0.23	0.22	
Plug Valve 3-way thru-flo 	30	0.81	0.75	0.69	0.66	0.63	0.57	0.54	0.51	0.45	0.42	0.39	0.39	0.36	
Plug Valve branch-flo 	90	2.43	2.25	2.07	1.98	1.89	1.71	1.62	1.53	1.35	1.26	1.17	1.17	1.08	
Standard elbow 	90°	30	0.81	0.75	0.69	0.66	0.63	0.57	0.54	0.51	0.45	0.42	0.39	0.36	
	45°	16	0.43	0.40	0.37	0.35	0.34	0.30	0.29	0.27	0.24	0.22	0.21	0.19	
	long radius 90°	16	0.43	0.40	0.37	0.35	0.34	0.30	0.29	0.27	0.24	0.22	0.21	0.19	

Fitting	Type of bend	L/D	Nominal pipe size											
			1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2-3	4	6	8-10	12-16	18-24
			K value											
Close Return Bend 		50	1.35	1.25	1.15	1.10	1.05	0.95	0.90	0.85	0.75	0.70	0.65	0.60
	Standard Tee 	thru ilo	20	0.54	0.50	0.46	0.44	0.42	0.38	0.36	0.34	0.30	0.28	0.26
	thru branch	60	1.62	1.50	1.38	1.32	1.26	1.14	1.08	1.02	0.90	0.84	0.78	0.72
90° Bends. Pipe bends, flanged elbows, butt welded elbows 	r/d = 1	20	0.54	0.50	0.46	0.44	0.42	0.38	0.36	0.34	0.30	0.28	0.26	0.24
	r/d = 2	12	0.32	0.30	0.28	0.26	0.25	0.23	0.22	0.20	0.18	0.17	0.16	0.14
	r/d = 3	12	0.32	0.30	0.28	0.26	0.25	0.23	0.22	0.20	0.18	0.17	0.16	0.14
	r/d = 4	14	0.38	0.35	0.32	0.31	0.29	0.27	0.25	0.24	0.21	0.20	0.18	0.17
	r/d = 6	17	0.46	0.43	0.39	0.37	0.36	0.32	0.31	0.29	0.26	0.24	0.22	0.20
	r/d = 8	24	0.65	0.60	0.55	0.53	0.50	0.46	0.43	0.41	0.36	0.34	0.31	0.29
	r/d = 10	30	0.81	0.75	0.69	0.66	0.63	0.57	0.54	0.51	0.45	0.42	0.39	0.36
	r/d = 12	34	0.92	0.85	0.78	0.75	0.71	0.65	0.61	0.58	0.51	0.48	0.44	0.41
	r/d = 14	38	1.03	0.95	0.87	0.84	0.80	0.72	0.68	0.65	0.57	0.53	0.49	0.46
	r/d = 16	42	1.13	1.05	0.97	0.92	0.88	0.80	0.76	0.71	0.63	0.59	0.55	0.50
	r/d = 18	46	1.24	1.15	1.06	1.01	0.97	0.87	0.83	0.78	0.69	0.64	0.60	0.55
	r/d = 20	50	1.35	1.25	1.15	1.10	1.05	0.95	0.90	0.85	0.75	0.70	0.65	0.60
	Mitre Bends 	$\alpha = 0^\circ$	2	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
$\alpha = 15^\circ$		4	0.11	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05	
$\alpha = 30^\circ$		8	0.22	0.20	0.18	0.18	0.17	0.15	0.14	0.14	0.12	0.11	0.10	0.10
$\alpha = 45^\circ$		15	0.41	0.38	0.35	0.33	0.32	0.29	0.27	0.26	0.23	0.21	0.20	0.18
$\alpha = 60^\circ$		25	0.68	0.63	0.58	0.55	0.53	0.48	0.45	0.43	0.38	0.35	0.33	0.30
$\alpha = 75^\circ$		40	1.09	1.00	0.92	0.88	0.84	0.76	0.72	0.68	0.60	0.56	0.52	0.48
$\alpha = 90^\circ$		60	1.62	1.50	1.38	1.32	1.26	1.14	1.08	1.02	0.90	0.84	0.78	0.72

Anexo A3 Coeficientes de resistencia K para Válvulas Check

Fitting stop-check valves	L/D	Minimum velocity for full disc lift		Nominal pipe size											
		general ft/sect	water ft/sec	1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2-3	4	6	8-10	12-16	18-24
				K value*											
	400	55 \sqrt{V}	6.96	10.8	10	9.2	8.8	8.4	7.5	7.2	6.8	6.0	5.6	5.2	4.8
	200	75 \sqrt{V}	9.49	5.4	5	4.6	4.4	4.2	3.8	3.6	3.4	3.0	2.8	2.6	2.4
	350	60 \sqrt{V}	7.59	9.5	8.8	8.1	7.7	7.4	6.7	6.3	6.0	5.3	4.9	4.6	4.2
	300	60 \sqrt{V}	7.59	8.1	7.5	6.9	6.6	6.3	5.7	5.4	5.1	4.5	4.2	3.9	3.6
	55	140 \sqrt{V}	17.7	1.5	1.4	1.3	1.2	1.2	1.1	1.0	.94	.83	.77	.72	.66

Fitting	L/D	Minimum velocity for full disc lift		Nominal pipe size												
		general ft/sect	water ft/sec	1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2-3	4	6	8-10	12-16	18-24	
				K value*												
 Swing check valve	100	35 \sqrt{V}	4.43	2.7	2.5	2.3	2.2	2.1	1.9	1.8	1.7	1.5	1.4	1.3	1.2	
	50	48 \sqrt{V}	6.08	1.4	1.3	1.2	1.1	1.1	1.0	0.9	0.9	.75	.70	.65	.6	
 Lift check valve	600	40 \sqrt{V}	5.06	16.2	15	13.8	13.2	12.6	11.4	10.8	10.2	9.0	8.4	7.8	7.2	
	55	140 \sqrt{V}	17.7	1.5	1.4	1.3	1.2	1.2	1.1	1.0	.94	.83	.77	.72	.66	
 Tilting disc check valve	5°	80 \sqrt{V}	10.13						.76	.72	.68	.60	.56	.39	.24	
	15°	30 \sqrt{V}	3.80						2.3	2.2	2.0	1.8	1.7	1.2	.72	
 Foot valve with strainer poppet disc	420	15 \sqrt{V}	1.90	11.3	10.5	9.7	9.3	8.8	8.0	7.6	7.1	6.3	5.9	5.5	5.0	
 Foot valve with strainer hinged disc	75	35 \sqrt{V}	4.43	2.0	1.9	1.7	1.7	1.7	1.4	1.4	1.3	1.1	1.1	1.0	.90	

ANEXO B. DIÁMETRO DEL TUBO HIDRO 3

Hidro 3 verde		Tuberías para agua caliente						
	Código N°	d mm	dn pulg.	di mm	s mm	Sp cm ²	P kg/m	Vu lt/m
	65	21.30	1/2	14.5	3.4	1.65	0.173	0.165
	66	26.90	3/4	19.1	3.9	2.9	0.256	0.290
	67	33.70	1	23.9	4.9	4.5	0.402	0.450
	68	42.20	1/4	30.8	5.7	7.45	0.593	0.745
	69	48.30	1 1/2	35.7	6.3	10.00	0.754	1.000
	70	60.30	2	45.3	7.5	16.10	1.128	1.610
	71	76.10	2 1/2	58.1	9.0	26.50	1.721	2.650
	72	88.90	3	68.3	10.3	36.65	2.307	3.665
	64	114.30	4	88.9	12.7	62.10	3.677	6.210
	63	139.70	5	101.5	19.1	80.91	6.947	8.090

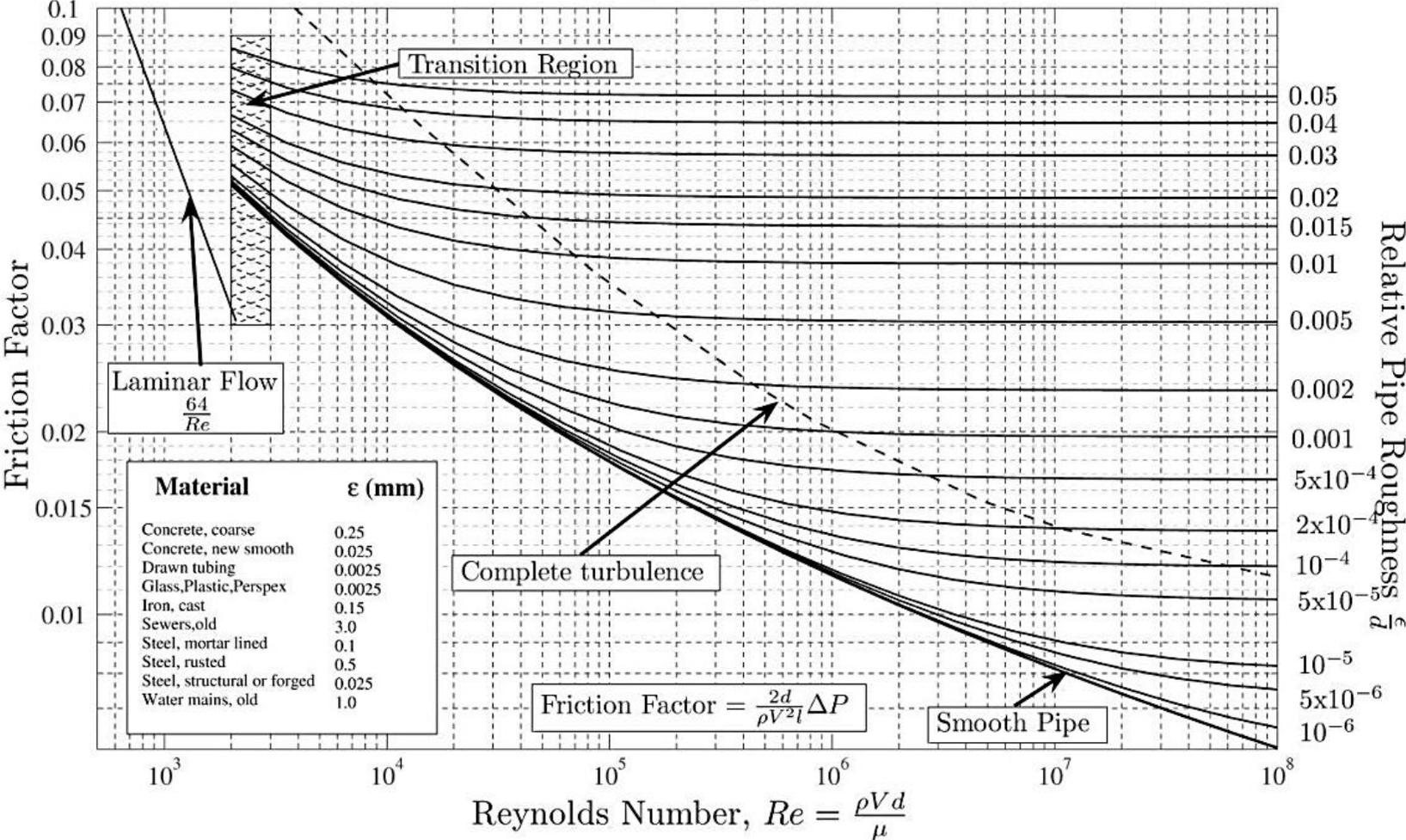
Presentación: Tiras por 6 m.

ANEXO C. PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA

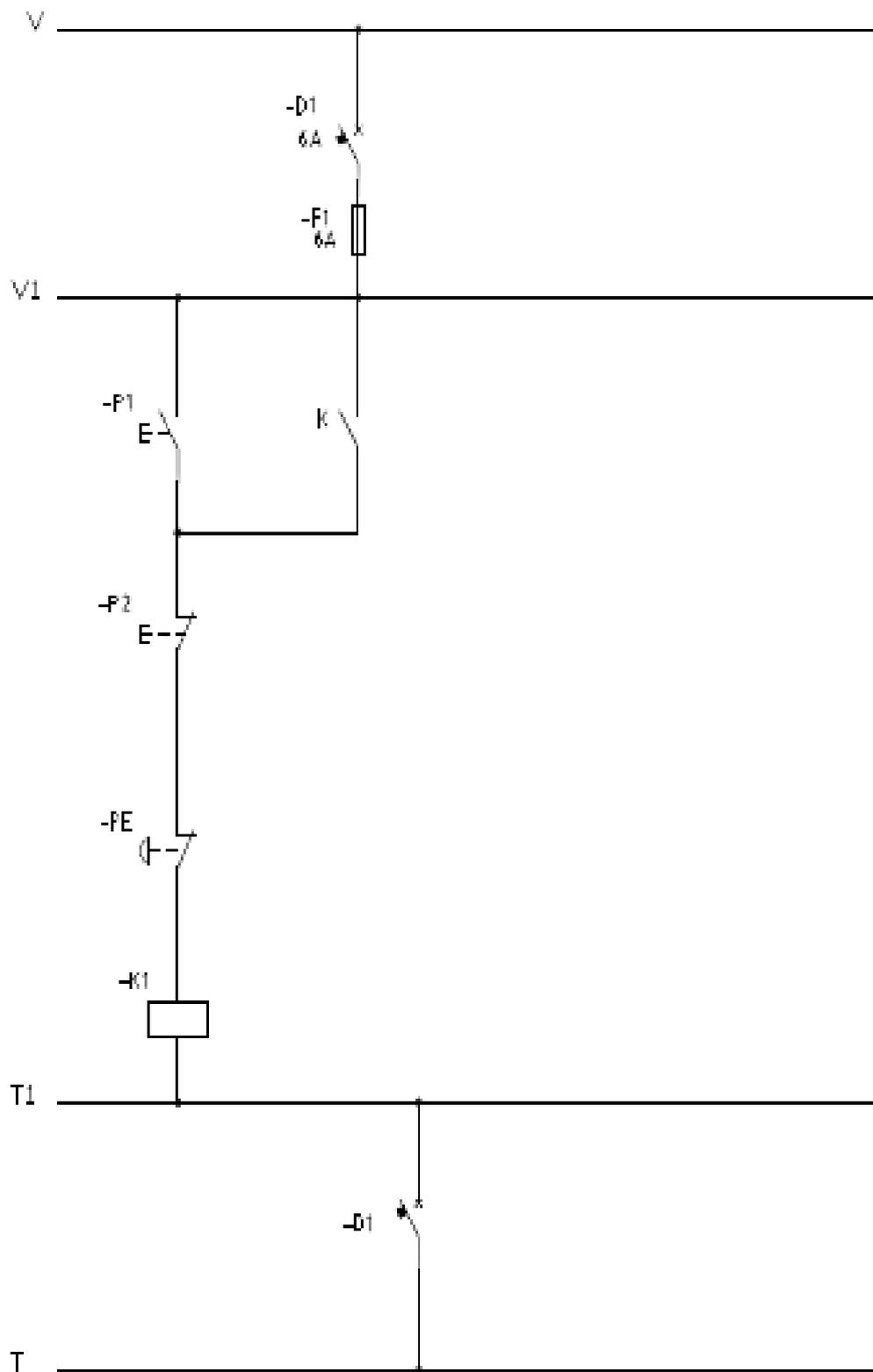
TEMPERATURA (°C)	Peso específico γ (N/m ³)	Densidad ρ (kg/m ³)	Viscosidad dinámica μ (Pa-s)	Viscosidad cinemática ν (m ² /s)
0	9810	1000	$1,75 \times 10^{-3}$	$1,75 \times 10^{-6}$
5	9810	1000	$1,52 \times 10^{-3}$	$1,52 \times 10^{-6}$
10	9810	1000	$1,30 \times 10^{-3}$	$1,30 \times 10^{-6}$
15	9810	1000	$1,15 \times 10^{-3}$	$1,15 \times 10^{-6}$
20	9790	998	$1,02 \times 10^{-3}$	$1,02 \times 10^{-7}$
25	9780	997	$8,91 \times 10^{-4}$	$8,94 \times 10^{-7}$
30	9770	996	$8,00 \times 10^{-4}$	$8,03 \times 10^{-7}$
35	9750	994	$7,18 \times 10^{-4}$	$7,22 \times 10^{-7}$
40	9730	992	$6,51 \times 10^{-4}$	$6,56 \times 10^{-7}$
45	9710	990	$5,94 \times 10^{-4}$	$6,00 \times 10^{-7}$
50	9690	988	$5,41 \times 10^{-4}$	$5,48 \times 10^{-7}$
55	9670	986	$4,98 \times 10^{-4}$	$5,05 \times 10^{-7}$
60	9650	984	$4,60 \times 10^{-4}$	$4,67 \times 10^{-7}$
65	9620	981	$4,31 \times 10^{-4}$	$4,39 \times 10^{-7}$
70	9590	978	$4,02 \times 10^{-4}$	$4,11 \times 10^{-7}$
75	9560	975	$3,73 \times 10^{-4}$	$3,83 \times 10^{-7}$
80	9530	971	$3,50 \times 10^{-4}$	$3,60 \times 10^{-7}$
85	9500	968	$3,30 \times 10^{-4}$	$3,41 \times 10^{-7}$
90	9470	965	$3,11 \times 10^{-4}$	$3,22 \times 10^{-7}$
95	9440	962	$2,92 \times 10^{-4}$	$3,04 \times 10^{-7}$
100	9400	958	$2,82 \times 10^{-4}$	$2,94 \times 10^{-7}$

ANEXO D. DIAGRAMA DE MOODY

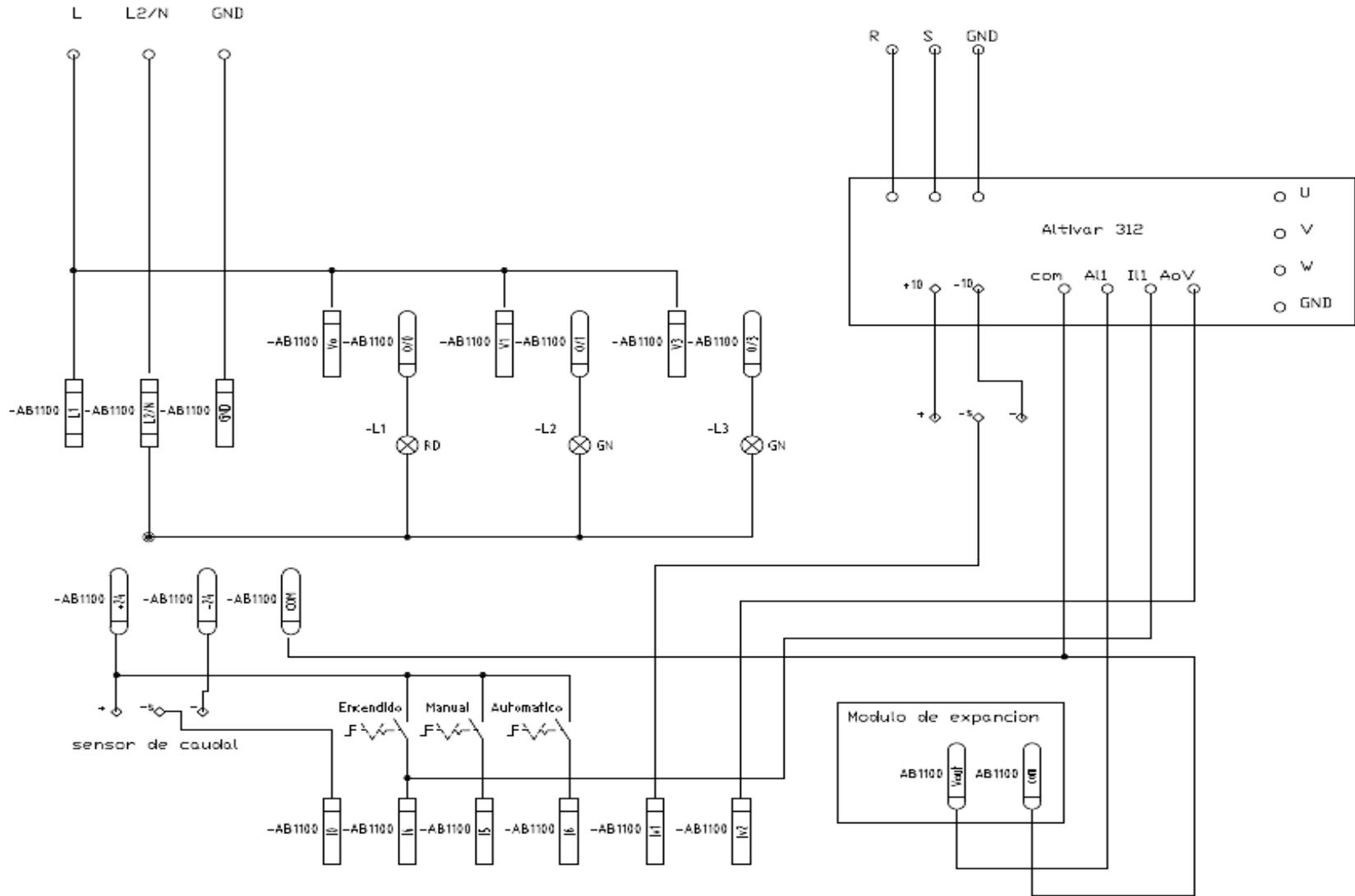
Moody Diagram



ANEXO E. DIAGRAMA DE FUERZA



ANEXO F. DIAGRAMA DE CONTROL



ANEXO G. PANEL FRONTAL DE LABVIEW



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

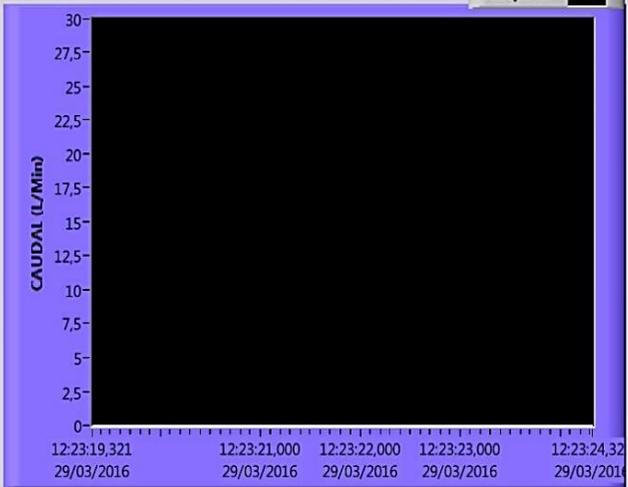
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO

Diseño y Construcción de un Módulo Didáctico para el Control de Caudal de Líquidos

STOP INTERFAZ

CAUDAL (L/Min)



Remoto
Run Variador
Local

Caudal LPM

Caudal GPM

Setpoint

Sensor Pulsos x Minuto

Frecuencia

Setpoint Remoto

Coefficientes de PID

proportional gain (Kc)

integral time (Ti, min)

derivative time (Td, min)

Rango Salida

output high

output low

Autotunig

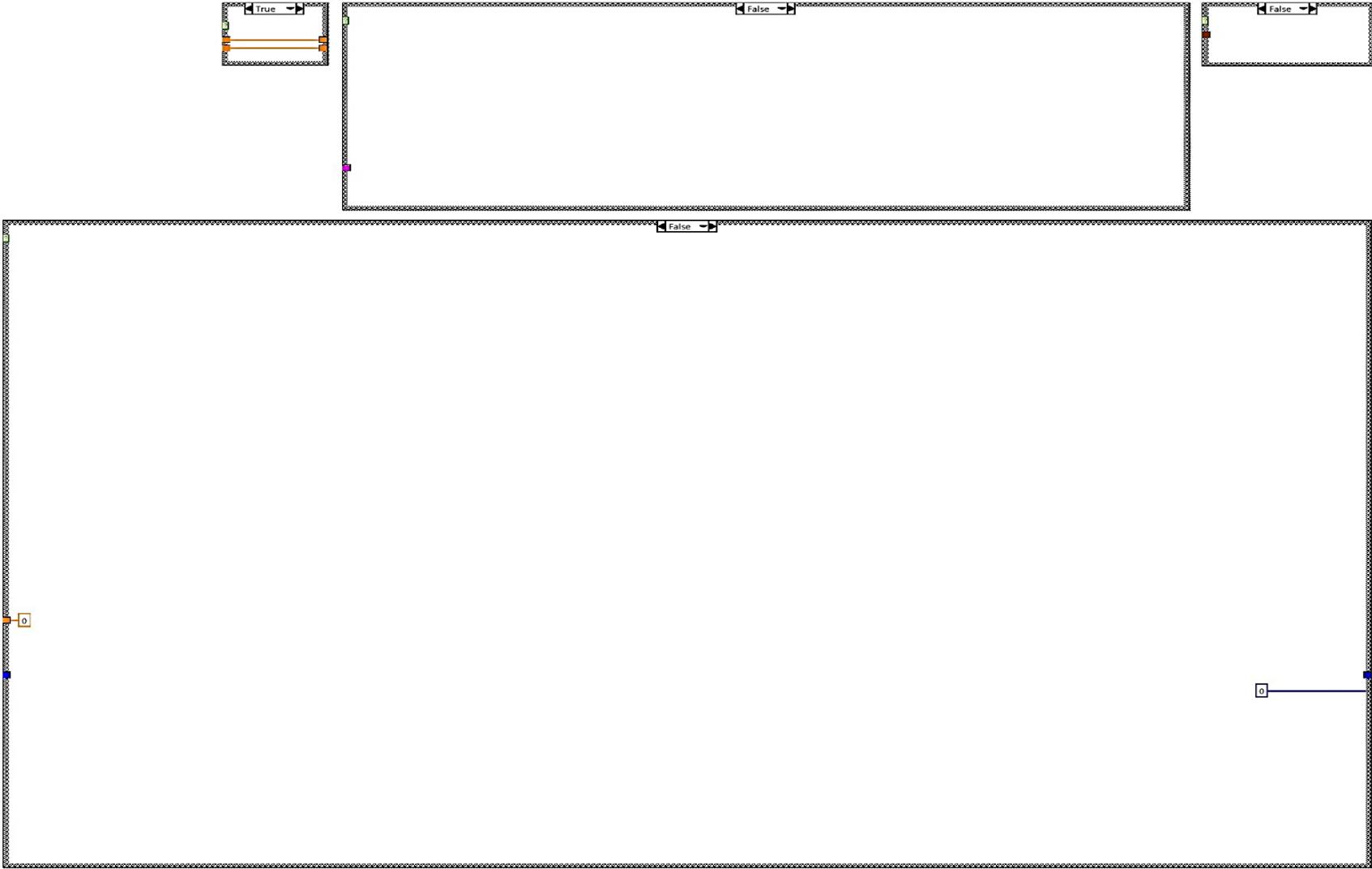
Reiniciar

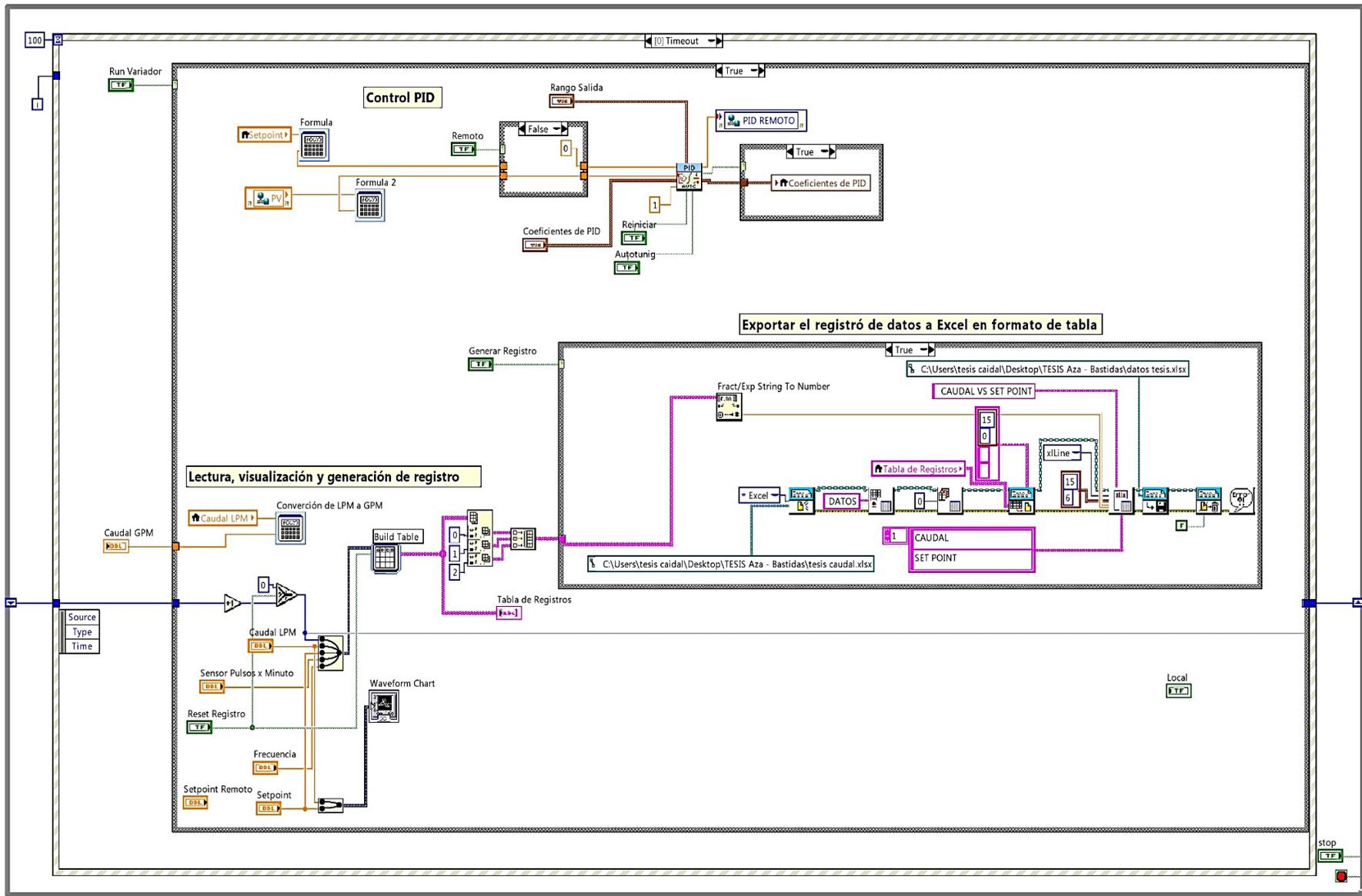
# Dato	Caudal	Setpoint	Sensor	Frecuencia
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Reset Registro

Generar Registro

ANEXO H. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LABVIEW





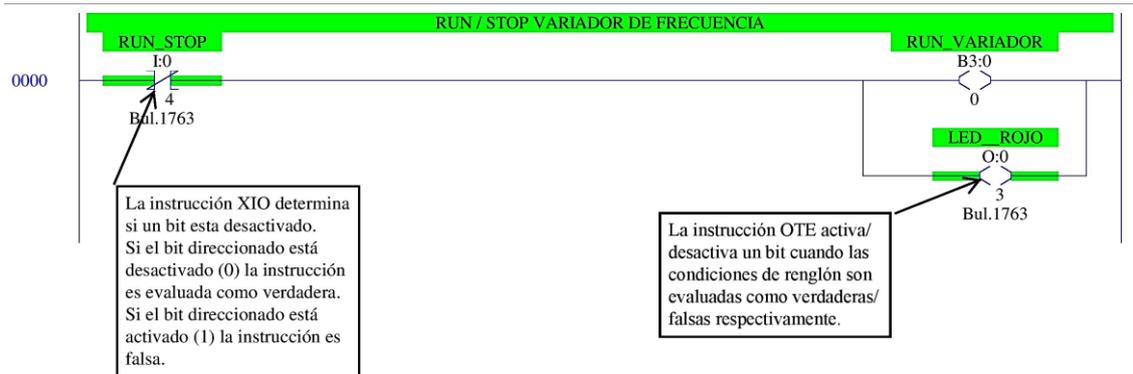
ANEXO I. ALGEBRA DE BLOQUES

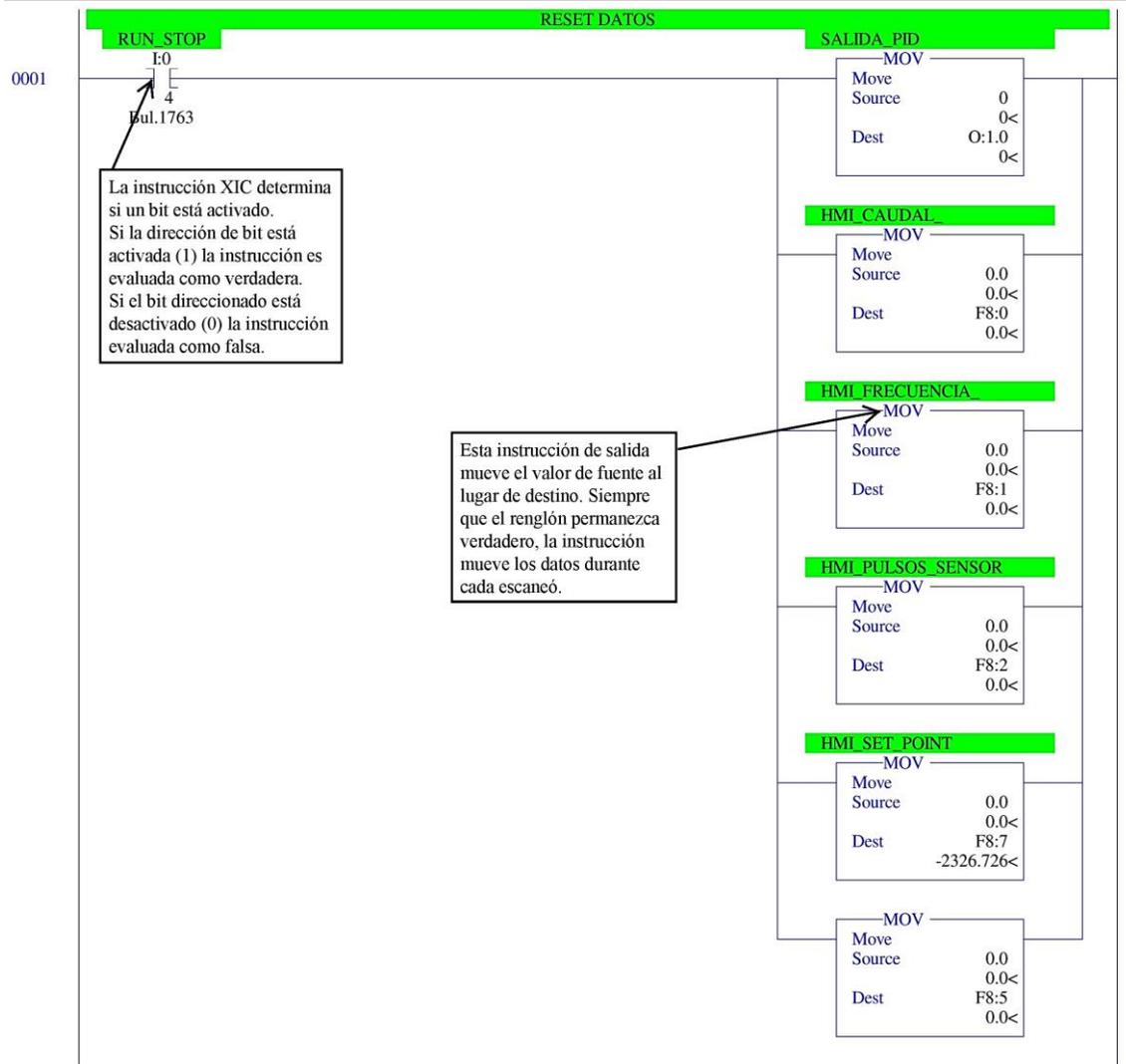
	Diagramas de bloques originales	Diagramas de bloques equivalentes
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		

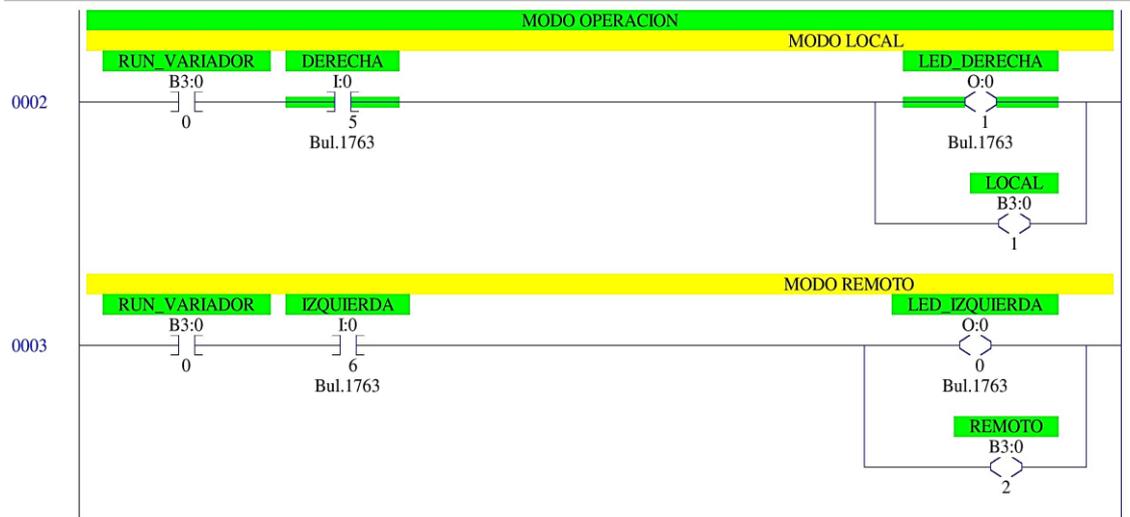
ANEXO J. LÍNEAS DE PROGRAMACIÓN

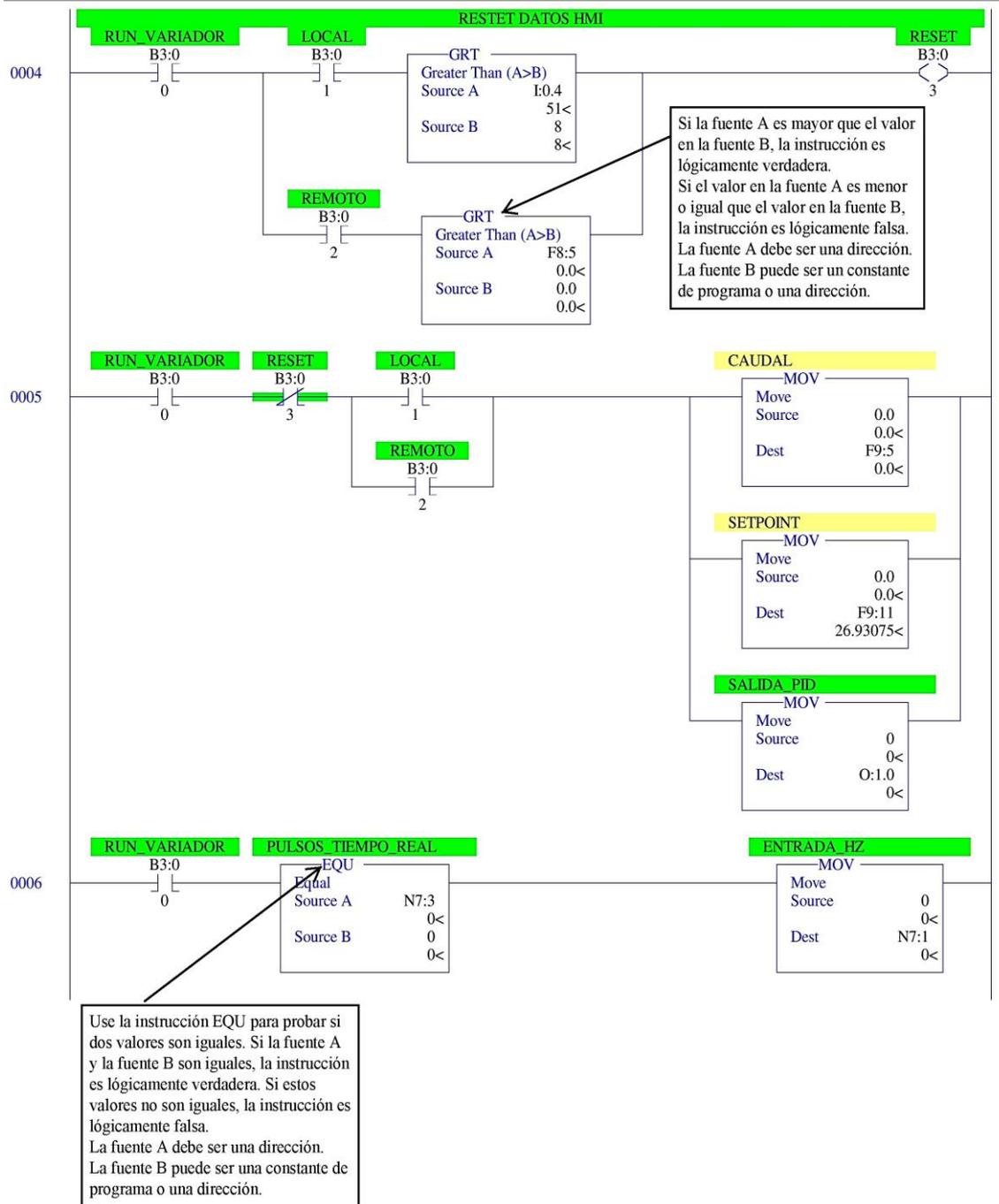
TESIS CAUDAL

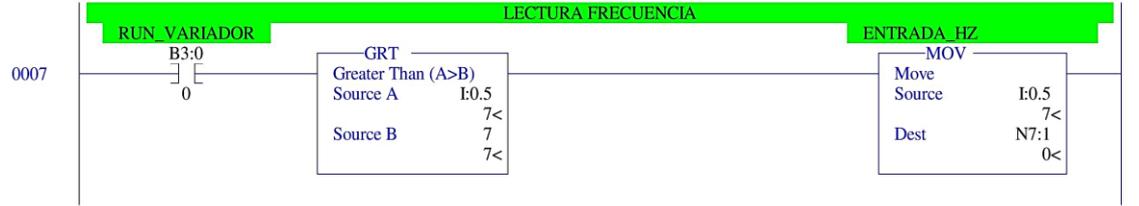
LAD 2 - INICIO --- Total Rungs in File = 30

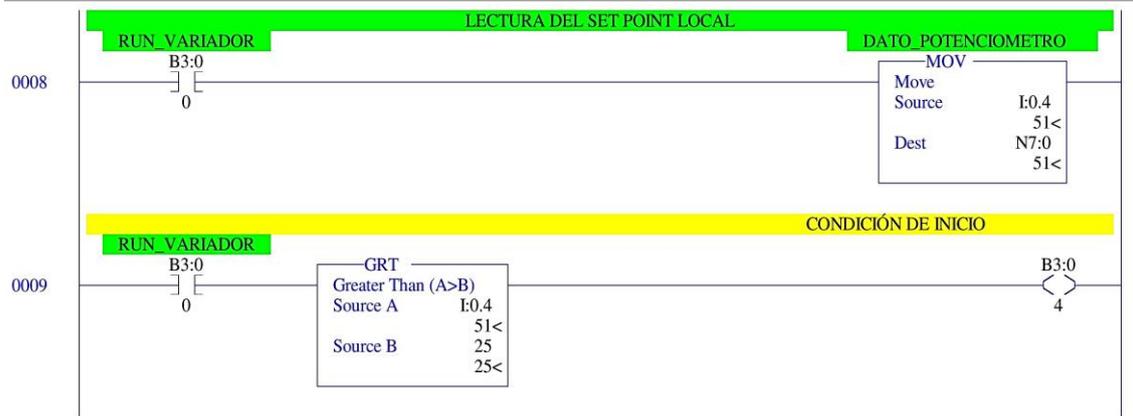


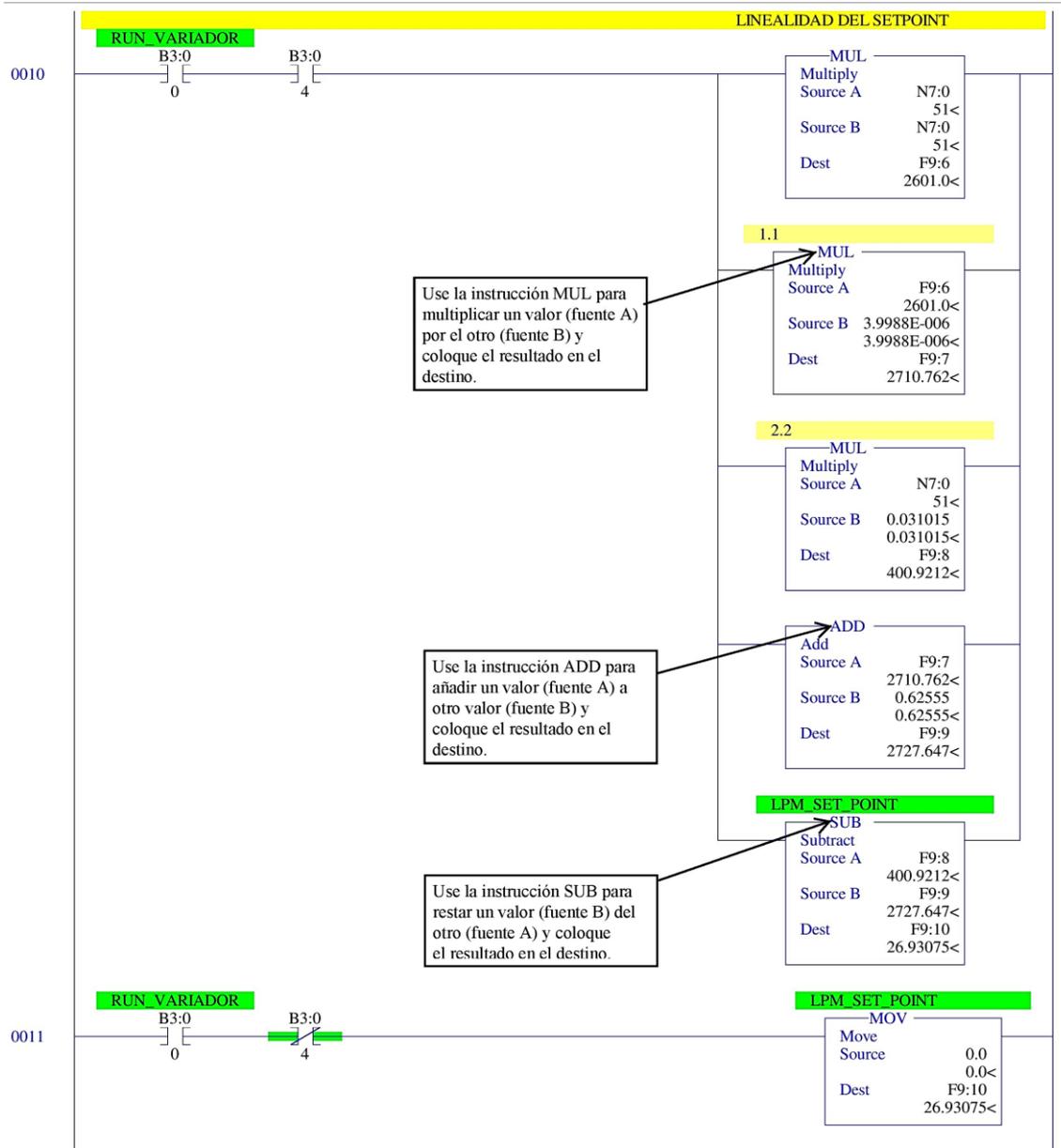


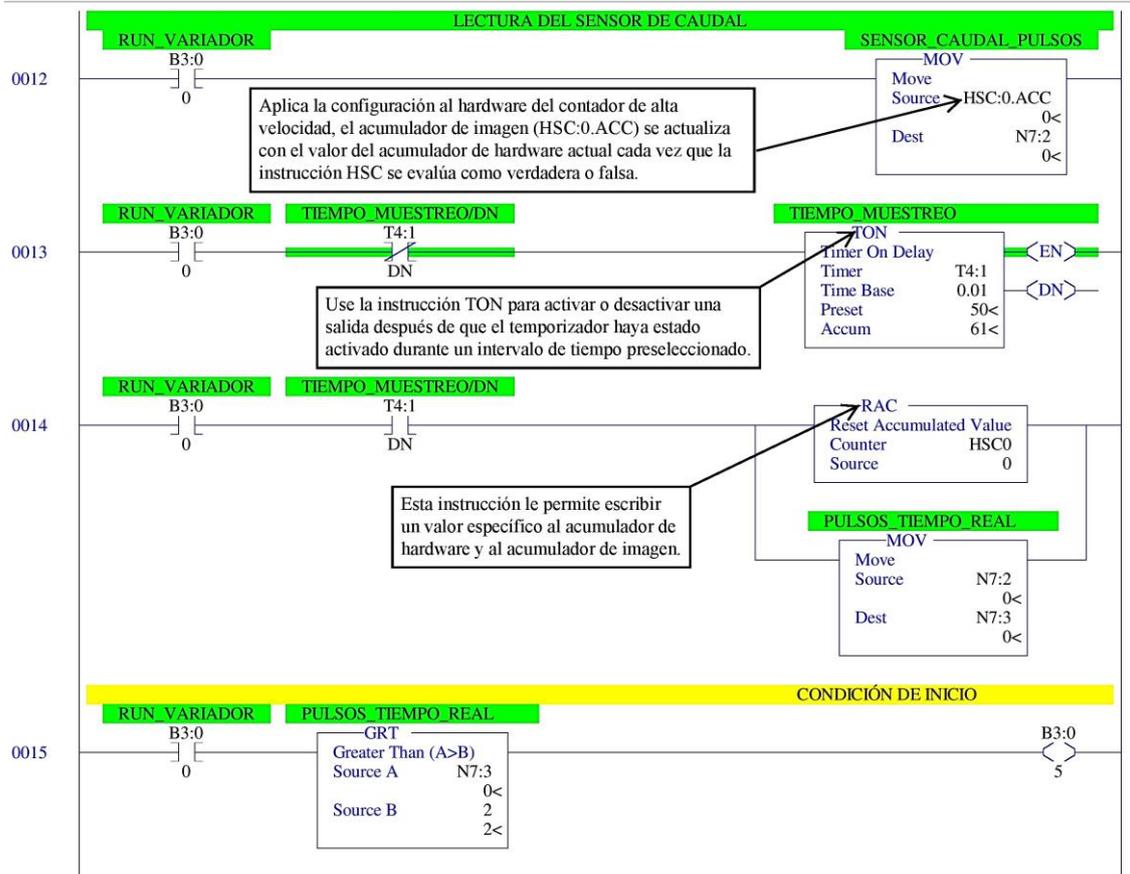


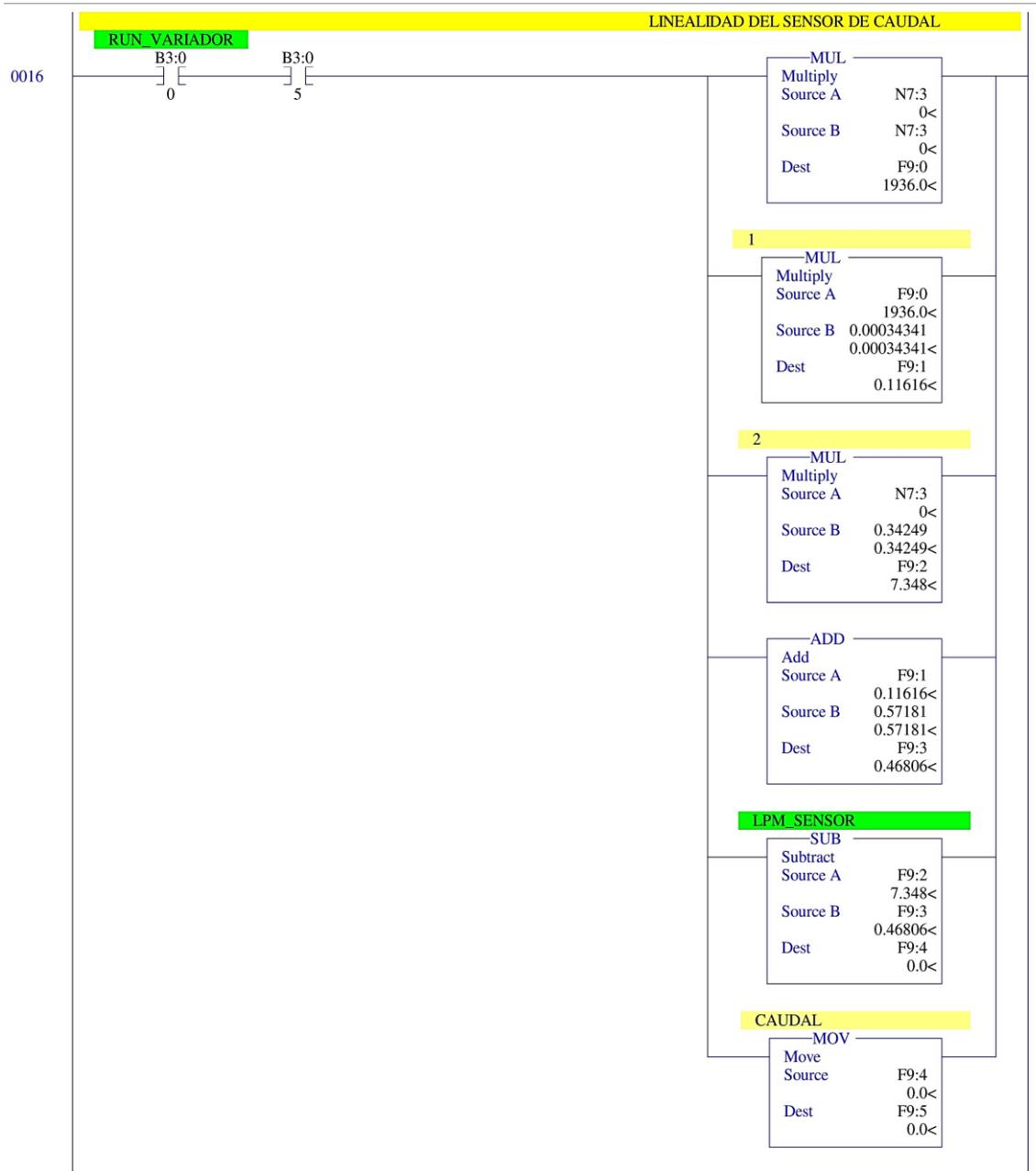


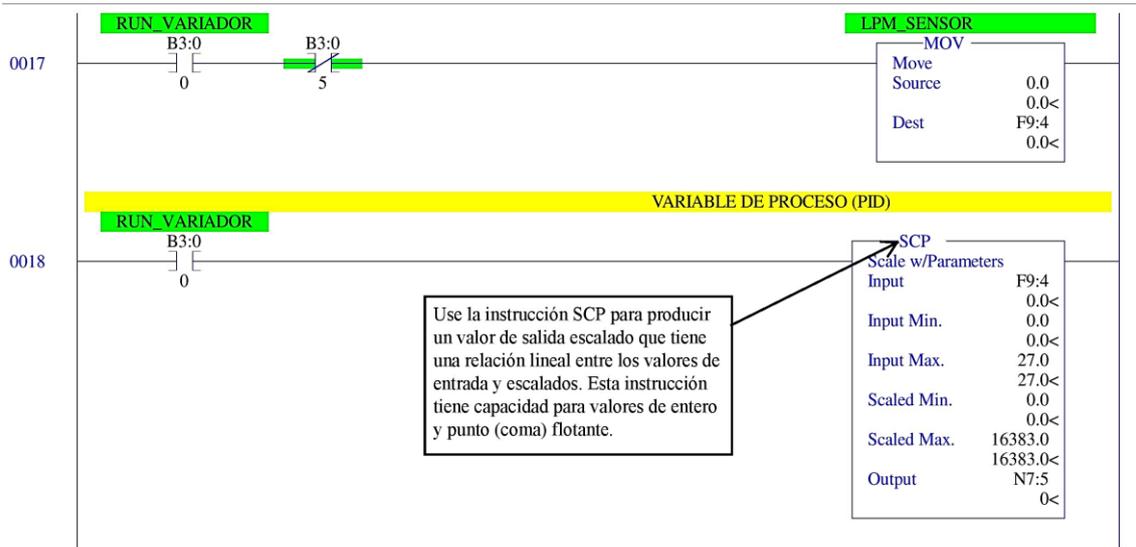


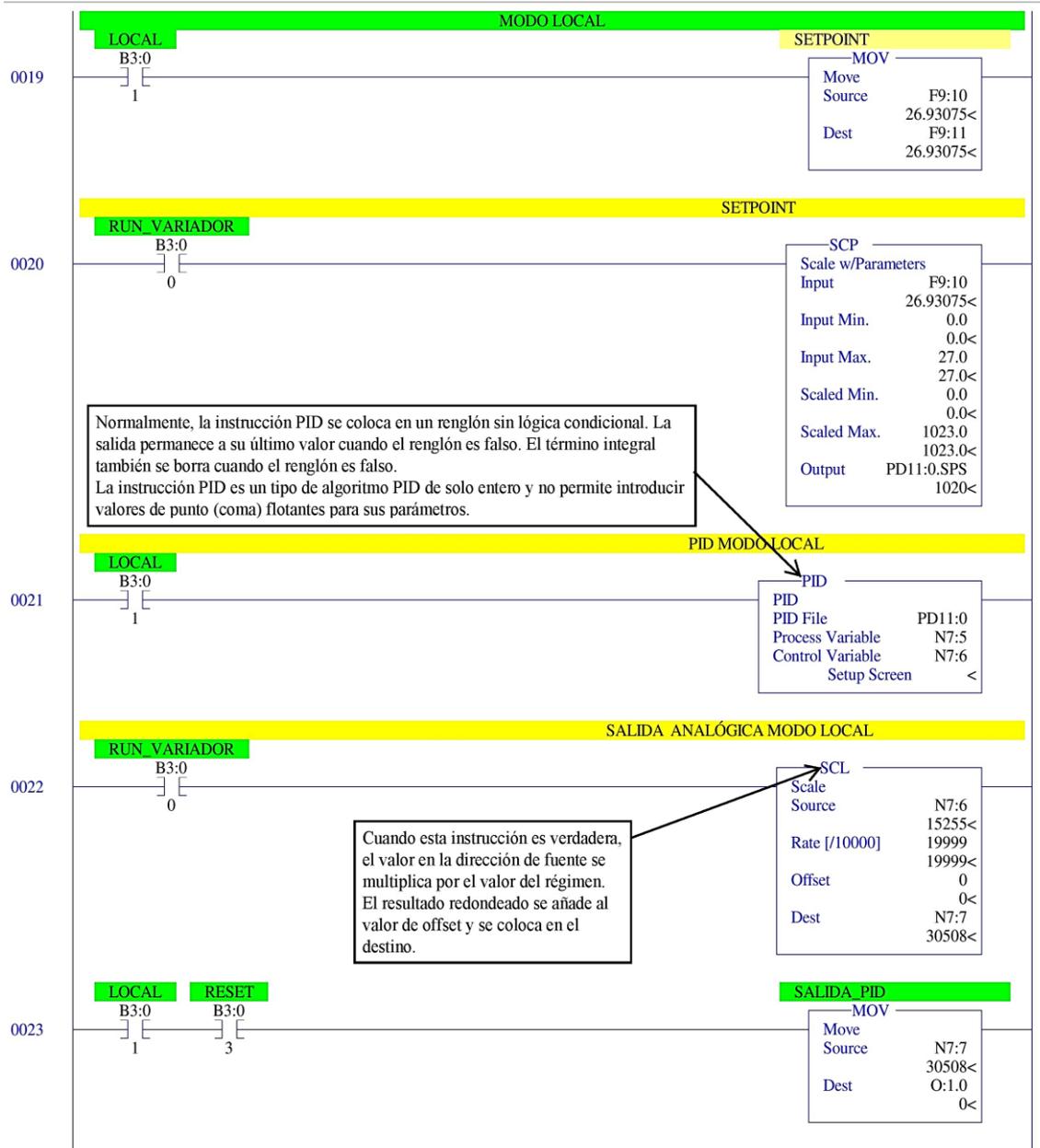








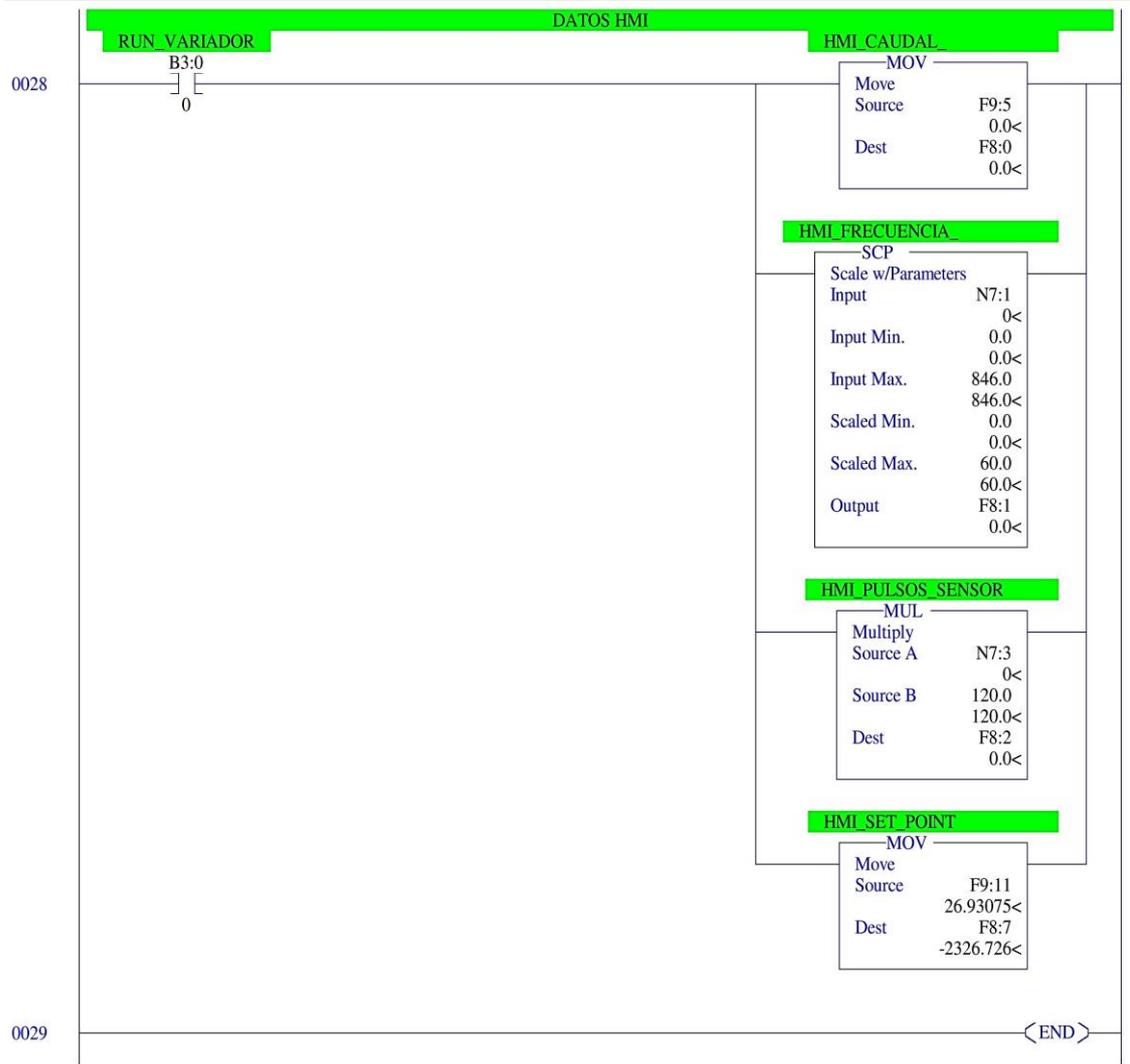






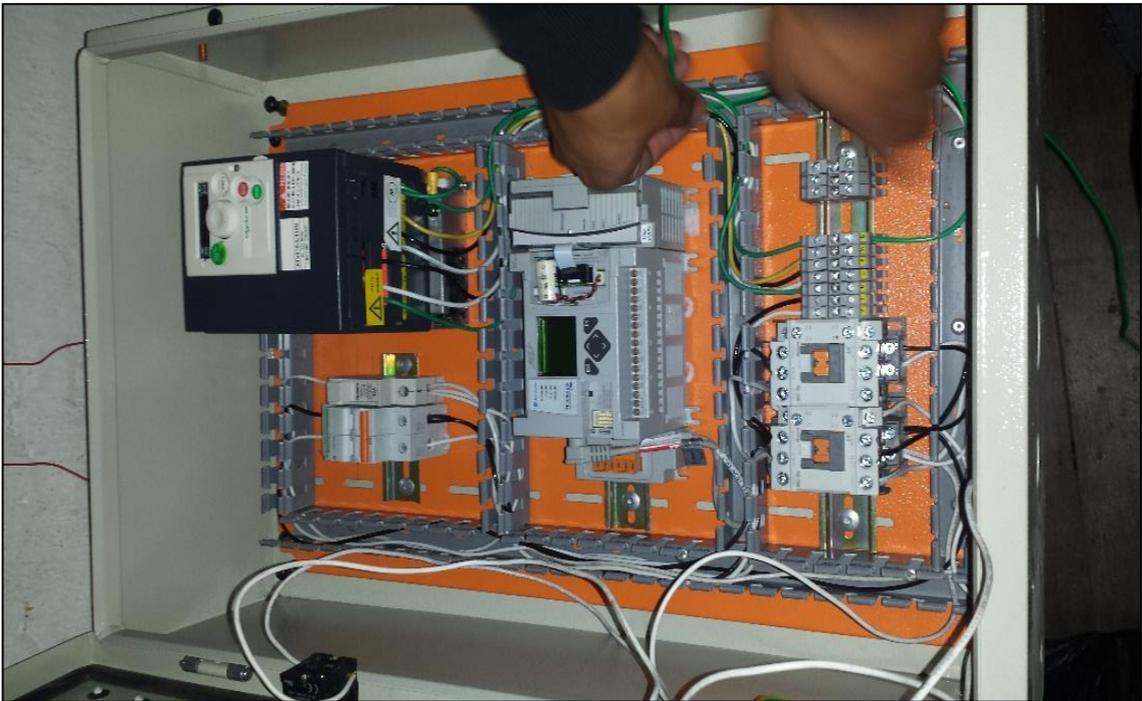
TESIS CAUDAL

LAD 2 - INICIO --- Total Rungs in File = 30

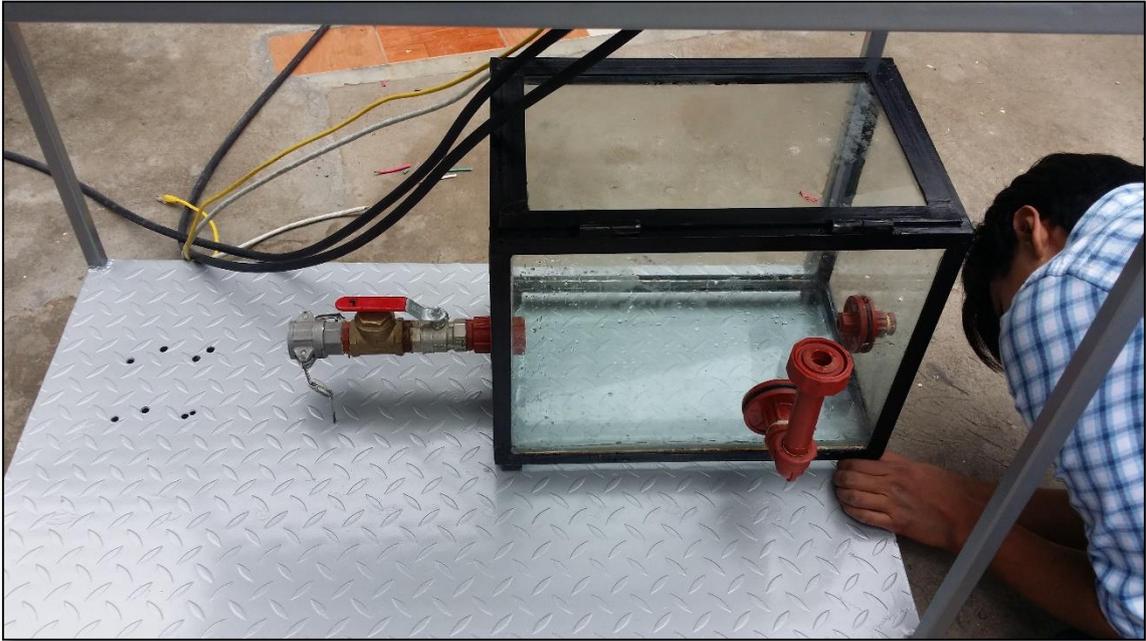


ANEXOS FOTOGRÁFICOS.













UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO

MÓDULO DIDÁCTICO PARA EL CONTROL DE CAUDAL DE LÍQUIDOS

GUÍA DE PRÀCTICAS

AUTORES:

AZA SARAGURO LENNIN RAMIRO

BASTIDAS CARLOSAMA DANILO RAMIRO

Ibarra, 2016

INDICE DE PRÁCTICAS

INDICE DE PRÁCTICAS	1
PRÁCTICA N°1.....	4
1 Tema	4
1.1 Objetivos.....	4
1.2 Marco teórico	4
1.2.1 PLC Allen Bradley MicroLogix 1100 y módulo de expansión.....	4
1.2.2 BOOT/DHCP Server	5
1.2.3 RSLinx Classic Lite	5
1.2.4 RSLogix Micro Starter Lite	5
1.2.5 Variador de frecuencia Schneider ATV312HU11M2	6
1.2.6 Sensor de flujo YF-S201	7
1.3 Equipos y herramientas	8
1.4 Trabajo preparatorio	9
1.5 Desarrollo	9
1.5.1 Configuración de la herramienta BOOT/DHCP Server	9
1.5.2 Configuración del software RSLinx Classic Lite	10
1.5.3 Configuración del software RSLogix Micro Starter Lite.....	11
1.5.4 Configuración de los parámetros en el variador de frecuencia altivar 312.....	12
1.5.5 Desarrollo del programa en lógica de escalera	13
1.6 Conclusiones y Recomendaciones	17
PRÁCTICA N°2.....	18
2 Tema	18
2.1 Objetivos.....	18
2.2 Marco teórico	18
2.2.1 Entorno gráfico de LabVIEW.....	18

2.2.1.1 Manejo y Aplicación del Sistema LabVIEW	18
2.2.2 OPC Server	21
2.2.3 RSLogix Micro Starter Lite	21
2.3 Equipos y herramientas	23
2.4 Trabajo preparatorio	23
2.5 Desarrollo	24
2.5.1 Tratamiento de la señal del setpoint.....	24
2.5.2 Tratamiento de la señal del sensor de flujo de efecto hall	25
2.5.3 Diseño de la interfaz gráfica.....	26
2.5.3.1 Configuración del NI OPC Servers.....	26
2.5.3.2 Creación de un nuevo proyecto en LabVIEW.....	29
2.5.3.3 Implementación del programa del VI.....	33
2.5.4 Desarrollo del programa en lógica de escalera	35
2.6 Conclusiones y Recomendaciones	42
PRACTICA N° 3.....	43
3 Tema:	43
3.1 Objetivos.....	43
3.2 Marco teórico	43
3.2.1 Concepto de sistema	43
3.2.2 Tipos de modelos de un sistema.....	43
3.2.2.1 Modelos mentales, intuitivos o verbales	43
3.2.2.2 Modelos no paramétricos	43
3.2.2.3 Modelos matemáticos	44
3.2.3 Métodos de obtención de modelos.....	44
3.2.4 Identificación de sistemas	44
3.2.5 Proceso de identificación de sistemas	44
3.2.6 Métodos de identificación.....	45

3.2.7 Familias de modelos de funciones de transferencia.....	45
3.2.7.1 Modelo ARX.....	45
3.2.7.2 Estructura ARMAX.....	46
3.2.7.3 Estructura ARARX.....	46
3.2.7.4 Estructura ARARMAX.....	46
3.2.7.5 Estructura de error de salida.....	46
3.2.7.6 Estructura Box- Jenkins.....	47
3.2.8 Sintonización PID por el método de Ziegler – Nichols.....	47
3.2.8.1 Método de la respuesta en escalón.....	47
3.3 Equipos y herramientas.....	49
3.4 Trabajo preparatorio.....	49
3.5Desarrollo.....	50
3.5.1 Exportación de datos de Excel a MATLAB y obtención de la función de transferencia.....	50
3.5.2 Sintonización PID mediante el método de Ziegler – Nichols.....	55
3.6 Conclusiones y recomendaciones.....	58

PRÁCTICA N°1

1 TEMA

Programación básica en el PLC Allen Bradley MicroLogix 1100 y del variador de frecuencia Schneider ATV312HU11M2.

1.1 OBJETIVOS

- Asociar al estudiante con el software de comunicación RSLinx Classic lite y el software de programación RSLogix Micro Starter Lite.
- Realizar la programación del variador de frecuencia Schneider ATV312HU11M2 con los parámetros de la bomba eléctrica.
- Verificar el funcionamiento del sensor de flujo de efecto hall.

1.2 MARCO TEÓRICO

1.2.1 PLC ALLEN BRADLEY MICROLOGIX 1100 Y MÓDULO DE EXPANSIÓN

El PLC Allen Bradley MicroLogix 1100 (1763-L16BWA) cuenta con 12 entradas (6 a 24V DC, 4 de alta velocidad a 24V DC y 2 analógicas de 0-10V DC), 6 salidas tipo relé, una alimentación de red de 100-240V AC y una fuente de voltaje de 24V DC a 250 mA utilizada para alimentar los dispositivos de entrada como sensores e interruptores.

El módulo de expansión (1762-IF2OF2) consta de 2 entradas configurables para voltaje o corriente y 2 salidas analógicas de voltaje/corriente.

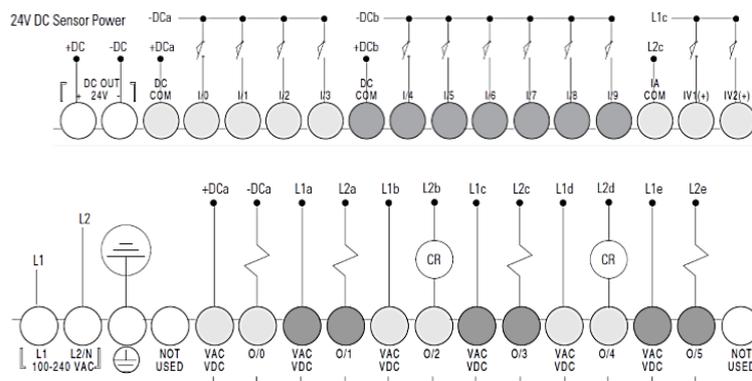


FIGURA 1. Esquema general de cableado (1763-L16BWA).

Fuente: Manual de usuario MicroLogix 1100

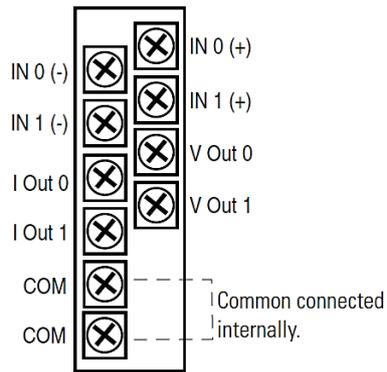


FIGURA 2. Terminales de conexión (1762-IF2OF2).

Fuente: Manual de usuario MicroLogix 1100.

1.2.2 BOOT/DHCP SERVER

La herramienta BOOT/DHCP Server es útil cuando se requiere conectar online un PLC que tiene interfaz Ethernet y se desconoce su dirección IP, esta herramienta asigna una dirección IP al PLC para posteriormente realizar la configuración del enlace en el programa RSLinx Classic.

1.2.3 RSLINX CLASSIC LITE

Se utiliza principalmente para realizar la comunicación del PLC con RSLogix. Esta versión no hace apoyo OPC y DDE. Además utiliza para:

- Configuración de red y de dispositivos, y diagnósticos utilizando RSNetWorx.
- Configuración de 1756-ENET, 1756-DHRIO y 1757-SRM módulos.
- Actualización de firmware mediante ControlFlash.
- Navegar por las redes y obtener información del dispositivo, tales como la revisión de firmware.

1.2.4 RSLOGIX MICRO STARTER LITE

Es la edición de menor funcionalidad del software RSLogix 500. Es compatible con todos los modelos y revisiones de los controladores modelo MicroLogix 1000 y MicroLogix 1100. Cuenta con las herramientas de programación necesarias para el desarrollo de un programa utilizando la lógica de escalera, en esta práctica se utilizaran las siguientes:

XIO, esta instrucción determina si un bit esta desactivado. Si el bit direccionado está desactivado (0) la instrucción es evaluada como verdadera. Si el bit direccionado está activado (1) la instrucción es falsa.

XIC, esta instrucción determina si un bit está activado. Si la dirección de bit está activada (1) la instrucción es evaluada como verdadera. Si el bit direccionado está desactivado (0) la instrucción evaluada como falsa.

OTE, esta instrucción activa/desactiva un bit cuando las condiciones de renglón son evaluadas como verdaderas/falsas respectivamente.

MOV, esta instrucción de salida mueve el valor de fuente al lugar de destino. Siempre que el renglón permanezca verdadero, la instrucción mueve los datos durante cada escaneó.

SCP, esta instrucción sirve para producir un valor de salida escalado que tiene una relación lineal entre los valores de entrada y escalados. Esta instrucción tiene capacidad para valores de entero y punto (coma) flotante.

Aplica la configuración al hardware del contador de alta velocidad, el acumulador de imagen (**HSC: 0.ACC**) se actualiza con el valor del acumulador de hardware actual cada vez que la instrucción **HSC** se evalúa como verdadera o falsa.

TON, esta instrucción sirve para activar o desactivar una salida después de que el temporizador haya estado activado durante un intervalo de tiempo preseleccionado.

RAC, esta instrucción le permite escribir un valor específico al acumulador de hardware y al acumulador de imagen.

1.2.5 VARIADOR DE FRECUENCIA SCHNEIDER ATV312HU11M2

El variador de velocidad Altivar 312 se integra transparentemente en sus arquitecturas y se comunica con cualquier elemento de control del sistema:

- Modbus y CANopen integrados como estándar.
- Tarjetas opcionales: CANopen Daisy Chain, DeviceNet, Profibus DP.
- Pasarelas para Ethernet/Modbus y Fipio/Modbus.

El variador Altivar 312 dispone de seis entradas lógicas, tres entradas analógicas, una salida lógica/analógica y dos salidas de relé.

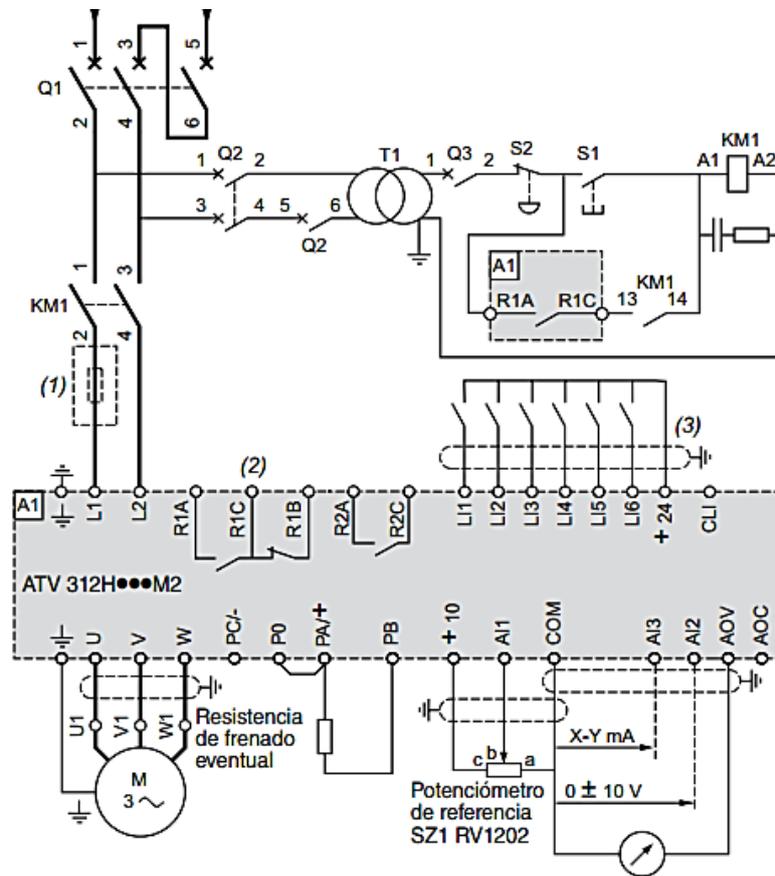


FIGURA 3. Esquema general de cableado.

Fuente: <http://documents.mx/documents/catalogo-altivar-312.html>

1.2.6 SENSOR DE FLUJO YF-S201

Está conformado por: un cuerpo de plástico como válvula, un rotor de agua, y un sensor de efecto Hall. Cuando el agua fluye a través del rotor se genera un tren de pulsos que es proporcional a la velocidad de flujo. La frecuencia del pulso varía dependiendo: de la velocidad de flujo, de la presión del fluido y de la orientación del sensor.

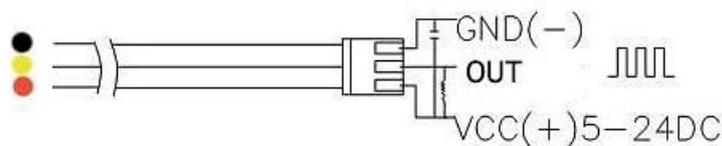


FIGURA 4. Conexión del sensor de flujo.

Fuente: <http://silicio.mx/sensor-de-flujo-de-agua-1-2>

TABLA 1. Características del sensor de flujo.

Ítem	Parámetro
Material del cuerpo	Plástico
Tipo de sensor	Efecto Hall
Voltaje de operación	5 a 24 [V DC]
Max. Consumo de corriente	15 [mA] @ 5 [V]
Flujo de trabajo	1 a 30 [L/min]
Temperatura de operación	-25° a +80° [C]
Precisión	±10%
Max. Presión del agua	2.0 [MPa]
Ciclo de trabajo de salida	50% ±10%
Tiempo de subida de salida	0.04 [us]
Tiempo de caída de salida	0.08 [us]
Pulso de flujo	Hz = 7.5 * Caudal [L/min]
Pulsos por litro	450 aproximadamente
Durabilidad	Mínimo 300.000 ciclos
Resistencia de aislamiento	>100 [mΩ]
Salida	Digital
Tamaño de interfaz	G ½" o (D=19mm)

Fuente: <http://silicio.mx/sensor-de-flujo-de-agua-1-2>

1.3 EQUIPOS Y HERRAMIENTAS

- PLC Allen Bradley MicroLogix 1100 y módulo de expansión (1762-IF2OF2).
- Los programas: BOOT/DHCP Server, RSLinx Classic Lite, y RSLogix Micro Starter Lite.
- Variador de frecuencia Schneider ATV312HU11M2.
- Sensor de flujo YF-S201.

- Potenciómetro.
- Luces pilotos.
- Selector de 2 posiciones.
- Botonera de ON-OFF y de paro de emergencia.
- Bomba trifásica ½ HP.

1.4 TRABAJO PREPARATORIO

Investigar los pasos a realizar para la configuración de:

- La herramienta BOOT/DHCP Server.
- Los drives de comunicación en el software RSLinx Classic Lite.
- Los parámetros en el software RSLogix Micro Starter Lite para crear y cargar un programa en la memoria del PLC.

Familiarizarse con:

- La guía de programación para el variador de frecuencia altivar 312.
- El manual de referencia (juego de instrucciones de SLC 500 y MicroLogix 1000).

1.5 DESARROLLO

1.5.1 CONFIGURACIÓN DE LA HERRAMIENTA BOOT/DHCP SERVER

En la herramienta BOOT/DHCP Server se debe configurar los parámetros **Subnet Mask** y **Gateway** según la configuración de red que se tenga en el computador (fig. 5). Posteriormente se debe ingresar la dirección Ethernet (MAC) y asignar una dirección IP al PLC (fig. 6).

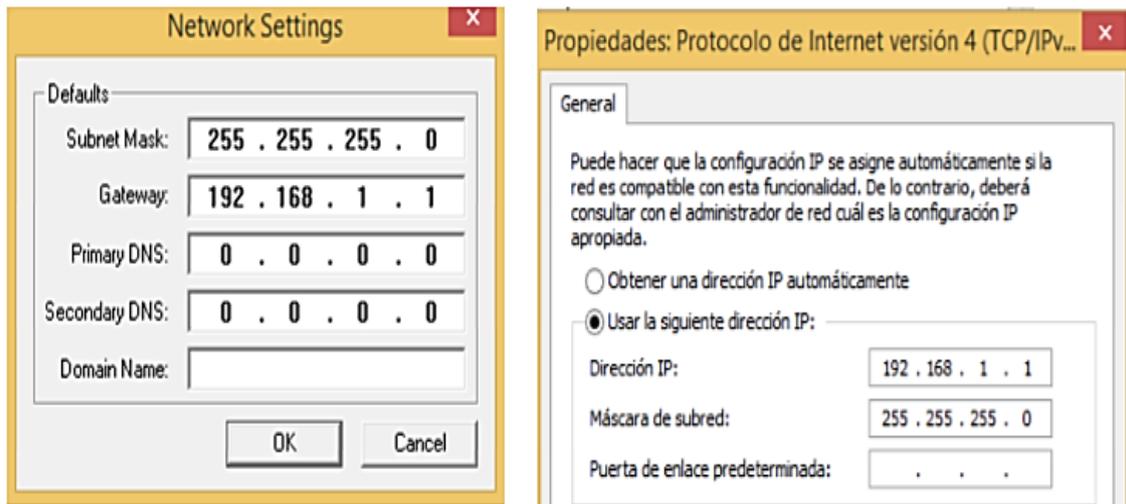


FIGURA 5. Configuración de la Subnet Mask y Gateway.

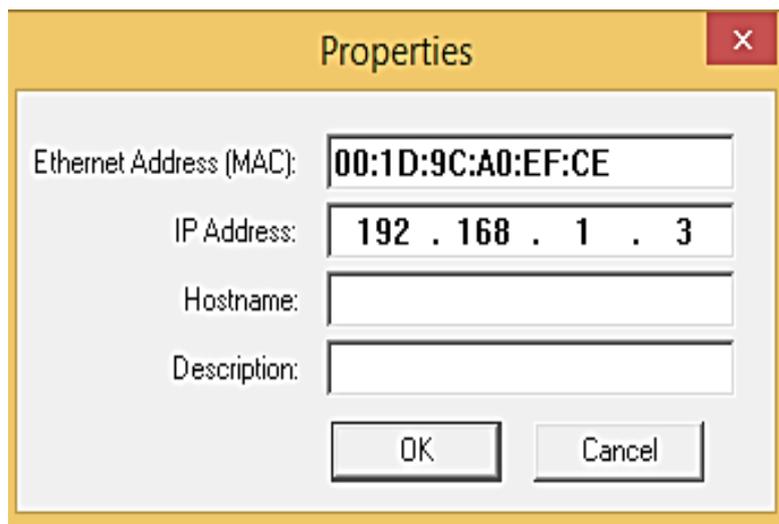


FIGURA 6. Configuración de la dirección ethernet (MAC) y de la dirección IP del PLC.

1.5.2 CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE RSLINX CLASSIC LITE

En la ventana principal del programa se debe realizar clic en **Communications >> Configure Drivers** y proceder a escoger **Ethernet devices**. Se procede a pinchar en **Add New** para configurar el controlador **AB_ETH-1** e ingresar la Dirección IP del computador y del PLC.

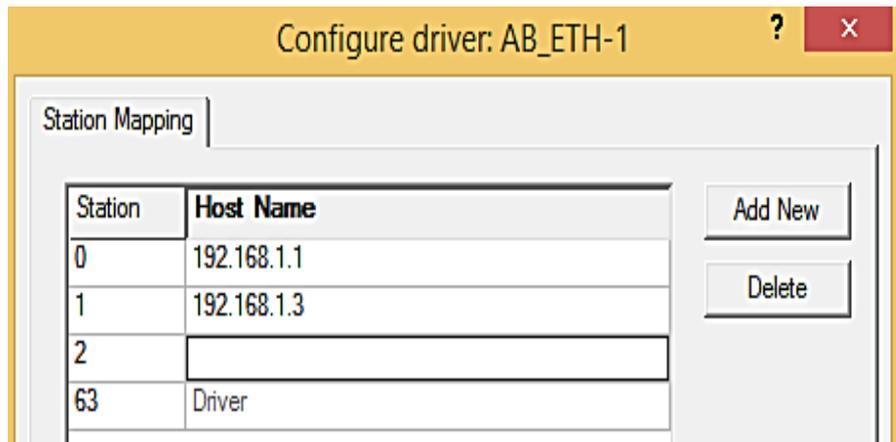


FIGURA 7. Configuración del controlador AB_ETH-1.

Para verificar que exista comunicación se debe dar clic en **Communications >> RSWho >> AB_ETH-1, Ethernet** y verificar que los dos iconos no estén marcados con una “X”.

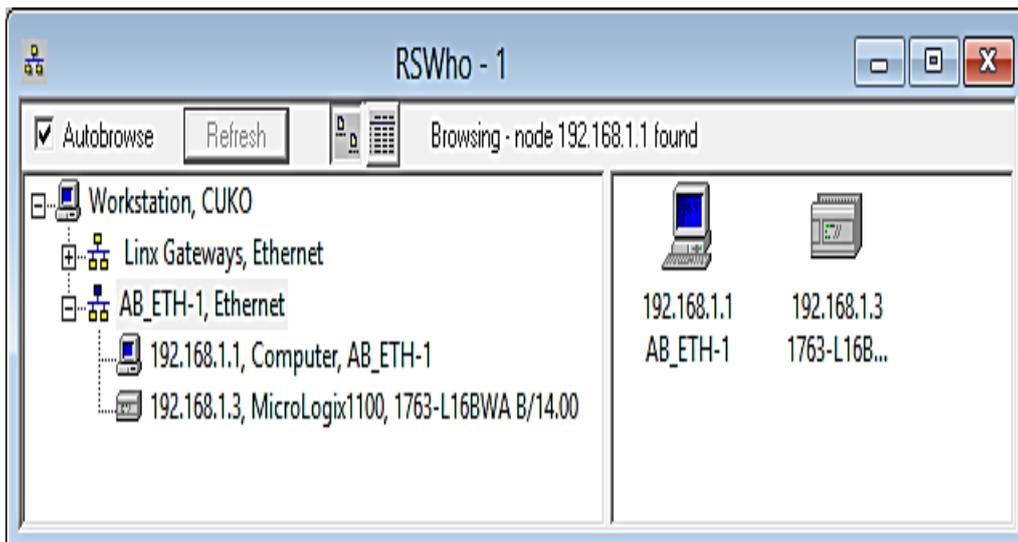


FIGURA 8. Verificación de la comunicación entre el PLC y el computador.

1.5.3 CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE RSLOGIX MICRO STARTER LITE

Antes de crear un programa, primero se debe escoger la serie del PLC (MicroLogix 110 serie B). Una vez en la ventana del programa Ladder se debe ubicar en el árbol del proyecto y pinchar en **Controller >> IO Configuration**, se procede a seleccionar el módulo de expansión (1762-IF20F2) para que el programa lo reconozca.

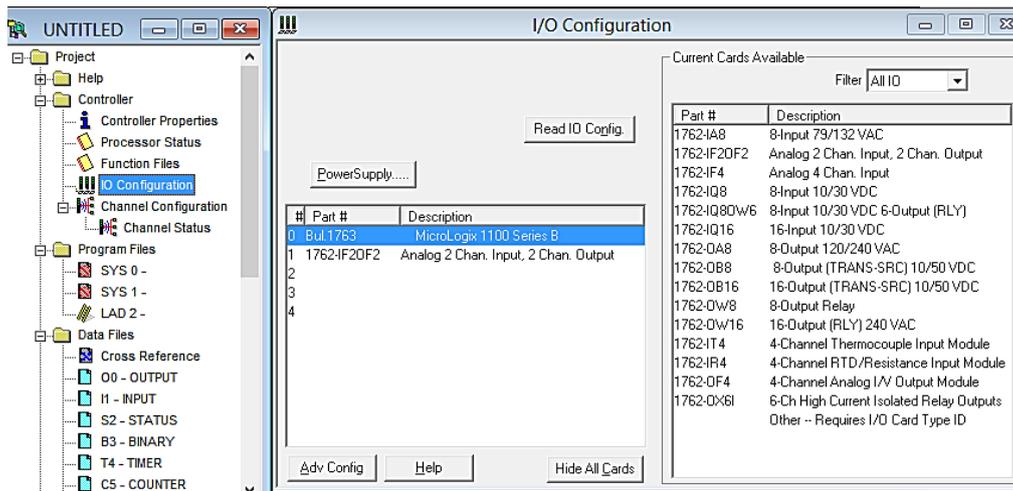


FIGURA 9. IO Configuración.

Posteriormente dar clic en **Channel Configuration >> Channel 1**, en esta ventana se debe desactivar el **BOOTP Enable** e introducir la dirección IP (192.168.1.3) y la **Subnet Mask** (255.255.255.0) para ser capaz de cargar el programa en el PLC.

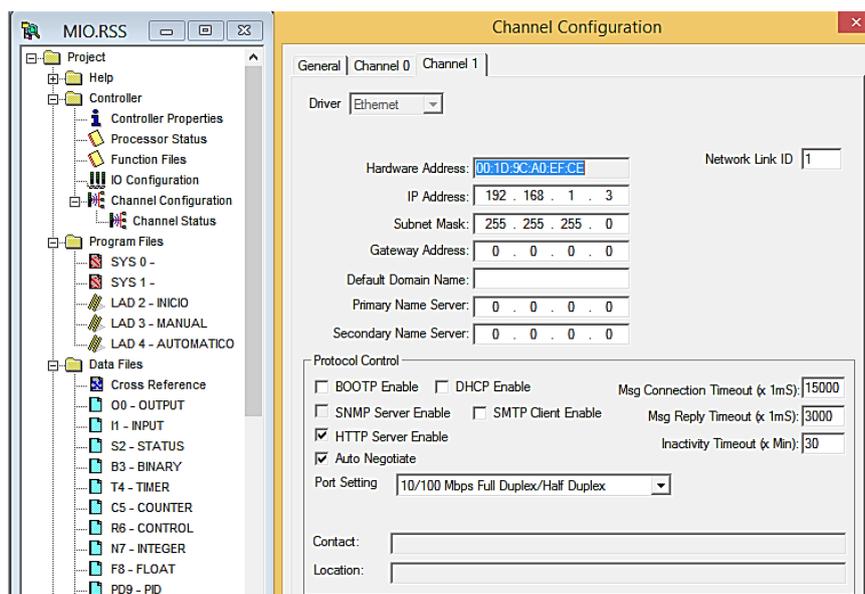


FIGURA 10. Configuración de canales.

1.5.4 CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS EN EL VARIADOR DE FRECUENCIA ALTIVAR 312

Para que un parámetro se quede registrado se debe presionar por 2 segundos la rueda de navegación, con la ayuda del panel frontal vamos a ingresar los siguientes parámetros:

- **Menú [Ajustes] (SEt-)**

LSP	0 Hz	[Velocidad mínima]
HSP	60 Hz	[Velocidad máxima]
ItH	1 A	[Intensidad térmica motor]
CLI	1.7 A	[Limite intensidad]
Ctd	1 A	[Nivel de intensidad del motor]

- **Menú [Control] (drC-)**

bFr	60 Hz	[Frecuencia estándar del motor]
UnS	230 V	[Tensión nominal motor]
Frs	60 Hz	[Frecuencia nominal del motor]
nCr	1.7 A	[Intensada nominal del motor]
nSP	3550 rpm	[Velocidad nominal del motor]
COS	0.81	[Motor 1 cos ϕ]
tFr	72 Hz	[Frecuencia máxima]

- **Menú [Entradas/Salidas] (I-O-)**

tCC	2C	[Control 2/3]
tCt	trn	[Tipo control 2 hilos]
AOIt	10 U	[Configuración AO1]
dO	Ofr	[Salida analog/logica]

- **Menú [Control] (CtL-)**

Frl	AI1	[Canal referencia 1]
-----	-----	----------------------

1.5.5 DESARROLLO DEL PROGRAMA EN LÓGICA DE ESCALERA

En el desarrollo de esta práctica se utilizara las entradas: a 24V DC, el contador de alta velocidad y la de 0-10V DC; las salidas tipo relé y la fuente de voltaje de 24V DC. Además de una salida analógica del módulo de expansión.

Una vez abierto un nuevo proyecto, se debe iniciar colocando en la primera línea de programación la instrucción **XIO (I: 0/4)** que registrará sobre el funcionamiento del programa a desarrollar, esta señal se la recibe del selector empleado para dar el inicio o paro al variador de frecuencia, conectada a una entrada a 24V DC. Adicionalmente se puede utilizar la instrucción **OTE (O: 0.3)** para accionar una salida tipo relé y conectar una luz piloto como visualización. Y por último colocamos en paralelo la instrucción **SCP** para realizar un escalado que tiene relación lineal entre la entrada **(I: 0.4)** y la salida **(O: 1.0)**, tomando como valores de entrada mínimo de 6 y máximo de 1023, y los valores de salida mínimo de 0 y máximo de 32764 para obtener una salida analógica de 0-10V DC proporcional a la señal del potenciómetro.

Para el control del variador de frecuencia se utiliza un potenciómetro, este envía una señal a la entrada analógica de 0-10V DC del PLC, al mismo tiempo el módulo de expansión reenvía la señal a la entrada analógica del variador.

Para activar el contador rápido del PLC se debe ubicar en el árbol del proyecto y pinchar en **Function files >> HSC >>** colocar 1 en **AS (Auto Start)** y en **CE (Counting Enable)**, y el número de la fila del programa donde se encuentre la instrucción **HSC: 0.ACC** que será 2 en **PFN (Program File Number)** (fig. 11). Adicionalmente en el árbol del proyecto damos clic en **IO Configuration >> MicroLogix 1100 Series B >> Inputs 0 + 1** y seleccionamos 25 uS (fig.12).

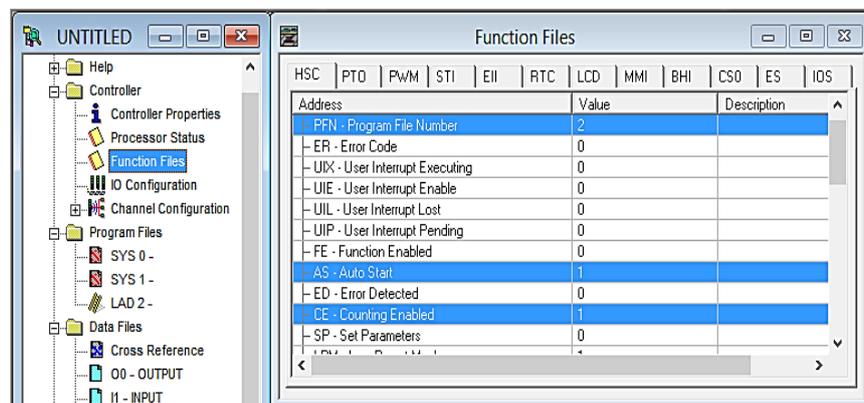


FIGURA 11. Activación del contador rápido del PLC.

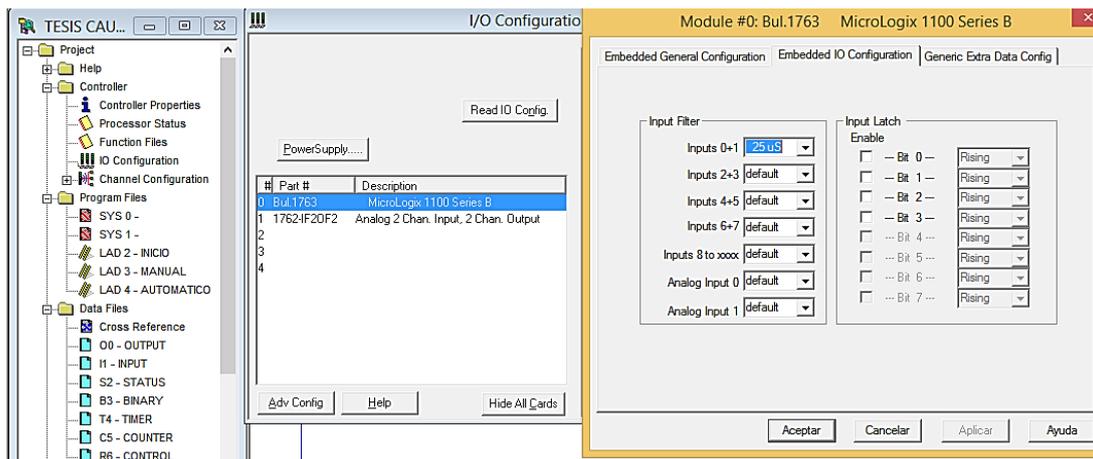


FIGURA 12. Habilitación del tiempo de reconocimiento para el contador rápido.

En la segunda línea emplearemos la instrucción **MOV** para mover de la dirección **HSC:0.ACC** el dato del contador accedente a un archivo de datos tipo integral (**N7:2**). En la siguiente línea se ocupa un archivo de datos tipo temporizador (**T4:1**) en la instrucción **TON**, esta realiza la activación o desactivación de la instrucción **XIO (T4:1/DN)** para reiniciar el tiempo de muestreo cada 50 centésimas de segundo y de la instrucción **XIC (T4:1/DN)** para resetear el valor acumulado de reposición.

En la siguiente línea se utiliza la instrucción **RAC** para establecer un valor de reinicio en el contador (**HSC0**) cada vez que la instrucción **XIC (T4:1/DN)** sea considerada como verdadera, al final se utiliza una instrucción **MOV** en paralelo para registrar el tren de pulsos del sensor de flujo de efecto hall.

Por último se utiliza la instrucción **SCP** para realizar un escalado que tiene relación lineal entre la entrada (**N7:2**) y la salida (**N7:3**), tomando como valores de entrada mínimo de 0 y máximo de 89, y valores de salida mínimo de 0 y máximo de 27 LPM visualizados de forma experimental en el rotámetro, la señal de salida es proporcional a los pulsos entregados por el sensor de flujo.

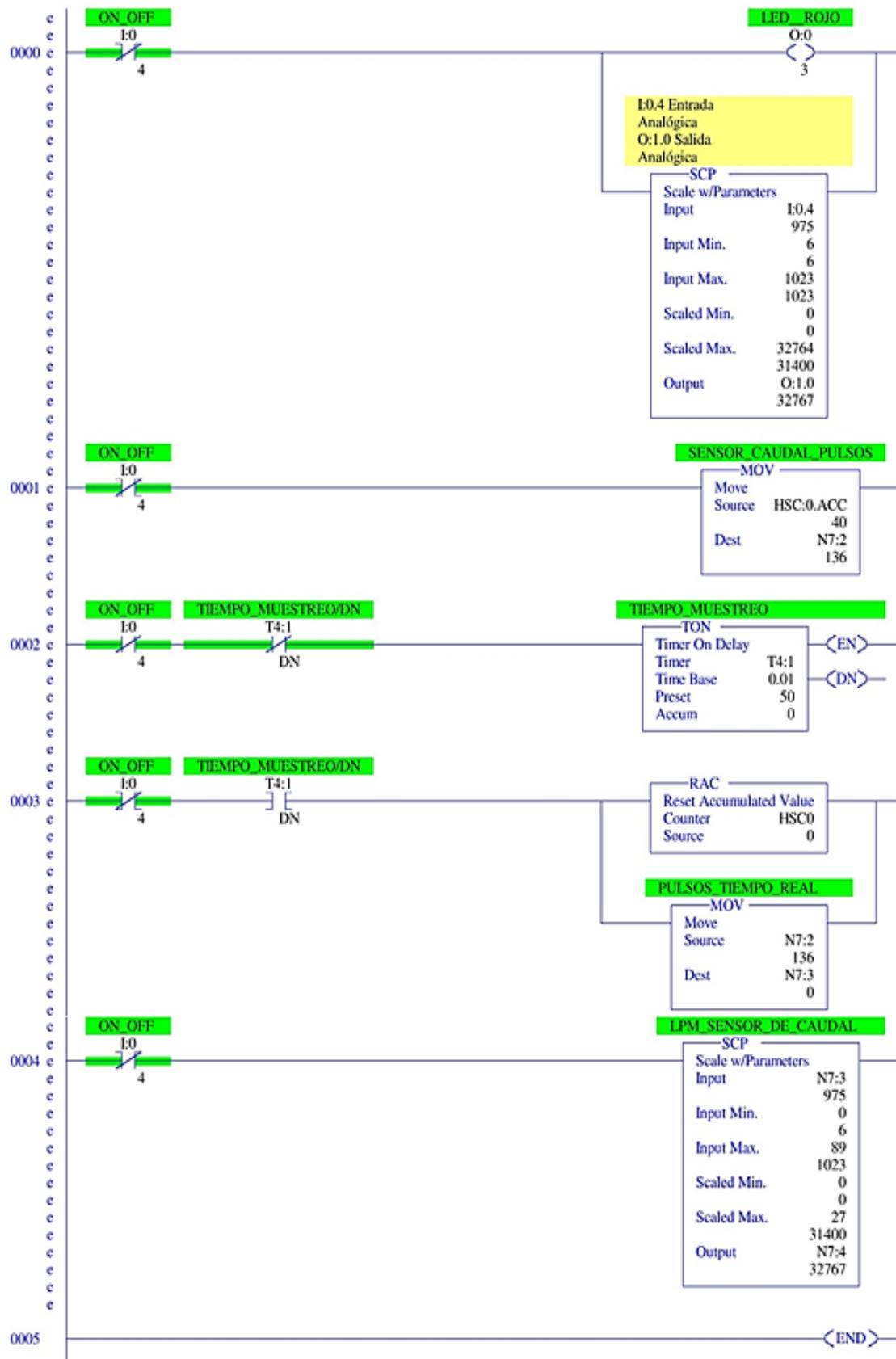


FIGURA 13. Líneas de programación.

1.6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

PRÁCTICA N°2

2 TEMA

Desarrollo de una interfaz gráfica para la adquisición de datos utilizando la plataforma de LabVIEW.

2.1 OBJETIVOS

- Asociar al estudiante con la plataforma gráfica de LabVIEW.
- Realizar la linealización de la señal del setpoint y del sensor de flujo mediante líneas de programación en el PLC.
- Adquirir datos de la señal de caudal y del setpoint para su posterior análisis.

2.2 MARCO TEÓRICO

2.2.1 ENTORNO GRÁFICO DE LABVIEW

LabVIEW (Laboratory Visual Instrument Engineering Workbench). Es un entorno de programación gráfico para el diseño de sistemas de adquisición de datos tanto de instrumentación como de control.

Para la creación de programas, utiliza símbolos o lenguaje gráfico en lugar de lenguaje contextual para la descripción de acciones, permitiendo el desarrollo de aplicaciones de forma más rápida y sencilla.

2.2.1.1 MANEJO Y APLICACIÓN DEL SISTEMA LABVIEW

Los programas realizados por LabVIEW se los conoce como instrumentos virtuales o "VI", por sus siglas en inglés. Cada VI se compone de dos elementos principales:

- **Panel frontal o front panel**

Que es donde se realiza la construcción de la interfaz mediante indicadores y controles los cuales permiten generar las respectivas entradas y salidas del sistema.

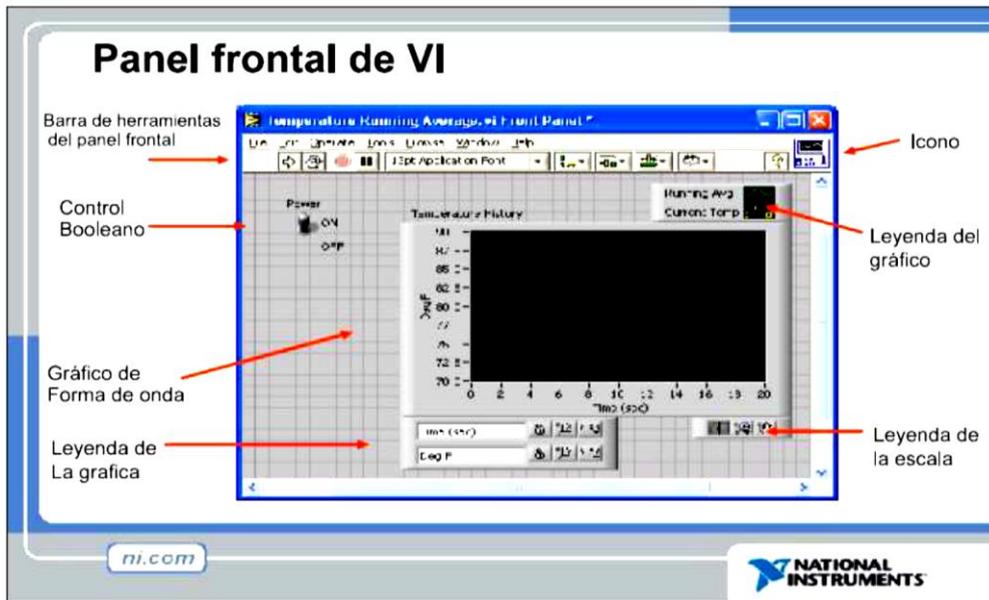


FIGURA 1. Panel frontal de LabVIEW.

Cada elemento en el panel frontal se puede colocar mediante la paleta de controles.

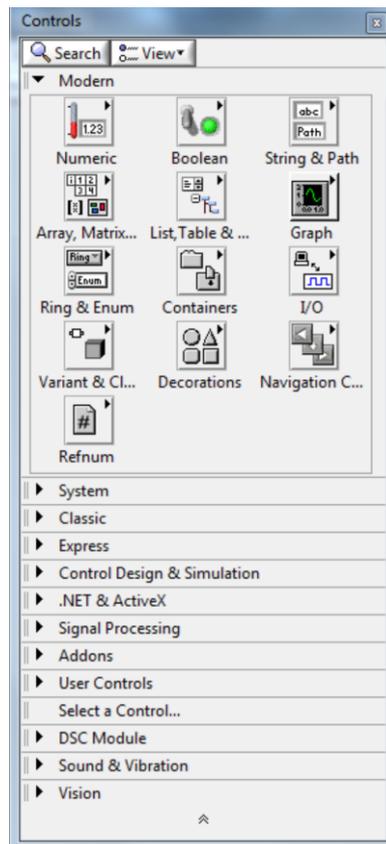


FIGURA 2. Paleta de controles.

- **Diagrama de bloques**

Después de realizar la construcción y personalización de los elementos en el panel frontal, LabVIEW nos permite realizar el código mediante las respectivas representaciones gráficas de las funciones.

El diagrama de bloques contiene el código gráfico, cada objeto realizado en el panel frontal aparecerá como terminal en el diagrama de bloques, además también se permite la inserción de otros idiomas de programación como código C y fórmulas de MATLAB.

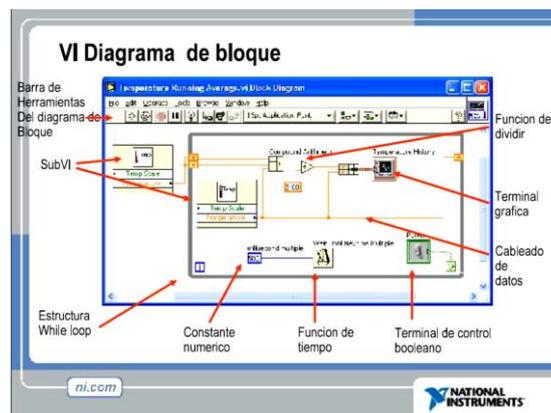


FIGURA 3. Diagrama de bloques.

Cada elemento en el diagrama de bloques se puede colocar mediante la paleta de funciones.

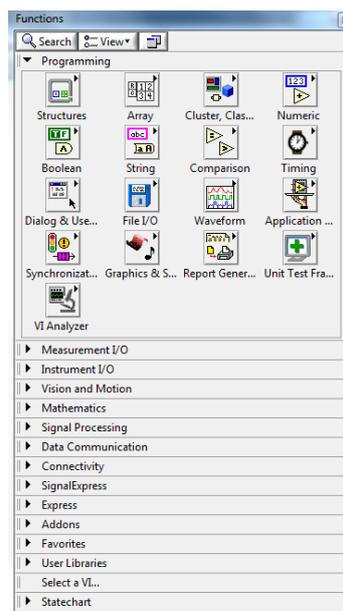


FIGURA 4. Paleta de funciones.

- **LabVIEW Report Generation Toolkit para Microsoft Office**

El LabVIEW Report Generation Toolkit para Microsoft Office es una biblioteca de VIs flexibles y fáciles de usar para crear y editar de manera programática reportes de Microsoft Word y Excel desde NI LabVIEW. Ya sea que usted necesite generar reportes para resumir resultados de pruebas de manufactura o compilar estadísticas de procesos para mejorar sus rendimientos de producción, el LabVIEW Report Generation Toolkit acelera el desarrollo de reportes profesionales personalizados.

2.2.2 OPC SERVER

Debido a la conflictividad existente entre distintos sistemas de comunicación, algunas empresas junto con Microsoft desarrollaron una tecnología la cual les permitió incluir equipos de diferentes marcas, en un bus de comunicaciones industriales. De allí surgió un servidor conocido como OPC (Ole Proces Control), el cual se convirtió en un estándar en la comunicación y la supervisión de la mayoría de procesos industriales.

El OPC server, ofrece una interfaz común, en la cual los componentes individuales se puedan comunicar y compartir datos de los procesos supervisados. Además el OPC server es una fuente de datos y cualquier aplicación que se base en OPC server puede acceder a dicho servidor para leer/escribir las variables que ofrezca el servidor.

Una de las principales ventajas del OPC server es que los usuarios disponen de más opciones para desarrollar sistemas eligiendo una amplia gama de productos con independencia de marca.

2.2.3 RSLOGIX MICRO STARTER LITE

Es la edición de menor funcionalidad del software RSLogix 500. Es compatible con todos los modelos y revisiones de los controladores modelo MicroLogix 1000 y MicroLogix 1100. Cuenta con las herramientas de programación necesarias para el desarrollo de un programa utilizando la lógica de escalera, en esta práctica se utilizaran las siguientes:

XIO, esta instrucción determina si un bit esta desactivado. Si el bit direccionado está desactivado (0) la instrucción es evaluada como verdadera. Si el bit direccionado está activado (1) la instrucción es falsa.

XIC, esta instrucción determina si un bit está activado. Si la dirección de bit está activada (1) la instrucción es evaluada como verdadera. Si el bit direccionado está desactivado (0) la instrucción evaluada como falsa.

OTE, esta instrucción activa/desactiva un bit cuando las condiciones de renglón son evaluadas como verdaderas/falsas respectivamente.

MOV, esta instrucción de salida mueve el valor de fuente al lugar de destino. Siempre que el renglón permanezca verdadero, la instrucción mueve los datos durante cada escaneó.

SCP, esta instrucción sirve para producir un valor de salida escalado que tiene una relación lineal entre los valores de entrada y escalados. Esta instrucción tiene capacidad para valores de entero y punto (coma) flotante.

Aplica la configuración al hardware del contador de alta velocidad, el acumulador de imagen (**HSC:0.ACC**) se actualiza con el valor del acumulador de hardware actual cada vez que la instrucción **HSC** se evalúa como verdadera o falsa.

TON, esta instrucción sirve para activar o desactivar una salida después de que el temporizador haya estado activado durante un intervalo de tiempo preseleccionado.

RAC, esta instrucción le permite escribir un valor específico al acumulador de hardware y al acumulador de imagen.

GRT, si la fuente A es mayor que el valor en la fuente B, la instrucción es lógicamente verdadera. Si el valor en la fuente A es menor o igual que el valor en la fuente B, la instrucción es lógicamente falsa. La fuente A debe ser una dirección. La fuente B puede ser un constante de programa o una dirección.

EQU, use esta instrucción para probar si dos valores son iguales. Si la fuente A y la fuente B son iguales, la instrucción es lógicamente verdadera. Si estos valores no son iguales, la instrucción es lógicamente falsa. La fuente A debe ser una dirección. La fuente B puede ser una constante de programa o una dirección.

MUL, Use la instrucción MUL para multiplicar un valor (fuente A) por el otro (fuente B) y coloque el resultado en el destino.

ADD, use esta instrucción para añadir un valor (fuente A) a otro valor (fuente B) y coloque el resultado en el destino.

SUB, use esta instrucción para restar un valor (fuente B) del otro (fuente A) y coloque el resultado en el destino.

2.3 EQUIPOS Y HERRAMIENTAS

- PLC Allen Bradley MicroLogix 1100 y módulo de expansión (1762-IF2OF2).
- Los programas: BOOT/DHCP Server, RSLinx Classic Lite, RSLogix Micro Starter Lite, y Microsoft Office.
- Variador de frecuencia Schneider ATV312HU11M2.
- Sensor de flujo YF-S201.
- Rotámetro.
- Potenciómetro.
- Luces pilotos.
- Selector de 2 posiciones.
- Botonera de ON-OFF y de paro de emergencia.
- Bomba trifásica ½ HP.

2.4 TRABAJO PREPARATORIO

Investigar los pasos para realizar la:

- Regresión polinomial por medio de las herramientas del programa de MATLAB.
- Configuración del NI OPC Servers.
- Exportación de datos desde LabVIEW a Excel.

Familiarizarse con:

- El software de LabVIEW.
- El manual de referencia (juego de instrucciones de SLC 500 y MicroLogix 1000).

2.5 DESARROLLO

2.5.1 TRATAMIENTO DE LA SEÑAL DEL SETPOINT

TABLA 1: Comparación del caudal vs señal del setpoint modo local.

Caudal [LPM]	Dato del PLC
4	156
6	216
8	284
10	368
12	432
14	502
16	569
18	657
20	746
22	810
24	902
26	983
27	1023

Con estos datos procedemos a realizar la linealización de la señal utilizando una regresión polinomial por medio de las herramientas del programa de MATLAB, dando como resultado.

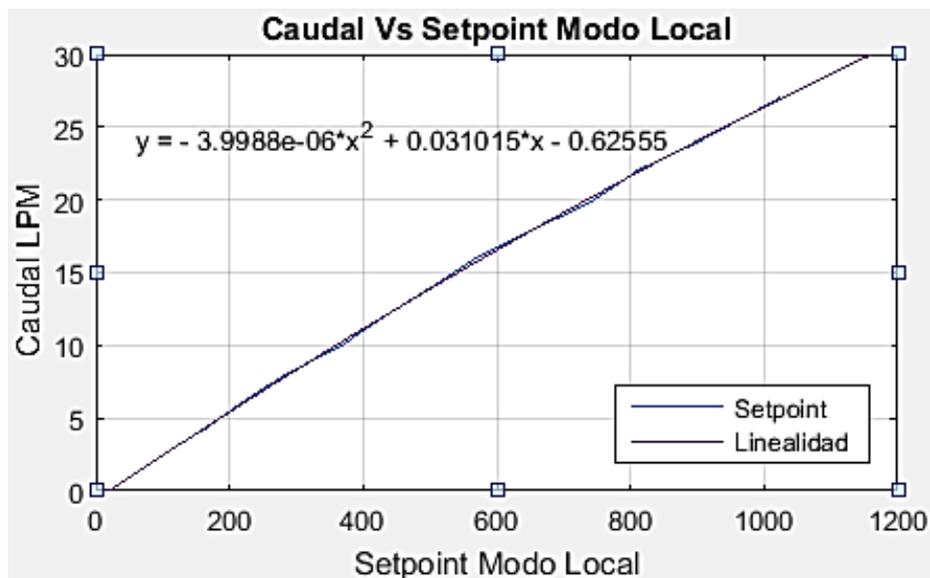


FIGURA 5. Curva de funcionamiento del setpoint modo local.

2.5.2 TRATAMIENTO DE LA SEÑAL DEL SENSOR DE FLUJO DE EFECTO HALL

TABLA 2. Comparación del caudal vs señal del sensor de caudal de efecto Hall.

Caudal [LPM]	Sensor
4	14
6	19
8	25
10	33
12	38
14	45
16	50
18	58
20	65
22	70
24	78
26	84
27	89

Con estos datos procedemos realizar la linealización de la señal utilizando una regresión polinomial por medio de las herramientas del programa de MATLAB, dando como resultado.

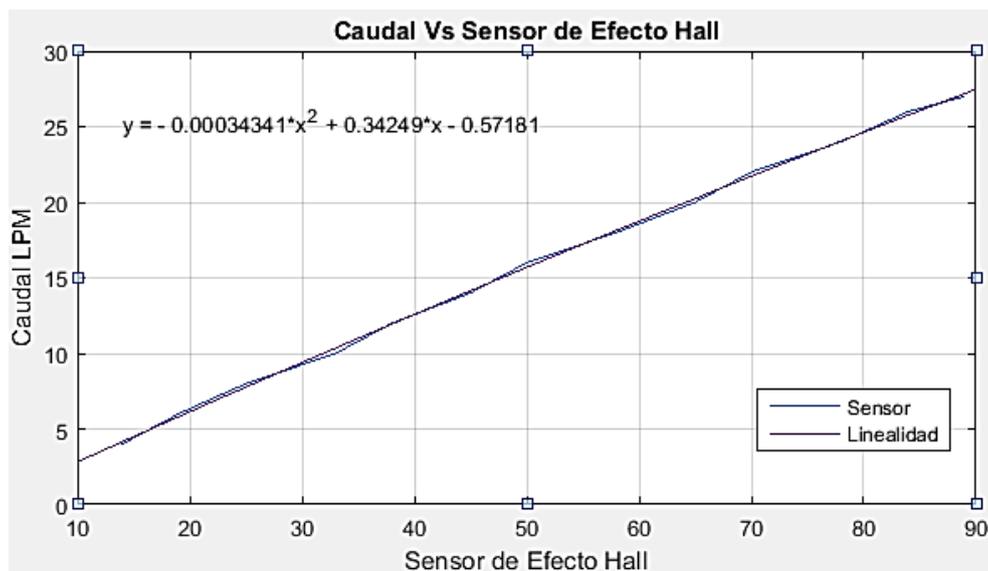


FIGURA 6. Curva de funcionamiento del sensor de caudal de efecto Hall.

2.5.3 DISEÑO DE LA INTERFAZ GRÁFICA

2.5.3.1 CONFIGURACIÓN DEL NI OPC SERVERS

Una vez abierto el programa NI OPC Servers se debe hacer clic en el icono **New Channel** para crear un Nuevo Canal.

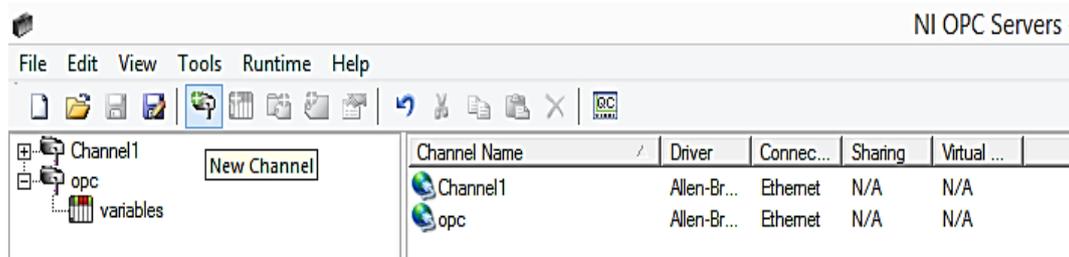


FIGURA 8: Interface del NI OPC Servers.

A continuación se desplegará la ventana **New Channel – Identification** en la cual se debe asignar un nombre al canal. Seguidamente se desplegará la ventana **New Channel – Device Driver** y se seleccionará **Allen – Bradley ControlLogix Ethernet**.

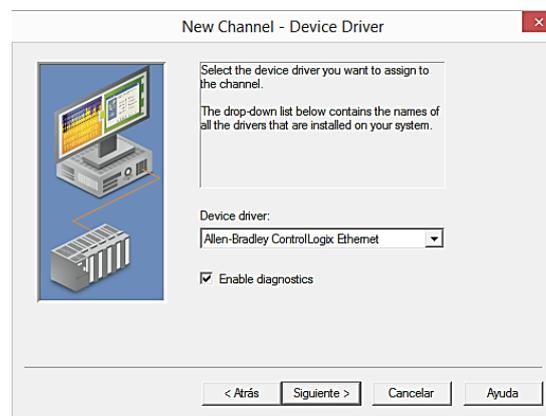


FIGURA 9: Ventana New Channel – Device Driver.

En las siguientes ventanas: **New Channel – Network Interface**, **New Channel – Write Optimizations** y **New Channel – Non-Normalized Float Handling** se debe optar por dejar los parámetros por defecto.

En el canal que se acabó de crear se debe pinchar en **Click to add a device** y se desplegará la ventana **New Device - Name**, en esta ventana se le asignará un nombre al dispositivo.

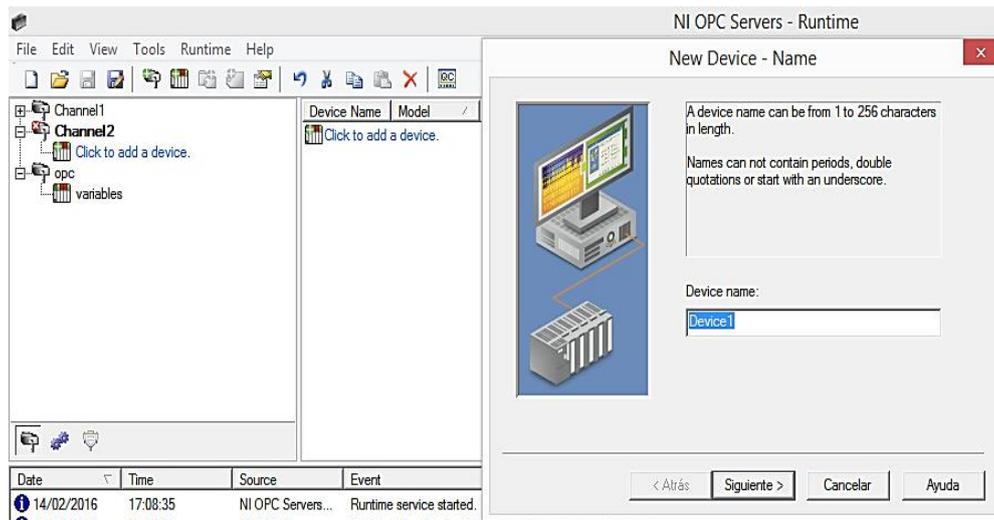


FIGURA 10. Ventana New Device – Name.

Posteriormente se desplegará la ventana **New Device - Model** en la cual se seleccionará el PLC (MicroLogix 1100).

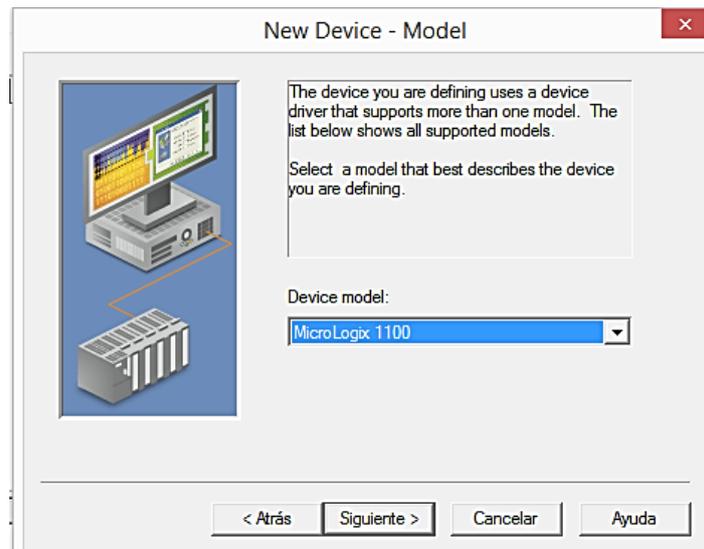


FIGURA 11. Ventana New Device – Model.

A continuación se abrirá la ventana **New Device - ID** en la cual se debe ingresar la dirección IP del PLC que es 192.168.1.3.

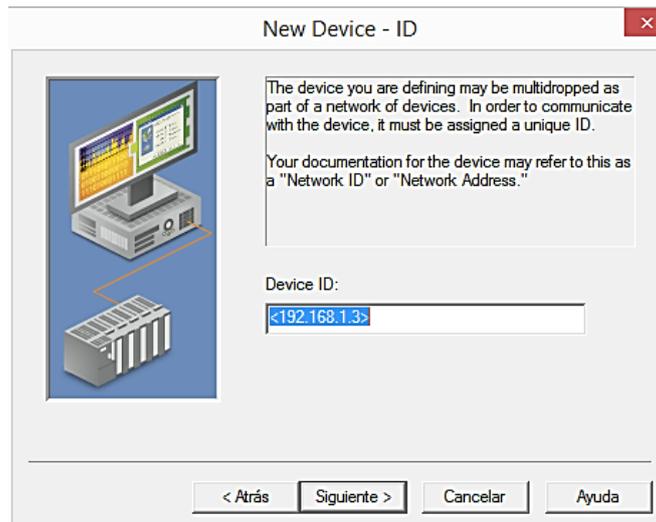


FIGURA 12. Ventana New Device – ID.

En las siguientes ventanas: **New Device – Scan Mode**, **New Device – Timing**, **New Device – Auto-Demotion**, **New Device – Database Creation** y **New Device - ENI DF1/DH+/CN Gtwy Communications**, se debe optar por dejar los parámetros por defecto.

En el dispositivo que se acabó de crear damos clic en **New Tag** y se desplegará la ventana **Tag Properties** en donde se debe introducir los datos correspondientes a la etiqueta a crear: nombre, zona de memoria del PLC, descripción, tipo de dato (Word, bool, byte, carácter, etc.), tipo de acceso (lectura solamente, escritura solamente o lectura/escritura) y el tiempo transcurrido entre cada lectura/escritura.

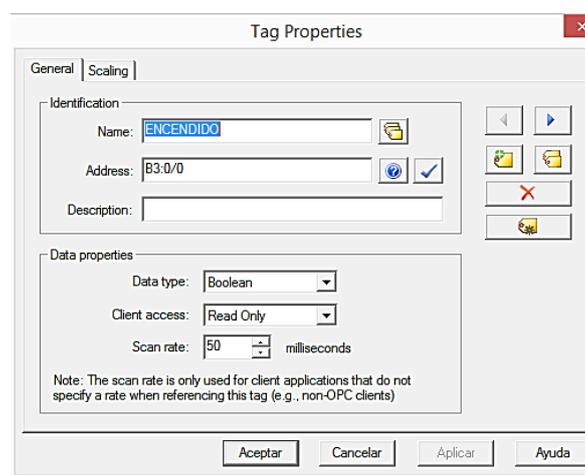


FIGURA 13. Ventana propiedades de etiqueta.

2.5.3.2 CREACIÓN DE UN NUEVO PROYECTO EN LABVIEW

En la ventana principal de LabVIEW se debe seleccionar **Create Project >> Blank Project**, una vez en la ventana del nuevo proyecto se debe dar clic en **My Computer >> New >> I/O Server**.

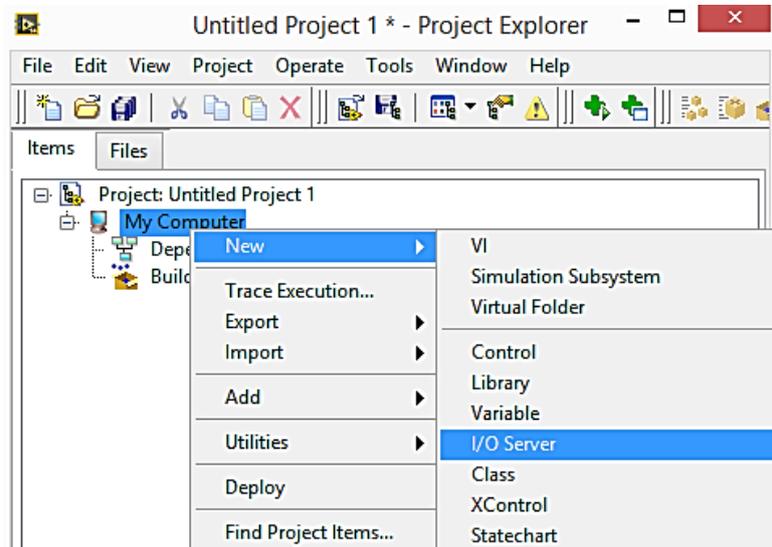


FIGURA 14. Ventana principal del nuevo proyecto.

En seguida se desplegará la ventana **Create New I/O Server** en la cual se escogerá la opción de **OPC Client**.

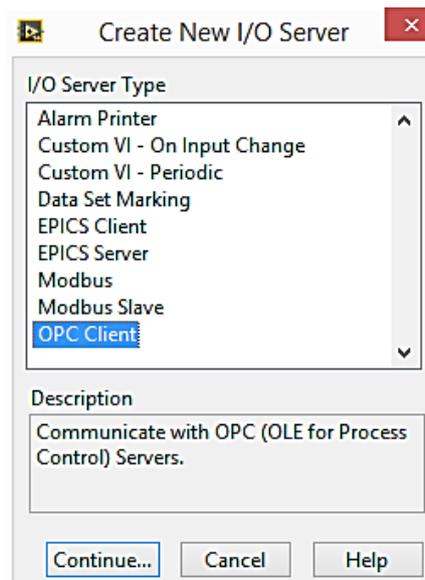


FIGURA 15. Ventana Create New I/O Server.

A continuación se abrirá la ventana **Configure OPC Client I/O Server** en la cual se seleccionará la opción **National Instruments.NIOPCServers.VS**, posteriormente se creará una nueva biblioteca sin título.

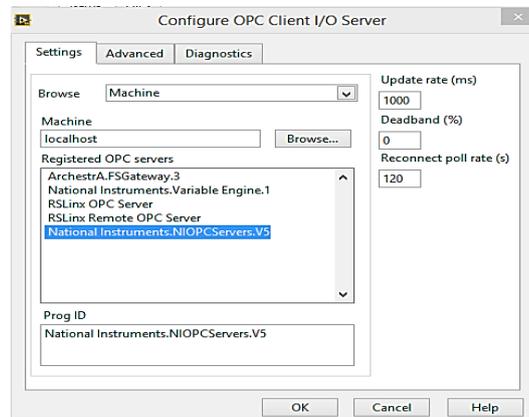


FIGURA 16. Ventana Configure OPC Client I/O Server.

En la ventana principal del nuevo proyecto se debe pinchar en la biblioteca que se acabó de crear >> **New >> Variable**.

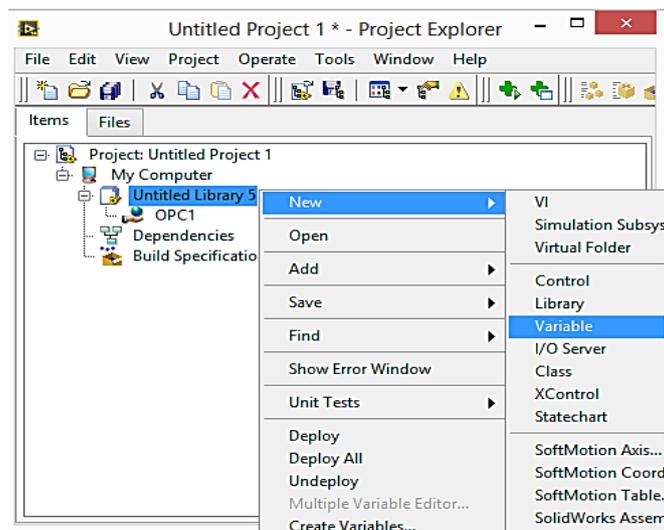


FIGURA 17. Creación de una variable.

Seguidamente se desplegará la ventana **Shared Variable Properties** en donde se deberá introducir los datos correspondientes a la variable a crear: nombre, el tipo de variable es Network-Published, se debe habilitar **Enable Aliasing** para ser capaz de buscar la etiqueta que se requiera emplear y por último se debe seleccionar el tipo de acceso que se requiera utilizar (lectura solamente, escritura solamente o lectura/escritura).

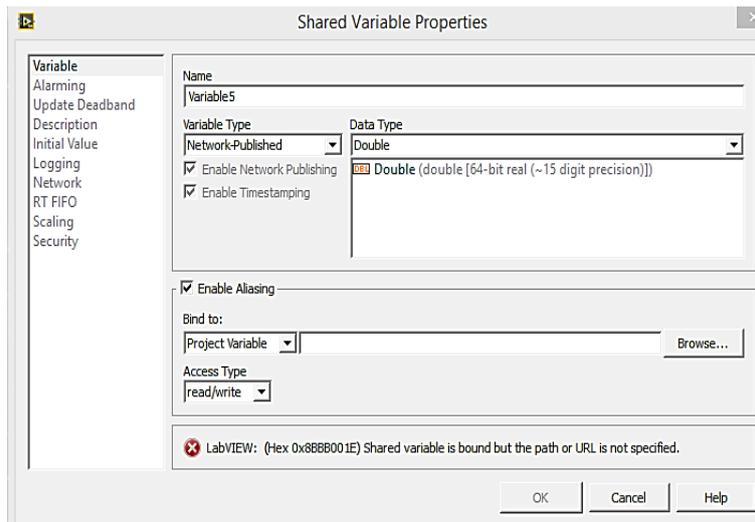


FIGURA 18. Ventana Shared Variable Properties.

Para escoger la etiqueta que se desee emplear se debe dar clic en **Buscar >> Mi computadora >> Librería creada >> OPC >> Canal creado >> Dispositivo creado** y a continuación se desplegarán todas las etiquetas que se han configurado en el NI OPC Server con anterioridad.

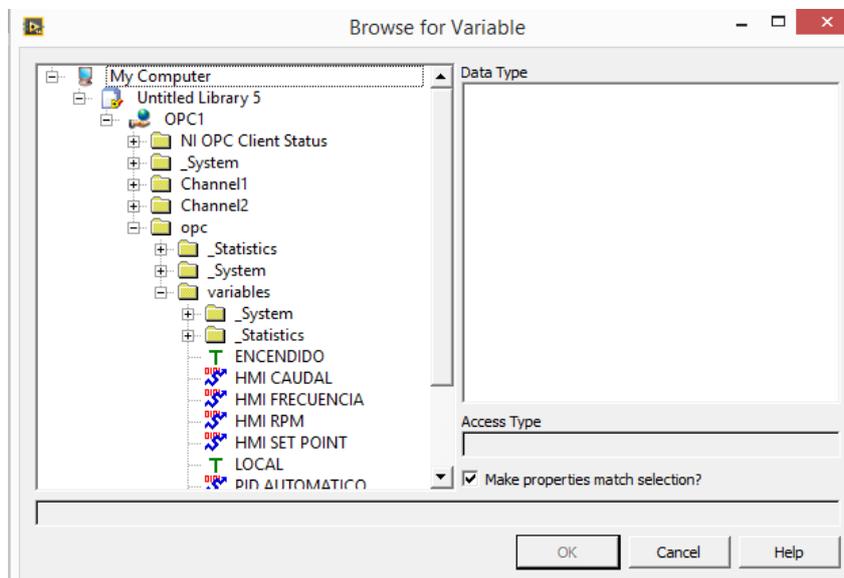


FIGURA 19. Ventana para buscar variables.

En la ventana principal del nuevo proyecto se debe pinchar en la **Biblioteca >> Nuevo >> VI** para crear la ventana del panel frontal.

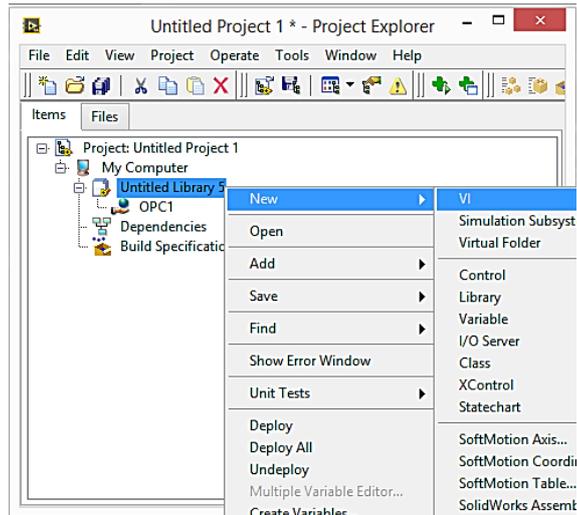


FIGURA 20. Creación de un nuevo VI.

En la ventana principal del panel frontal se deberá realizar el enlazamiento de las variables, para ello se debe dar clic derecho en la variable y seguir los siguientes pasos: dar clic en **Properties >> Data Binding >>** en **Data Binding Selection** se escogerá la opción Shared Variable Engine (NI-PSP) >> en el **Tipo de Acceso** se escogerá (lectura solamente, escritura solamente o lectura/escritura) >> **Buscar**. A continuación se desplegará la ventana **Select Source Item** en donde se deberá pinchar en: **el proyecto creado >> Mi Computadora >> la Biblioteca Creada** y seleccionar la etiqueta que se requiera emplear.

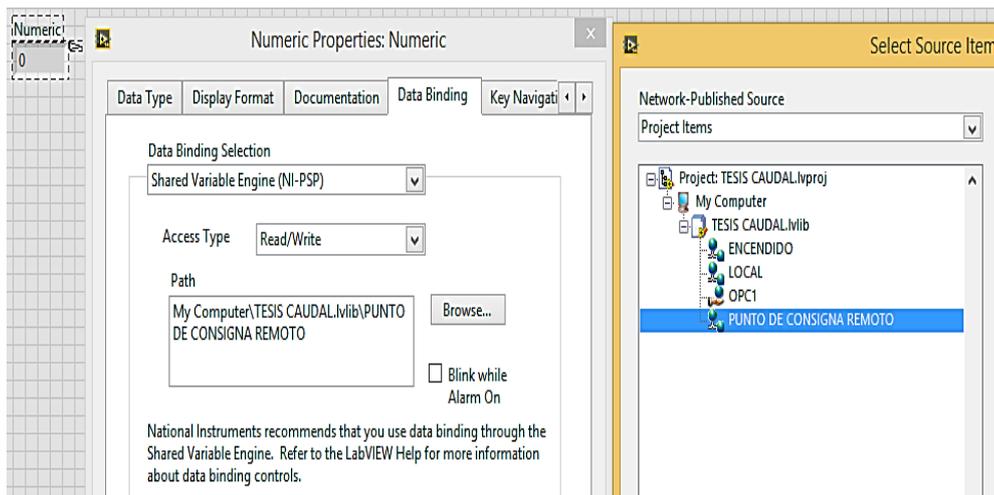


FIGURA 21. Enlazar una variable con la etiqueta.

Se puede verificar el correcto funcionamiento de la etiqueta si el pequeño piloto de forma triangular situado a la derecha de la variable, se pone en verde.

2.5.3.3 IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA DEL VI

- **Lectura, visualización y generación de registro**

Para la lectura y visualización de las variables de caudal y del setpoint, se utilizó indicadores numéricos enlazados respectivamente a su correspondiente etiqueta, el registró de los datos se realiza mediante el indicador **EX Table** ubicado en la paleta de funciones del panel frontal >> **List, Table & Tree**, adicionalmente se realizó un contador con su respectivo reset para obtener el número de datos y por último se utilizó un **Waveform Chart** para la visualización de la señal del caudal y del setpoint.

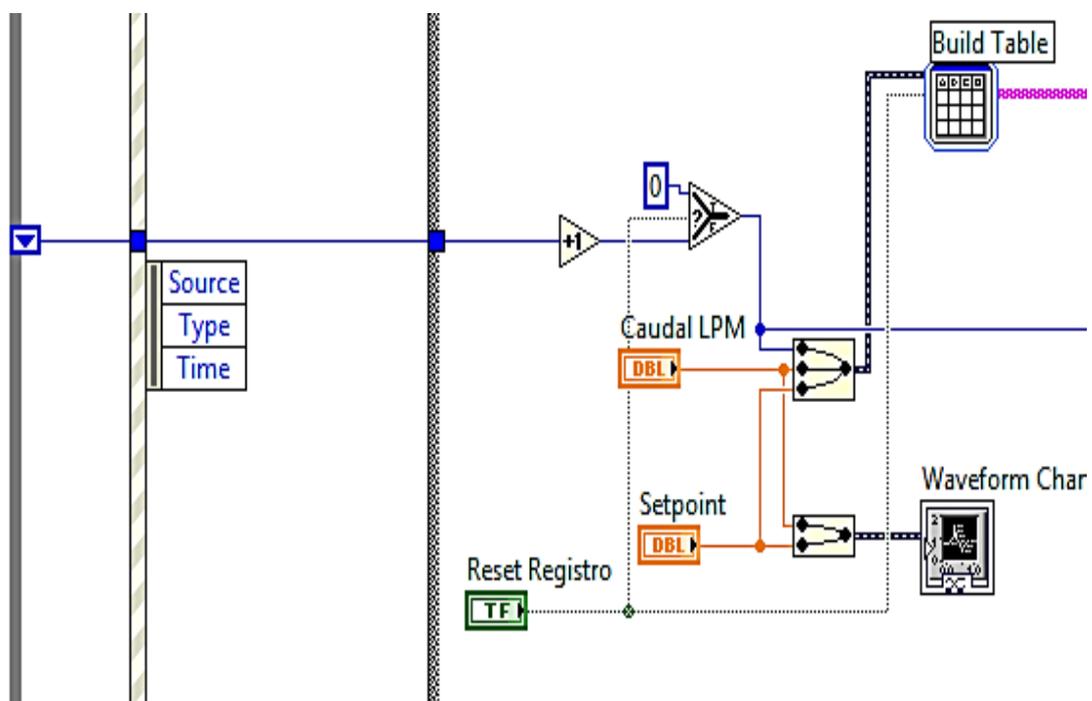


FIGURA 22. Lectura, visualización y generación de registro.

- **Exportar el registró de datos a Excel en formato de tabla**

La exportación de datos desde LabVIEW a Excel se lo realiza mediante la paleta de funciones del diagrama de bloques >> **Report Generation >> Excel Specific**. A continuación se presentan los arreglos necesarios para realizar la exportación de datos y creación de una gráfica en Excel. Los arreglos se encuentran dentro de una estructura de caso (verdadera) para poder generar la exportación al presionar un controlador tipo booleano.

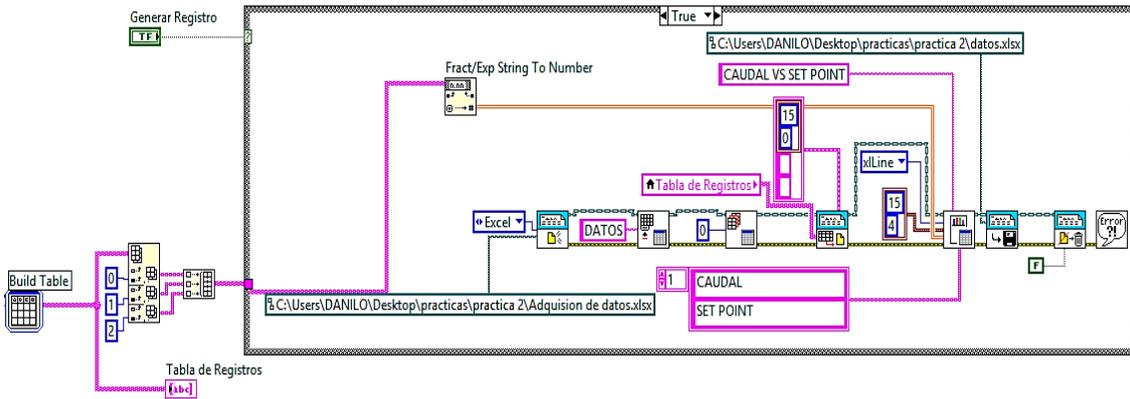


FIGURA 23. Exportar el registró de datos a Excel en formato de tabla.

Todos los arreglos antes mencionados se encuentran dentro de una estructura de caso (verdadera) para su funcionamiento, esto se lo consigue mediante un indicador tipo booleano enlazado a la etiqueta de run variador. A su vez, esta estructura se encuentra dentro de otra estructura de evento que registra datos cada 100 milisegundos, y por último todo se encuentra dentro de una estructura while loop.

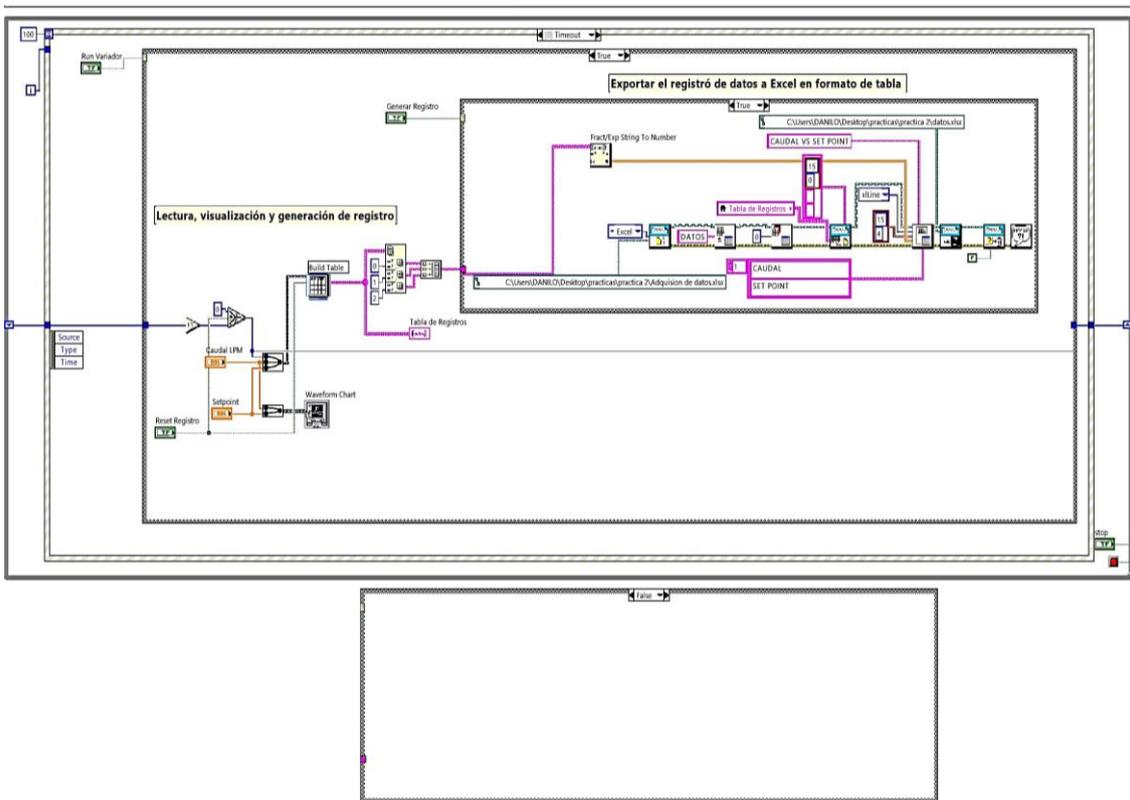


FIGURA 24. Diagrama de bloques de LabVIEW parte 1.

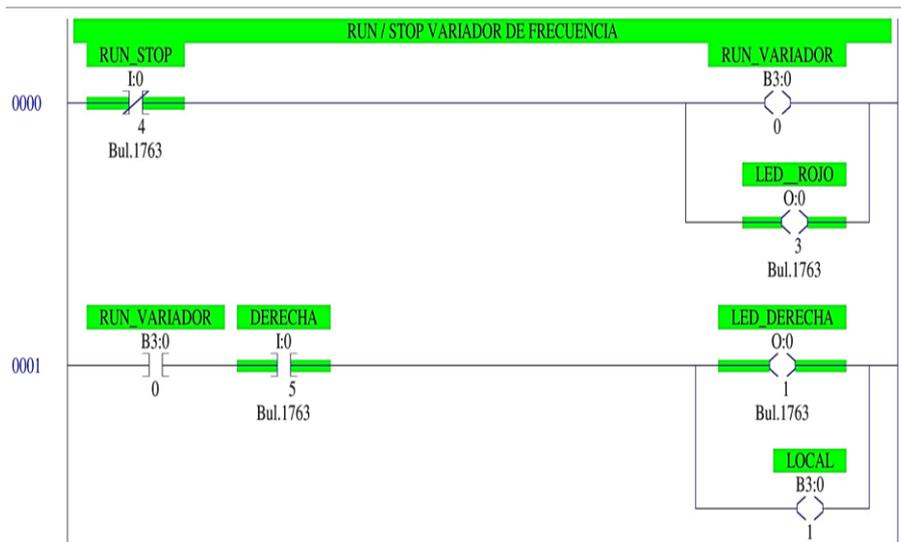
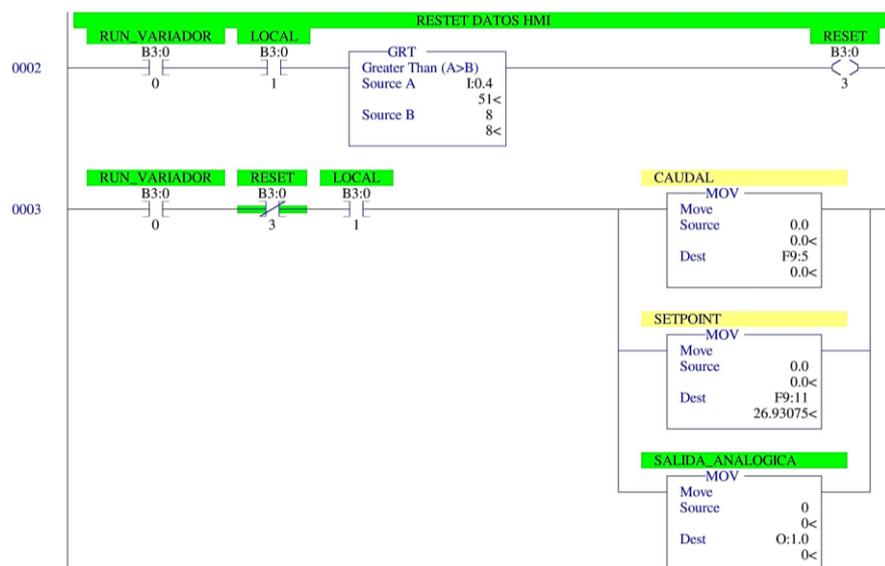


FIGURA 27. Líneas de programación 0 y 1.

En la línea 2, colocamos un **XIC (B3:0/0)** y un **XIC (B3:0/1)** en serie para activar la línea de programación. Adicionalmente usaremos la instrucción **GRT (I:0.4>8)** como condición de inicio para activar un **OTE (B3:0/0)** que servirá como reset en la siguiente línea.

En la línea 3, colocamos un **XIC (B3:0/0)**, un **XIC (B3:0/1)** y un **XIO (B3:0/3)** en serie para activar la línea de programación. Adicionalmente utilizaremos la instrucción **MOV** en paralelo para mover un cero cuando la línea sea verdadera a las direcciones: **F9:5, F9:11, O:0.1** independientemente.



En la línea 4, colocamos un **XIC (B3:0/0)** para activar la línea de programación, además de un **MOV** para mover la dirección **I:0.4** a un archivo de numero entero **N7:0**.

En la línea 5, colocamos un **XIC (B3:0/0)** para activar la línea de programación. Adicionalmente usaremos la instrucción **GRT (I:0.4>25)** como condición de inicio para activar un **OTE (B3:0/4)** que servirá para activar la siguiente línea.

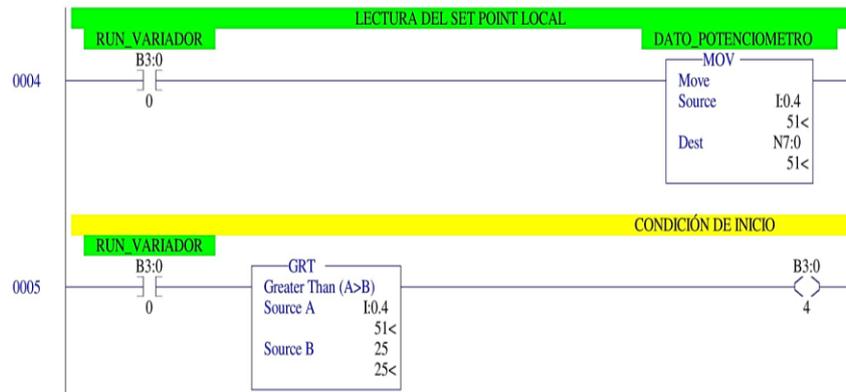


FIGURA 29. Líneas de programación 4 y 5.

En la línea 6, colocamos un **XIC (B3:0/0)** y un **XIC (B3:0/4)** para activar la línea de programación. Adicionalmente colocamos las siguientes instrucciones en paralelo: 3 **MUL**, un **ADD** y un **SUB** para realizar el ingreso de la ecuación de la linealidad del setpoint.

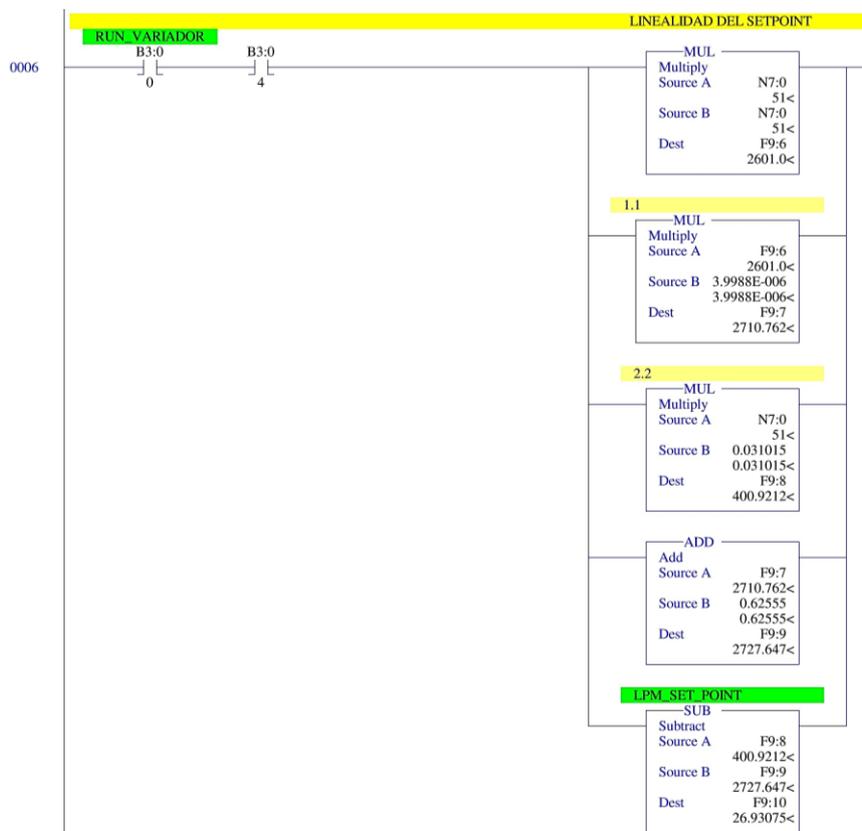


FIGURA 30. Líneas de programación 6.

En la línea 7, colocamos un **XIC (B3:0/0)** y un **XIO (B3:0/4)** para activar la línea de programación y poder usar un **MOV** para mover un cero a la dirección **F9:10**.



FIGURA 31. Línea de programación 7.

En la línea 8, colocamos un **XIC (B3:0/0)** para activar la línea de programación y poder usar un **MOV** para mover la dirección **HSC:0.ACC** a la dirección de número entero **N7:2**.

En la línea 9, colocamos un **XIC (B3:0/0)** y un **XIO (T4:1/DN)** para activar la línea de programación. Adicionalmente utilizamos la instrucción **TON** y la dirección **T4:1** para activar el **XIO (T4:1/DN)** y el **XIC (T4:1/DN)** cada 50 centésimas de segundo.

En la línea 10, colocamos un **XIC (B3:0/0)** y un **XIC (T4:1/DN)** para activar la línea de programación. Adicionalmente utilizamos la instrucción **RAC** en la dirección **HSCO** para resetear el valor acumulado, además de un **MOV** en paralelo con las direcciones **N7:2** a **N7:3** para obtener el número de pulsos del sensor cada 50 centésimas de segundo.

En la línea 11, colocamos un **XIC (B3:0/0)** y un **GRT (N7:3 > 2)** para activar la línea de programación. Adicionalmente utilizamos un **OTE (B3:5)** que servirá para activar la siguiente línea.

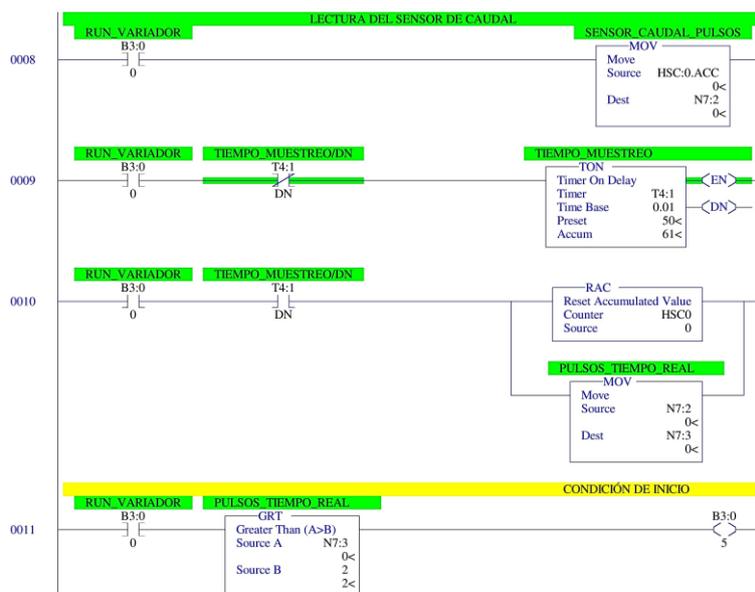


FIGURA 32. Línea de programación 8, 9, 10 y 11.

En la línea 12, colocamos un **XIC (B3:0/0)** y un **XIC (B3:0/4)** para activar la línea de programación. Adicionalmente colocamos las siguientes instrucciones en paralelo: 3 **MUL**, un **ADD** y un **SUB** para realizar el ingreso de la ecuación de la linealidad del sensor de flujo de efecto hall.

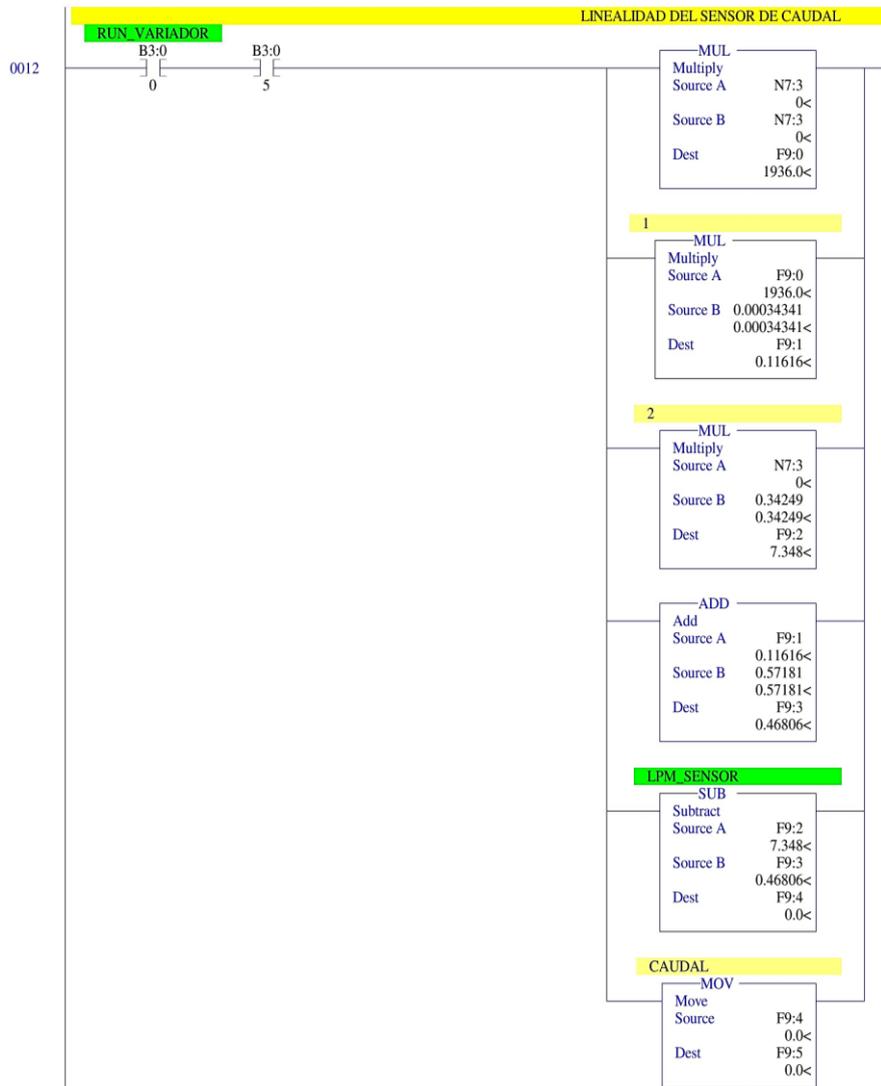


FIGURA 33. Línea de programación 12.

En la línea 13, colocamos un **XIC (B3:0/0)** para la activación de la línea. Adicionalmente utilizamos la instrucción **SCP** para escalar un número desde **F9:4** a **N7:5**, con las siguientes condiciones: ingreso mínimo es 0, ingreso máximo es 27, escala mínima es 0 y escala máxima es 16383. Esta es la variable de proceso.

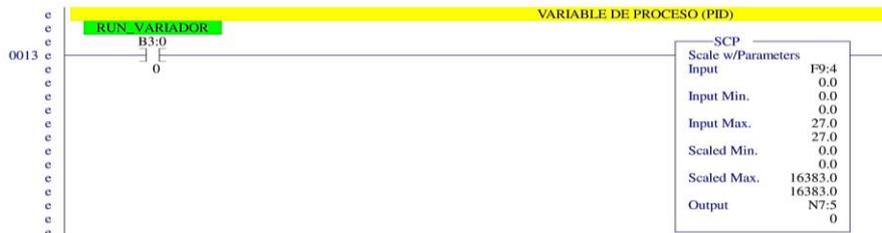


FIGURA 34. Línea de programación 13.

En la línea 14, colocamos un **XIC (B3:0/0)** y un **XIO (B3:0/5)** para activar la línea de programación y poder usar un **MOV** para mover un cero a la dirección **F9:4**.

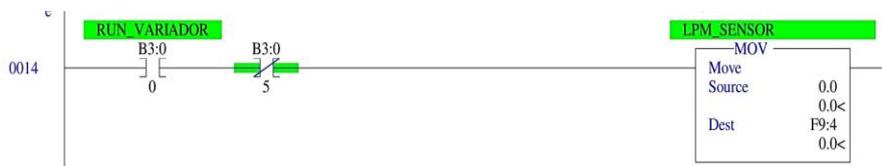


FIGURA 35. Línea de programación 14.

En la línea 15, colocamos un **XIC (B3:0/1)** para activar la línea de programación y poder usar un **MOV** para mover la dirección **F9:10** a **F9:11**.

En la línea 16, colocamos un **XIC (B3:0/1)** para la activación de la línea. Adicionalmente utilizamos la instrucción **SCP** para escalar un número desde **F9:10** a **PD11:0.SPS**, con las siguientes condiciones: ingreso mínimo es 0, ingreso máximo es 27, escala mínima es 0 y escala máxima es 1023. Este es el setpoint de la instrucción de PID.

En la línea 17, colocamos un **XIC (B3:0/1)** para la activación de la línea. Adicionalmente utilizamos la instrucción **PID** con la dirección de archivo **PD11:0**, la variable de proceso ingresa en **N7:5** y la variable controlada se la obtiene en **N7:6**.

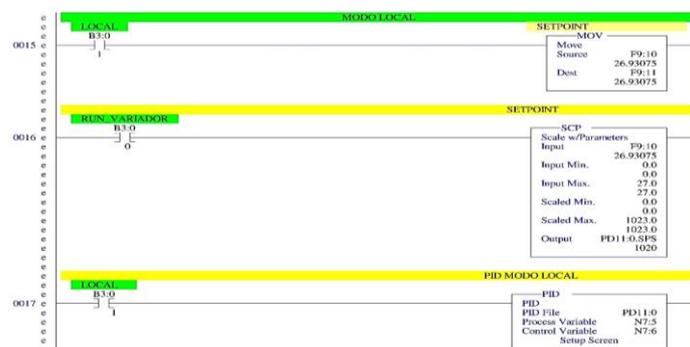


FIGURA 36. Línea de programación 15, 16, 17.

En la línea 18, colocamos un **XIC (B3:0/0)** para la activación de la línea. Adicionalmente utilizamos la instrucción **SCL** para escalar el dato de la dirección **N7:6** a valor de salida analógica en **N7:7**.

En la línea 19, colocamos un **XIC (B3:0/1)** y un **XIC (B3:0/3)** para activar la línea de programación y poder usar un **MOV** para mover el dato de **N7:7** a la salida **O:1.0**.

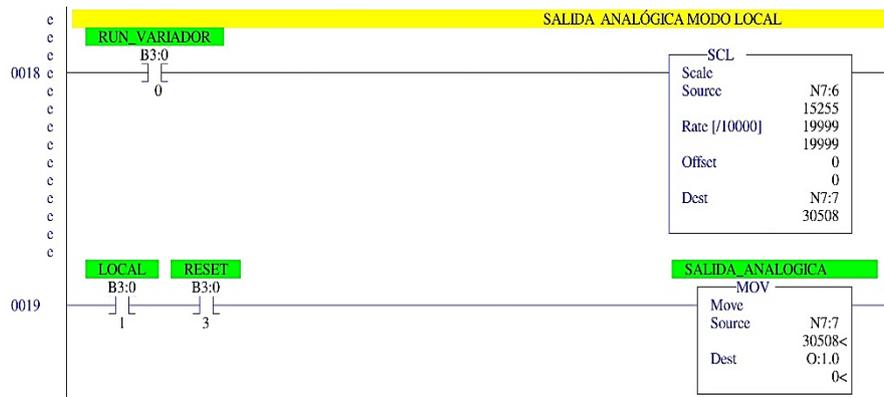


FIGURA 37. Línea de programación 18 y 19.

En la línea 20, colocamos un **XIC (B3:0/0)** para activar la línea de programación y poder usar la instrucción **MOV** en paralelo para mover los datos de caudal y setpoint a la interfaz gráfica.

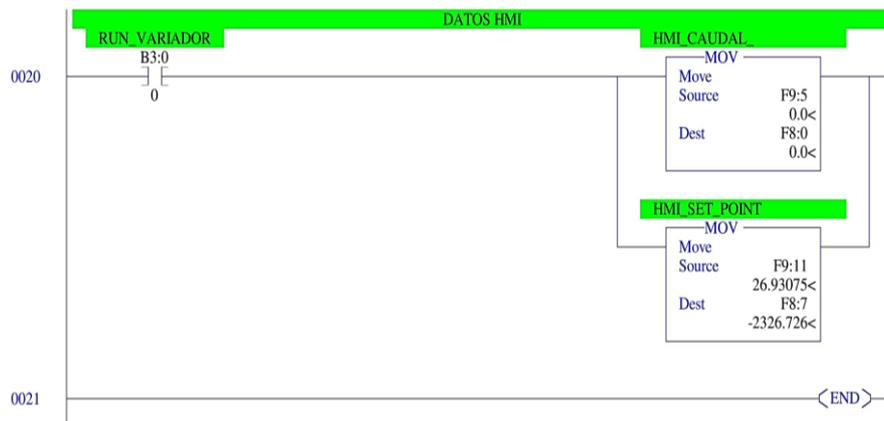


FIGURA 38. Línea de programación 20.

2.6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

PRACTICA N° 3

3 TEMA:

Identificación del sistema de caudal.

3.1 OBJETIVOS

- Asociar al estudiante con system identification toolbox de MATLAB para la identificación de sistemas dinámicos.
- Encontrar la función de transferencia del sistema.
- Realizar el ajuste del controlador PID mediante el método de Ziegler Nichols.

3.2 MARCO TEÓRICO

3.2.1 CONCEPTO DE SISTEMA

Un sistema es donde las variables de diferentes tipos convergen para producir señales visibles al usuario. En donde las señales que son observables serán las salidas del sistema, las señales que el usuario puede manipular serán las entradas del sistema, y las señales que influyen o interfieren en el sistema y que no pueden ser manipuladas se denominan perturbaciones.

3.2.2 TIPOS DE MODELOS DE UN SISTEMA

Un modelo básicamente es una herramienta utilizada para la identificación de sistemas, la cual permite predecir el comportamiento de la planta sin necesidad de experimentar en ella.

3.2.2.1 MODELOS MENTALES, INTUITIVOS O VERBALES

Carecen de cualquier formalidad matemática.

3.2.2.2 MODELOS NO PARAMÉTRICOS

Requieren de la utilización de tablas o gráficos para describir sus propiedades dinámicas mediante un número no finito de parámetros.

3.2.2.3 MODELOS MATEMÁTICOS

Para modelos más avanzados los cuales requieran la descripción de los nexos entre las variables del sistema. Esto pueden clasificarse en:

- **Determinísticos o estocásticos.** Expresan una relación entre la entrada y salida mediante una ecuación exacta.
- **Dinámicos o estáticos.** La salida depende únicamente de la entrada en el mismo instante, existe una relación directa entre entrada y salida.
- **Continuos o discretos.** En ambos casos trabajan con señales continuas y muestreadas respectivamente, y son determinados mediante ecuaciones diferenciales.

3.2.3 MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE MODELOS

Existen dos métodos para la obtención de un modelo del sistema:

- **Modelado teórico.** Es un método analítico el cual describe el comportamiento dinámico de un fenómeno o de un proceso, mediante las leyes básicas de la física.
- **Identificación del sistema.** Método experimental en el cual se obtiene el modelo del sistema mediante la recolección de datos reales de la planta bajo estudio.

3.2.4 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS

Identificar, es determinar experimentalmente el modelo dinámico de un sistema mediante la obtención de datos de las entradas y salidas, el cual reproducirá dicho modelo con la suficiente exactitud para los fines deseados.

3.2.5 PROCESO DE IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS

La identificación de sistemas comprende los siguientes pasos:

- **Obtención de datos de entrada y salida.-** Mediante la aplicación de una señal de entrada se procede a excitar el sistema y se registra la evolución de entrada y salida durante un intervalo de tiempo.

- **Tratamiento previo de los datos registrados.-** Generalmente los datos registrados están acompañados de ruidos o imperfecciones las cuales tienen que ser corregidos o eliminados antes del proceso de identificación.
- **Elección de la estructura del modelo.-** Si se desea obtener un modelo paramétrico, se debe determinar la estructura deseada para dicho modelo.
- **Obtención de parámetros del modelo.-** Se estima los parámetros que mejor se ajusten a la respuesta del modelo, y a los datos de entrada y salida obtenidos experimentalmente.
- **Validación del modelo.-** Determina si la respuesta del modelo obtenido satisface el grado de exactitud para la aplicación en cuestión. Si el modelo no es validado puede a que se deba a que los datos de entrada-salida no proporcionen a suficiente información dinámica del sistema o el criterio de ajustes de los parámetros del sistema.

3.2.6 MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN

Existen diversos métodos de identificación los cuales se los puede clasificar dependiendo del modelo a utilizar.

- **Métodos no paramétricos.-** Se puede definir el modelo mediante el uso de gráficas, tablas o mediante un número no finito de muestras.
- **Métodos paramétricos.-** Se utiliza métodos cuantitativos los cuales describen la interacción de las variables de un proceso. Además se requiere de la elección de una posible estructura de modelo, criterio de ajuste de los parámetros y la estimación de los parámetros que mejor se ajusten al modelo y a los datos experimentales.

3.2.7 FAMILIAS DE MODELOS DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

3.2.7.1 MODELO ARX

Probablemente el modelo ARX sea a relación entrada salida más simple que se puede obtener sea la proveniente de una descripción del sistema como una ecuación lineal en diferencias. De manera explícita el modelo ARX se expresa según:

$$y(t) + a_1y(t - 1) + a_2y(t - 2) + \dots + a_ny(t - n_a) = b_1u(t - 1) + b_2u(t - 2) + \dots + b_nu(t - n_b) + e(t)$$

Esto dará lugar a un sistema de ecuaciones donde las incógnitas a y b serán los coeficientes de la función de transferencia discreta.

3.2.7.2 ESTRUCTURA ARMAX

La estructura ARMAX, posee una desventaja la cual es la escasas y falta de libertad en la descripción del término de perturbación, pero es posible incorporar una mayor flexibilidad al modelo si se agrega un término conocido como medida en movimiento.

$$y(t) + a_2y(t - 1) + a_2y(t - 2) + \dots + a_ny(t - n_a) = b_1u(t - 1) + \dots + b_nu(t - n_b) + e(t) + c_1e(t - 1) + \dots + c_n e(t - n_c)$$

Esto da lugar a un sistema de ecuaciones donde las incógnitas son los coeficientes del modelo discreto, cuyas soluciones se obtienen por predicción del error con el método de la máxima Verosimilitud. Para esto se usa la función ARMAX.

3.2.7.3 ESTRUCTURA ARARX

En lugar de modelar el termino ruido como en la estructura ARX y como una medida en movimiento como en la estructura ARMAX, se puede describir esta perturbación como una auto regresión.

$$A(q).y(t) = B(q).u(t) + \frac{1}{D(q)}.e(t)$$

3.2.7.4 ESTRUCTURA ARARMAX

Una forma más general aun es la que introduce la descripción ARMA en la estructura ARARX, dando como resultado el modelo ARARMAX.

$$A(q).y(t) = B(q).u(t) + \frac{C(q)}{D(q)}.e(t)$$

3.2.7.5 ESTRUCTURA DE ERROR DE SALIDA

La estructura de error de salida se representa de la siguiente forma.

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t - nk) + e(t)$$

$$\text{Con } F(q) = 1 + f_1q^{-1} + \dots + f_{n_f}q^{-n_f}$$

3.2.7.6 ESTRUCTURA BOX- JENKINS

El desarrollo del modelo de error de salida es para adicionar al modelo las propiedades del ruido en la salida. Pero si describimos esto mismo en el marco de un modelo ARMAX llegamos al siguiente resultado

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} u(t) + \frac{C(q)}{D(q)} e(t)$$

Las funciones de transferencia G y H son parametrizadas en forma independiente como las funciones racionales.

$$\hat{y}(t, \Theta) = \frac{D(q).B(q)}{C(q).F(q)} \cdot u(t) + \frac{C(q)-D(q)}{C(q)} y(t)$$

3.2.8 SINTONIZACIÓN PID POR EL MÉTODO DE ZIEGLER – NICHOLS

El método de Ziegler – Nichols está basado en la determinación de algunas características de la dinámica del proceso. Es ampliamente utilizado ya que permite realizar el ajuste o la sintonización de forma empírica de un regulador PID, de forma en la cual no es necesario conocer las ecuaciones del sistema o de la planta.

3.2.8.1 MÉTODO DE LA RESPUESTA EN ESCALÓN

Este método está basado en la obtención de la respuesta del proceso en forma de un escalón lazo abierto, que presentan tiempos de retardos desde que reciben la señal de control hasta que comienzan a actuar. Para poder calcular los parámetros se debe trazar una recta tangente a la señal de salida del sistema.

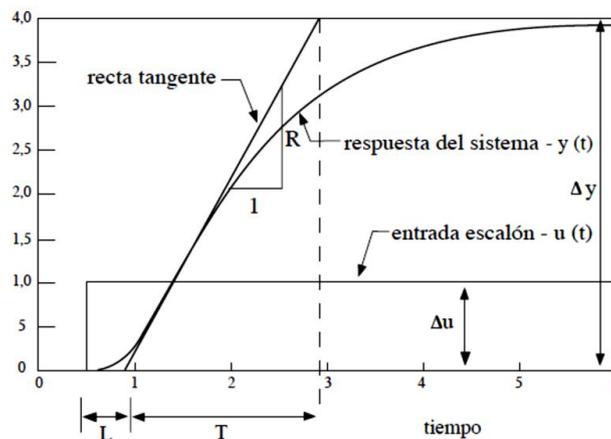


FIGURA 1. Método escalón Ziegler – Nichols.

La curva se caracteriza por dos parámetros que son el tiempo de retardo L y la constante del tiempo T . El tiempo de retardo y la constante del tiempo son determinados por una recta tangente la cual es dibujada en el punto de inflexión de la curva, y determinando las intersecciones de la tangente con el eje del tiempo y la línea de estabilización del sistema o $c(t)=K$.

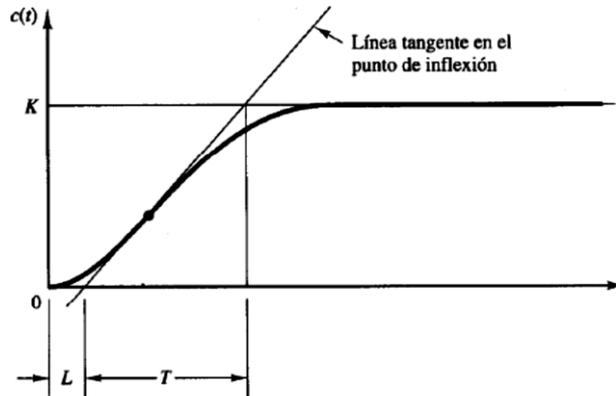


FIGURA 2. Curva de respuesta de método escalón.

De esta manera Ziegler y Nichols establecieron los valores de K_p , T_i y T_d , de acuerdo a las formulas establecidas en la siguiente tabla.

TABLA 1. Constantes PID.

	K_p	T_i	T_d
P	T/L	∞	0
PI	$0,9T/L$	$L/0,3$	0
PID	$1,2*T/L$	$2*L$	$0,5*L$

Fuente: Martínez S. Reglas De Sintonización Para Controladores PID

Tabla 2. Valores de K_i y K_d .

K_i	K_d
K_p/T_i	K_p*T_d

3.3 EQUIPOS Y HERRAMIENTAS

- PLC Allen Bradley MicroLogix 1100 y módulo de expansión (1762-IF2OF2).
- Los programas: BOOT/DHCP Server, RSLinx Classic Lite, RSLogix Micro Starter Lite, Microsoft Office, y MATLAB.
- Variador de frecuencia Schneider ATV312HU11M2.
- Sensor de flujo YF-S201.
- Rotámetro.
- Potenciómetro.
- Luces pilotos.
- Selector de 2 posiciones.
- Botonera de ON-OFF y de paro de emergencia.
- Bomba trifásica ½ HP.

3.4 TRABAJO PREPARATORIO

Investigar los pasos para realizar:

- La Identificación del sistema, obtener la función de transferencia utilizando las herramientas de MATLAB.
- El cálculo de los coeficientes del PID por el método de Ziegler-Nichols.

Familiarizarse con:

- Con la herramienta system identification toolbox de MATLAB.
- Con los comandos necesarios para realizar el cálculo de los coeficientes del PID por el método de Ziegler-Nichols en MATLAB.

3.5DESARROLLO

3.5.1 EXPORTACIÓN DE DATOS DE EXCEL A MATLAB Y OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

Una vez obtenidos los valores de setpoint y de caudal en una hoja de Excel, se deberá proceder a la exportación de dichos valores al workspace de MATLAB.

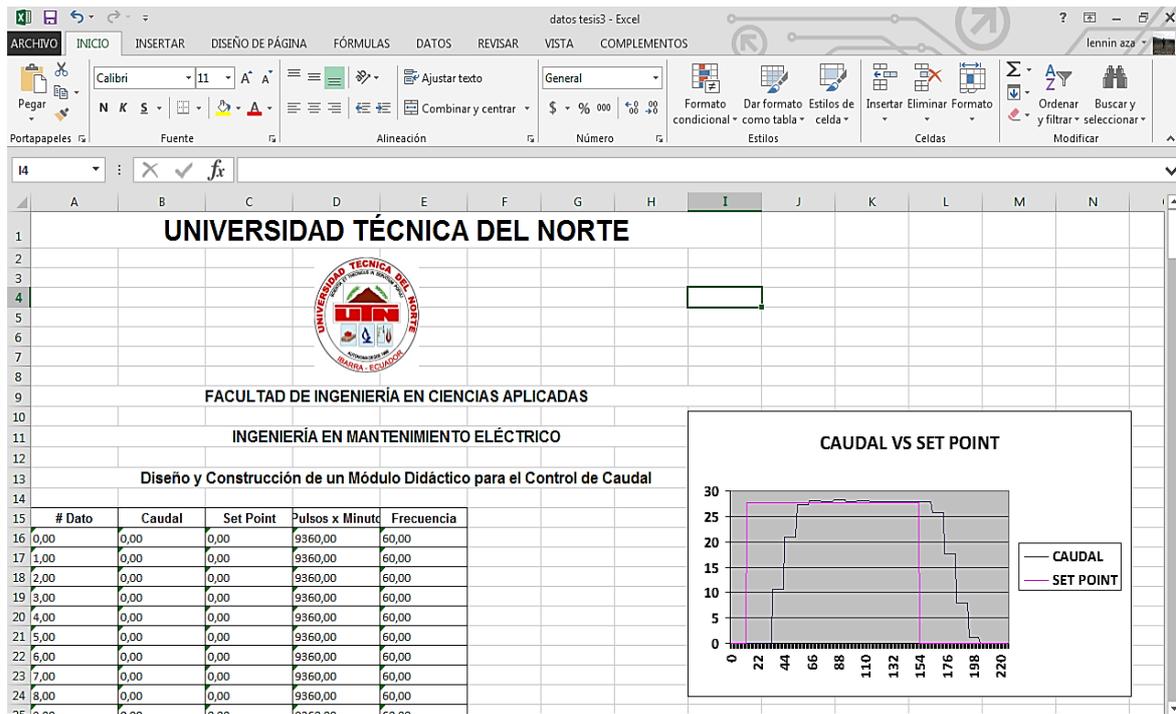


FIGURA 3. Hoja de Excel de adquisición de datos.

En el workspace de MATLAB se creara las variables realizando un clic secundario y escogiendo la opción new, a esta nueva variable se la nombrara setpoint, de igual forma se lo realizará con la variable del caudal. Se debe realizar doble clic en la variable para poder desplegar la tabla de valores, en esta se ingresara los valores del setpoint y del caudal. Los valores de las variables deben ser ingresados de la hoja de Excel copiando los datos de setpoint y pegarlos en la tabla de valores de MATLAB.

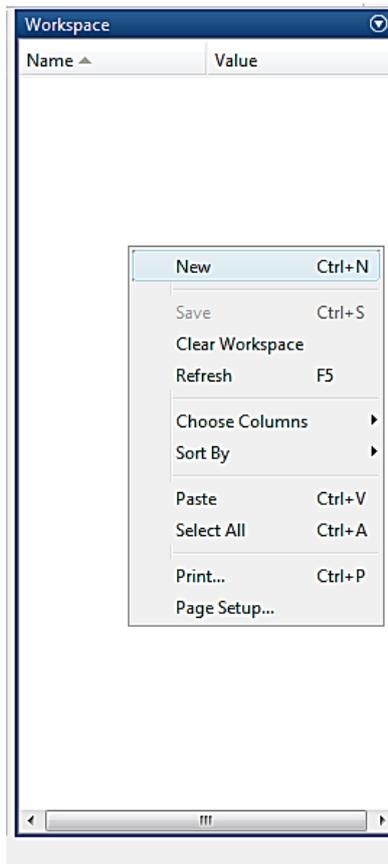


Figura 4. Creación de variables.

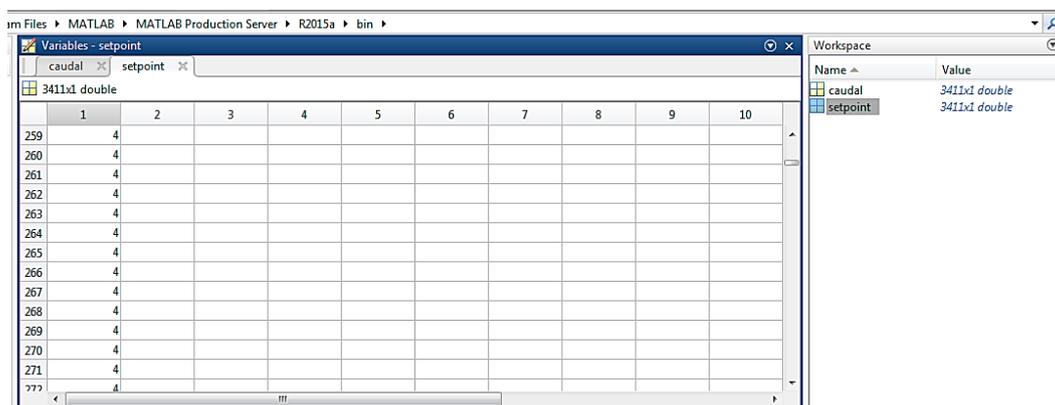


Figura 5. Hoja de datos de las variables.

Una vez creadas las variables del caudal y setpoint, se utiliza el comando `>> ident` en el Comand window de MATLAB para abrir el System Identification.

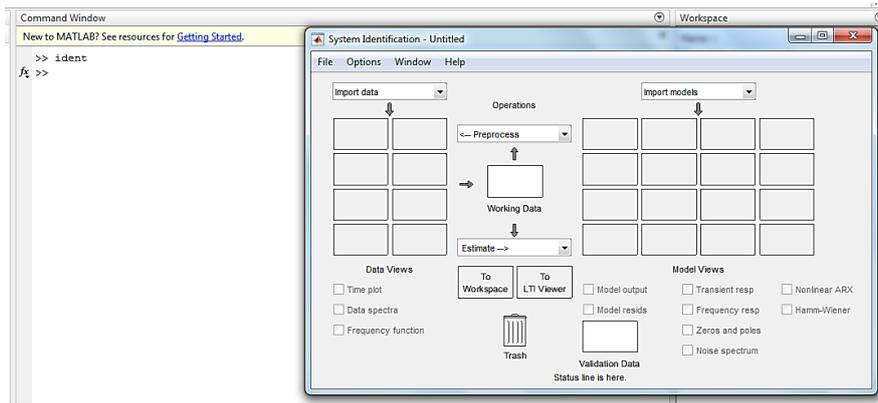


FIGURA 6. System Identification.

Una vez abierto el System Identification se procede a la importación de los respectivos datos, para eso se debe ubicar en la pestaña de **import data** y escoger la opción **time domain data** porque que los datos obtenidos son en función del tiempo.

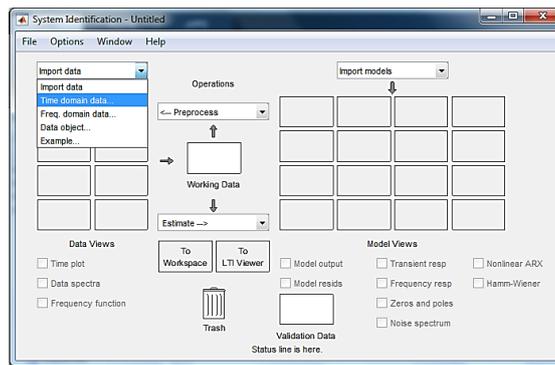


FIGURA 7. Importación de datos en system identification.

Una vez desplegada la ventana de Import data se tendrá que dar los valores de las constantes creadas anteriormente en el Workspace de MATLAB.

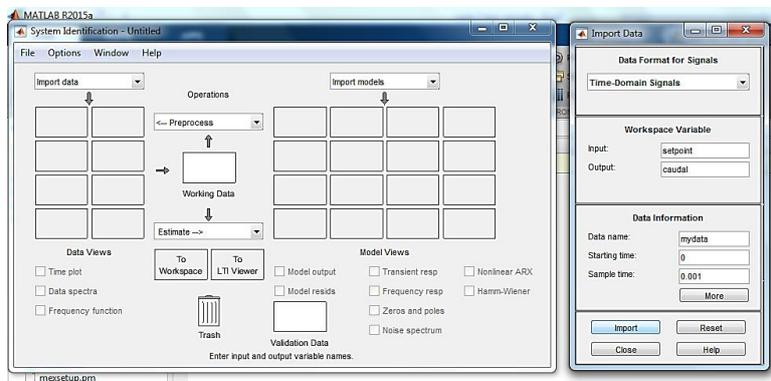


FIGURA 8. Importación de datos desde el workspace de MATLAB.

Realizada la importación de las variables se debe ubicar en la pestaña **Operations** y seleccionar la opción **Quick star**, la cual realiza el tratamiento y selección de los datos.

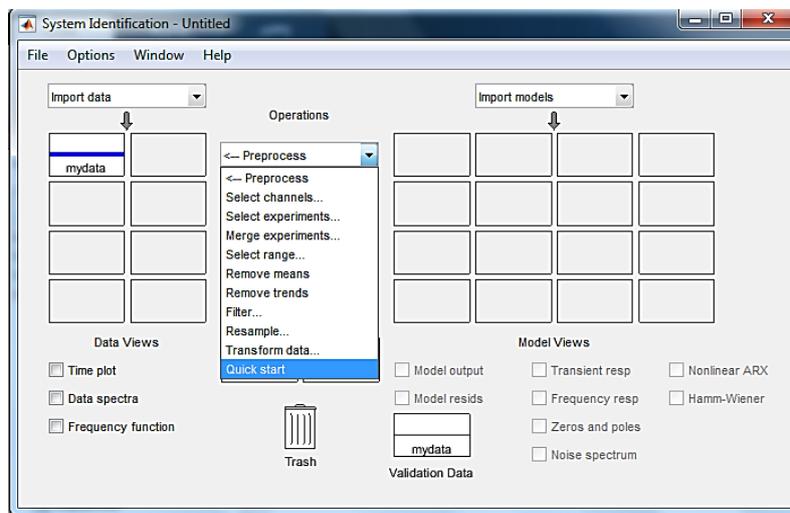


FIGURA 9. Selección de datos mediante la función Quick star.

Una vez realizada la selección de los datos se tiene que escoger en la pestaña **Working data** la opción **Transfer función model**.

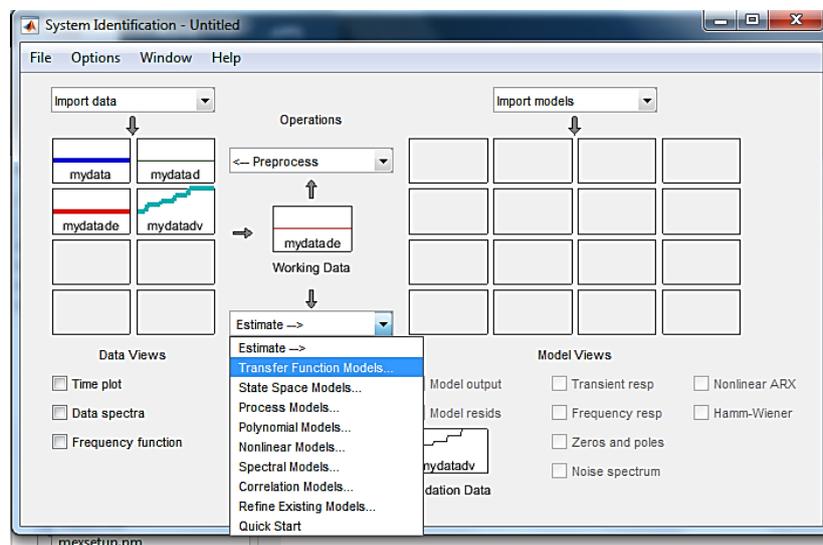


FIGURA 10. Selección de la función de transferencia.

A continuación se desplegará una ventana en la cual se debe seleccionar el número de polos y ceros que la función de transferencia requiera. En esta parte es recomendable realizar una amplia selección de polos y ceros para poder seleccionar la función de transferencia que mejor se ajuste al sistema.

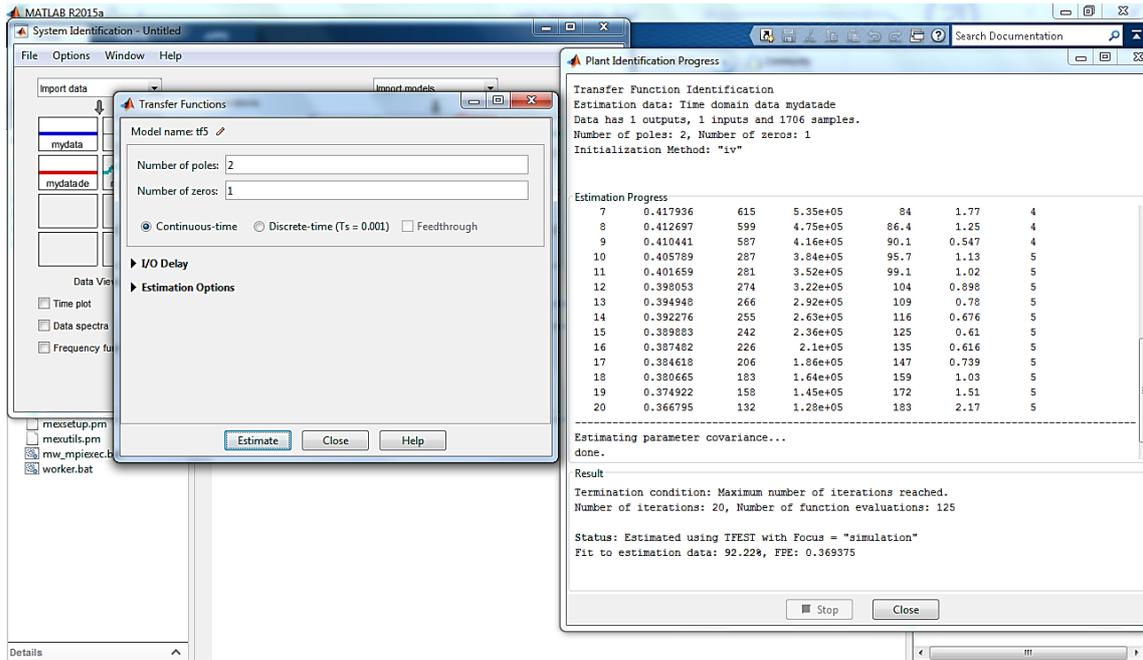


FIGURA 12. Selección de polos y ceros para la función de transferencia.

Una vez que el programa termine de realizar las estimaciones necesarias para cada función de transferencia, se obtendrá las respectivas curvas de la misma. Para poder apreciar de mejor manera los resultados se tiene que seleccionar la opción **Model output**.

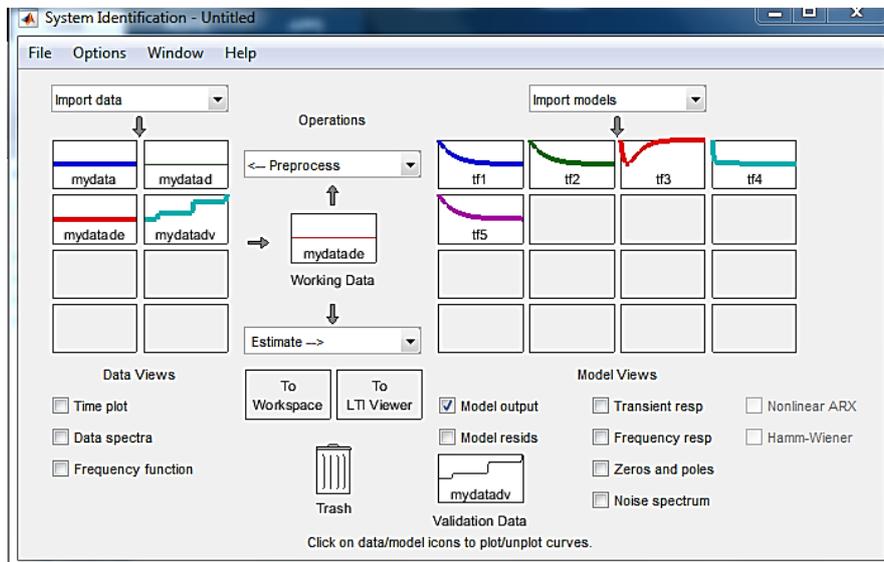


Figura 13. Curvas de las funciones de transferencia.

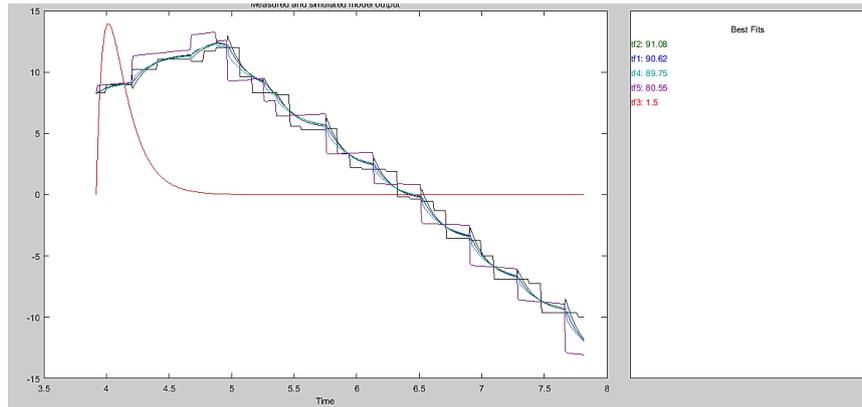


FIGURA 14. Curvas y resultados de la función de transferencia.

Para seleccionar la función de transferencia que se ajuste a la planta diseñada se debe escoger la que tenga un resultado o estimación superior al 60%.

Una vez que se haya obtenido la función de transferencia se la exportara al workspace simplemente arrastrándola a la opción >>to workspace.

3.5.2 SINTONIZACIÓN PID MEDIANTE EL MÉTODO DE ZIEGLER – NICHOLS

Una vez obtenida la función de transferencia se debe realizar la sintonización PID de la planta, se utiliza el método de Ziegler – Nichols por su sencillez y fácil aplicación. A continuación se presenta el código generado en MATLAB, el cual ayuda a realizar el cálculo de la constante del tiempo y del tiempo de retardo.

```
>> H=tf3;%función de transferencia
>> step(H);
>> hold on;
>> dt=0.01;%tiempo de muestreo
>> t=0:dt:2;%vector de tiempo
>> y=step(H,t)';%respuesta en escalón
>> dy=diff(y)/dt;%derivada de la respuesta en escalón
>> [m,p]=max(dy);%punto de inflexión
>> y1=y(p);
>> t1=t(p);
>> L=t1-y1/m;%tiempo de retardo
>> T=(y(end)-y1)/m+t1-L;%constante de tiempo
>> plot(t,y,'b',[0 L L+T t(end)],[0 0 y(end) y(end)],'k')
>> plot(L,0,'*r')
>> plot(T+L,y(end),'*b')
```

FIGURA 15. Código de Matlab para cálculo de Ziegler – Nichols.

Una vez que se obtenga la constante del tiempo y el tiempo de retardo se calcula las constantes PID con las siguientes formulas de la tabla 1.

	Kp	Ti	Td
P	T/L	∞	0
PI	0,9T/L	L/0,3	0
PID	1,2*T/L	2*L	0,5*L

Con los valores de Kc, Ti, y Td, implementar en el PLC y observar el comportamiento del sistema.

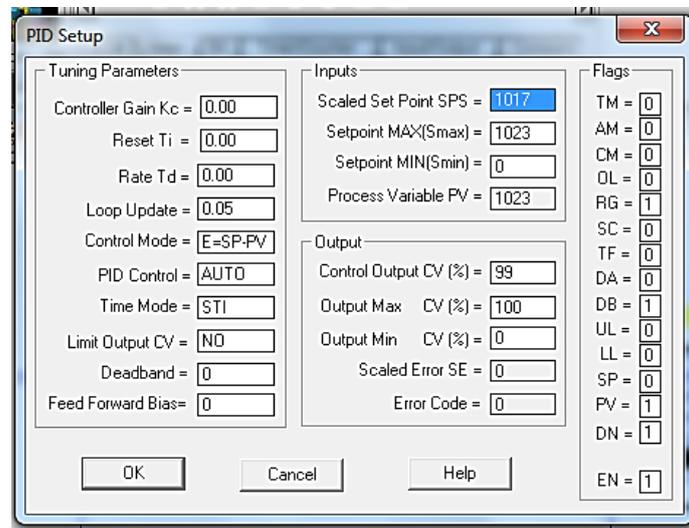


FIGURA 16. Implementación del PID en el PLC.

Una vez calculados estos valores se podrán determinar las constantes de Ki y Kd.

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}$$

$$K_i = \frac{2.0432}{0.3054}$$

$$K_i = 6.6902$$

$$K_d = K_p * T_d;$$

$$K_d = 2.0432 * 0.0763;$$

$$K_d = 0.1558$$

Con las constantes Kp, Kd, y Ki se realizara el cálculo de la función de transferencia del controlador PID, además de la función de transferencia en lazo cerrado

$$G(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s}$$

$$H_{lc} = \frac{G(s) * H(s)}{1 + G(s) * H(s)}$$

Con la función en lazo cerrado en simulink se creara un diagrama de bloques para observar de mejor manera el controlador PID

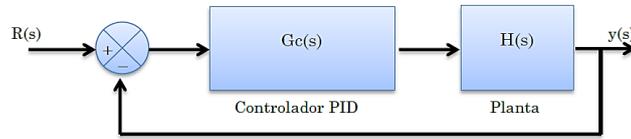


FIGURA 17. Diagrama de bloques del sistema PID y la planta.

En caso de que el controlador PID requiera un refinamiento se utilizara el Autotuning PID de Matlab.

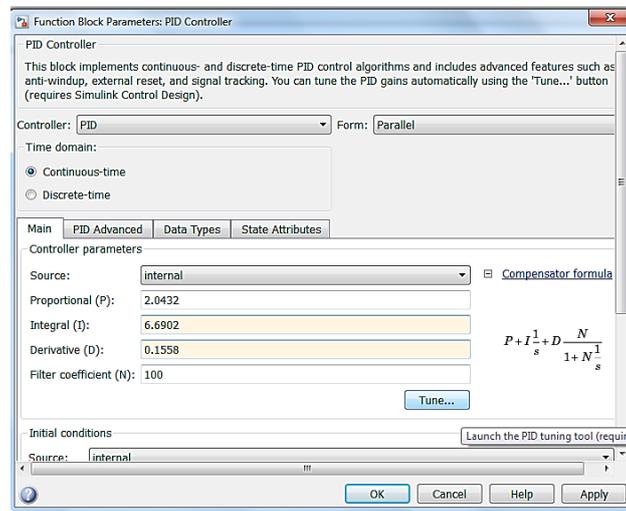


FIGURA 18. Auto tune del PID.

3.6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES