

AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS. DESARROLLO DE MATERIAL
DIDÁCTICO BASADO EN EL PLC COMPACTLOGIX 1769-L32E

JOSÉ ANTONIO SUÁREZ HERNÁNDEZ
WYLLINTON ARMANDO FERNÁNDEZ DUARTE



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES BUCARAMANGA

2016

AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS. DESARROLLO DE MATERIAL
DIDÁCTICO BASADO EN EL PLC COMPACTLOGIX 1769-L32E

JOSÉ ANTONIO SUÁREZ HERNÁNDEZ
WYLLINTON ARMANDO FERNÁNDEZ DUARTE

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico

Director:

MSC. Julio Augusto Gelvez Figueredo

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2016

*A Dios, por darme la fuerza y el valor para cumplir cada una de mis metas
logradas hasta hoy.*

*A mi familia y en especial a mi madre Claudia Hernández que en todo momento
estuvo apoyándome incondicionalmente.*

*A mis profesores y en especial a nuestro director Julio Gelvez por su valiosa ayuda
en cada una de las etapas de este trabajo de grado.*

José Antonio Suárez Hernández

*A DIOS todo poderoso, por mostrarme el camino y proporcionarme las
herramientas para cumplir con el objetivo propuesto.*

*A mi madre Betty Marlene Duarte por su cariño, esfuerzo y dedicación para
hacerme una persona de bien.*

*A mi padre Crisanto Fernández Delgado por ser un gran ser humano siendo mí
ejemplo a seguir.*

*A mis hermanos Guerly Milena Fernández Duarte y Juan Carlos Fernández Duarte
por ser un apoyo incondicional.*

*Al profesor Julio Augusto Gelvez Figueredo por su orientación y gran apoyo
siempre mostrando una gran disposición.*

A todos aquellos quienes estuvieron pendientes porque esta meta se lograra.

Wyllinton Armando Fernández Duarte

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	16
1 GENERALIDADES DEL PROYECTO	18
1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....	18
1.2 PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	20
1.3 OBJETIVOS	21
1.3.1 Objetivo general	21
1.3.2 Objetivos específicos	21
2 DESCRIPCION MONTAJE Y TABLERO DE CONTROL.....	22
2.1 DESCRIPCION DEL SISTEMA.....	22
2.2 TABLERO DE CONTROL	23
2.2.1 PLC COMPACTLOGIX 1769-L32E	25
2.2.2 FUENTES DE ALIMENTACION.....	32
2.2.3 MODULOS DE ENTRADA Y SALIDA	35
2.2.3.1 Módulo de entradas digitales 1769-IQ16.....	37
2.2.3.2 Módulo de salidas digitales 1769-OB16.....	39
2.2.3.3 Módulo de entradas y salidas analógicas 1769- IF4XOF2	40
2.2.4 CONVERTOR ADAM-4520.....	44
2.3 PANELVIEW	45
2.4 TARJETA DE ADQUISICION DE DATOS	47
3 IDENTIFICACIÓN DE LOS MODELOS Y DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DE LOS SISTEMAS.....	49
3.1 SISTEMA DE TANQUES ACOPLADOS	49
3.2 HORNO TOSTADOR TIPO RESIDENCIAL.....	51

3.3 MOTOR DE CORRIENTE CONTINÚA DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE ...	53
4 DESCRIPCION LAS PLANTAS EN LABVIEW, ETAPA DE ADECUACION	55
4.1 IMPLEMENTACION DE LAS PLANTAS EN LABVIEW	55
4.1.1 DESCRIPCION DE LOS BLOQUES FUNCIONALES.....	55
4.1.2 PLANTA DE TANQUES ACOPLADOS.....	59
4.1.3 PLANTA PARA HORNO CONTROL CON TRIAC	61
4.1.4 MOTOR DE CORRIENTE CONTINÚA	63
4.2 CIRCUITOS PARA LA ADECUACION DE SEÑAL.....	64
4.2.1 CIRCUITO DE AISLAMIENTO ENTRE LA TARJETA DE ADQUISICIÓN Y EL TABLERO DE CONTROL.....	64
5 DESCRIPCION DEL SOFTWARE DE COMUNICACION, PROGRAMACION Y SIMULACION PARA EL PLC.....	67
5.1 RSLINX	67
5.2 RSLOGIX 5000	68
5.3 RSLOGIX EMULATE 5000	70
5.4 FACTORYTALK VIEW	73
6 OBTENCION DE PARAMETROS DE LOS CONTROLADORES Y CONTROL DE LAS PLANTAS.....	75
6.1 CONTROL DE TEMPERATURA HORNO SIMULADO EN LABVIEW	75
6.2 CONTROL DE VELOCIDAD DEL MOTOR SIMULADO EN LABVIEW	83
6.3 CONTROL DE NIVEL DE TANQUES ACOPLADOS SIMULADOS EN LABVIEW.....	88
6.4 CONTROL DE TEMPERATURA DE UN HORNO TOSTADOR TIPO ELECTRODOMESTICO	93
CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES	95
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	97

BIBLIOGRAFIA	99
ANEXOS	100

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de bloques para el control de la planta real.....	22
Figura 2. Diagrama de bloques para el control de las plantas virtuales.....	23
Figura 3. Tablero de control.....	24
Figura 4. Controlador Compactlogix 1769-L32E.....	25
Figura 5. Características principales del controlador Compactlogix 1769-L32E.....	27
Figura 6. Distribución PLC.....	32
Figura 7. Ubicación de las fuentes de alimentación del tablero de control.....	33
Figura 8. Fuente de alimentación conmutada.....	33
Figura 9. Fuente de alimentación eléctrica 1769-PA2.....	34
Figura 10. Características generales de los módulos I/O.....	36
Figura 11. Convertidor ADAM-4520.....	45
Figura 12. Terminal PanelView Component C600.....	46
Figura 13. Tarjeta de adquisición de datos USB 6009.....	47
Figura 14. Sistema de tanques acoplados.....	49
Figura 15. Diagrama de bloques para el control del horno tostador tipo residencial.....	52
Figura 16. Modelo del motor de corriente continua con excitación independiente.....	53
Figura 17. Boque Control & Simulation Loop.....	56
Figura 18. Bloque DAQ Assistant.....	57
Figura 19. Bloque Transfer function.....	58
Figura 20. Bloque Waveform Chart.....	58
Figura 21. Bloque Merge Signals Function.....	59
Figura 22. Bloque Simulare Signal.....	59
Figura 23. VI Planta tanques acoplados.....	59
Figura 24. VI Horno.....	61
Figura 25. VI Motor de corriente continua.....	63
Figura 26. Encapsulado y descripción pines ISO 122.....	65
Figura 27. Etapa de aislamiento y filtrado de la señal de control.....	66
Figura 28. PCB de la etapa de aislamiento y filtrado de la señal de sensado.....	66

Figura 29. Ventana principal de RSLinx.....	67
Figura 30. Ventana principal de RSLogix 5000.....	68
Figura 31. Descripción ventana principal de RSLogix 5000.....	69
Figura 32. Ventana principal de RSLogix Emulate 5000.....	71
Figura 33. Descripción ventana principal de RSLogix Emulate 5000.....	72
Figura 34. FactoryTalk View.....	73
Figura 35. Ventana de programación de FactoryTalk View.....	74
Figura 36. Lazo cerrado de control sencillo.....	76
Figura 37. Respuesta del horno empleando Simulink con $K_p=2$, $T_i=335$	78
Figura 38. Respuesta del horno para $K_p=2$ y $T_i=335$ empleando LabVIEW.....	79
Figura 39. Respuesta del horno para $K_p=2$ y $T_i=335$ empleando RSLogix 5000.....	80
Figura 40. Respuesta del horno para $K_p=4$ y $T_i=335$ empleando RSLogix 5000.....	81
Figura 41. Respuesta del horno para $K_p=4$ y $T_i=335$ empleando LabVIEW.....	82
Figura 42. Implementación del método Ziegler y Nichols para el control del motor DC excitación independiente en MATLAB - Respuesta al escalón unitario.....	84
Figura 43. Control con transistor (con Carga) empleando el controlador CompactLogix 1769-L32E de Allen Bradley con $K_p=0.01$ $T_i=1$ y $T_d=0.1$, monitoreado en RSLogix 5000.....	86
Figura 44. Control con transistor (con Carga) empleando el controlador CompactLogix 1769-L32E de Allen Bradley con $K_p=0.01$ $T_i=1$ y $T_d=0.1$, monitoreado en LabView.....	87
Figura 45. Curva de la respuesta ante una entrada tipo escalón con forma de S.....	89
Figura 46. Control tanques acoplados empleando el controlador CompactLogix 1769- L32E de Allen Bradley con $K_p=12.016$, $T_i=54.7$ y $T_d=13.67$, monitoreado en LabView.....	91
Figura 47. Control de temperatura de un horno tostador tipo electrodoméstico empleando el controlador CompactLogix 1769-L32E de Allen Bradley con $K_p=4$, $T_i=335$ y un setpoint de $66.25\text{ }^\circ\text{C}$	93

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características del controlador 1769-L32E.....	26
Tabla 2. Modos de control.....	27
Tabla 3. Indicadores de estado del PLC.....	29
Tabla 4. Características fuente conmutada 1606-XLP.....	34
Tabla 5. Especificaciones generales módulo de entrada digital 1769-IQ16.....	37
Tabla 6. Especificaciones módulo 1769-OB16.....	39
Tabla 7. Especificaciones del módulo 1769-IF4XOF2.....	40
Tabla 8 Análisis de la respuesta transitoria y estacionaria de un horno tostador tipo electrodoméstico simulado en LabVIEW empleando un controlador PI con parámetros de control $K_p=2$ $T_i=335$ y $K_p=4$ y $T_i=335$ y un setpoint de $66.25\text{ }^\circ\text{C}$	83
Tabla 9. Determinación de constantes por Ziegler y Nichols	85
Tabla 10. Análisis de la respuesta transitoria y estacionaria de un motor de corriente continua empleando un controlador PID con parámetros de control $K_p=0.01$ $T_i=1$ y $T_d=0.1$ y un setpoint de 107.5 rad/seg	87
Tabla 11. Parámetros del controlador por calculo teorico.....	90
Tabla 12. Análisis de la respuesta transitoria y estacionaria de un horno tostador tipo electrodoméstico empleando un controlador PI con parámetros de control $K_p=12.016$, $T_i=54.7$ y $T_d=13.67$ y un setpoint de 23 cm	92
Tabla 13. Análisis de la respuesta transitoria y estacionaria de un horno tostador tipo electrodoméstico empleando un controlador PI con parámetros de control $K_p=2$ $T_i=335$ y $K_p=4$ y $T_i=335$ y un setpoint de $66.25\text{ }^\circ\text{C}$	94

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Guía básica de configuración y programación compactlogix 1769 L32E.....	100
ANEXO B. Instrucciones de instalación. Módulo combinado de E/S analógicas Compact™.....	100
ANEXO C. Datos de tags y E/S en los controladores Logix5000.....	100
ANEXO D. Guía de inicio rápido para controladores Logix5000.....	100
ANEXO E. Instrucciones generales de los controladores Logix5000™.....	100
ANEXO F. Manual del usuario de los controladores CompactLogix 1769.....	100
ANEXO G. Cómo obtener resultados con RSLinx Classic.....	100
ANEXO H. RSLogix™ Emulate 5000. Getting results guide.....	100

RESUMEN

TITULO: AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS. DESARROLLO DE MATERIAL DIDÁCTICO BASADO EN EL PLC COMPACTLOGIX 1769-L32E.¹

AUTORES: JOSÉ ANTONIO SUÁREZ HERNÁNDEZ, WYLLITON ARMANDO FERNÁNDEZ DUARTE.²

PALABRAS CLAVES: automatización de procesos, plc, rockwell automation, allen bradley, 1769-L32E

DESCRIPCIÓN: Hoy en día, empresas nacionales de diferentes sectores requieren de la implementación de sistemas de automatización industrial en sus procesos con el fin de ser más productivas y competitivas ante tratados de libre comercio adelantados por el gobierno nacional con otras naciones. Por tal razón, es muy importante fomentar el estudio de controladores lógicos programables (PLC) los cuales tienen beneficios tales como la implementación en espacios reducidos, su mantenimiento es económico y la posibilidad de realizar modificaciones a partir de una programación sin tener que interrumpir el proceso lo que permite a las industrias nacionales competir de manera eficaz en mercados internacionales.

Este proyecto incluye la identificación de cada uno de los componentes de un tablero eléctrico de control perteneciente a la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones E3T. El componente principal es el controlador de Allen-Bradley CompactLogix™ 1769-L32E, fabricado por Rockwell Automation. Puede ser programado usando el software RSLogix 5000, en este caso puede controlar procesos de nivel, velocidad y temperatura implementados en LabVIEW. También controla otros procesos presentes en el laboratorio. El proceso de programación se muestra paso a paso en un manual de programación y una serie de vídeos.

¹ Trabajo de grado.

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: MSC. Julio Augusto Gelvez Figueredo.

ABSTRACT

TITLE: PROCESS AUTOMATION. DEVELOPMENT OF EDUCATIONAL MATERIAL BASED ON COMPACTLOGIX 1769-L32E PLC.²

AUTHORS: JOSÉ ANTONIO SUÁREZ HERNÁNDEZ, WYLLITON ARMANDO FERNÁNDEZ DUARTE.³

KEYWORDS: process automation, plc, rockwell automation, allen bradley, 1769-l32e

DESCRIPTION: Nowadays, national companies from different sectors require the implementation of industrial automation systems in their processes in order to be more productive and competitive while participating in free trade agreements developed by the national government with other nations. For this reason it is very important to encourage the study of programmable logic controllers (PLC) which have benefits such as deployment in confined space, low maintenance and the ability to make programming changes without interrupting the manufacturing process, allowing national companies to compete effectively in international markets.

This project includes the identification of each component in an electric control board belonging to the School of Electric, Electronic and Telecommunications Engineering E3T. The main component is the Allen-Bradley 1769-L32E CompactLogix™ controller, manufactured by Rockwell Automation. It can be programmed using RSLogix 5000 software, in this case can controls level, velocity and temperature processes implemented in LabVIEW. It also controls other processes present in the laboratory where the programming process is shown step by step in a programming manual and a series of videos.

² Degree Work

³ Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Electric, Electronic and Telecommunications School. Director: MSC. Julio Augusto Gelvez Figueredo.

INTRODUCCION

La automatización de procesos industriales ha venido aumentando en los últimos años en diferentes sectores como lo son el OIL&GAS, químico, manufacturero entre otros. Con sistemas automatizados se optimiza el funcionamiento, se garantiza la fiabilidad y seguridad en los procesos. Cuando se requieren metodologías modernas de planeamiento, diseño, puesta en marcha, operación y control de sistemas de producción, se necesitan tableros de control capacitados para manejar muchas entradas y salidas ya sean analógicas o digitales simultáneamente.

Las características de funcionamiento de los equipos de estado sólido son distintas de las de los equipos electromecánicos. Los dispositivos de estado sólido proveen muchas ventajas como alta velocidad, pequeño tamaño y la habilidad de manejar funciones extremadamente complejas. Sin embargo, ellos difieren de los dispositivos electromecánicos en las características básicas de operación y la sensibilidad de la influencia del ambiente.

El Controlador Lógico Programable (PLC) es un dispositivo que emplea elementos de estado sólido, diseñado para controlar procesos que se ejecutan en un ambiente industrial y en la actualidad es común encontrar que cuentan con elementos, que les permiten operar en los ambientes hostiles que se encuentran en la industria. Es por esto que son muy utilizados en tableros de control, diseñados teniendo en cuenta los estándares de seguridad.

La automatización agrupa una serie de herramientas teóricas y tecnológicas que intervienen en la concepción, construcción y el empleo de los tableros de control. El conjunto de los métodos matemáticos (cálculo de fuerza, análisis cinemática) y de síntesis (diagrama de Espacio-Fase, sistemas de control, Grafcet, Programación

lógica) que los estudiantes aprenden durante la carrera de ingeniería tienen que ponerse en práctica al momento de desarrollar un proyecto de automatización. También deben conocer los distintos elementos tecnológicos que existen en el mercado industrial (actuadores, sensores, relés, pulsadores, sistemas de comunicación, controladores).

Debido a la importancia actual de la automatización y a que en el nuevo plan de estudios de Ingeniería Electrónica ahora es una asignatura obligatoria, es primordial que los nuevos profesionales que van a egresar de la escuela, conozcan de antemano los equipos industriales con los que se pueden encontrar; por lo tanto es fundamental que se cuente con herramientas para esto. Entonces que un Ingeniero Electrónico conozca como programar un PLC para simular o resolver problemas de su entorno profesional, será esencial en su trayectoria como profesional.

En este trabajo se simularon tres procesos en LabVIEW para ser controlados por medio del tablero y se controló un proceso real, con lo cual se practica la configuración, comunicación y programación del PLC que compone uno de los elementos del tablero, todo esto con el fin de documentar y dejar bases para el manejo de los elementos constitutivos de este. Además se espera hacer una introducción al gran potencial de estos dispositivos en la industria y por ende motivar a los estudiantes en futuros proyectos de control y automatización.

1 GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

En la Universidad Industrial de Santander se han desarrollado proyectos de grado basados en diferentes tecnologías, tales como:

“UNIDAD DIDÁCTICA DE CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMABLES PLC'S” [1] de la escuela de Ingeniería Mecánica, esta tesis muestra la configuración y componentes del micro-autómata programable TSX 17-20 de Telemecanique, la realización de prácticas de laboratorio para su manejo y desarrollan una unidad didáctica para estos PLC. “SUPERVISION DE PROCESOS INDUSTRIALES CONTROLADOS MEDIANTE AUTOMATAS PROGRAMABLES (PLC's)” [2] de la escuela de Ingeniería Mecánica, esta tesis diseña e implementa una práctica de laboratorio de comunicación serial PC Y PLC Simantic S5-95U, una práctica de laboratorio de comunicación multipunto (MPI) PC y PLC Simantic S7-300 y se introduce el concepto del software Simantic WinCC 4.0. “AUTOMATIZACION DE UNA MAQUINA CNC MEDIANTE ARQUITECTURA PC-PLC” [3] de la escuela de Ingeniería Mecánica, esta tesis utiliza un equipo Simantic S5-95U, implementando y diseñando el software para el control de los ejes de una maquina CNC, haciendo una configuración PC-PLC para ejercer el control directo. “CONTROLADOR LOGICO PROGRAMABLE TSX NANO. MODULOS DE ENTRENAMIENTO Y PRACTICAS DE LABORATORIO” [4] de la E3T, esta tesis creo un manual del PLC para referencia de los estudiantes, diseña 4 módulos con 10 prácticas para que el estudiante conozca de manera didáctica como automatizar diferentes procesos por medio del PLC en cuestión. “MODBUS Y ETHERNET IMPLEMENTADOS EN AUTOMATAS PROGRAMABLES TRILOGI, KOYO Y MODICON - TELEMECANIQUE” [5] de la E3T, esta tesis consiste en realizar una red industrial utilizando los protocolos Modbus y Ethernet con los autómatas no modulares Trilogi, los autómatas Telemecanique Micro y Nano y el autómata KOYO DL 250. “COMPARACIÓN DE LAS CARACTERISTICAS Y COMPORTAMIENTO DE UN CONTROLADOR PID INDUSTRIAL CON LA FUNCIÓN PID DE UN PLC” [6] de la

E3T, esta consistió en un estudio que busca hacer esta comparación usando como planta un motor DC y un horno eléctrico, ambos simulados en LabVIEW. “OBJETO DE APRENDIZAJE PARA LOS AUTÓMATAS S7-200 Y LOGO SIEMENS BASADO EN AUTOMATISMOS LÓGICOS MEDIANTE LA EMULACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES” [7] de la escuela de Ingeniería Mecánica, diseña y construye un objeto de aprendizaje para los autómatas mencionados y efectúa el control de 4 procesos industriales y además se estructuraron dos manuales teóricos. “OBJETO DE APRENDIZAJE PARA EL MANEJO DE AUTÓMATAS ALLEN BRADLEY DE ROCKWELL AUTOMATION” [8], de la escuela de Ingeniería Mecánica, en esta tesis se realizó el diseño y construcción del objeto de aprendizaje para el autómata FlexLogix 5433, que mediante automatismos realiza la emulación de procesos industrial real, además se rediseño un banco de dos vagonetas y una banda transportadora.

Como se puede apreciar los autómatas SIEMENS, son típicamente utilizados por la Escuela de Ingeniería Mecánica, los de tecnología TELEMECANIQUE SCHNEIDER por la E3T, también se incursiono en los PLC´s de SIEMENS en la gama de LOGO y S7-200, en la actualidad el PLC CompactLogix 1769-L32E de tecnología ALLEN BRADLEY es nueva para la E3T por lo tanto es necesario preparar material didáctico.

Además es importante resaltar que en el plan de desarrollo educativo para Colombia [9] ("plan decenal nacional de educación 2006-2016", Bogotá, 18 al 20 de septiembre de 2007), se encuentra una clara tendencia a revolucionar los métodos convencionales de enseñanza, apoyándose en herramientas educativas virtuales y demás elementos pertenecientes a las Nuevas Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC).

Hoy en día para el entrenamiento de personal especializado se trabaja primero en simulación de procesos reales apoyados en herramientas virtuales y de software como LabVIEW.

1.2 PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Gracias a la importancia de la automatización de procesos en la industria, actualmente la escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones de la UIS (E³T) tiene en su nuevo plan de estudios la asignatura Automatización de Procesos, por lo cual es esencial proporcionar a los estudiantes herramientas necesarias para prepararse en este campo.

El grupo de investigación CEMOS adquirió un tablero de control basado en el PLC CompactLogix 1769-L32E dentro del cual se destacan los siguientes módulos adicionales: 1769-IQ16 (Módulo de 8 entradas digitales), 1769-OB16 (Módulo de 8 salidas digitales) y 1769-IF4XOF2 (Módulo de 4 entradas y 2 salidas análogas); otros elementos importantes con los que cuenta el tablero son: 1606-XLP100E (Fuente de alimentación DC), 1769-PA2 (Módulo Fuente de alimentación de CompactLogix) y 2711C-T6T (Panelview plus).

El tablero fue desarrollado y ensamblado por Proctek LTDA y en la actualidad está disponible para ser utilizado por la escuela en las asignaturas automatización de procesos, instrumentación y sistemas de control, pero debido a que la tecnología Allen Bradley y más específicamente el PLC CompactLogix 1769-L32E es nuevo para la E3T se pretende con este trabajo de grado desarrollar material didáctico para facilitar el aprendizaje de la programación de dicho controlador.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

- Desarrollar material de apoyo didáctico basado en el PLC CompactLogix 1769-L32E.

1.3.2 Objetivos específicos

- Elaborar una guía básica de configuración y programación del PLC CompactLogix 1769-L32E.
- Desarrollar tutoriales en formato audiovisual que permitan a la comunidad E³T identificar y conocer los componentes del tablero de control; como también configurar y programar el PLC CompactLogix 1769-L32E.
- Seleccionar dos plantas, simularlas en LabVIEW y controlarlas por medio del PLC CompactLogix 1769-L32E utilizando la tarjeta de adquisición de datos NI USB 6009 como la interfaz entre el PC y el PLC.
- Controlar una planta utilizando el PLC CompactLogix 1769-L32E.

2 DESCRIPCION MONTAJE Y TABLERO DE CONTROL

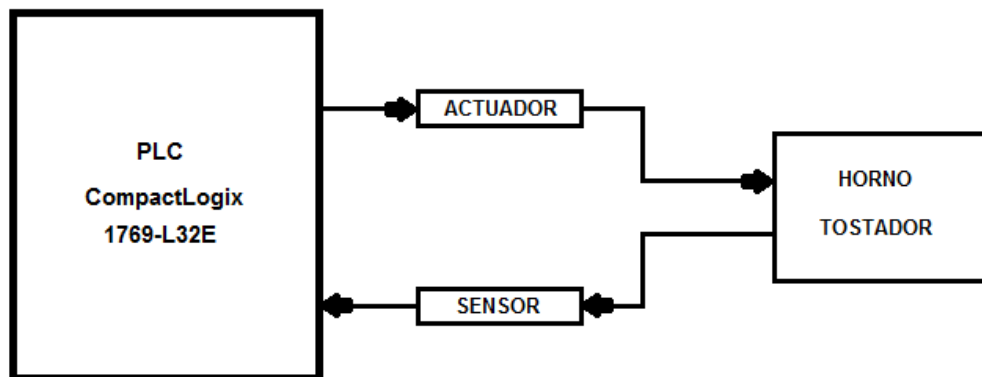
En este capítulo se describen los montajes para el control de la planta real y las plantas virtuales.

Se detallan los componentes que conforman el tablero y además se explica las características, instalación y funcionamiento de los elementos utilizados como son: el actuador, el sensor y la tarjeta de adquisición de datos.

2.1 DESCRIPCION DEL SISTEMA

En la figura 1 se ilustra el diagrama de bloques que describe en forma general cada una de las etapas y los elementos que constituyen el sistema de control de temperatura de un horno casero (Tipo residencial).

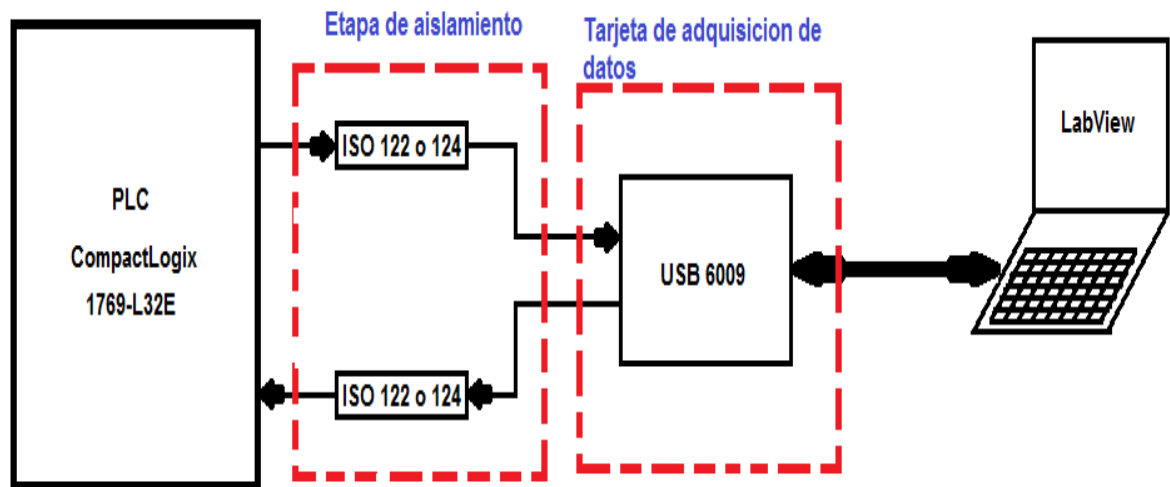
Figura 1. Diagrama de bloques para el control de la planta real



Como se puede observar el control es realizado por el PLC, que es el principal elemento del tablero de control; como actuador se utilizó un relé y como sensor se empleó una termocupla tipo J en la región lineal.

En la figura 2 se ilustra el diagrama de bloques que describe en forma general cada una de las etapas y los elementos que constituyen el sistema para el control de las plantas virtuales.

Figura 2. Diagrama de bloques para el control de las plantas virtuales.



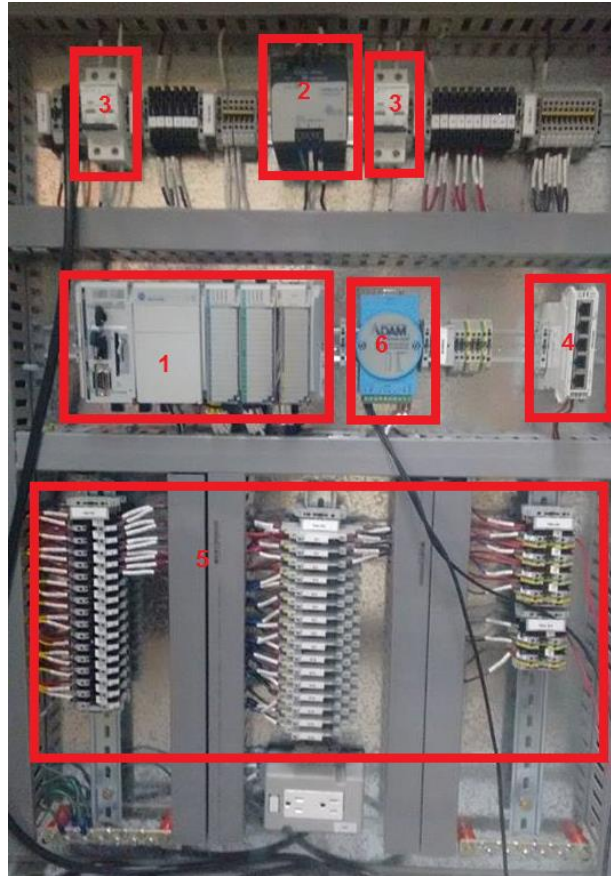
Como se mencionó anteriormente, el control lo efectuó un PLC, para ello se utiliza un circuito que permitió aislar galvánicamente el PLC de la tarjeta de adquisición de datos; garantizando que esta entregue de forma segura los diferentes valores que posteriormente fueron interpretados por el programa y a su vez devueltos al PLC para la ejecución del control.

2.2 TABLERO DE CONTROL

El sistema cuenta con un tablero de control, diseñado acorde a normas y requerimientos, para uso interior o exterior con las condiciones típicas de una estación petrolera en zona tropical, ambiente industrial con agentes corrosivos, radiación solar intensa y ambiente húmedo. El principal componente de este tablero es el PLC CompactLogix 1769-L32E, que en conjunto con elementos periféricos permiten la realización de control proporcionando seguridad de conexión y comunicación

En la figura 3, se puede apreciar los elementos que se encuentran dentro del tablero que reciben las señales provenientes de campo, de una forma ordenada y aprovechando el mínimo espacio.

Figura 3. Tablero de control



1. PLC modular, compuesto por:
 - Controlador CompactLogix 1769-L32E
 - Fuente 1769-PA2
 - Módulo de entradas digitales 1769-IQ16
 - Módulo de salidas digitales 1769-OB16
 - Modulo combinado de Entradas/Salidas analógicas 1769- IF4XOF2
2. Fuente.
3. Seccionadores.
4. Switch.
5. Borneras de entrada y salida.
6. Convertidor ADAM-4520

2.2.1 PLC COMPACTLOGIX 1769-L32E

El PLC que se utilizó es de la marca Allen Bradley cuyo modelo es CompactLogix 1769-L32E, este “ofrece toda la potencia y facilidades para aplicaciones que requieren soluciones de control, comunicación con puerto serial, Ethernet/IP o Controlnet, comunicaciones modulares Devicenet y elementos de entrada/salida avanzados.”⁴

El controlador CompactLogix 1769-L32E, hace parte de la familia de controladores Logix, constituyendo un sistema pequeño y eficiente. La configuración y programación se hace empleando el software RSLogix™ 5000.

En la figura 4 se muestra un PLC CompactLogix de Allen Bradley.

Figura 4. Controlador Compactlogix 1769-L32E



⁴ Tomado de: ARREDONDO VILLARROEL, Neyla. “DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL Y SUPERVISIÓN PARA LA UNIDAD 770 DE UNA PLANTA DE MTBE”. Barcelona, 2010,207p. Trabajo de grado (Ingeniero electricista). Universidad de Oriente. Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas.

La tabla 1 muestra las características técnicas del controlador 1769-L32E.

Tabla 1. Características del controlador 1769-L32E.

Descripción	Controlador 1769-L32E
Memoria disponible al usuario	750 KB
Opciones de comunicación	1 puerto Ethernet/IP 1 puerto serial RS-232
Número de tareas admitidas	6
Número de módulos de E/S admitidas	16
Clasificación de distancia respecto a la fuente de alimentación	4 módulos

Fuente: CEDILLO GUZMAN, Marco Antonio, CONCEPCION FUENTES, Roberto. “AUTOMATIZACIÓN DE UN MODULO DE ENTRENAMIENTO APLICADO A SISTEMAS DE TRASLADO DE MATERIALES”. México, 2014, 157p. Tesis (Ingeniero de control y automatización). Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

El PLC cuenta con puertos incorporados de comunicación para redes EtherNet/IP, un puerto serial RS- 232, adicionalmente los módulos Compact I/O proveen un sistema de E/S compacto. Posee la capacidad de comunicación serial y Ethernet con otros dispositivos, cuenta con una tarjeta de memoria flash para actualizaciones de firmware del controlador, por medio de una llave se puede establecer el modo de control y posee LEDs indicadores de estado tal como se ilustra en la figura 5.

Figura 5. Características principales del controlador CompactLogix 1769-L32E



Fuente: ARGUEDAS ROMERO, José Fabio. Sistema de control automático para un horno industrial. Cartago (Costa Rica), 2010,132p. Trabajo de grado (Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Electrónica.

Por medio de la llave ubicada en la parte frontal del PLC se pueden establecer los modos de control, estos son: RUN, PROG y REM.

En la tabla 2 se resumen las acciones que se pueden efectuar en cada uno de estos modos.

Tabla 2. Modos de control.

Posición de llave	Descripción
RUN	<ul style="list-style-type: none"> •Cargue proyectos. •Ejecute el programa y habilite las salidas. •No se puede crear ni eliminar tareas, programas o rutinas. No se puede crear ni eliminar tags ni editar en

	<p>línea mientras el interruptor de llave está en la posición RUN (marcha).</p> <ul style="list-style-type: none"> •No se puede cambiar el modo usando el software de programación mientras el interruptor de llave está en la posición RUN. 		
PROG	<ul style="list-style-type: none"> •Inhabilite las salidas. •Cargue/descargue proyectos. •Cree, modifique y elimine tareas, programas o rutinas. <p>•El controlador no ejecuta (escanea) tareas mientras el interruptor de llave está en la posición PROG.</p> <p>•No puede cambiar el modo mediante el software de programación mientras el interruptor de llave está en la posición PROG.</p>		
REM	<ul style="list-style-type: none"> •Cargue/descargue proyectos. •Cambie entre los modos Programación remota, Prueba remota y Marcha remota mediante el software de programación. 		
	<table border="1"> <tr> <td>Marcha remota</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> •El controlador ejecuta (escanea) tareas. •Habilite las salidas. •Edite en línea. </td> </tr> </table>	Marcha remota	<ul style="list-style-type: none"> •El controlador ejecuta (escanea) tareas. •Habilite las salidas. •Edite en línea.
	Marcha remota	<ul style="list-style-type: none"> •El controlador ejecuta (escanea) tareas. •Habilite las salidas. •Edite en línea. 	
<table border="1"> <tr> <td>Programa remoto</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> •Inhabilite las salidas. •Cree, modifique y elimine tareas, programas o rutinas. •Descargue proyectos. •Edite en línea. •El controlador no ejecuta (escanea) tareas. </td> </tr> </table>	Programa remoto	<ul style="list-style-type: none"> •Inhabilite las salidas. •Cree, modifique y elimine tareas, programas o rutinas. •Descargue proyectos. •Edite en línea. •El controlador no ejecuta (escanea) tareas. 	
Programa remoto	<ul style="list-style-type: none"> •Inhabilite las salidas. •Cree, modifique y elimine tareas, programas o rutinas. •Descargue proyectos. •Edite en línea. •El controlador no ejecuta (escanea) tareas. 		
	<table border="1"> <tr> <td>Prueba remota</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> •Ejecute tareas con las salidas inhabilitadas. •Edite en línea. </td> </tr> </table>	Prueba remota	<ul style="list-style-type: none"> •Ejecute tareas con las salidas inhabilitadas. •Edite en línea.
Prueba remota	<ul style="list-style-type: none"> •Ejecute tareas con las salidas inhabilitadas. •Edite en línea. 		

Fuente: ARGUEDAS ROMERO, José Fabio. Sistema de control automático para un horno industrial. Cartago (Costa Rica), 2010,132p. Trabajo de grado (Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Electrónica.

En la tabla 3 se muestra la función de cada uno de los indicadores LED ubicados en la parte frontal del PLC.

Tabla 3. Indicadores de estado del PLC

Indicador	Condición	Interpretación
RUN	Apagado	El controlador está en modo de programación o de prueba.
	Verde fijo	El controlador está en modo de marcha.
FORCE	Apagado	• No hay tags que contengan valores de forzado de E/S.
		• Los forzados de E/S están inactivos (inhabilitados).
	Ambar fijo	• Los forzados de E/S están activos (habilitados).
		• Pueden o no existir valores de forzados de E/S.
Ambar parpadeante	Una o más direcciones de entrada o de salida han sido forzadas a una condición de activado o desactivado, pero los forzados no han sido habilitados.	
BAT	Apagado	La batería conserva la memoria.
	Rojo fijo	La batería: • no se ha instalado; • está descargada al 95% y debe reemplazarse.
I/O	Apagado	• No hay dispositivos en la configuración de E/S del controlador.
		• El controlador no contiene un proyecto.
	Verde fijo	El controlador se está comunicando con todos los dispositivos en su configuración de E/S.
	Verde parpadeante	Uno o más dispositivos en la configuración de E/S del controlador no responden.
Rojo parpadeante	• El controlador no se está comunicando con ningún dispositivo.	
	• El controlador presenta un fallo.	
OK	Apagado	No hay alimentación eléctrica aplicada.
	Rojo parpadeante	• El controlador necesita una actualización de firmware. • Se ha producido un fallo mayor recuperable en el controlador. Para borrar un fallo realice este procedimiento. a. Cambie el interruptor de llave del controlador de la posición PROG a RUN a PROG.

		<p>b. Entre en línea con el software de programación RSLogix 5000.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se ha producido un fallo mayor no recuperable en el controlador. En este caso, el controlador: <ul style="list-style-type: none"> a. en principio muestra un indicador de estado de rojo fijo; b. se restablece; c. borra el proyecto de su memoria; d. establece el indicador de estado en rojo parpadeante; e. produce un fallo mayor recuperable; f. genera un código de fallo en el proyecto RSLogix 5000. <p>El código de fallo que se muestra en el software de programación RSLogix 5000 y el método de recuperación de fallo posterior dependen de si ha instalado una tarjeta CompactFlash en el controlador.</p>									
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Código</th> <th>Condición</th> <th>Método de recuperación de fallo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>60</td> <td>No se ha instalado la tarjeta CompactFlash.</td> <td> <ol style="list-style-type: none"> 1. Borre el fallo. 2. Descargue el proyecto. 3. Cambie al modo de marcha remota/marcha. <p>Si el problema persiste:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Antes de desconectar y volver a conectar la alimentación eléctrica del controlador, anote el estado de los indicadores de estado OK y RS232. 2. Comuníquese con el servicio de asistencia técnica de Rockwell Automation. Consulte la contraportada. </td> </tr> <tr> <td>61</td> <td>La tarjeta CompactFlash está instalada</td> <td> <ol style="list-style-type: none"> 1. Borre el fallo. 2. Descargue el proyecto. 3. Cambie al modo de marcha remota/marcha. <p>Si el problema persiste, comuníquese con el servicio</p> </td> </tr> </tbody> </table>	Código	Condición	Método de recuperación de fallo	60	No se ha instalado la tarjeta CompactFlash.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Borre el fallo. 2. Descargue el proyecto. 3. Cambie al modo de marcha remota/marcha. <p>Si el problema persiste:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Antes de desconectar y volver a conectar la alimentación eléctrica del controlador, anote el estado de los indicadores de estado OK y RS232. 2. Comuníquese con el servicio de asistencia técnica de Rockwell Automation. Consulte la contraportada. 	61	La tarjeta CompactFlash está instalada	<ol style="list-style-type: none"> 1. Borre el fallo. 2. Descargue el proyecto. 3. Cambie al modo de marcha remota/marcha. <p>Si el problema persiste, comuníquese con el servicio</p>
Código	Condición	Método de recuperación de fallo									
60	No se ha instalado la tarjeta CompactFlash.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Borre el fallo. 2. Descargue el proyecto. 3. Cambie al modo de marcha remota/marcha. <p>Si el problema persiste:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Antes de desconectar y volver a conectar la alimentación eléctrica del controlador, anote el estado de los indicadores de estado OK y RS232. 2. Comuníquese con el servicio de asistencia técnica de Rockwell Automation. Consulte la contraportada. 									
61	La tarjeta CompactFlash está instalada	<ol style="list-style-type: none"> 1. Borre el fallo. 2. Descargue el proyecto. 3. Cambie al modo de marcha remota/marcha. <p>Si el problema persiste, comuníquese con el servicio</p>									

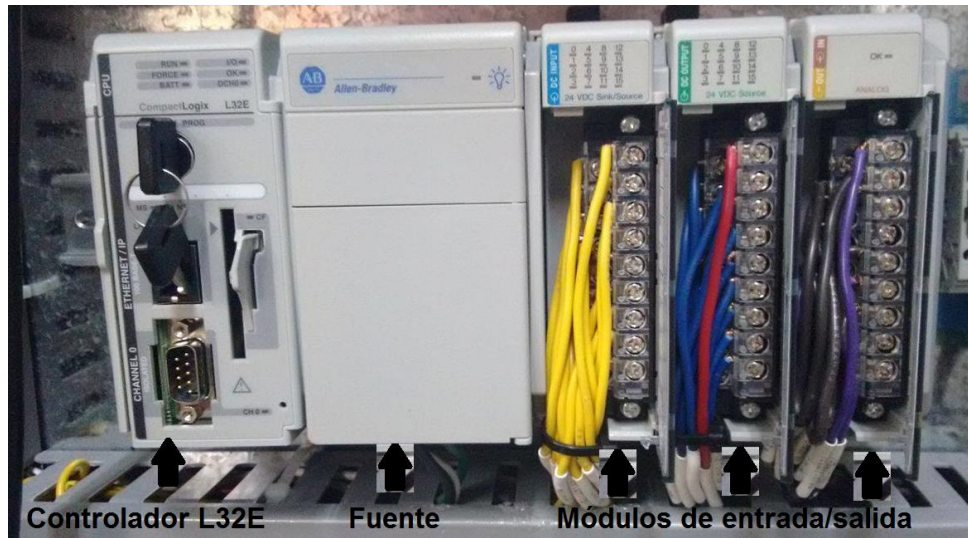
				de asistencia técnica de Rockwell Automation. Consulte la contraportada.
	Rojo fijo	<p>El controlador detectó un fallo mayor no recuperable, por lo que borró el proyecto de la memoria. Para recuperarse de un fallo mayor, siga este procedimiento.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Desconecte y vuelva a conectar la alimentación eléctrica del chasis. 2. Descargue el proyecto. 3. Cambie al modo de marcha. <p>Si el indicador de estado OK sigue siendo color rojo fijo, comuníquese con el representante o distribuidor local de Rockwell Automation.</p>		
	Verde fijo	El controlador está en buen estado.		
	Verde parpadeante	El controlador está almacenando o cargando un proyecto hacia la memoria no volátil o desde ella.		

Fuente: ALLEN-BRADLEY. Manual del usuario de los controladores CompactLogix 1769. Febrero 2013.

Al trabajar con un PLC CompactLogix, se debe determinar la configuración de red y la posición de los componentes en cada ubicación.

En la figura 6 se ilustra la distribución de la fuente y módulos de entrada/salida al PLC.

Figura 6. Distribución PLC



Al momento de ensamblar el sistema se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- El controlador CompactLogix es siempre el módulo del extremo izquierdo en el sistema.
- El controlador debe estar a una distancia no superior a cuatro módulos de la fuente de alimentación del sistema.
- El controlador admite hasta 16 módulos de E/S.
- Solo se puede utilizar un controlador en un sistema CompactLogix.
- Una tapa de extremo derecho 1769-ECR o una tapa de extremo izquierdo 1769-ECL es necesaria para terminar el extremo del bus de comunicación.⁵

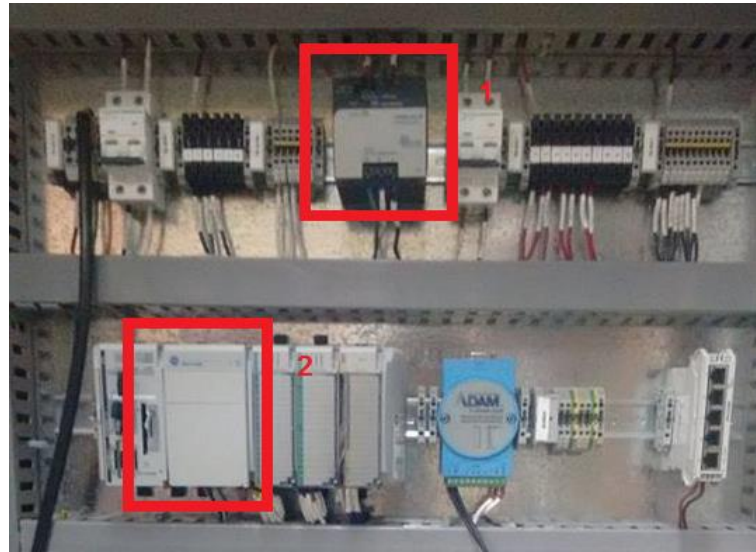
2.2.2 FUENTES DE ALIMENTACION

Dentro del tablero se ubican dos fuentes, una fuente de alimentación conmutada (Allen-Bradley 1606-XLP) y una fuente de alimentación eléctrica PA2.

La figura 7 ilustra las dos fuentes de alimentación con las que cuenta el tablero.

⁵ Tomado de: ALLEN BRADLEY, Manual del usuario de los controladores CompactLogix 1769, Febrero 2013

Figura 7. Ubicación de las fuentes de alimentación del tablero de control



1. **Fuente de alimentación conmutada (Allen-Bradley 1606-XLP):** esta fuente mediante transistores transforma la energía eléctrica AC en energía eléctrica DC empleando la conmutación para regular el valor de tensión de salida. En la figura 8, se ilustra la fuente conmutada.

Figura 8. Fuente de alimentación conmutada



En la tabla 4 se muestran algunas características que esta fuente posee.

Tabla 4. Características fuente conmutada 1606-XLP

Referencia	1606-XLP
Potencia de salida (watts)	25...100 W
Voltaje entrada/ Voltaje primario	85...264 VCA 85...375 VCC
Eficiencia	80...90%
Voltaje salida/ Voltaje secundario	5,10...12,12,15,24,48 VCC
Corriente de salida nominal	1.3 ... 4.2 A

Fuente:http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/sg/1606-sg001_-es-p.pdf

En la figura 9, se ilustra la fuente de alimentación eléctrica PA2.

Figura 9. Fuente de alimentación eléctrica 1769-PA2



2. Fuente de alimentación eléctrica Compact I/O 1769-PA2: proporciona alimentación eléctrica de 120/240 VCA y de 24 VCC a los módulos, que se pueden colocar en el lado izquierdo o derecho de la fuente. Se pueden colocar hasta ocho módulos de E/S a cada lado de la fuente de alimentación.⁶

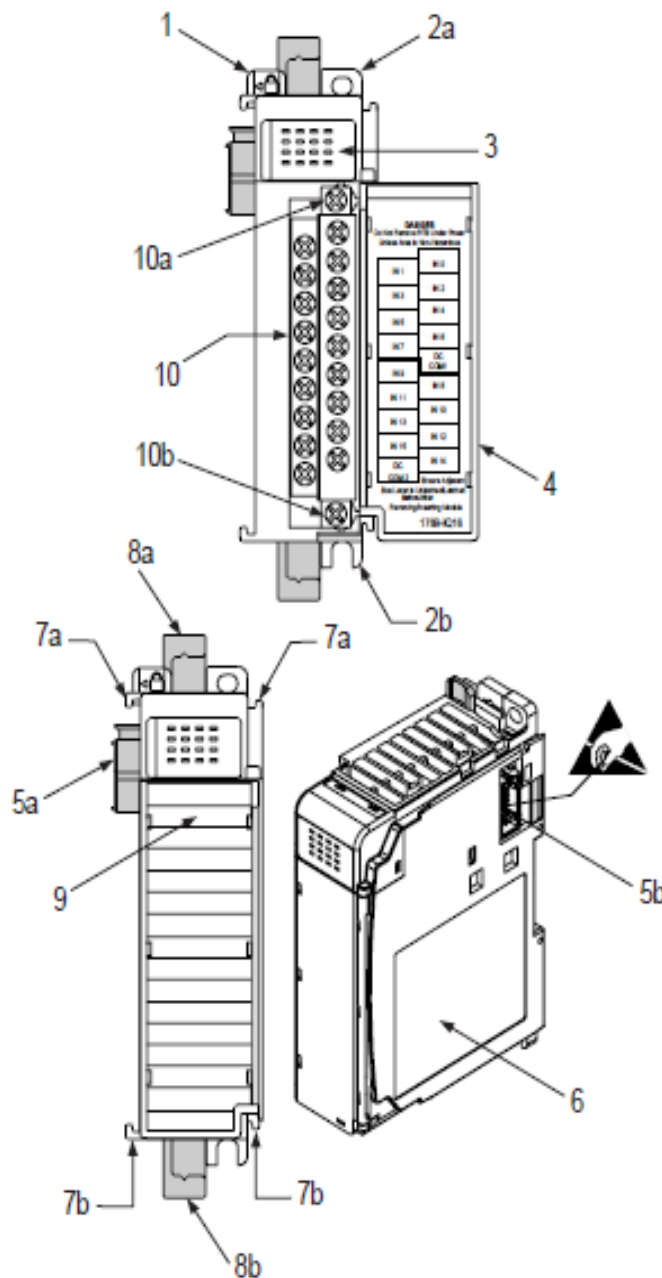
2.2.3 MODULOS DE ENTRADA Y SALIDA

El tablero cuenta con tres módulos, un primer módulo para entradas digitales, un segundo para salidas digitales y un tercero que combina las entradas y salidas análogas.

Todos los módulos presentan características tal cual se muestran en la figura 10.

⁶ Tomado de: Instrucciones de instalación. Fuentes de alimentación de expansión Compact I/O. Números de catálogo 1769-PA2, 1769-PB2, 1769-PA4, 1769-PB4. Publicación 1769-IN028B-ES-P - Octubre 2008

Figura 10. Características generales de los módulos I/O



Nº	Descripción
1	Palanca de bus (con enclavamiento)
2a	Lengüeta superior para montaje en panel
2b	Lengüeta inferior para montaje en panel
3	LEDs de diagnóstico E/S
4	Puerta del módulo con etiqueta identificadora de terminales
5a	Conector de bus móvil con pines hembra
5b	Conector de bus fijo con pines macho
6	Etiqueta identificadora del módulo
7a	Ranuras superiores de machihembrado
7b	Ranuras inferiores de machihembrado
8a	Seguro superior para el riel DIN
8b	Seguro inferior para el riel DIN
9	Etiqueta rotulable (para identificaciones del usuario)
10	Bloque de terminales extraíble (BTE) con cubierta protectora de los dedos
10a	Tornillo superior de retención del BTE
10b	Tornillo inferior de retención del BTE

Fuente: Instrucciones de instalación, Módulo combinado de E/S analógicas Compact™, (Número de catálogo 1769-IF4XOF2)

2.2.3.1 Módulo de entradas digitales 1769-IQ16

La tabla 4, muestra las especificaciones generales del módulo de entradas digitales.

Tabla 5. Especificaciones generales módulo de entrada digital 1769-IQ16

Especificaciones

Especificaciones generales

Especificación	Valor
Medidas	118 mm (alto) x 87 mm (profundo) x 35 mm (ancho) la altura, incluidas las lengüetas de montaje, es de 138 mm.
Peso aproximado de expedición (con embalaje)	270 g
Temperatura de almacenaje	de -40°C a +85°C
Temperatura de funcionamiento	de 0°C a +60°C
Humedad de funcionamiento	del 5% al 95%, sin condensación
Altitud de funcionamiento	2000 metros
Vibraciones	En funcionamiento: de 10 a 500 Hz, 5g, 0,015 " entre pico y pico En funcionamiento de relé: 2g
Choque	En funcionamiento: 30g montado en panel (20g montado en riel DIN) En funcionamiento de relé: 7,5g montado en panel (5g montado en riel DIN) Fuera de funcionamiento: 40g montado en panel (30g montado en riel DIN)
Certificaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Certificación C-UL (bajo CSA C22.2 n° 142) • Incluida en UL 508 • Conforme a todas las directivas relevantes CE
Clase de entorno peligroso	Clase I, división 2, lugar peligroso, grupos A, B, C, D (UL 1604, C-UL bajo CSA C22.2 n° 213)
Emisiones radiadas y conducidas	EN50081-2 clase A
<i>Eléctricas /EMC:</i>	<i>El módulo ha superado las pruebas en los siguientes niveles:</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Inmunidad contra descargas electrostáticas (IEC1000-4-2) 	<ul style="list-style-type: none"> • 4 kV contacto, 8 kV aérea, 4 kV indirecta
<ul style="list-style-type: none"> • Inmunidad radiada (IEC1000-4-3) 	<ul style="list-style-type: none"> • 10 V/m, de 80 a 1000 MHz, 80% amplitud de modulación, +900 MHz portador manipulado
<ul style="list-style-type: none"> • Ráfagas rápidas transitorias (IEC1000-4-4) 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 kV, 5 kHz
<ul style="list-style-type: none"> • Inmunidad a sobretensiones (IEC1000-4-5) 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 kV modo común, 1 kV modo diferencial
<ul style="list-style-type: none"> • Inmunidad conducida (IEC1000-4-6) 	<ul style="list-style-type: none"> • 10 V, de 0,15 a 80 MHz¹

1. El margen de frecuencias de inmunidad conducida puede ser de 150 kHz a 30 MHz si el margen de frecuencias de inmunidad radiada es de 30 MHz a 1000 MHz.

Especificaciones para las entradas

Especificación	1769-IQ16
Tipo de tensión	24 V c.c. (drenador/surtidor ¹)
Margen de tensión de funcionamiento	de 10 a 30 V c.c. con 30°C de 10 a 26,4 V c.c. con 60°C
Número de entradas	16
Consumo de corriente del bus (máx.)	115 mA a 5 V c.c. (0,575 W)
Disipación del calor	3,55 vatios totales (los vatios por punto, más los vatios mínimos, con todos los puntos activados)
Retardo de señal (máx.)	Retardo a la conexión: 8,0 ms Retardo a la desconexión: 8,0 ms
Tensión en estado bloqueado (máx.)	5 V c.c.
Intensidad en estado bloqueado (máx.)	1,5 mA
Tensión en estado conductor (mín.)	10 V c.c.
Intensidad en estado conductor (mín.)	2,0 mA
Intensidad de irrupción (máx.)	250 mA
Impedancia nominal	3 k Ω
Compatibilidad IEC de las entradas	Clase 1+
Distancia respecto a la fuente de alimentación	8 (el módulo no puede estar a más de 8 módulos de distancia respecto de la fuente de alimentación o del controlador)
Grupos aislados	Grupo 1: entradas 0 a 7 Grupo 2: entradas 8 a 15 Los grupos aislados operan, o en configuraciones drenadoras, o en configuraciones surtidoras.
Grupo de entradas con aislamiento de placa posterior, y grupo de entradas con aislamiento del grupo de entradas	Verificado por una de las siguientes pruebas dieléctricas: 1200 V c.a. durante 1 seg. o 1697 V c.c. durante 1 seg. 75 V c.c. de tensión de trabajo (IEC clase 2 aislamiento reforzado)
Código del proveedor	1
Código del tipo del producto	7
Código del producto	67

1. **Entradas drenador/surtidor** – Surtidor/drenador describe el flujo de la corriente entre el módulo E/S y el dispositivo de campo. Los circuitos surtidores E/S alimentan con corriente a los dispositivos de campo drenadores. Los circuitos drenadores E/S son accionados por un dispositivo de campo surtidor de corriente. Los dispositivos de campo que están conectados al lado negativo (común c.c.) de la fuente de alimentación son dispositivos de campo drenadores. Los dispositivos de campo que están conectados al lado positivo (+V) de la fuente de alimentación son dispositivos de campo surtidores. Europa: Los circuitos de módulos c.c. de entradas drenadoras y de salidas surtidoras son opciones utilizadas habitualmente.

Fuente: Allen-Bradley. Compact 1769-IQ16. Módulo de entradas 24V c.c. drenador/surtidor

2.2.3.2 Módulo de salidas digitales 1769-OB16

En la tabla 5, muestra las especificaciones del módulo de salidas digitales.

Tabla 6. Especificaciones módulo 1769-OB16

Output Specifications

Specification	1769-OB16
Voltage Category	24V dc
Operating Voltage Range	20.4V dc to 26.4V dc (source ¹)
Number of Outputs	16
Bus Current Draw (max.)	200 mA at 5V dc (1.0W)
Heat Dissipation	2.11 Total Watts (<i>The Watts per point, plus the minimum Watts, with all points energized.</i>)
Signal Delay (max.) – resistive load	turn-on = 0.1 ms turn-off = 1.0 ms
Off-State Leakage (max.) ²	1.0 mA at 26.4V dc
On-State Current (min.)	1.0 mA
On-State Voltage Drop (max.)	1.0V dc
Continuous Current Per Point (max.)	0.5A at 60°C (140°F) <i>See the derating graphs on page 13.</i>
Continuous Current Per Module (max.)	4.0A at 60°C (140°F) <i>See the derating graphs on page 13.</i>
Surge Current (max.) ³	2.0A (Repeatability is once every 2 seconds for a duration of 10 msec.)
Power Supply Distance Rating	8 (The module may not be more than 8 modules away from the power supply.)
Isolated Groups	Group 1: outputs 0 to 15
Output Group to Backplane Isolation	Verified by one of the following dielectric tests: 1200V ac for 1 sec. or 1697V dc for 1 sec. 75V dc working voltage (IEC Class 2 reinforced insulation)
Vendor I.D. Code	1
Product Type Code	7
Product Code	71

1. **Sourcing Output** - Source describes the current flow between the I/O module and the field device. Sourcing output circuits supply (source) current to sinking field devices. Field devices connected to the negative side (DC Common) of the field power supply are sinking field devices. Field devices connected to the positive side (+V) of the field supply are sourcing field devices. Europe: DC sinking input and sourcing output module circuits are the commonly used options.

2. **Typical Loading Resistor** - To limit the effects of leakage current through solid state outputs, a loading resistor can be connected in parallel with your load. Use a 5.6K ohm, ½ watt resistor for transistor outputs, 24V dc operation.

3. **Recommended Surge Suppression** - Use a 1N4004 diode reverse-wired across the load for transistor outputs switching 24V dc inductive loads. For additional details, refer to Industrial Automation Wiring and Grounding Guidelines, Allen-Bradley publication 1770-4.1.

Fuente: Rockwell Automation. Compact 1769-OB16. Solid State 24V dc Source Output Module

2.2.3.3 Módulo de entradas y salidas analógicas 1769-IF4XOF2

El módulo integra cuatro (4) canales de entrada y dos (2) canales de salida analógicos, con rangos de entrada y salida de voltaje de 0 a 10 VDC y corriente de 0 a 20mA, respectivamente, con una resolución de 8 bits. La tabla 6 muestra las especificaciones generales, de entrada y de salida del módulo.

Tabla 7. Especificaciones del módulo 1769-IF4XOF2

Especificaciones generales

Especificación	1769-IF4XOF2
Dimensiones	118 mm (alto) x 87 mm (profundidad) x 35 mm (ancho) La altura con las lengüetas de montaje incluidas es de 138 mm. 4.65 pulg. (alto) x 3.43 pulg. (profundidad) x 1.38 pulg. (ancho) La altura con las lengüetas de montaje incluidas es de 5.43 pulg.
Peso aproximado de envío (con caja)	290 g (0.64 lb.)
Temperatura de almacenamiento	de -40 °C a +85 °C (-40 °F a +185 °F)
Temperatura de funcionamiento	de 0 °C a +60 °C (32 °F a +140 °F)
Humedad de funcionamiento	del 5 % al 95 %, sin condensación
Altitud de funcionamiento	2000 metros (6561 pies)
Vibración	En funcionamiento: de 10 a 500 Hz, 5 G, 0.762 mm (0.030 pulg.) entre pico y pico Funcionamiento de relé: 2 G (cuando se utiliza un módulo de relé en el sistema)
Choque	En funcionamiento: 30 G, 11 mseg montado en panel (20 G, 11 mseg montado en riel DIN) Funcionamiento de relé: 7.5 G montado en panel (5 G montado en riel DIN) Sin funcionar: 40 G montado en panel (30 G montado en riel DIN)
Consumo de corriente del bus (máx.)	120 mA a 5 VCC 160 mA a 24 VCC
Disipación del calor	3.03 watts totales (los watts por punto, más los watts mínimos, con todos los puntos activados)
Distancia respecto a la fuente de alimentación del sistema	8 (el módulo no puede estar a más de 8 módulos de distancia de la fuente de alimentación)
Cable de entrada/salida recomendado	Belden™ 8761 (blindado)
Longitud máx. del cable de entrada/salida	200 m (656 pies). Si la longitud del cable es superior a la indicada, se reducirá la precisión del sistema. Para obtener más información, consulte Compact Combination Analog Module User Manual, publicación 1769-UM008A-EN-P.
LED Module OK	Encendido: el módulo recibe alimentación eléctrica, ha pasado la prueba de diagnóstico interna y se está comunicando a través del bus. Apagado: alguna de las condiciones anteriores no se cumple.
Calibración de campo	No es necesaria
Código del proveedor	1
Código del tipo del producto	10
Código del producto	33

Especificación	1769-IF4XOF2
Certificaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Certificación C-UL (bajo CSA C22.2 n° 142) • Lista UL 508 • Homologado para CE y C-Tick conforme a todas las directivas aplicables
Clase de ambiente peligroso	Clase I, división 2, lugares peligrosos, grupos A, B, C, D (UL 1604, C-UL bajo CSA C22.2 n° 213)
Emisiones radiadas y conducidas	EN50081-2 Clase A
<i>Eléctricas /EMC:</i>	<i>El módulo ha superado las pruebas en los siguientes niveles:</i>
Inmunidad ESD (IEC61000-4-2)	• 4 kV por contacto, 8 kV por aire, 4 kV indirecta
Inmunidad radiada (IEC61000-4-3)	• 10 V/m, de 80 a 1000 MHz, 80% de amplitud modulada, +900 MHz portador codificado
Rafagas rápidas transitorias (IEC61000-4-4)	• 2 kV, 5 kHz
Inmunidad a sobrevoltajes (IEC61000-4-5)	• 1 kV tubo galvánico
Inmunidad conducida (IEC61000-4-6)	• 10 V, de 0.15 a 80 MHz ⁽¹⁾

(1) El rango de frecuencias de la Inmunidad conducida puede ser de 150 kHz a 30 MHz si el rango de frecuencias de la Inmunidad radiada es de 30 MHz a 1000 MHz.

Especificaciones para las entradas

Especificación	1769-IF4XOF2
Número de entradas	4 diferenciales o unipolares
Rangos de funcionamiento analógico normal ⁽¹⁾	Voltaje: 0 a 10 VCC Corriente: 0 a 20 mA
Rangos analógicos de escala completa ⁽¹⁾	Voltaje: 0 a 10.5 VCC Corriente: 0 a 21 mA
Tipo de convertidor	Aproximación sucesiva
Resolución (máx.)	8 bits signo más (el signo es siempre positivo)
Velocidad de respuesta por canal	5 mseg
Voltaje nominal operativo ⁽²⁾	30 VCA/30 VCC
Voltaje en modo común ⁽³⁾	Máximo de 10 VCC por canal
Rechazo del modo común	mayor que 60 dB a 60 Hz y 10 V entre las entradas y el terminal común analógico
Proporción de rechazo en el modo normal	ninguno
Impedancia de entrada	Terminal de voltaje: 150 K Ω (nominal) Terminal de corriente: 150 Ω (nominal)
Precisión general ⁽⁴⁾ a 25 °C	Terminal de voltaje: $\pm 0.7\%$ de la escala completa Terminal de corriente: $\pm 0.6\%$ de la escala completa
Precisión general a una temperatura entre 0 y 60 °C	Terminal de voltaje: $\pm 0.9\%$ de la escala completa Terminal de corriente: $\pm 0.8\%$ de la escala completa

Especificación	1769-IF4XOF2
Desviación de la precisión con la temperatura	Terminal de voltaje: $\pm 0.006\%$ por $^{\circ}\text{C}$ Terminal de corriente: $\pm 0.006\%$ por $^{\circ}\text{C}$
Calibración	No es necesaria. La precisión está garantizada por los componentes.
Sin linealidad (expresada en porcentaje de escala completa)	$\pm 0.4\%$
Capacidad de repetición ⁽⁵⁾	$\pm 0.4\%$
Configuración de canales de entrada	a través del cableado de dispositivos, la pantalla de software de configuración o el programa del usuario (escribiendo un patrón de bits único en el archivo de configuración del módulo). Consulte el manual del usuario del controlador para saber si el sistema admite la configuración con programas del usuario.
Sobrecarga máxima en los terminales de entrada ⁽⁶⁾	Terminal de voltaje: 20 V continuo, 0.1 mA Terminal de corriente: 32 mA continua, +5 VCC
Grupo de entradas al aislamiento del bus	500 VCA o 710 VCC por 1 minuto (prueba de calificación) Voltaje operativo 30 VCA/30 VCC (aislamiento reforzado IEC Clase 2)
Diagnóstico de canales	Generación de informes de sobrerango por bit

- (1) El indicador de sobrerango se activará cuando se exceda el rango de funcionamiento normal. El módulo seguirá convirtiendo la entrada analógica hasta el rango máximo de la escala completa. El indicador se restablece automáticamente cuando se encuentra dentro del rango de funcionamiento normal.
- (2) El voltaje nominal operativo es el voltaje máximo continuo que puede aplicarse en el terminal de entrada, con la señal de entrada y el valor situado por encima del potencial de tierra (por ejemplo, señal de entrada de 10 VCC y potencial por encima de tierra de 20 VCC).
- (3) Para asegurar un funcionamiento correcto, los terminales de entrada positivo y negativo deben tener un voltaje de entre 0 y +10 VCC respecto al terminal común analógico.
- (4) Incluye condiciones de error de offset, ganancia, sin linealidad y capacidad de repetición.
- (5) La capacidad de repetición es la capacidad del módulo de entrada para registrar la misma lectura en mediciones sucesivas para una misma señal de entrada.
- (6) Si se supera este valor pueden producirse daños en el circuito de entrada.

Especificaciones para las salidas

Especificación	1769-IF4XOF2
Número de salidas	2 unipolares
Rangos de funcionamiento analógico normal ⁽¹⁾	Voltaje: 0 a 10 VCC Corriente: 0 a 20 mA
Rangos analógicos de la escala completa ⁽¹⁾	Voltaje: 0 a 10.5 VCC Corriente: 0 a 21 mA
Tipo de convertidor	Cadena de resistencias
Resolución (máx.)	8 bits signo más (el signo es siempre positivo, Bit 15 = 0)
Velocidad de respuesta por canal	0.3 mseg para la resistencia y la inductancia nominales 3.0 mseg para la capacitancia nominal
Carga de corriente en la salida de voltaje	10 mA max.

Especificación	1769-IF4XOF2
Carga resistiva en la salida de corriente	0 a 300 Ω (incluye la resistencia del cable)
Rango de carga en la salida de voltaje	> 1 k Ω a 10 VCC
Carga inductiva máx. (Salidas de corriente)	0.1 mH
Carga capacitiva máx. (Salidas de voltaje)	1 μ F
Precisión general a 25 °C ⁽²⁾	Terminal de voltaje: \pm 0.5% de la escala completa Terminal de corriente: \pm 0.5% de la escala completa
Precisión general a una temperatura entre 0 y 60 °C	Terminal de voltaje: \pm 0.6% de la escala completa Terminal de corriente: \pm 1.0% de la escala completa
Desviación de la precisión con la temperatura	Terminal de voltaje: \pm 0.01% de la escala completa por °C Terminal de corriente: \pm 0.01% de la escala completa por °C
Fluctuación de salida ⁽³⁾ rango de 0 a 50 kHz (referido al rango de salida)	\pm 0.05%
Sin linealidad (expresada en porcentaje de escala completa)	\pm 0.4%
Capacidad de repetición ⁽⁴⁾ (expresada en porcentaje de la escala total)	\pm 0.05%
Impedancia de salida	10 Ω (nominal)
Protección contra circuitos abiertos y cortocircuitos	SI
Cortocircuito máximo	Corriente: 40 mA
Circuito abierto máximo	Voltaje: 15 V
Respuesta de salida al encender y apagar el sistema	Pico de +2.0 VCC a -1.0 VCC durante menos de 6 mseg
Grupo de salidas al aislamiento del bus	500 VCA o 710 VCC por 1 minuto (prueba de calificación) Voltaje operativo 30 VCA/30 VCC (aislamiento reforzado IEC Clase 2)
Diagnóstico de canales	Generación de informes de sobrerango por bit

(1) El Indicador de sobrerango se activará cuando se exceda el rango de funcionamiento normal. El módulo seguirá convirtiendo la salida analógica hasta el rango máximo de la escala completa. El Indicador se restablece automáticamente cuando se encuentra dentro del rango de funcionamiento normal.

(2) Incluye condiciones de error de offset, ganancia, deriva, sin linealidad y capacidad de repetición.

(3) La fluctuación de salida es la cantidad en que varía una salida fija en el transcurso del tiempo, suponiendo condiciones constantes de carga y temperatura.

(4) La capacidad de repetición es aquella que tiene el módulo de salida para reproducir las lecturas de salida cuando se le aplica el mismo valor del controlador de manera consecutiva, en las mismas condiciones y en la misma dirección.

Fuente: Instrucciones de instalación. Módulo combinado de E/S analógicas Compact™. Número de catálogo 1769-IF4XOF2. Publicación 1769-IN057A-ES-P - Julio de 2001

Algunas consideraciones que se deben tener en cuenta, al realizar el cableado del sistema, son⁷:

- Todos los terminales comunes del módulo (ANLG COM) están conectados en el módulo analógico.
- Para alcanzar la máxima precisión, se sugiere limitar la impedancia total del cable procurando que éste sea lo más corto posible. Colocar el sistema de E/S lo más cerca posible de los sensores o accionadores. Si la longitud del cable es superior a 50 metros, puede afectar la precisión.
- Si se utilizan varias fuentes de alimentación con entradas analógicas, los terminales comunes de las fuentes de alimentación deben estar conectados.
- El módulo 1769-IF4XOF2 no proporciona lazos de alimentación para entradas analógicas. Utilice una fuente de alimentación compatible con las especificaciones del transmisor de entrada.
- Las entradas analógicas diferenciales son más resistentes al ruido que las unipolares.
- Las salidas de voltaje (Vout 0+ y Vout 1+) del módulo 1769-IF4XOF2 se refieren a los terminales comunes ANLG COM. La resistencia de carga de un canal de salida de voltaje debe ser igual o superior a 1 K Ω .
- La resistencia de carga de un canal de salida de corriente debe mantenerse entre 0 y 300 Ω .
- Los voltajes de Vin+, V/lin- e lin+ del módulo 1769-IF4XOF2 deben estar en un rango entre 0 y +10 VCC en relación con el terminal común analógico.

2.2.4 CONVERTOR ADAM-4520

La mayoría de los sistemas informáticos industriales vienen con puertos seriales RS-232. Aunque es ampliamente aceptado, el puerto serial RS-232 ha limitado la velocidad de transmisión, alcance y capacidades de red. Los estándares RS-422 y

⁷ Tomado de: Instrucciones de instalación, Módulo combinado de E/S analógicas Compact™, (Número de catálogo 1769-IF4XOF2)

RS-485 superan estas limitaciones mediante el uso de líneas de tensión diferencial para datos y señales de control. El convertidor ADAM- 4520, permite tomar las ventajas de los estándares RS-422 y RS-485 en sistemas equipados originalmente con RS- 232. ⁸

El conversor ADAM- 4520, permite crear un sistema de comunicación de grado industrial con hardware estándar.

La figura 11 muestra un conversor ADAM-4520.

Figura 11. Convertidor ADAM-4520



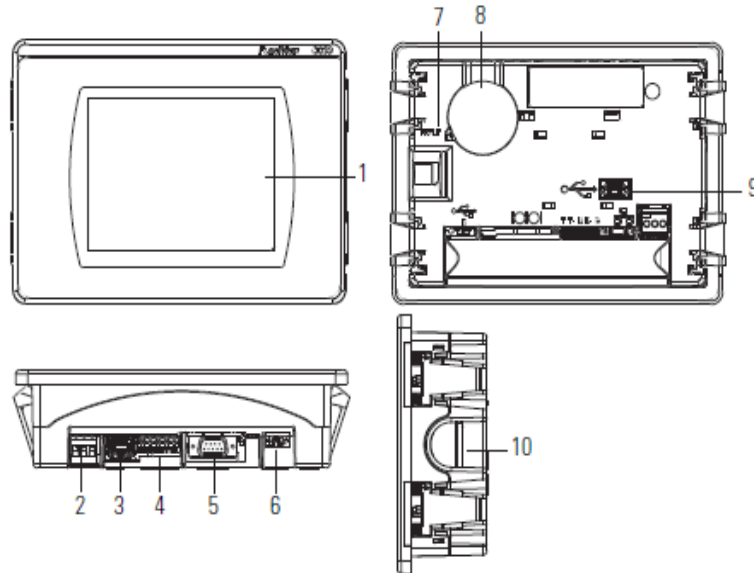
2.3 PANELVIEW

El terminal PanelView es un dispositivo de interface de operador que permite en este caso monitorear y controlar dispositivos conectados al controlador. Las aplicaciones

⁸ Tomado de: "ADAM-4520 Isolated RS-232 to RS-422/485 Converter". agosto de 2014}. Disponible en (http://www.advantech.com/products/data_acquisition_modules/adam-4520).

HMI se crean mediante una aplicación web mientras el computador está conectado directamente al terminal.

Figura 12. Terminal PanelView Component C600.



Ítem	Descripción	Ítem	Descripción
1	Pantalla táctil	6	Puerto de dispositivo USB
2	Entrada de alimentación de 24 VCC	7	Indicadores de estatus de diagnóstico
3	Puerto Ethernet 10/100 Mbits	8	Batería reemplazable de reloj en tiempo real
4	Puerto RS-422 o RS-485	9	Puerto de computadora principal USB
5	Puerto en serie RS-232	10	Ranura para tarjeta digital segura (SD)

Este tipo de terminales se pueden conectar a un explorador mediante un puerto USB o una conexión de red Ethernet. Para ello se debe introducir la dirección IP del terminal del PanelView Component en el campo de dirección del explorador.

El terminal C600 tiene un puerto Ethernet, el cual acepta tanto direcciones IP estáticas como direcciones DHCP (Dynamic Host Configuration). Al usar direcciones estáticas, se debe establecer manualmente la dirección IP, la máscara de subred y

la puerta de enlace predeterminada. Si se usa DHCP, el servidor automáticamente asigna una dirección IP, máscara de subred, la puerta de enlace predeterminada y el servidor DNS y WINS.

2.4 TARJETA DE ADQUISICION DE DATOS

Se cuenta con una tarjeta de adquisición de datos, que permite establecer la comunicación entre el tablero y las aplicaciones desarrolladas en LABView para poder realizar el respectivo control.

Figura 13. Tarjeta de adquisición de datos USB 6009



Se desarrollaron aplicaciones que permitieron la simulación del funcionamiento de plantas físicas, por medio de LABView, que es un software utilizado y conocido por los estudiantes.

Algunas características de esta tarjeta son:

Canales de entrada analógica seleccionados por software: 8 canales unipolares y 4 diferenciales.

- Un convertidor A/D de 14 bits de aproximaciones sucesivas. Y 13 bits de modo diferencial.
- El rango máximo de muestreo de la tarjeta es 5 Mhz.
- Rangos de entradas analógicas seleccionadas por software:
Unipolares: $\pm 10V$.

Diferenciales: $\pm 20V$, $\pm 10V$, $\pm 5V$, $\pm 4V$, $\pm 2.5V$, $\pm 2V$, $\pm 1.25V$, $\pm 1V$.

- Resolución de entrada: 14 bits en modo unipolar y 13 bits en modo diferencial.
- Muestreo de tasa máxima: Un canal 48 KS/s, para múltiples canales 42KS/s. Voltaje de trabajo $\pm 10V$, con una impedancia de entrada de $144K\Omega$ y una protección de sobretensión de $\pm 35V$.
- Cuenta con 8 entradas analógicas y 8 digitales ambas pueden configurarse como entradas o salidas por medio de software además posee 8 salidas digitales con 2 salidas analógicas utilizando un convertidor de aproximaciones sucesivas.

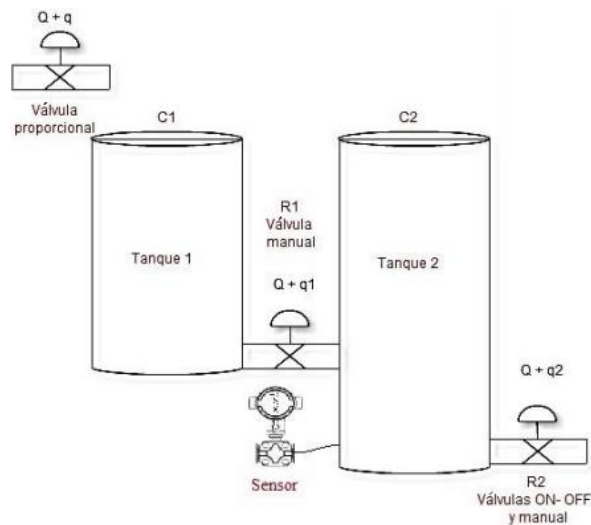
3 IDENTIFICACIÓN DE LOS MODELOS Y DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DE LOS SISTEMAS

En este capítulo se definen las funciones de transferencia que representan el comportamiento de los sistemas seleccionados, los cuales se simularon en LabVIEW y posteriormente se controlaron empleando el CompactLogix 1769-L32E

3.1 SISTEMA DE TANQUES ACOPLADOS

Este sistema de tanques acoplados se seleccionó del trabajo de grado titulado INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE NIVEL PARA UN SISTEMA DE TANQUES ACOPLADOS EN EL LABORATORIO DE CONTROL E INSTRUMENTACION DE LA E3T-UIS de donde se tomó literalmente la función de transferencia de segundo orden junto con sus parámetros.

Figura 14. Sistema de tanques acoplados



Fuente: INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE NIVEL PARA UN SISTEMA DE TANQUES ACOPLADOS EN EL LABORATORIO DE CONTROL E INSTRUMENTACION DE LA E3T-UIS. Claudia Peñaranda, Wilson Silva, Eulices Arias. Universidad Industrial de Santander. Colombia. 2014

El sistema consiste en dos tanques acoplados por medio de un tubo de PVC de 1'' en el que hay presente una válvula manual por donde sale el fluido del primer tanque

y posteriormente ingresa al segundo tanque venciendo la resistencia hidráulica (R1) provista por dicha válvula manual la cual también es utilizada para realizar perturbaciones al sistema.

En el segundo tanque hay un transmisor de presión diferencial, el cual es utilizado para sensar el nivel de líquido presente en dicho tanque, generando una señal que posteriormente es procesada por el controlador y a su vez este envía la señal de control a la electroválvula proporcional servo accionada, quien es la encargada de regular el caudal de entrada al primer tanque, para que el nivel del segundo tanque llegue al nivel deseado.

Finalmente en la salida del segundo tanque hay una válvula On-Off encargada del desagüe del fluido contenido en el tanque, con resistencia hidráulica R2.

La función de transferencia de segundo orden del sistema de dos tanques acoplados es la siguiente:

$$\frac{H_2 S}{Q S} = \frac{R_2}{(R_1 R_2 C_1 C_2) S^2 + R_1 C_1 + R_2 C_2 S + 1} \quad (1)$$

Donde la entrada es el flujo que ingresa al primer tanque y la salida es el nivel presente en el segundo tanque y los parámetros son:

$R_1 [s/m^2]$ es la resistencia hidráulica que se opone al paso de fluido que va del tanque 1 al tanque 2 y atraviesa la válvula manual

$R_2 [s/m^2]$ es la resistencia hidráulica que se opone al paso de fluido que sale del tanque 2 y atraviesa la válvula On-Off

$C_1 [m^2]$ es la capacitancia hidráulica o área transversal del primer tanque.

$C_2 [m^2]$ es la capacitancia hidráulica o área transversal del segundo tanque.

$dh_1 [m]$ es el cambio de la altura en el primer tanque

$dh_2 [m]$ es el cambio de la altura en el segundo tanque

$q[m^3]$ es el flujo que ingresa al primer tanque

$q_1[m^3]$ es el flujo que sale del segundo tanque

$q_2[m^3]$ es el flujo que sale del segundo tanque

Reemplazando los parámetros obtenidos en el trabajo de grado de referencia

$C_1 = 0.1238[m^2]$ $C_2 = 0.1244[m^2]$ $R_1 = 620[s/m^2]$ y $R_2 = 1020[s/m^2]$, se tiene

$$\frac{H_2(S)}{Q(S)} = \frac{1020}{9739S^2 + 203.6S + 1} \quad (2)$$

Donde H_2 está dado en [m] y Q en [mm^3/s]

3.2 HORNO TOSTADOR TIPO RESIDENCIAL

El sistema de horno tostador tipo residencial se seleccionó del trabajo de grado titulado COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO DE UN CONTROLADOR PID INDUSTRIAL CON LA FUNCIÓN PID DE UN PLC (CONTROLADOR LOGICO PROGRAMABLE) de donde se tomó literalmente la función de transferencia junto con sus parámetros.

El horno se ha modelado como un sistema de primer orden

$$\frac{T(S)}{V_a(S)} = \frac{A}{(\tau * S + 1)} \quad (3)$$

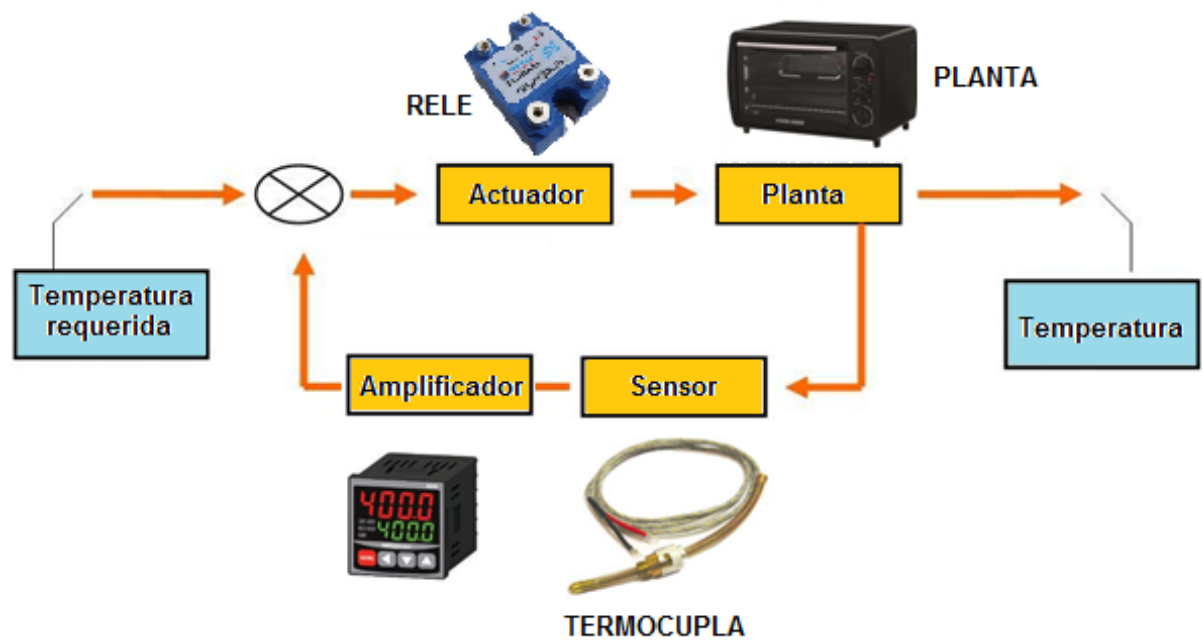
Reemplazando $A=0.006561$ y la constante de tiempo de calentamiento τ , la cual es el tiempo que demora el horno en alcanzar el 63.2% de su valor de temperatura nominal, se tiene

$$\frac{T(S)}{V_a(S)} = \frac{0.006561}{S + \frac{1}{335}} \quad (4)$$

Donde $V_a(S)$ es la tensión de alimentación y $T(S)$ es la temperatura en grados celsius a la cual se encuentra el interior del horno

La figura 15 muestra el diagrama de bloques para el sistema real que se implementó para realizar el control de la temperatura del horno físico.

Figura 15. Diagrama de bloques para el control del horno tostador tipo residencial



De la figura 15 se observa que la temperatura del horno es sensada por una termocupla que genera una señal en mV, por lo que se requiere amplificarla, para ello se utilizó un Controlador Digital de Temperatura AX4-4A⁹; el cual tiene la opción de amplificar permitiendo leer valores en los rangos exigidos por el modulo analógico del PLC.

En el software RSLogix 5000 se hizo una programación en escalera la cual tiene un controlador PI y una rutina con un PWM que energiza o desenergiza una salida digital

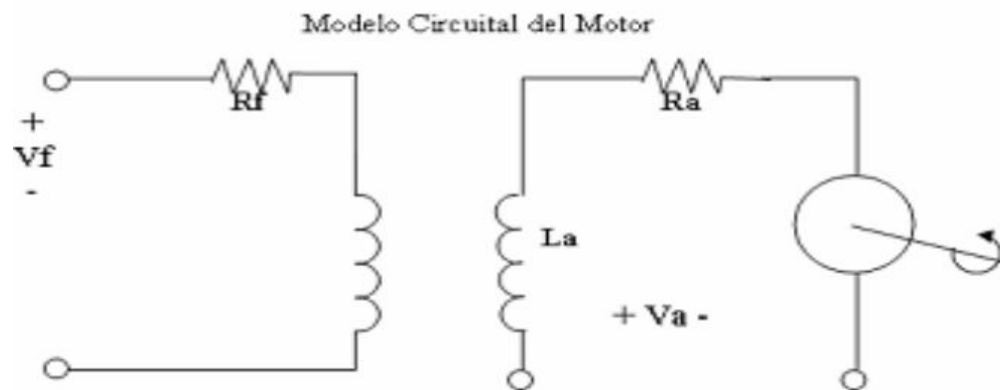
⁹ El controlador es de la marca HanYoung Nux, cuyas especificaciones se pueden ver en la página web: http://productos.hayaqui.info/index.php?route=product%2Fproduct&product_id=89

activando o desactivando un relé¹⁰ lo que permite controlar la temperatura al interior del horno siguiendo la temperatura deseada asignada en el setpoint.

3.3 MOTOR DE CORRIENTE CONTINÚA DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE

El sistema de motor de corriente continua se seleccionó del trabajo de grado titulado COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO DE UN CONTROLADOR PID INDUSTRIAL CON LA FUNCIÓN PID DE UN PLC (CONTROLADOR LOGICO PROGRAMABLE) de donde se tomó literalmente la función de transferencia junto con sus parámetros.

Figura 16. Modelo del motor de corriente continua con excitación independiente



Fuente: OGATA HATSUHIKO, Modern Control Engineering, Third edition, Prentice Hall, 1998.

Relacionando el componente eléctrico y mecánico del motor se tiene que la función de transferencia del motor que parte del reposo es la mostrada en (5).

$$\frac{W(S)}{V_a(S)} = \frac{K_m}{(R_a + L_a * S) * (J * S + B) + K_m^2} \quad (5)$$

¹⁰ El rele utilizado es de la marca OPTEC cuyas especificaciones se pueden ver en la página web: <http://documents.mx/documents/manualoptec.html>

Donde:

$W(S)$: Velocidad

$V_a(S)$: Tension de armadura

Resistencia de armadura $R_a = 3.67895867 \Omega$

Inductancia de armadura $L_a = 70 \text{ mH}$

Constante de magnetización $K_m = \frac{V_a - R_a * I_a}{w} = 1.01$

Constante de fricción $B = \frac{K_m * I_a}{w} = 2.1 * 10^{-3}$

Momento de inercia $J = 0.004201173 \text{ Kg} * \text{m}^2$

De modo que la función de transferencia para el control de velocidad del motor de corriente continua que se controló con él PLC CompactLogix 1769-L32E, es la siguiente:

$$\frac{W(S)}{V_a(S)} = \frac{1.01409162}{(3.678958+0.07S)*(0.004201173S+0.0020512)+1.01409162} \quad (6)$$

Siendo $W(S)$ la velocidad angular con la que cuenta el motor a la salida para un respectivo voltaje de armadura $V_a(S)$ a la entrada del sistema el cual debe ser mayor si se asigna un mayor setpoint a la entrada del sistema.

4 DESCRIPCION LAS PLANTAS EN LABVIEW, ETAPA DE ADECUACION DE SEÑAL Y ADQUISICION DE DATOS

En este capítulo se detalla la programación que se desarrolló en LabVIEW para la caracterización de las plantas virtuales, describiéndose los bloques que se utilizaron. Además especifica el circuito diseñado para la adecuación de señal y posterior aislamiento, que necesitó.

4.1 IMPLEMENTACION DE LAS PLANTAS EN LABVIEW

En el PC se simula, mediante LabVIEW, los sensores, actuadores, la etapa de potencia y en general toda la planta, con el propósito de comprobar la ejecución del control desde el PLC.

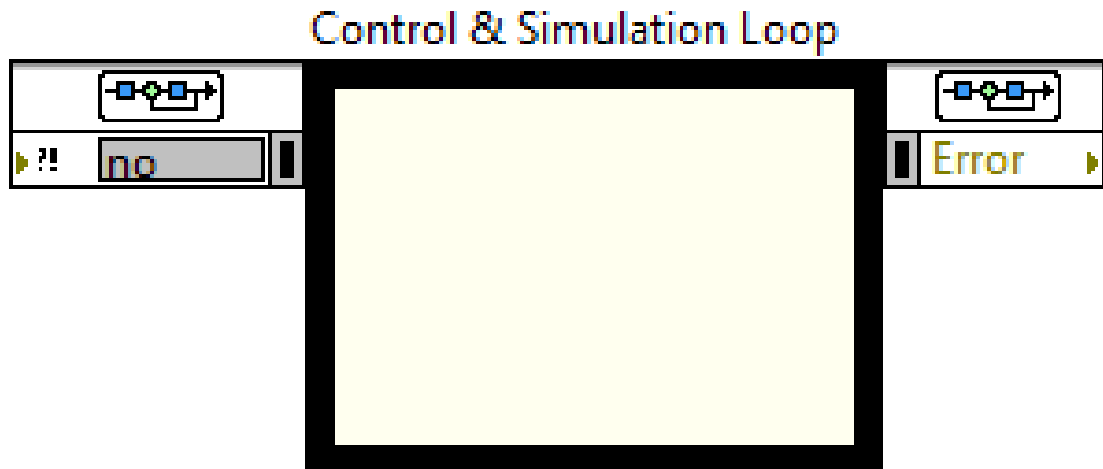
Al controlar las plantas virtuales por medio del tablero, más específicamente del PLC Compactlogix 1769-L32E, se utilizó la tarjeta de adquisición de datos (USB 6009) de National Instrument para la recepción y envío de datos entre el controlador y el PC.

4.1.1 DESCRIPCION DE LOS BLOQUES FUNCIONALES

Control & Simulation Loop:

Ejecuta el diagrama de simulación contenido en el bloque hasta que el Control & Simulación Loop llega al tiempo final de simulación o hasta que la función de simulación "Halt" detiene la ejecución mediante programación. El Control & Simulación Loop tiene un nodo de entrada y un nodo de salida. Se puede utilizar el nodo de entrada para configurar los parámetros de simulación mediante programación. Para acceder a este cuadro de diálogo se hace doble clic en el nodo de entrada o haciendo clic derecho en la frontera y seleccionando configurar parámetros de simulación en el menú contextual.

Figura 17. Boque Control & Simulation Loop:



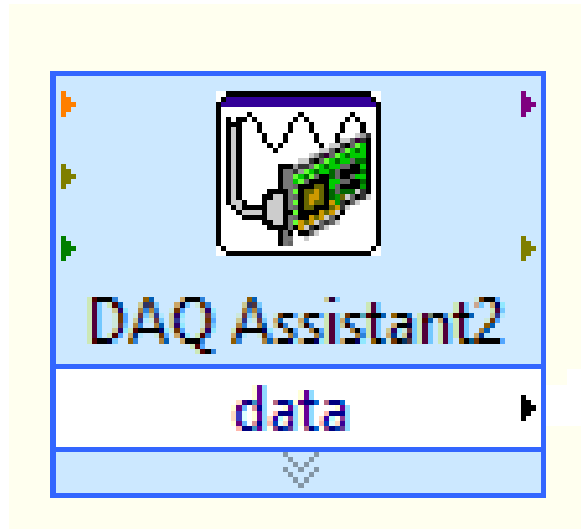
Los datos requeridos para su configuración son los siguientes:

- Tiempo inicial de la simulación.
- Tiempo final de la simulación.
- Método de solución de la simulación: esta casilla da la posibilidad de escoger el método a utilizar ya sea Runge-Kutta 27, Runge-Kutta 4, etc. para resolver la planta.
- Paso de tiempo continuo o tolerancia: como su nombre lo indica en esta casilla se coloca el paso de tiempo continuo para la solución de la planta y el error permitido en la solución.
-

DAQ Assistant

Se emplea cuando se pretende utilizar una entrada o salida de la tarjeta de adquisición de datos para comunicarla con el programa elaborado. Este bloque permite configurar el tipo de entrada o salida que se requiere, es decir una de tensión o una de corriente, es importante aclarar que también depende de las características de la tarjeta, después de configurar esto, permite escoger (en el caso de entradas) el número de muestras por segundo y el modo de adquisición de datos, para la salida permite escoger el modo generación (analógico o digital) y los rangos de salida de tensión.

Figura 18. Bloque DAQ Assistant

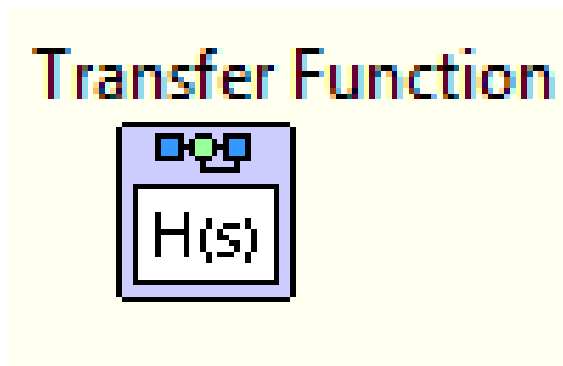


Se usa cuando se pretende utilizar una entrada o salida de la tarjeta de adquisición de datos para comunicarla con el programa elaborado. Este bloque permite configurar el tipo de entrada o salida que se requiere, es decir una de tensión o una de corriente, es importante aclarar que también depende de las características de la tarjeta, después de configurar esto, permite escoger (en el caso de entradas) el número de muestras por segundo y el modo de adquisición de datos, para la salida permite escoger el modo generación (analógico o digital) y los rangos de salida de tensión.

Transfer function

Implementa la forma de la función de transferencia de la planta, los datos a introducir son el denominador y el numerador, esto se logra haciendo doble clic sobre el icono. La entrada es la señal estímulo y la salida es la respuesta de la planta frente a esta entrada.

Figura 19. Bloque Transfer function



Waveform Chart

Permite visualizar mediante una gráfica el comportamiento de la planta.

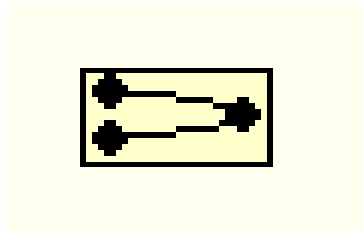
Figura 20. Bloque Waveform Chart.



Merge Signals Function

Combina dos o más señales en una sola salida.

Figura 21. Bloque Merge Signals Function



Simulate Signal

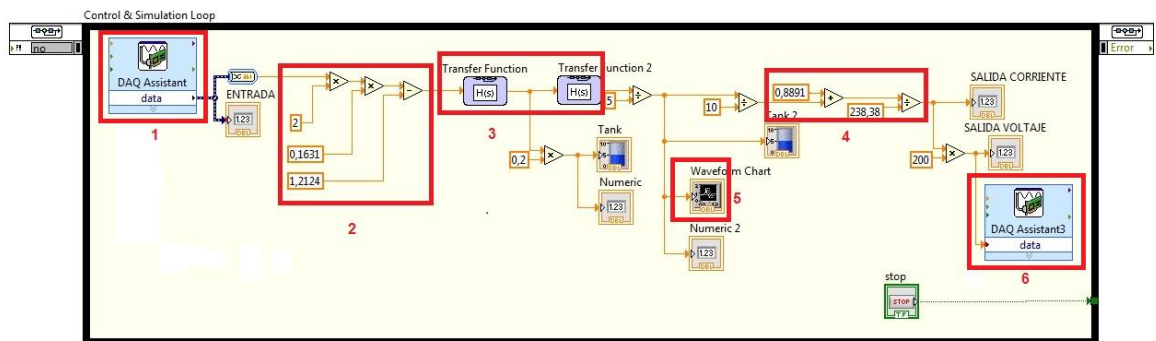
Es un componente del diagrama de bloques que se puede configurar para la realización de tareas de medición comunes. Simula una señal basada en la configuración que se especifique.

Figura 22. Bloque Simulare Signal



4.1.2 PLANTA DE TANQUES ACOPLADOS

Figura 23. VI Planta tanques acoplados



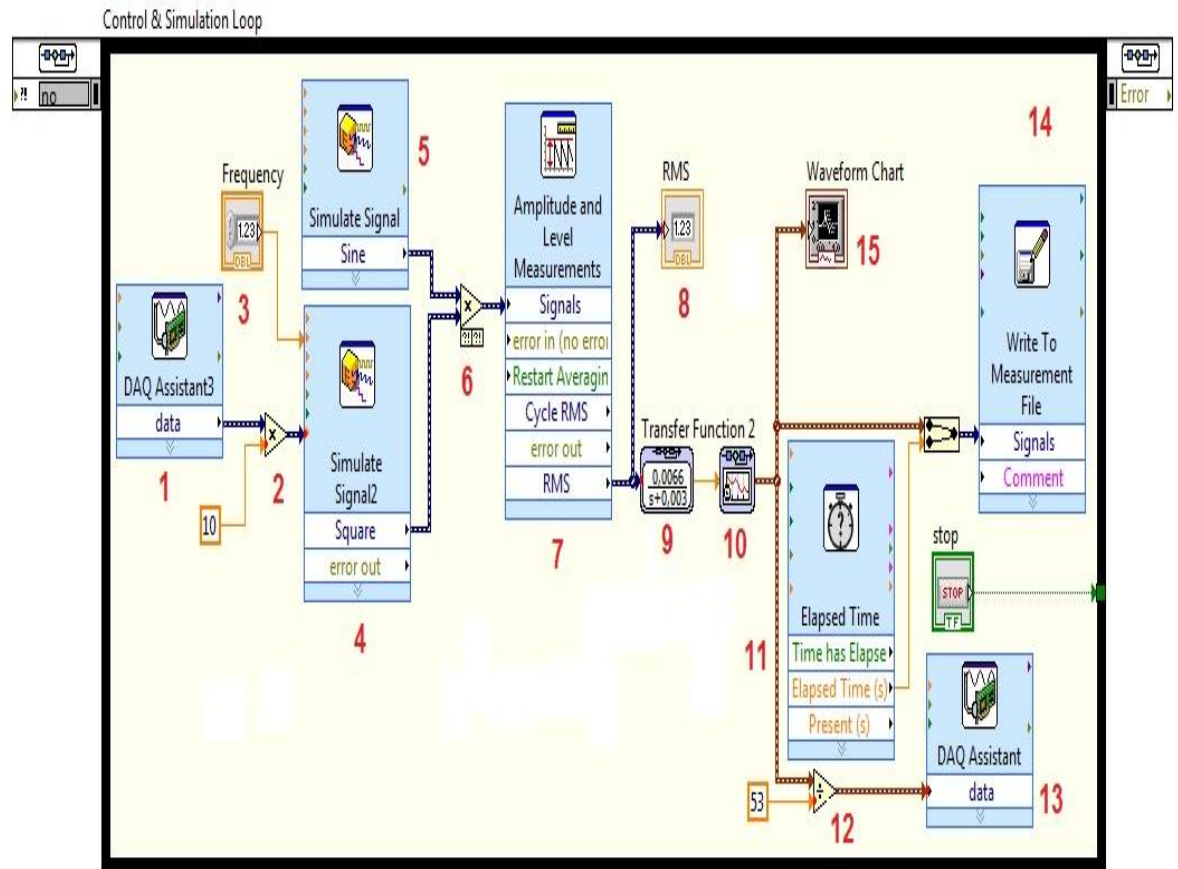
En la figura 23, se observa cómo se programa el comportamiento del sistema de tanques acoplados; el cual está estructurado de la siguiente manera:

1. Este bloque permite adquirir los datos para controlar la planta desde el PLC, a través de la tarjeta de adquisición de datos.
2. La señal recibida desde el PLC se convierte a los valores representativos de los niveles de caudal, hallándose un equivalente para corriente y se lleva a la ecuación característica del actuador, que en el proceso real corresponde a una electroválvula proporcional servoaccionada.
3. En este bloque se ejecutan las funciones de transferencia para cada tanque.¹¹
4. El bloque permite recibir el nivel del segundo tanque, llevándolo a la ecuación característica del sensor, que en el proceso real corresponde a un transmisor de presión diferencial.
5. El bloque permite visualizar mediante una gráfica el comportamiento de la planta, para este caso el nivel del tanque
6. El bloque toma el valor de la señal de salida de la ecuación característica del sensor y la transmite a la tarjeta de adquisición de datos, para ser enviada al PLC.

¹¹ Ver capítulo 3 ecuación (2)

4.1.3 PLANTA PARA HORNO CONTROL CON TRIAC

Figura 24.VI Horno



En la figura 24, se observa cómo se programa el comportamiento del actuador y el horno tostador casero; el cual está estructurado de la siguiente manera:

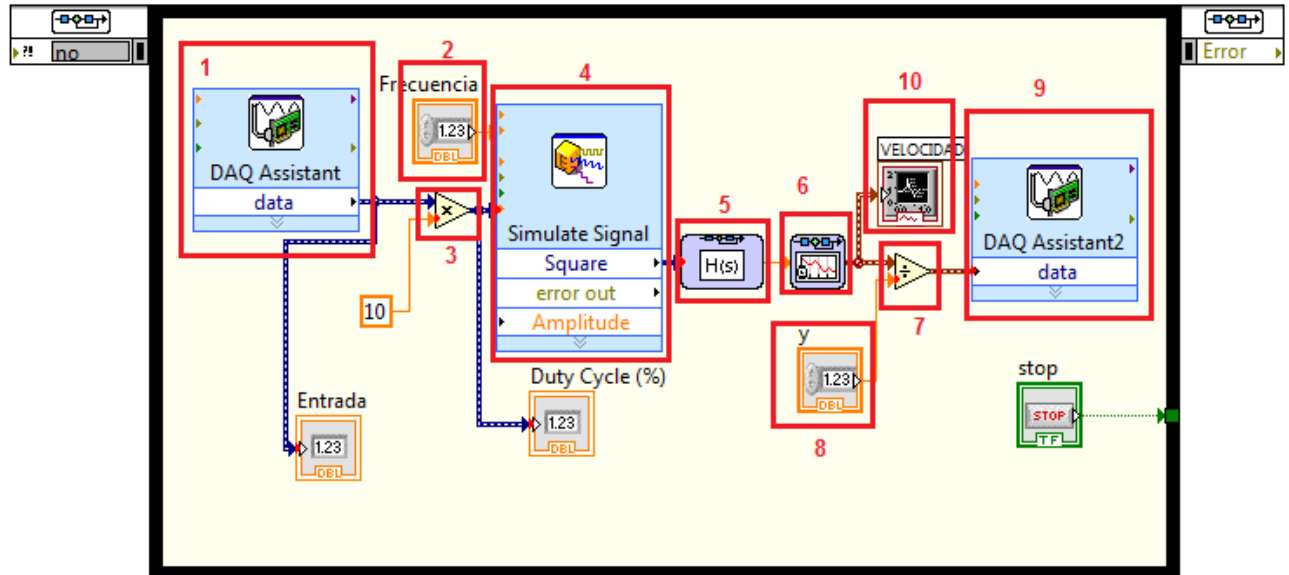
1. Este bloque permite adquirir los datos correspondientes a niveles de tensión, para controlar la planta desde el PLC, a través de la tarjeta de adquisición de datos.
2. La señal recibida desde el PLC se multiplica por un factor, en este caso 10; para convertirla en un valor de 0 a 100, que corresponde al porcentaje de ciclo de trabajo del pulso.
3. Permite introducir la frecuencia de la señal PWM
4. El bloque toma la señal de control, generando la señal PWM

5. El bloque permite simular la señal sinusoidal que energiza el horno, que en el proceso real corresponde a la red eléctrica.
6. El bloque permite simular la función del triac
7. El bloque toma la señal proveniente del triac y calcula el valor RMS de la señal para transmitírselo a la planta.
8. Visualiza el valor RMS de la señal
9. En este bloque se ejecuta la función de transferencia para el horno.¹²
10. Ayuda a mostrar los datos de la simulación correctamente
11. Medidor de tiempo de la duración de la simulación
12. El bloque recibe y ajusta los valores correspondientes a la temperatura del horno, en una tensión de 0 a 5 V que son los permitidos por la tarjeta USB 6009.
13. El bloque toma el valor de la señal en este caso temperatura y la transmite a la tarjeta de adquisición de datos, para ser enviada al PLC.
14. Guarda el comportamiento de la temperatura durante la simulación.
15. Muestra el comportamiento de la temperatura mediante una gráfica.

¹² Ver capítulo 3 ecuación (4)

4.1.4 MOTOR DE CORRIENTE CONTINÚA

Figura 25. VI Motor de corriente continua



En la figura 25, se observa cómo se programa el comportamiento del motor de corriente continua; el cual está estructurado de la siguiente manera:

1. Este bloque permite adquirir los datos para controlar la planta desde el PLC, a través de la tarjeta de adquisición de datos.
2. El bloque permite introducir la frecuencia de la señal PWM
3. La señal recibida desde el PLC se multiplica por un factor, en este caso 10; para convertirla en un valor de 0 a 100, que corresponde al porcentaje de ciclo de trabajo del pulso.
4. Es la Fuente al mismo tiempo es la señal de control PWM y la operación del transistor.
5. En este bloque se ejecuta la función de transferencia para el motor de corriente continua.¹³

¹³ Ver capítulo 3 ecuación (6)

6. Ayuda a mostrar los datos de la simulación correctamente.
7. Transforma los valores de la Velocidad en una tensión de 0 a 5 V que son los permitidos por la tarjeta USB 6009.
8. Es el valor con el cual transformo el valor de velocidad en una tensión entre 0 y 5 [v].
9. Transmite la velocidad que posee el motor al controlador a través de la tarjeta USB 6009.
10. Muestra el comportamiento de la temperatura mediante una gráfica.

4.2 CIRCUITOS PARA LA ADECUACION DE SEÑAL

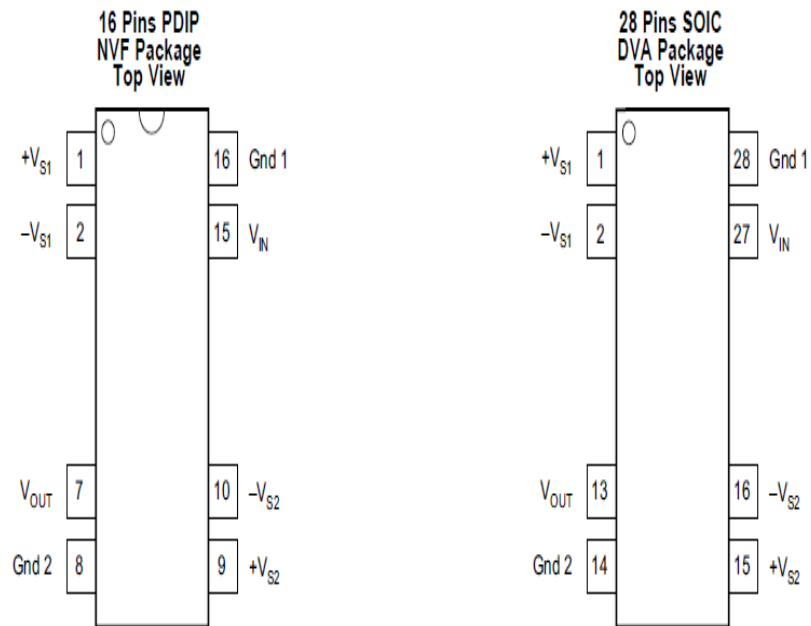
Se utilizaron dos circuitos electrónicos porque fue necesario adaptar la señal a los niveles adecuados para poder ser leídos por la tarjeta de adquisición de datos, además es imperioso aislar galvánicamente (diferentes tierras) la tarjeta de adquisición de datos y el controlador, para ello se utilizó un circuito que permite el paso de señal entre ellos sin modificarla.

4.2.1 CIRCUITO DE AISLAMIENTO ENTRE LA TARJETA DE ADQUISICIÓN Y EL TABLERO DE CONTROL.

Se diseñó e implementó una etapa de aislamiento con el fin de proteger la tarjeta USB 6009 en caso de falla, de tal manera que entre el tablero y la tarjeta los circuitos sean independientes. Los integrados que se utilizaron fueron el amplificador ISO 122, utilizado para aislar señales analógicas.

En la figura 26, se muestra la configuración dada por el fabricante del amplificador de aislamiento ISO 122.

Figura 26. Encapsulado y descripción pines ISO 122



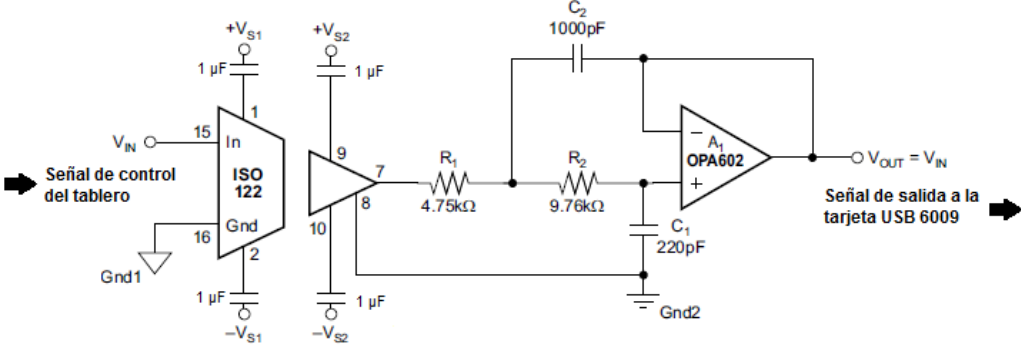
Pin Functions

NAME	PIN		I/O	DESCRIPTION
	PDIP	SOIC		
GND	8	14	-	Low-side ground reference
GND	16	28	-	High-side ground reference
V_{IN}	15	27	I	High-side analog input
V_{OUT}	7	13	O	Low-side analog output
$+V_{S1}$	1	1	-	High-side positive analog supply
$-V_{S1}$	2	2	-	High-side negative analog supply
$+V_{S2}$	9	15	-	Low-side positive analog supply
$-V_{S2}$	10	16	-	Low-side negative analog supply

Fuente: Datasheet del ISO122

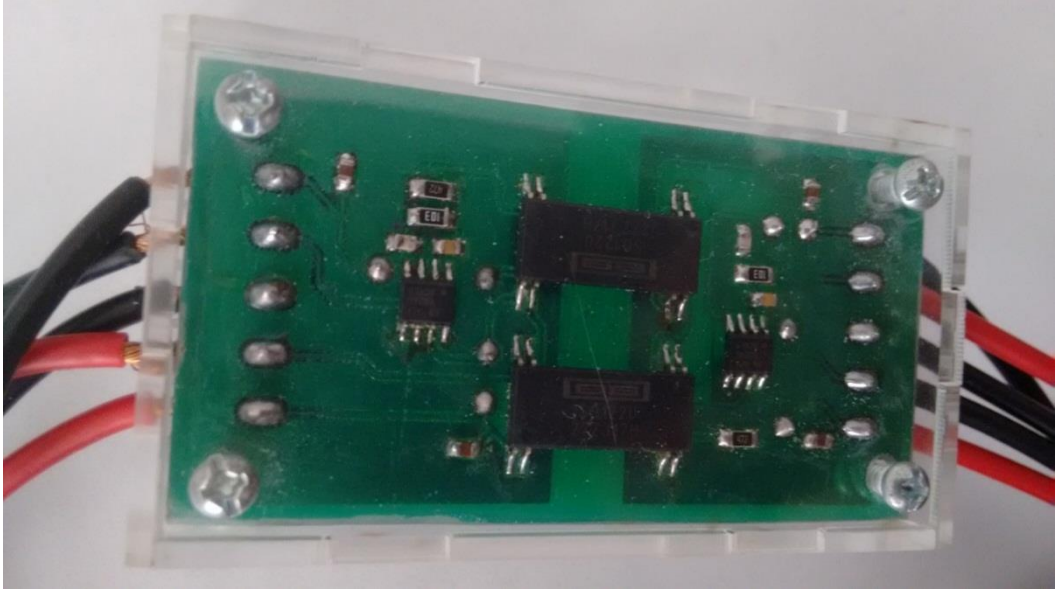
En la figura 27, se puede observar el circuito electrónico que se utilizó en esta etapa. Esta configuración se hizo de acuerdo a las especificaciones técnicas del fabricante y las necesidades.

Figura 27. Etapa de aislamiento y filtrado de la señal de control



Fuente: Adaptada del datasheet del ISO122 o ISO124
La figura 28 muestra la tarjeta implementada del aislamiento.

Figura 28. PCB de la etapa de aislamiento y filtrado de la señal de sensado



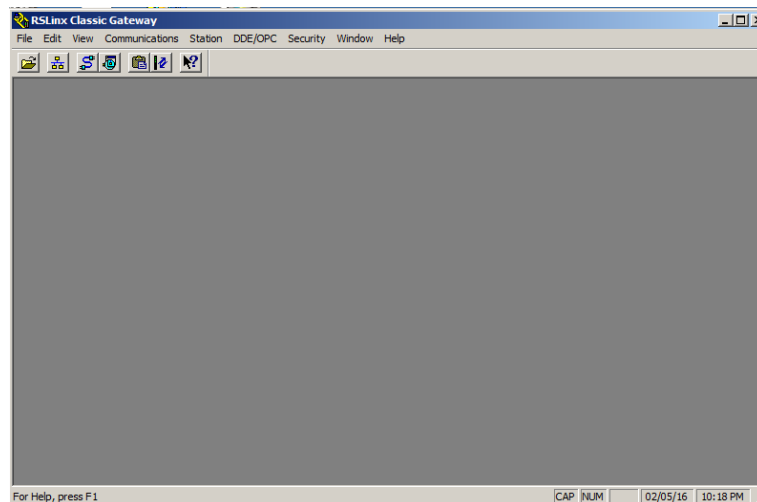
5 DESCRIPCION DEL SOFTWARE DE COMUNICACION, PROGRAMACION Y SIMULACION PARA EL PLC

Para realizar una completa y correcta programación y configuración del PLC CompactLogix 1769-L32E es necesario el uso de software especializado como el RSLinx el cual es el encargado de controlar las comunicaciones entre los dispositivos, el RSLogix 5000 donde se agregan el controlador y los módulos con los que este cuenta y se hace la programación en diagrama escalera para luego cargarlo al PLC, el RSLogix Emulate 5000 donde sin la necesidad de un controlador físico puede realizarse la programación en ladder y ver como se energizan entradas y salidas digitales y el software FactoryTalk View el cual permite crear una interfaz humano grafica para monitorear los procesos desde el mismo PC incluso sin la necesidad de una Panel View.

5.1 RSLINX

RSLinx es una herramienta que permite la comunicación con equipos o redes de Allen-Bradley.

Figura 29. Ventana principal de RSLinx



“Este software permite que el PLC acceda a una amplia variedad de aplicaciones del Software de Rockwell y Allen-Bradley. Entre estas aplicaciones se incluyen

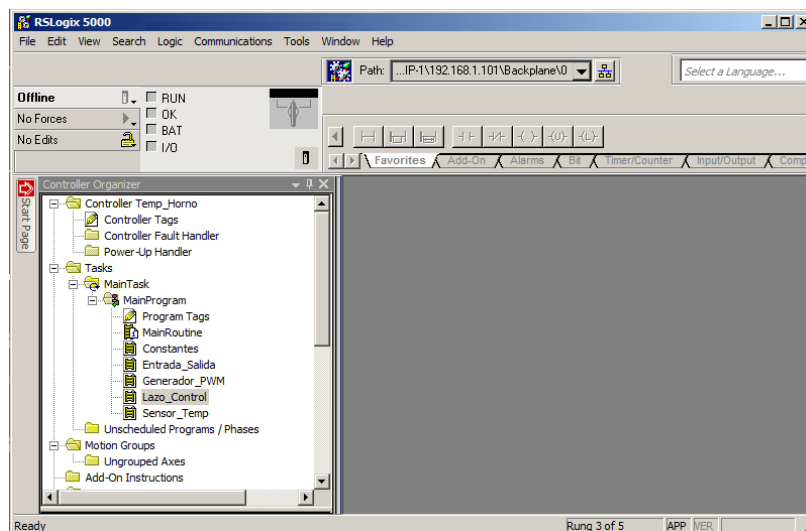
desde aplicaciones de configuración y programación tales como RSLogix y RSNetWorx hasta aplicaciones HMI (interfaz operador-máquina) como RSView32, hasta sus propias aplicaciones de adquisición de datos mediante Microsoft Office, páginas Web o Visual Basic. RSLinx Classic es un servidor compatible con OPC Data Access.”¹⁴

Existen varias versiones: Lite, Single Node, OEM, SDK, Professional, RSView y, por último, Gateway. La versión Lite, como su nombre lo indica, es la versión más sencilla de RSLinx, y la versión Gateway es la más completa.

5.2 RSLOGIX 5000

Cuando se trabaja con algún tipo de PLC, es necesario que se cuente con un software , en el cual se pueda llevar a cabo la programación de este, en el caso de los PLC's de la línea de Allen Bradley de última generación se cuenta con el software RSLogix 5000, que permite configurar, programar y supervisar el funcionamiento del PLC.

Figura 30. Ventana principal de RSLogix 5000



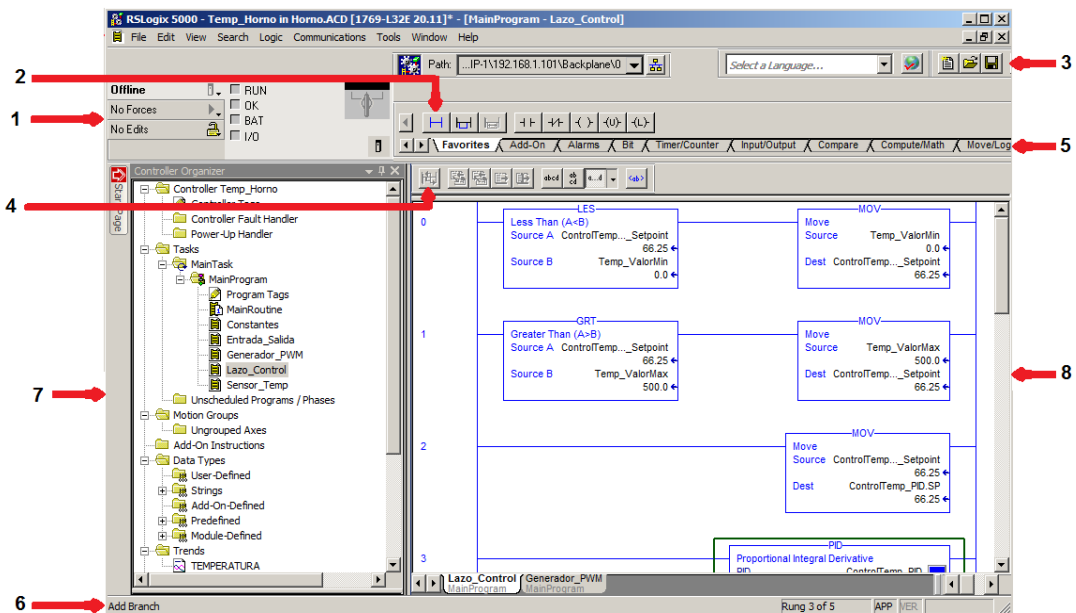
¹⁴ Tomado de: “Compatibilidad en Software de Rockwell”. {agosto de 2014}. Disponible en: (<https://conbotassucias.wordpress.com/2013/02/04/compatibilidad-en-software-de-rockwell/>).

El software RSLogix 5000, es un entorno de desarrollo en el que se integran las herramientas de programación necesarias para implementar diversas aplicaciones con los controladores Temp de la línea Allen Bradley de Rockwell.¹⁵

Utiliza varios tipos de lenguaje de programación como Escalera (Ladder), Bloques de funciones (Functions blocks), texto estructurado (structured text) y esquemas de funciones secuenciales (Sequential Function Chart).

La interfaz del programa RSLogix 5000 cuenta con diferentes apartados los cuales son de vital importancia reconocer e identificar el uso adecuado dependiendo el proyecto que se esté realizando por lo que se describen en detalle en la figura 31.

Figura 31. Descripción ventana principal de RSLogix 5000



1. **La barra en línea** - Este barra de herramientas muestra el estado del programa y del controlador. También indica el modo de funcionamiento y si existen cambios pendientes

¹⁵ Tomado de tesis: MURILLO BARRIOS, Andrés. Automatización de dos lazos de control para el proceso evaporación de leche en una línea de producción de leche condensada. Cartago (Costa Rica), 2011,111p. Trabajo de grado (Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Electrónica

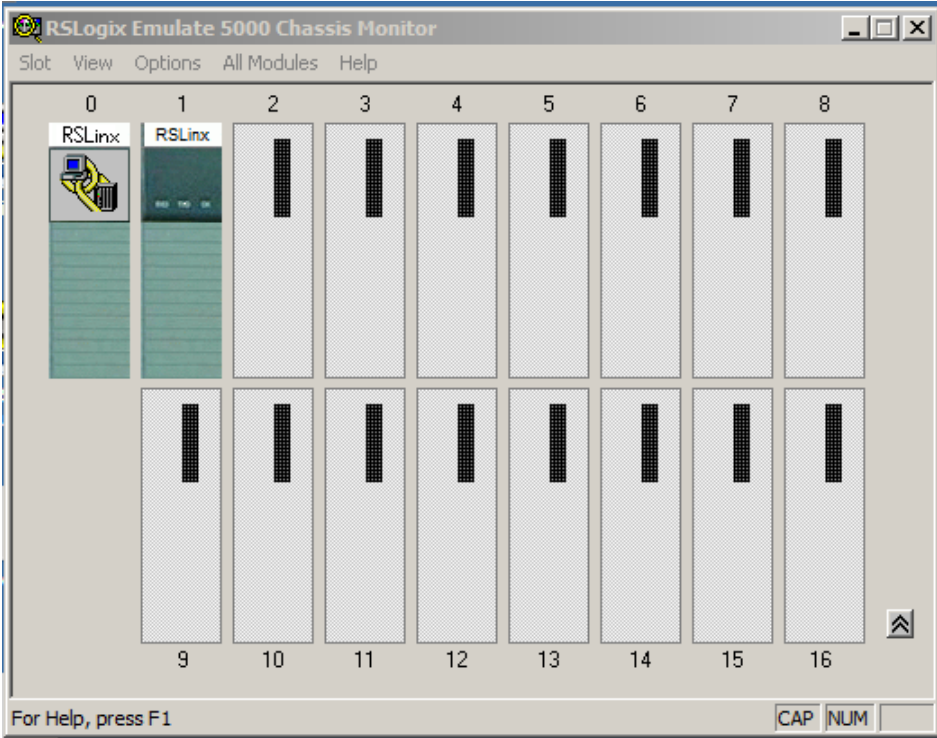
2. **La barra de herramientas de la lógica común** - Esta barra de herramientas contiene todos los elementos de lógica ladder que no son instrucciones (por ejemplo, rungs, ramas), así como las instrucciones más utilizadas.
3. **La barra de herramientas Estándar** - Esta barra de herramientas contiene las funciones (por ejemplo, Cut Copy, paste) que va a utilizar varias veces a medida que desarrolle y pruebe su programa.
4. **Barra de herramientas Editar Ladder** - Esta barra de herramientas contiene toda la edición en línea de las funciones, así como algunas funciones comunes de edición
5. **La barra de herramientas con pestañas Instrucción.** En esta barra se encuentran las instrucciones necesarias para crear un proyecto en ladder y estas están organizadas por categorías las cuales pueden seleccionarse haciendo clic en cada una de las pestañas.
6. **La barra de estado** - barra de estado para información de estado en curso del programa.
7. **El organizador del controlador** - El organizador del controlador es una gráfica y representación de los contenidos de su proyecto.
8. **El panel de vistas** - La ventana principal del software RSLogix 5000 le ofrece con un marco en el que se pueden ver varios editores (por ejemplo, editor de ladder, editor de bloques de funciones, etc.)¹⁶

5.3 RSLOGIX EMULATE 5000

RSLogix Emulate 5000 es un software simulador para la línea Allen Bradley de los controladores Logix 5000 ((ControlLogix®, CompactLogix®, FlexLogix®, SoftLogix5800® and DriveLogix®)

¹⁶ Tomado de web: "Como programar un PLC Allen Bradley RSLogix 5000". {julio de 2014}. Disponible en: (http://www.rocatek.com/forum_rslogix.php).

Figura 32. Ventana principal de RSLogix Emulate 5000

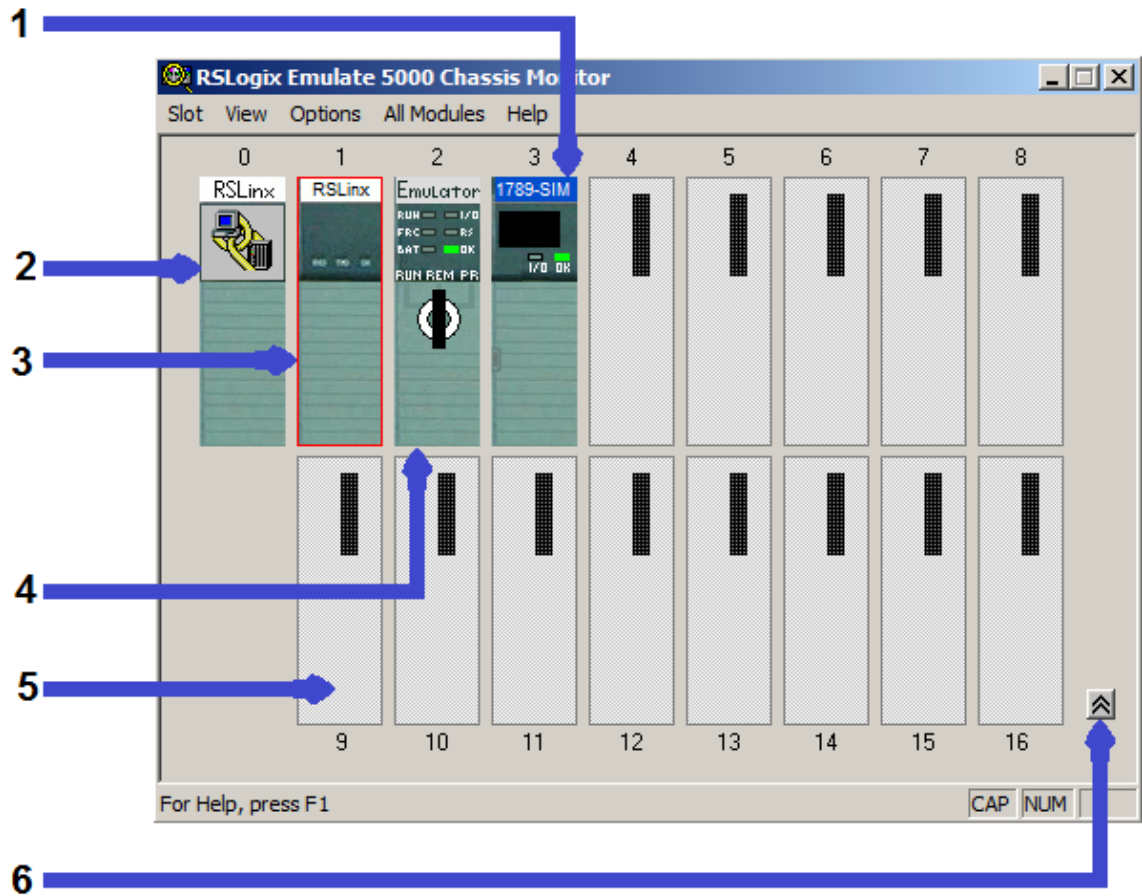


RSLogix Emulate 5000 es utilizado para comprobar la lógica antes que esta sea puesta en el controlador físico.

Es importante al momento de hacer la simulación tener en cuenta que la versión del software de programación RSLogix 5000 y el RSLogix Emulate 5000 sea la misma.

La siguiente figura muestra una ventana del Monitor Chasis:

Figura 33. Descripción ventana principal de RSLogix Emulate 5000



1. Módulo de entradas y salidas simulado.
2. Módulo RSLinx Classic (slot 0 por defecto), puede residir en otro slot disponible.
3. La línea roja indica que el modulo esta seleccionado. Haciendo clic derecho se despliega el menú de configuración.
4. Módulo que simula un controlador.
5. Slots vacíos que pueden contener un controlador o módulos de entrada y salida simulados. Haciendo clic en el slot se crea un módulo.
6. Este botón permite reducir el monitor del chasis a uno más pequeño.

5.4 FACTORYTALK VIEW

FactoryTalk View es un programa de Rockwell que permite la creación de aplicaciones HMI (Human Machine Interface), siendo un programa versátil, que ofrece una solución robusta y dedicada para dispositivos de interface de operador a nivel de máquina como lo son los PanelView.

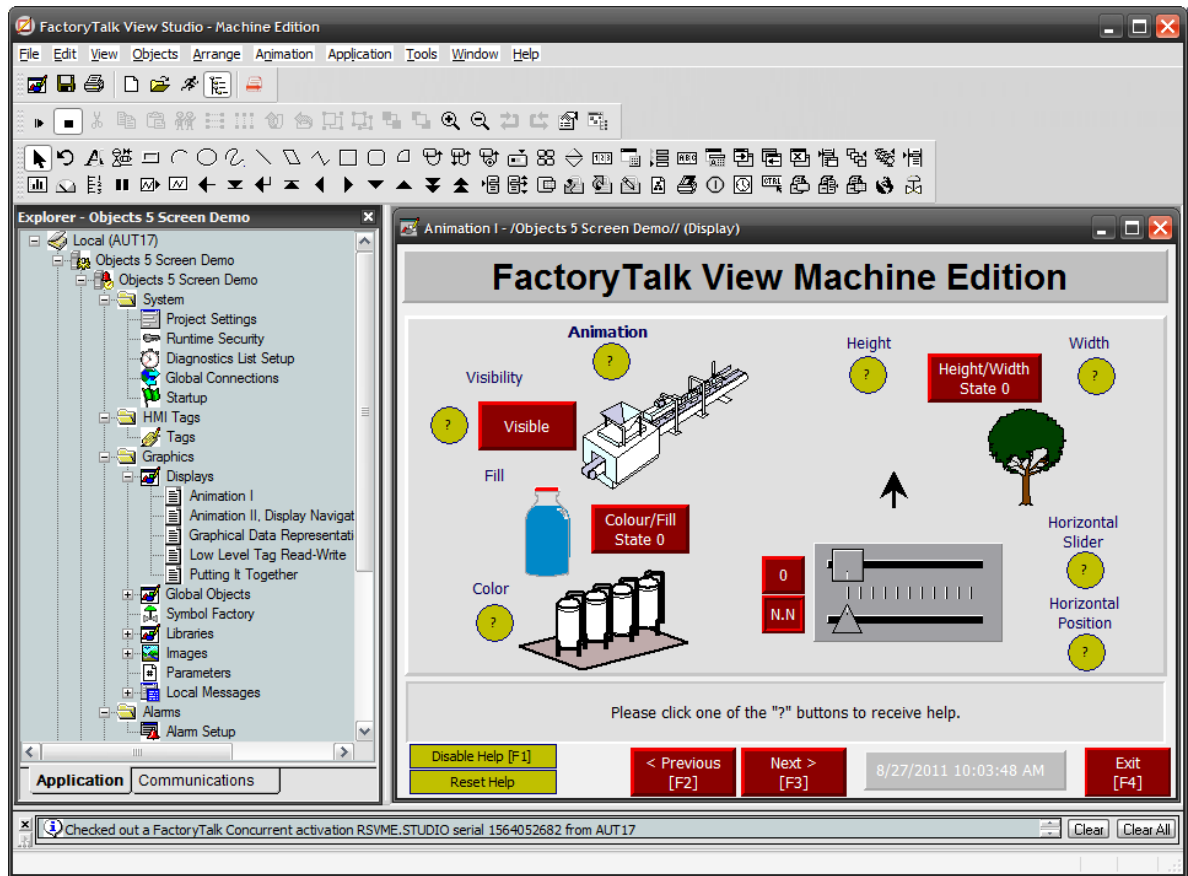
Figura 34. FactoryTalk View



Fuente: <http://notasdeautomatizacion.blogspot.com.co/2011/08/probando-factory-talk-view-me-el.html>

Al abrir el programa para la creación de un nuevo proyecto se encuentra la siguiente ventana:

Figura 35. Ventana de programación de FactoryTalk View



Fuente: <http://notasdeautomatizacion.blogspot.com.co/2011/08/probando-factory-talk-view-me-el.html>

En esta ventana se puede observar que en la parte izquierda se encuentra un árbol de proyecto desde donde se accede a los diferentes componentes. En la parte superior una barra que permite el acceso a los objetos gráficos y en la parte inferior está el diagnóstico que proporciona información sobre la actividad de la aplicación. Una de las ventajas principales de este software es que permite relacionar las entradas y salidas presentes en la programación realizada en el RSLogix 5000.

6 OBTENCION DE PARAMETROS DE LOS CONTROLADORES Y CONTROL DE LAS PLANTAS

En este capítulo se definen los parámetros (Termino proporcional, integral y derivativo) para los controladores (PI y PID) diseñados que consecutivamente se utilizan en el control de cada planta (virtuales y real). Es importante resaltar que parte de este capítulo está basado en dos trabajos de grado anteriores.

Posteriormente se ejecuta el control donde se muestran los resultados obtenidos, comparando estos con los resultados con las tesis tomadas como base.

6.1 CONTROL DE TEMPERATURA HORNO SIMULADO EN LABVIEW

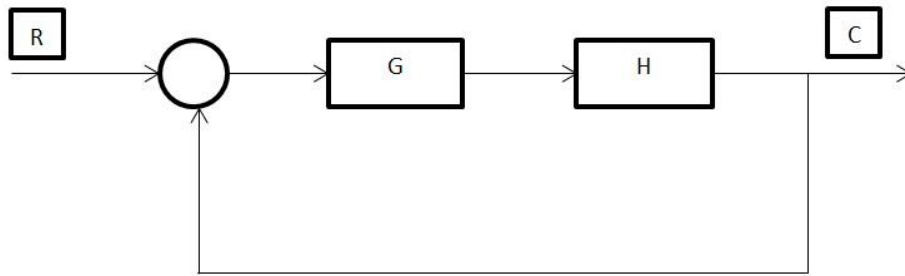
El procedimiento para obtener las constantes de control (Término proporcional e integral) fueron tomadas literalmente de la tesis: “COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO DE UN CONTROLADOR PID INDUSTRIAL CON LA FUNCIÓN PID DE UN PLC (CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE)” [6], teniendo en cuenta que parte del proyecto está basado en ella¹⁷.

En la tesis se define que la función de transferencia para el horno es de primer orden y ya que es un proceso lento, la forma adecuada de hacer el control es mediante un PI.

Basados en el diagrama de bloques, que se muestra en la figura 36, se determinan los parámetros del controlador:

¹⁷ Ver capítulo 5 pagina 83 de la tesis “COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO DE UN CONTROLADOR PID INDUSTRIAL CON LA FUNCIÓN PID DE UN PLC (CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE)”

Figura 36. Lazo cerrado de control sencillo



Fuente: “COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO DE UN CONTROLADOR PID INDUSTRIAL CON LA FUNCIÓN PID DE UN PLC (CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE)”

De la figura se tiene:

$$\frac{C(S)}{R(S)} = \frac{G(S) * H(S)}{1 + G(S) * H(S)}$$

Donde:

G(s) es la función de transferencia para el controlador PI

H(s) es la función para el horno ¹⁸

Sabiendo que para un controlador PI la función de transferencia está dada por:¹⁹

$$G(S) = K_p \frac{T_i * S + 1}{T_i * S}$$

$$H(S) = \frac{2.1979 * K_p}{335 * S + 1}$$

¹⁸ Ver en el capítulo 3, sección 3.2 del presente trabajo de grado.

¹⁹ Tomado de: OGATA KATSUHIKO, Modern Control Engineering, Third edition, Prentice Hall, 1998.

Asumiendo $T_i = 335$, se tiene que:

$$G(S) * H(S) = \frac{2.1979}{335 * S + 1} * K_p * \frac{335 * S + 1}{335 * S}$$

$$G(S) * H(S) = \frac{2.1979}{335 * S}$$

Dando la relación

$$\frac{C(S)}{R(S)} = \frac{2.1979 * K_p}{335 * S + 2.1979 * K_p}$$

De acuerdo a lo planteado en la tesis donde se indica que el tiempo de asentamiento debe ser menor a 1000 segundos y que la respuesta debe establecerse aproximadamente a los $5 \tau_c$

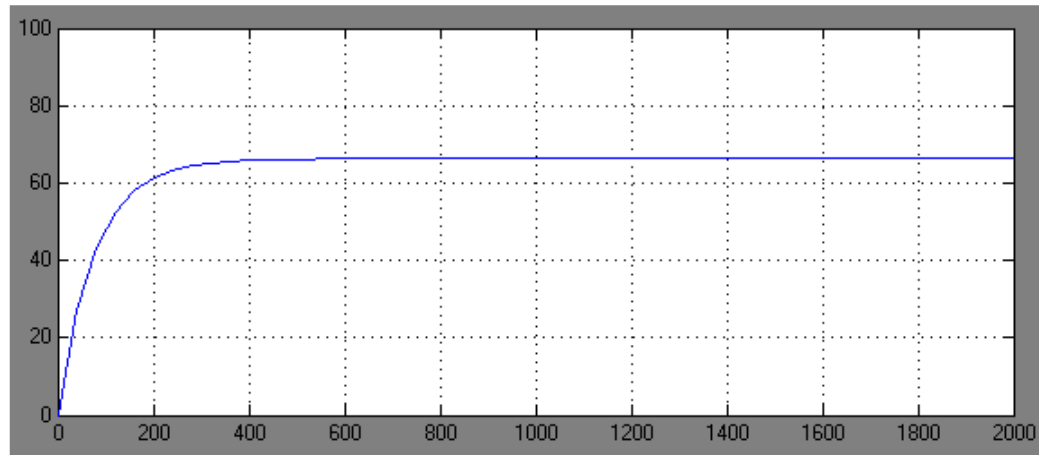
$$\tau_c = \frac{335}{2.1979 * K_p}$$

$$S * \tau_c = S * \frac{335}{2.1979 * K_p} \leq 1000$$

$$K_p \geq 0.7623$$

Teniendo en cuenta los resultados alcanzados se asume un $K_p = 2$, para posteriormente con ayuda del software Matlab simular la respuesta de este sistema, obteniendo la gráfica de la figura 37.

Figura 37. Respuesta del horno empleando Simulink con $K_p=2$, $T_i=335$



Fuente: “COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO DE UN CONTROLADOR PID INDUSTRIAL CON LA FUNCIÓN PID DE UN PLC (CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE)”

De la gráfica se pudo verificar que el tiempo de establecimiento lo alcanzo en aproximadamente 500 segundos, indicando que los parámetros fueron los convenientes para el modelo.

Teniendo en cuenta lo planteado anteriormente, se efectúa el control de la planta virtual del horno²⁰, para ello se tienen dos formas de control: una haciendo un control de la tensión de alimentación y otra mediante un modulador de pulsos (PWM)²¹; para este caso se hizo de la segunda manera, dando como resultado la respuesta del sistema que se muestra en la figura 38, para un setpoint de 66.25 °C el cual es el punto de operación.

²⁰ Ver Capítulo 4, sección 4.1.3 del presente trabajo de grado

²¹ Ver Capítulo 5, sección 5.2 de la tesis “COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO DE UN CONTROLADOR PID INDUSTRIAL CON LA FUNCIÓN PID DE UN PLC (CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE)”

Figura 38. Respuesta del horno para $K_p=2$ y $T_i=335$ empleando LabVIEW



Según se puede observar en la gráfica la respuesta alcanza el valor del 50% (33,125 °C) del setpoint aproximadamente a los 51s que corresponde al tiempo de retardo (t_d).

Teniendo en cuenta que el tiempo de subida es el intervalo correspondiente entre el 90% (60,25°C) y 10% (6,625 °C) de la respuesta, cuyos valores se alcanzan aproximadamente a los 140s y 10s respectivamente, dando un tiempo de subida aproximado de 130s.

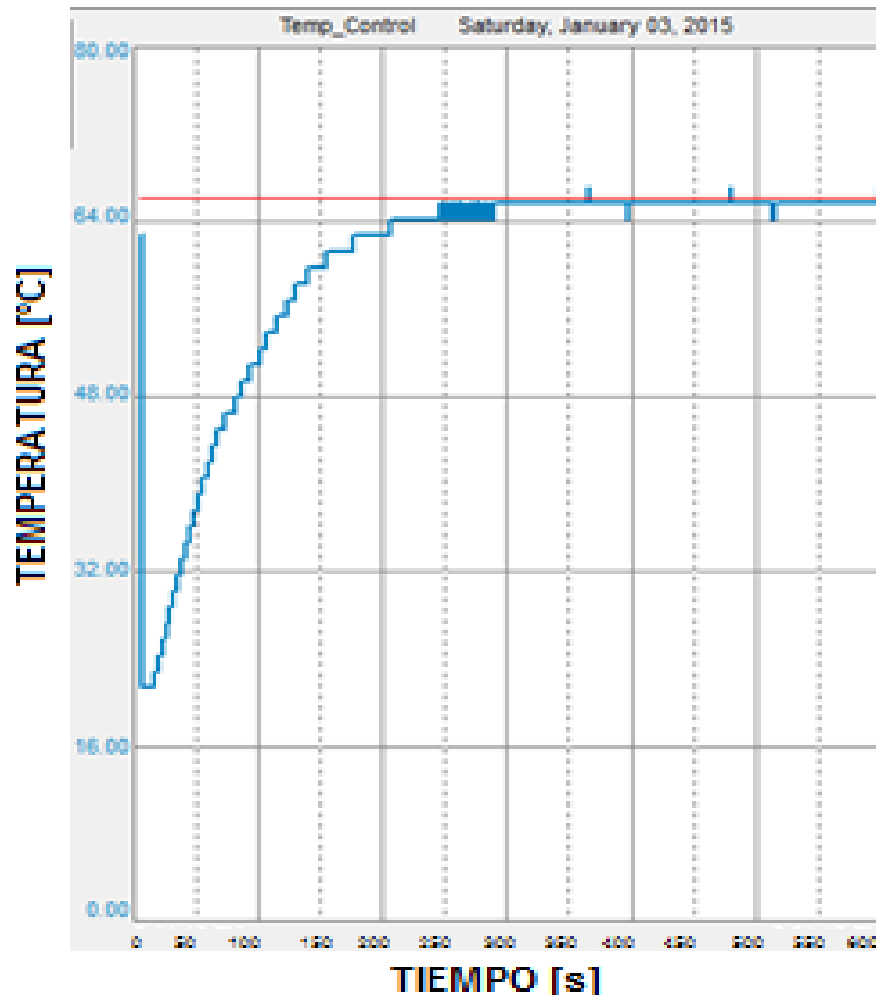
El tiempo de asentamiento corresponde al tiempo al cual la respuesta se mantiene en un rango del 5% por encima y por debajo del setpoint, pudiéndose observar en la

gráfica que dicho comportamiento de la respuesta es alcanzado a los 185 s aproximadamente.

De la gráfica se puede observar que no se presenta error en estado estable

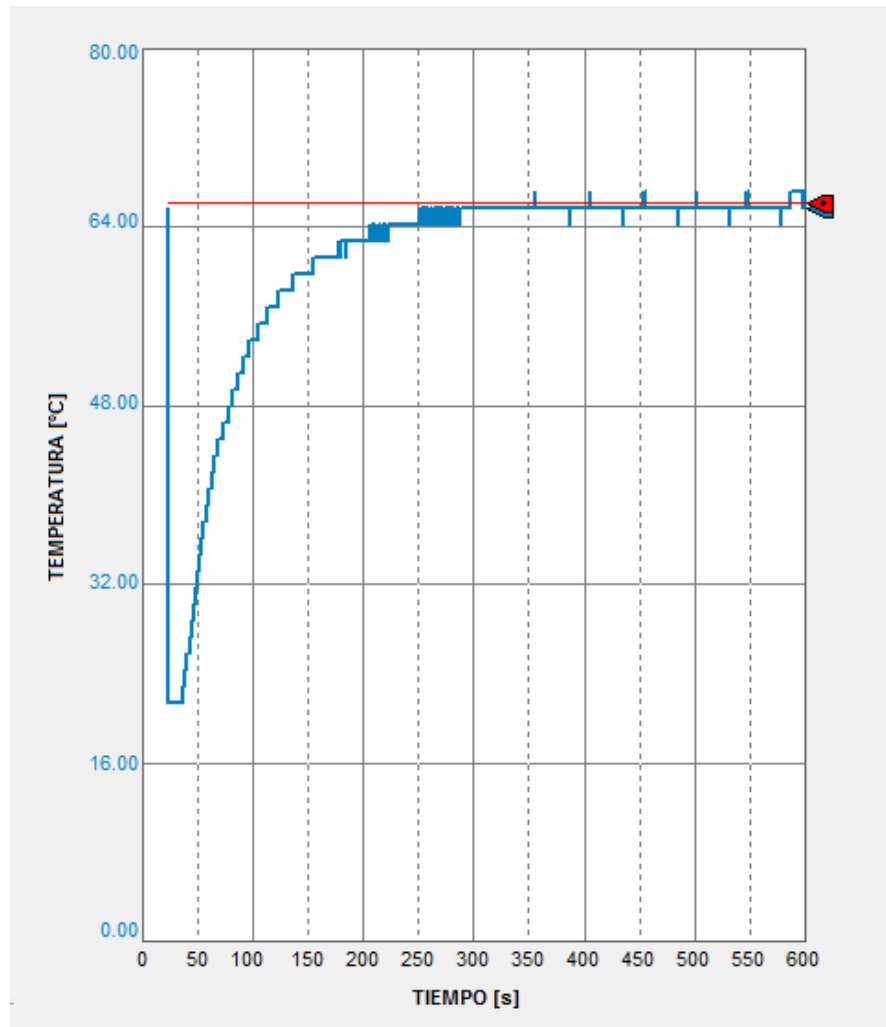
En el software RSLogix 5000 también se pudo monitorear la respuesta obteniéndose la gráfica de la figura 39.

Figura 39. Respuesta del horno para $K_p=2$ y $T_i=335$ empleando RSLogix 5000



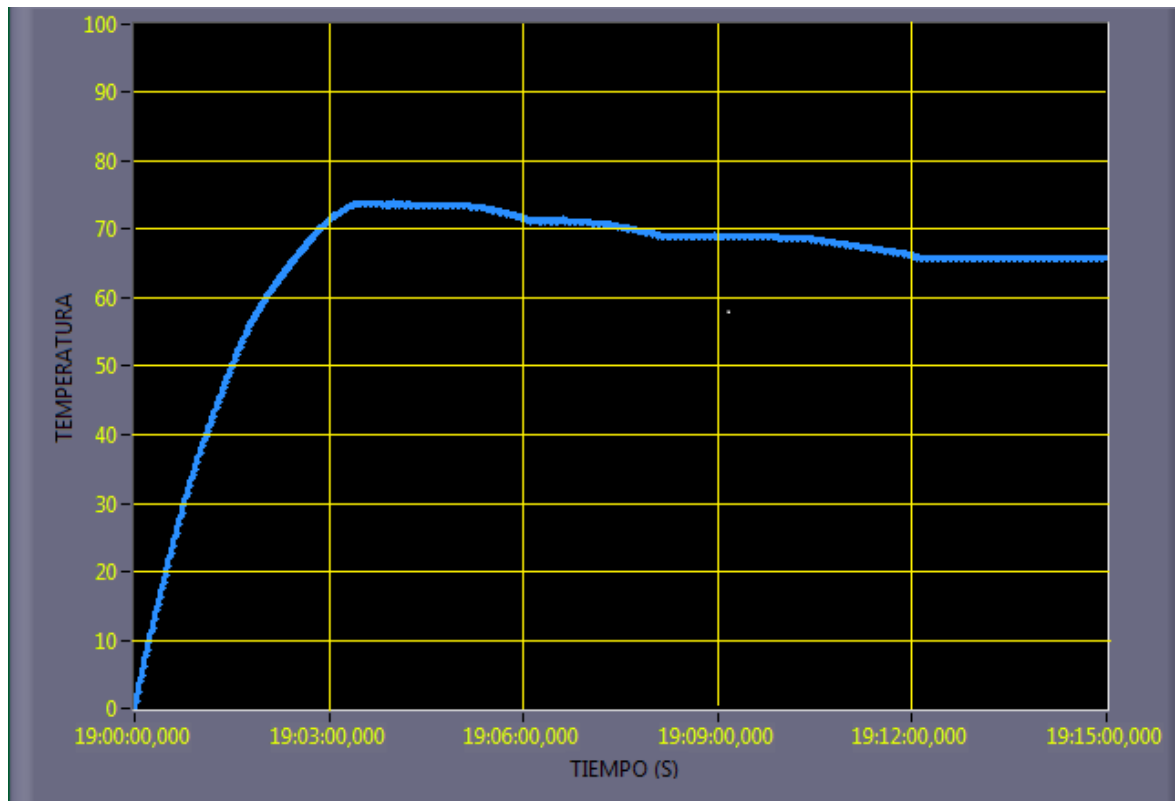
Usando los parámetros de control $K_p = 4$ y $T_i = 335 \text{ seg}$ a una frecuencia de 30Hz vista desde RSLogix 5000 se obtuvo la respuesta que se muestra en la figura 40, para un setpoint de $66.25 \text{ }^\circ\text{C}$ el cual es el punto de operación.

Figura 40. Respuesta del horno para $K_p=4$ y $T_i=335$ empleando RSLogix 5000



Así también se graficó la respuesta desde LabVIEW con los mismos parámetros de control y setpoint.

Figura 41. Respuesta del horno para $K_p=4$ y $T_i=335$ empleando LabVIEW



Según se puede observar en la gráfica la respuesta alcanza el valor del 50% (33,125 °C) del setpoint aproximadamente a los 51s que corresponde al tiempo de retardo (td).

Teniendo en cuenta que el tiempo de subida es el intervalo correspondiente entre el 90% (60,25°C) y 10% (6,625 °C) de la respuesta, cuyos valores se alcanzan aproximadamente a los 117s y 9s respectivamente, dando un tiempo de subida aproximado de 108s.

El valor pico máximo de la curva de respuesta es de 74 °C y se da en un tiempo de aproximadamente 206 s, que corresponde al tiempo pico. El tiempo de asentamiento corresponde al tiempo al cual la respuesta se mantiene en un rango del 5% por encima y por debajo del setpoint, pudiéndose observar en la gráfica que dicho comportamiento de la respuesta es alcanzado a los 669 s aproximadamente.

El sobrepaso máximo es el porcentaje de la salida que excede el valor en estado estable, observándose en la gráfica que este valor excede en 7,75 °C el valor del setpoint, por lo tanto el porcentaje correspondiente es del 11,69%.

De la gráfica se puede observar que no se presenta error en estado estable

Tabla 8. Análisis de la respuesta transitoria y estacionaria de un horno tostador tipo electrodoméstico simulado en LabVIEW empleando un controlador PI con parámetros de control $K_p=2$ $T_i=335$ y $K_p=4$ y $T_i=335$ y un setpoint de 66.25 °C

	CompactLogix 1769-L32E $K_p=2$ y $T_i=335$	CompactLogix 1769-L32E $K_p=4$ y $T_i=335$
Tiempo de retardo [s]	51	51
Tiempo de levantamiento [s]	130	108
Tiempo pico [s]	NA	206
Sobrepaso Máximo	NA	11,69
Tiempo de asentamiento [s]	185	669
Error de estado estable [°C]	0	0

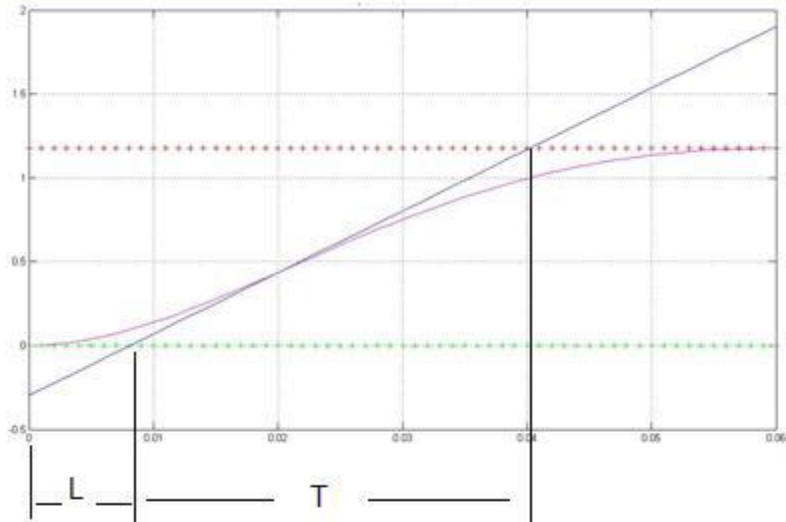
6.2 CONTROL DE VELOCIDAD DEL MOTOR SIMULADO EN LABVIEW

En la tesis se presentan dos situaciones para realizar el control del motor de corriente continua: el motor está en vacío y otra en la que el motor tiene carga, además se implementaron dos formas de control: una con un transistor trabajando en corte y saturación y la otra haciendo un control continuo de la alimentación; partiendo de los escenarios anteriormente mencionados se realizó el control simulando el motor con carga y haciéndolo a través del transistor.

Los parámetros del controlador se hallaron empleando el primer método de Ziegler-Nichols, que posteriormente fueron utilizados para hacer el control del motor. En la

figura 42, se ilustran los resultados obtenidos como lo son: la constante de tiempo T y el tiempo de retardo L ²².

Figura 42. Implementación del método Ziegler y Nichols para el control del motor DC excitación independiente en MATLAB - Respuesta al escalón unitario.



De la figura se puede concluir que:

$$T = 0.032s$$

$$L = 0.008s$$

Usando estos valores se hallaron los parámetros de control, como se muestran en la tabla 8:

²² Ver capítulo 5, sección 5.4 de la tesis: “COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO DE UN CONTROLADOR PID INDUSTRIAL CON LA FUNCIÓN PID DE UN PLC (CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE)”

Tabla 9. Determinación de constantes por Ziegler y Nichols

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
PID	$1.2 * \frac{T}{L} = 4.8$	$2 * L = 0.016$	$0.5 * L = 0.004$

Fuente: OGATA KATSUHIKO, Modern Control Engineering, Third edition, Prentice Hall, 1998.

Teniendo en cuenta que no fue posible graficar la respuesta con estos parámetros debido a que la tarjeta de adquisición de datos arrojó un error, haciéndose necesario hallar nuevos valores²³.

Para el caso específico del motor con carga y controlado a través del transistor se usaron los siguientes parámetros de control:

$$K_p = 0,01$$

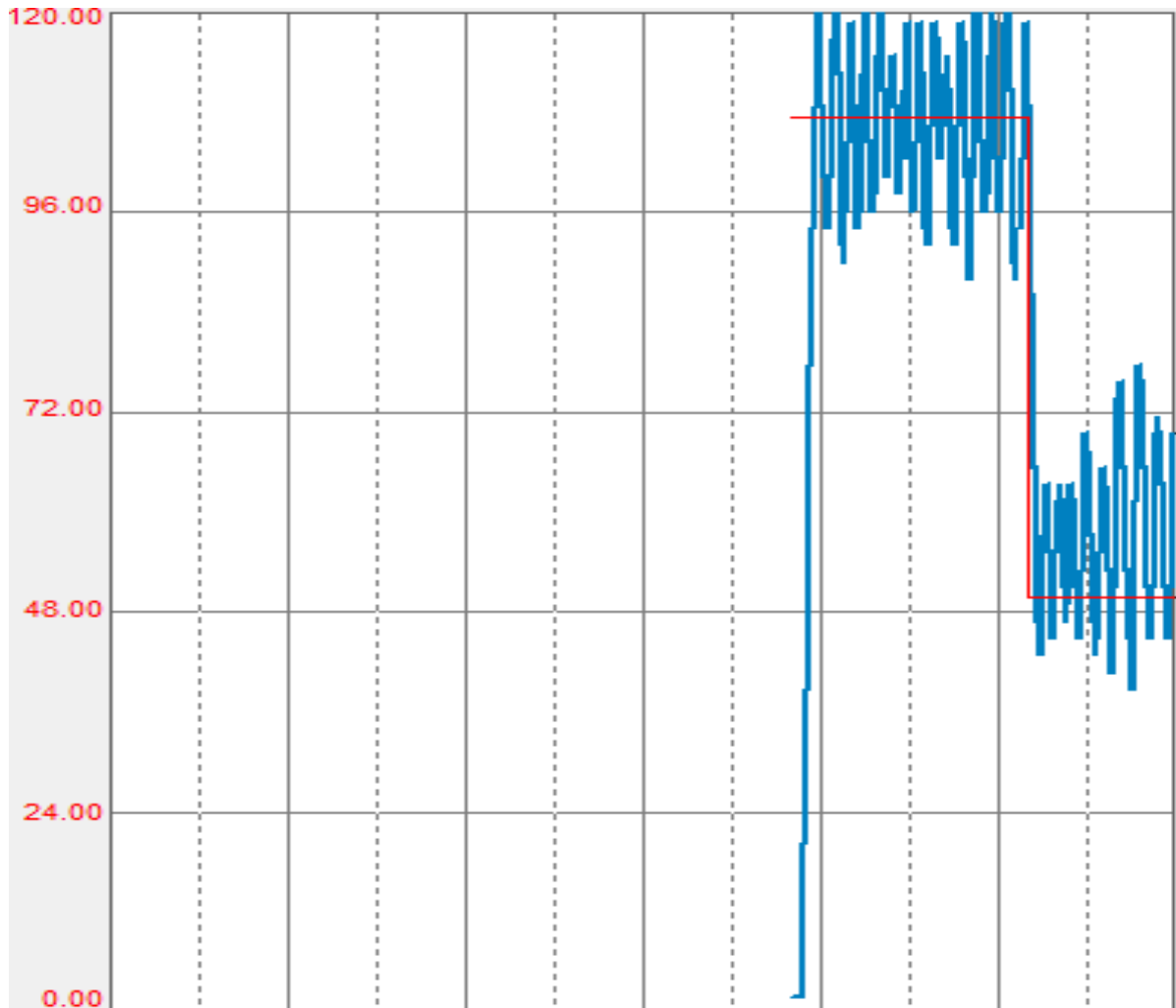
$$T_d = 0,1$$

$$T_i = 1$$

Usando el software RSLogix 5000 se estableció un setpoint de 107.5 rad/seg el cual es el punto de operación donde la variable de proceso llegó a ese valor y prontamente se bajó el setpoint a 50 rad/seg donde también la variable de proceso llegó a ese valor y se pudo verificar que hubo control de velocidad para el motor, como se ilustra en la figura 43.

²³ Ver página 99 de la tesis: : “COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO DE UN CONTROLADOR PID INDUSTRIAL CON LA FUNCIÓN PID DE UN PLC (CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE)”

Figura 43. Control con transistor (con Carga) empleando el controlador CompactLogix 1769-L32E de Allen Bradley con $K_p=0.01$ $T_i=1$ y $T_d=0.1$, monitoreado en RSLogix 5000



Simultáneamente se monitoreó, la respuesta a la acción de control desde LabVIEW donde la respuesta para los mismos valores de setpoint de 107 y 50 rad/seg se muestra en la figura 44.

Figura 44. Control con transistor (con Carga) empleando el controlador CompactLogix 1769-L32E de Allen Bradley con $K_p=0.01$ $T_i=1$ y $T_d=0.1$, monitoreado en LabView.

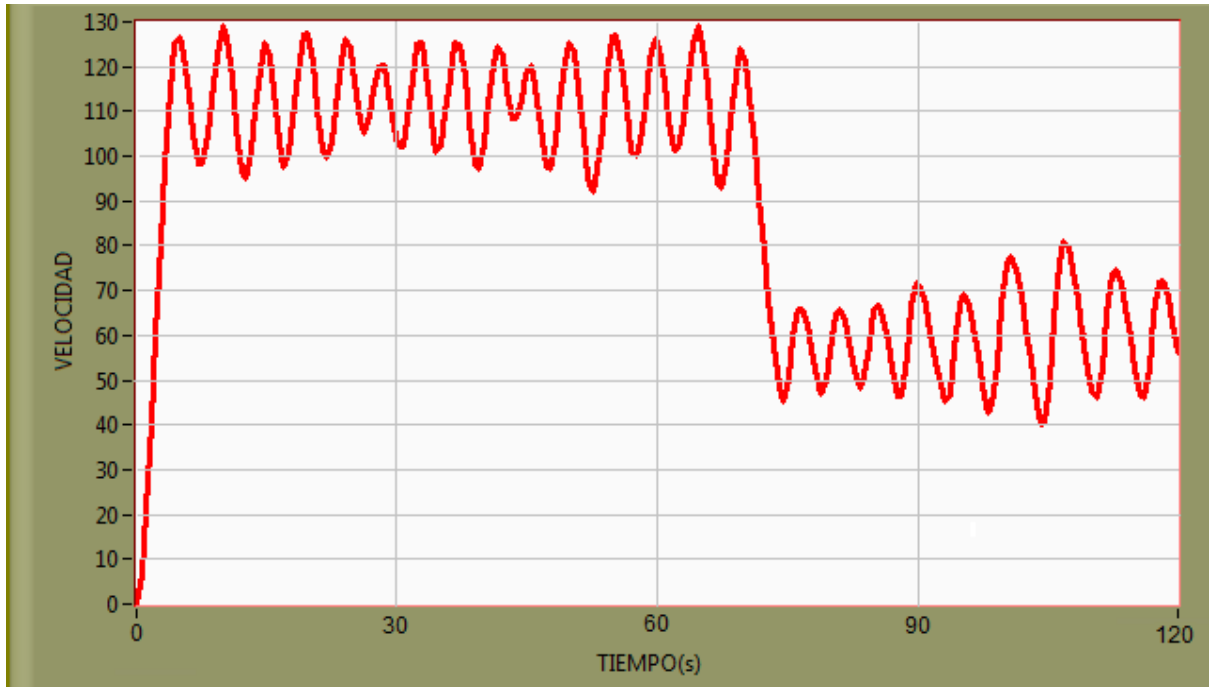


Tabla 10. Análisis de la respuesta transitoria y estacionaria de un motor de corriente continua empleando un controlador PID con parámetros de control $K_p=0.01$ $T_i=1$ y $T_d=0.1$ y un setpoint de 107.5 rad/seg

	CompactLogix 1769-L32E
Tiempo de retardo [s]	1.8
Tiempo de levantamiento [s]	2.88
Tiempo pico [s]	4
Sobrepaso Máximo [%]	1.1065
Tiempo de asentamiento [s]	7
Error de estado estable [rad/seg]	11.45

6.3 CONTROL DE NIVEL DE TANQUES ACOPLADOS SIMULADOS EN LABVIEW

Partiendo del modelado del sistema para realizar el control del nivel de líquido de dos tanques acoplados descrito en la tesis: “INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE NIVEL PARA UN SISTEMA DE TANQUES ACOPLADOS EN EL LABORATORIO DE CONTROL E INSTRUMENTACIÓN DE LA E3T-UIS” [10], se identifican los parámetros del controlador PID que se diseñó.

Teniendo en cuenta que el algoritmo básico del control PID se expresa como²⁴:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Donde la entrada del controlador es el error $e(t)$, K_p , K_i y K_d , son las ganancias proporcional, integral y derivativa respectivamente. Reformulando la expresión se tiene:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

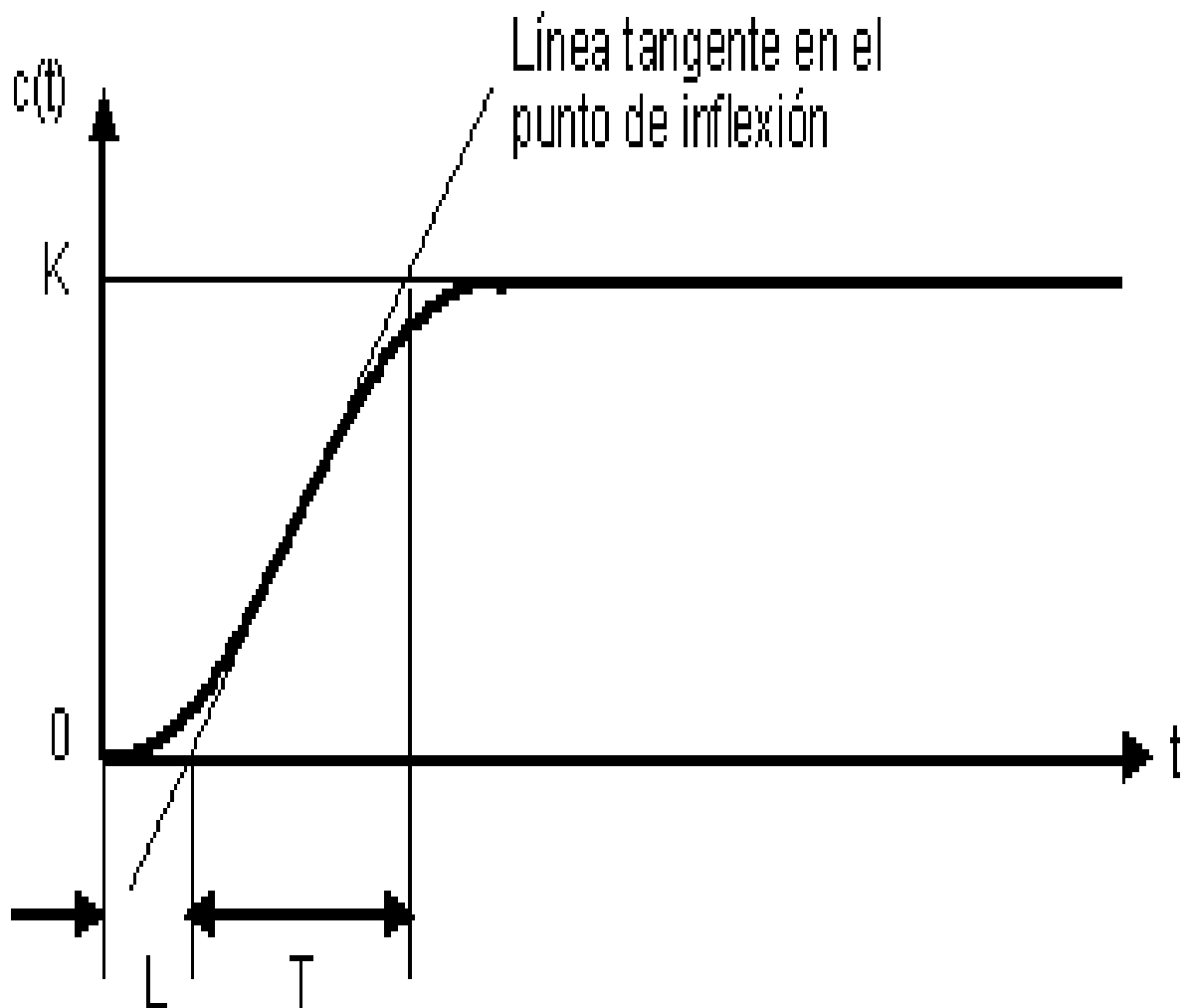
Usando el primer método de Ziegler–Nichols se obtuvieron los parámetros del controlador PID trazando una línea tangente al punto de inflexión de la respuesta con forma de S la cual puede aproximarse a un sistema de primer orden con retardo modelado como:

$$\frac{C(S)}{U(S)} = \frac{K_e^{-LS}}{TS + 1}$$

²⁴ Ver sección 4.1 de la tesis: “INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE NIVEL PARA UN SISTEMA DE TANQUES ACOPLADOS EN EL LABORATORIO DE CONTROL E INSTRUMENTACIÓN DE LA E3T-UIS”

Una vez trazada la recta tangente es posible calcular el tiempo de retardo L , tomando la distancia horizontal entre el eje $c(t)$ y la intersección entre la recta tangente y el eje (t) así también la constante de tiempo T tomando la distancia horizontal entre la intersección entre la recta tangente y el eje del tiempo con la línea $c(t)=K$ como se ilustra en la figura 45.

Figura 45. Curva de la respuesta ante una entrada tipo escalón con forma de S



Fuente: INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE NIVEL PARA UN SISTEMA DE TANQUES ACOPLADOS EN EL LABORATORIO DE CONTROL E INSTRUMENTACIÓN DE LA E3T-UIS

Los valores obtenidos son:

Tiempo de retardo $L = 27.3531$

Constante de tiempo $T = 237.89$

Con estos valores y con las relaciones de la tabla 9 se obtuvieron los parámetros de control K_p , T_i y T_d .

Tabla 11. Parámetros del controlador por cálculo teórico

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 * \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 * \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Por lo que los parámetros del controlador PID para los tanques son:

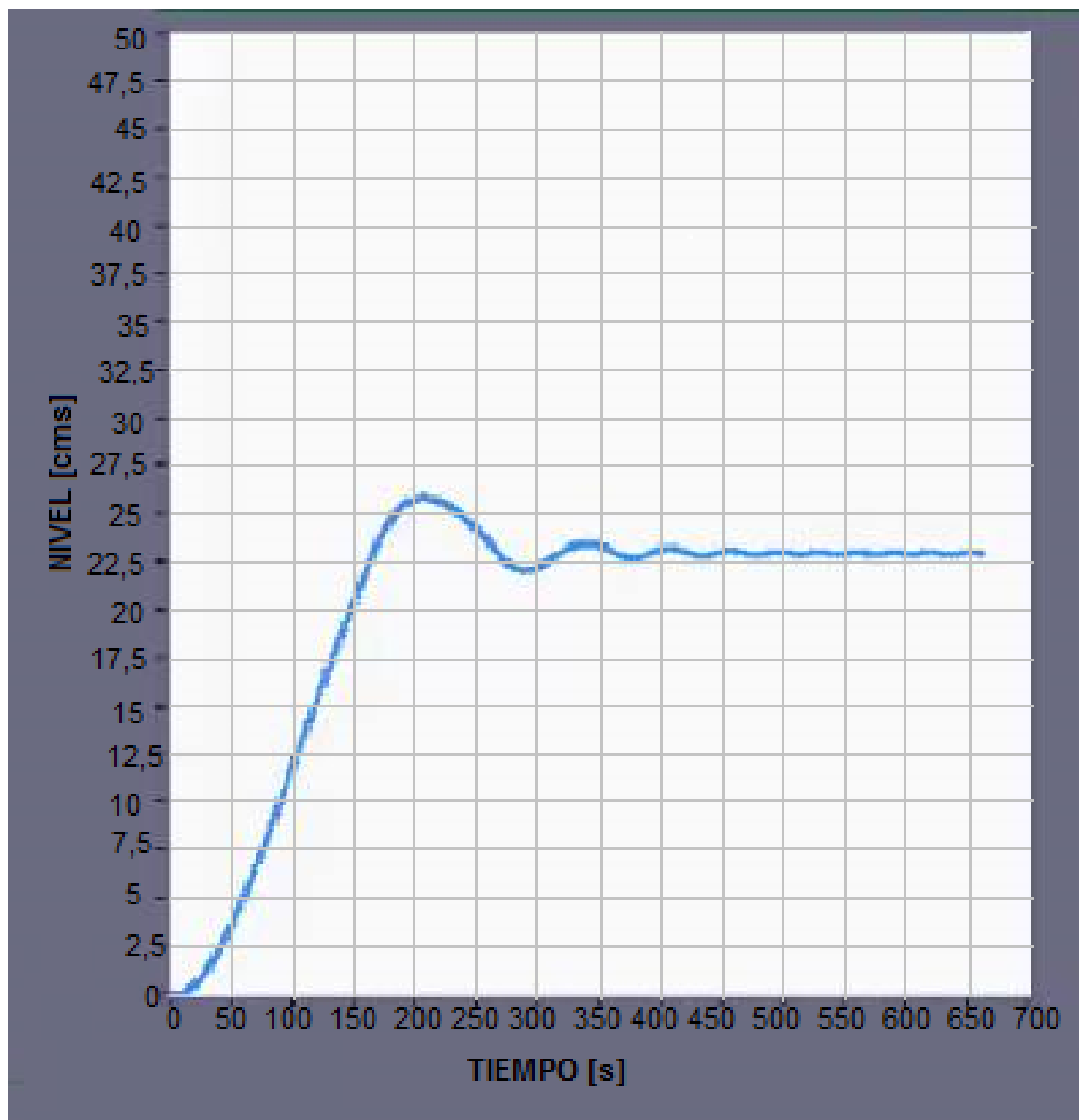
$$K_p = 12.016$$

$$T_d = 13.67$$

$$T_i = 54.7$$

Usando los parámetros de control obtenidos se asignó un setpoint de 23 cm el cual es el punto de operación donde a través de LabVIEW se visualizó la respuesta del sistema que se muestra en la figura 46.

Figura 46. Control tanques acoplados empleando el controlador CompactLogix 1769-L32E de Allen Bradley con $K_p=12.016$, $T_i=54.7$ y $T_d=13.67$, monitoreado en LabView.



Según se puede observar en la gráfica la respuesta alcanza el valor del 50% (11,5 cm en el nivel del segundo tanque) del setpoint aproximadamente a los 96s que corresponde al tiempo de retardo (t_d).

Teniendo en cuenta que el tiempo de subida es el intervalo correspondiente entre el 90% (20,7 cm) y 10% (2,3 cm) de la respuesta, cuyos valores se alcanzan

aproximadamente a los 154s y 40s respectivamente, dando un tiempo de subida aproximado de 114s.

El valor pico máximo de la curva de respuesta es de 25,5 cm y se da en un tiempo de aproximadamente 208 s, que corresponde al tiempo pico. El tiempo de asentamiento corresponde al tiempo al cual la respuesta se mantiene en un rango del 5% por encima y por debajo del setpoint, pudiéndose observar en la gráfica que dicho comportamiento de la respuesta es alcanzado a los 250 s aproximadamente.

El sobrepaso máximo es el porcentaje de la salida que excede el valor en estado estable, observándose en la gráfica que este valor excede en 2,5 cm el valor del setpoint, por lo tanto el porcentaje correspondiente es del 10,86%.

De la gráfica se puede observar que no se presenta error en estado estable

Tabla 12. Análisis de la respuesta transitoria y estacionaria de un horno tostador tipo electrodoméstico empleando un controlador PI con parámetros de control $K_p=12.016$, $T_i=54.7$ y $T_d=13.67$ y un setpoint de 23 cm

	CompactLogix 1769-L32E
Tiempo de retardo [s]	96
Tiempo de levantamiento [s]	114
Tiempo pico [s]	208
Sobrepaso Máximo	10,86 %
Tiempo de asentamiento [s]	250
Error de estado estable [cm]	0

6.4 CONTROL DE TEMPERATURA DE UN HORNO TOSTADOR TIPO ELECTRODOMESTICO

Figura 47. Control de temperatura de un horno tostador tipo electrodoméstico empleando el controlador CompactLogix 1769-L32E de Allen Bradley con $K_p=4$, $T_i=335$ y un setpoint de $66.25\text{ }^\circ\text{C}$

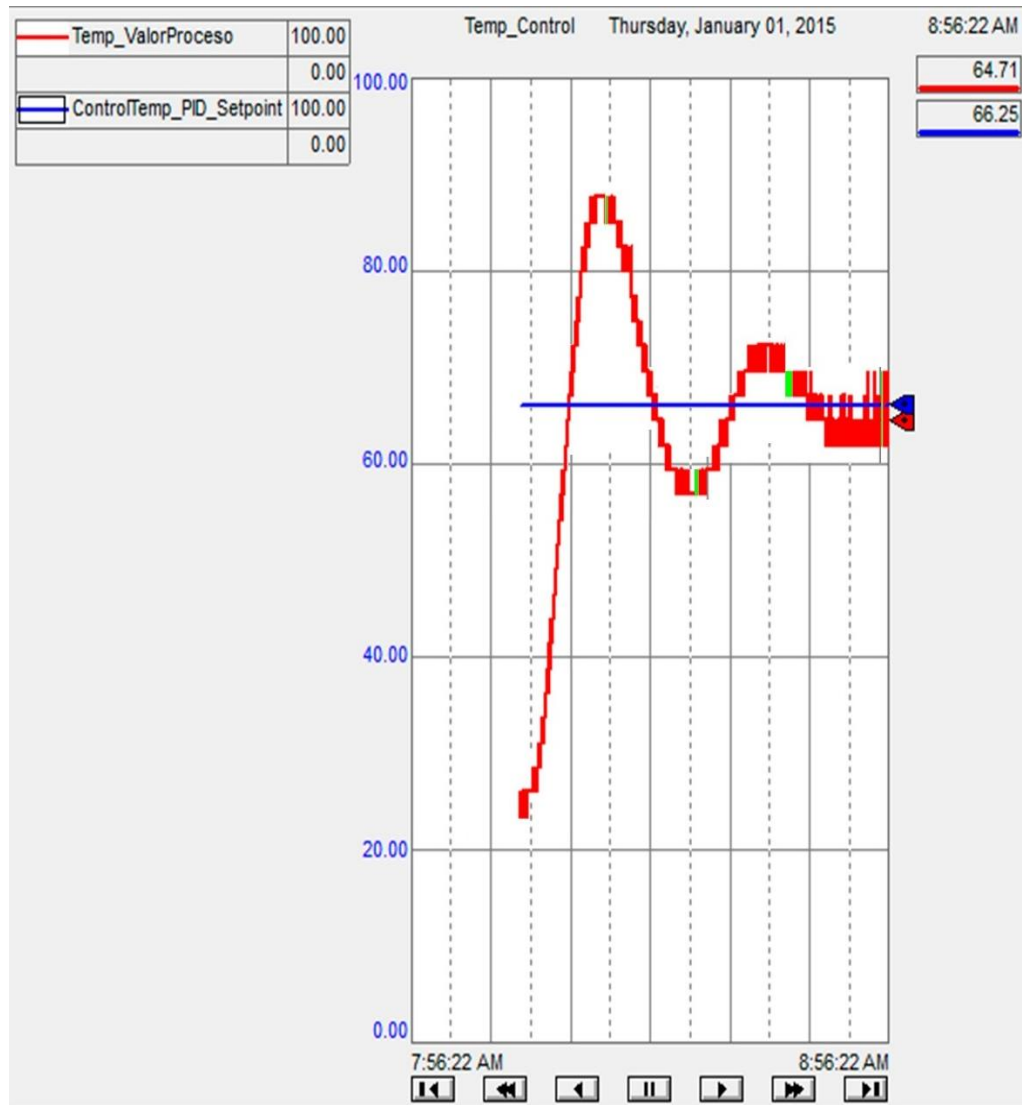


Tabla 13. Análisis de la respuesta transitoria y estacionaria de un horno tostador tipo electrodoméstico empleando un controlador PI con parámetros de control $K_p=2$ $T_i=335$ y $K_p=4$ y $T_i=335$ y un setpoint de 66.25 °C

	CompactLogix 1769-L32E
Tiempo de retardo [s]	246
Tiempo de levantamiento [s]	230
Tiempo pico [s]	606
Sobrepaso Máximo	1.32
Tiempo de asentamiento [s]	2720
Error de estado estable [°C]	1.54

CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

- Por medio de este trabajo, se entrega información básica que facilita la configuración de un tablero de control, similar a los encontrados en el sector industrial y adquirido por la escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones.
- Se implementaron tres programas en LabVIEW, que simulan el comportamiento de tres plantas, permitiendo el control con el tablero adquirido por la escuela.
- Se seleccionó un proceso real, en el cual se controla la temperatura por medio del PLC CompactLogix 1769-L32E que es uno de los componentes principales del tablero.
- Se estructuró un manual básico que permite la configuración y programación del PLC CompactLogix 1769-L32E, así como también ayudas audiovisuales.
- Las salidas y entradas del módulo analógico (1769-IF4XOF2) en el tablero vienen configuradas por defecto para corriente, por lo tanto se debe tener cuidado a la hora de hacer las conexiones.
- Es muy importante tener cuidado al pelar los cables; la caída de algún filamento dentro del tablero puede causar daños al momento de encenderlo. Por tal razón se debe asegurar que no quede ningún filamento metálico en el tablero.
- En el control de temperatura del horno de uso residencial, se observó que para un $K_p=2$ el tiempo de asentamiento es de 270 segundos mientras que para un

$K_p=4$ se establece en 252 segundos reduciendo el tiempo de establecimiento pero agregando una oscilación en la respuesta.

- Es posible realizar una autosintonización de los parámetros proporcional, integral y derivativo del controlador empleando la instrucción PIDE (Enhanced PID), en una rutina de diagrama de bloques funcionales.
- En la rutina PWM del control de temperatura del horno se seleccionó un periodo de 5000 ms para capturar la mayor cantidad de semiciclos posibles de corriente alterna que garanticen la estabilidad en la respuesta del sistema. Si el periodo es menor se presenta oscilación por ausencia de ciclos.
- El panel view 2711C-T6T de la marca Allen Bradley con el que cuenta el tablero de control pertenece a la familia de terminales gráficos PanelView Component los cuales no son compatibles con el PLC CompactLogix 1769-L32E pero si con las familias de controladores MicroLogix, SLC 500 y Micro800. Para PLC se recomienda usar los terminales gráficos PanelView Plus 6 Compact.
- Al momento de la implementación y de realizar las pruebas se puede observar que la programación estructurada por rutinas permite organizar un proyecto y así de esta manera facilitar el seguimiento que admiten cambios o modificaciones que van en pro de mejoras en las aplicaciones.
- Se recomienda realizar guías para prácticas de laboratorio con las demás instrucciones que no se llegaron a abordar en este escrito.
- Se recomienda diseñar e implementar más sistemas de control para diferentes procesos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] BELTRAN FUENTES, LILIANA; HERNANDEZ TARAZONA, LUIS FRANCISCO. Unidad didáctica de controladores lógicos programables PLC'S. Bucaramanga 1994. Tesis (Pregrado). Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería mecánica.
- [2] RAMIREZ PEDRAZA, INGRID ALEXANDRA; PONTON ACEVEDO, GABRIEL ARTURO. Supervisión de procesos industriales controlados mediante autómatas programables (PLC'S). Bucaramanga 2000. Tesis (Pregrado). Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería mecánica.
- [3] GOMEZ ARGUELLO, ANGEL MARIA; MENESES FLOREZ, JORGE ENRIQUE. Automatización de una maquina CNC mediante arquitectura PC-PLC. Bucaramanga 1997. Tesis (Pregrado). Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería mecánica.
- [4] ARTEAGA GONZALEZ, ALWIN SERGUEY; RUEDA RUEDA, WILFRED; URIBE VEGA, CESAR GIOVANY. Controlador lógico programable TSX nano. Módulos de entrenamiento y prácticas de laboratorio. Bucaramanga 2001. Tesis (Pregrado). Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones.
- [5] NINO BARON, CARLOS EDUARDO; BECERRA ACEVEDO, ALVARO BERNARDO. Modbus y Ethernet implementados en autómatas programables TRILOGI, KOYO Y MODICON –TELEMECANIQUE. Bucaramanga 2002. Tesis (Pregrado). Universidad Industrial de Santander. Escuela ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones.

- [6] VILLAMIZAR CONTRERAS, JAVIER ORLANDO; YERENA BAYONA, GUSTAVO ADOLFO. Comparación de las características y comportamiento de un controlador PID industrial con la función PID de un PLC. Bucaramanga 2013. Tesis (Pregrado). Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones.
- [7] MESA DUARTE, JUAN CARLOS; ROJAS VARGAS, RAMON ALEXIS. Objeto de aprendizaje para los autómatas s7-200 y logo siemens basado en automatismos lógicos mediante la emulación de procesos industriales. Bucaramanga 2012. Tesis (Pregrado). Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería mecánica.
- [8] GONZALEZ ROBLES, CARLOS MARIO; CORONEL GRANADOS, REYNALDO. Objeto de aprendizaje para el manejo de autómatas Allen Bradley de Rockwell Automation. Tesis (Pregrado). Bucaramanga 2013. Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería mecánica.
- [9] VÉLEZ WHITE, CECILIA MARÍA; Plan decenal nacional de educación 2016-2016, Ministerio de educación nacional. http://planipolis.iiep.unesco.org/upload/Colombia/Colombia_plan_decenal_educacion_2006-2016.pdf [Consultada en Julio de 2015]
- [10] PEÑARANDA, CLAUDIA YANETH; SILVA, WILSON REINALDO; ARIAS, EULICES GÓMEZ. Instrumentación y control de nivel para un sistema de tanques acoplados en el laboratorio de control e instrumentación de la e3t-uis. Bucaramanga 2014. Tesis (Pregrado). Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones.

BIBLIOGRAFIA

GONZALEZ ROBLES, CARLOS MARIO; CORONEL GRANADOS, REYNALDO. Objeto de aprendizaje para el manejo de autómatas Allen Bradley de Rockwell Automation. Tesis (Pregrado). Bucaramanga 2013. Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería mecánica.

MESA DUARTE, JUAN CARLOS; ROJAS VARGAS, RAMON ALEXIS. Objeto de aprendizaje para los autómatas s7-200 y logo siemens basado en automatismos lógicos mediante la emulación de procesos industriales. Bucaramanga 2012. Tesis (Pregrado). Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería mecánica.

NINO BARON, CARLOS EDUARDO; BECERRA ACEVEDO, ALVARO BERNARDO. Modbus y Ethernet implementados en autómatas programables TRILOGI, KOYO Y MODICON –TELEMECANIQUE. Bucaramanga 2002. Tesis (Pregrado). Universidad Industrial de Santander. Escuela ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones.

PEÑARANDA, CLAUDIA YANETH; SILVA, WILSON REINALDO; ARIAS, EULICES GÓMEZ. Instrumentación y control de nivel para un sistema de tanques acoplados en el laboratorio de control e instrumentación de la e3t-uis. Bucaramanga 2014. Tesis (Pregrado). Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones.

VILLAMIZAR CONTRERAS, JAVIER ORLANDO; YERENA BAYONA, GUSTAVO ADOLFO. Comparación de las características y comportamiento de un controlador PID industrial con la función PID de un PLC. Bucaramanga 2013. Tesis (Pregrado). Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones.

ANEXOS

ANEXO A.

Documento adjunto (Guía básica de configuración y programación compactlogix 1769 L32E)

ANEXO B.

Documento adjunto (Instrucciones de instalación. Módulo combinado de E/S analógicas)

ANEXO C.

Documento adjunto (Datos de tags y E/S en los controladores Logix5000)

ANEXO D.

Documento adjunto (Guía de inicio rápido para controladores Logix5000)

ANEXO E.

Documento adjunto (Instrucciones generales de los controladores Logix5000™)

ANEXO F.

Documento adjunto (Manual del usuario de los controladores CompactLogix 1769)

ANEXO G.

Documento adjunto (Cómo obtener resultados con RSLinx Classic)

ANEXO H.

Documento adjunto (RSLogix™ Emulate 5000. Getting results guide)