

**IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE ENSAYO PARA LA MEDICIÓN DE
NIVEL DE LÍQUIDO EN EL LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN DE LA
UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**

**MILDRED ILIANA MERCADO URIETA
JUAN SEBASTIÁN AMADOR TORRES**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA**

2016

**IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE ENSAYO PARA LA MEDICIÓN DE
NIVEL DE LÍQUIDO EN EL LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN DE LA
UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**

**MILDRED ILIANA MERCADO URIETA
JUAN SEBASTIÁN AMADOR TORRES**

PROYECTO DE GRADO

**JUAN CARLOS MANTILLA SAAVEDRA
DIRECTOR DEL PROYECTO**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA**

2016

Nota de aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bucaramanga, Enero de 2016

Este logro es del fruto del esfuerzo de quienes me rodearon y respaldaron aún en los momentos más difíciles. Lo dedico a mi Poder Superior por darme fuerzas en los días duros, a mi Madre por darme siempre una voz de aliento y un voto de confianza cuando lo necesité, a mi Padre por su sacrificio al apoyarme, a la Señora Doris Sánchez y al Señor Luis Ernesto Navas por recibirme en su hogar como a un hijo, a la Doctora Liliana Urbano y al Ingeniero Fabio Guzmán por sus consejos y guiarme entre las dificultades y duras pruebas que se me presentaron, a todo el equipo de la Facultad de Ingeniería Electrónica por su acompañamiento y por supuesto a mi compañera de proyecto con quien pude compartir un espacio de trabajo que me dejó grandes enseñanzas de vida

Juan Sebastián Amador Torres

Este proyecto está dedicado a todas las personas que contribuyeron a mi formación como Ingeniera, a mis padres, mis hermanas, amigos y compañero de trabajo, especialmente a Andres Felipe Amaya quien me ha apoyado incondicionalmente en este proceso.

Mildred Mercado Urieta.

AGRADECIMIENTOS.

A la Facultad de Ingeniería por darnos la oportunidad de implementar este módulo.

Al ingeniero Juan Carlos Mantilla Saavedra por el tiempo dedicado a nosotros, sus indicaciones y direccionamiento en cada etapa de esta fase.

A la ingeniera Leidy Olarte quién puso a nuestra disposición equipos y software necesarios para la implementación.

A la ingeniera Jessica Ariza por proporcionarnos soporte técnico por parte de la compañía National Instruments.

Al ingeniero Juan Carlos Villamizar por sus sugerencias, aportes y asesoría en el proceso de realizar las conexiones eléctricas.

Al equipo del Laboratorio de Ingeniería Electrónica por el acompañamiento, colaboración y el brindarnos las herramientas que hicieron eficiente el trabajo.

CONTENIDO

	Pag.
GLOSARIO	13
INTRODUCCIÓN	15
1. MEDICIÓN DE NIVEL DE LÍQUIDO	12
1.1 REVISIÓN DEL DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	12
1.1.1 Sistema de llenado y vaciado	13
1.2 NORMA TÉCNICA COLOMBIANA RETIE 2013 [2]	14
2. INTERVENTORÍA	16
3. TABLERO DE CONTROL Y POTENCIA	17
3.1 PROTECCIONES.....	18
3.1.1 Contactor Sace fórmula A1	18
3.1.2 Guardamotor GV2-ME10	18
3.1.3 Interruptor magnetotérmico Chint NB1 63 C2	19
3.1.4 Interruptor diferencial tripolar 5SY6 (Breaker)	19
3.2 RELÉ DE ESTADO SÓLIDO 3RF2120-3AA02	20
3.3 FUENTE DE ALIMENTACIÓN NI PS-15.....	20
3.4 VARIADOR DE TENSIÓN TRIFÁSICA	21
3.5 BORNES DE INTERCONEXIÓN Y EMPALME ABB	21
3.6 PLANO GENERAL DEL TABLERO DE CONTROL	22
4 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	25
4.1 IMPLEMENTACIÓN.....	26
4.1.1 Software	26
4.1.2 Instalación y Configuración del CompactRIO 9075.....	26
4.1.3 Configuración de los sensores de nivel.	27
4.2 ESTRATEGIA DE CONTROL DE LAS ELECTROVÁLVULAS A TRAVÉS DEL NI 9474:	28
4.3 COMUNICACIÓN ENTRE EL PC Y EL AM-9898 A TRAVÉS DEL CRIO 9075 Y LECTURA DE CORRIENTE EN LOS SENSORES CONECTADOS DE FORMA INDEPENDIENTE	34
4.4 CONEXIÓN DE LOS SENSORES EN BUS HART MULTIPUNTO CON EL MÓDULO AM-9898.....	38
4.5 INTERFAZ GRÁFICA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	42
5 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	45
5.1 PRUEBA No 1: TANQUE TK-200	45
5.2 PRUEBA No 2: TANQUE TK-100A.....	47
5.3 PRUEBA No 3: TANQUES TK200, TK100A Y TK100B AL 50%	50
5.4 PRUEBA NO 4: SENSORES CONECTADOS EN BUS HART MULTIPUNTO	53
5.5 PRUEBA NO 5: TANQUES CON TURBULENCIA	58
6 PRESTACIÓN DE SERVICIOS.....	59

RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	60
CONCLUSIONES	62
REFERENCIAS.....	63
ANEXO A.....	64
ANEXO B.....	65
ANEXO C.....	66
ANEXO D.....	67
ANEXO E	68

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1. DISEÑO CAD DEL MÓDULO VS IMPLEMENTACIÓN [1].....	12
FIGURA 1-2. MOTOBOMBA PARA EL LLENADO Y VACIADO DE LOS TANQUES [1].....	13
FIGURA 1-3. DISEÑO CAD DE LAS ELECTROVÁLVULAS VS IMPLEMENTACIÓN [1].....	14
FIGURA 1-4: DIAGRAMA P&ID DEL MÓDULO DE NIVEL [1].....	14
FIGURA 2-1: CONSTRUCCIÓN DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO POR LA EMPRESA ING&MAQUINAS	16
FIGURA 3-1. TABLERO DE CONTROL Y POTENCIA	17
FIGURA 3-2. CONTACTOR SACE FÓRMULA A1	18
FIGURA 3-3. GUARDAMOTOR GV2-ME10 [5].....	18
FIGURA 3-4. FUENTE DE ALIMENTACIÓN NI PS-15 [9].....	20
FIGURA 3-5. VARIADOR DE VELOCIDAD MICROMASTER 440 [10].....	21
FIGURA 3-6. BORNES ABB [11]	21
FIGURA 3-7. PLANO ELÉCTRICO DEL TABLERO DE CONTROL.....	24
FIGURA 4-1. SISTEMA COMPACTRIO [12].....	25
FIGURA 4-2. SISTEMA REMOTO CONFIGURADO	27
FIGURA 4-3. INICIAR LABVIEW FOR MYRIO	29
FIGURA 4-4. CREAR PROYECTO	29
FIGURA 4-5. CREAR UN PROYECTO EN BLANCO	30
FIGURA 4-6. AGREGAR TARJETAS Y/O DISPOSITIVOS	30
FIGURA 4-7. MÓDULO COMPACT-RIO DETECTADO	31
FIGURA 4-8. MENÚ PARA AGREGAR MÓDULOS	31
FIGURA 4-9. MENÚ DE SELECCIÓN PARA EL MODO DE PROGRAMACIÓN DEL CHASSIS	32
FIGURA 4-10. CREACIÓN DE UN NUEVO VI	32
FIGURA 4-11. NUEVO VI CREADO.....	32
FIGURA 4-12. MÓDULOS DE ENTRADAS Y SALIDAS DIGITALES EXPANDIDOS	33
FIGURA 4-13. VI Y SU DIAGRAMA DE BLOQUES PARA CONTROLAR LAS ELECTROVÁLVULAS	33
FIGURA 4-14. PROYECTO EJEMPLO AM-9898 HART MODULE.....	34
FIGURA 4-15. PROYECTO AM9898 MODIFICADO SEGÚN EL HARDWARE DISPONIBLE	35
FIGURA 4-16. PANEL FRONTAL DEL VI AM-9898 FPGA MAIN EXAMPLE	36
FIGURA 4-17. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PANEL FRONTAL DE LA FIGURA 3-15.....	37
FIGURA 4-18. AM-9898 HART SCAN DEVICES: PANEL FRONTAL	39
FIGURA 4-19. AM-9898_HART_MULTIDROP_EXAMPLE.VI: PANEL FRONTAL	39
FIGURA 4-20. AM-9898 HART SCAN DEVICES: DIAGRAMA DE BLOQUES	40
FIGURA 4-21. AM-9898_HART_MULTIDROP_EXAMPLE.VI: DIAGRAMA DE BLOQUES....	41
FIGURA 4-22. ÁRBOL DE JERARQUÍA DE LA APLICACIÓN GENERAL	42
FIGURA 4-23. INTERFAZ GRÁFICA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	43
FIGURA 4-24. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA INTERFAZ GRÁFICA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	44
FIGURA 5-1. LECTURA DE LA INTERFAZ GRÁFICA PARA EL TANQUE TK200 LLENO	45
FIGURA 5-2. LECTURA DEL SENSOR DELTAPILOT M FMB50	46

FIGURA 5-3. LECTURA DEL SENSOR LEVELFLEX-FMP52	46
FIGURA 5-4. LECTURA DEL SENSOR MICROPILOT FMR51	46
FIGURA 5-5. LECTURA DEL SENSOR LIQUICAP M FM151	47
FIGURA 5-6. LECTURA DE LA INTERFAZ GRÁFICA PARA EL TANQUE TK200 VACÍO.....	48
FIGURA 5-7. LECTURA DEL SENSOR DELTAPILOT M FMB50	49
FIGURA 5-8. LECTURA DEL SENSOR LEVELFLEX-FMP52.....	49
FIGURA 5-9. LECTURA DEL SENSOR MICROPILOT FMR51	49
FIGURA 5-10. LECTURA DEL SENSOR LIQUIDCAP M FM151.....	50
FIGURA 5-11. LECTURA DE LA INTERFAZ GRÁFICA DESARROLLADA	51
FIGURA 5-12. LECTURA DEL SENSOR DELTAPILOT	52
FIGURA 5-13. LECTURA DEL SENSOR LEVELFLEX.....	52
FIGURA 5-14. LECTURA DEL SENSOR MICROPILOT.....	52
FIGURA 5-15. LECTURA DEL SENSOR LIQUIDCAP	53
FIGURA 5-16. CONEXIÓN MULTIPUNTO DE LOS SENSORES DE NIVEL [14]	53
FIGURA 5-17. LECTURA MULTIPUNTO DE LOS CUATRO SENSORES	54
FIGURA 5-18. LECTURA EN PANTALLA DE LOS SENSORES EN CONEXIÓN MULTIPUNTO	54
FIGURA 5-19. RESULTADOS DEL PANEL FRONTAL PARA LA SEGUNDA PRUEBA	55
FIGURA 5-20. LECTURA DE LOS SENSORES DESDE LA INTERFAZ GRÁFICA	55
FIGURA 5-21. LECTURA DE LOS SENSORES DESDE SU PANTALLA.....	56
FIGURA 5-22. RESULTADOS DEL PANEL FRONTAL PARA LA TERCERA PRUEBA.....	56
FIGURA 5-23. LECTURA DE LOS SENSORES DESDE LA INTERFAZ GRÁFICA	57
FIGURA 5-24. LECTURA DE LOS SENSORES DESDE SU PANTALLA.....	57
FIGURA 5-25: RESULTADOS DEL PANEL FRONTAL EN PRESENCIA DE TURBULENC.....	58
FIGURA 6-1: ACOMPAÑAMIENTO A ESTUDIANTES DE ING. MECÁNICA	59

GLOSARIO

HART: (transductor remoto direccionable en red) es el estándar mundial para enviar y recibir información digital a través de cables analógicos entre dispositivos inteligentes y el sistema de control o de monitoreo.

Dispositivo: cualquier artefacto aparato o instrumento usado para hacer una medición.

Transmisor: instrumento que captan y transmite la información de la variable de nivel obtenida a un receptor ya sea indicador, registrador o controlador.

LabVIEW: plataforma de desarrollo para el diseño de sistemas, con lenguaje de programación visual gráfica.

P&ID: (Piping and Instrumentation diagram) diagrama que muestra el flujo del proceso en las tuberías y equipos instalados.

Micropilot FMR51: Sensor de nivel por radar.

Liquicap M FMI51: Sensor de nivel por capacitancia.

Deltapilot M FMB50: Sensor de nivel por presión hidrostática.

Levelflex FMP52: sensor de nivel de radar por onda guiada.

CompactRIO-9075: sistema integrado que combina un procesador en tiempo real y FPGA reconfigurable en el mismo chasis para aplicaciones embebidas de monitoreo y control de máquinas. Posee cuatro ranuras para módulos de E/S de la Serie C.

Módulos de E/S de la Serie C: Módulos, de entradas y/o salidas tanto analógicas como digitales, de medida autónomos. Todos los circuitos requeridos para tomar medidas específicas están incluidos en él y es capaz de realizar todas las conversiones A/D y D/A necesarias.

NI PS-15: Fuente de alimentación industrial de 24 V, de larga expectativa de vida, reservas de potencias generosas y tamaño compacto.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE ENSAYO PARA LA MEDICIÓN DE NIVEL DE LÍQUIDO EN EL LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN DE LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

AUTOR(ES): MILDRED ILIANA MERCADO URIETA
JUAN SEBASTIÁN AMADOR TORRES

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR(A): JUAN CARLOS MANTILLA SAAVEDRA

RESUMEN

Este proyecto describe la implementación de un módulo de medición de nivel de líquidos basado en el diseño conceptual propuesto en la fase I [1]. El módulo hace parte del laboratorio de instrumentación de la Universidad Pontificia Bolivariana, y se complementa con diseños adicionales para la medición de flujo y presión. El módulo está compuesto por dos tanques de almacenamiento principales y un tanque auxiliar. Cada uno de ellos cuenta con diversos sensores de nivel, los cuales se implementaron basados en el protocolo HART. Además, cuenta con cuatro electroválvulas que controlan el flujo de agua entre los tanques y dos válvulas de aire encargadas de generar turbulencia que permitirán comparar las lecturas de flujo laminar con las de turbulento. En adición, el proyecto incluyó el diseño y montaje de un tablero de control donde se alojaron todos los elementos de potencia, protección y adquisición de datos. Esta última parte se realizó mediante el sistema CompactRIO 9075, que consiste en un controlador embebido para comunicación y procesamiento, un chasis reconfigurable que aloja al FPGA programable por el usuario, módulos de E/S intercambiables en tiempo real y software gráfico LabVIEW para programación. Finalmente, para facilitar desarrollos posteriores, el proyecto incluyó el diseño de ciertas guías de laboratorio donde se explica tanto el uso de los sensores como de la interfaz gráfica.

PALABRAS CLAVES:

Medición de Nivel, Protocolo HART, LabVIEW, Compact-RIO, FPGA.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: IMPLEMENTATION OF A TEST MODULE FOR LIQUID LEVEL MEASUREMENT IN THE INSTRUMENTATION LABORATORY OF THE UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA.

AUTHOR(S): MILDRED ILIANA MERCADO URIETA
JUAN SEBASTIÁN AMADOR TORRES

FACULTY: Facultad de Ingeniería Informática

DIRECTOR: JUAN CARLOS MANTILLA SAAVEDRA

ABSTRACT

This Project describes the implementation of a test module for liquid level measurement based on the conceptual design proposed in the first phase [1]. The module makes part of the Instrumentation Laboratory of the Universidad Pontificia Bolivariana and it is complemented with additional designs for the measurement of flow and pressure. The module is composed by two main storage tanks and an auxiliary one. Each one of them has several level sensors, which are implemented based on the HART protocol. Also it has four valves that controls water flow through the tanks and two valves that generate air turbulence for comparing readings of laminar flow with the turbulent one. In addition, the project includes the design and installation of a control panel where all the power, protection and data acquisition elements are housed. This last part was performed by the CompactRIO 9075 system, that consist of an embedded controller for communication and processing, a reconfigurable chassis housing the user-programmable FPGA, hot-swappable I/O modules, and graphical LabVIEW software for programming. Finally, to facilitate further developments, the project includes the design of certain laboratory guides that explains both the use of the sensors and the user interface.

KEYWORDS:

Level Measurement, HART Protocol, LabVIEW, CompactRIO, FPGA.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

Gran parte del crecimiento de la economía nacional se basa en la optimización de procesos de producción industrial –muchos de ellos relacionados con derivados del petróleo–, cuya característica en común ha sido su automatización, control y gestión tanto desde la misma planta, como desde terminales remotas. Este proceso incluye la monitorización de variables tales como flujo, caudal, nivel, presión, entre otras, las cuales deben conocerse en tiempo real y con la mayor confiabilidad posible.

A gran escala una planta industrial cuenta con redes de sensores distribuidos por toda su extensión, los cuales se comunican de manera permanente con una estación central, haciendo uso de diversos protocolos. Esta estructura es un estándar que tanto empresas nacionales como internacionales han adoptado para sus procesos, hasta el punto que se ha destinado una gran cantidad de recursos para su continuo mejoramiento y desarrollo.

Teniendo en cuenta que uno de los campos de acción del Ingeniero de procesos de la Universidad Pontificia Bolivariana es el control y automatización de procesos industriales, surge la necesidad de implementar un sistema a escala de monitoreo de nivel de un tanque, que sirva como material de apoyo a asignaturas del área de procesos de las Facultades de Ingeniería Industrial, Mecánica y Electrónica. Este sistema hace parte del Laboratorio de Instrumentación de la UPB, el cual integra módulos de control de presión, flujo y caudal, y así poder simular las diversas situaciones que se presentan en una planta industrial.

La implementación de este módulo parte de un diseño previo que se realizó en la fase I [1], donde se establecieron todas las especificaciones técnicas de los tanques de almacenamiento y su estructura. Por tanto, este proyecto cubre el diseño y montaje de todo el cableado de los sensores de nivel utilizados y el gabinete de control y potencia, así como un canal de comunicaciones usando el protocolo HART, y su visualización en una interfaz gráfica con el software LabVIEW.

1. MEDICIÓN DE NIVEL DE LÍQUIDO

Una de las principales industrias que hacen uso continuo de sistemas que midan el nivel de líquidos en tanques de almacenamiento son la petroquímica y de alimentos y bebidas. Éstas basan su operación en el almacenamiento de sus productos e insumos en grandes tanques de más de un millón de litros, los cuales son continuamente llenados y vaciados mediante motobombas y circuitos hidráulicos. A continuación se hará una descripción del módulo a implementar con el fin establecer las pautas para los diseños posteriores

1.1 REVISIÓN DEL DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Para el módulo a implementar se cuenta con dos tanques verticales de 247 litros cada uno, tal como se muestra en la Figura 1-1 [1]. El tanque de la derecha se nombrará TK200 mientras que el de la izquierda es TK100A y su tanque auxiliar es TK100B. Cada uno de ellos cuenta con dos sensores de nivel, de la siguiente manera:

- TK100A: Sensor de nivel por radar **Micropilot FMR51**.
- TK100B: Sensor de nivel por capacitancia **Liquicap M FMI51**.
- TK200: Sensor de nivel por presión **Deltapilot M FMB50**; sensor de nivel de radar por onda guiada **Levelflex FMP52**.



FIGURA 1-1. DISEÑO CAD DEL MÓDULO VS IMPLEMENTACIÓN [1]

Cada uno de estos sensores presenta una señal de salida en corriente de 4mA a 20mA, superpuesta con una señal de modulación por cambio de frecuencia FSK, la cual corresponde al protocolo HART. Es importante resaltar que el hecho de

hacer uso de un protocolo de comunicaciones –HART en este caso– proporciona una mayor flexibilidad y confiabilidad en la información que se transmite, ya que se pueden conocer datos adicionales tales como la temperatura del sensor, su identificador y su estado o diagnóstico.

De manera adicional, el tanque TK100A cuenta con una mirilla auxiliar donde se puede medir el nivel de manera visual. Adjunta a esta mirilla están dos sensores capacitivos **AUTONICS CR18-8DP**, que indicaran un nivel mínimo y máximo permitido.

Finalmente, cada tanque cuenta con una válvula **AIRTACIP65** que controla el flujo de aire a presión hacia el taque. De esta manera es posible introducir turbulencia en el sistema y emular una situación mucho más similar a una planta industrial.

1.1.1 Sistema de llenado y vaciado

Para el llenado y vaciado de los tanques de almacenamiento se hace uso de dos electroválvulas por cada uno de ellos, las cuales son accionadas por una tensión de corriente alterna de 220Vrms. Estas válvulas controlan el flujo de agua de un tanque a otro, el cual es producido por una motobomba de 4HP, tal como se muestra en las Figura 1-2 y Figura 1-3. La motobomba opera a una tensión trifásica de 220Vrms. Además, mediante la activación de dos de las cuatro válvulas se controla el flujo de agua de un tanque a otro, de tal forma que mientras uno se llena el otro se vacía. La conexión eléctrica de cada uno de los elementos mencionados se hará desde el tablero de control, el cual se explicará en el siguiente capítulo.

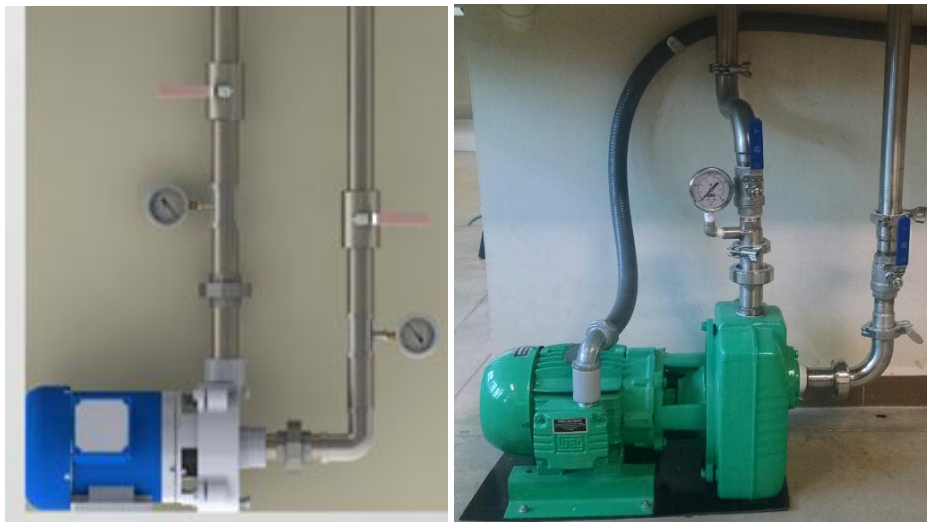


FIGURA 1-2. MOTOBOMBA PARA EL LLENADO Y VACIADO DE LOS TANQUES [1]



FIGURA 1-3. DISEÑO CAD DE LAS ELECTROVÁLVULAS Vs IMPLEMENTACIÓN [1]

Finalmente, la Figura 1-4 presenta el diagrama de tuberías e interconexión P&ID del módulo de nivel [1].

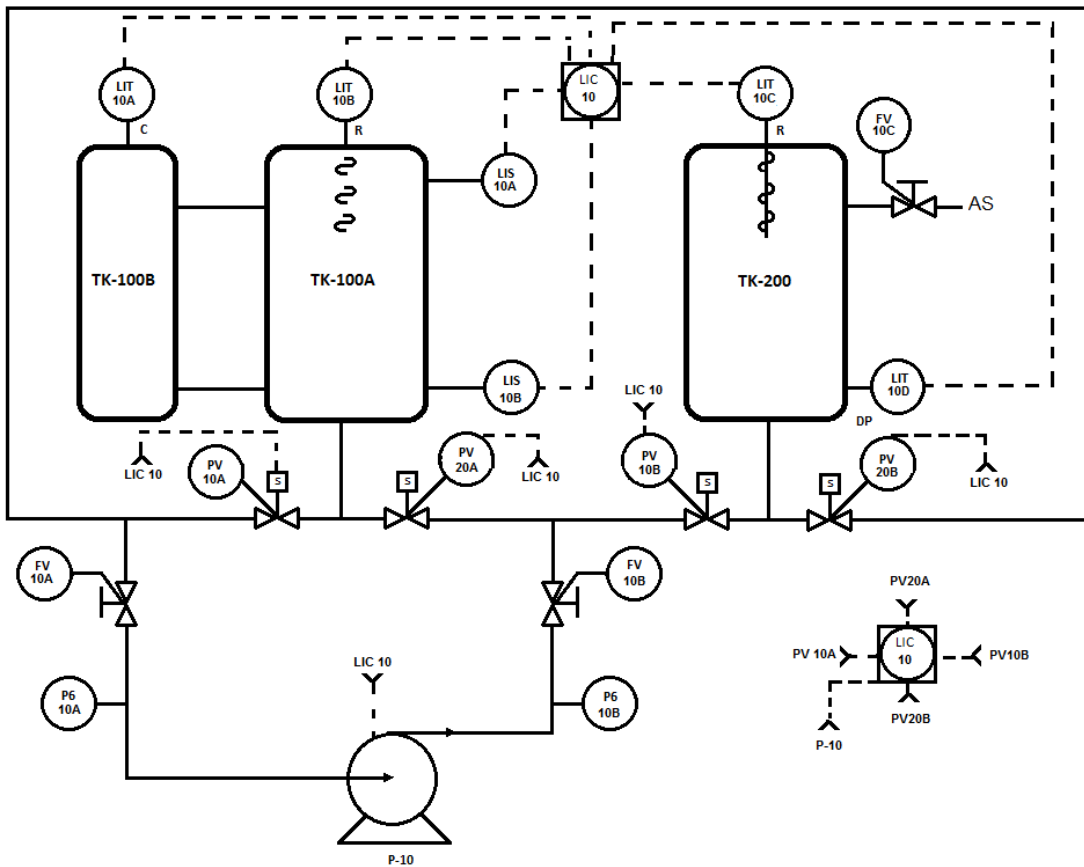


FIGURA 1-4: DIAGRAMA P&ID DEL MÓDULO DE NIVEL [1]

1.2 NORMA TÉCNICA COLOMBIANA RETIE 2013 [2]

El Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas –RETIE– establece ciertas especificaciones para el cableado de cada uno de los elementos descritos anteriormente. Éstas incluyen color del cable, calibre, ubicación, empalmes, entre otras.

Teniendo en cuenta que la red eléctrica del laboratorio de instrumentación es tipo Y con conexión a neutro, los colores de cada conductor son:

- Fase 1: Amarillo
- Fase 2: Azul
- Fase 3: Rojo
- Neutro: Blanco
- Tierra: Verde

Adicionalmente, para la conexión de todos los dispositivos relacionados con la motobomba (variador MicroMater s440, contactor Sace A1 y guardamotor GV2-ME10) se utilizó cable calibre 12 según el estándar **AWG** (American Wire Gauge). Al utilizar este calibre se garantiza que nunca se presentarán calentamientos en los conductores, producto de la corriente que exige la motobomba. Por otro lado, los conductores pertenecientes al circuito de control y adquisición de datos son calibre 16, ya que la corriente que circula por cada uno de ellos es inferior a 1A.

2. INTERVENTORÍA

Después de revisar el diseño realizado durante la fase I se hizo un acompañamiento a la empresa **Ing&Maquinas** para la elaboración de los tanques de almacenamiento, como lo muestra la Figura 2-1. Esta empresa fue escogida por la universidad como su proveedor relacionado con toda la estructura metálica de los módulos del laboratorio de instrumentación. La interventoría también incluyó el montaje del módulo de medición de nivel de líquidos en el laboratorio.



FIGURA 2-1: CONSTRUCCIÓN DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO POR LA EMPRESA ING&MAQUINAS

Fueron necesarias algunas modificaciones sugeridas por el contratista. El volumen de los tanques, que inicialmente se propuso en 300L para el tanque TK-200 y 264L para el tanque TK-100A, fueron modificados dejando una capacidad de 264L para los dos tanques. Este cambio permitió que la estructura tenga una mayor estabilidad mecánica ya que su punto de apoyo es el mesón de trabajo.

Adicionalmente, el material escogido para la ventana del tanque TK-200 fue acrílico. Según el diseño de la fase I, ésta debía construirse a partir de vidrio. No obstante, dicho material no es lo suficientemente resistente para soportar la presión que el agua de los tanques ejerce. Además, el acrílico puede tomar una forma cilíndrica acorde a las especificaciones del tanque, permitiendo su instalación.

Después que finalizó el montaje del módulo se hicieron pruebas de fuga a tanques y tubería para corroborar la eficiencia del proceso a realizar en prácticas de laboratorio.

3. TABLERO DE CONTROL Y POTENCIA

El tablero de control juega un papel fundamental en la implementación del módulo de nivel, ya que contiene todas las interconexiones eléctricas entre el módulo de adquisición de datos Compact-RIO y las electroválvulas, sensores y motobomba. Éste se muestra en la Figura 3-1.



FIGURA 3-1. TABLERO DE CONTROL Y POTENCIA

La distribución de sus componentes se realizó de la siguiente manera: los elementos de potencia se ubican en el nivel inferior y los de control en la parte superior. De esta manera se evitan cruces entre cables de distintos dominios, cuyas tensiones varían entre 24V de corriente continua y 220Vrms de corriente alterna. El tablero se encuentra dentro de un gabinete metálico, el cual posee una puerta frontal con una ventana de vidrio para su visualización desde el exterior. Además, se incluye un botón de parada de emergencia en la parte lateral derecha, para que cualquier usuario pueda detener el llenado o vaciado de los tanques en caso de alguna eventualidad.

Dentro de los elementos de potencia están las protecciones, el variador de velocidad de la motobomba y los relés de estado sólido. Por otro lado, los elementos de control son la fuente de alimentación de 24V y el sistema Compact-RIO. Estos serán descritos a continuación.

3.1 PROTECCIONES

3.1.1 CONTACTOR SACE FÓRMULA A1



FIGURA 3-2. CONTACTOR SACE FÓRMULA A1

El **Sace Formula A1** (Figura 3-2) es un contactor tripolar de 125A que opera a una temperatura máxima de 50 °C [3]. Es un dispositivo electromagnético que se usa para cerrar o abrir circuitos de potencia. Para este caso se usa como interruptor principal que energiza todos los circuitos del tablero, así como la motobomba y los módulos de adquisición de datos [4].

3.1.2 Guardamotor GV2-ME10



FIGURA 3-3. GUARDAMOTOR GV2-ME10 [5]

El GV2-ME es un guardamotor magneto-térmico tripolar adaptado al mando y a la protección de los motores, utilizado para salvaguardar la motobomba. Sus componentes magnéticos son utilizados para la protección contra cortocircuitos, mientras que los elementos térmicos se utilizan para la protección contra sobrecargas. Su rango de disparo varía entre 4A y 6.3A, lo que se ajusta a la corriente que exige la motobomba cuando está a su máxima potencia. Además, el

guardamotor está compensado contra las variaciones de la temperatura ambiente, permitiendo su operación en distintos ambientes [5].

3.1.3 Interruptor magnetotérmico Chint NB1 63 C2



FIGURA 3-3. INTERRUPTOR CHINT NB1 63 C2

El **Chint NB1 63 C2** es una protección contra corrientes de sobrecarga y cortocircuitos de tipo magnetotérmicos. Puede soportar hasta 60 A. Este se utilizó como protección para la fuente de alimentación NI PS-15 power supply [4].

3.1.4 Interruptor diferencial tripolar 5SY6 (Breaker)



FIGURA 3-4. BREAKER 5SY6 [6]

Este dispositivo se utiliza como protección de las electroválvulas y los relés de estado sólido, en dado caso que estos presenten alguna falla. Es un elemento de tres polos, que soporta una tensión máxima de 400Vrms y una corriente de 125A, lo cual lo hace adecuado para esta aplicación (Figura 3-) [6]. Además, contiene una compensación en temperatura para que pueda operar en distintas condiciones ambientales.

3.2 RELÉ DE ESTADO SÓLIDO 3RF2120-3AA02



FIGURA 3-5. RELÉ DE ESTADO SÓLIDO 3RF2120-3AA02 [7]

Los relés de estado sólido (solid-state relays) son dispositivos que usan TRIACs o SCRs para controlar elevadas cargas de potencia a partir de señales de control de bajo voltaje e intensidad. Mediante el uso de una tensión de control digital de 0 a 24 V el relé se comporta como un interruptor abierto o cerrado bidireccional. De esta manera se encienden y apagan las electroválvulas que controlan el sentido del flujo del agua entre los dos tanques. La máxima corriente que soporta es 20A lo que los hace compatibles con los requerimientos de las válvulas [8].

3.3 FUENTE DE ALIMENTACIÓN NI PS-15.



FIGURA 3-4. FUENTE DE ALIMENTACIÓN NI PS-15 [9]

La fuente de alimentación NI PS-15 se usa para energizar los distintos módulos del sistema de adquisición de datos compactRIO y los relés de estado sólido. Su tensión de salida es de 24V dc a una corriente máxima de 5A. Esta fuente fue adquirida a la compañía National Instruments, lo que hace que sea completamente compatible con el compactRIO.

3.4 VARIADOR DE TENSIÓN TRIFÁSICA



FIGURA 3-5. VARIADOR DE VELOCIDAD MICROMASTER 440 [10]

Este dispositivo es un inversor trifásico de potencia, el cual se utiliza para controlar la velocidad de la motobomba. Dentro de sus principales características están el control de velocidad por frecuencia, y la opción de activarlo/desactivarlo mediante entradas externas; por tal motivo puede ser controlado mediante el módulo Compact-RIO. Su potencia de salida es máximo de 60HP, lo que lo hace adecuado para producir grandes variaciones de flujo y caudal con la motobomba [10].

3.5 BORNES DE INTERCONEXIÓN Y EMPALME ABB



FIGURA 3-6. BORNES ABB [11]

Para el empalme de los conductores y su interconexión se utilizaron bornes del fabricante ABB, tal como se muestra en la Figura 3-6. Dependiendo del tipo de

circuito en donde fueron utilizados (potencia o control) su tamaño varía. Estos elementos también pueden ser utilizados como protecciones adicionales ya que las que pertenecen al circuito de potencia contienen un fusible en su interior. Con esto se garantiza la integridad de cada uno de los elementos del tablero ante cualquier falla.

3.6 PLANO GENERAL DEL TABLERO DE CONTROL

El diagrama eléctrico del tablero de control se presenta en la Figura 3-7. Éste muestra la interconexión de todos los elementos mencionados en las secciones anteriores. Se destaca el cableado de cada uno de los sensores de nivel al módulo de adquisición de datos Compact-RIO, a través de los bornes de control. La motobomba se conecta al variador de frecuencia, éste al guardamotor y a la toma general trifásica. Además, la tensión de 24VDC que produce la fuente NI-PS15 se reparte a los relés, sensores y al módulo Compact-RIO a través de seis (6) bornes, los cuales están interconectados entre sí. Cada cable fue etiquetado según su uso: potencia, tierra, datos, sensores, etc. Dicha nomenclatura se resume en la Tabla 1.

En adición, cada elemento tiene su respectiva conexión a la puesta a tierra de todo el laboratorio, con el fin de aislar cualquier potencial interferente que pueda causar algún daño; esta conexión se realiza por medio de los bornes de tierra, los cuales tiene una nomenclatura y color en particular. Para mayor claridad este plano está impreso en tamaño poster y será expuesto en el laboratorio de instrumentación. De esta manera futuros proyectos tendrán un punto de partida claro y conciso para la mejora del módulo.

EQUIPO	MARCACION	NOMENCLATURA	DESCRIPCION
Relé	(1R A1-1R A2 a 4R A1-4R A2)	1 a 4:# numero de relé R:relé A: 1a 2: terminal	Bobinas
	(1R L1-1R T2 a 4R L1-4R T2)	1 a 4:# numero de relé R:relé L1, T2: terminal	Pines
Totalizadores	CB1...CB3	C: circuit B:breaker 1 a 3: # de fase	Pines de fase
Borneras	BR-1...BR-55	BR:Bornera 1 a 55: # de Bornera	Borneras ABB
Fuente 24 V	S +24 : S - GND	S: Source	NIPS-15
Variador de Frecuencia	VF	VF: Variador de Frecuencia	SIEMENS MM40
GuardaMotor	MP	MP: Motor Protection	GV2ME10
Motor	M	M: Motor	Motobomba de 4HP

TABLA 1: NOMENCLATURA UTILIZADA PARA ETIQUETAR EL CABLEADO DEL TABLERO DE CONTROL

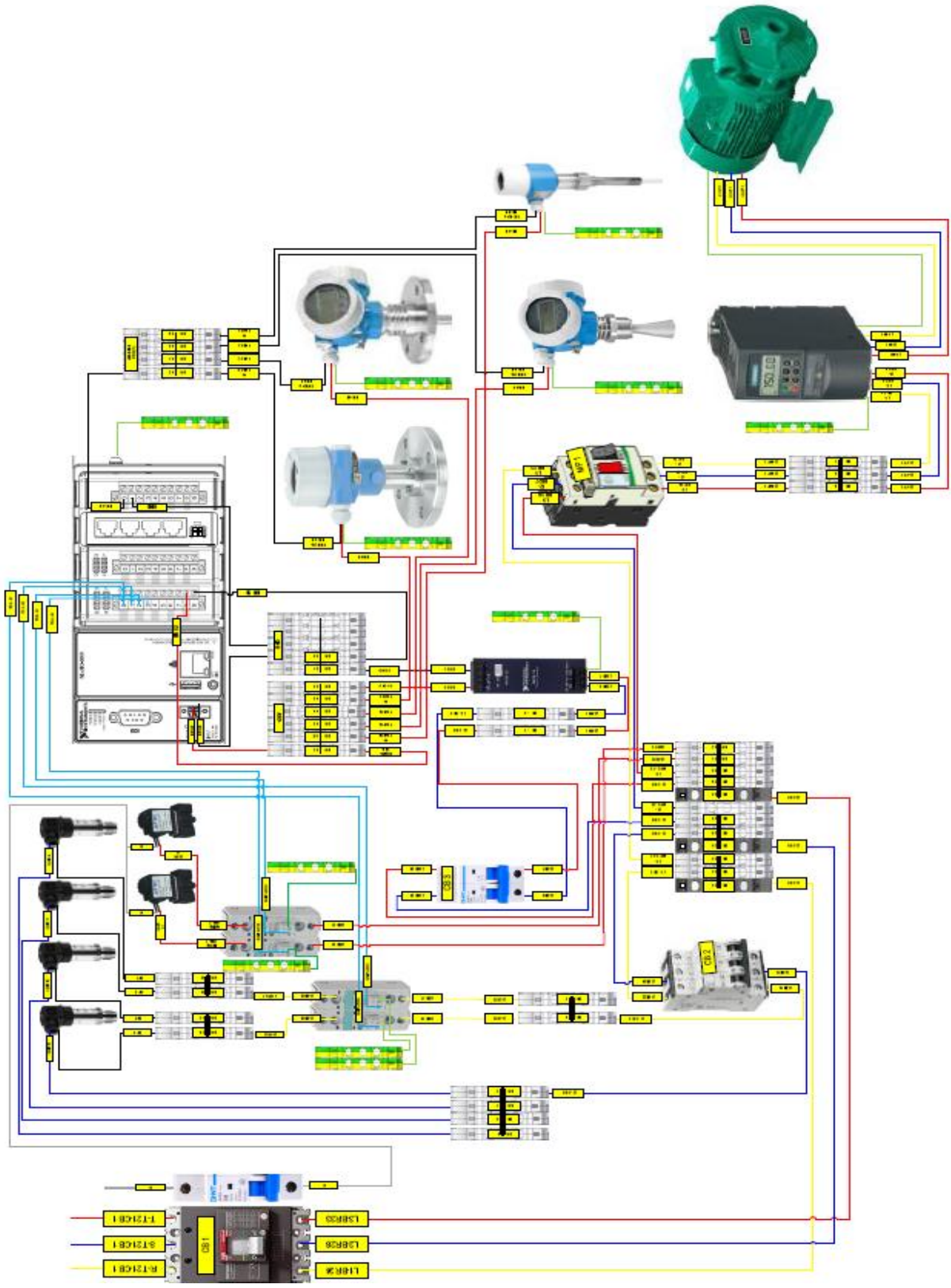


FIGURA 3-7. PLANO ELÉCTRICO DEL TABLERO DE CONTROL

4 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El control de llenado y vaciado de los tanques se efectúa desde el software LabVIEW. Se implementó un control centralizado donde todos los sistemas y subsistemas están conectados a única unidad central, que supervisa y puede controlar todos los periféricos directamente. Se escogió este tipo de control porque se consideró óptimo para esta fase del proyecto, basados en los recursos de los que se disponen y los fines deseados. Tiene tanto ventajas como falencias que deben ser tenidas en cuenta. En general un sistema de control de este tipo es de menor costo, dado que requiere menos Hardware. Otro factor clave es que ofrece mayor seguridad y protección de información y de equipos, porque todo el procesamiento es controlado desde el servidor principal, al cual sólo tiene acceso el personal autorizado. En caso de alguna falla, será más simple realizar un mantenimiento, ya que se cuenta con un sólo punto afectado. Dentro de las desventajas se encuentra la posible baja velocidad de repuesta, dependiendo de la conexión de la red a la central y de la jerarquía propia de este tipo de sistema, razón por la cual se adquirió para el laboratorio un computador lo suficientemente rápido y con gran capacidad de almacenamiento.



FIGURA 4-1. SISTEMA COMPACTRIO [12]

La adquisición y procesamiento de las señales de control se realizó a través del módulo **Compact-RIO 9075** (Figura 4-1) proporcionado por la compañía **National Instruments**, el cual es un sistema embebido avanzado de control y monitoreo que incluye un procesador en tiempo real, un FPGA y módulos de la Serie C intercambiables en tiempo real. Para este proyecto, el cRIO se fijó al tablero eléctrico mediante la plataforma **NI 9905** (Panel Mounting Kit) y para la implementación del sistema de control se usaron los siguientes módulos:

- **NI 9421** (8-Channel Sinking Digital Input Module): Dispositivo que provee ocho (8) señales de entrada digitales, cuyos valores lógicos son 0v y 24V.
- **NI 9474** (8-Channel Digital Output Modules): Es un módulo que proporciona ocho (8) señales de salida digitales, cuyos valores lógicos son 0V y 24V.

- **NI 9870** (4-Port, RS232 Serial Module): Módulo de comunicación serial de tipo RS232.
- **AM-9898** (HART Communications CompactRIO Module): Dispositivo especializado en la lectura de señales de corriente y moduladas según el protocolo HART.

Para crear la interfaz gráfica y realizar la comunicación desde el PC con el hardware de NI, se programó sobre el software de desarrollo de sistemas LabVIEW con el Módulo LabVIEW Real-Time, el Módulo LabVIEW FPGA y el controlador NI-RIO.

4.1 IMPLEMENTACIÓN

La implementación del control se realizó por partes que se fueron uniendo para así formar la interfaz final. De esta forma, se verificó el correcto funcionamiento de cada uno de los dispositivos, equipos, módulos y subsistemas antes de interconectarlos como un solo sistema centralizado. A continuación se muestra la secuencia de pasos necesaria para crear e implementar una aplicación usando Compact-RIO, la cual quedará como documentación para futuros proyectos en torno al mejoramiento del módulo.

4.1.1 Software

El software necesario para el desarrollo del proyecto es:

- Sistema de Desarrollo Completo de LabVIEW
- Módulo LabVIEW Real-Time
- Módulo LabVIEW FPGA
- Controlador NI-RIO
- AM-9898 HART Interface Toolkit (Instalado desde JKI VI Package Manager)

Estas herramientas fueron instaladas desde los recursos que la compañía National Instruments proporcionó a la Universidad Pontificia Bolivariana, que incluyen DVDs de respaldo, memorias USB y todo el hardware mencionado.

4.1.2 Instalación y Configuración del CompactRIO 9075.

Una vez instalado físicamente el cRIO 9075 en el tablero eléctrico mediante el NI 9905, se procedió a configurarlo siguiendo las instrucciones disponibles en la página web oficial de National Instruments [13].

La Figura 4-2 muestra el resultado de configurar la plataforma NI 9905 junto con el módulo cRIO 9075. La red de comunicaciones es directa, es decir existe una única

conexión física tipo Ethernet entre la plataforma NI 9905 y el computador donde se desarrollan las aplicaciones, sin la necesidad de hacer uso de routers o módems adicionales; esto permite aumentar la velocidad de comunicación hasta 100Mbps. No obstante, gracias a que la conexión es tipo Ethernet, es posible incluir un router y así conectar diversas plataformas NI9905 o similares, que incluyan varios cRIO 9075, logrando aumentar la capacidad del sistema de manera significativa.

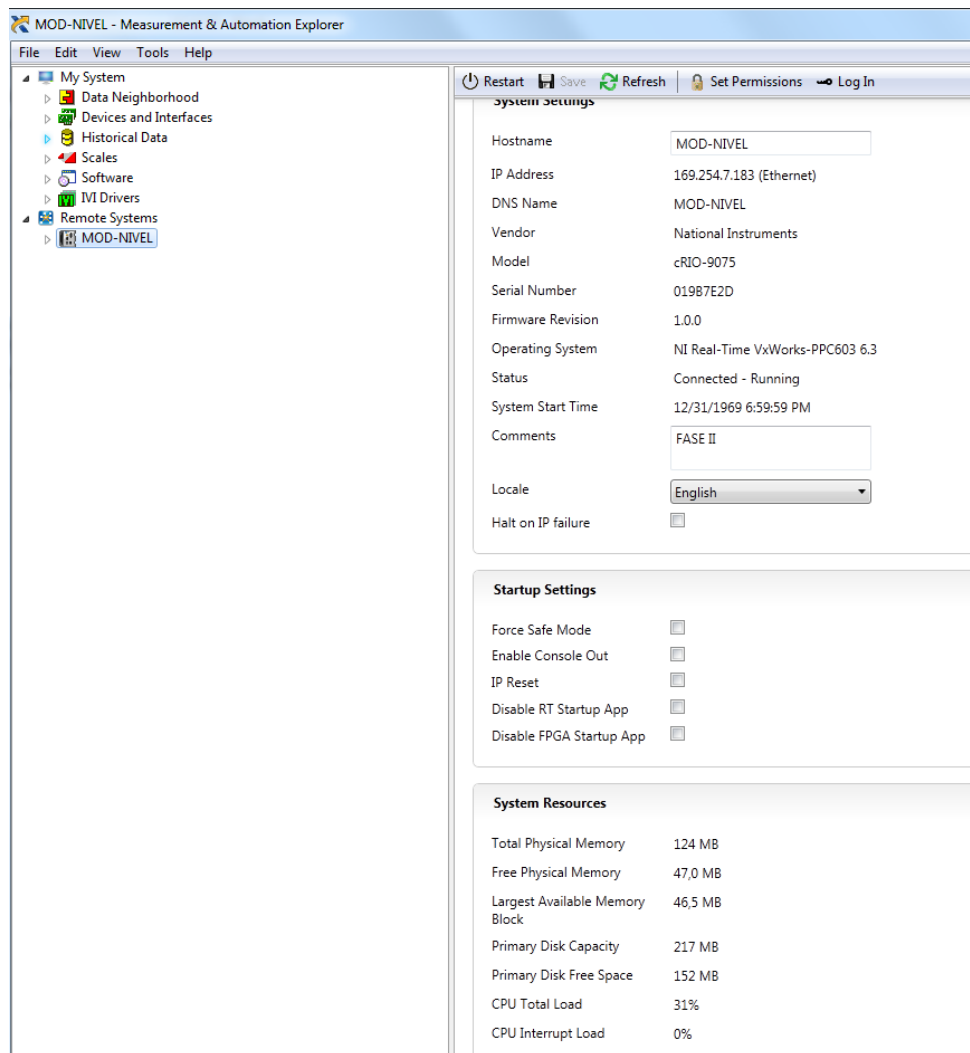


FIGURA 4-2. SISTEMA REMOTO CONFIGURADO

4.1.3 Configuración de los sensores de nivel.

Como paso preliminar es necesario ajustar el spam y rango de cada sensor. Para esto cada sensor posee una pantalla LCD y tres teclas (arriba, abajo y avanzar), las cuales permiten navegar por un menú de opciones que incluye Lenguaje, Diagnóstico, Ajustes básicos y avanzados, entre otros.

El proceso de ajuste del spam consiste en definir los estados mínimo y máximo en el tanque y que el sensor interpretará como vacío y lleno. Esto se realiza de manera manual en cada dispositivo siguiendo los siguientes pasos:

- a) Una vez se encienden los sensores por primera vez seleccione el idioma del menú.
- b) Para los sensores de onda guiada y de radar, es necesario escoger en el menú ajustes el material del tanque, su geometría y el tipo de líquido a medir. Con esto el sensor puede ajustar los parámetros de emisión y rebote de la onda prueba. Para este caso se escogió un tanque metálico, cilíndrico y con un contenido basado en agua.
- c) Para el sensor de presión se debe escoger desde el menú ajustes el tipo de medición que se va a realizar. A pesar que su principal variable es la presión, se escoge nivel con el fin de que el sensor internamente calcule el nivel a partir de la presión medida y lo muestre e pantalla como un porcentaje.
- d) Acto seguido, para todo los sensores es necesario definir el nivel que éste asumirá como 0%. Para esto es necesario vaciar los tanques hasta que el nivel del agua esté 10cm por encima de la base del tanque.
- e) Luego se define el nivel máximo, para lo cual se debe medir manualmente la distancia entre el nivel mínimo del punto anterior y el nivel máximo. Este valor debe ser ingresado en cada sensor.
- f) Para los sensores de onda guiada y radar es necesario ejecutar una prueba de vacío y mapeo, la cual se encuentra en el menú Mapeo. Esto permite que los sensores reconozcan la geometría del tanque y puedan eliminar ecos y señales interferentes que alteren la medición. Esta prueba se debe realizar con los tanques completamente vacíos.
- g) Luego es necesario configurar la comunicación con LabVIEW. Por defecto todos los sensores están ajustados según el protocolo HART, de modo tal que sólo es necesario configurar el canal por el cual se comunican. Para realizar esto se debe ingresar al menú de ajustes expertos, luego al submenú comunicación y ajustes HART, y escoger un canal distinto para cada sensor.

4.2 ESTRATEGIA DE CONTROL DE LAS ELECTROVÁLVULAS A TRAVÉS DEL NI 9474:

El programa se desarrolló usando LabVIEW for myRIO. Se inició un nuevo proyecto en blanco desde la interfaz gráfica. Se escoge la opción "*Blank Project*", con lo que se inicializa todo LabView para hacer uso del cRIO. Estos pasos se muestran en las Figura 4-3, Figura 4-4 y Figura 4-5.

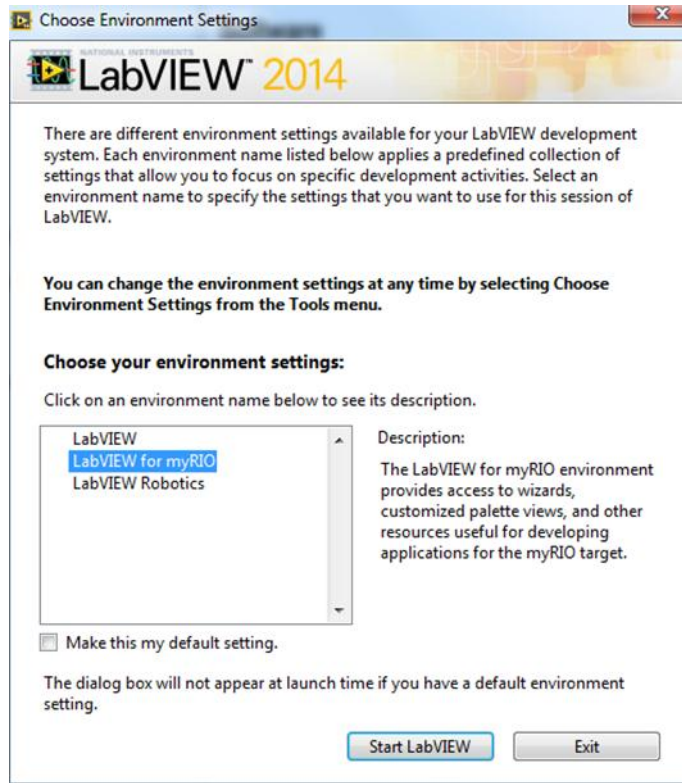


FIGURA 4-3. INICIAR LABVIEW FOR MYRIO

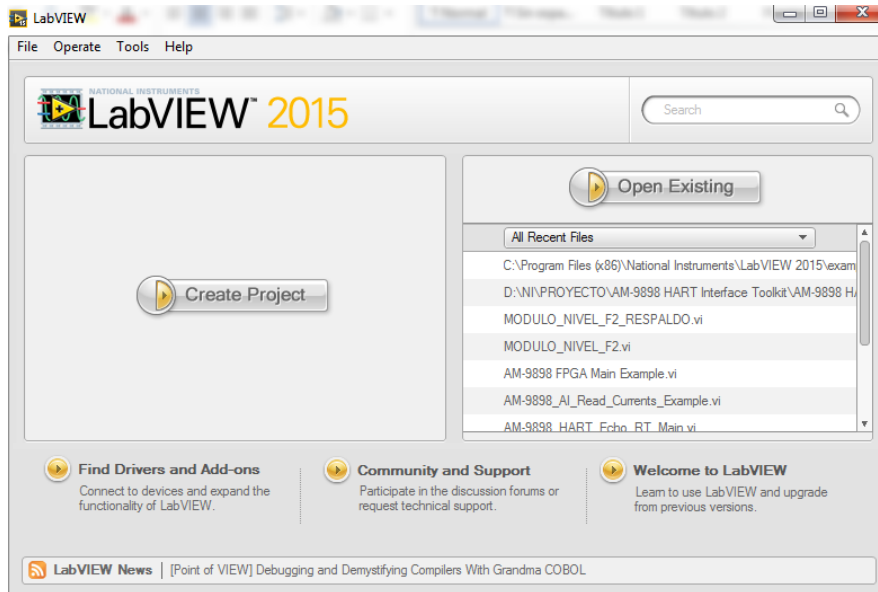


FIGURA 4-4. CREAR PROYECTO

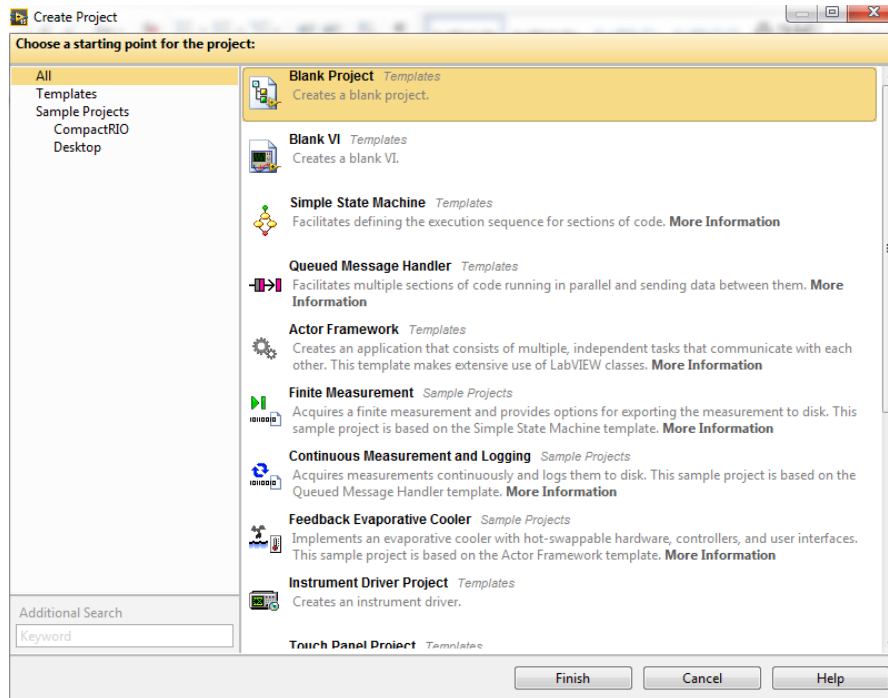


FIGURA 4-5. CREAR UN PROYECTO EN BLANCO

Al proyecto se le deben agregar las tarjetas y dispositivos correspondientes. En este caso es el cRIO 9075. Para realizar este proceso se busca la tarjeta o dispositivo automáticamente, usando la dirección IP con la que se configuró o simplemente agregando un elemento genérico en caso de que no se tenga el Hardware y se deseen realizar simulaciones. Para este caso se optó por la primera opción, tal como se muestra en las Figura 4-6 y Figura 4-7.

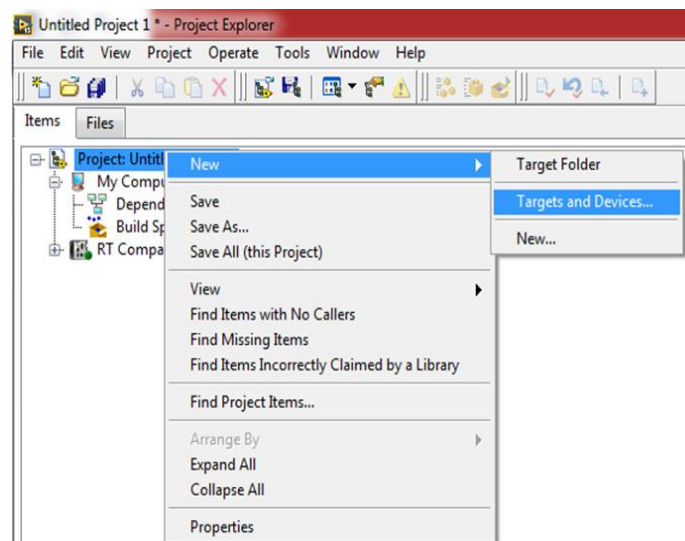


FIGURA 4-6. AGREGAR TARJETAS Y/O DISPOSITIVOS

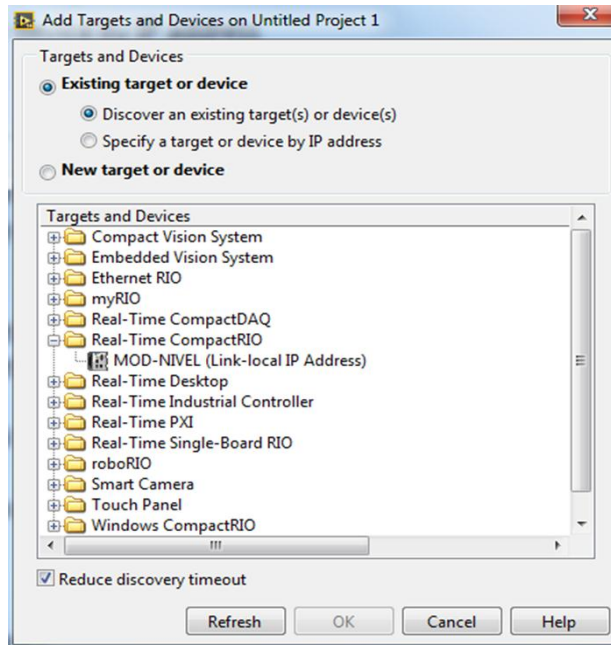


FIGURA 4-7. MÓDULO COMPACT-RIO DETECTADO

A continuación, se agregan los módulos que se habían conectado previamente a Chassis (C-Series Modules). En este caso se encontraban conectados el NI 9474 y NI 9021, tal como lo muestran las Figuras 4-9 a 4-11.

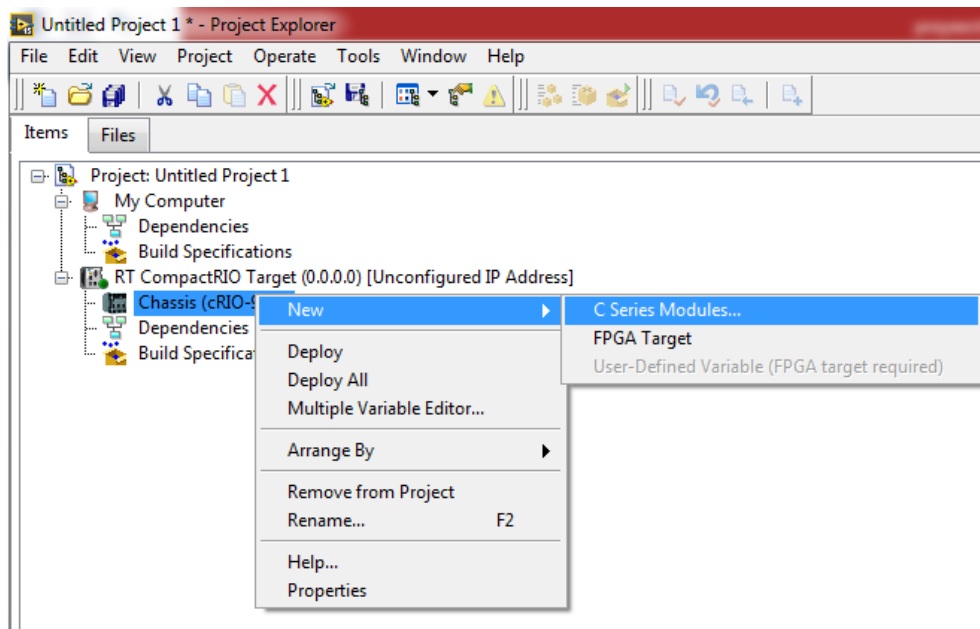


FIGURA 4-8. MENÚ PARA AGREGAR MÓDULOS

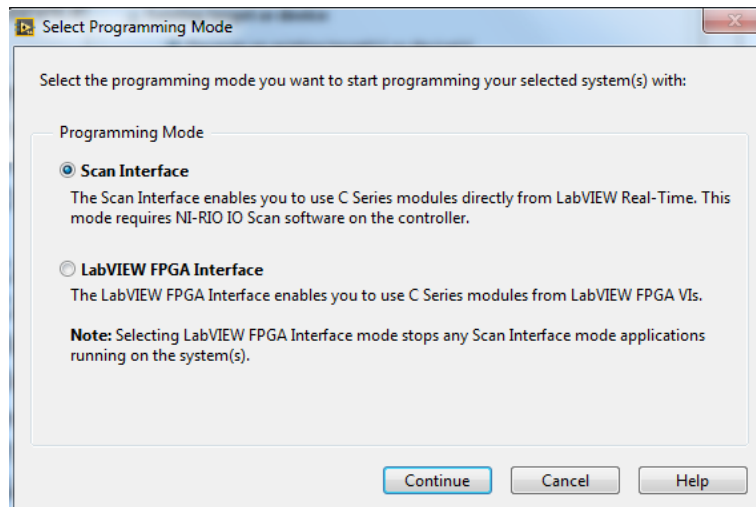


FIGURA 4-9. MENÚ DE SELECCIÓN PARA EL MODO DE PROGRAMACIÓN DEL CHASSIS

Se debe agregar un archivo VI para comenzar a trabajar con salidas y entradas digitales. Éste se correrá directamente desde el procesador, pero como se mostrará más adelante al realizar un programa más robusto y que opere en tiempo real (con altas velocidades,) se va a requerir de un VI principal que se ejecute desde la FPGA; éste podrá ser llamado desde otros VI desde el procesador. Es relevante tener en cuenta que sólo puede haber un VI ejecutándose desde la FPGA, en caso de requerir otros, estos deberán ser llamados como SubVI o su programación deberá ser incluida en el diagrama de bloques del archivo principal.

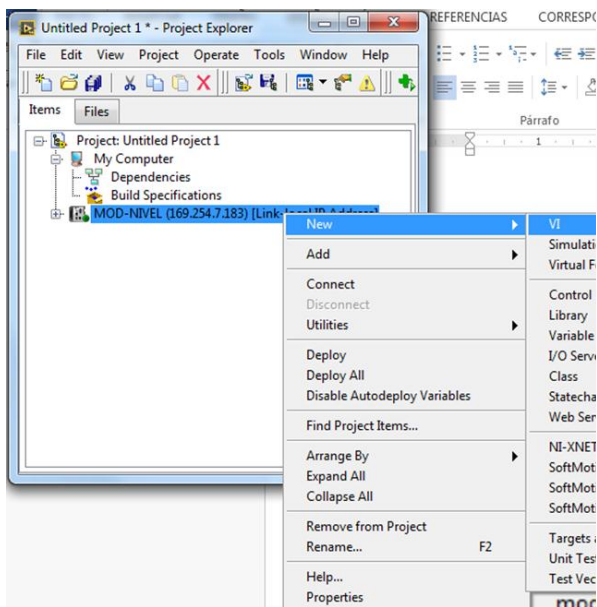


FIGURA 4-10. CREACIÓN DE UN NUEVO VI

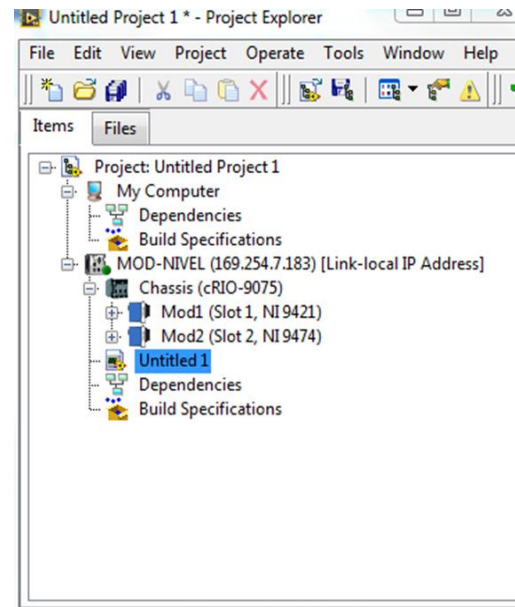


FIGURA 4-11. NUEVO VI CREADO

Para comenzar a programar usando las salidas y entradas digitales disponibles en los módulos, los expandimos, seleccionamos el puerto deseado y lo arrastramos hasta nuestro diagrama de bloques en el VI, tal como se muestra en las Figura 4-12 y Figura 4-13.

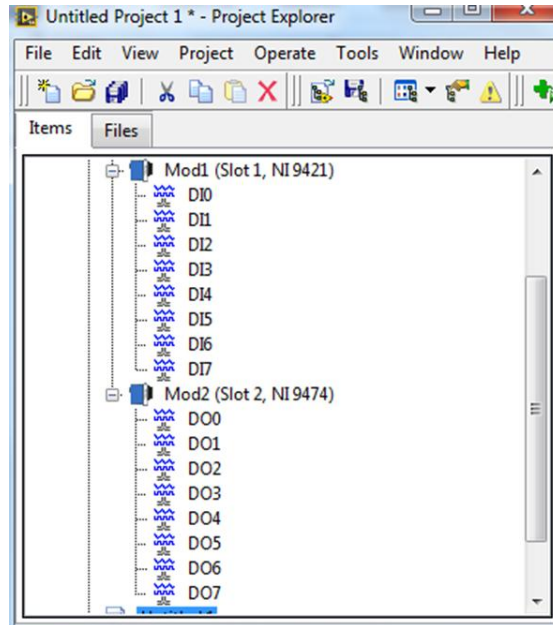


FIGURA 4-12. MÓDULOS DE ENTRADAS Y SALIDAS DIGITALES EXPANDIDOS

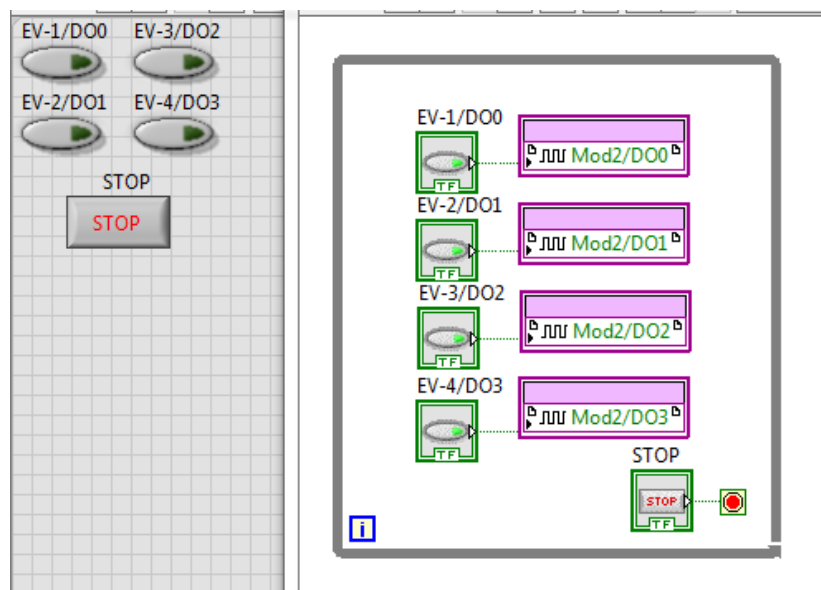


FIGURA 4-13. VI Y SU DIAGRAMA DE BLOQUES PARA CONTROLAR LAS ELECTROVÁLVULAS

Usando este proyecto fue posible probar individualmente las electroválvulas. Las salidas fueron conectadas a la bobina de un relé de estado sólido y al ser energizadas, activan las electroválvulas. Finalmente se conectaron en paralelo la

EV-1 y EV-3, igual que la EV-2 y EV-4, por lo que sólo se hicieron necesarias dos salidas digitales (dos relés de estado sólido). De esta manera se controla el sentido del flujo de agua entre los tanques, ya sea del tanque TK100 al TK200 o viceversa.

4.3 COMUNICACIÓN ENTRE EL PC Y EL AM-9898 A TRAVÉS DEL CRIO 9075 Y LECTURA DE CORRIENTE EN LOS SENSORES CONECTADOS DE FORMA INDEPENDIENTE

En esta sección se mostrará la forma de crear una aplicación en LabVIEW para la lectura de las corrientes que proporciona cada sensor. Es importante resaltar que cada uno de ellos opera bajo el estándar 4-20mA. La comunicación con el módulo AM9898, el cual es el encargado del sensado de corriente, se logró gracias a la documentación que National Instruments proporciona [14].

La aplicación se basa en el proyecto ejemplo titulado “AM-9898 HART Module.lvproj”, tal como se muestra en la Figura 4-14.

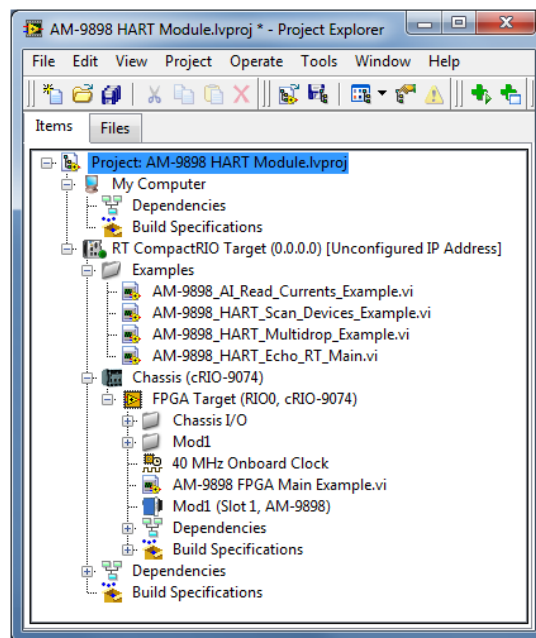


FIGURA 4-14. PROYECTO EJEMPLO AM-9898 HART MODULE

Una vez abierto el proyecto, se modifica la IP de la Tarjeta para que coincida con la configurada anteriormente. Además es necesario cambiar la referencia del Chassis por cRIO-9074, ya que por defecto está cRIO-9075.

Luego se carga el archivo “AM-9898 FPGA Main Example.vi”. Este VI debe encontrarse en la jerarquía del proyecto por debajo de la FPGA, pues es el

encargado de la comunicación principal. Cualquier otro VI que se encuentre en la tarjeta y que se desee ejecutar deberá llamarlo para permitir el proceso de transmisión y recepción de datos. Esto se muestra en la Figura 4-15.

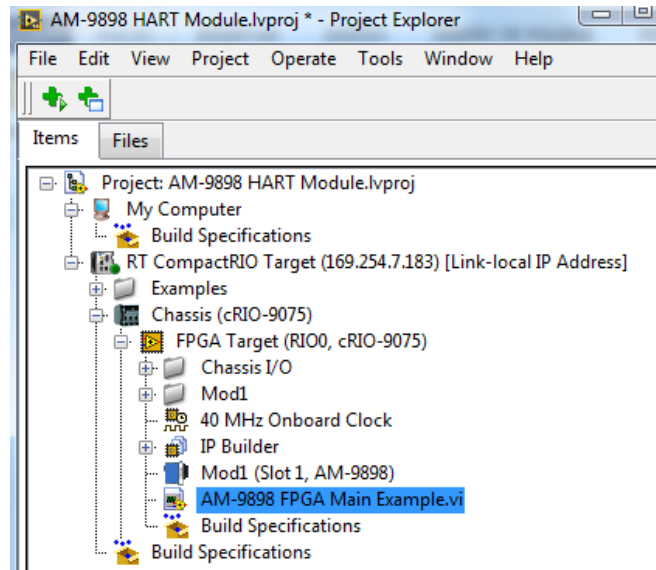


FIGURA 4-15. PROYECTO AM9898 MODIFICADO SEGÚN EL HARDWARE DISPONIBLE

El panel frontal del VI mencionado se muestra en la Figura 4-16 y su diagrama de bloques en la Figura 4-17. Este recolecta diversa información de los sensores de nivel, tal como su número de identificación, número de serie, identificador del proveedor, entre otras. Como primera medida se conecta cada sensor a un canal distinto del módulo AM-9898. De esta manera se puede conocer en tiempo real la lectura de cada sensor:

- Canal AI0: Deltapilot M FMB50 (TK-200)
- Canal AI1: Levelex-FMP52 (TK-200)
- Canal AI2: Micropilot FMR51 (TK-100A)
- Canal AI3: Liquicap M FMI51 (TK-100B)

Es importante hacer énfasis en que para ejecutar el VI en mención en el cRIO es necesario que LabVIEW sintetice un código en VHDL para que sea implementado en la FPGA. Esto lo realiza mediante herramientas de la compañía Xilinx, ya que la FPGA es proporcionada por dicha empresa. Este proceso tiene una duración aproximada de 30 minutos, por lo que es sumamente importante que se revise con cautela el VI para optimizar el tiempo que tarda el desarrollo de la aplicación.

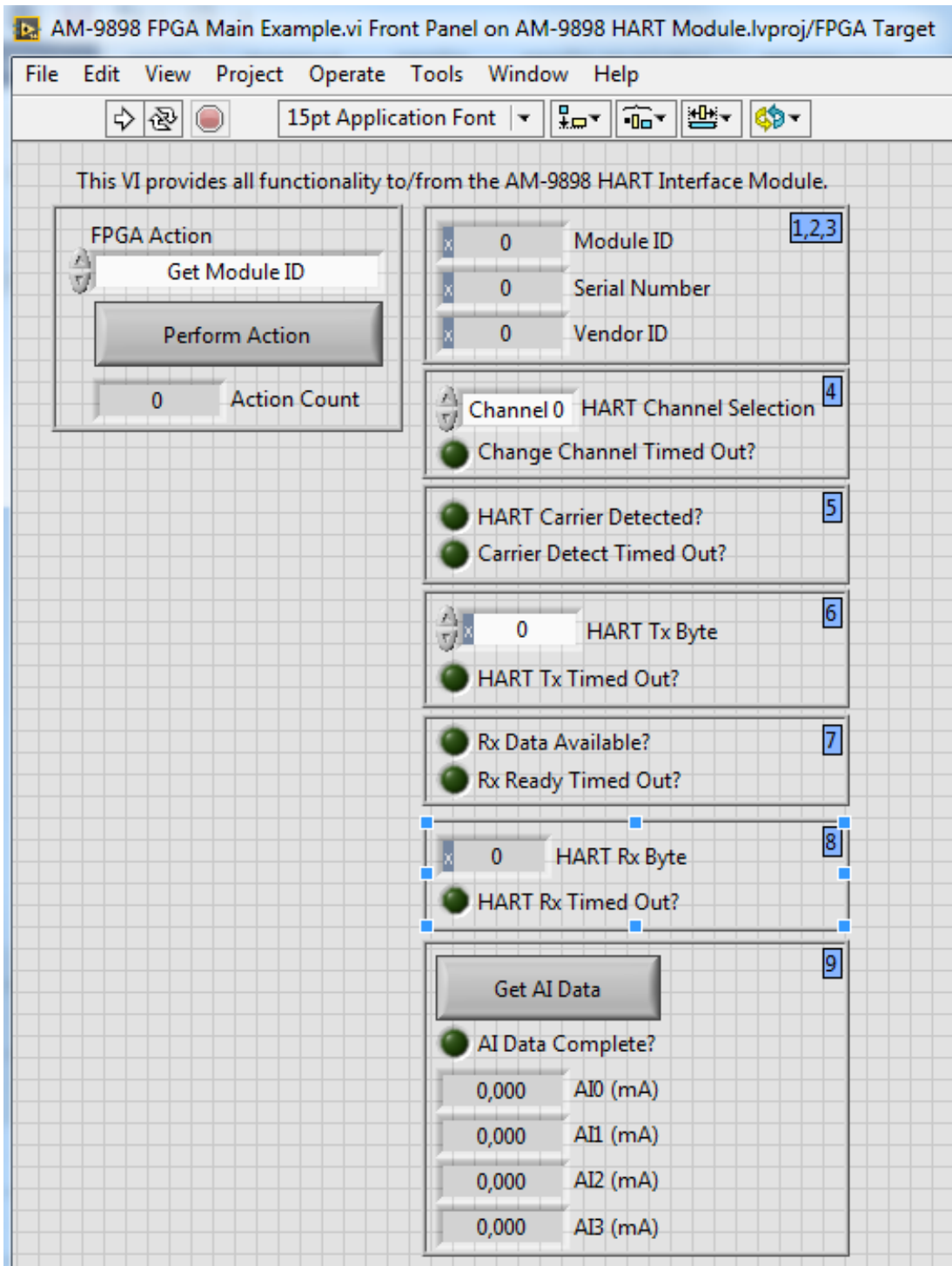
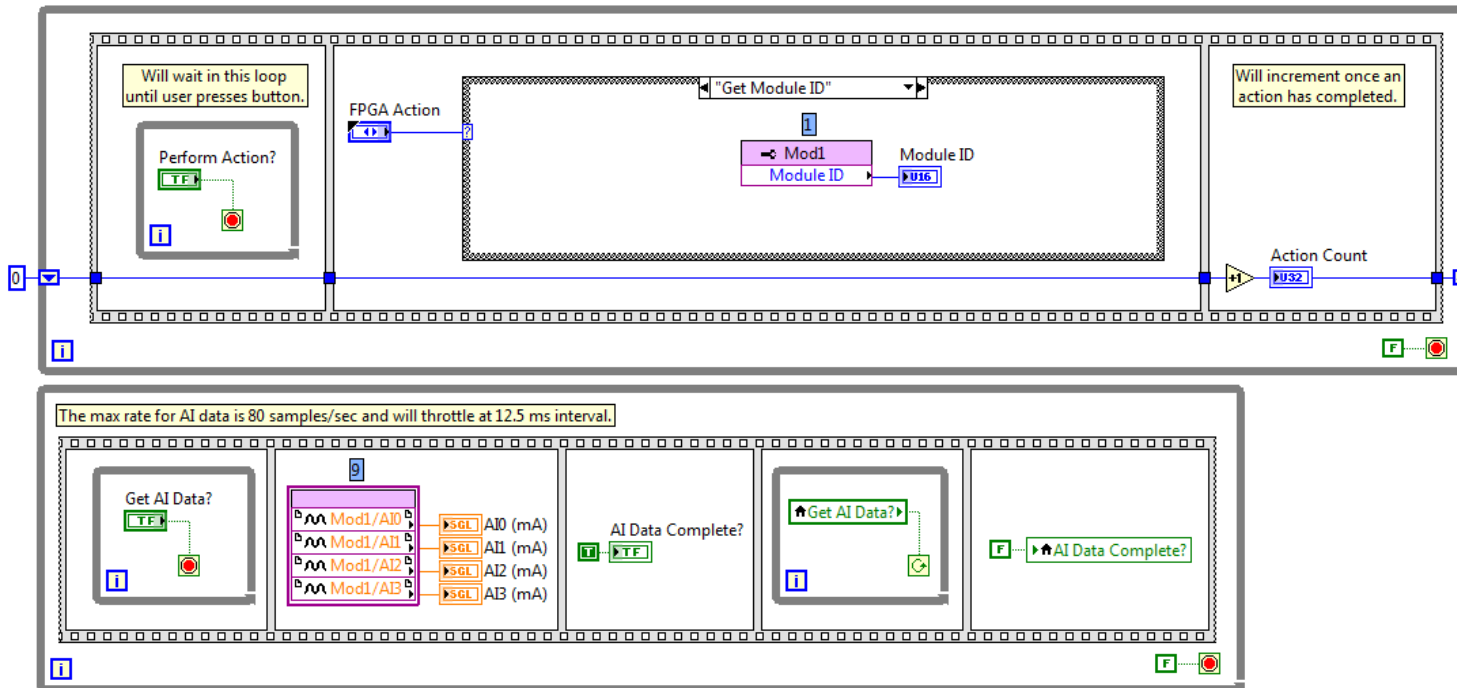


FIGURA 4-16. PANEL FRONTAL DEL VI AM-9898 FPGA MAIN EXAMPLE



This example will provide all functionality required to communicate including:

1. Get Module ID (x9898)
2. Get Serial Number
3. Get Vendor ID (x414D)
4. Change HART Channel (0-3)
5. Check Carrier Detect (for incoming traffic)
6. Write HART Byte to HART modem
7. Check HART Rx Ready (for available character)
8. Read HART Byte from HART modem
9. Acquire Current for all loops

FIGURA 4-17. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PANEL FRONTAL DE LA FIGURA 3-15

4.4 CONEXIÓN DE LOS SENSORES EN BUS HART MULTIPUNTO CON EL MÓDULO AM-9898

Para aprovechar todas las ventajas que cada sensor ofrece en cuanto a la información que pueden transmitir, se implementó una aplicación que hace uso del protocolo HART para comunicarse con cada dispositivo. Es importante resaltar que los sensores ofrecen dos formas distintas para transmitir su medición: una señal de corriente DC de 4-20mA tal como se mencionó anteriormente, y una señal de corriente sinusoidal modulada por cambio de frecuencia FSK que corresponde al módulo HART.

El hecho de hacer uso del protocolo HART permite que los cuatro sensores puedan ser conectados a un solo canal y así maximizar la utilización del módulo AM-9898. Esta conexión se denomina multipunto, y será la base de las aplicaciones que se expliquen en el resto del documento. Es importante resaltar que debido a que en una conexión multipunto la corriente de todos los sensores se suma en un solo nodo y canal de entrada, se debe conectar una inductancia de protección de 100mH en paralelo con el canal, tal como el manual de usuario lo recomienda [14]

Para la inicialización de la comunicación y la identificación de los sensores se debe correr el archivo "AM-9898_HART_Scan_Devices_Example.vi", el cual realizará un barrido por todos los canales y frecuencias disponibles para el protocolo. De esta manera se puede reconocer cuántos sensores están conectados al canal, así como sus direcciones, tipo de medición, estado, entre otras variables. El resultado de este VI es fundamental para establecer el enlace de HART y poder leer todos los sensores en tiempo real. El panel frontal de este VI se muestra en la Figura 4-18, y su diagrama de bloques en la Figura 3-19.

Una vez se detectan los dispositivos con sus respectivas direcciones, éstas se actualizan en el archivo "AM-9898_HART_Multidrop_Example.vi", donde se procede a leer la información que cada sensor envía a través del protocolo HART. Las Figuras 3-18 y Figura 4-21 muestran su panel frontal y diagrama de bloques respectivamente. Este VI hace uso del archivo mencionado en la sección anterior, el cual fue compilado previamente; como funciones adicionales se encuentran la identificación de la señal portadora y el llamado a los sensores para su posterior escucha.

Con esto queda resuelto el problema de la lectura multipunto de los sensores de cada tanque, haciendo falta su integración en una sola aplicación, junto con los demás VI desarrollados anteriormente.

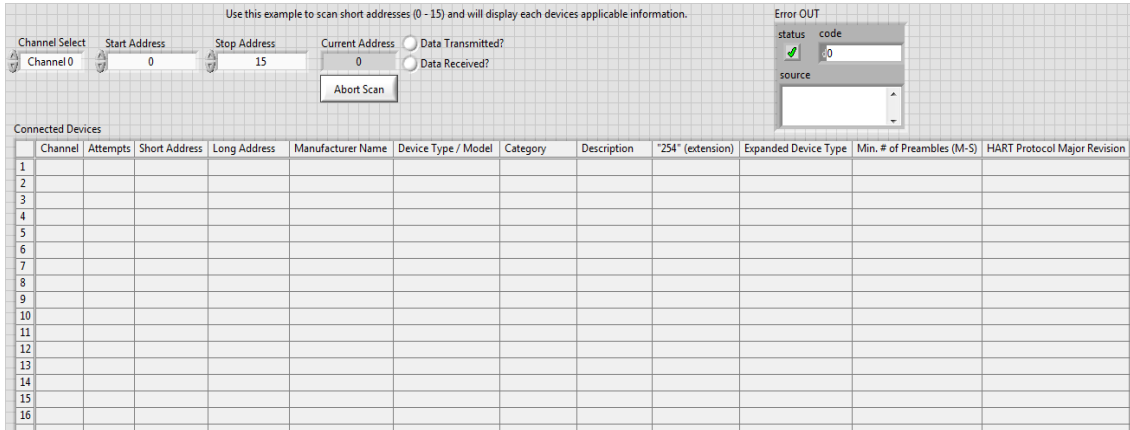


FIGURA 4-18. AM-9898 HART SCAN DEVICES: PANEL FRONTAL

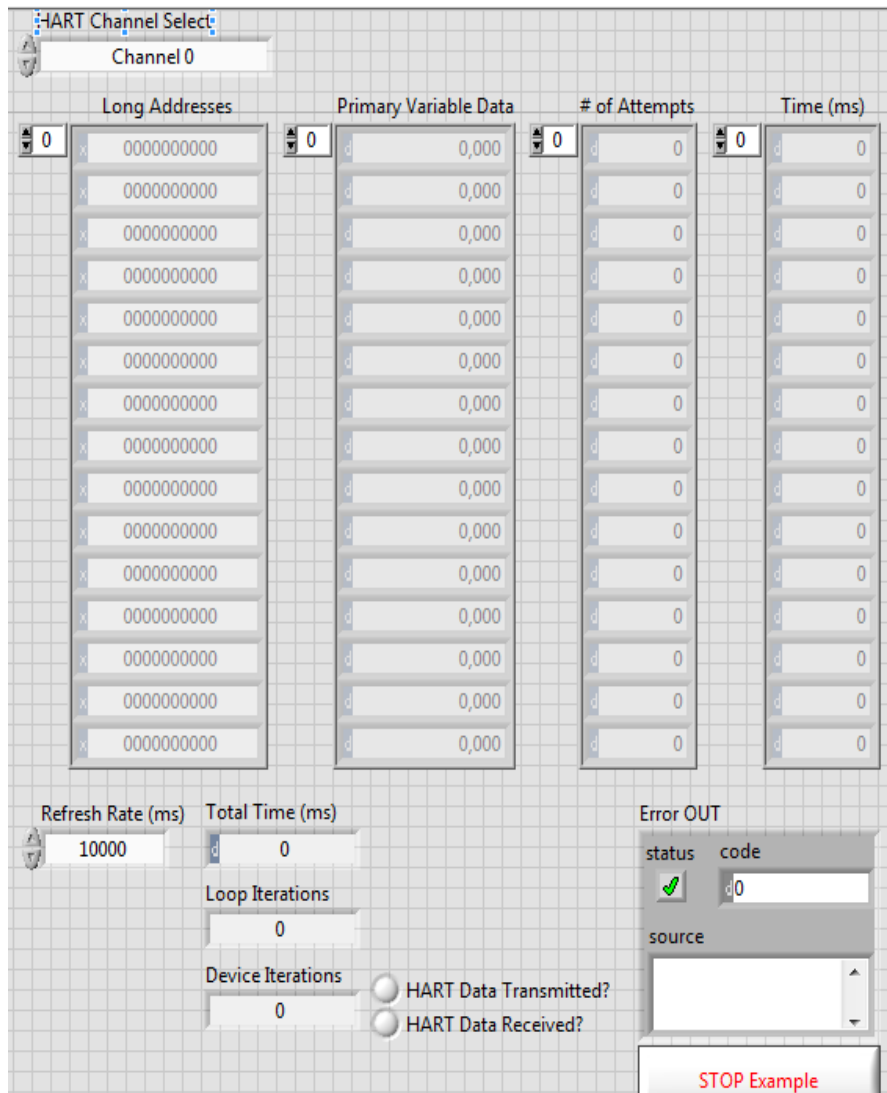
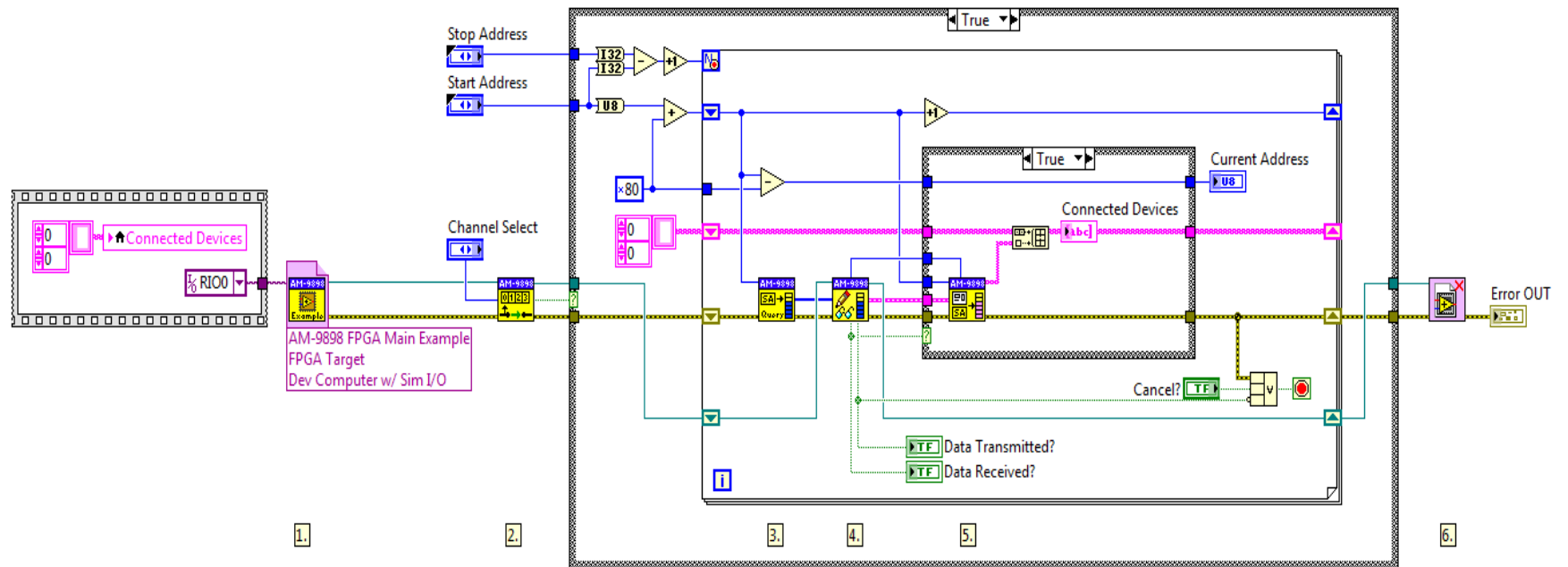


FIGURA 4-19. AM-9898_HART_MULTIDROP_EXAMPLE.VI: PANEL FRONTAL

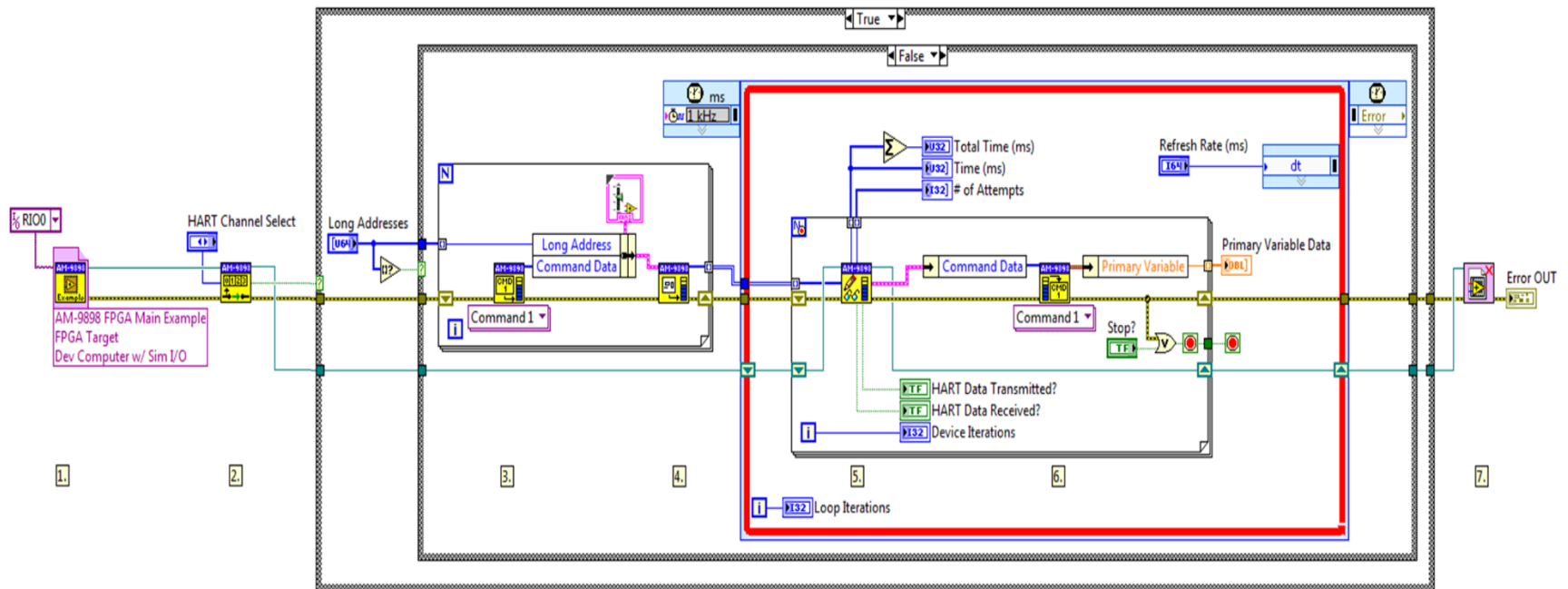


This example will scan up to 16 short addresses and return all applicable information for any connected devices.

1. Open a reference to the top level FPGA
2. Command to change channel selection (0 - 3)
3. Uses standard HART specifications to create an array to transmit per short address
4. Transmits the data array to the HART modem and receives all data from the HART modem
5. Parses receive data to table display
6. Closes FPGA reference

FIGURA 4-20. AM-9898 HART SCAN DEVICES: DIAGRAMA DE BLOQUES

This example will take a list of devices and query a response for Command 1 (Read Primary Variable) but can be modified to query other commands.



1. Open a reference to the top level FPGA
2. Command to change channel selection (0 - 3)
3. Uses standard HART specifications to create an array to transmit per short address
4. Create transmit message format to be sent via the HART modem
5. Transmits the data array to the HART modem and receives data from the HART modem
6. Decodes HART Command 1 to display primary variable data
7. Closes FPGA reference

FIGURA 4-21. AM-9898_HART_MULTIDROP_EXAMPLE.VI: DIAGRAMA DE BLOQUES

4.5 INTERFAZ GRÁFICA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Todas las anteriores aplicaciones de LabVIEW se integraron en un solo VI, por lo que es posible controlar las electroválvulas en la medida en que las lecturas de los distintos sensores lo indiquen. El archivo que contiene la nueva aplicación es “MODULO_NIVEL_F2.vi”; éste debe incluirse en el proyecto en un nivel de jerarquía mayor que la FPGA (es decir fuera de la misma), para que haga uso del archivo “AM-9898_FPGA_Main_Example.vi” previamente compilado. Esta configuración se muestra en la Figura 4-22.

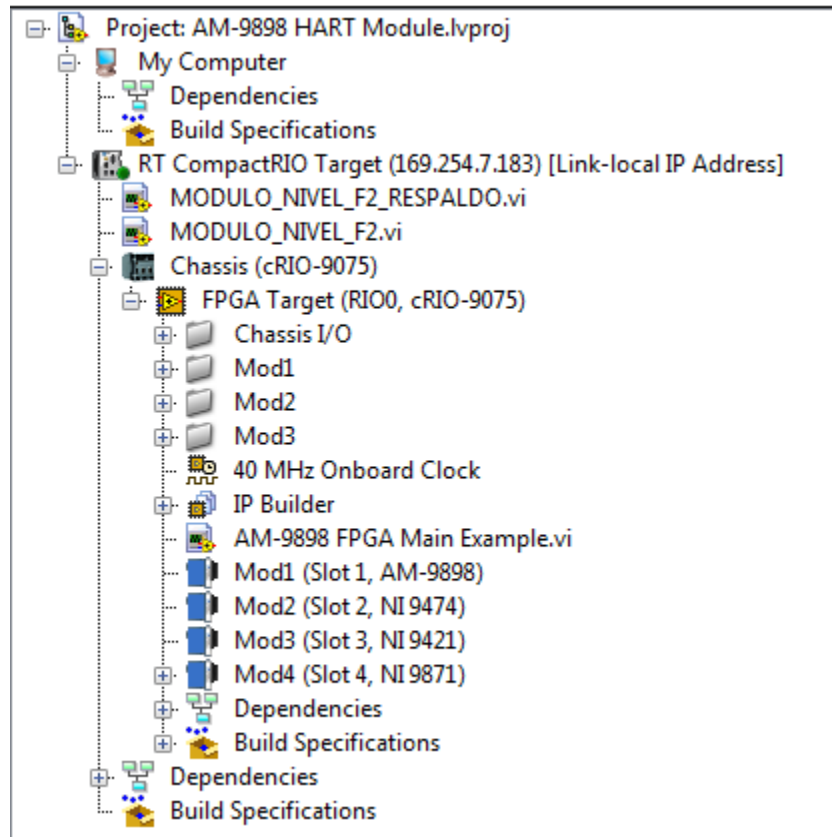


FIGURA 4-22. ÁRBOL DE JERARQUÍA DE LA APLICACIÓN GENERAL

El panel frontal se muestra en la Figura 4-23, el cual está compuesto por los siguientes elementos:

- Región Amarilla: Escanea el canal seleccionado la cantidad de veces deseadas, en busca de sensores conectados en modo multipunto y extrae su dirección.
- Región Azul: Se ingresan las Direcciones en el orden que se desee y retorna la medida enviada por el sensor, además de determinar el tiempo total, iteraciones y Frecuencia en que se ejecutan los bucles para la lectura HART.

- Región Verde: Indicadores de los sensores AUTONICS. Debido a que la salida de estos sensores es completamente digital, se conectan a las entradas digitales del cRIO y se colocan dos indicadores únicamente.
- Región Morada: Controles de apertura y cierre de las Electroválvulas y encendido del variador
- Región Naranja: Indicadores de los valores medidos por los sensores; hacen referencia al nivel de cada tanque

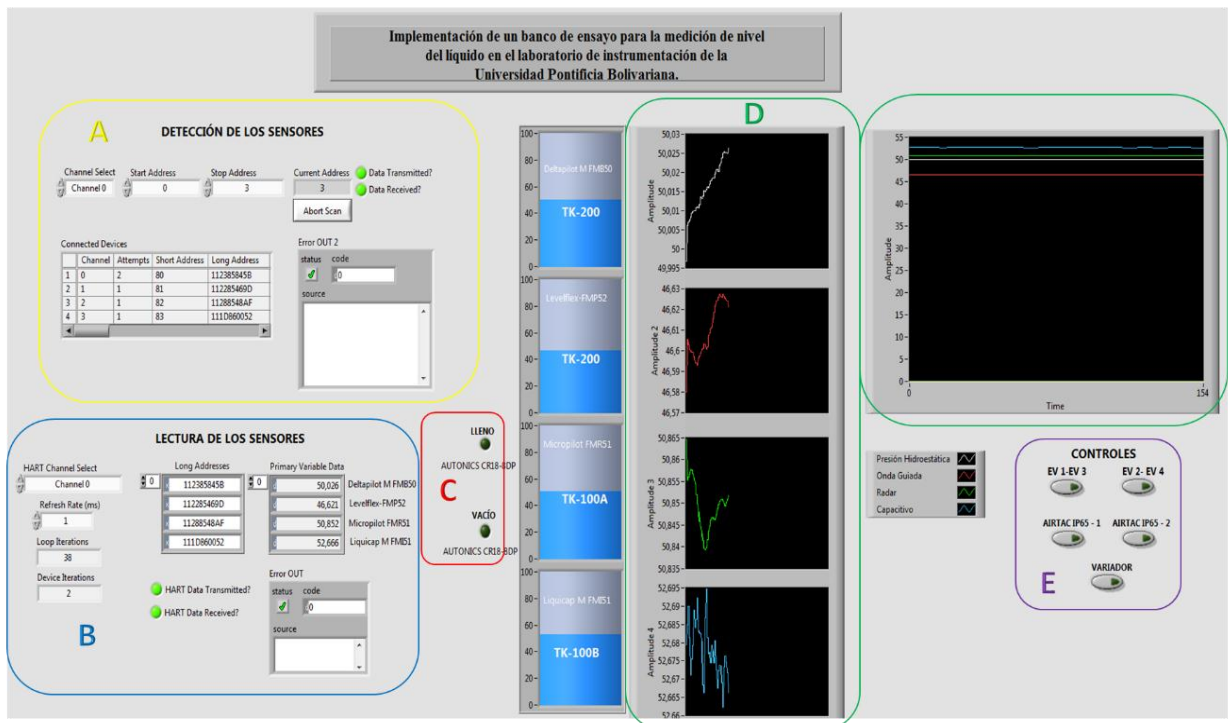


FIGURA 4-23. INTERFAZ GRÁFICA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Finalmente, el diagrama de bloques se muestra en la Figura 4-24 (ver anexo C). Con esto se soluciona completamente el problema de la lectura con protocolo HART multipunto de los sensores y su integración con las electroválvulas y los demás sensores presentes. Por tal motivo, en el siguiente capítulo se mostrarán los diversos resultados de llenado y vaciado de los tanques, así como una comparación entre lo que los sensores muestran en pantalla y lo obtenido en LabVIEW.

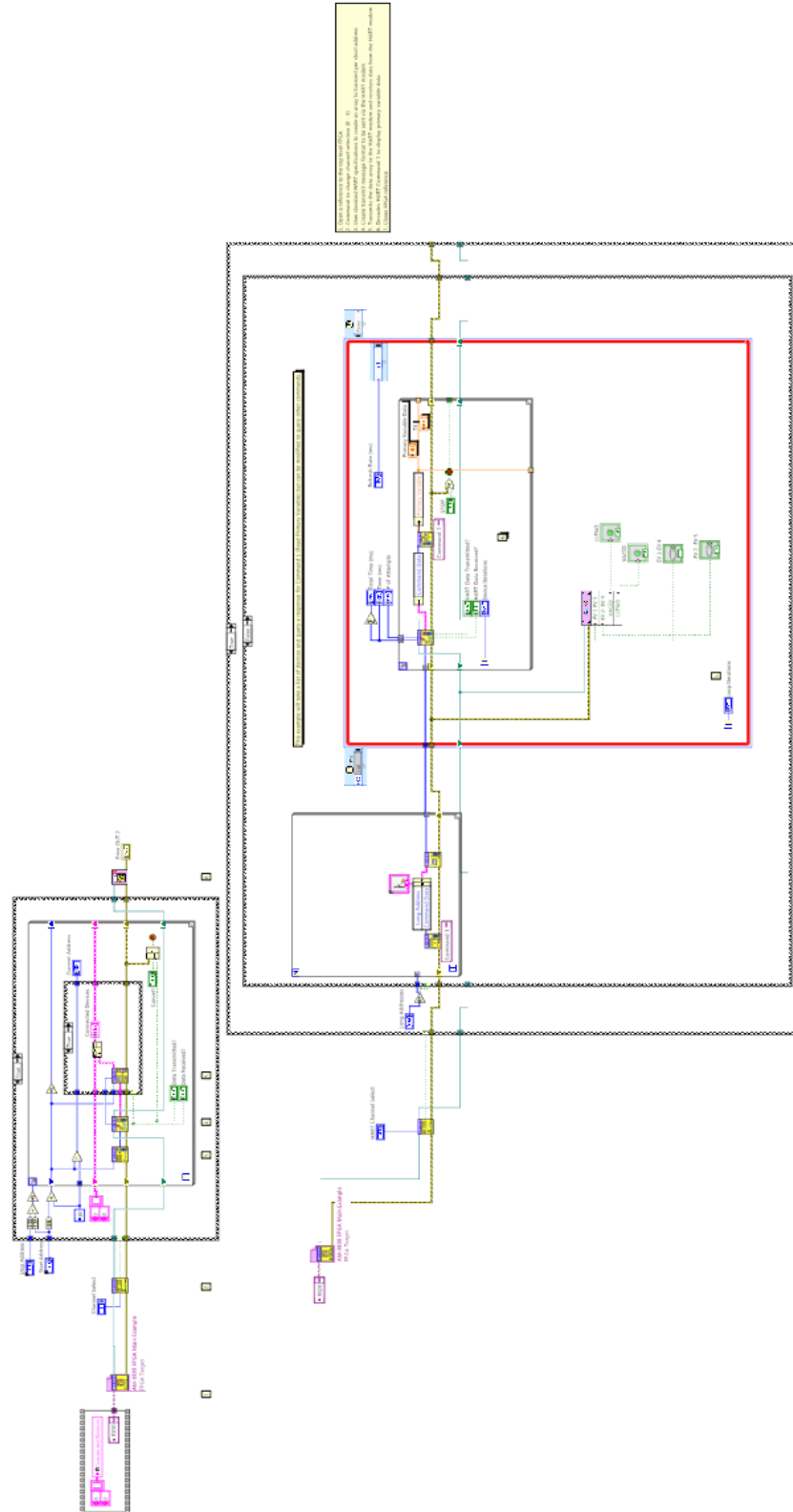


FIGURA 4-24. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA INTERFAZ GRÁFICA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

5 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Una vez construida toda la aplicación junto con su interfaz gráfica, se procede a realizar ciertas pruebas de funcionamiento para verificar la concordancia entre las lecturas en pantalla de cada sensor y lo obtenido en LabVIEW.

5.1 PRUEBA No 1: TANQUE TK-200

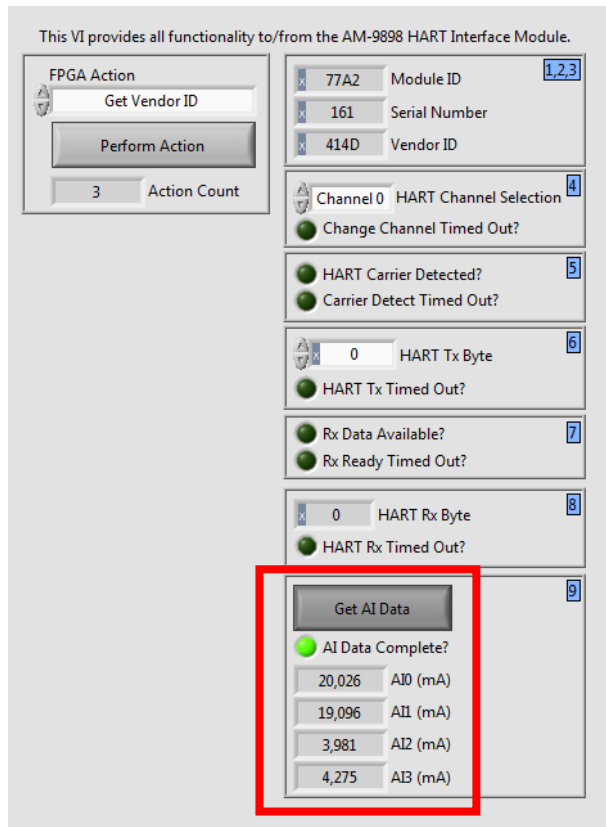


FIGURA 5-1. LECTURA DE LA INTERFAZ GRÁFICA PARA EL TANQUE TK200 LLENO

Tal como lo muestra la Figura 5-1, en los canales AI0 y AI1 se leen valores alrededor de los 20 mA, indicando que el TK-200 se encuentra en su nivel máximo. Por otro lado, los canales AI2 y AI3, muestran valores cercanos a 4 mA, indicando que los tanques TK-100A y TK-100B respectivamente se encuentran vacíos.

El indicador en pantalla del sensor Deltapilot M FMB50 hace evidente que el tanque TK-200 se encuentra en su nivel máximo, el cual corresponde a una presión de 1,143 psi (Figura 5-2). Además, la Figura 5-3 el sensor Levelex-FMP52 corrobora la lectura ya que muestra que el TK-200 se encuentra al 93.69 % de su

capacidad; este valor es cercano e inferior en un 6,31 % a los 20 mA y es coherente con la lectura de la interfaz (19.096 mA).



FIGURA 5-2. LECTURA DEL SENSOR DELTAPILOT M FMB50



FIGURA 5-3. LECTURA DEL SENSOR LEVELFLEX-FMP52



FIGURA 5-4. LECTURA DEL SENSOR MICROPILOT FMR51

Finalmente, el sensor Micropilot FMR51 indica que el TK-100A se encuentra vacío (0 % de su capacidad), tal como lo muestra la Figura 5-4. Además, la Figura 5-5 muestra una lectura similar efectuada por el sensor Liquicap M FM151. Con esto se comprueba que el módulo AM-9898 se configuró correctamente.



FIGURA 5-5. LECTURA DEL SENSOR LIQUICAP M FM151

5.2 PRUEBA No 2: TANQUE TK-100A

Tal como lo muestra la Figura 5-6, en los canales AI0 y AI1 se leen valores cercanos a 4 mA, indicando que el TK-200 se encuentra en su nivel mínimo. Los tanques TK 100A y TK-100B están en su máximo nivel y sin embargo dan lecturas menores a los 20 mA. Para estas pruebas donde sólo se pretende leer los sensores no es un inconveniente, pero estos valores posteriormente fueron ajustados para que correspondan a los 20 mA. Resultados como estos son esperados, debido a que el nivel de máxima capacidad del tanque no necesariamente corresponde al que se ha optado por establecer como máximo nivel.

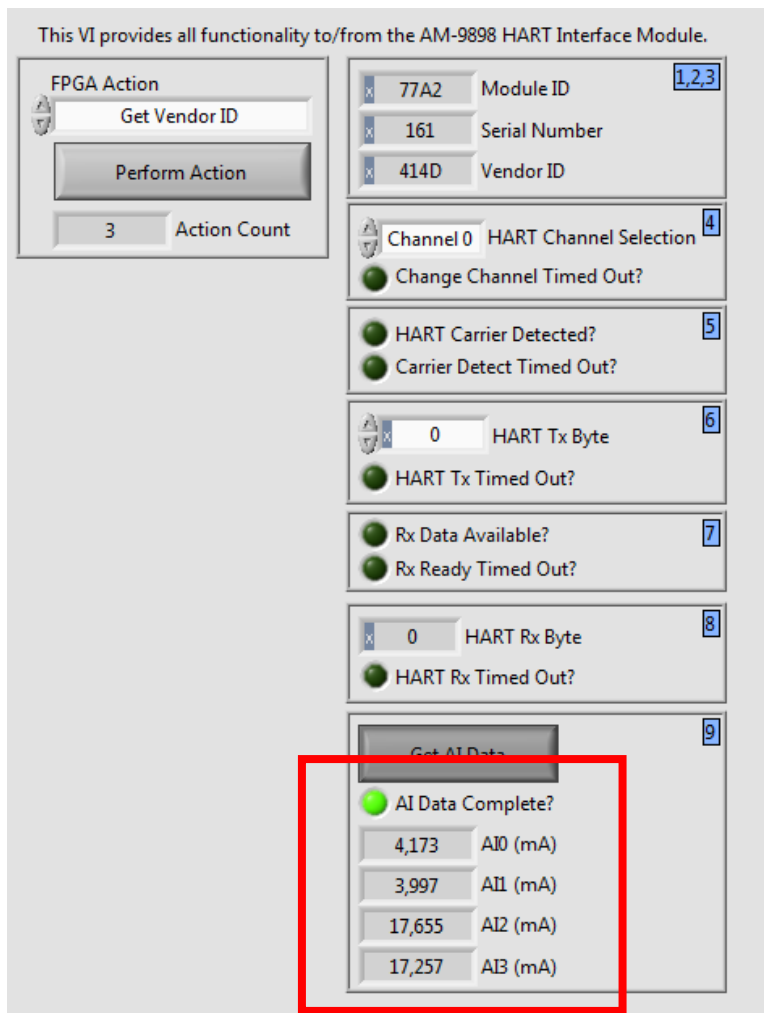


FIGURA 5-6. LECTURA DE LA INTERFAZ GRÁFICA PARA EL TANQUE TK200 VACÍO

El indicador gráfico del sensor Deltapilot hace evidente que el tanque TK-200 se encuentra en su nivel mínimo, el cual corresponde a una presión de 0,013 psi (Figura 5-7). Además, la Figura 5-8 corrobora dicha información, ya que muestra 0% como el nivel medido para el sensor Levelflex.

Por otro lado, el sensor Micropilot FMR51 indica que el TK-100A se encuentra en el 82,9% de su capacidad y es por esto que el valor leído fue cercano a 19 mA (Figura 5-9). Por lo tanto, el sensor si está calibrado, pero debe ser ajustado para que tome este nivel como el máximo. Finalmente, el sensor Liquicap en la Figura

5-10 muestra la corriente directamente, la cual corresponde a un valor muy cercano a lectura de la interfaz (17,257 mA).



FIGURA 5-7. LECTURA DEL SENSOR DELTAPILOT M FMB50



FIGURA 5-8. LECTURA DEL SENSOR LEVELFLEX-FMP52



FIGURA 5-9. LECTURA DEL SENSOR MICROPILOT FMR51



FIGURA 5-10. LECTURA DEL SENSOR LIQUIDCAP M FM151

5.3 PRUEBA No 3: TANQUES TK200, TK100A Y TK100B AL 50%

Para esta prueba, los canales AI0 y AI1 leen valores alrededor de los 10,5 y 11,5 mA (Figura 5-11), indicando que el TK-200 se encuentra en un nivel cercano a la mitad de su capacidad (12 mA idealmente). En adición, los canales AI2 y AI3, con valores cercanos a los 8 mA, indican que los TK-100A y TK-100B se encuentran en el 25 % de su capacidad (8 mA idealmente). Estas medidas son las esperadas, puesto que los dos últimos tanques se encuentran en paralelo y la suma de sus dos niveles debe dar por resultado el 50 % restante del TK-200.

Por otra parte, el indicador gráfico del sensor Deltapilot (Figura 5-12) hace evidente que el tanque TK-200 se encuentra en un nivel cercano a la mitad de su capacidad y que corresponde a una presión de 0,626 psi. Esta medida se verifica con la lectura del sensor Levelflex (Figura 5-13), el cual muestra que el TK-200 se encuentra en el 40.81 % de su capacidad.

Finalmente, el sensor Micropilot FMR51 (Figura 5-14) indica que el TK-100A se encuentra en un 21,45 % de su capacidad, y el sensor Liquicap (Figura 5-15) –el cual muestra el valor de la corriente directamente– presenta un error despreciable frente a la lectura de la interfaz (8,269 mA).

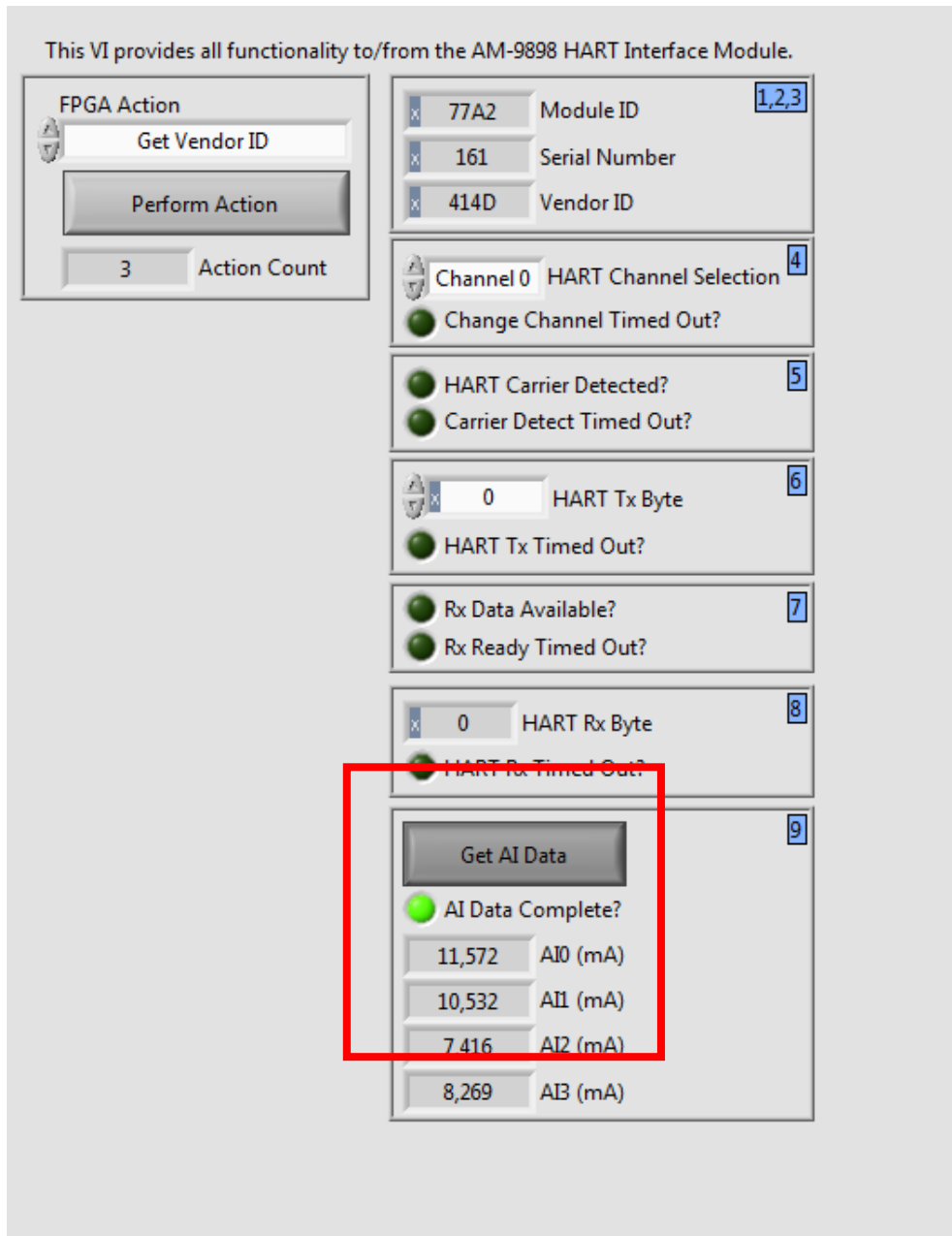


FIGURA 5-11. LECTURA DE LA INTERFAZ GRÁFICA DESARROLLADA



FIGURA 5-12. LECTURA DEL SENSOR DELTAPILOT



FIGURA 5-13. LECTURA DEL SENSOR LEVELFLEX



FIGURA 5-14. LECTURA DEL SENSOR MICROPILOT



FIGURA 5-15. LECTURA DEL SENSOR LIQUIDCAP

5.4 PRUEBA NO 4: SENSORES CONECTADOS EN BUS HART MULTIPUNTO

Para completar la comunicación con los sensores de nivel y aprovechar todas las capacidades que el protocolo HART ofrece, estos se conectan a un solo canal del módulo AM-9898 en configuración multipunto, tal como se muestra en la Figura 5-16 [14]. Esta opción permite conectar en paralelo hasta 8 sensores distintos, por la capacidad del cRIO aumentaría de 4 mediciones a 32.

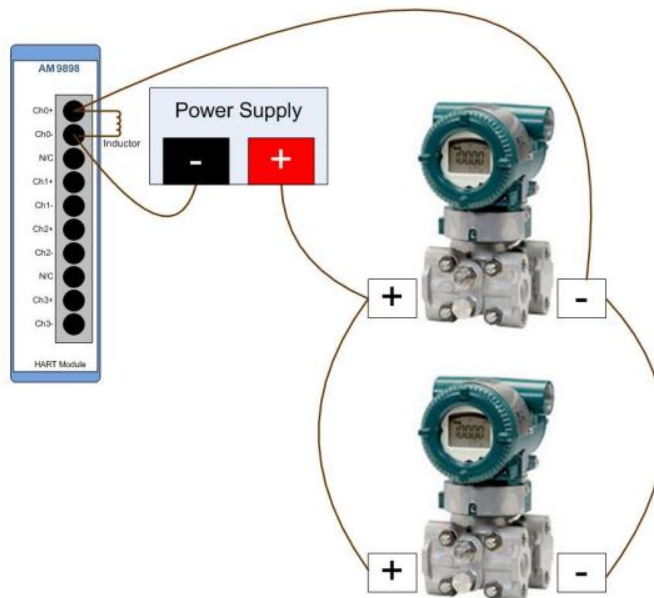


FIGURA 5-16. CONEXIÓN MULTIPUNTO DE LOS SENSORES DE NIVEL [14]

Cabe resaltar la importancia del inductor de 100mH conectado en paralelo con el canal, con el fin de protegerlo ante una sobrecorriente ya que se suman las salidas de los cuatro sensores en un solo nodo.

Tal como se mencionó en el capítulo anterior, primero se debe ejecutar la aplicación de detección de los sensores para identificar sus direcciones. Luego se procede a leer la variable principal, la cual se muestra en la Figura 5-17. Esta medición se corrobora con lo que muestra cada sensor en pantalla (Figura 5-18) notándose un error inferior al 0.5%.

d	94,952	Deltapilot M FMB50
d	94,754	Levelflex-FMP52
d	0,008	Micropilot FMR51
d	1,714	Liquicap M FMI51

FIGURA 5-17. LECTURA MULTIPUNTO DE LOS CUATRO SENSORES



FIGURA 5-18. LECTURA EN PANTALLA DE LOS SENSORES EN CONEXIÓN MULTIPUNTO

En una segunda prueba se trasladó todo el contenido del tanque TK200 a los tanques TK100A y TK100B, haciendo uso de las electroválvulas desde la interfaz gráfica. Las Figura 5-19 y Figura 5-20 muestran los resultados, los cuales son verificados por la lectura en pantalla de cada sensor (Figura 5-21). Además, se aprecia que los indicadores de los sensores capacitivos responden ante los cambios de nivel.

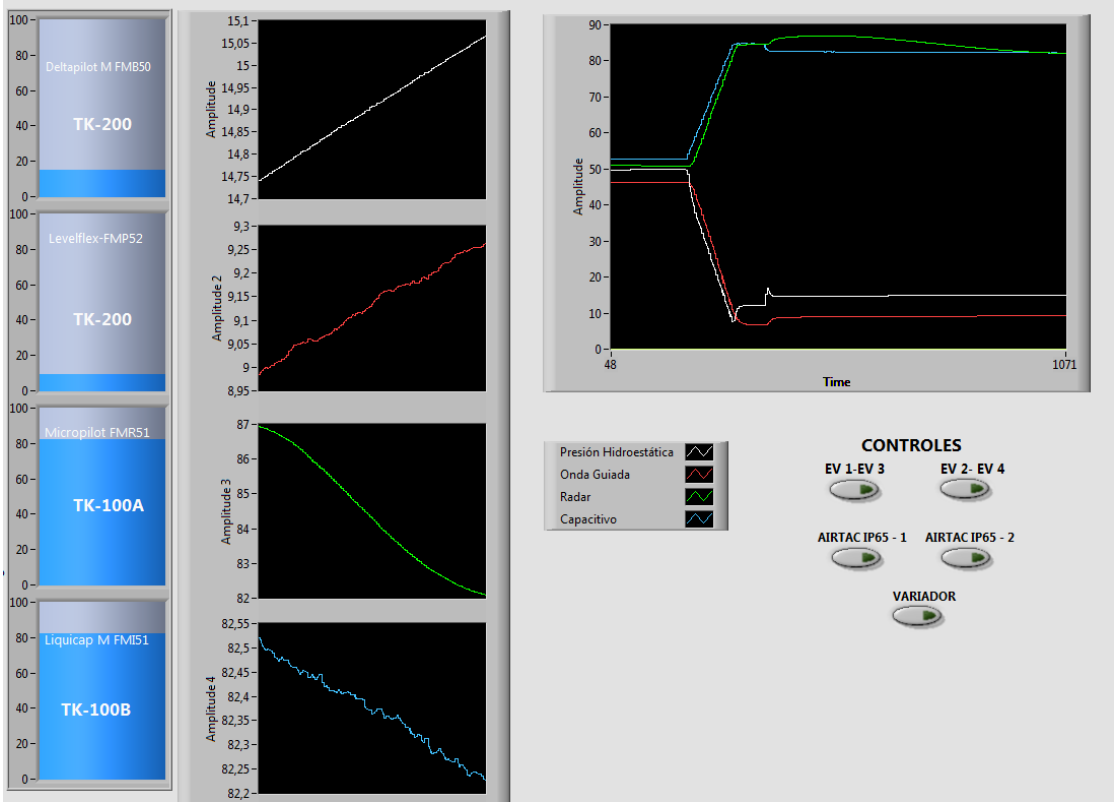


FIGURA 5-19. RESULTADOS DEL PANEL FRONTAL PARA LA SEGUNDA PRUEBA

d	15,089	Deltapilot M FMB50
d	9,289	Levelflex-FMP52
d	82,046	Micropilot FMR51
d	82,209	Liquicap M FMI51

FIGURA 5-20. LECTURA DE LOS SENSORES DESDE LA INTERFAZ GRÁFICA



FIGURA 5-21. LECTURA DE LOS SENSORES DESDE SU PANTALLA

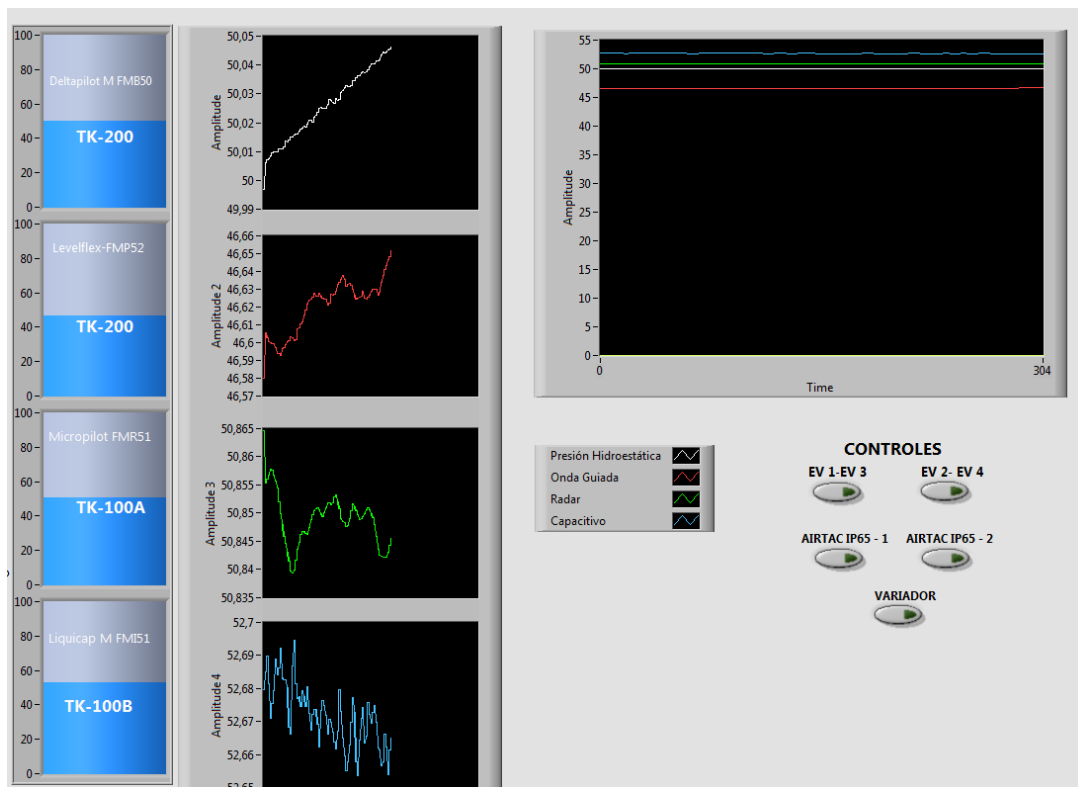


FIGURA 5-22. RESULTADOS DEL PANEL FRONTAL PARA LA TERCERA PRUEBA

Por último, las Figura 5-22, Figura 5-23 y Figura 5-24 muestran una situación similar pero considerando que todo el contenido del tanque TK200 se transfirió a los tanque TK100A y TK100B de manra equitativa. Nuevamente los datos que arroja la interfaz gráfica son verificados mediante la lectura en pantalla de cada sensor. Finalmente, los indicadores de los sensores capacitivos muestran que el tanque se encuentra lleno.

d	50,038	Deltapilot M FMB50
d	46,629	Levelflex-FMP52
d	50,849	Micropilot FMR51
d	52,674	Liquicap M FMI51

FIGURA 5-23. LECTURA DE LOS SENSORES DESDE LA INTERFAZ GRÁFICA



FIGURA 5-24. LECTURA DE LOS SENSORES DESDE SU PANTALLA

5.5 PRUEBA NO 5: TANQUES CON TURBULENCIA

Como última prueba se introdujo turbulencia en todos los tanques mediante las válvulas AIRTACIP65 -1 y AIRTACIP65-2, las cuales introducen una corriente de aire. Los tanques fueron llenados hasta la mitad de su capacidad, y los datos se capturaron haciendo uso de la interfaz gráfica. Cabe resaltar que el introducir turbulencia en el sistema pone a prueba el desempeño y robustez de los sensores, ya que deben eliminar o filtrar falsas mediciones o lecturas.

La Figura 5-25 presenta los resultados desde el panel frontal de la interfaz gráfica de adquisición de datos. Ésta muestra que el sensor capacitivo Liquidcap es el más sensible a la turbulencia, ya que su nivel cambia dos puntos porcentuales.

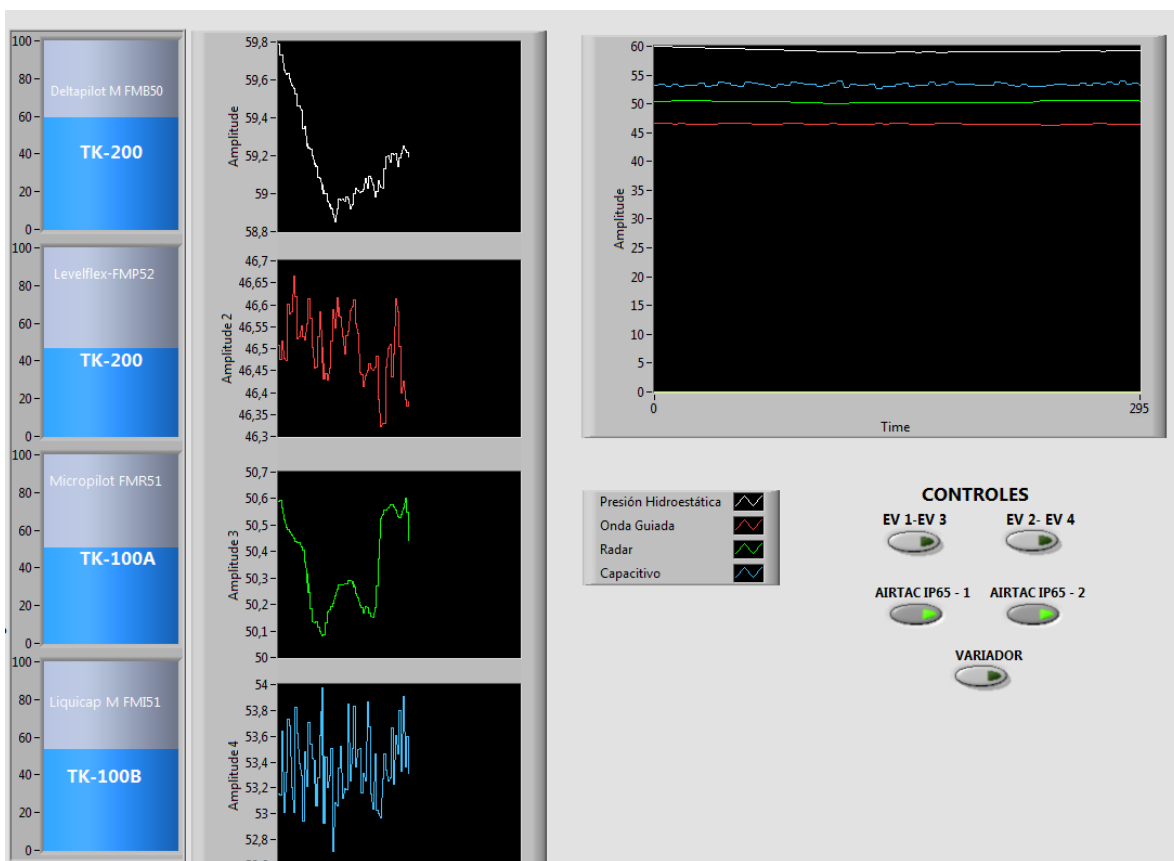


FIGURA 5-25: RESULTADOS DEL PANEL FRONTAL EN PRESENCIA DE TURBULENCIA

6 PRESTACIÓN DE SERVICIOS

Después de llevar a cabo el montaje del módulo, obtener la lectura de los sensores por medio de un bus HART y desarrollar una HMI básica, se diseñó una guía de trabajo (ver Anexo D) como material de apoyo a asignaturas de procesos de las facultades de ingeniería Industrial, Mecánica y Electrónica de la UPB.

Esta guía de trabajo permite afianzar conocimientos tales como:

- Conocer las diferentes tecnologías para medición de nivel de líquidos.
- Entender el funcionamiento de los elementos que componen el modulo.
- Interactuar con la HMI de tal manera que controle los actuadores presentes y visualice los valores de nivel obtenidos de manera gráfica y numérica.
- Hacer comparaciones entre las gráficas de tal manera que se calcule la histéresis y repetibilidad del proceso.

Este acompañamiento se hizo a estudiantes de ingeniería mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana como lo vemos en la figura 6-1.



FIGURA 6-1: ACOMPAÑAMIENTO A ESTUDIANTES DE ING. MECÁNICA

RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

En miras del mejoramiento del módulo y la ampliación de sus funciones se proponen las siguientes recomendaciones para trabajos futuros:

- El control del variador de tensión y frecuencia que alimenta la motobomba es actualmente manual. Este dispositivo puede ser controlado desde la interfaz gráfica de LabVIEW si se realiza una comunicación serial. Para este propósito, se dispone del módulo NI 9071, de modo tal que es necesario diseñar las correctas conexiones desde el variador hacia el módulo mediante el estándar de comunicaciones en bus de la capa física del Modelo OSI RS485 (EIA-485).
- En este proyecto se desarrolló una interfaz gráfica que incluye todas las funciones para leer los sensores y controlar las electroválvulas. No obstante, con miras a proporcionar elementos adecuados para las prácticas de laboratorio –en especial para la Especialización en control e instrumentación industrial– se recomienda incluir en la aplicación elementos aclaratorios y pedagógicos que permitan al estudiante aprovechar al máximo los recursos. Además, se recomienda realizar programas más robustos y eficaces teniendo presente que, como es objetivo de todo buen programador reusar y aprovechar al máximo los algoritmos a implementar, se deben evitar procesos y redundantes.
- Como el Sistema de Control es Centralizado se recomienda mantener una copia de seguridad de los archivos. Este servicio puede realizarse a través de la computación en la nube. Hay múltiples servidores de confianza hoy día, sin embargo se aconseja revisar los servicios que ofrece National Instruments para compilar, programar y guardar información del sistema en la nube.
- La conexión actual de las tuberías hacen que dos de los tres tanques estén en paralelo. Una reconfiguración del sistema podría permitir que los tres tanques se trabajen individualmente y su interacción puede ofrecer una amplia gama de posibilidades y experiencias.
- Además de medir el nivel de un solo líquido en particular, este sistema puede ser adecuado a través de la integración de más dispositivos que generen alteraciones a las propiedades físicas y químicas, para simular procesos comunes en la industria como lo son la dosificación de productos químicos, homogeneizar mezclas y separación de productos por gravedad específica entre otros.

CONCLUSIONES

Como resultado de este proyecto se logró la implementación de un módulo de medición de nivel de líquidos basado en un diseño conceptual desarrollado en la fase 1 [1]. El módulo incluye cuatro sensores de nivel de distinto tipo, los cuales hacen uso del protocolo HART para su comunicación. Además, se diseñó un tablero de control para realizar todas las interconexiones eléctricas entre los elementos de potencia –motobomba y contactos principales– y el módulo de comunicaciones y adquisición de datos. Éste último corresponde al sistema en tiempo Compact-RIO, cuya principal característica es su alta velocidad de operación gracias a su implementación en una FPGA.

Teniendo en cuenta lo anterior es posible formular las siguientes conclusiones y observaciones:

- La conexión multipunto de los sensores permitió expandir la capacidad del sistema al usar un solo canal de entrada para todos los dispositivos.
- La conexión Ethernet del módulo Compact-RIO es fundamental para alcanzar altas velocidades de comunicación y transmisión de datos, y así poder leer todos los sensores en tiempo real. Además, para expandir aún más el sistema se puede hacer uso de un router de alta velocidad, y trabajar con varios Chassis al mismo tiempo.
- La interventoría realizada al proceso de fabricación de los tanques de acero y sus tuberías mostró que el diseño propuesto en la fase I fue óptimo, de acuerdo a las necesidades del laboratorio de instrumentación.
- Como producto final del montaje del módulo se desarrolló una guía de laboratorio preliminar, la cual se apoya en la interfaz gráfica desarrollada. Esta guía puede ser usada tanto en las asignaturas de pregrado referentes al control e instrumentación, como en la especialización en control e instrumentación industrial.

REFERENCIAS

- [1] D. Rueda y L. Tavera, Especificación y Diseño de un Banco de Ensayo para la Medición de Nivel de Líquidos en el Laboratorio de Instrumentación de la Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, 2014.
- [2] Ministerio de Minas y Energías, *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE*, 2013.
- [3] A. Company, «ABB download center,» [En línea]. Available: <https://library.e.abb.com>. [Último acceso: 8 Octubre 2015].
- [4] J. C. Martín y M. P. García, Automatismos industriales, Madrid: Editex.
- [5] Schneider, «Schneider-Electric,» [En línea]. Available: <http://www.schneider-electric.cl/documents/local/catalogos/ci/cap1.pdf>. [Último acceso: 8 Octubre 2015].
- [6] Siemens AG, «Miniature Circuit Breakers,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.siemens.fi/pool/products/>. [Último acceso: 15 10 2015].
- [7] «octopart,» [En línea]. Available: <http://datasheet.octopart.com/3RF2120-1AA02-Siemens-datasheet-14369105.pdf>. [Último acceso: 8 Octubre 2015].
- [8] «electronica-electronics,» [En línea]. Available: http://electronica-electronics.com/Circuitos/SSR_-_Relay_de_estado_solido.html. [Último acceso: 8 Octubre 2015].
- [9] National Instruments, «Productos y servicios de NI,» [En línea]. Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/207473>. [Último acceso: 8 Octubre 2015].
- [10] Siemens, «MicroMaster 440,» 10 2006. [En línea]. Available: <https://www.inverterdrive.com/file/siemens-micromaster-440-manual>. [Último acceso: 08 Octubre 2015].
- [11] Promelsa, «Catálogo de Productos,» 2014. [En línea]. Available: http://www.promelsa.com.pe/productos_list.asp. [Último acceso: 08 Octubre 2015].
- [12] National Instruments, «Configurador CompactRIO,» 2016. [En línea]. Available: <http://ohm.ni.com/advisors/crio/pages/common/intro.xhtml>. [Último acceso: 13 Enero 2016].
- [13] National Instruments, «National Instruments Servicios y Soporte,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.ni.com/getting-started/set-up-hardware/compactrio/esa/first-use>. [Último acceso: 10 Noviembre 2015].
- [14] National Instruments, «AM9898,» 16 Abril 2015. [En línea]. Available: http://www.ni.com/pdf/manuals/HART_AM9898_UserManual.pdf. [Último acceso: 4 Diciembre 2015].

ANEXO A

PLANO DE INTERCONEXIÓN ELÉCTRICA
(VER CD)

ANEXO B

HOJAS DE DATOS DE LOS SENSORES
(VER CD)

ANEXO C

SOFTWARE DESARROLLADO EN LABVIEW
(VER CD)

ANEXO D

GUÍA PRELIMAR
(VER CD)

ANEXO E

GUÍA SOBRE LA PROGRAMACIÓN GRÁFICA DE LA HMI EN LABVIEW
(VER CD)