UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR
DECANATO DE ESTUDIOS PROFESIONALES
COORDINACIÓN DE INGENIERÍA QUÍMICA

DISEÑO, CONFIGURACIÓN Y PRUEBA DE UN SISTEMA DE CONTROL DE PROCESOS YOKOGAWA STARDOM DE DEMOSTRACIÓN

Por:

Andrés Mauricio Peña Peña

INFORME FINAL CURSO DE COOPERACIÓN TÉCNICA
Presentado ante la Ilustre Universidad Simón Bolívar
Como requisito para optar el título de
Ingeniero Químico

Sartenejas, Febrero de 2017

UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR
DECANATO DE ESTUDIOS PROFESIONALES
COORDINACIÓN DE INGENIERÍA QUÍMICA

DISEÑO, CONFIGURACIÓN Y PRUEBA DE UN SISTEMA DE CONTROL DE PROCESOS YOKOGAWA STARDOM DE DEMOSTRACIÓN

Por:

Andrés Mauricio Peña Peña

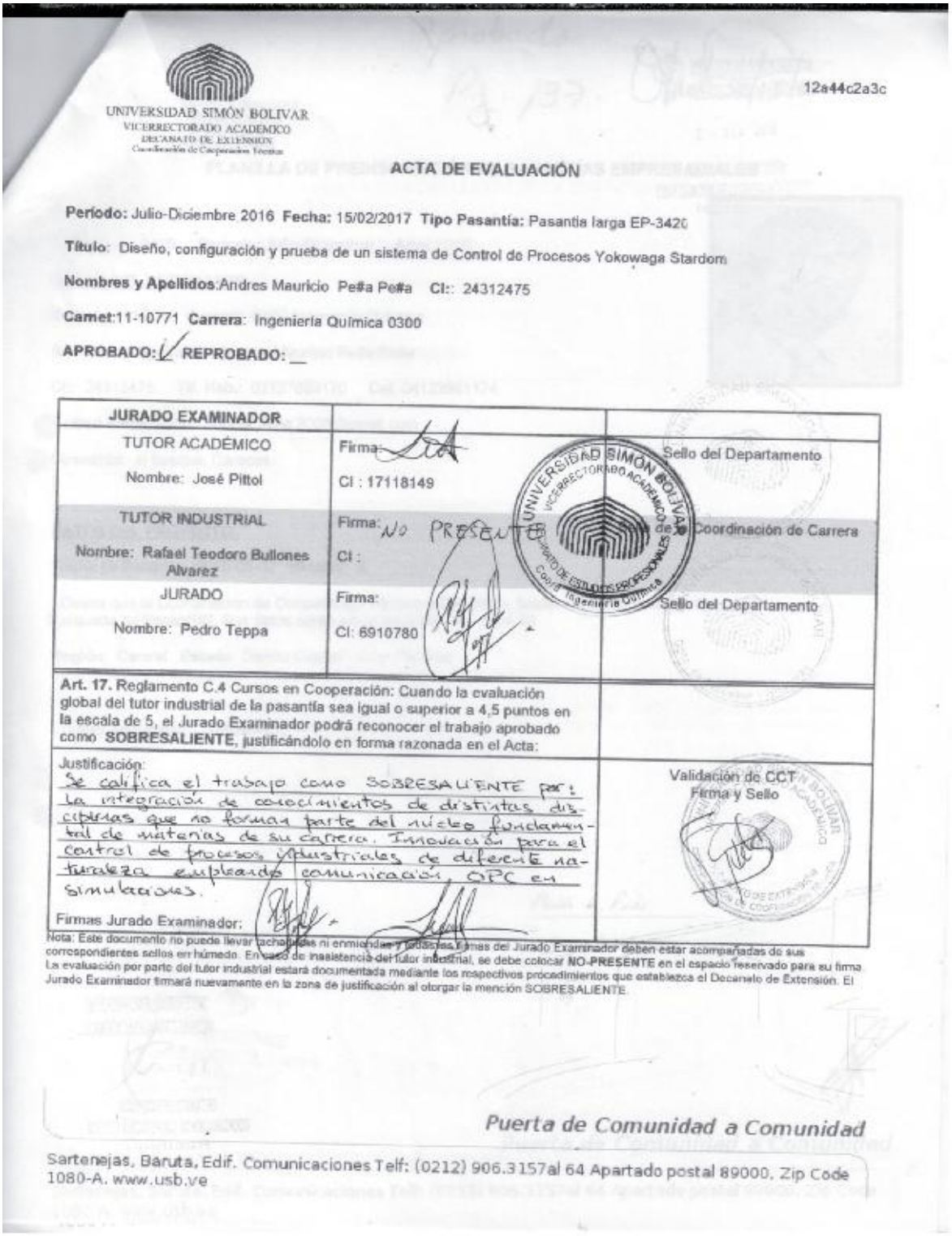
Realizado con la asesoría de:

Tutor académico: Prof. Jose Pittol
Tutor industrial: Ing. Rafael Bullones

INFORME FINAL CURSO DE COOPERACIÓN TÉCNICA
Presentado ante la Ilustre Universidad Simón Bolívar
Como requisito para optar el título de
Ingeniero Químico

Sartenejas, Febrero de 2017

ACTA DE EVALUACIÓN



UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR
VICERRECTORADO ACADÉMICO
DECANATO DE EXTENSIÓN
Coordinación de Cooperación Técnica

12a44c2a3c

ACTA DE EVALUACIÓN

Período: Julio-Diciembre 2016 **Fecha:** 15/02/2017 **Tipo Pasantía:** Pasantía larga EP-3420

Título: Diseño, configuración y prueba de un sistema de Control de Procesos Yokowaga Stardom

Nombres y Apellidos:Andres Mauricio Pe#a Pe#a **CI:**: 24312475

Carnet:11-10771 **Carrera**: Ingeniería Química 0300

APROBADO: ✓ **REPROBADO:** __

JURADO EXAMINADOR		
TUTOR ACADÉMICO Nombre: José Pittol	Firma: CI : 17118149	Sello del Departamento
TUTOR INDUSTRIAL Nombre: Rafael Teodoro Bullones Alvarez	Firma: NO PRESENTE CI :	Coordinación de Carrera
JURADO Nombre: Pedro Teppa	Firma: CI: 6910780	Sello del Departamento

Art. 17. Reglamento C.4 Cursos en Cooperación: Cuando la evaluación global del tutor industrial de la pasantía sea igual o superior a 4,5 puntos en la escala de 5, el Jurado Examinador podrá reconocer el trabajo aprobado como **SOBRESALIENTE**, justificándolo en forma razonada en el Acta:

Justificación:
Se califica el trabajo como SOBRESALIENTE por: la integración de conocimientos de distintas disciplinas que no forman parte del núcleo fundamental de materias de su carrera. Innovación para el control de procesos industriales de diferente naturaleza empleando comunicación OPC en simulaciones.

Validación de CCT
Firma y Sello

Firmas Jurado Examinador:

Nota: Este documento no puede llevar tachaduras ni enmiendas y todas las firmas del Jurado Examinador deben estar acompañadas de sus correspondientes sellos en húmedo. En caso de inasistencia del tutor industrial, se debe colocar **NO-PRESENTE** en el espacio reservado para su firma. La evaluación por parte del tutor industrial estará documentada mediante los respectivos procedimientos que establezca el Decanato de Extensión. El Jurado Examinador firmará nuevamente en la zona de justificación al otorgar la mención SOBRESALIENTE.

Puerta de Comunidad a Comunidad

Sartenejas, Baruta, Edif. Comunicaciones Telf: (0212) 906.3157al 64 Apartado postal 89000, Zip Code 1080-A. www.usb.ve

UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR
Decanato de Estudios Profesionales
Coordinación de Ingeniería Química

DISEÑO, CONFIGURACIÓN Y PRUEBA DE UN SISTEMA DE CONTROL DE PROCESOS YOKOGAWA STARDOM DE DEMOSTRACIÓN

INFORME FINAL CURSO DE COOPERACIÓN TÉCNICA
Presentado Por Andrés Mauricio Peña Peña Carnet: 11-10771
Realizado con la asesoría de Prof. José Pittol e Ing. Rafael Bullones

RESUMEN

Este proyecto tiene como objetivo principal el diseño, configuración y prueba de un sistema de control de procesos Stardom de la compañía Yokogawa para demostraciones. Para lograr este objetivo se realizaron configuraciones de distintos instrumentos, se realizaron modelos de procesos típicos conocidos y se planificaron y configuraron estrategias de control para los procesos modelados. El modelaje de procesos se realizó en el programa Matlab y las estrategias de control se configuraron en el Stardom mediante el programa Logic Designer. Los instrumentos se utilizaron para hacer las pruebas de la integración con el Stardom. Se realizó la configuración de instrumentos de presión diferencial, de pH y de temperatura inalámbrico. Finalmente se utilizó el sistema InfoWell del Stardom para configurar una interfaz hombre-máquina (HMI) mostrando un despliegue gráfico de las simulaciones del control de los procesos. Las simulaciones y la integración de los instrumentos fueron utilizadas para la etapa de prueba del Stardom como parte de un sistema de demostraciones.

Palabras clase: Stardom, Matlab, InfoWell.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, por su admirable esfuerzo y dedicación, gracias por hacerme la persona que soy. Porque siempre has estado en todo momento para mí, me has apoyado en todas las decisiones y tu gran esfuerzo en siempre darme lo mejor, tus consejos, enseñanzas, cariño y amor, me hacen sentir muy afortunado de ser tu hijo.

A mi amada familia, tíos y primos de todas generaciones, los cuales siempre me hacen sentir como en casa en donde me reciben, me brindan mucho amor y son una parte importante de mi vida. Dondequiera que estén, siempre los recuerdo y los llevo en mi corazón.

A mi novia, Mariana, por estar siempre a mi lado desde el momento que nos conocimos y siempre apoyarme en todas mis decisiones. Gracias por animarme, ayudarme y siempre estar conmigo en estos últimos años. A toda su familia, por siempre recibirme con una gran amabilidad y apoyo.

A mis amigos de carrera, por todos los buenos momentos y los trasnochos que pasamos estudiando o en algún proyecto y siempre el apoyo que me han dado. En especial a David Delgado, por ser mi compañero de estudio en todas las asignaturas estos últimos años.

A mis compañeros de trabajo, por su apoyo en estos últimos cinco meses y por los ratos divertidos.

A mi tutor académico, José Antonio, por la gran oportunidad de realizar este proyecto de pasantía, por su excelente trato y disposición de ayudar. A mi tutor industrial, Rafael, por su gran apoyo y receptividad y creer en mis capacidades.

Gracias a todos.

ÍNDICE GENERAL

ACTA DE EVALUACIÓN III
RESUMEN IV
AGRADECIMIENTOS V
ÍNDICE GENERAL VI
ÍNDICE DE TABLAS VIII
ÍNDICE DE FIGURAS VIII
LISTA DE ABREVIATURAS XI
INTRODUCCIÓN 1
Antecedentes 1
Alcance y justificación 1
Planteamiento del problema 1
Objetivo general 2
Objetivos específicos 2
CAPÍTULO 1 3
DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA 3
1.1. Historia de la empresa 3
1.2. Visión 4
1.3. Misión 4
1.4. Valores 4
1.5. Política de calidad 5
1.6. Productos 5
1.7. Organización de la empresa 6
CAPÍTULO 2 8
MARCO TEÓRICO 8
2.1. Sistema de supervisión, control y adquisición de datos 8
2.2. Controladores Lógicos Programables (PLCs) 8
2.3. Stardom FCN-RTU Yokogawa 8
2.3.1. Software compatible con el FCN-RTU 10
2.3.1.1. Resource Configurator 11
2.3.1.2. Logic Designer 12
2.3.1.2.1. Unidades de organización de programas (POU) 13
2.3.1.2.2. Tareas 13
2.3.1.3. InfoWell 14
2.3.1.3.1. InfoWell Graphic Portafolio 16
2.3.1.3.2. InfoWell Logging Portafolio 16
2.3.2. Lenguajes de programación 17
2.3.3. Protocolos de comunicación 18
2.3.3.1. Comunicación OPC 19
2.3.3.2. Comunicación Modbus 20
2.3.3.3. Estándar ISA100.11a 21
2.4. Procesos y operaciones unitarias 22
2.4.1. Planta de neutralización 23
2.4.2. Llenado de tanques 24
2.4.3. Intercambiador de calor 25
2.4.4. Reactor Batch 26
2.4.5. Horno 27
CAPÍTULO 3 28
MARCO METODOLÓGICO 28
3.1. Elaboración de planos y lista de materiales 28
3.2. Programación de los equipos 28

3.2.1. Desarrollo de la simulación de procesos 28
3.2.2. Elaboración de las lógicas de control 29
3.2.3. Diseño y configuración de la HMI 30
3.3. Configuración de instrumentos 31
3.3.1. Transmisor de presión diferencial Yokogawa EJX110A 31
3.3.2. Transmisor y analizador de pH y conductividad Thermo Scientific Orion 2100 32
3.3.3. Transmisor de temperatura inalámbrico Yokogawa YTA510 33
CAPÍTULO 4 34
RESULTADOS Y DISCUSIÓN 34
4.1. Lista de materiales y planos 34
4.2. Configuración de los instrumentos 37
4.2.1. Transmisor de presión diferencial Yokogawa EJX110A 37
4.2.2. Transmisor y analizador de pH y conductividad Thermo Scientific Orion 2100 37
4.2.3. Sistema de instrumentación inalámbrico Yokogawa 38
4.3. Integración entre MATLAB y STARDOM 39
4.4. Configuración de lazos de control 42
4.4.1. Planta de neutralización 43
4.4.2. Llenado de tanques 46
4.4.2.1. Arreglo 1 46
4.4.2.2. Arreglo 2 48
4.4.3. Intercambiador de calor 50
4.4.4. Reactor batch 52
4.4.5. Horno 55
4.5. Discusión general de resultados de lazos de control 58
4.6. Integración con el HMI 61
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 63
REFERENCIAS 64
APÉNDICE A 67
MODELAJE MATEMÁTICO DE SISTEMAS DINÁMICOS 67
A.1. Planta de neutralización 68
A.1.1. Modelaje matemático 68
A.1.2. Glosario 68
A.2. Llenado de tanques 69
A.2.1. Modelaje matemático 69
A.2.1.1. Arreglo 1 69
A.2.1.2. Arreglo 2 69
A.2.2. Glosario 69
A.3. Intercambiador de calor 71
A.3.1. Modelaje matemático 71
A.3.2. Glosario 71
A.4. Reactor Batch 74
A.4.1. Modelaje matemático 74
A.4.2. Glosario 74
A.5. Horno 77
A.5.1. Modelaje matemático 77
A.5.2. Glosario 78
APÉNDICE B 67
DIAGRAMAS DE TRANSPORTE Y CONEXIONADO 67
APÉNDICE C 83
ESQUEMAS EN SIMULINK 83
C.1. Esquemas de procesos a lazo abierto 84
C.2. Esquemas de procesos con estrategia de control aplicada 85
C.3. Esquemas de procesos integrados con Stardom vía OPC. 87

APÉNDICE D 90
LÓGICAS DE CONTROL DE LOGIC DESIGNER 90
APÉNDICE E 96
DESPLIEGUES GRÁFICOS EN INFOWELL 96

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1. DESCRIPCIÓN DE TIPOS DE OBJETO DE COMUNICACIÓN MODBUS. 21
TABLA 3.1. ESTRATEGIAS DE CONTROL IMPLEMENTADAS PARA LOS PROCESOS SIMULADOS. 29
TABLA 4.1. LISTA DE MATERIALES. 34
TABLA 4.2. PARÁMETROS DE LOS LAZOS PID EN SIMULINK Y STARDOM 60
TABLA A.1. TABLA DE CONSTANTES DE LA PLANTA DE NEUTRALIZACIÓN. 68
TABLA A.3. TABLA DE CONSTANTES PARA EL ARREGLO DE TANQUES 2. 70
TABLA A.4. TABLA DE CONSTANTES PARA INTERCAMBIADOR DE CALOR. 72
TABLA A.5. TABLA DE CONSTANTES PARA EL REACTOR BATCH. 76
TABLA A.6. TABLA DE CONSTANTES PARA EL HORNO. 79

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1. CONTROLADOR FCN-RTU DE YOKOGAWA 9
FIGURA 2.2. COMPONENTES DEL CONTROLADOR FCN-RTU. 10
FIGURA 2.3. MÉTODO DE CONEXIÓN DE LOS MÓDULOS E/S INTEGRADOS. 11
FIGURA 2.4. VENTANA PRINCIPAL DEL RESOURCE CONFIGURATOR. 12
FIGURA 2.5. VENTANA PRINCIPAL DEL LOGIC DESIGNER. 13
FIGURA 2.6. DIAGRAMA DE FUNCIONES DE INFOWELL. 15
FIGURA 2.7. VENTANA PRINCIPAL DE INFOWELL. 16
FIGURA 2.8. VENTANA PRINCIPAL DEL GRAPHIC TOOL. 17
FIGURA 2.9. VENTANA PRINCIPAL DEL LOGGING PORTAFOLIO 17
FIGURA 2.10. CONEXIÓN SIN TECNOLOGÍA OPC 19
FIGURA 2.11. CONEXIÓN CON TECNOLOGÍA OPC 20
FIGURA 2.12. ARQUITECTURA DE LA COMUNICACIÓN MODBUS TCP/IP. 21
FIGURA 2.13. ARQUITECTURA DE LA ISA100.11A 22
FIGURA 2.14. PLANTA DE NEUTRALIZACIÓN DE ÁCIDO ACÉTICO Y SODA CÁUSTICA. 24
FIGURA 2.15. ARREGLO 1 DE LLENADO DE TANQUES. 24
FIGURA 2.16. ARREGLO 2 DE LLENADO DE TANQUES. 25
FIGURA 2.17. INTERCAMBIADOR DE CALOR MINIATURA. 26
FIGURA 2.18. REACTOR BATCH. 26
FIGURA 2.19. HORNO DE PROCESO. 27
FIGURA 3.1. TRANSMISOR DE PRESIÓN DIFECENCIAL EJX110A. 32

FIGURA 3.2. TRANSMISOR Y ANALIZADOR DE PH/CONDUCTIVIDAD ORION 2100. 33
FIGURA 3.3. SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN INALÁMBRICO 34
FIGURA 4.1. CONEXIÓN INALÁMBRICA ENTRE LOS INSTRUMENTOS DEL SISTEMA DE CONEXIÓN INALÁMBRICO YOKOGAWA. 38
FIGURA 4.2. VENTANA PRINCIPAL DEL TOOLBOX OPC DATA ACCESS EXPLORER. 40
FIGURA 4.3. BLOQUES DE INTEGRACIÓN OPC DISPONIBLES EN SIMULINK 40
FIGURA 4.4. DECLARACIÓN DE VARIABLE OPC EN LOGIC DESIGNER. 40
FIGURA 4.5. VISUALIZACIÓN DE LAS VARIABLES OPC DESDE SIMULINK. 41
FIGURA 4.6. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE PLANTA DE NEUTRALIZACIÓN. 43
FIGURA 4.10. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL ARREGLO 1 DEL PROCESO DE LLENADO DE TANQUES. 46
FIGURA 4.11. RESPUESTA DE LA ALTURA DEL TANQUE V-1003 DEL PROCESO DE LLENADO DE TANQUES 1. 47
FIGURA 4.12. RESPUESTA DEL VOLTAJE DE LA BOMBA P-1001 DEL PROCESO DE LLENADO DE TANQUES 1. 47
FIGURA 4.13. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL ARREGLO 2 DEL PROCESO DE LLENADO DE TANQUES. 48
FIGURA 4.14. RESPUESTA DE LA ALTURA DE LOS TANQUES V-1003 Y V-1004 DEL PROCESO DE LLENADO DE TANQUES 2. 49
FIGURA 4.15. RESPUESTA DEL VOLTAJE DE LAS BOMBAS P-1001 Y P-1002 DEL PROCESO DE LLENADO DE TANQUES 2. 49
FIGURA 4.16. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR. 50
FIGURA 4.17. RESPUESTA DE LA TEMPERATURA THO DEL PROCESO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR. 51
FIGURA 4.18. RESPUESTA DE LA APERTURA DE LA VÁLVULA DEL PROCESO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR. 51
FIGURA 4.19. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE REACTOR BATCH. 52
FIGURA 4.20. RESPUESTA DE LA TEMPERATURA DEL REACTOR R-1001 DEL PROCESO DE REACTOR BATCH. 53
FIGURA 4.21. RESPUESTA DE LAS CONCENTRACIONES DE A, B Y C DEL PROCESO DE REACTOR BATCH. 53
FIGURA 4.22. RESPUESTA DE LA APERTURA DE LAS VÁLVULAS V-1001 Y V-1002 DEL PROCESO DE REACTOR BATCH. 54
FIGURA 4.23. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE HORNO. 55
FIGURA 4.24. RESPUESTA DE LA TEMPERATURA DE SALIDA DEL CRUDO DEL PROCESO DEL HORNO. 56
FIGURA 4.25. RESPUESTA DE LA APERTURA DE LA VÁLVULA V-1001 DEL PROCESO DEL HORNO. 56
FIGURA 4.26. RESPUESTA DE LA TEMPERATURA DE SALIDA DEL CRUDO DEL PROCESO DEL HORNO. CONTROL PID Y CASCADA CON STARDOM. 57
FIGURA 4.27. RESPUESTA DE LA APERTURA DE LA VÁLVULA V-1001 DEL PROCESO DEL HORNO. CONTROL PID Y CASCADA CON STARDOM 57
FIGURA 4.28. MENÚ DE ACCESO PARA LOS DESPLIEGUES GRÁFICOS EN INFOWELL. 61
FIGURA B.1. DIAGRAMA DE CONEXIONADO DE E/S ANALÓGICAS 81
FIGURA B.2. DIAGRAMA DE CONEXIONADO DE E/S DIGITALES. 82
FIGURA C.1. ESQUEMA A LAZO ABIERTO DE LA PLANTA DE NEUTRALIZACIÓN. 84
FIGURA C.2. ESQUEMA A LAZO ABIERTO DEL LLENADO DE TANQUES 1. 84
FIGURA C.3. ESQUEMA A LAZO ABIERTO DEL LLENADO DE TANQUES 2. 84
FIGURA C.4. ESQUEMA A LAZO ABIERTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR. 85
FIGURA C.5. ESQUEMA A LAZO ABIERTO DEL REACTOR BATCH. 85

FIGURA C.6. ESQUEMA A LAZO ABIERTO DEL HORNO. 85
FIGURA C.7. ESQUEMA A LAZO CERRADO DE LA PLANTA DE NEUTRALIZACIÓN. CONTROL PID EN REDUNDANCIA. 86
FIGURA C.8. ESQUEMA A LAZO CERRADO DEL LLENADO DE TANQUES 1. CONTROL PID. 86
FIGURA C.9. ESQUEMA A LAZO CERRADO DEL LLENADO DE TANQUES 2. CONTROL PID EN REDUNDANCIA. 86
FIGURA C.10. ESQUEMA A LAZO CERRADO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR. CONTROL PID. 86
FIGURA C.11. ESQUEMA A LAZO CERRADO DEL REACTOR BATCH. CONTROL PID SELECTIVO. 87
FIGURA C.12. ESQUEMA A LAZO CERRADO DEL HORNO. CONTROL PID. 87
FIGURA C.13. ESQUEMA DE INTEGRACIÓN OPC DE LA PLANTA DE NEUTRALIZACIÓN. 87
FIGURA C.14. ESQUEMA DE INTEGRACIÓN OPC DEL LLENADO DE TANQUES 1. 88
FIGURA C.15. ESQUEMA DE INTEGRACIÓN OPC DEL LLENADO DE TANQUES 2. 88
FIGURA C.16. ESQUEMA DE INTEGRACIÓN OPC DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR. 88
FIGURA C.17. ESQUEMA DE INTEGRACIÓN OPC DEL REACTOR BATCH. 89
FIGURA C.18. ESQUEMA DE INTEGRACIÓN OPC DEL HORNO. 89
FIGURA C.19. ESQUEMA DE INTEGRACIÓN OPC DEL HORNO EN CASCADA. 89
FIGURA D.1. LÓGICA DE CONTROL DEL PROCESO DE PLANTA DE NEUTRALIZACIÓN PARA LA ESTRATEGIA DE CONTROL PID. 91
FIGURA D.2. LÓGICA DE CONTROL DEL PROCESO DE LLENADO DE TANQUES 1 PARA LA ESTRATEGIA DE CONTROL PID. 91
FIGURA D.3. LÓGICA DE CONTROL DEL PROCESO DE LLENADO DE TANQUES 1 PARA LA ESTRATEGIA DE CONTROL FEED-FORWARD. 92
FIGURA D.4. LÓGICA DE CONTROL DEL PROCESO DE LLENADO DE TANQUES 2 PARA LA ESTRATEGIA DE CONTROL PID EN REDUNDANCIA. 93
FIGURA D.5. LÓGICA DE CONTROL DEL PROCESO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA LA ESTRATEGIA DE CONTROL PID. 93
FIGURA D.6. LÓGICA DE CONTROL DEL PROCESO DE REACTOR BATCH PARA LA ESTRATEGIA DE CONTROL PID SELECTIVO. 93
FIGURA D.7. LÓGICA DE CONTROL DEL PROCESO DE HORNO PARA LA ESTRATEGIA DE CONTROL PID. 94
FIGURA D.8. LÓGICA DE CONTROL DEL PROCESO DE HORNO PARA LA ESTRATEGIA DE CONTROL EN CASCADA. 94
FIGURA D.9. LÓGICA DE ENTRADA ANALÓGICA DE INSTRUMENTOS. 95
FIGURA D.10. LÓGICA DE RECEPCIÓN DE INFORMACIÓN MODBUS DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN INALÁMBRICO. 95
FIGURA E.1. DESPLIEGUE GRÁFICO DEL PROCESO DE PLANTA DE NEUTRALIZACIÓN. 97
FIGURA E.2. DESPLIEGUE GRÁFICO DEL PROCESO LLENADO DE TANQUES 1. 97
FIGURA E.3. DESPLIEGUE GRÁFICO DEL PROCESO LLENADO DE TANQUES 2. 97
FIGURA E.4. DESPLIEGUE GRÁFICO DEL PROCESO INTERCAMBIADOR DE CALOR. 98
FIGURA E.5. DESPLIEGUE GRÁFICO DEL PROCESO DE REACTOR BATCH. 98
FIGURA E.6. DESPLIEGUE GRÁFICO DEL PROCESO DE HORNO. 98
FIGURA E.7. DESPLIEGUE GRÁFICO DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN INALÁMBRICO 99

LISTA DE ABREVIATURAS

SCADA: *"Supervisory Control and Data Adquisition"* (Sistema de Control, Supervisión y Adquisición de Datos).

CPU: *"Central Processing Unit"* (Unidad de procesamiento central).

PLC: *"Programable Logic Controller"* (Controlador Lógico Programable).

FCN-RTU: *"Field Control Node - Remote Terminal Unit"* (Nodo de Control de Campo-Unidad Terminal Remota).

HMI: *"Human.Machine Interface"* (Interfaz Hombre Máquina).

LD: *"Ladder Diagram"* (Diagrama de Escalera).

FBD: *"Functional Block Diagram"* (Diagrama de Bloques Funcional).

ST: *"Structured Text"* (Texto Estructurado).

SFC: Sequence Function Chart (Función de Trazado de Secuencias)

IL: *"Instruction List"* (Lista de Instrucciones).

OPC: *"OLE for Process Control"* (OLE para Control de Procesos)

OLE: "*Object Linking Embedding"* (Incrustación y Enlace de Objetos)

ISA:*"International Standard for Automatization"* (Estándar Internacional de Automatización).

LGR: "Lugar Geométrico de Raíces".

POU: *"Program Organizational Unit"* (Unidad de Organización de Programas).

PV: *"Process Variable"* (Variable de proceso).

SV: *"Setpoint Value"* (Valor de setpoint).

MV: *"Manipulated Variable"* (Variable manipulada).

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

Las industrias progresan día a día, en donde es necesario implementar técnicas de control y automatización para poder competir en el mercado. Al implementar estas técnicas, se optimizan los sistemas de producción al reducir los tiempos en ciclos productivos y aumentar la cantidad y calidad del producto fabricado. El progreso de la tecnología de la automatización y control ha logrado pasar desde lógicas analógicas a base de relés a una gran variedad de controladores que se adaptan a cualquier proceso en cualquier industria. Este proyecto se enfoca en el desarrollo y prueba de un controlador utilizado en la industria actual

Alcance y justificación

En todo proceso industrial se requieren equipos que permitan la automatización del mismo, los cuales están conformados principalmente por transmisores, controladores y elementos de acción final, como por ejemplo válvulas. La integración de estos tres tipos de equipos permite controlar cualquier tipo de proceso al generar lazos de control. En Controval se adquirió recientemente una plataforma basada en solución de control de redes llamada Stardom de la empresa Yokogawa. Este es un tipo de controlador que maneja múltiples entradas y salidas, ya sean analógicas o digitales, lo que le permite el control simultáneo de múltiples partes de un proceso. Con esta plataforma se deseaba realizar simulaciones de lógicas de control para procesos industriales conocidos y modelados como equipo de demostraciones para clientes. Las simulaciones y modelaje de procesos se realizaron con una integración entre el Stardom y Matlab, donde se simuló el proceso en Matlab y el control de dicho proceso con Stardom. Adicionalmente se desarrolló y documentó el desarrollo de una interfaz hombre máquina (HMI) donde se muestre gráficamente los procesos simulados.

Planteamiento del problema

El sistema de control Stardom FCN-RTU posee características únicas en cuanto a robustez y operacionalidad, permitiendo la adquisición de datos y control en ambientes severos y con una infraestructura y comunicaciones que requieren bajo consumo de energía. Este

sistema de control es una adquisición reciente por parte de Controval, el cual fue suministrado con manuales típicos que genera el fabricante, por lo que cualquier configuración y funcionabilidad que se requiera debe ser programado y desarrollado de acuerdo a los diferentes parámetros y necesidades de la empresa. Es por ello que este proyecto está destinado al desarrollo del diseño, configuración y prueba del Stardom, con el fin de determinar las potencialidades del mismo y su desempeño ante distintos procesos industriales, al igual de explorar cualquier función adicional que el controlador pueda aportar.

Objetivo general

Realizar el diseño y configuración de un sistema de control de procesos Stardom de Yokogawa y realizar pruebas de procesos industriales típicos como parte de un equipo de demostraciones ante clientes.

Objetivos específicos

- Elaborar una lista de materiales y planos de conexionado.
- Realizar la configuración básica de instrumentos de presión, pH, temperatura e inalámbricos.
- Realizar el modelaje de sistemas típicos de procesos industriales para control de nivel, control de pH, control de temperatura, entre otros.
- Diseñar, configurar y probar estrategias de control para los sistemas modelados.
- Realizar el diseño gráfico y configuración InfoWell, una interfaz hombre-máquina incluida en Stardom.
- Realizar la integración entre Stardom y Matlab mediante comunicación OPC para implementar simulaciones de los procesos modelados y probar las estrategias de control diseñadas.
- Realizar la documentación del proyecto

CAPÍTULO 1
DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

En este capítulo se describen brevemente los principales aspectos de la empresa donde se desarrolla el proyecto. Se hace énfasis en su historia, organización, visión, misión, valores y productos.

1.1. Historia de la empresa

La empresa fue fundada en 1991 con 100% capital venezolano, contando con oficinas en Caracas, Barcelona y Maracaibo, comercializando con una marca conocida de actuadores eléctricos [1].

En 1993, Controval amplía su gama de productos, ofreciendo actuadores hidráulicos y neumáticos de alta y baja presión, así como sistemas de control digital [1].

En 1994, debido a la creciente demanda de soluciones integrales en el mercado industrial, la empresa comienza a ofrecer servicio técnico especializado para la instalación, arranque y puesta en marcha de los equipos suministrados. Se realiza el ensamblado del conjunto válvula-actuador en los talleres de la empresa [1].

Para el año 1997 y 1998, Controval experimenta un rápido crecimiento, en el cual se abren dos nuevas oficinas en Valencia y Maturín y se invierte en la expansión de las oficinas de Maracaibo y Barcelona. Además se incorpora a la cesta de productos equipos en el área de instrumentación, logrando abarcar no sólo el sector petrolero sino sectores como el metalúrgico, papelero, alimenticio y farmacéutico [1].

Para el año 1999 y 2000 se abre una nueva oficina en Puerto Ordaz y se comienza con el diseño, fabricación, arranque y puesta en marcha de equipos de procesos en forma de patines. En el año 2001 se abren operaciones en Estados Unidos con una oficina en Houston, Texas[1].

1.2. Visión

"Liderar el mercado de automatización industrial, como proveedor confiable de soluciones integrales y universales, con máximo valor agregado nacional, a la entera satisfacción de nuestros clientes en términos de calidad, oportunidad, seguridad y confiabilidad"[1].

1.3. Misión

"Suministrar con orgullo soluciones integrales y oportunas en el manejo de fluidos, instrumentación y automatización industrial, convirtiéndonos en aliados de nuestros clientes y proveedores generando bienestar y satisfacción de nuestro entorno social, capital humano y asociados, asegurando la transferencia y conocimiento tecnológico"[1].

1.4. Valores

- Soñador
    - Liderazgo y motivación – empuje.
    - Confiable.
    - Iniciativa, creatividad e innovación.
    - Capacidad de entusiasmar.
- Vocación de Servicio
    - El cliente como centro y maestro.
    - Calidad sin condiciones.
    - Evolución continua.
    - Orgullo de ser útiles.
    - Rapidez y flexibilidad.
- Integridad
    - Honestidad (pensamiento, palabra y acción)
    - Responsabilidad.
    - Ética.
    - Profesionalismo.
    - Lealtad a los principios.
- Calor humano
    - Cortesía y respeto.
    - Disfrute y fomento de nuestras virtudes humanas.

- Humor.
- Celebración compartida.
- Colaboración.

1.5. Política de calidad

"Ofrecer productos y servicios de la más alta calidad relacionados con soluciones en el manejo de fluidos, instrumentación y automatización industrial, respaldados por nuestro personal calificado, en continua capacitación, por mutuas y beneficiosas relaciones con nuestros proveedores y teniendo como objetivo el mejoramiento continuo de la eficacia de nuestros procesos, garantizando así la satisfacción de nuestros clientes"[1].

1.6. Productos

Actualmente, Controval se encarga de comercializar una gran variedad de marcas de productos como válvulas, actuadores, transmisores, etc. Sin embargo, en materia de instrumentación y sistemas de control, Controval es el distribuidor autorizado en el país de los equipos de la marca japonesa Yokogawa Electric Corporation. Entre los productos de los que dispone Yokogawa, se encuentran[1]:

- Plataformas de control y seguridad:
  - Centum: Es el sistema de control integrado DCS.
  - Pro-Safe. Sistema instrumentado de seguridad.
  - Stardom: Sistema de control basado en redes.
  - FA-M3R: Controlador lógico programable (PLC).
- Soluciones de software para el manejo y supervisión de plantas:
  - Fast/Tools: Sistema SCADA.
  - PRM: Administrador de activos de planta.
  - Exaquantum: Administrador de información de planta.
- Instrumentos de campo:
  - Transmisores de presión diferencial y absoluta.
  - Transmisores de flujo.
  - Transmisores de temperatura.
  - Analizadores de pH, Gas, Oxígeno, etc.
- Válvulas:

- Válvulas Actuadas.
- Válvulas Manuales.
- Válvulas de control.
- Válvulas de alivio de seguridad.

Adicionalmente, Controval ofrece varios Skids (patines) de diversas áreas. Entre algunos patines disponibles están:

- Trampas para Herramientas de Limpieza de Líneas.
- Paquete de Inyección de Químicos.
- Paquete de Aceite Lubricante.
- Separadores de Prueba.
- Paquetes de Medición y Análisis de Plantas de Tratamiento de Agua.
- Paquete de Protección de Golpe de Ariete.
- Paquete de Acondicionamiento de Gas Combustible.
- Unidades de Potencia Hidráulica.
- Sistema Toma Muestras.
- Paquetes de Regulación de Calderas.
- Unidades LACT para Líquidos o Gases

1.7. Organización de la empresa

La sede de Controval ubicada en Caracas, está formada por diferentes departamentos entre los cuales se pueden mencionar [1]:

- Departamento de automatización, instrumentación y producción (AIP): Realizan la ingeniería de la empresa. Esta función comprende el diseño del producto que se desea comercializar, tomando en cuenta todas las especificaciones requeridas por los clientes. Una vez elaborado dicho producto se realizan las pruebas d eingeniería, consistentes en comprobar que el producto cumpla con el objetico para el cual fue elaborado.
- Departamento de automatización, instrumentación y telecomunicaciones (AIT): Dedicado a la configuración de los sistemas SCADA y programación de los PLCs pertenecientes a la marca Yokogawa.

- Departamento de ventas: Es el encargado de persuadir a un mercado en existencia de un producto, valiéndose de su fuerza de comercialización o de intermediarios, aplicando las técnicas y políticas acordes con los productos de ingeniería que se desean vender.
- Departamento de recursos humanos: Consiste en la planeación, organización, desarrollo y coordinación, así como también control de técnicas, capaces de promover el desempeño eficiente del personal. Entre sus funciones destacan ayudar y prestar servicios a la organización, a sus dirigentes, gerentes y empleados; describir las responsabilidades que definen cada puesto laborar y las cualidades que debe tener la persona que lo ocupe; evaluar el desempeño del personal, promocionando el desarrollo del liderazgo; reclutar al personal idóneo para cada puesto, capacitar y desarrollar programas, cursos y toda la actividad que vaya en función del mejoramiento de los conocimientos del personal.
- Departamento de informática: Contempla entre sus funciones, apoyar computacionalmente las actividades de todas las Direcciones, Departamentos y otras unidades de la organización, preocupándose del desarrollo de programas como de la actualización de todo su equipo, mantener y administrar las redes, sistemas y equipos computacionales, prestar soporte a usuarios en todo lo relativo a la plataforma computacional.

CAPÍTULO 2
MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se describen las bases teóricas que fundamentan el proyecto de pasantía. Se hace una introducción a los sistemas de supervisión, control y adquisición de datos y a los controladores lógicos programables, se describe el controlador relacionado con este proyecto, sus software y protocolos de comunicación y los tipos de procesos que fueron simulados para las demostraciones.

2.1. Sistema de supervisión, control y adquisición de datos

Un Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA) es una aplicación de software especialmente diseñada para funcionar sobre computadores en el control de producción, proporcionando comunicación con los dispositivos en campo (controladores autónomos) y controlando el proceso de forma automática desde la pantalla del ordenador. También provee de toda la información que se genera en el proceso productico de diversos usuarios, tanto del mismo nivel como de otros usuarios supervisores dentro de la empresa [2].

2.2. Controladores Lógicos Programables (PLCs)

Los controladores lógicos programables son la unidad fundamental de un sistema de automatización industrial. Estos controladores no son más que un computador adecuado para uso industrial, por lo que disponen de una fuente de poder, una Unidad Central de Proceso (CPU) y en vez de tener un teclado y una pantalla tienen terminales para conectar entradas y salidas desde y hacia el proceso o máquina [3].

2.3. Stardom FCN-RTU Yokogawa

En respuesta a la demanda creciente de energía en países emergentes, gran cantidad de pozos de petróleo y gas son taladrados en ambientes severos o lugares sin una fuente de poder o infraestructura de comunicaciones adecuada. Por esta razón, los controladores en dichas áreas deben ser excepcionalmente robustos y operar en bajo consumo. Para satisfacer estas necesidades, Yokogawa ha producido un controlador autónomo de bajo consumo Nodo de Control de Campo-Unidad Terminal Remota (FCN-RTU) para el sistema de control basado en

redes STARDOM. En la figura 2.1 se puede observar el controlador FCN-RTU. Entre las características más resaltantes están las siguientes [4] [5]:



Figura 2.1. Controlador FCN-RTU de Yokogawa

- Bajo consumo de energía: El FCN-RTU puede operar consumiendo tan solo 2.9 W al emplear dispositivos de bajo consumo y un CPU integrado con E/Ss analógicas y digitales e interfaces de comunicación, los cuales son requerido para el control, operación y monitoreo.
- Expandir el ambiente de operación: El FCN-RTU ha sido probado para operar en temperaturas extremas desde -40 °C hasta 70 °C y en altitudes hasta de 3000 m.
- Expandir el rango de voltaje de entrada: El rango de voltaje de entrada es de 10 V a 30 V. Combinado con la característica del bajo consumo de energía, el controlador puede operar con energía inestable y limitada así como energía solar, incluso en áreas donde no hay infraestructura adecuada de energía.
- Mejor calidad de comunicación: Además de un puerto de Ethernet, el FCN-RTU está equipado con tres puertos de serial RS-232 y uno de serial RS-422/RS-485, permitiendo construir una red confiable con la línea principal y las líneas de apoyo. Así, la transmisión de información desde y hacia el SCADA (Supervisory Control and Data Adquisition) es suministrado. Cumpliendo con el Protocolo de Redes Distribuidas (DNP3), el FCN-RTU puede enviar solo información cambiada entre información tamponada, así reduciendo costos de comunicación y mejorando la calidad.
- Herencia de tecnologías claves: El controlador hereda tecnologías claves del controlador STARDOM: inteligencia, confianza, flexibilidad y fácil ingeniería.

El FCN-RTU está compuesto de los siguientes módulos [4], los cuales pueden verse en la figura 2.2:

- Módulo base: Es un chasis en el cual varios módulos de funciones tales como CPU, fuente de poder y adicionales módulos de E/S pueden ser montados para configurar una unidad de control.
- Fuente de poder: El módulo de fuente de poder se instala en el módulo base y suministra energía estable a cada módulo. La fuente de poder suministrada tiene funciones de salida (fuente de poder de 5 V DC, fuente de poder de campo 24 V DC para módulos de E/S adicionales.
- Módulo CPU: Un módulo CPU opera un sistema de operaciones en tiempo real, soporta lenguajes de programación con el estándar internacional IEC 61131-3 y sirve como una máquina virtual de Java. Una característica resaltante del módulo CPU es que tiene integrado dos módulos de E/S que se conectan a dos bloques terminales conectores MIL externos con cables conectores MIL, con 16 entradas digitales, 12 entradas analógicas, 8 salidas digitales, 2 salidas analógicas, 2 entradas de pulso y una entrada de batería. El método de conexionado se muestra en la figura 2.3.
- Módulos de E/S: Módulos con funciones de entrada y salida.

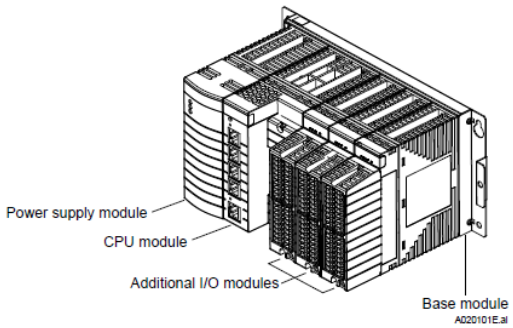


Figura 2.2. Componentes del controlador FCN-RTU.

2.3.1. Software compatible con el FCN-RTU

En esta sección se hará una breve descripción de los programas y sus funciones que fueron utilizados para el funcionamiento del FCN-RTU.

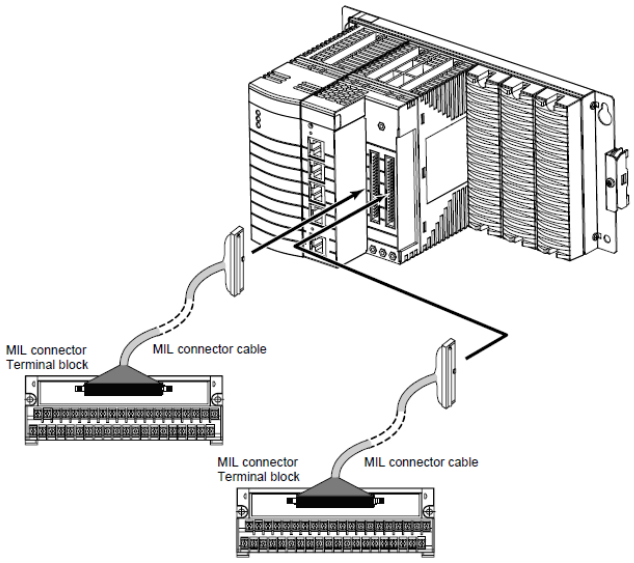


Figura 2.3. Método de conexión de los módulos E/S integrados.

2.3.1.1. Resource Configurator

Resource Configurator es una herramienta que realiza ajustes básicos en controladores autónomos FCN/FCJ. La ventana principal de dicho programa se muestra en la figura 2.4. Principalmente realiza las siguientes funciones [6]:

- Configuración de red: Esta función permite realizar ajustes relacionado con la red del controlador (Dirección IP, submask, puerta de acceso).
- Configuración de módulo de CPU: Esta función permite realizar ajustes relacionados al módulo de CPU, tales como permitir repuesto de información retenida, usar programa Java y permitir auto-cargado de módulos de E/S.
- Configuración de módulos de E/S: Esta función permite configuraciones relacionadas con módulos de entrada y salida, tales como configuración de nombres de etiquetas, supervisión de módulos ocupados y configuración separada de cada módulo.
- Muestreo de licencias: Esta función permite visualizar las licencias actualmente en ejecución en el controlador.
- Muestreo de información RAS: Esta función permite visualizar la información RAS (Reliability, Avilability, Serviceability) en el controlador.
- Supervisión de información: Esta función permite visualizar la información que es transmitida en los módulos de E/S en unidades de ingeniería o en función de la máxima corriente de entrada.

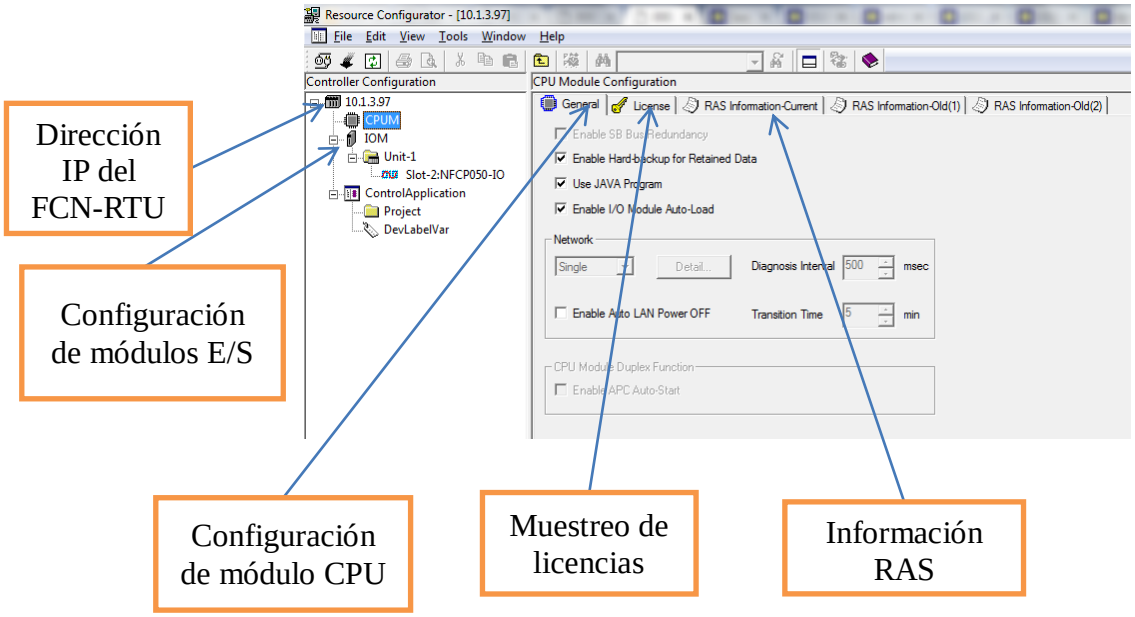


Figura 2.4. Ventana principal del Resource Configurator.

2.3.1.2. Logic Designer

Logic Designer es un software utilizado para crear aplicaciones de control para controladores autónomos FCN-RTU. La ventana principal de dicho programa se muestra en la figura 2.5. Tiene las siguientes funciones [6]:

- Una aplicación de control puede ser creada en lenguajes de control satisfaciendo el estándar internacional IEC 61131-3.
- Son soportados cinco tipos de lenguajes, incluyendo diagrama de funciones de bloques, escalera y programación SFC.
- Una aplicación de lógica de control puede ser construida a partir de módulos (referidos como POU); por ende, la aplicación de control puede ser diseñada de una manera jerárquica.
- Soporta varios portafolios de aplicación, los cuales son colecciones de POUs para varios propósitos de control.
- Soporta editores para cada lenguaje de programación.
- Está equipado con una poderosa función de debug.
- La interfaz de usuario tales como barras de herramientas y botones de atajo pueden ser personalizados.

El Logic Designer tiene una interfaz tipo exploración en el cual el directorio principal es el proyecto, en los subdirectorios están representadas secciones funcionales del proyecto. Los directores principales para el proyecto son [7]:

- Libraries: El directorio en el cual todas las funciones de librerías están registradas.
- Data Types: El directorio en el cual se registran tipos de datos adicionales y estructuras.
- Logical POUS: El directorio en el cual están todos los programas y bloques de funciones.
- Physical Hardware: Contiene la configuración para el hardware. Cada configuración tiene FCXs, cada uno con su set de tareas, E/S y variables globales.

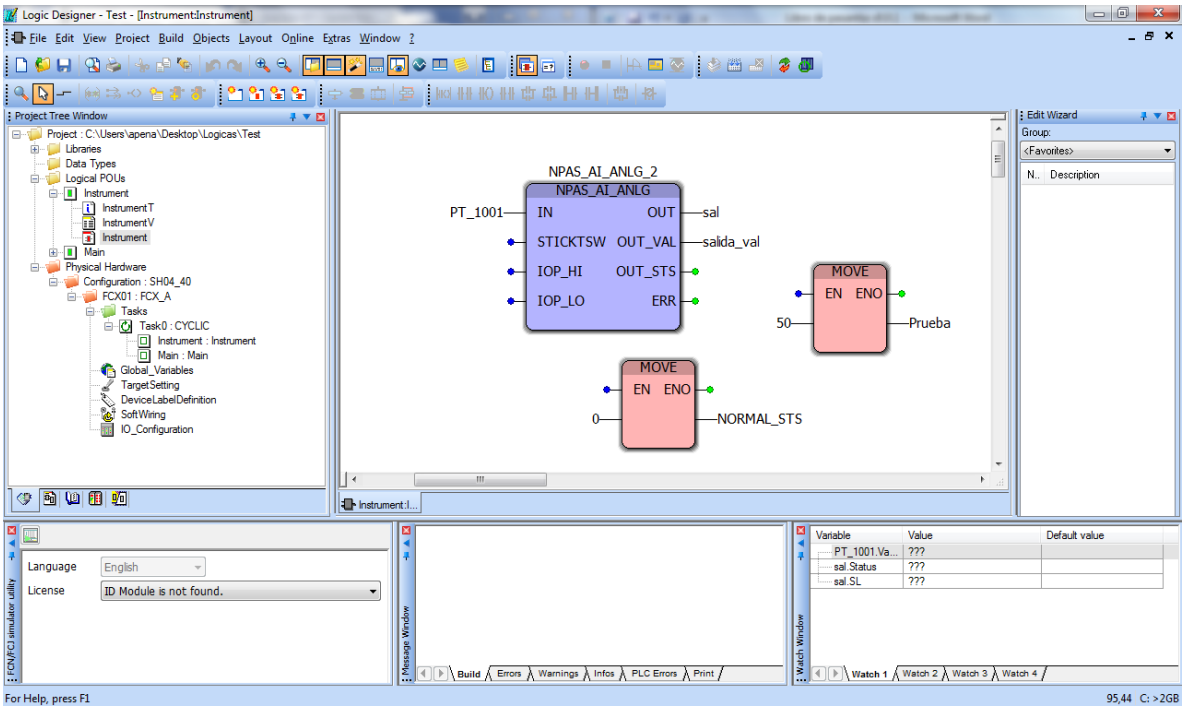


Figura 2.5. Ventana principal del Logic Designer.

2.3.1.2.1. Unidades de organización de programas (POU)

Las aplicaciones de control están encapsuladas en una Unidad de Organización de Programa (POU). Un POU puede ser creado como una combinación de los lenguajes de programación IEC-61131 y puede ser designado como una función, un bloque de función o un programa [7].

2.3.1.2.2. Tareas

Un POU designado como un programa es instantáneamente asignado a una tarea, esto asigna los siguientes atributos al programa [7]:

- Unidad FCX donde se está ejecutando.
- Velocidad de ejecución.
- Prioridad.
- Tipo de tarea.
- Memoria asignada en la pila.

Antes de que un programa pueda ser asignado a una tarea, se debe crear la misma. Las tareas son creadas para cada FCX en la configuración.

2.3.1.3. InfoWell

El sistema InfoWell es un software operando en el Stardom FCN-RTU que permite a ingenieros desarrollar aplicaciones Web o e-mail para la ejecución del controlador sin la necesidad de tener conocimiento de programación IT. Un diagrama de funciones de InfoWell se muestra en la figura 2.6. Tiene las siguientes características principales [8] [9]:

- Un objetivo de InfoWell es una programación libre de ingeniería para mantener costos de ingeniería al mínimo. Por esta razón, InfoWell provee un softwate para lograr funciones de Web y e-mail.
- Todas las herramientas de montaje y archivos requeridos para la operación de InfoWell están localizadas en el FCN-RTU. Esto permite la configuración de clientes pequeños en PCs usadas para montaje o monitoreo, así reduciendo costos de operación y administración. Adicionalmente el montaje, operación y monitoreo es posible desde cualquier terminal conectada a la red.
- Las aplicaciones de Web y e-mail han sido desarrolladas para hacer un efectivo uso de la aplicación Java Eléctrica de Yokogawa montado en el FCN-RTU, adoptando una arquitectura que es consciente de la dependencia y expansión de cada aplicación.
- InfoWell añade una función adicional de transmisión de información al controlador.
- Al usar el Web Aplication Portafolio, el controlador funciona como un servidor web y el monitoreo y operación del equipo resulta posible desde distintas PCs en la red.
- Al usar la E-mail Aplication Portafolio, se pueden enviar correos a computadoras en el dominio e incluso a teléfonos móviles, mediante el cual mensajes e información del equipo puede ser recibida en cualquier lugar y momento.

- La combinación de ambas aplicaciones permite un estilo de operación en el cual el controlador usualmente opera sin ninguna supervisión; en tal caso de haber problemas, se recibe una notificación vía e-mail.
- Las configuraciones de estos portafolios puede ser hecha fácilmente, modificando una página Web modelo (se requiere conocimientos de básica lectura HTML).

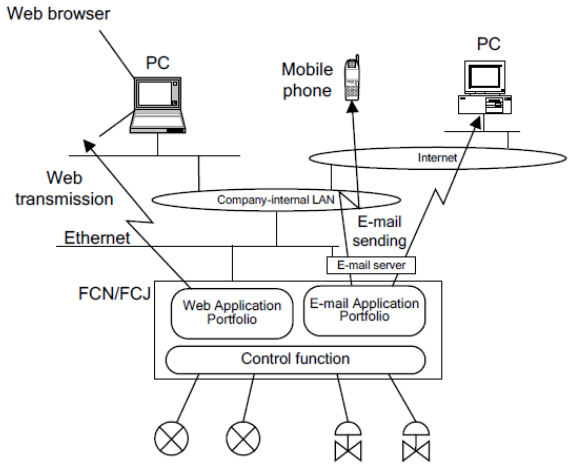


Figura 2.6. Diagrama de funciones de InfoWell.

InfoWell posee las siguientes funciones [8]:

1. **Creación de página Web:** La creación de páginas web para transmitir información de control involucra varias tareas además de la regular programación HTML; se deben programar botones de operación y áreas de texto en JavaScript y Tags para incrustar data de control en la pantalla Web vía OPC; aplicaciones Java para ejecutar un muestreo gráfico deben ser creadas; y formas para enviar información al FCN-RTU deben ser creadas. Es por esto que InfoWell provee varios modelos de páginas Web para cada tipo de pantalla que son preinstaladas con partes para configurar páginas Web para aligerar la carga de trabajo. Esto permite que el ingeniero solo debe importar la información de control necesaria basada en estos modelos.
2. **Función de transmisión de alarma/mensaje de proceso:** El módulo de e-mail permite leer la memoria del controlador que almacena cualquier cambio de estado del proceso o condiciones de alarma y envía dicha información como un correo.
3. **Modificación flexible de montajes:** A pesar de que el FCN-RTU está equipado con un motor de ejecución de control y transmisión de información en el mismo hardware, la operación de estas funciones en el FCN-RTU puede ser modificada de manera independiente,

con el propósito de que el montaje de páginas Web y transmisión vía e-mail pueda ser modificada en InfoWell de acuerdo a las circunstancias sin que la ejecución de control sea suspendida.

4. **Registro de historia:** La información escrita en el motor de ejecución de control, el historial de correos enviados y actualización de archivos son almacenados en un registro.

La ventana principal de InfoWell se muestra en la figura 2.7.

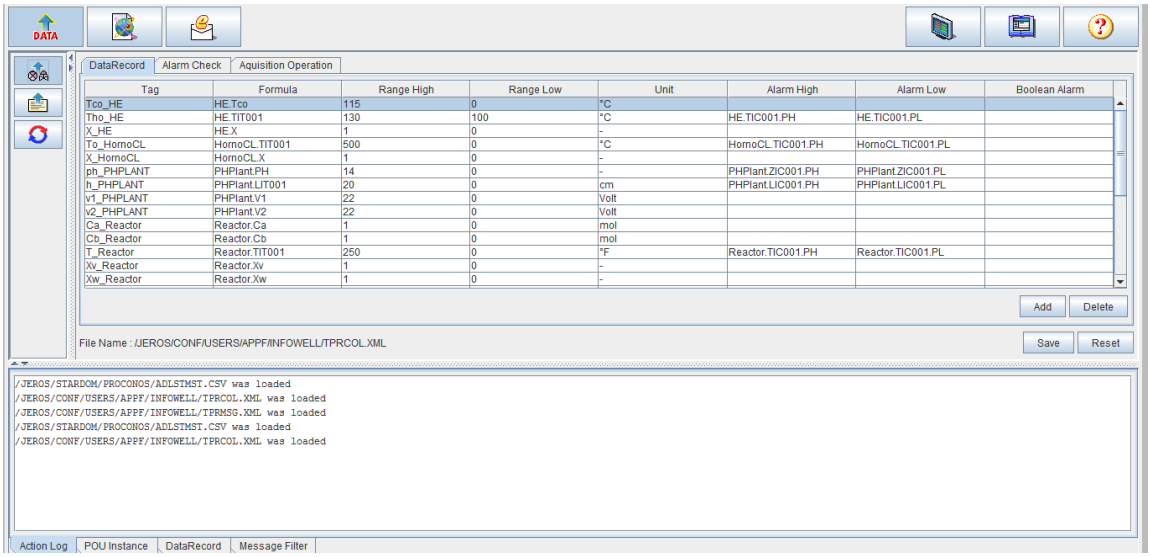


Figura 2.7. Ventana principal de InfoWell.

2.3.1.3.1. InfoWell Graphic Portafolio

Este portafolio permite crear imágenes en una página web, utilizando la información suministrada al FCN-RTU para crear una interfaz hombre-máquina (Human-Machine Interface) (HMI) en el mismo controlador. Un HMI es el medio que permite la interacción entre las personas y el sistema de control, a través del cual el usuario puede realizar acciones de configuración, monitoreo y mantenimiento del proceso automatizado. Se definen todas las imágenes, variables a mostrar, método de visualización, etc. en Windows para luego descargar la parte gráfica en el controlador [10]. La ventana principal del portafolio de muestra en la figura 2.8.

2.3.1.3.2. InfoWell Logging Portafolio

Este portafolio le añade la función a InfoWell de crear registros de información. Dicho registro puede ser periódico, por lotes o en secuencia de eventos. El registro puede ser a baja velocidad (1-60 minutos) o a alta velocidad (1-60 segundos). Adicionalmente cuenta con funciones de

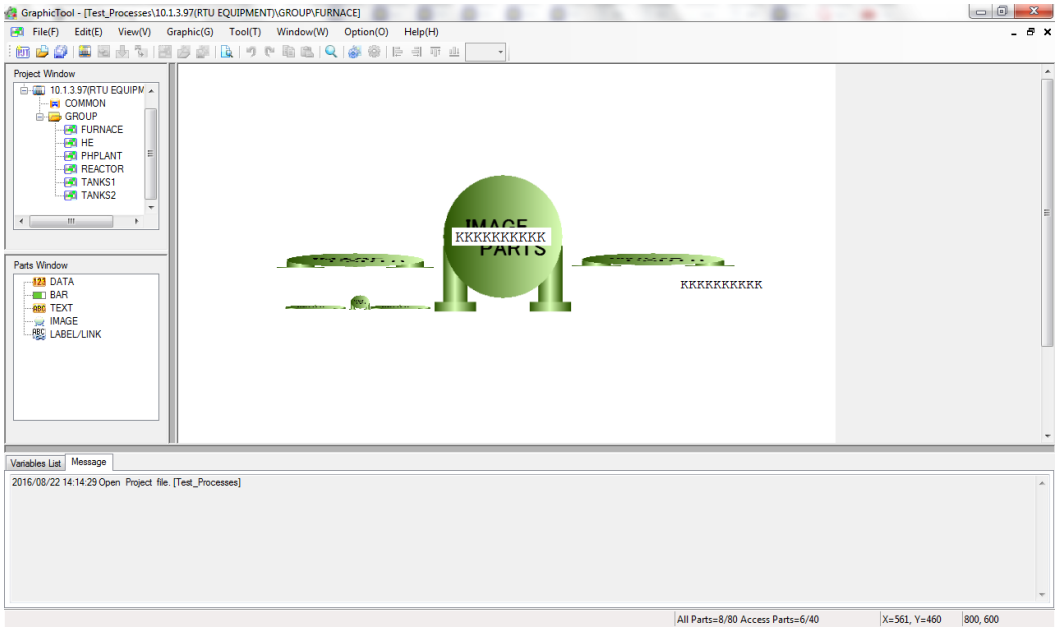


Figura 2.8. Ventana principal del Graphic Tool.

monitoreo de registro de información, registro colectivo y envío de registros. Gracias a esta funcionalidad, es posible que desde cualquier PC se pueda tener registros de un proceso industrial completo, información de interés para una gran variedad de operadores en una planta [11]. La ventana principal del portafolio se muestra en la figura 2.9.



Figura 2.9. Ventana principal del Logging Portafolio.

2.3.2. Lenguajes de programación

La programación en el FCN-RTU utiliza el estándar IEC61131-3 [5]. Este estándar especifica los lenguajes siguientes [12]:

- Diagramas lógicos o de escalera (LD): Este lenguaje se asemeja a la representación gráfica de un circuito. Está compuesto principalmente por contactos, que representan las entradas del sistema, y bobinas, que representan las salidas. Los contactos conectados en paralelo simbolizan la función lógica "OR", mientras que en serie equivale a la función lógica "AND" entre las entradas. Las bobinas se pueden configurar para que reflejen directamente la salida del sistema o para que ejecuten una función de "SET" o "RESET". Tanto los contactos como las bobinas también pueden ser negados.
- Diagrama de bloques funcionales (FBD): En dicho lenguaje, todas las funciones se expresan en forma de circuitos integrados, estos pueden ser interconectados por medio de cables o variables. Es bastante común ver aplicaciones donde se combina este lenguaje con diagramas de escalera.
- Texto estructurado (ST): Es un lenguaje de alto nivel con orígenes en el Ada, Pascal y "C", puede ser utilizado para codificar expresiones complejas e instrucciones anidadas; este lenguaje dispone de estructuras para bucles (REPEAT-UNTIL; WHILE-DO), ejecución condicional (IF-THEN-ELSE; CASE), funciones (SQRT, SIN, etc.).
- Funciones de trazado de secuencias (SFC): Se utiliza generalmente para aplicaciones en donde el proceso se debe ejecutar en diferentes pasos en forma ordenada, como por ejemplo en procesos Batch. La estructura de este lenguaje es similar a la de un diagrama de flujos, el cual está conformado por estados y transiciones. Cuando el programa se encuentra en un estado determinado, el controlador solamente ejecutará el conjunto de acciones asociadas a dicho estado. Una vez que se cumple la condición de la transición, el programa pasará a ejecutar el siguiente estado y, por ende, el siguiente conjunto de acciones.
- Lista de instrucciones (IL): Es el modelo de lenguaje ensamblador basado en un acumulador simple.

2.3.3. Protocolos de comunicación

En esta sección se hará una breve descripción de los protocolos de comunicación utilizados para la integración de distintos programas y equipos con el Stardom FCN-RTU.

2.3.3.1. Comunicación OPC

OPC (OLE (Object Linking and embedding) for Process Control) es el estándar interoperabilidad para el intercambio seguro y confiable de información en el espacio de automatización industrial y otras industrias. Es una plataforma independiente que asegura el sinfín de flujo de información entre dispositivos de múltiples vendedores. La Fundación OPC es responsable del desarrollo y mantenimiento de este estándar. El estándar OPC es una serie de especificaciones desarrollada por industrias de vendedores, usuarios y desarrolladores de software. Estas especificaciones definen la interfaz entre clientes y servidores, así como servidores y servidores, incluyendo el acceso a información en tiempo real, monitoreo de alarmas y eventos, acceso a data histórica y otras aplicaciones. [13].

Un servidor de acceso a datos OPC está conformado por varios objetos: el servidor, el grupo y el elemento. El servidor ofrece sirve como contenedor de grupos de objetos OPC. El grupo mantiene información acerca de sí mismo y proporciona los mecanismos para contener y organizar lógicamente los elementos OPC. Los elementos representan conexiones a fuentes de datos dentro del servidor. Un elemento OPC no es accesible por el cliente como un objeto, así pues no hay interfaz externa definida para un elemento OPC [14]. El beneficio de la tecnología OPC se aprecia en las figuras 2.10 y 2.11.

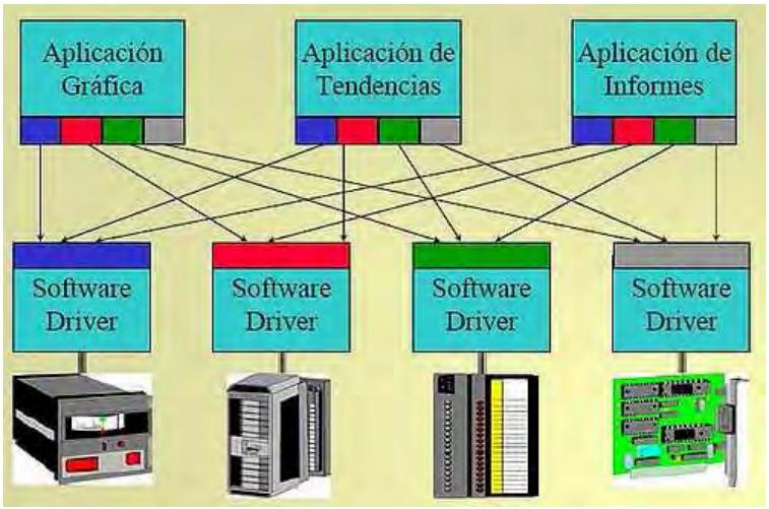


Figura 2.10. Conexión sin tecnología OPC [14].

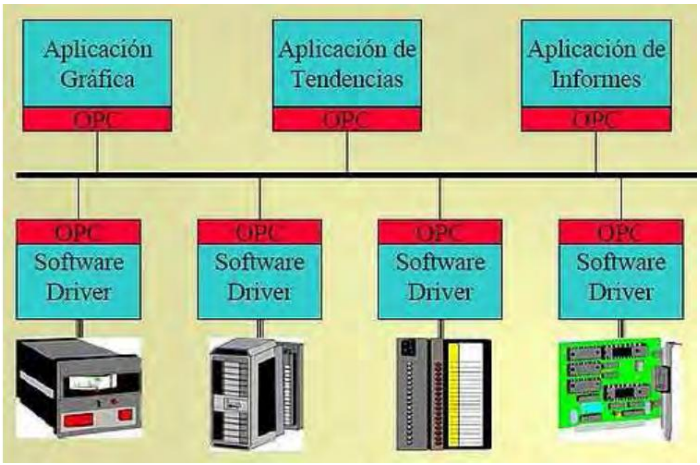


Figura 2.11. Conexión con tecnología OPC [14].

2.3.3.2. Comunicación Modbus

Modbus es un protocolo de comunicaciones serial publicado en 1979 por Modicon para su uso con PLCs. Simple y robusto, se ha convertido desde entonces en un protocolo de estándar de comunicaciones, y es ahora un medio común de conexionado de dispositivos electrónicos industriales [15]. Las principales razones para el uso de Modbus en el ambiente industrial son:

- Desarrollado para aplicaciones industriales.
- Publicado abiertamente y libre de regalías.
- Fácil de desplegar y mantener.
- Mueve bits y palabras sin colocar tantas restricciones en vendedores.

En términos simples, Modbus es un método usado para transmitir información sobre líneas seriales entre dispositivos electrónicos. El dispositivo solicitando la información es llamado Maestro Modbus y los dispositivos suministrando la información son Esclavos Modbus. En una red Mosbus estándar, hay un maestro y hasta 247 esclavos, cada uno con una dirección única desde 1 hasta 247. El maestro también puede escribir información a los esclavos. Modbus es típicamente usado para transmitir señales de instrumentación y dispositivos de control de vuelta al controlador principal o un sistema de acumulación de información. Normalmente es utilizado para conectar una computadora supervisora con una unidad terminal remota en sistemas SCADA [16].

Modbus tiene cuatro tipos de objeto, descritos en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Descripción de tipos de objeto de comunicación Modbus.

Tipo de objeto	Acceso	Tamaño
Coil	Lectura-Escritura	1-bit
Discrete Input	Solo lectura	1-bit
Input Register	Solo lectura	16-bit
Holding Register	Lectura-Escritura	16-bit

Existen versiones del protocolo Modbus para puerto serial y Ethernet. Este último se denomina Modbus TCP/IP y funciona con dispositivos maestros y esclavos conectados a una red TCP/IP. Mediante esta versión del protocolo se suele comunicar el Stardom FCN-RTU, en el cual se considera como un Maestro Modbus, solicitando información de otros dispositivos esclavos y administrando la información. Un ejemplo de la arquitectura de comunicación Modbus TCP/IP se muestra en la figura 2.12.

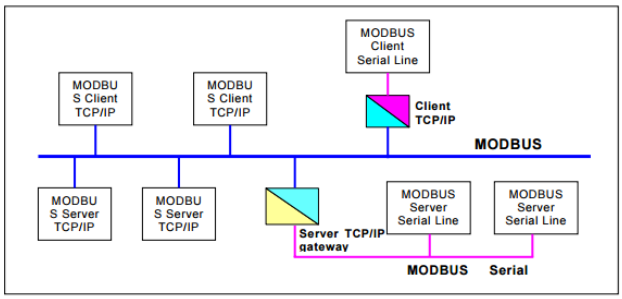


Figura 2.12. Arquitectura de la comunicación Modbus TCP/IP.

2.3.3.3. Estándar ISA100.11a

El estándar ISA100.11a es un estándar de tecnología de conexionado inalámbrico desarrollado por la Sociedad Internacional de Automatización (ISA). La descripción oficial del estándar es "Sistemas inalámbricos para automatización industrial: Control de procesos y aplicaciones relacionadas". En este estándar se definen todas las especificaciones de dispositivos inalámbricos, incluyendo seguridad y manejo. Este estándar tiene las siguientes características:

- Dispositivos de bajo consumo de energía, con la habilidad de escalar a grandes instalaciones.

- Infraestructura inalámbrica, con requerimientos de seguridad y manejo de red en una manera funcional.
- Robustez en la presencia de interferencia.
- Coexistencia con otros dispositivos inalámbricos.
- Interoperabilidad con dispositivos ISA100.

En 2009, Yokogawa anunció productos basados en el estándar ISA100.11a, los cuales incluyen un Gateway inalámbrico, un punto de acceso y transmisores de temperatura y presión. En conjunto, estos dispositivos permiten crear una red de comunicaciones cerrada para la automatización y control de procesos inalámbrico [17]. Un ejemplo de la arquitectura de comunicación Modbus TCP/IP se muestra en la figura 2.13.

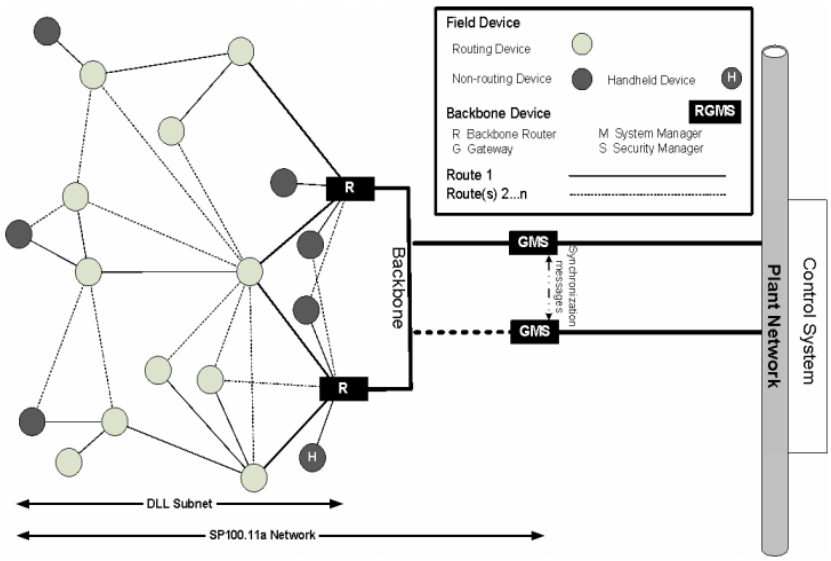


Figura 2.13. Arquitectura de la ISA100.11a [17].

2.4. Procesos y operaciones unitarias

Un ingeniero químico es aquel involucrado en el desarrollo, diseño y supervisión procesos industriales en los cuales materia prima es transformada o separada en productos útiles, tanto del proceso completo como de los equipos a utilizar. Los productos de interés pueden ir desde químicos comúnmente usados como ácido sulfúrico hasta productos de alta tecnología como soportes litográficos poliméricos para la industria electrónica. Debido a la complejidad de modernos procesos industriales, un método de organización más efectivo es separar los procesos en una serie de pasos llamados operaciones unitarias. Dichas operaciones están basadas en ciencia y experiencia, las cuales se combinan para un eficiente diseño de equipos a ser fabricado,

ensamblado, operado y mantenido [18]. En esta sección se realizará una breve introducción de los distintos procesos y operaciones unitarias utilizadas como ejemplo para las pruebas realizadas con el controlador.

Al estudiar los sistemas de control, es necesario conocer el modelo matemático que define al proceso u operación unitaria. Un modelo matemático de un sistema dinámico se define como un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con precisión. Un modelo matemático no es único para un sistema determinado. La dinámica de muchos sistemas se describe en términos de ecuaciones diferenciales, las cuales se obtienen a partir de las leyes físicas que gobiernan un sistema determinado [19].

2.4.1. Planta de neutralización

Las plantas con reacciones de neutralización, en las cuales se mide continuamente el pH, son actualmente utilizadas en la mayoría de las industrias a nivel mundial, entre ellas, la industria alimentaria en la conservación de alimentos, la industria agrícola para controlar el pH, entre otros. Una reacción de neutralización se lleva a cabo al combinar un ácido con una base, con el fin de determinar la concentración de las distintas sustancias en disolución. Tienen lugar cuando un ácido reacciona totalmente con una base, produciendo sal y agua. La reacción de neutralización utilizada como ejemplo en este trabajo es entre ácido acético (CH3COOH) y soda cáustica (NaOH) para formar el acetato de sodio (CH3COONa) y agua, de acuerdo a la siguiente reacción [20]:

$$CH_3COOH + NaOH \rightarrow CH_3COONa + H_2O$$
$$H^+ + OH^- \rightarrow H_2O$$

El pH es un indicador de la acidez de una sustancia. Su medición está determinada por la consideración entre el número de protones (iones H^+) y el número de iones hidroxilo (OH^-). El pH varía comúnmente entre 0 y 14, cuando es menor a 7 se trata de una sustancia ácida, mientras que cuando es mayor a 7 se trata de una sustancia básica y si es igual a 7 se trata de una sustancia neutra. La planta de neutralización a ser usada como ejemplo se muestra en la figura 2.14 [20].

Los objetivos de control del proceso son el nivel de producto en el tanque V-1003 y el pH del mismo, manipulando el voltaje de las bombas de alimentación. El modelo matemático que describe la dinámica del proceso, así como la descripción de cada término y el valor de los mismos se muestra en el apéndice A [20].

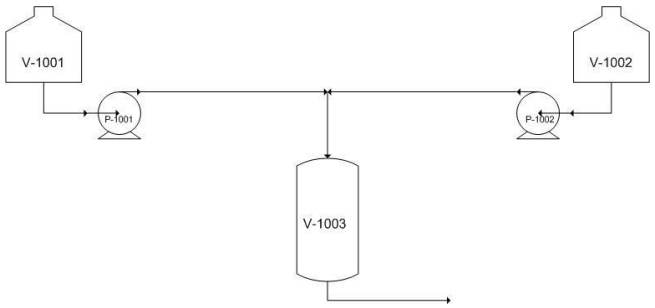


Figura 2.14. Planta de neutralización de ácido acético y soda cáustica.

2.4.2. Llenado de tanques

Los tanques de proceso son usados comúnmente para mezclar ingredientes de varias corrientes, produciendo una sola corriente de proceso. Los tanques de almacenamiento son usados para contener líquidos o gases de producto. Ambos tipos de tanques son utilizados ampliamente en todo tipo de industrias, ya sea en procesos de almacenamiento de crudo, servicios de suministro de agua, etc [18].

Normalmente en distintos procesos se tienen tanques en cascada o un arreglo de tanques en los cuales se distribuyen los productos a almacenar o mezclar la materia prima para producir un producto clave. Como ejemplo para este proyecto de investigación se diseñaron dos arreglos distintos de tanques acoplados, utilizando como modelo los tanques acoplados Quanser, en el cual se utiliza agua como fluido de proceso [21]. Los arreglos empleados se muestran en las figuras 2.15 y 2.16.

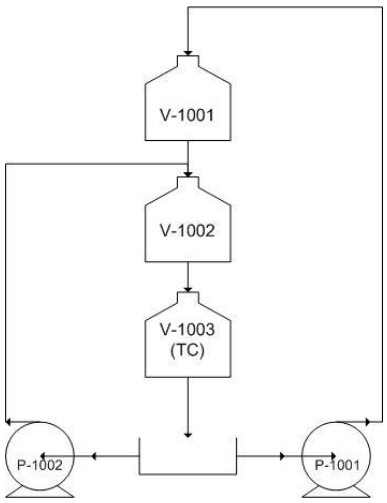


Figura 2.15. Arreglo 1 de llenado de tanques.

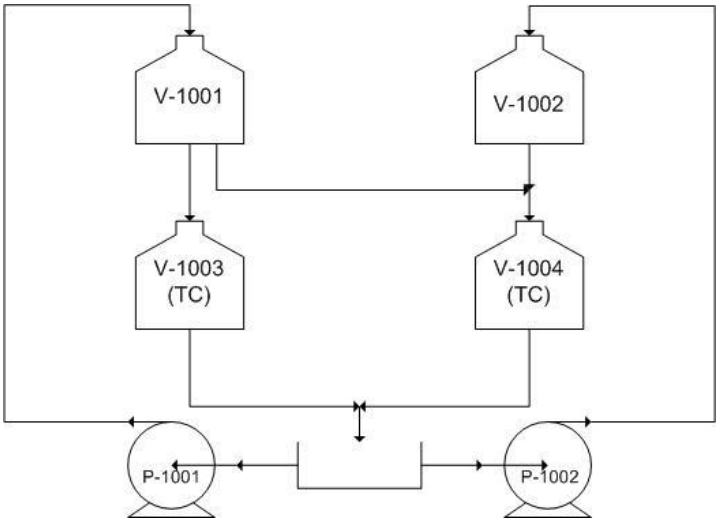


Figura 2.16. Arreglo 2 de llenado de tanques.

Los objetivos de control son las alturas de los tanques TC manipulando el voltaje de las bombas de alimentación para cada arreglo. El modelo matemático que describe la dinámica de los procesos, así como la descripción de cada término y el valor de los mismos se muestra en el apéndice A [19].

2.4.3. Intercambiador de calor

El proceso de intercambio de calor entre dos fluidos a diferentes temperaturas y separadas por una pared ocurre en muchos procesos industriales. El equipo utilizado para implementar este intercambio se denomina intercambiador de calor. Los intercambiadores de tipo tubo y coraza son usados en su mayoría en los procesos industriales, el cual consiste en un gran número de tubos encerrados por una carcasa. Un fluido atraviesa los tubos mientras que otro circula por el exterior en la carcasa [22].

Como ejemplo para este proyecto de investigación se utilizó un intercambiador de calor en miniatura diseñado para enfriar aceite de motor de un motor con un refrigerante, como se muestra en la figura 2.17 [23].

El objetivo de control es la temperatura de salida del aceite manipulando la apertura de la válvula que permite circular el refrigerante. El modelo matemático que describe la dinámica del proceso, así como la descripción de cada término y el valor de los mismos se muestra en el apéndice A [23].

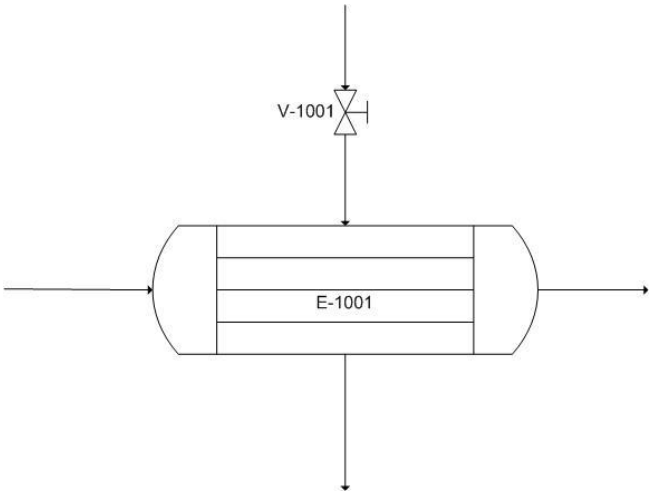


Figura 2.17. Intercambiador de calor miniatura.

2.4.4. Reactor Batch

Un reactor químico es un equipo en el cual se forma una sustancia a partir de otras llamadas reactantes, por medio de una serie de transformaciones químicas. El procesamiento Batch consiste en una serie de pasos para poder llegar al producto deseado. Este tipo de procesamiento es empleado en la producción de químicos de uso altamente especializado, productos farmacéuticos, polímeros, etc [18].

El modelo del reactor batch a ser utilizado como ejemplo en esta investigación consiste en una reacción exotérmica, irreversible y de primer orden, del tipo A => B => C, donde A es el reactante, B es el producto principal y C es el producto secundario no deseado. El reactante ha sido previamente cargado y mezclado en el reactor. Para iniciar la reacción de la mezcla se inyecta vapor en el interior de la chaqueta. Esto eleva la temperatura de la mezcla hasta alcanzar un valor límite. Una vez alcanzado dicho valor, se cierra la válvula de inyección de valor y se regula la temperatura de la reacción mediante la apertura de la válvula de agua fría [24]. Una descripción gráfica del proceso se muestra en la figura 2.18.

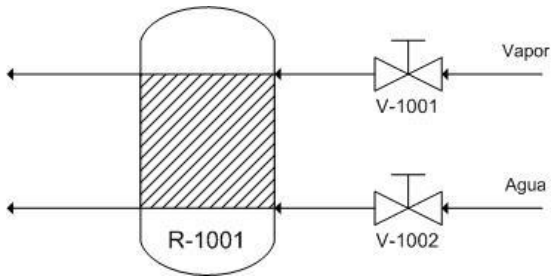


Figura 2.18. Reactor Batch.

El objetivo de control es la temperatura del reactor manipulando la apertura de las válvulas de vapor y agua que entran a la chaqueta. El modelo matemático que describe la dinámica del proceso, así como la descripción de cada término y el valor de los mismos se muestra en el apéndice A [24].

2.4.5. Horno

Un horno de proceso es un intercambiador de calor de fuego dirigido que usa gases calientes de combustión para elevar la temperatura de una alimentación que fluye a través de un banco de tubos a través del horno. Este tipo de equipos se utilizan para elevar la temperatura de fluidos por encima de los 300 °C, con el objetivo de preparar el reactivo de alguna reacción. Son usados en refinerías, plantas de gas, petroquímicas, plantas fertilizantes, etc [23].

El modelo del horno a ser utilizado como ejemplo para esta investigación consiste en un horno de proceso de 1 x 1,25 x 2 m utilizado para calentar aceite utilizando metano como gas combustible. En la figura 2.19 se muestra una descripción gráfica del proceso [25].

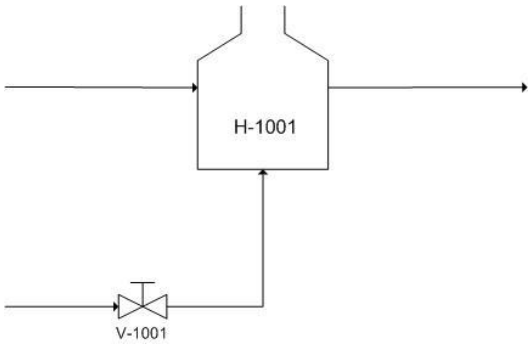


Figura 2.19. Horno de proceso.

El objetivo de control es la temperatura de salida del aceite manipulando la apertura de la válvula de gas combustible. El modelo matemático que describe la dinámica del proceso, así como la descripción de cada término y el valor de los mismos se muestra en el apéndice A [25].

CAPÍTULO 3
MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se explica en líneas generales los métodos y pasos realizados para la configuración de los instrumentos y del Stardom, el desarrollo de la simulación de los procesos, la elaboración de las lógicas de control y la integración de los sistemas.

3.1. Elaboración de planos y lista de materiales

Como primera etapa de este proyecto se elaboró una lista de materiales con el objetivo de documentar lo necesario para el transporte y montaje del Demo para las demostraciones y para futuros usos. La lista de materiales se muestra en el capítulo 4.

Se elaboraron dos planos con el objetivo de demostraciones del Stardom FCN-RTU:

- Diagrama de conexionado de E/S analógicas.
- Diagrama de conexionado de E/S digitales.

Los planos realizados se muestran en el Apéndice B.

3.2. Programación de los equipos

3.2.1. Desarrollo de la simulación de procesos

Para las pruebas y demostraciones a realizar, se desarrollaron los modelos planteados en el programa Simulink con el objetivo de crear una simulación matemática del proceso, en el cual toda la información para el control y registro sería comunicada vía OPC al Stardom. Los modelos desarrollados de los sistemas a lazo abierto se muestran en el apéndice C en las figuras C.1 a C.6.

En dichas simulaciones se desarrollaron adicionalmente los lazos de control a implementar en el Stardom, para poder diseñar las estrategias de control para cada proceso y obtener los parámetros necesarios de control. Las estrategias de control que se implementaron se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Estrategias de control implementadas para los procesos simulados.

Proceso	Estrategia de control
Planta de neutralización	Control PID multivariable
Llenado de tanques 1	Control PID, feed-forward
Llenado de tanques 2	Control PID multivariable
Intercambiador de calor	Control PID
Reactor Batch	Control PID selectivo
Horno	Control PID, cascada

Una vez planteadas las estrategias de control se buscaron los parámetros de control para cada esquema. Esto se realizó de manera empírica, mediante observación de la respuesta temporal del sistema y obtención de una función de transferencia de primer o segundo orden que se aproximara a la respuesta del sistema y luego, utilizando la herramienta SISOTool de MATLAB, diseñar el controlador a partir del Lugar Geométrico de las Raíces (LGR). Los objetivos de control para todos los sistemas fueron:

- Error de estado estacionario nulo.
- Máximo pico menor a 20% o nulo.
- Disminuir el tiempo de estado estacionario al menor posible.
- Minimizar el ruido de existir.

Una vez diseñados los controladores éstos se probarían en la Simulink para verificar su eficacia y luego con esos parámetros elaborar las lógicas de control en el Stardom. Se compararía posteriormente el desempeño del controlador con respecto a los controladores simulados.

3.2.2. Elaboración de las lógicas de control

Antes de empezar con la elaboración del programa, el primer paso consiste en la configuración del controlador. Esto se hace mediante el programa Resource Configurator. Las configuraciones realizadas fueron las siguientes:

- Asignación de la dirección IP.
- Habilitar la opción de leer JAVA.

Una vez configurado el controlador, se pudo dar inicio a la programación de las lógicas con el uso del programa Logic Designer. Se tiene un POU (unidad de organización de programa) por cada proceso por separado. Cada POU fue programado con el lenguaje FBD, en el cual cada uno realiza la acción de control PID programada para cada caso por separado con el PID controller POU, sólo cuando se inicie la simulación en Simulink. La lógica programada consiste en lo siguiente:

1. Se envía una señal de encendido (ON) escrito vía OPC desde Simulink hasta Logic Designer para que inicie la simulación. Esto se hace para habilitar el modo automático del PID controller POU.
2. La variable de proceso (PV) es escrita vía OPC por la planta en Simulink y leída por el PID controller POU. El setpoint (SV) se asigna un valor inicial en Logic Designer para su posterior manipulación.
3. Los parámetros del PID controller POU son programados por separado antes de la simulación. Sólo el parámetro de PV es modificado a medida que progrese la simulación.
4. El PID controller POU realiza la acción de control PID programada y tiene como salida la variable manipulada (MV).
5. La MV es leída vía OPC en Simulink y es introducida a la planta.
6. Se realizan los cálculos en Simulink y tiene como salida la PV y se repite el procedimiento. En cierto momento puede haber variaciones de la SV para verificar el comportamiento del controlador.

En el Apéndice D se pueden observar las lógicas de control configuradas. Finalizado el proceso de configuración de lógicas de control se procedió a la descarga de las mismas en el controlador.

3.2.3. Diseño y configuración de la HMI

Una vez configuradas las lógicas en el programa Logic Designer, se dio inicio al diseño del HMI utilizando el Graphic Portafolio de InfoWell. El HMI consiste en una página web en donde se puede observar un despliegue montado de varias imágenes tipo .BMP, con su etiqueta indicando el nombre del equipo, información numérica de las variables importantes y, en las pruebas que requiera controlar nivel, una barra que representa el nivel de su correspondiente tanque. Las imágenes, barras y valores numéricos tienen la característica de cambiar el color en caso de llegar a una situación de alarma, cambiando a color azul en caso de alarma de baja y a

color rojo en caso de alarma de alta. Adicionalmente cada página web tiene una etiqueta llamada "Descripción", en la cual al hacer clic se muestra una descripción breve del proceso a visualizar. Inclusive se creó una página llamada Menú la cual permite navegar entre las páginas Web que muestran cada proceso. Para configurar el HMI es necesario descargar la información del controlador en el Graphic Tool y luego asignar cada parte de información numérica, barra e imagen a la variable deseada, también editando los límites superiores e inferiores y los cambio de color necesarios. Por último fue necesario descargar el despliegue al Stardom para su posterior visualización. Los despliegues se muestran en el apéndice E. Adicionalmente, gracias a que se realizaron las simulaciones en MATLAB, se crearon registros para ver la respuesta del controlador y de las variables de proceso. Dichos registros serán mostrados en el capítulo 4.

3.3. Configuración de instrumentos

Con el fin de realizar pruebas y demostraciones con el Stardom FCN-RTU se utilizó en total tres instrumentos los cuales serían conectados al controlador mediante distintas maneras y serían configurados de manera independiente. Los instrumentos utilizados se describen a continuación.

3.3.1. Transmisor de presión diferencial Yokogawa EJX110A

El transmisor de presión diferencial EJX110A marca Yokogawa consta de un sensor de cristal solicitado resonante y es adecuado para medir flujos de líquido, gas o vapor así como nivel de líquido, densidad y presión. El transmisor tiene una señal de salida de 4 a 20 mA DC correspondiente a la presión diferencial medida. Tiene alta exactitud y puede también medir presión estática, la cual puede ser monitoreada mediante comunicación HART o BRAIN. Posee adicionalmente protocolos de Foundation Fieldbus y Profibus. Otras funcionas claves incluyen una respuesta rápida y configuración y diagnósticos remotos de alarmas de alta y baja. Una imagen del transmisor se puede ver en la figura 3.1 [26]. Este instrumento fue configurado de fábrica bajo las siguientes especificaciones:

- Unidad de medición: psi.
- Alarma de alta: 8 psi.
- Alarma crítica de cápsula: 16 psi.

El método de conexionado del instrumento al Stardom FCN-RTU se muestra en el diagrama de conexionado de E/S analógicas en el apéndice B.



Figura 3.1. Transmisor de presión difecencial EJX110A.

Para poder recibir la información se configuró una lógica en Logic Designer que permite leer la información de los módulos de E/S integrados en el Stardom FCN-RTU, la cual se puede ver en el apéndice C, denominada Instrument. De igual manera se realizó un despliegue sencillo en InfoWell para poder ver la variable medida por el transmisor, la cual puede verse en el apéndice D.

3.3.2. Transmisor y analizador de pH y conductividad Thermo Scientific Orion 2100

El transmisor y analizador de pH/conductividad Orion 2100 provee medidas exactas y confiables en medidas de agua ultra pura así como en ambientes industriales más rudos. Permite configuraciones de canales único o dual y tienen disponible con una terminal de comunicación digital. Estos transmisores vienen en conjunto con electrodos para medir pH, conductividad y compensación de temperatura. Tienen aplicaciones en mercados de generación de energía, pulpa y papel, embotellamiento de agua y tratamiento de aguas. Puede ser utilizado sólo como analizador pero su capacidad de transmisor le permite ser utilizado para aplicaciones de control. Es de fácil calibración y posee alarmas configurables de alta y baja. Una imagen del transmisor y analizador se puede ver en la figura 3.2 [27]. Este instrumento fue calibrado bajo las siguientes especificaciones:

- Número de canales: 1
- Unidad de medición: pH.
- Rango: 0 a 14
- Alarma de alta: 10

- Alarma de baja: 4



Figura 3.2. Transmisor y analizador de pH/conductividad Orion 2100.

El método de conexionado del instrumento al Stardom FCN-RTU se muestra en el diagrama de conexionado de E/S analógicas en el apéndice B.

Para poder recibir la información se configuró una lógica en Logic Designer que permite leer la información de los módulos de E/S integrados en el Stardom FCN-RTU. Esta lógica fue la misma realizada para el transmisor de presión, denominada Instrument, la cual puede verse en el apéndice C. De igual manera se realizó un despliegue sencillo en InfoWell para poder ver la variable medida por el transmisor, la cual puede verse en el apéndice D.

3.3.3. Transmisor de temperatura inalámbrico Yokogawa YTA510

El transmisor de temperatura inalámbrico YTA510 es una parte del sistema de instrumentación inalámbrica marca Yokogawa, que consiste adicionalmente del Access Point YFGW510 y del Management Station YFGW410. El transmisor consta de dos entradas analógicas de temperatura de sensores configurables, los cuales pueden ser escogidos entre RTD de PT100, PT200 y PT500 y termocúpulas B, E, J, K, N, R, S, T, una antena de comunicación de 2 db y una pantalla donde muestra el valor medido en porcentaje con respecto al límite superior configurado. El transmisor es configurable mediante el estándar ISA100, mediante el cual primero se configura con un sensor infrarojo y luego, una vez establecida la comunicación entre los equipos, se puede configurar vía inalámbrico. La fuente de alimentación del transmisor son baterías de cloruro de litio-tionilo, con un tiempo de vida de aproximadamente 6 años.

El Access Point es un equipo que recibe la información inalámbrica de los transmisores y transmite la información vía Ethernet al Management Station. El Management Station es el

equipo que recibe la información y permite la configuración de la red inalámbrica sobre la cual se realiza la comunicación de información. Adicionalmente este equipo permite realizar un monitoreo de la comunicación. Tanto la configuración y el monitoreo se realiza mediante Internet Explorer con una PC conectándose al Management Station vía Ethernet. La información recibida la transmite posteriormente mediante comunicación Modbus a otro equipo de control o supervisorio, en este caso, el Stardom FCN-RTU. Una imagen del sistema inalámbrico se puede ver en la figura 3.3 [28] [29]. El transmisor fue configurado bajo las siguientes especificaciones:

- Unidad de medición: °C
- Tipo de sensor: PT100
- Rango: 0 a 200 °C.

El método de conexionado del sistema de instrumentación inalámbrica con el Stardom FCN-RTU consistió en un conexionado vía Ethernet entre el Management Station y el controlador, para comunicar la información mediante comunicación Modbus TCP/IP. Para realizar la correcta lectura de la información recibida por el transmisor y realizar un chequeo de transmisión de información se configuró una lógica en Logic Designer denominada MODBUS. De igual manera se realizó un despliegue sencillo en InfoWell para poder ver la variable medida por el transmisor, la cual puede verse en el apéndice D.

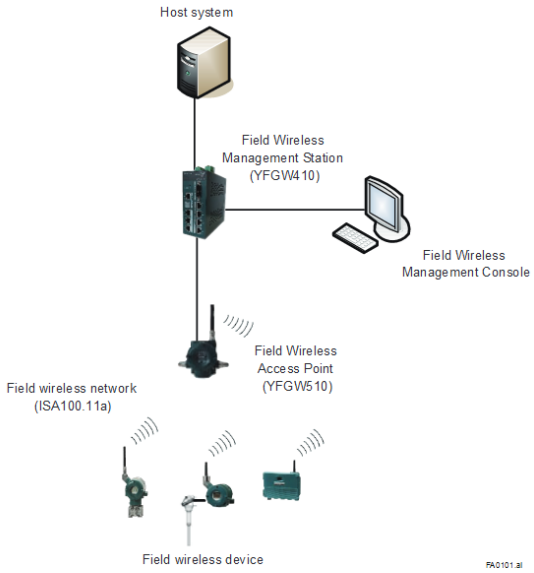


Figura 3.3. Sistema de instrumentación inalámbrico

CAPÍTULO 4
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se describen los resultados obtenidos del proyecto y sus discusiones. La lista de materiales y planos de conexionado, la configuración de los instrumentos y la integración de Matlab y Stardom, junto con los resultados de las simulaciones realizadas y el diseño y configuración de la interfaz hombre-máquina (HMI).

4.1. Lista de materiales y planos

La lista de materiales utilizados en el proyecto se muestra en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Lista de materiales.

				Dimensiones (mm)		
Ítem	Cantidad	Descripción	Modelo	Ancho	Alto	Profundidad
1	1	STARDOM FCN-RTU	NFBU050-S15	283	131	171
1.1	1	Base Module	NFBU050-S15	283	131	24,7
1.2	1	CPU Module	NFCP050-S15	68	130	142,5
1.3	1	Power Supply Module	NFPW426-50	49,7	130	146,3
1.4	3	Dummy Cover	NFDCV01	32	129	19,7
1.5	2	MIL Connector Terminal Block (40 Pole Plug Types, M3.5) for Analog and Digital I/O	TAS40-0N	180	55	50,8
1.6	2	MIL Connector Cable (40 Pole Plug Types) for Terminal Block 2m	KMS40-S020	2000	X	X
2	1	Sistema de instrumentación inalámbrica Yokogawa	X	X	X	X
2.1	1	Field Wireless Access Point	YFGW510	140	228	150
2.2	1	Temperature Transmitter; Wireless Comunication	YTA510	140	248	191
2.3	1	Field Wireless Management Station	YFGW410	140	80	174

2.4	1	Battery pack assemby Battery case, Lithium-thionyl chloride batteries	F9090FD	X	X	X
3	1	Transmisor y analizador de pH/conductividad Thermo Scientific	Orion 2100	X	X	X
3.1	1	Flow Cell	Orion 2001FC			
3.2	1	Electrodo de proceso de combinación de pH	ROSS	12	120	12
3.3	1	Sonda de temperatura	Orion ATC	5	117	5
3.4	1	Transmisor y analizador	Orion 2100	144	186	144
4	1	Transmisor de presión diferencial Yokogawa	EJX110A	115	175	130
4	1	Power Supply Unit Phoenix Contact	TRIO - PS/1AC/24DC/5	40	130	115
5	1	Riel DIN		1200	X	X
6	22	Borneras Simples		7	58	55
7	1	Cables de conexión		2500	X	X

Esta lista de materiales se realizó con el propósito de un fácil manejo de los equipos en cuanto al transporte y montaje del Demo.

El conexionado de los instrumentos no inalámbricos analógicos con el Stardom FCN-RTU se puede observar en el plano realizado mostrado en el apéndice B en la figura B.1. En este plano se muestra un tipo de conexionado a cuatro hilos, donde la fuente de poder Phoenix Contact alimenta a los instrumentos y a su vez los instrumentos están conectados a los terminales de entrada analógica AI (A18-B18 y A19-B19). Se puede observar adicionalmente que en los puertos AI hay una resistencia en paralelo a la conexión. Esta resistencia es para disminuir la corriente de alimentación, puesto que los instrumentos tienen una corriente de alimentación de 4-20 mA DC y el terminal board posee un rango de voltaje de 1-5 V DC. Por lo tanto, es necesario utilizar resistencias de 250Ω para cumplir con los requisitos del conexionado. El conexionado de salidas analógicas AO (A2-B2 y A3-B3) es un conexionado a dos hilos, en el cual se alimenta directamente a los elementos de acción final desde el Stardom mediante el terminal board. El

terminal board está conectado al Stardom mediante los cables conectores MIL, por lo que los puertos A1 y B1 están para la alimentación interna de las AO.

El conexionado de los instrumentos digitales con el Stardom FCN-RTU se puede ver en el plano realizado mostrado en el apéndice B en la figura B.2. Para este conexionado se utilizaron los tres relés que trae por defecto el transmisor de pH, los cuales se tienen configuradas alarmas de alta, de baja y de error. El conexionado entre los relés y el terminal board es de un hilo, en el cual la señal digital se envía desde el transmisor hasta los terminales de entrada digital DI (A2, A3 y A4). De igual manera el conexionado de salidas digitales DO (B2 y B3) es un conexionado a un hilo, en el cual se envía la señal directamente hacia los elementos de acción digital, como por ejemplo un shutdown de proceso.

4.2. Configuración de los instrumentos

A cada instrumento suministrado se les realizó su configuración independientemente, para su posterior demostración del funcionamiento a distintos clientes.

4.2.1. Transmisor de presión diferencial Yokogawa EJX110A

A este transmisor de presión diferencial no se le realizó ninguna configuración, se utilizó la configuración de fábrica. Este transmisor de presión se utilizó como parte de una demostración para verificar su funcionamiento ante valores de presión por encima de los valores de alarma de fábrica. Se realizó el conexionado al Stardom FCN-RTU en donde se mostraba el valor en % del valor de la diferencia de presión y el valor verdadero se veía en la pantalla del transmisor. Como resultado se obtuvo que el transmisor mostrara las alarmas configuradas de fábrica en su pantalla, mostrando adicionalmente el valor de la diferencia de presión, la cual era la preocupación inicial del cliente.

4.2.2. Transmisor y analizador de pH y conductividad Thermo Scientific Orion 2100

Este transmisor de pH se ensambló desde empaque y se realzó el conexionado de los sensores de pH y conductrividad y las salidas analógicas y digitales al Stardom FCN-RTU. Este transmisor se utilizó como parte de una presentación para ver la integración con el FCN-RTU y mostrar la información en un despliegue gráfico, con las alarmas de los relés configuradas previamente. Esta presentación también se incluyó el ensamblaje y calibración del instrumento, la cual fue dedicada especialmente al departamento de AIT de la empresa. Adicionalmente se realizó la

documentación necesaria que muestra el paso a paso del ensamblaje, configuración, conexionado y calibración del transmisor.

4.2.3. Sistema de instrumentación inalámbrico Yokogawa

El sistema de instrumentación inalámbrico fue configurado con todos los equipos reiniciados para estar en estado de fábrica. Se realizó la configuración individual de los tres instrumentos: el transmisor de temperatura YTA510, el Access Point YFGW510 y el Management Station YFGW410. Una vez configurados los tres instrumentos se obtuvo una red funcional en la cual los instrumentos transmitían la información necesaria sin problemas de comunicación. La conexión entre los equipos se puede ver en la figura 4.1.

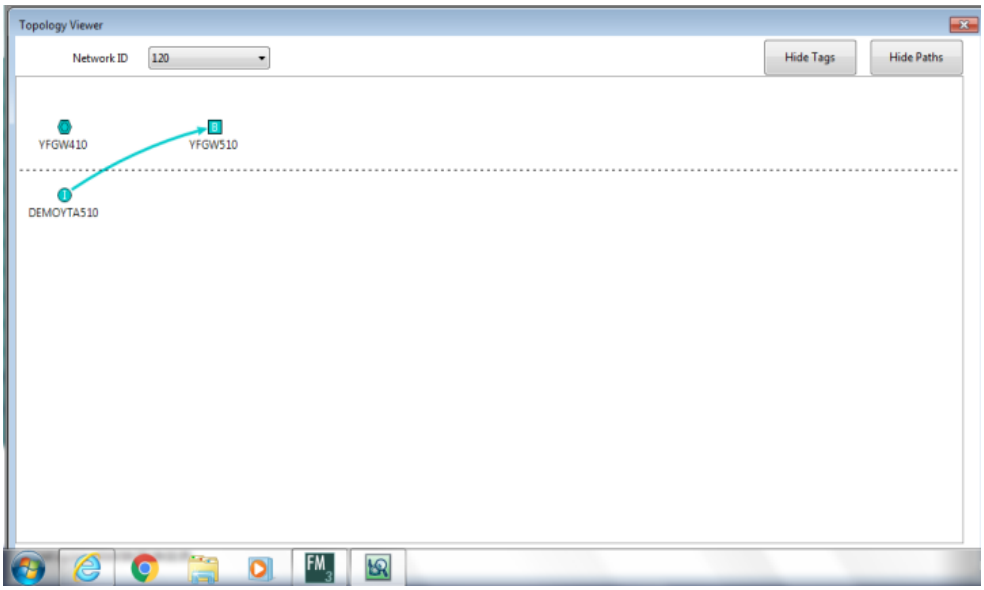


Figura 4.1. Conexión inalámbrica entre los instrumentos del sistema de conexión inalámbrico Yokogawa.

Una vez configurada la red de operación del sistema inalámbrico, los valores de temperatura captados por el transmisor se podían observar en el despliegue gráfico mostrado por InfoWell, mostrado en el apéndice D en la figura D.10. Adicionalmente se configuró el despliegue para que se pudiese observar tiempo restante de la batería del transmisor inalámbrico.

El sistema de instrumentación inalámbrico se utilizó como parte de una presentación para ver el funcionamiento del sistema y su integración con el Stardom FCN-RTU. Adicionalmente se explicó la metodología de la configuración realizada a cada instrumento, la cual fue explicada al departamento de AIT de la empresa. Por último se realizó la documentación necesaria que

explica la metodología de la configuración, las ventajas y desventajas del sistema y las potencialidades en la industria, así como la integración al FCN-RTU.

4.3. Integración entre MATLAB y STARDOM

Como parte fundamental del objetivo principal del proyecto, se realizó una integración entre MATLAB y el Stardom FCN-RTU, con el objetivo de mostrar ante clientes las potencialidades de control de procesos del FCN-RTU ante procesos sencillos y típicos en la industria. La integración entre ambas herramientas se logró mediante comunicación OPC gracias a la disponibilidad de un servidor OPC que incluye el controlador. Para realizar la integración fue necesario hacer varias configuraciones en la PC donde estaría incluido MATLAB a nivel de políticas y seguridad. Las configuraciones se lograron gracias a un instructivo de Yokogawa que muestra las integraciones OPC del Stardom con otros programas, pertenecientes o no a Yokogawa. Una vez realizada la configuración de la PC se pudo verificar la conexión de MATLAB con el servidor gracias a un Toolbox instalado llamado "OPC Data Access Explorer". La ventana principal del Toolbox donde se verifica la conexión con el servidor OPC se muestra en la figura 4.2.

Para la realización de la simulación de los procesos planteados se utilizó el paquete Simulink de MATLAB, el cual permite realizar simulaciones dinámicas de procesos. Simulink también cuenta con bloques para integración OPC. Cuenta con 4 bloques en total, los cuales se muestran en la figura 4.3.

- OPC Configuration: Permite establecer la conexión OPC entre Simulink y el Stardom.
- OPC Quality Parts: Permite verificar la calidad de la comunicación de los ítems en el servidor OPC.
- OPC Read: Permite la lectura de un ítem OPC en el servidor.
- OPC Write: Permite la escritura de un ítem OPC en el servidor.

La declaración de las variables OPC se hace en la lógica de control. Para ello solo es necesario indicar que una variable será utilizada mediante comunicación OPC confirmando un check en el recuadro OPC de la variable, como se muestra en la figura 4.4.

La razón por la que las variables no vienen marcadas con el Check OPC desde un que son creadas es debido a que una cantidad muy grande de variables hace más lento la comunicación

OPC entre las herramientas. Esto, por ende, puede afectar el comportamiento del control del proceso, desmejorando el tiempo de respuesta por parte del controlador.

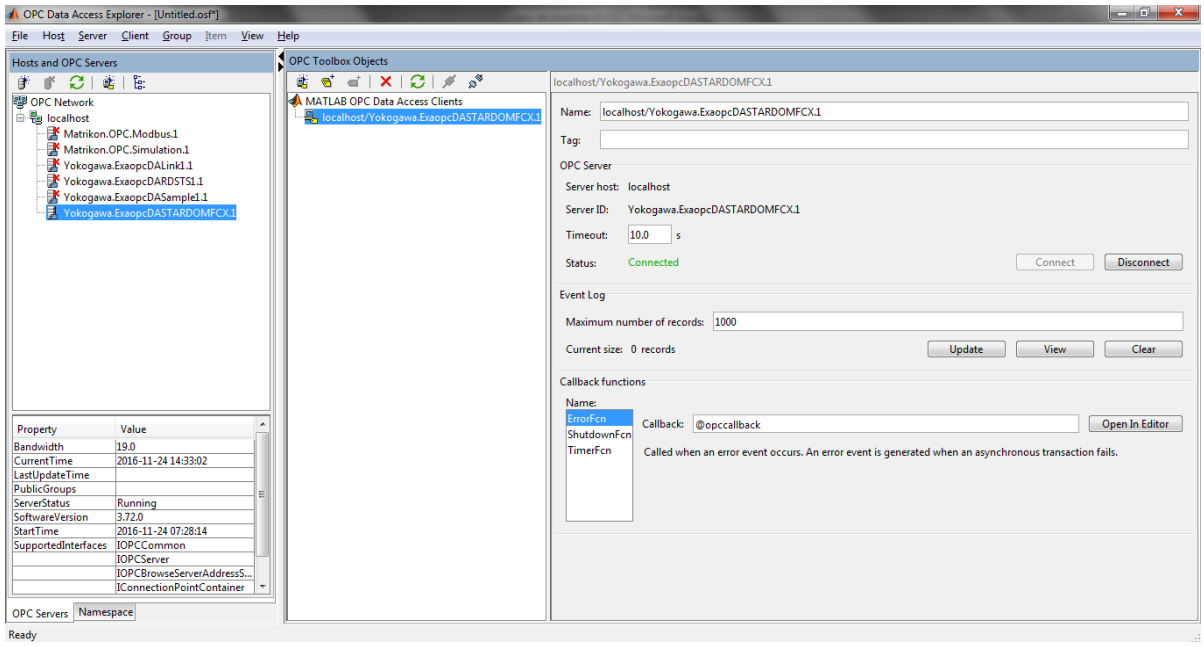


Figura 4.2. Ventana principal del Toolbox OPC Data Access Explorer.

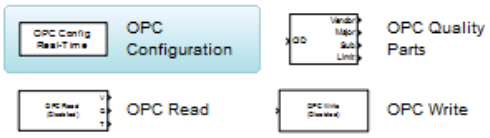


Figura 4.3. Bloques de integración OPC disponibles en Simulink.

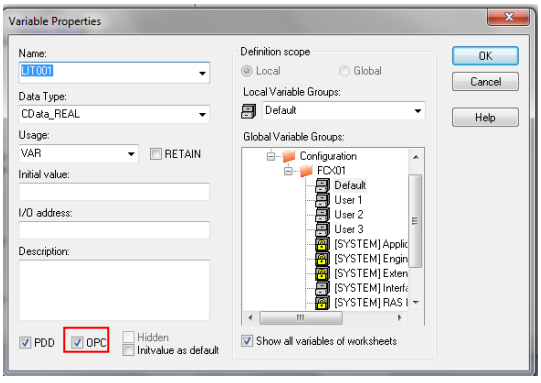


Figura 4.4. Declaración de variable OPC en Logic Designer.

Una vez declaradas las variables OPC éstas se pueden ver desde Simulink cuando se utilizan los bloques OPC Read u OPC Write. Cada variable OPC se muestra seccionada en cada POU creado,

para que exista la posibilidad de crear varias variables con el mismo nombre en distintos procesos. Un ejemplo de esta representación se muestra en la figura 4.5.

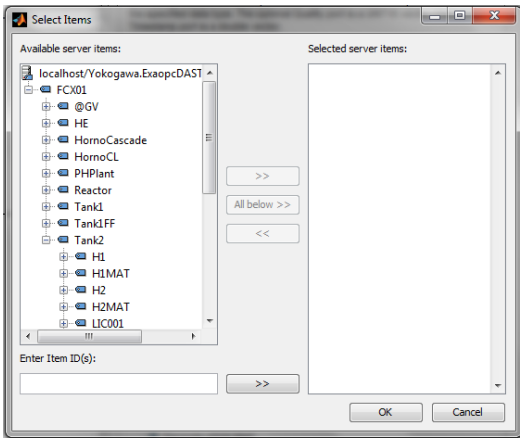


Figura 4.5. Visualización de las variables OPC desde Simulink.

En el apéndice C en las figuras C.13 hasta la figura C.19 se pueden ver los modelos construidos en Simulink con los bloques OPC necesarios para la integración. Se puede observar un patrón similar en todas las figuras, con el cual es que se logra por completo la integración.

- El bloque OPC Configuration siempre debe estar presente, puesto que este bloque es el que establece la comunicación del modelo con el servidor OPC.
- Las variables de entrada del modelo a controlar son introducidas mediante un bloque OPC Read. Esto se debe a que la variable manipulada (MV) es la variable de salida del bloque de control de la lógica de control.
- Las variables de salida del modelo son introducidas mediante un bloque OPC Write. Esto se debe a que la variable de proceso (PV) es introducida al bloque de control en la lógica de control. Otras variables que no son PV son también introducidas al Stardom con el objetivo del monitoreo de dichas variables y su representación gráfica en el InfoWell.
- Todos los procesos tienen un bloque de entrada ON que es introducido a un bloque OPC Write. Esto se debe a que al iniciar la simulación del proceso, ese bloque cambia el modo del controlador a modo automático mediante una lógica en lenguaje de escalera (LD). Se puede ver en el apéndice D en las figuras D.1 hasta la figura D.10 que en todas las lógicas de control se encuentra una lógica de escalera sencilla que hace lo descrito anteriormente. El objetivo de esta programación es para que la acción de control se realice una vez iniciada la simulación, de lo contrario el controlador realizará su lógica de control con las variables iniciales que se encuentran programadas.

- Todos los procesos tienen un bloque de entrada REF que es introducido a un bloque OPC Write. Este bloque REF es el que designa el setpoint (SV) del proceso. El propósito de este bloque se mostrará más adelante en este capítulo.

4.4. Configuración de lazos de control

En esta sección se describen las configuraciones realizadas a las lógicas de control en Logic Designer y se muestra adicionalmente una comparación entre la respuesta del Stardom FCN-RTU con el controlador teórico diseñado en Simulink para cada proceso. Cada proceso fue simulado con los valores iniciales en 0 para realizar una simulación del arranque del proceso. Adicionalmente cada proceso tiene una perturbación del SV en un tiempo predeterminado para probar la respuesta del controlador ante un cambio brusco del SV.

En el apéndice D se muestran las lógicas de control diseñadas para cada proceso. En términos generales, la lógica de control consiste únicamente en utilizar una lógica de escalera que activa la acción del controlador y un bloque de control PID. En este bloque tiene como entrada la PV y salida la MV, sin embargo para su correcto funcionamiento es necesario modificar algunos parámetros. Esto se hace, como se muestran en las figuras D.1 a D.8, utilizando bloques MOVE, los cuales asignan valores a los parámetros. Los parámetros necesarios a modificar en las lógicas de control configuradas fueron los siguientes:

- P: Parámetro PB del algoritmo de control
- I: Parámetro TI del algoritmo de control.
- D: Parámetro TD del algoritmo de control.
- MH: Límite superior de la MV.
- ML: Límite inferior de la MV.
- PH: Valor de la PV para alarma de alta.
- PL: Valor de la PV para alarma de baja.
- MODE: Modo del controlador. False para automático y True para manual.
- AlarmStatus: Estatus de alarma: 0 para normal, 1 para alta y 2 para baja. Utilizado para la configuración del HMI.
- PV: Variable del proceso.
- SV: Valor del Setpoint.
- VN: Valor de la perturbación a controlar (Sólo para control Feed-Forward).

- CASV: Valor del Setpoint del lazo en cascada (Sólo para control en cascada).

Cada proceso está diseñado a ser visualizado en el HMI previamente programado, cuyos despliegues se encuentran en el apéndice E.

4.4.1. Planta de neutralización

La estrategia de control implementada para este proceso fue un control PID multivariable, cuyas PV son la altura (H) del tanque V-1003 y el pH del acetato de sodio manipulando el voltaje de las bombas P-1001 y P-1002 (V_1 y V_2) respectivamente. En la figura 4.6 se muestra un diagrama de bloques del proceso.

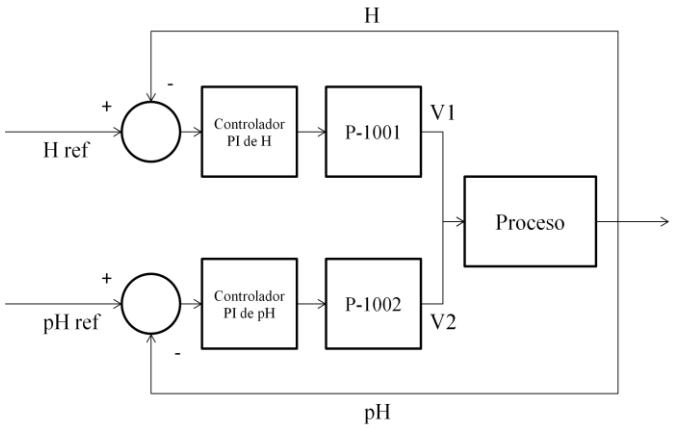


Figura 4.6. Diagrama de bloques del proceso de planta de neutralización.

En el apéndice C en la figura C.7 se muestra el esquema en Simulink del control PID multivariable aplicado al proceso con un par de controladores PI, mientras que en el apéndice C en la figura C.13 se muestra el esquema en Simulink del proceso integrado con el Stardom FCN-RTU que tiene programado la lógica mostrada en el apéndice D en la figura D.1. En dicha lógica se muestran dos controles PID, el primero denominado ZIC001 controla el pH, mientras que el segundo denominado LIC001 controla el nivel. Se realizó la simulación de ambos procesos y se obtuvo la respuesta de las PV mostrada en las figuras 4.7 y 4.8, mientras que la respuesta de las variables manipuladas (MV) se muestra en la figura 4.9.

En las figuras 4.7 y 4.8 se puede observar que las respuestas de las PV con el lazo de control de control programado con Stardom como en Simulink son muy similares, con la excepción de que el Stardom muestra una respuesta una respuesta más rápida que Simulink. En cuanto a la altura del tanque se muestra que ante el arranque del proceso se llega al estado estacionario en aproximadamente 50 segundos para ambos lazos de control y ante un cambio del SV se llega al

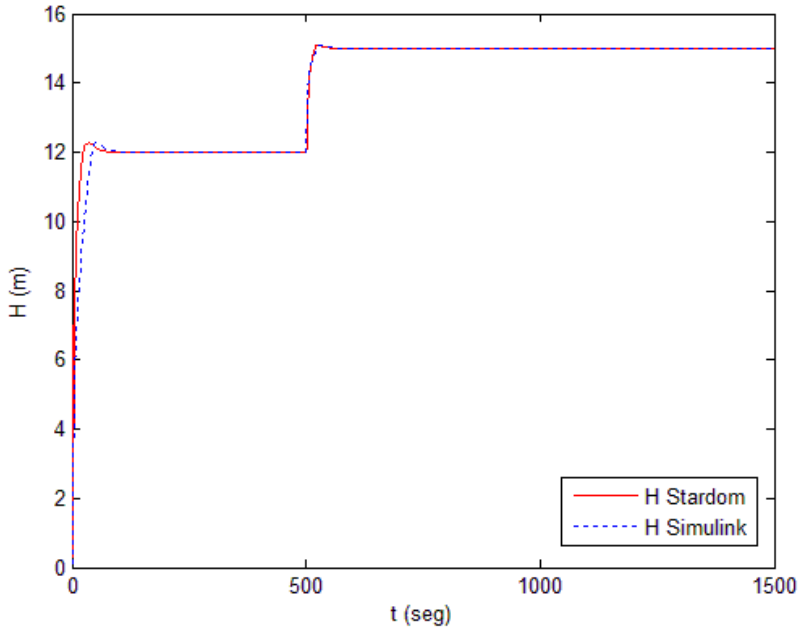


Figura 4.7. Respuesta de la altura del tanque V-1003 del proceso de planta de neutralización.

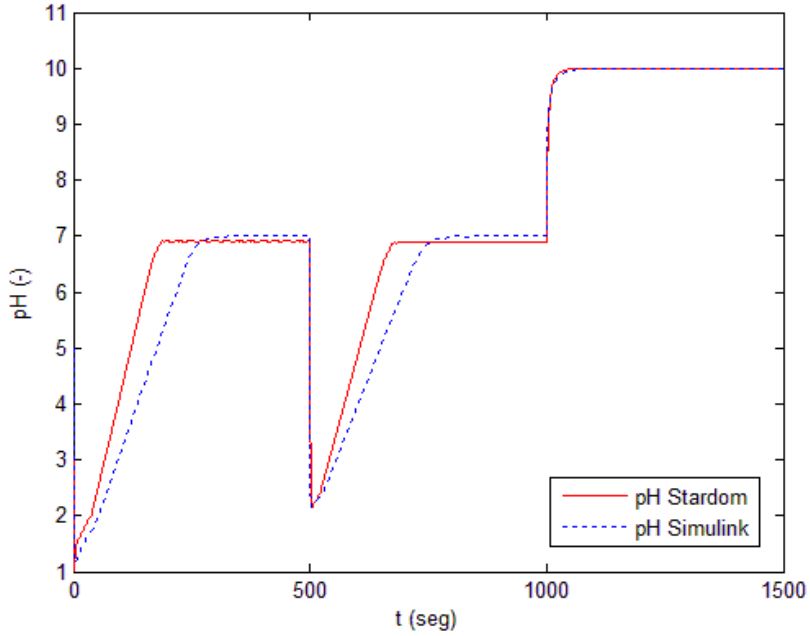


Figura 4.8. Respuesta del pH de ácido acético del proceso de planta de neutralización.

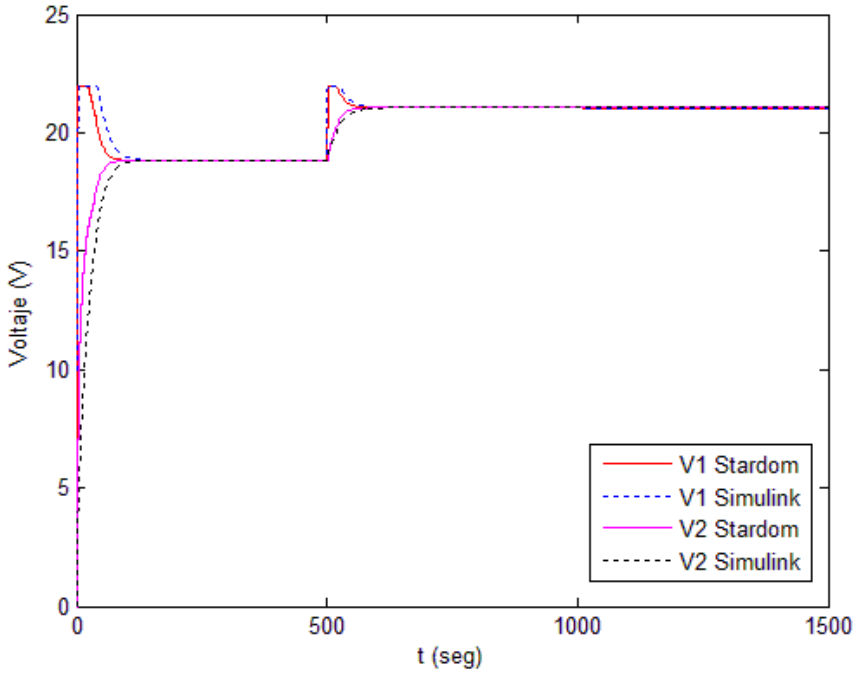


Figura 4.9. Respuesta del voltaje de las bombas P-1001 y P-1002 del proceso de planta de neutralización.

estado estacionario en aproximadamente 30 segundos. Por otra parte, en cuanto al pH se muestra una respuesta más diferenciada, en el cual el lazo de control por parte del Stardom alcanza el estado estacionario ante el arranque del proceso aproximadamente 100 segundos antes que el lazo de control de Simulink y ante una perturbación el lazo de control del Stardom se recupera en la misma diferencia de tiempo contra el lazo de control de Simulink, lo que muestra un mejor desempeño por parte del Stardom en comparación con el Simulink. Por otra parte se muestra que la altura no se ve afectada ante la variación del SV del pH como perturbación, lo que implica que ambos lazos de control operan correctamente, de modo tal que se regulan las MV para que el pH se regule al SV necesario, como se muestra en la figura 4.9. Adicionalmente en la misma figura se puede observar que la respuesta de la MV de los algoritmos de control de Stardom y Simulink no muestra ninguna irregularidad y un comportamiento similar entre ambos lazos de control, lo que muestra un desempeño eficiente del Stardom ante el proceso. La discusión de estos resultados se realizará más adelante en este capítulo.

4.4.2. Llenado de tanques

4.4.2.1. Arreglo 1

Las estrategias de control implementadas para este proceso fueron un control PID en retroalimentación simple, cuya PV es la altura del tanque V-1003 manipulando el voltaje de la bomba P-1001, y un control Feed-Forward, con el cual se propone a disminuir una perturbación causada por un aumento súbito en el voltaje de la bomba P-1002. En la figura 4.10 se muestra un diagrama de bloques del proceso.

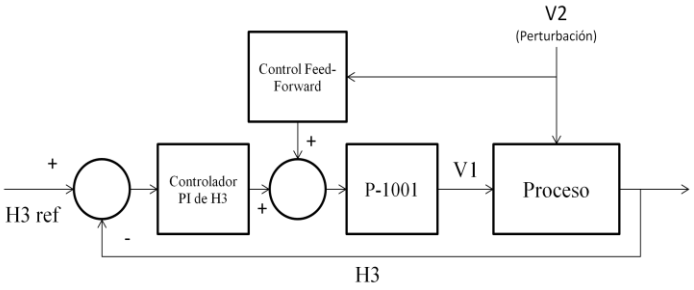


Figura 4.10. Diagrama de bloques del arreglo 1 del proceso de llenado de tanques.

En el apéndice C en la figura C.8 se muestra el esquema en Simulink del control PID aplicado al proceso con un controlador PI, mientras que en el apéndice C en la figura C.14 se muestra el esquema en Simulink del proceso integrado con el Stardom FCN-RTU que tiene programado las lógicas mostradas en el apéndice D en la figura D.2. y D.3, las cuales corresponden al control PID y Feed-Forward respectivamente. La diferencia entre ambas figuras es la asignación de valor a las variables VN y VNGain, las cuales asignan la entrada de la perturbación V2 y la manipulan, realizando el control Feed-Forward. Se realizó la simulación de ambos procesos y se obtuvo la respuesta de la PV mostrada en la figura 4.11 mientras que la respuesta de la MV se muestra en la figura 4.12. Ambas figuras muestran ambas estrategias de control.

En la figura 4.11 se muestra que la altura H con el lazo de control programado con Stardom como en Simulink muestra una respuesta muy similar ante el arranque del proceso, sin aproximadamente ninguna variación en la respuesta transitoria y llegando al estado estacionario en aproximadamente 200 segundos sin máximo pico. Por otra parte en a los 300 segundos se muestra un cambio del SV, en el cual ambos lazos de control muestran un desempeño similar llegando al SV en aproximadamente 100 segundos sin máximo pico. Sin embargo a los 500 segundos se muestra una perturbación en el sistema, ante la cual el control PID del Stardom

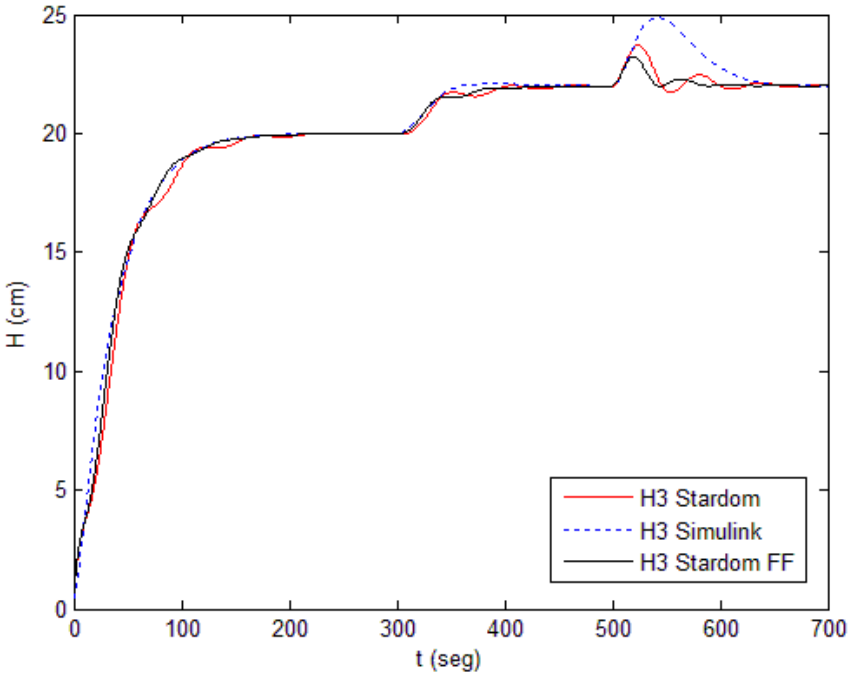


Figura 4.11. Respuesta de la altura del tanque V-1003 del proceso de llenado de tanques 1.

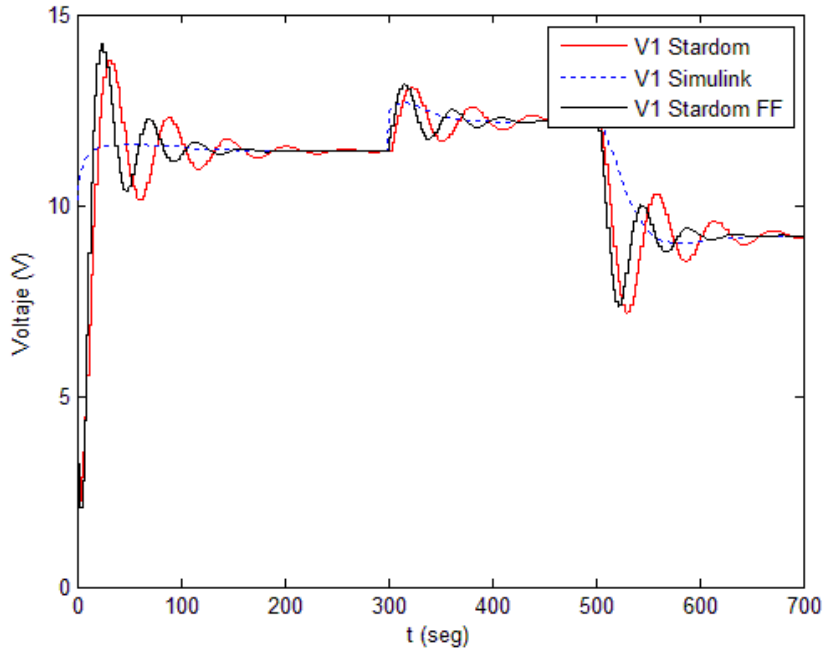


Figura 4.12. Respuesta del voltaje de la bomba P-1001 del proceso de llenado de tanques 1.

muestra una respuesta mejor ante la perturbación, regresando el PV a su valor objetivo en menos de 50 segundos, a diferencia del control PID de Simulink que logra el objetivo en al menos 100

segundos y elevando el PV en aproximadamente 20%. En la misma figura se muestra también la respuesta del lazo Feed-Forward programada en el Stardom, en la cual se observa un comportamiento similar ante el arranque y el cambio del SV en comparación con el lazo de control PID, sin embargo ante la perturbación se observa una mejor respuesta, en el cual se encuentra un pico menor y se retorna a su valor objetivo en un tiempo de aproximadamente 10 segundos menos. Esto muestra buen desempeño del Stardom ante el proceso, tanto con la lógica de control PID como con la lógica de control Feed-Forward.

Por otra parte se puede ver en la figura 4.12 la respuesta de la MV de los algoritmos de control de Stardom y Simulink. Se muestra que el Stardom muestra una señal de control poco estable ante el arranque del proceso, cambios del SV y perturbaciones, a diferencia de Simulink, tanto para el lazo de control PID como el lazo de control Feed-Forward. Este desempeño del MV afecta en menor proporción la respuesta de la PV, sin embargo es necesario vigilar la señal de control para mantener la seguridad de los elementos de acción final. La discusión de estos resultados se realizará más adelante en este capítulo.

4.4.2.2. Arreglo 2

La estrategia de control implementada para este proceso fue un control PID multivariable, cuyas PV son las alturas de los tanques V-1003 y V-1004 manipulando el voltaje de las bombas P-1001 y P-1002 respectivamente. En la figura 4.13 se muestra un diagrama de bloques del proceso.

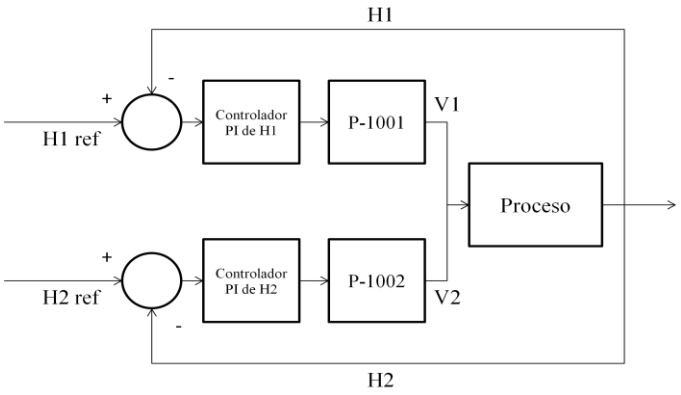


Figura 4.13. Diagrama de bloques del arreglo 2 del proceso de llenado de tanques.

En el apéndice C en la figura C.9 se muestra el esquema en Simulink del control PID multivariable aplicado al proceso con un par de controladores PI, mientras que en el apéndice C en la figura C.15 se muestra el esquema en Simulink del proceso integrado con el Stardom FCN-RTU que tiene programado la lógica mostrada en el apéndice D en la figura D.4. En dicha lógica

se muestran dos controles PID, el primero denominado LIC001 controla el nivel del tanque V-1003, mientras que el segundo denominado LIC002 controla el nivel del tanque V-1004. Se realizó la simulación de ambos procesos y se obtuvo la respuesta de las PV mostrada en la figura 4.14, mientras que la respuesta de las MV se muestra en la figura 4.15.

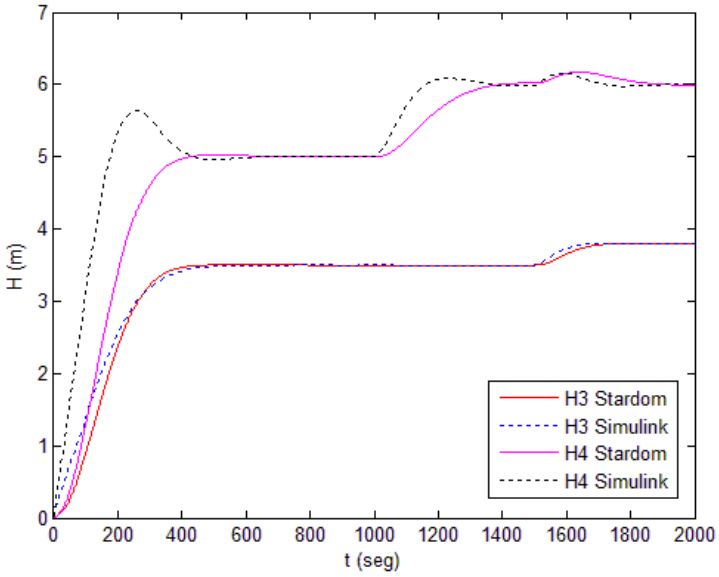


Figura 4.14. Respuesta de la altura de los tanques V-1003 y V-1004 del proceso de llenado de tanques 2.

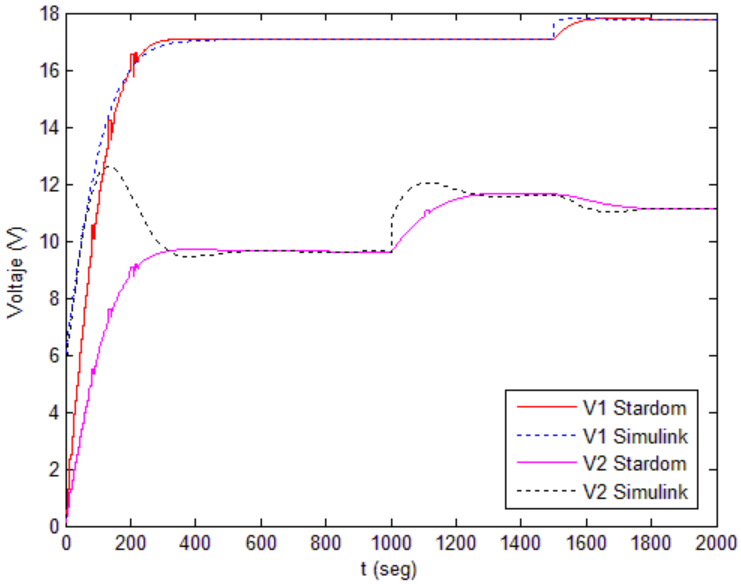


Figura 4.15. Respuesta del voltaje de las bombas P-1001 y P-1002 del proceso de llenado de tanques 2.

En la figura 4.14 se muestra que la altura H3 con el lazo de control programado en Stardom como en Simulink muestran una respuesta similar, obteniendo un tiempo en estado estacionario de aproximadamente 500 segundos y sin máximo pico, del mismo modo generando una respuesta similar ante la perturbación planteada. La diferencia más notable se muestra en la respuesta de la altura H4, en la cual se muestra una respuesta más eficiente por parte del Stardom en comparación con la lógica programada en Simulink, puesto que ésta presenta un máximo pico de aproximadamente 10% a diferencia de la respuesta del Stardom que no muestra máximo pico y ambas respuestas presentan un tiempo en estado estacionario similar. Del mismo modo se observa una respuesta similar ante cambios del SV, en la cual la respuesta del Stardom muestra una recuperación más rápida que la respuesta de Simulink. En la figura 4.15 se observa un comportamiento similar de las MV en comparación con las PV, en la cual la señal de control del Stardom logra estabilizarse en un tiempo menor que la señal de Simulink, sin embargo, en cuanto las MV, se muestra una respuesta un poco errática por parte de Stardom, sin embargo no afectando gravemente la PV ni tampoco pudiendo afectar el elemento de acción final. La discusión de estos resultados se realizará más adelante en este capítulo.

4.4.3. Intercambiador de calor

La estrategia de control implementada para este proceso fue un control PID por realimentación simple, cuya PV es la temperatura de salida del aceite de motor manipulando la apertura de la válvula V-1001 que permite el paso del flujo de refrigerante. En la figura 4.16 se muestra un diagrama de bloques del proceso.

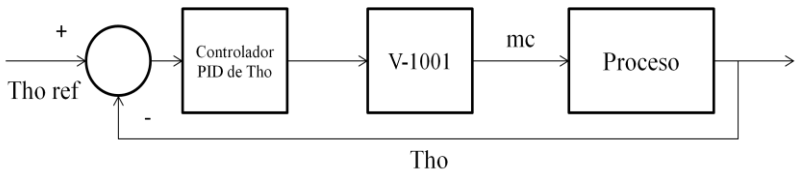


Figura 4.16. Diagrama de bloques del proceso de intercambiador de calor.

Se puede observar que para este proceso, a diferencia de los demás, se requiere un controlador de acción inversa. En el apéndice C en la figura C.10 se muestra el esquema en Simulink del control PID aplicado al proceso con un controlador PID, mientras que en el apéndice C en la figura C.16 se muestra el esquema en Simulink del proceso integrado con el Stardom FCN-RTU que tiene programado la lógica mostrada en el apéndice D en la figura D.5. La diferencia de esta

lógica en cuanto a las demás es la asignación del parámetro CTL_SW, el cual asigna la acción del controlador. Se realizó la simulación de ambos procesos y se obtuvo la respuesta de la PV mostrada en la figura 4.17, mientras que la respuesta de la MV se muestra en la figura 4.18.

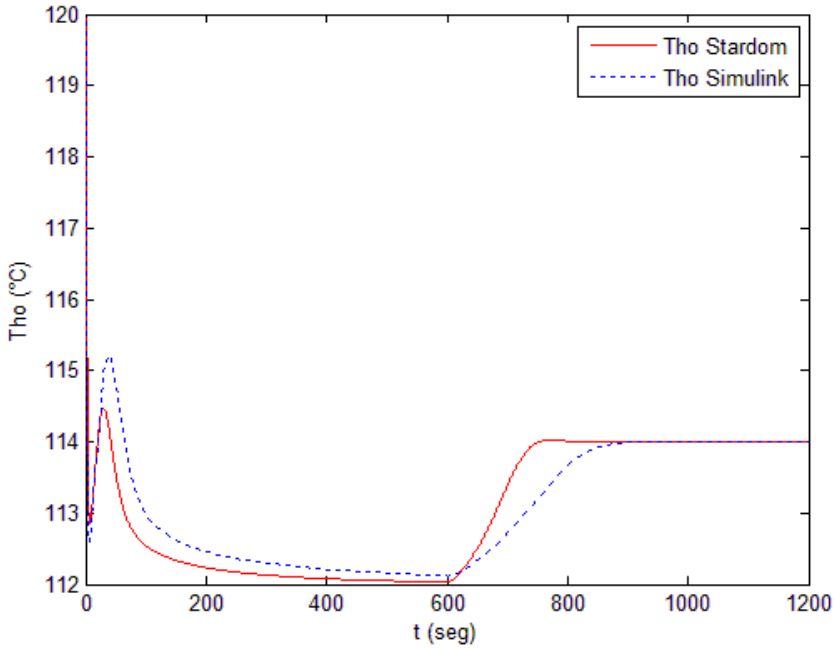


Figura 4.17. Respuesta de la temperatura Tho del proceso de intercambiador de calor.

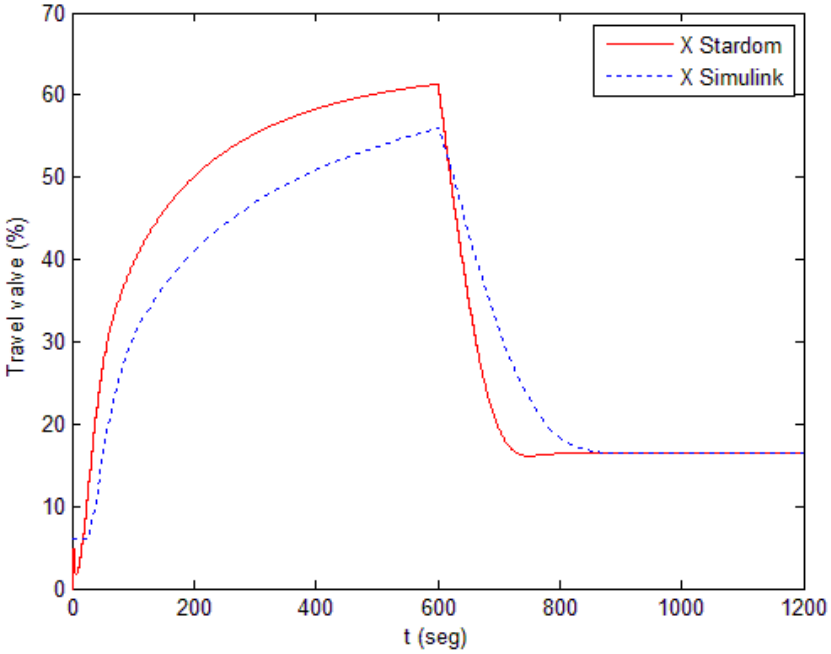


Figura 4.18. Respuesta de la apertura de la válvula del proceso de intercambiador de calor.

En la figura 4.17 se muestran respuestas similares por parte del Stardom y Simulink, con la excepción de que la respuesta por parte del Stardom muestra tener un tiempo de estado estacionario menor al de Simulink, de aproximadamente 100 segundos, lo cual muestra una respuesta mejor aunque sea en menor proporción. De igual manera se muestra una respuesta mejor ante cambios de SV por parte del Stardom y en la figura 4.18 se muestra una respuesta similar de la MV por parte del Stardom y de Simulink, correspondiendo a directamente a la respuesta de la PV. La discusión de estos resultados se realizará más adelante en este capítulo.

4.4.4. Reactor batch

La estrategia de control implementada para este proceso fue un control PID por realimentación selectiva, cuya PV es la temperatura de la mezcla reactiva manipulando la apertura de la válvula V-1001 que permite el paso del flujo de vapor. El proceso de reacción tiene una duración de aproximadamente 4 horas, momento en el cual la concentración de B empieza a disminuir y se debe terminar el proceso, enfriando la reacción abriendo la válvula de agua V-1002, utilizando un selector de casos. En la figura 4.19 se muestra un diagrama de bloques del proceso.

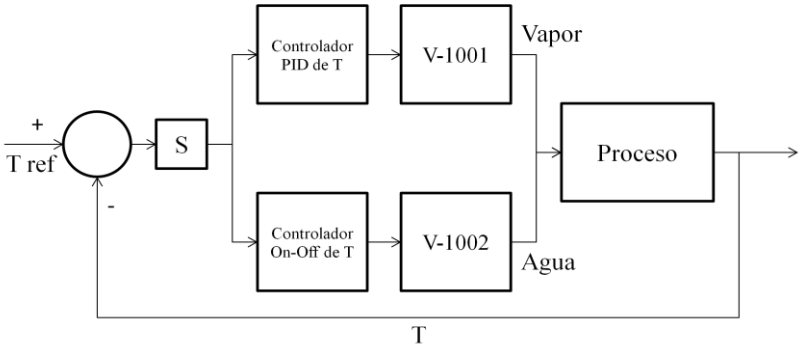


Figura 4.19. Diagrama de bloques del proceso de reactor batch.

En el apéndice C en la figura C.11 se muestra el esquema en Simulink del control PID selectivo aplicado al proceso con un controlador de ganancia unitaria, mientras que en el apéndice C en la figura C.17 se muestra el esquema en Simulink del proceso integrado con el Stardom FCN-RTU que tiene programado la lógica mostrada en el apéndice D en la figura D.6. Esta lógica, a diferencia de las demás, tiene programada un contador que abrirá por completo la válvula de agua en el momento que pasen las 4 horas y cerrando la válvula cuando la temperatura del reactor llegue a los 80 °F, realizando un control ON-OFF. Se realizó la simulación de ambos procesos y se obtuvo la respuesta de la PV mostrada en la figura 4.20 y las concentraciones de los

compuestos A, B y C en la figura 4.21, mientras que la respuesta de las MV se muestra en la figura 4.22.

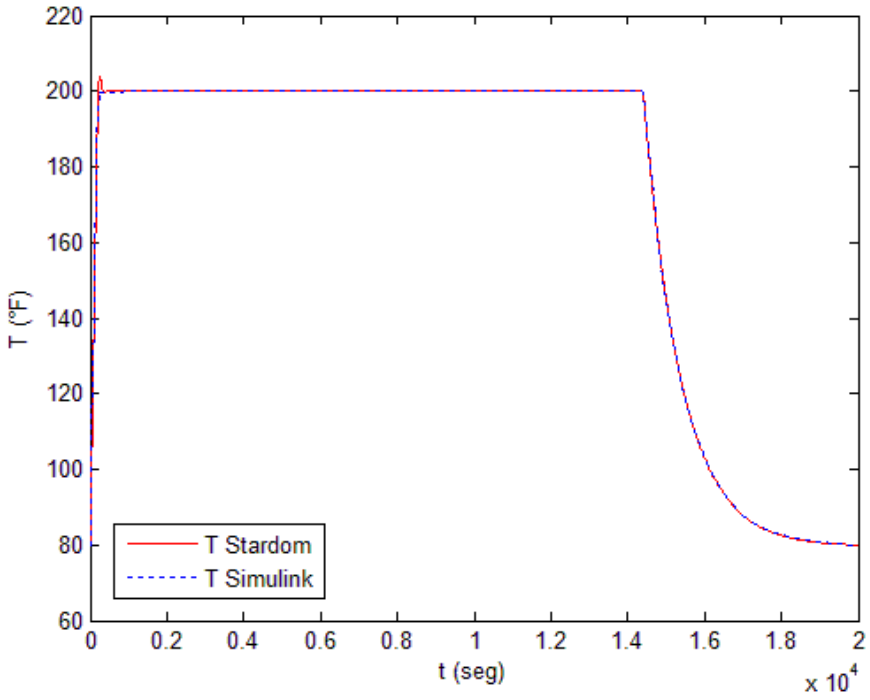


Figura 4.20. Respuesta de la temperatura del reactor R-1001 del proceso de reactor batch.

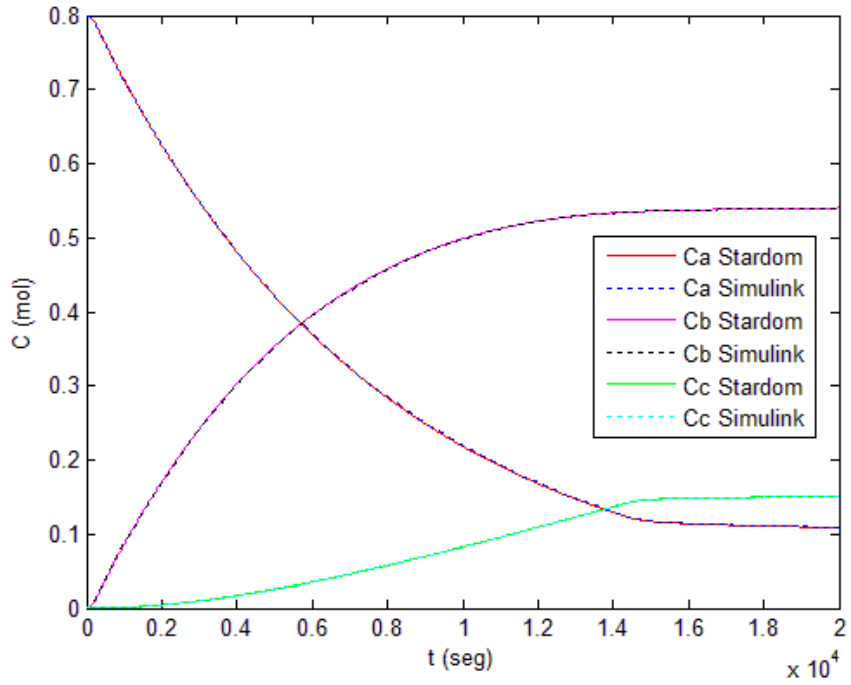


Figura 4.21. Respuesta de las concentraciones de A, B y C del proceso de reactor batch.

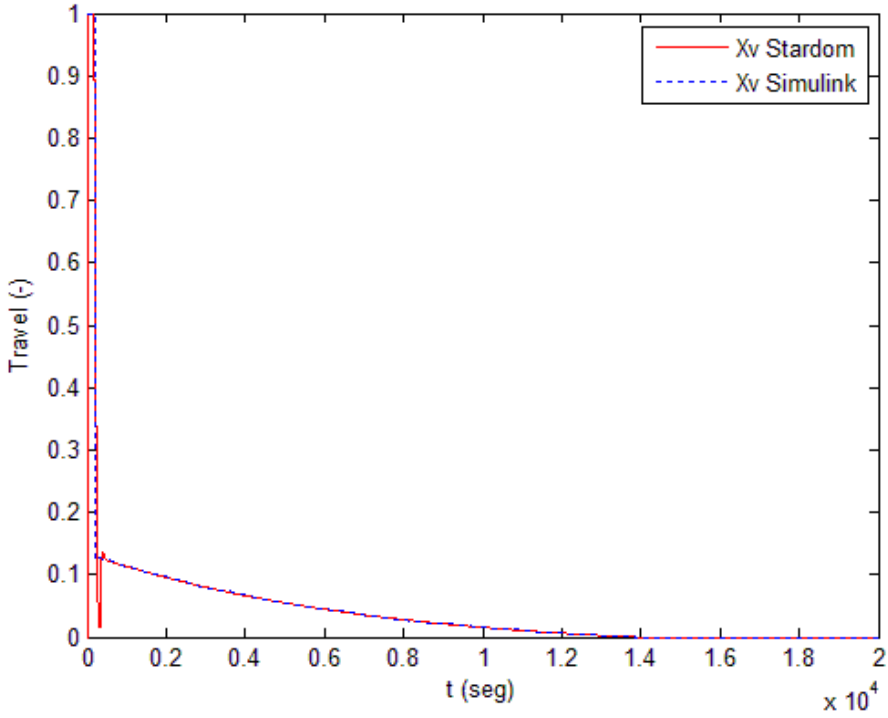


Figura 4.22. Respuesta de la apertura de las válvulas V-1001 y V-1002 del proceso de reactor batch.

Este proceso, a diferencia de los anteriores, es un proceso batch, en el cual se buscaba probar el desempeño del Stardom ante un proceso que consiste en una secuencia de pasos para llegar a un resultado, por lo que se buscaba que la respuesta del Stardom y Simulink fuesen lo más parecidas posibles. En la figura 4.20 se muestra que la respuesta de la PV por parte de los lazos de control de Stardom y Simulink es muy similar, a excepción del arranque del proceso, en el cual se muestra un máximo pico casi despreciable. En la figura 4.21 se muestran las concentraciones de los reactivos y productos en el transcurso de la operación, donde se muestra una respuesta casi idéntica por parte de ambos lazos de control. Por último en la figura 4.22 se muestra que la respuesta de la MV por parte de los algoritmos de control de Stardom y Simulink es muy parecidas, a excepción de un pico en los primeros minutos del proceso en donde la PV alcanza el SV deseado, cuya respuesta es consistente al comparar dicha figura con la figura 4.21. En conjunto, al observar estas tres figuras se muestra que el desempeño del lazo de control de Stardom es eficiente ante procesos Batch. La discusión de estos resultados se realizará más adelante en este capítulo.

4.4.5. Horno

Las estrategias de control implementadas para este proceso fueron un control PID por realimentación selectica, cuya PV es la temperatura de salida del crudo To manipulando la apertura de la válvula V-1001, y un control en cascada, con el cual se propuso controlar el flujo másico del gas combustible para aumentar la velocidad de respuesta del lazo principal. En la figura 4.23 se muestra un diagrama de bloques del proceso.

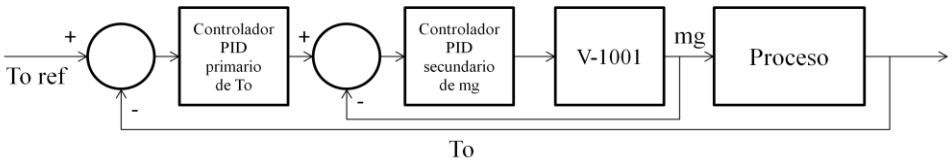


Figura 4.23. Diagrama de bloques del proceso de horno.

En el apéndice C en la figura C.12 se muestra el esquema en Simulink del control PID aplicado al proceso con un controlador PI con anti windup, mientras que en el apéndice C en las figuras C.18 y C.19 se muestras los esquemas en Simulink del proceso integrado con el Stardom FCN-RTU que tiene programado las lógicas PID y cascada mostradas en el apéndice D en las figuras D.7 y D.8 respectivamente. En la figura D.8 se muestra un bloque de control PID denominado FIC001, el cual es el lazo de control secundario del sistema en cascada, cuyo SV es el MV del control PID anterior denominado TIC001. Para este proceso se realizó la simulación con dos perturbaciones distintas: la primera consiste en un cambio del SV para comparar el algoritmo de control PID del Stardom con el mismo algoritmo de Simulink, mientras que la segunda consiste en una disminución del flujo de gas para comparar los algoritmos de control PID y cascada de Stardom. Se realizaron las simulaciones y se obtuvieron las respuestas de la PV mostrada en las figuras 4.24 y 4.25 para mientras que las respuestas de la MV se muestran en las figuras 4.26 y 4.27.

En la figura 4.24 se muestra una respuesta similar de la temperatura del crudo por parte del Stardom y Simulink, con la excepción de que la respuesta por parte del Stardom muestra tener un tiempo de estado estacionario mayor al de Simulink, de aproximadamente 20 segundos, lo cual muestra una respuesta mejor aunque sea en menor proporción, sin embargo esta respuesta presenta un máximo pico mayor y una estabilización más errática. Ante un cambio del SV se muestra que la respuesta por parte del Stardom es más rápida y se estabiliza rápidamente, alcontrario de la respuesta de Simulink, la cual muestra que no se llega a estabilizar y permanece

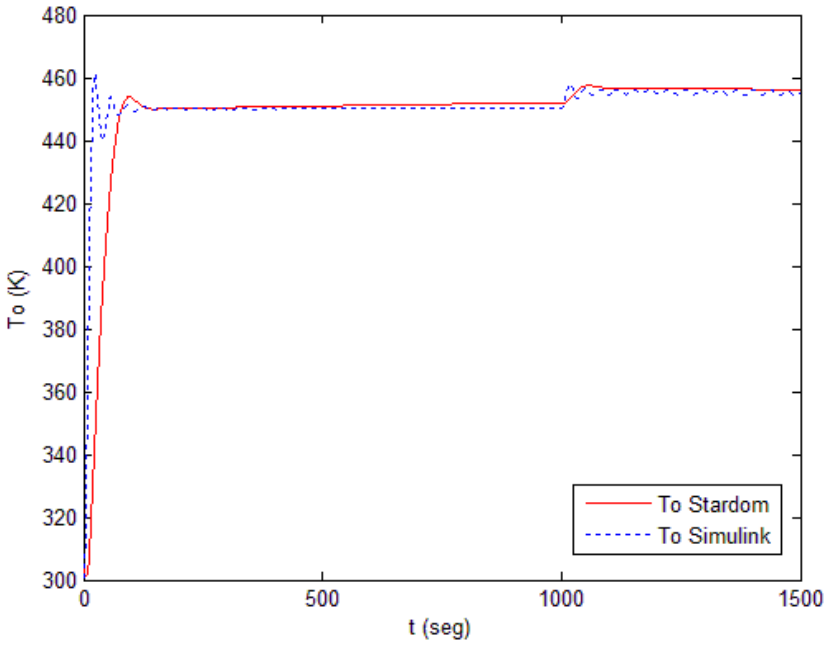


Figura 4.24. Respuesta de la temperatura de salida del crudo del proceso del horno.

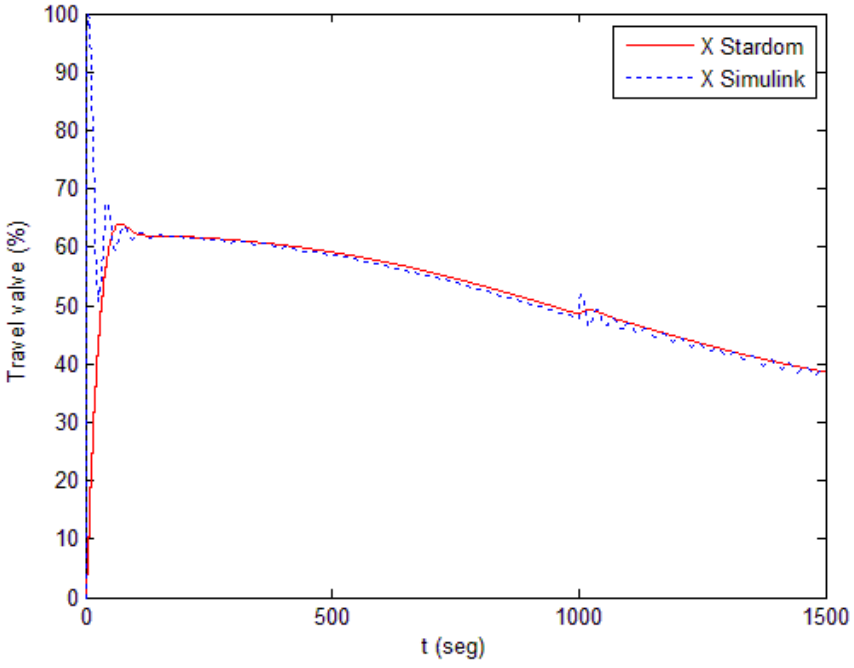


Figura 4.25. Respuesta de la apertura de la válvula V-1001 del proceso del horno.

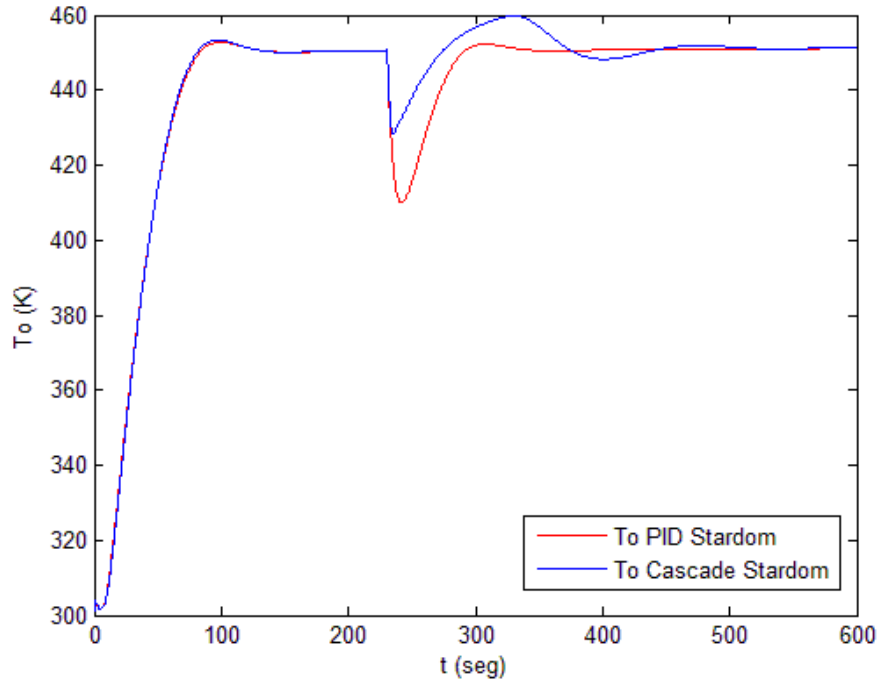


Figura 4.26. Respuesta de la temperatura de salida del crudo del proceso del horno. Control PID y cascada con Stardom.

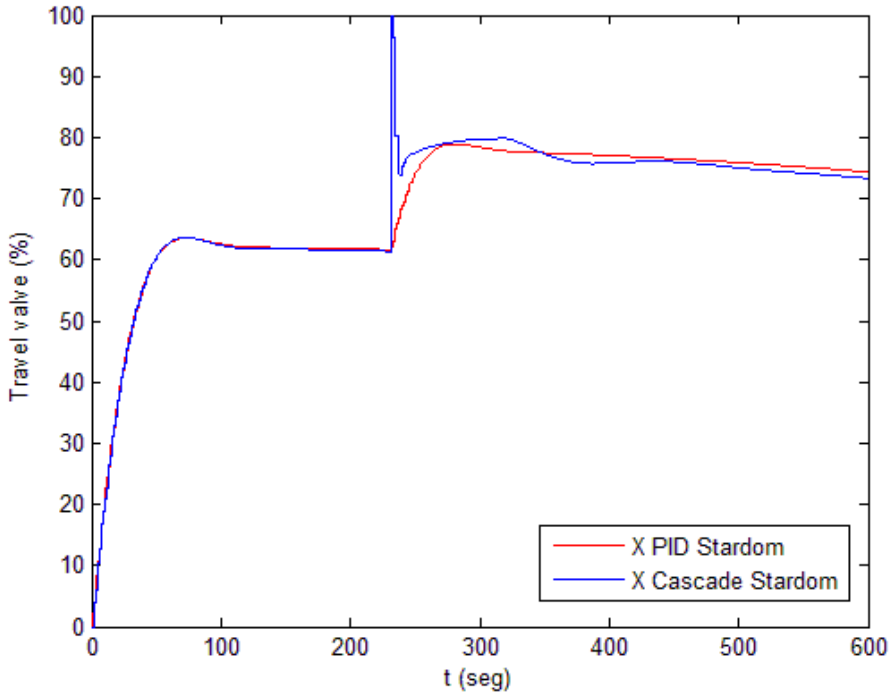


Figura 4.27. Respuesta de la apertura de la válvula V-1001 del proceso del horno. Control PID y cascada con Stardom

oscilando con un error de ± 2°C por al menos 500 segundos. En la figura 4.25 se muestra también que la respuesta de la apertura de la válvula por parte de Simulink es muy errática por los primeros 100 segundos, la cual muestra que es necesaria una válvula que permita una carrera completa en menos de 10 segundos. Se observa adicionalmente en la misma figura que el travel de la válvula disminuye a pesar de que la PV ya se ha estabilizado. Esto se debe a que uno de los estados del proceso no ha llegado al estado estacionario y afecta indirectamente al estado a controlar.

En la figura 4.26 se observa la comparación de los algoritmos de control PID y cascada del Stardom. Cabe mencionar que se realizaron las simulaciones de tal manera que para el arranque del proceso adaptara el control PID y ante la perturbación cada simulación adaptara el algoritmo de control respectivo. Ante la perturbación se muestra una respuesta distinta por ambos algoritmos, en el cual el algoritmo PID muestra un descenso de temperatura mucho mayor de aproximadamente 40 K, sin embargo muestra una recuperación mucho más rápida de aproximadamente 80 segundos, mientras que el algoritmo cascada presenta un aumento de temperatura de aproximadamente 10 K y una recuperación de aproximadamente 150 segundos, es decir de aproximadamente el doble de tiempo. Adicionalmente en la figura 4.27 se muestra que la MV para el algoritmo de cascada muestra un aumento abrupto, alcanzando el 100% de la apertura de la válvula por pocos segundos, lo cual pudiese poner en riesgo el proceso si la recuperación de la válvula no es lo suficientemente rápida. En general esto muestra las ventajas y desventajas del lazo de control en cascada para el horno de calentamiento con Simulink, mostrando el desempeño del Stardom de sus distintos algoritmos de control. La discusión de estos resultados se realizará a continuación.

4.5. Discusión general de resultados de lazos de control

Dado a que se muestra un comportamiento similar en la respuesta de las PV y MV ante los distintos procesos simulados al comparar la acción de control por parte del Stardom con Simulink, esta sección describe una discusión general de la comparación entre ambas respuestas para todos los procesos.

La diferencia de las respuestas transitorias por parte del Stardom y Simulink, se puede deber a la diferencia del algoritmo de cálculo de los bloques PID del Stardom y de Simulink. Para Simulink el algoritmo PID se muestra en la ecuación 4.1, mientras que para Stardom su algoritmo de muestra en la ecuación 4.2.

$$MV(t) = P \cdot E(t) + I \int E(t)dt + D\frac{dE(t)}{dt} \tag{4.1}$$

$$\Delta MV_n = k_p\left(\Delta PV_n + \frac{\Delta T}{TI}E_n + \frac{TD}{\Delta T}\Delta(\Delta PV_n)\right) \tag{4.2}$$

Donde

$k_p = \frac{100}{PB}$

E(t): error. $E(t) = PV(t) - SV(t)$

ΔMV_n : Variación de la MV. $\Delta MV_n = MV_n - MV_{n-1}$

ΔE_n: Variación del error. $\Delta E_n = E_n - E_{n-1}$

ΔT: Período de control.

ΔPV_n: Variación de la PV. $\Delta PV_n = PV_n - PV_{n-1}$

Las constantes P, I y D son los parámetros configurables del algoritmo en Simulink y las constantes PB, TI y TD son los parámetros configurables del algoritmo en Stardom, los cuales guardan entre ellos la siguiente relación:

$$PB = \frac{100}{P} \qquad TI = \frac{P}{I} \qquad TD = P \cdot D$$

Se puede observar que Simulink realiza el algoritmo PID en base al cálculo del error, mientras que Stardom realiza el algoritmo PID en base a la diferencia de la PV con respecto al valor previo de la iteración, lo cual permite que solo haga la acción integral cuando el SV varíe. Este algoritmo se realiza para tener un desempeño de control estable ante cambios abruptos del SV. Esto muestra que la respuesta entre Simulink y Stardom no será idéntica, lo que se evidencia en las respuestas anteriores, en especial en la respuesta de las MV, las cuales muestran un comportamiento más errático por parte de Stardom en comparación con la respuesta de Simulink, sin embargo generando mejores resultados por parte de las PV.

Cabe destacar cambien que la programación de los parámetros del algoritmo PID fue distinta para Simulink como para Stardom. La programación del algoritmo PID del Simulink se realizó mediante el diseño de LGR, mientras que la programación del algoritmo PID de Stardom partió de dicho diseño y se modificaron los parámetros para optimizar la respuesta transitoria. Los

parámetros de los lazos PID programados en Simulink y Stardom para este proceso se muestran en la tabla 4.2, representados en base a los parámetros del Stardom.

Tabla 4.2. Parámetros de los lazos PID en Simulink y Stardom

		PD		TI		TD	
		Stardom	Simulink	Stardom	Simulink	Stardom	Simulink
Planta de neutralización	Control de altura	100	119.11	2.2	2.2	N/A	N/A
	Control de pH	3	4.167	2.4	2.4	N/A	N/A
Llenado de tanques 1		35	191.66	37	34	2	N/A
Llenado de tanques 2	Control de altura H3	10	57.296	52	52	10	N/A
	Control de altura H4	40	90.909	36.67	36.67	15	N/A
Intercambiador de calor		11111.11	21470.75	3	3	N/A	1.62E-5
Reactor batch	Control de valvula Xv	20	100	40	N/A	N/A	N/A
	Control de válvula Xw	ON/OFF	100	N/A	N/A	N/A	N/A
Horno en realimentación simple		1000	9583.81	7	7	N/A	N/A
Horno en cascada	Lazo principal	1000	N/A	7	N/A	N/A	N/A
	Lazo secundario	0.1	N/A	0	N/A		

Se observa que para todos los casos los parámetros difieren en pocas proporciones. La modificación de dichos valores se realizó puesto que la respuesta ante el mismo lazo de control era muy distinta, a veces alterando el proceso de tal manera que no se convergiera a un resultado lógico, sin embargo el diseño de LGR funcionó como punto de partida importante para poder realizar la modificación de los parámetros, dado que es un método eficiente y rápido de implementar a la hora de diseñar lazos PID.

Cabe destacar que la diferencia de las respuestas transitorias de las PV también se debe a la velocidad de respuesta del Stardom, puesto que esta tiene una velocidad de respuesta de aproximadamente cada segundo, mientras que en Simulink tiene una velocidad de respuesta mucho mayor. Esto puede afectar en la respuesta transitoria de las PV y la disminución de la

velocidad de respuesta por parte del Stardom se puede deber principalmente a la cantidad de parámetros OPC en el servidor, puesto que los bloques PID tienen aproximadamente 20 variables cada uno, lo cual afecta la respuesta del Stardom.

Adicionalmente se puede observar en las figuras C.10, C.11 y C.13 que posterior a la salida de algunas señales de control se encuentra un filtro, el cual fue colocado para disminuir el ruido generado por dicha señal. Si esta figura se compara con la figuras C.15 a C.20 se muestra que en la integración OPC no hay necesidad de un filtro y la respuesta de la misma MV muestra una señal de control más atenuada que la que tiene el filtro. Esto muestra que el Stardom tiene incorporado filtros internos para minimizar el ruido generado por las señales, lo cual resulta beneficioso al mostrar una señal de control más atenuada, a pesar de ser un poco errática, sin embargo esto se debe principalmente al algoritmo de control.

En general se puede ver un comportamiento muy similar entre ambos algoritmos de control, difiriendo en características menores pero mostrando en general un comportamiento eficiente para el control de procesos. Esto muestra que el Stardom funciona eficientemente ante distintas soluciones y tiene muchas otras características que permite el control de múltiples procesos en la industria.

4.6. Integración con el HMI

Para observar el desenpeño de los procesos simulados en una visualización más dinámica se configuró el HMI utilizando el Graphic Portafolio de InfoWell. Como se mencionó en el capítulo 3, se realizó un menú de acceso rápido a los distintos despliegues gráficos. Dicho menú se muestra en la figura 4.28.

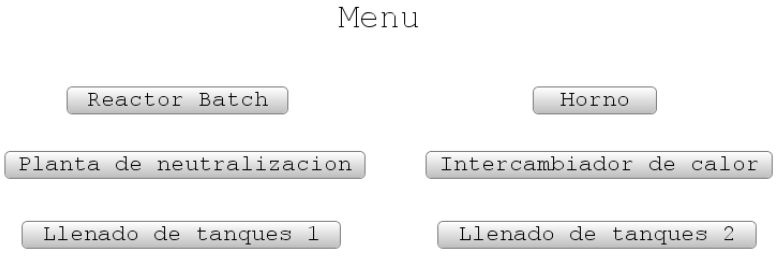


Figura 4.28. Menú de acceso para los despliegues gráficos en InfoWell.

En el apéndice E se muestran los despliegues gráficos realizados. Estos vienen configurados con la capacidad de cambiar de color cuando hay una ocurrencia de alarma de alta o baja. Estos despliegues, junto con la integración OPC entre MATLAB--Stardom y la configuración de los

lazos de control se mostraron en una presentación que tenía por objetivo demostrar la capacidad de control del Stardom FCN-RTU y de ofrecer distintas soluciones a ante distintos procesos industriales típicos. Adicionalmente se realizó la documentación necesaria acerca de la configuración de InfoWell y las potencialidades que posee el sistema como SCADA sencillo incorporado dentro del Stardom, incluyendo sus ventajas y desventajas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Todos los objetivos de este proyecto planteados inicialmente fueron alcanzados y el gran valor de esta práctica consistió en que se realizaron las pruebas planificadas ante diversos clientes, demostrando las potencialidades del controlador Stardom ante los distintos procesos industriales. Se obtuvo de esta manera aprendizaje en cuanto a la configuración de instrumentos de medición y transmisión, configuración de lógicas de control en el Stardom e su integración entre varios software e instrumentos.

En la duración de este proyecto de pasantía se logró configurar y realizar pruebas exitosas de los transmisores de presión y pH, del sistema de instrumentación inalámbrico y del Stardom, adquiriendo conocimiento en el ámbito de la instrumentación y control. También se logró modelar exitosamente los sistemas propuestos y diseñar las estrategias de control, incluyendo estrategias de control avanzadas, lo cual mostró la destreza de programación y el conocimiento como ingeniero químico de la matemática y física de los procesos industriales y su control mediante control teórico a través de Simulink y control práctico a través de Stardom. Adicionalmente se realizó una comparación del desempeño del control de procesos por parte del Stardom con un controlador teórico diseñado en Simulink, demostrando un desempeño eficiente por parte del sistema Stardom para cualquier proceso industrial.

La integración de los modelos de los procesos desarrollados en Matlab con las lógicas de control diseñadas en Stardom, en conjunto con el sistema InfoWell como Interfaz hombre-máquina (HMI), permitió realizar pruebas del Stardom ante varios clientes exitosas, proponiendo la venta del equipo como una solución integrada para los procesos planteados. Por otra parte se recomienda crear una interfaz de selección de los procesos en Simulink, en la cual permita al usuario introducir los parámetros del proceso a voluntad, con el propósito de probar la funcionalidad del Stardom ante el mismo proceso pero bajo otras circunstancias. También se recomienda y se propone el modelaje de varios otros procesos industriales y el acoplamiento entre varios procesos creados, con el propósito de simular un proceso industrial completo.

REFERENCIAS

[1] Controval. Controval. Disponible en Internet: www.controval.us/es/, consultado el 9 de septiembre de 2016.

[2] Sánchez, J. A."Control Avanzado de procesos teoría y práctica". Días de Santos S.A, Madrid, pp. 144 (2006).

[3] Asociación de la Industria Eléctrica-Elecrónica Chile (AIE). "El ABC de la automatización". Disponible en Internet: http://www.aie.cl/ca-abc, consultado el 15 de agosto de 2016.

[4] Yokogawa. "FCN-RTU Low Power Autonomous Controller Functions. General Speficications". Yokogawa Electric Corporation, Tokio, pp 1-3. (2014).

[5] New Products STARDOM FCN-RTU Low Power Autonomous Controller. Yokogawa Technical Report English Edition Vol.53 No.1 (2010).

[6] Yokogawa. "STARDOM FCN/FCJ User's Manual". Yokogawa Electric Corporation, Tokio, pp. 155-205 (2015).

[7] Yokogawa. "Logic Designer General Specifications". Yokogawa Electric Coropration, Tokio, pp 1-4. (2014).

[8] Iguchi H., Kaji T., Tanaka K, Okada S. ""InfoWell" Information Transmission Package for Stardom". Yokogawa Technical Report English Edition, No.37, pp 1-4. (2004).

[9] Yokogawa. "InfoWell User's Manual". Yokogawa Electric Corporation, Tokio, pp. 13-28 (2015).

[10] Yokogawa. "InfoWell Graphic Portafolio User's Manual". Yokogawa Electric Coropration, Tokio, pp. 13-16 (2015).

[11] Yokogawa. "InfoWell Logging Portafolio User's Manual". Yokogawa Electric Coropration, Tokio, pp. 15-20 (2015).

[12] Karl-Heinz J., Tiegelkamp M. "IEC 61131-3: Programming Industrial Automation Systems". Springer-Verlag Berlin Hiedelberg, New York, pp. 95-200 (2001).

[13] OPC Foundation. What is OPC? Disponible en Internet: http://www.opcfoundation.org, consultado el 15 de septiembre.

[14] Wolfgang Mahnke, S. "OPC Unified Architecture". Springer, Berlin, pp 1-17, (2009).

[15] Drury, B. "*Control Techniques Drives and Controls Handbook*". Institution of Engineering and Technology, England, pp. 508-510 (2009).

[16] Modbus-IDA. Modbus Messaging on TCP/IP Implementation Guide V1.0b. Disponible en Internet: http://www.Modbus-IDA.org, consultado el 4 de noviembre de 2016.

[17] ISA. The ISA100 Standards. Overview & Status. Disponible en Internet: https://www.isa.org/, consultado el 4 de noviembre de 2016.

[18] McGabe, W. L., Smith, J. C. "Unit Operations of chemical engineering". 5th Edition, McGraw Hill, New York, pp 3-5, 27-30 (1993).

[19] Ogata, K. "Modern Control Engineering" 5th Edition, Prentice Hall, pp. 20-37 (2010).

[20] Frattallone, M., Peguero, D., Villar, J. "Diseño de una planta de neutralización de ácido acético y soda cáustica a escala de laboratorio". Universidad Simón Bolivar, Sartenejas, Venezuela (2012).

[21] Quanser. Quanser Coupled Tanks. Disponible en Internet: http://www.quanser.com/products/coupled_tanks, consultado el 21 de julio de 2016.

[22] Incropera, F. P., DeWitt, D. P. "Fundamentals of Heat and Mass Transfer" 6th Edition, J. Wiley, New York, pp 669-673 (2002).

[23] Kern, D. "Process Heat Transfer". McGraw Hill, New York, pp. 674-716 (1965).

[24] Pérez, A., Peña, E., Aljibes, P. "Modelación, simulación y control de un reactor exotérmico por lotes utilizando Matlab-Simulink". Revista Ingeniería UC. Vol.10, N° 2, pp. 7-17 (2003).

[25] Roffel, B., Rijnsdorp, J. E. "Dynamics and Control of a Gas-Fired Furnace". Chemical Engineering Science, Vol.29, pp. 2083-2092 (1974).

[26] Yokogawa. "EJX110A Differential Pressure Transmitter. General Specifications". Yokogawa Electric Coropration, Tokio, pp. 1-2 (2016).

[27] Thermo Fisher. "Thermo Scientific Orion 2100 Series pH/ORP & Conductivity Analyzers". Thermo Fisher Scientific Inc., MA USA, pp. 1-4 (2013).

[28] Yokogawa. "YTA510 Temperature Transmitter. General Specifications". Yokogawa Electric Coropration, Tokio, pp. 1 (2015).

[29] Yokogawa. “Field Wireless System Overview. General Specifications”. Yokogawa Electric Coropration, Tokio, pp. 1-6 (2010).

APÉNDICE A
MODELAJE MATEMÁTICO DE SISTEMAS DINÁMICOS

A.1. Planta de neutralización

A.1.1. Modelaje matemático

$$\frac{dH(t)}{dt} = \frac{K \cdot V_1(t)}{A_T} + \frac{K \cdot V_2(t)}{A_T} - \frac{A_t}{A_T} \cdot \sqrt{2gH(t)}$$

$$x(t)\frac{dH(t)}{dt} + H(t)\frac{dx(t)}{dt} = \frac{C_{2O} \cdot K \cdot V_2(t)}{A_T} - \frac{C_{1O} \cdot K \cdot V_1(t)}{A_T} - x(t) \cdot \frac{A_t}{A_T} \cdot \sqrt{2gH(t)}$$

Donde

$$pH = \begin{cases} -\log\left(\frac{x}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{4 \cdot Kw}{x^2}} - 1\right)\right) & si\ x > 0 \\ -\log\left(-\frac{x}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{4 \cdot Kw}{x^2}} - 1\right)\right) & si\ x < 0 \\ -\log\left(\sqrt{Kw}\right) & si\ x = 0 \end{cases}$$

A.1.2. Glosario

$A_{t/T}$: Área transversal de la tubería/tanque (cm^2).

$C_{1/2O}$: Concentración inicial del ácido acético / soda cáustica (mol).

g: Aceleración de gravedad (cm/s^2).

H: Altura del tanque (cm).

K: Constante de bomba ($cm^3/V.s$).

t: tiempo (segundos).

V_x: Voltaje suministrado a la bomba x (V).

x: Diferencia de concentraciones de iones H^+ y OH^- (-).

Tabla A.1. Tabla de constantes de la planta de neutralización.

Parámetro	Valor
K ($cm^3/V.s$)	4,6
A_T (cm^2)	14,9540
A_t (cm^2)	1,1310
C_{1O} (mol)	0,2

C_{2O} (mol)	0,1
g (cm/s^2)	980
Kw	1x10^{-14}

A.2. Llenado de tanques

A.2.1. Modelaje matemático

A.2.1.1. Arreglo 1

$$\frac{dH_1(t)}{dt} = \frac{K_1 \cdot V_1(t)}{A_{T1}} - \frac{A_{t1}}{A_{T1}}\sqrt{2gH_1(t)}$$

$$\frac{dH_2(t)}{dt} = \frac{K_2 \cdot V_2(t)}{A_{T2}} + \frac{A_{t1}}{A_{T2}}\sqrt{2gH_1(t)} - \frac{A_{t2}}{A_{T2}}\sqrt{2gH_2(t)}$$

$$\frac{dH_3(t)}{dt} = \frac{A_{t2}}{A_{T3}}\sqrt{2gH_2(t)} - \frac{A_{t3}}{A_{T3}}\sqrt{2gH_3(t)}$$

A.2.1.2. Arreglo 2

$$\frac{dH_1(t)}{dt} = \frac{K \cdot V_1(t)}{A_{T1}} - \frac{A_{t1}}{A_{T1}}\sqrt{2gH_1(t)} - \frac{A_{t2}}{A_{T1}}\sqrt{2gH_1(t)}$$

$$\frac{dH_2(t)}{dt} = \frac{K \cdot V_2(t)}{A_{T2}} - \frac{A_{t3}}{A_{T2}}\sqrt{2gH_2(t)}$$

$$\frac{dH_3(t)}{dt} = \frac{A_{t1}}{A_{T3}}\sqrt{2gH_1(t)} - \frac{A_{t4}}{A_{T3}}\sqrt{2gH_3(t)}$$

$$\frac{dH_4(t)}{dt} = \frac{A_{t2}}{A_{T4}}\sqrt{2gH_1(t)} + \frac{A_{t3}}{A_{T4}}\sqrt{2gH_2(t)} - \frac{A_{t5}}{A_{T4}}\sqrt{2gH_4(t)}$$

A.2.2. Glosario

$A_{t/T\ x}$: Área transversal de la tubería/tanque x. (cm^2)

g: Aceleración de gravedad (cm/s^2).

H_x: Altura del tanque x (cm).

K: Constante de bomba (cm^3/V.s).

t: Tiempo (segundos).

V_x: Voltaje suministrado a la bomba x (V).

Tabla A.2. Tabla de constantes para el arreglo de tanques 1.

Parámetro	Valor
K (cm^3/V.s)	3,3
A_{T1} (cm^2)	15,5528
A_{T2} (cm^2)	15,5528
A_{T3} (cm^2)	15,5528
A_{t1} (cm^2)	0,2463
A_{t2} (cm^2)	0,181
A_{t3} (cm^2)	0,0804
g (cm/s^2)	980

Tabla A.3. Tabla de constantes para el arreglo de tanques 2.

Parámetro	Valor
K_1 (cm^3/V.s)	3,3
K_2 (cm^3/V.s)	3,3
A_{T1} (cm^2)	15,5528
A_{T2} (cm^2)	15,5528
A_{T3} (cm^2)	15,5528
A_{T4} (cm^2)	15,5528
A_{t1} (cm^2)	0,2463
A_{t2} (cm^2)	0,2463
A_{t3} (cm^2)	0,181
A_{t3} (cm^2)	0,0804
A_{t3} (cm^2)	0,0804
g (cm/s^2)	980

A.3. Intercambiador de calor

A.3.1. Modelaje matemático

$$\rho_C \cdot \left(\pi \cdot \frac{D_S^2}{4} \cdot \frac{L_T}{N_P} - \pi \cdot \frac{D_O^2}{4} \cdot L_T \cdot N_t\right) \cdot Cp_C \cdot \frac{dT_{Co}(t)}{dt} = \dot{m}_C(t) \cdot Cp_C \cdot \left(T_{Ci} - T_{Co}(t)\right) + A_o U(t) \cdot \left(\frac{T_{Ho}(t) - T_{Ci} - T_{Hi} + T_{Co}(t)}{\ln\left(\frac{T_{Ho}(t) - T_{Ci}}{T_{Hi} - T_{Co}(t)}\right)}\right)$$

$$\rho_H \cdot Cp_H \cdot \pi \cdot \frac{D_i^2}{4} \cdot L_T \cdot N_t \cdot \frac{dT_{Ho}(t)}{dt} = \dot{m}_H(t) \cdot Cp_H \cdot \left(T_{Hi} - T_{Ho}(t)\right) - A_o U(t) \cdot \left(\frac{T_{Ho}(t) - T_{Ci} - T_{Hi} + T_{Co}(t)}{\ln\left(\frac{T_{Ho}(t) - T_{Ci}}{T_{Hi} - T_{Co}(t)}\right)}\right)$$

$$A_o U(t) = \frac{1}{\frac{1}{A_i h_i(t)} + \frac{\ln\left({D_o}/{D_i}\right)}{2\pi LK} + \frac{1}{A_o h_o(t)} + \frac{R_o}{A_o} + \frac{R_i}{A_i}}$$

$$h_i(t) = \begin{cases} \frac{k_H}{D_i} \cdot \frac{(Re_H(t) - 1000) \cdot Pr_H \cdot \frac{f(t)}{8}}{1 + 12{,}7 \cdot \left(Pr_H^{\frac{2}{3}} - 1\right)\sqrt{\frac{f(t)}{8}}} & si\ Re_H(t) > 2300 \\ \frac{k_H}{D_i \cdot 4{,}36}\ si\ Re_H(t) < 2300 \end{cases}$$

$$Re_H = \frac{4 \cdot \dot{m}_H(t)}{\pi \cdot D_i \cdot \mu_H \cdot \frac{N_t}{N_p}} \qquad Pr_H = \frac{Cp_H \cdot \mu_H}{k_H} \qquad f(t) = \frac{1}{(0{,}79 \cdot \ln(Re_H(t)) - 1{,}64)^2}$$

$$h_o(t) = \frac{k_C}{D_h} \cdot 0{,}36 \cdot Re_C(t)^{0{,}55} Pr_C^{\frac{1}{3}}$$

$$Re_C(t) = \frac{\dot{m}_C(t) \cdot P_t \cdot D_h}{D_s \cdot C_t \cdot \mu_C \cdot B} \qquad Pr_H = \frac{Cp_C \cdot \mu_C}{k_C} \qquad D_h = \frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot {P_t}^2 - \pi {D_o}^2}{\pi \cdot D_o}$$

A.3.2. Glosario

$A_{i/o}$: Área interna/externa de intercambio de calor (m^2).

B: Espaciamento de bafles (m).

$Cp_{C/H}$: Calor específico del fluido frío/caliente (J/kg.°C).

C_t: Espacio entre tubos (m).

D_h: Diámetro hidráulico (m).

$D_{i/o}$: Diametro interno/externo de los tubos (m).

D_S: Diámetro interno de la carcasa (m).

f: Factor de fricción de la tubería (-).

$h_{i/o}$: Coeficiente de convección interno/externo ($W/m^2.°C$).

$k_{C/H}$: Conductividad del fluido frío/caliente (W/m.°C).

K: Conductividad de los tubos. (W/m.°C).

L: Longitud de los tubos (m).

$\dot{m}_{C/H}$: Flujo másico del fluido frío/caliente (kg/s).

N_p: Número de pasos (-).

N_t: Número de tubos (-).

P_t: Pitch de los tubos (m).

$Pr_{C/H}$: Número de Prandtl del fluido frío/caliente (-).

t: Tiempo (segundos).

$T_{C/H\ i/o}$: Temperatura del fluido frío/caliente a la entrada/salida (°C).

$R_{i/o}$: Resistencia interna/externa por suciedad ($m^2.°C/W$).

$Re_{C/H}$: Número de Reynolds del fluido frío/caliente (-).

U: Coeficiente global de trasferencia de calor ($W/m^2.°C$).

$\rho_{C/H}$: Densidad del fluido frío/caliente (kg/m^3).

$\mu_{C/H}$: Viscosidad del fluido frío/caliente ($N.s/m^2$).

Tabla A.4. Tabla de constantes para intercambiador de calor.

Parámetro	Valor
ρ_H (kg/m^3)	828
ρ_C (kg/m^3)	1020

Cp_H (J/kg.°C)	2307
Cp_C (J/kg.°C)	3650
k_H (W/m.°C)	0,135
k_C (W/m.°C)	0,442
μ_H (N.s/m^2)	1,027x10^{-2}
μ_C (N.s/m^2)	0,08x10^{-2}
$\dot{m}_C$ (kg/s)	0,23
$\dot{m}_H$ (kg/s)	0,47
T_{Hi} (°C)	120
T_{Ci} (°C)	90
D_i (mm)	2,442
D_o (mm)	3,175
L_t (mm)	381
N_t (-)	138
N_P (-)	1
P_t (m)	3,969
D_S (m)	50,8
C_t (m)	0,799
B (m)	25,4
K (W/m.°C)	42,7
R_o (m^2.°C/W)	0,353x10^{-3}
R_i (m^2.°C/W)	0,176x10^{-3}
A_i (m^2)	0,4038
A_o (m^2)	0,5244

A.4. Reactor Batch

A.4.1. Modelaje matemático

$$\frac{dC_A(t)}{dt} = -K_1(t) \cdot C_A(t)$$

$$\frac{dC_B(t)}{dt} = K_1(t) \cdot C_A(t) - K_2(t) \cdot C_B(t)$$

Donde

$$K_1(t) = k_{o1} e^{-\frac{E_1}{R \cdot (T(t)+460)}} \quad \text{y} \quad K_2(t) = k_{o2} e^{-\frac{E_2}{R \cdot (T(t)+460)}}$$

Etapa de calentamiento

$$\rho \cdot Cp \cdot V \cdot \frac{dT(t)}{dt} = W_V(t) \cdot \Delta H_V + \Delta H_{r1} \cdot V \cdot K_1(T) \cdot C_A(t) + \Delta H_{r2} \cdot V \cdot K_2(t) \cdot C_B(t)$$

Etapa de enfriamiento

$$\rho \cdot Cp \cdot V \cdot \frac{dT(t)}{dt} = UA \cdot \Big(T_J(t) - T(t)\Big) + \Delta H_{r1} \cdot V \cdot K_1(T) \cdot C_A(t) + \Delta H_{r2} \cdot V \cdot K_2(t) \cdot C_B(t)$$

$$\rho_W \cdot Cp_W \cdot V_J \cdot \frac{dT_J(t)}{dt} = \rho_W \cdot Cp_W \cdot q_w(t) \cdot (T_{Wi} - T_J(t)) + UA \cdot (T(t) - T_J(t))$$

Donde

$$UA = \frac{1}{\frac{1}{A_i h_i} + \frac{1}{A_o h_{oW}}}$$

$$P^{Vap}(t) = e^{\frac{Aw}{T_J(t)+460} + Bw}$$

$$W_V(t) = C_{VV} \cdot X_V(t) \cdot \sqrt{P_{SS} - P^{Vap}(t)} \quad \text{y} \quad q_W = C_{VW} \cdot X_W(t) \cdot \sqrt{P_{CP}}$$

A.4.2. Glosario

$A_{i/o}$: Área interna/externa de trasnferencia de calor (ft^2).

Aw, Bw: Constantes de Antoine para el agua (°R, -).

$C_{A/B}$: Concentración del compuesto A/B (mol).

C_{VV}: Coeficiente de dimensionamiento de la válvula de vapor ($lb/min.Psi^{0,5}$).

C_{VW}: Coeficiente de dimensionamiento de la válvula de agua (lb/min.Psi^{0,5}).

Cp: Calor específico de la mezcla reactiva (BTU/lb.°F).

$Cp_{m/W}$: Calor específico de la pared/agua (BTU/lb.°F).

$E_{1/2}$: Energía de activación de la reacción 1/2 (BTU/lb_{mol}).

h_i: Coeficiente convectivo de la mezcla reactiva (BTU/lb.ft^2.h).

$h_{oV/W}$: Coeficiente convectivo del vapor/agua (BTU/lb.ft^2.h).

$k_{o1/2}$: Factor preexponencial de Arrhenius de la reacción 1/2 (min^{-1})

$K_{1/2}$: Velocidad de reacción 1/2 (min^{-1}).

M_{H2O}: Peso molecular del agua (lb/lb_{mol}).

P^{Vap}: Presión de vapor de agua (Psi).

P_{CP}: Cabezal de presión del agua fría (Psig).

P_{SS}: Presión de alimentación de vapor (Psi).

R: Constante universal de los gases (BTU/lb_{mol}.°R).

q_w: Caudal de agua en la chaqueta (ft^3/min).

t: Tiempo (segundos).

T: Temperatura dentro del reactor (°F).

T_J: Temperatura del fluido en la chaqueta (°F).

T_m: Temperatura de la pared (°F).

T_{wi}: Temperatura de entrada del agua en la chaqueta (°F).

V: Volumen de la mezcla reactiva (ft^3).

$V_{m,J}$: Volumen de la pared/chaqueta (ft^3).

W_V: Flujo másico de vapor en la chaqueta (lb/min).

X_W: Fracción de apertura de la válvula de agua (-).

X_V: Fracción de apertura de la válvula de vapor (-).

$\Delta H_{r1/2}$: Entalpía de reacción de la reacción 1/2 (BTU/lb_{mol}).

ΔH_V: Entalpía de vaporización del agua (BTU/lb).

ρ: Densidad de la mezcla reactiva (lb/ft^3).

$\rho_{m/V/W}$: Densidad de la pared/vapor/agua (lb/ft^3).

Tabla A.5. Tabla de constantes para el reactor Batch.

Parámetro	Valor
k_{o1} (min^{-1})	729,55
k_{o2} (min^{-1})	6567,6
E_1 (BTU/lb_{mol})	15000
E_2 (BTU/lb_{mol})	20000
ΔH_{r1} (BTU/lb_{mol})	-40000
ΔH_{r2} (BTU/lb_{mol})	50000
h_i ($BTU/lb.ft^2.h$)	160
h_{oV} ($BTU/lb.ft^2.h$)	1000
h_{oW} ($BTU/lb.ft^2.h$)	400
T_{Wi} (°F)	80
A_i (ft^2)	56,5
A_o (ft^2)	56,5
ΔH_V (BTU/lb)	939
V (ft^3)	42,5
V_m (ft^3)	9,42
V_J (ft^3)	18,83
ρ (lb/ft^3)	50
ρ_m (lb/ft^3)	512
ρ_W (lb/ft^3)	62,3
Cp (BTU/lb.°F)	1
Cp_m (BTU/lb.°F)	0,12
Cp_J (BTU/lb.°F)	1
P_{SS} (Psia)	35
P_{CP} (Psi)	20
C_{VV} ($lb/min.Psi^{0,5}$)	112
C_{VW} ($lb/min.Psi^{0,5}$)	100
Aw (°R)	-8744,4
Bw (-)	15,7

M_{H2O} (lb/lb_{mol})	18
R (BTU/lb_{mol}.°R).	1,987

A.5. Horno

A.5.1. Modelaje matemático

$$\rho_T \cdot V_T \cdot Cp_T \cdot \frac{dT_T(t)}{dt} = A_o \cdot (\alpha_{W,T}(t) \cdot \varepsilon_{WT} - \alpha_{GW,T}(t) \cdot \varepsilon_W) \cdot (T_W(t) - T_T(t)) + A_o \cdot (\alpha_{G,T}(t) \cdot \varepsilon_T + h_o) \cdot (T_G(t) - T_T(t)) - h_i(t) \cdot A_i \cdot \left(T_T(t) - T_f(t)\right)$$

$$\rho_f \cdot V_f \cdot Cp_f \cdot \frac{dT_f}{dt} = h_i(t) \cdot A_i \cdot \left(T_T(t) - T_f(t)\right) - \dot{m}_f(t) \cdot Cp_f \cdot (T_f(t) - T_{in})$$

$$m_W \cdot Cp_W \cdot \frac{dT_W}{dt} = \epsilon_{HEATER} \cdot A_W\left(\alpha_{G,W}(t) \cdot \varepsilon_W + h_o\right) \cdot (T_G(t) - T_W(t)) - A_o \cdot (\alpha_{W,T}(t) \cdot \varepsilon_{WT} - \alpha_{GW,T}(t) \cdot \varepsilon_W) \cdot (T_W(t) - T_T(t))$$

$$\rho_G \cdot V_G \cdot Cp_G \cdot \frac{\partial T_G}{\partial t} = \dot{m}_G \cdot \Delta H_{COMB} - A_W\left(\alpha_{G,W}(t) \cdot \varepsilon_W + h_o\right) \cdot \left(T_G(t) - T_W(t)\right) - A_o \cdot \left(\alpha_{G,T}(t) \cdot \varepsilon_T + h_o\right) \cdot \left(T_G(t) - T_T(t)\right) - \dot{m}_G \cdot Cp_G \cdot (T_G(t) - T_\infty)$$

Donde

$$h_i(t) = \frac{k_f}{D_i} \cdot \frac{(Re(t) - 1000) \cdot Pr \cdot \frac{f(t)}{8}}{1 + 12{,}7 \cdot (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)\sqrt{\frac{f(t)}{8}}}$$

$$Re(t) = \frac{4 \cdot \dot{m}_f}{\pi \cdot D_i \cdot \mu_f \cdot N_t} \qquad Pr = \frac{Cp_f \cdot \mu_f}{k_f} \qquad f(t) = \frac{1}{(0{,}79 \cdot \ln(Re(t)) - 1{,}64)^2}$$

$$\alpha_{WT} = 5{,}78 \cdot 10^{-3} \frac{\left(\frac{T_W(t)}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_T(t)}{100}\right)^4}{T_W(t) - T_T(t)}$$

$$\alpha_{ij}(t) = \alpha_{CO2,ij}(t) + \alpha_{H20,ij}(t)$$

$$\alpha_{CO2,ij}(t) = 5{,}88 \cdot 10^{-4} \frac{\left(\frac{T_i(t)}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_j(t)}{100}\right)^4}{T_i(t) - T_j(t)} \qquad \alpha_{H2O,ij}(t) = 3{,}57 \cdot 10^{-3} \frac{\left(\frac{T_i(t)}{100}\right)^{3,4} - \left(\frac{T_j(t)}{100}\right)^{3,4}}{T_i(t) - T_j(t)}$$

donde i, j corresponde a las parejas gw,t; g,t y gw.

A.5.2. Glosario

$A_{i/O/W}$: Área interna de tubos/externa de tubos/pared (m^2).

$Cp_{T/f/W/G}$: Calor específico de los tubos/fluido/pared/gases (kJ/Kg°C).

D_i: Diámetro interno (m).

f: Factor de fricción (-).

$h_{i/O}$: Coeficiente de transferencia de calor por convección interno/externo con respecto a los tubos ($kW/m^2°C$).

k_f: Conductividad del fluido (kW/m.°C).

$\dot{m_{f/G}}$: Flujo másico del fluido/gas combustible (kg/s).

$M_{T/W}$: Masa de los tubos/pared (kg).

N_t: Número de tubos (-).

Pr: Número de Prandtl (-).

Re: Número de Reynolds (-).

t: Tiempo (segundos).

$T_{T/f/W/G/in/\infty}$: Temperatura de los tubos/salida del fluido/pared/gases/entrada del fluido/ambiente (°C).

$V_{f/G}$: Volúmen que ocupa el fluido/gases (m^3).

$\alpha_{W,T/G,T/GW,T/G,W}$: Coeficiente de transferencia de calor por radiación del sistema pared-tubos/gases-tubos/gases a la temperatura de la pared-tubos/gases-pared ($kW/m^2°C$).

ΔH_{COMB}: Calor de combustión (kJ/kg).

$\varepsilon_{W/T/WT}$: Emisividad de la pared/tubos/sistema pared-tubos (-).

ϵ_{HEATER}: Eficiencia del horno (-).

$\rho_{f/G/CH4/}$: Densidad del fluido/gases/metano (kg/m^3).

μ_f: Viscosidad del fluido ($N.s/m^2$).

Tabla A.6. Tabla de constantes para el horno.

Parámetro	Valor
M_t (kg)	81,6
M_W (kg)	3273,6
Cp_t (kJ/kg.°C)	0,504
Cp_f (kJ/kg.°C)	$2,895-4x10^{-3}*T_f$
Cp_W (kJ/kg.°C)	0,84
Cp_G (kJ/kg.°C)	0,9508
A_o (m^2)	7,7
A_i (m^2)	5
A_W (m^2)	10
ε_W (-)	0,82
ε_T (-)	0,87
ε_{WT} (-)	0,777
ρ_f (kg/m^3)	$1049-0,62*T_f$
ρ_g (kg/m^3)	0,3935
h_o ($kW/m^2.°C$)	0,014
ϵ_{HEATER}	0,7
V_f (m^3)	6,8096
V_G (m^3)	3
ΔH_{COMB} (kJ/kg)	50164
T_{in} (°C)	300
T_∞ (°C)	25
k_f (kW/m.°C)	$(0,152-7x10^{-5}*T_f)/1000$
μ_f ($N.s/m^2$)	$(1049-0,62*T_f)*1,7098x10^{-6}$
D_i (m)	0,017
N_t (-)	200

Apéndice B
Diagramas de transporte y conexionado

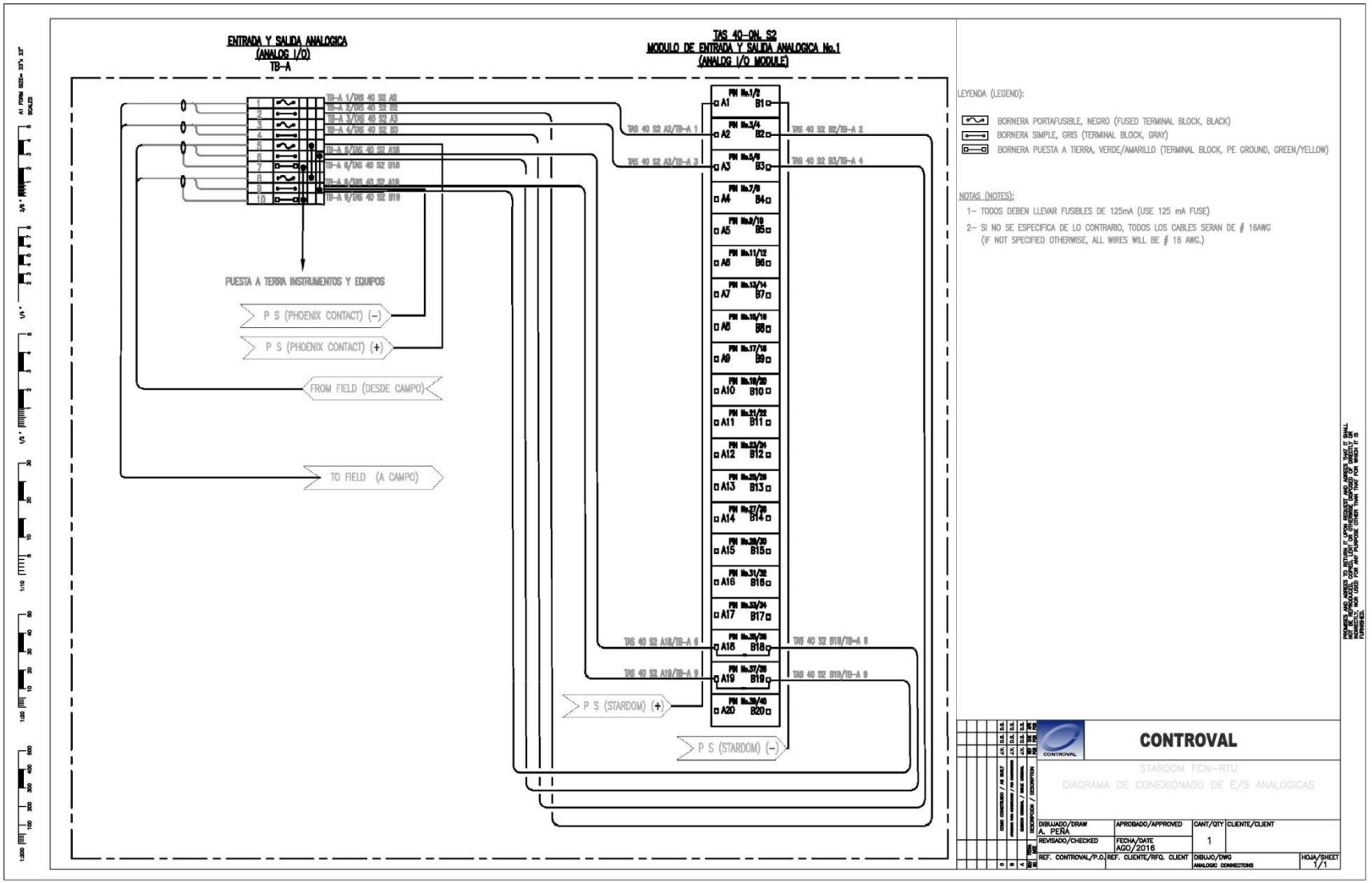


Figura B.1. Diagrama de conexionado de E/S analógicas

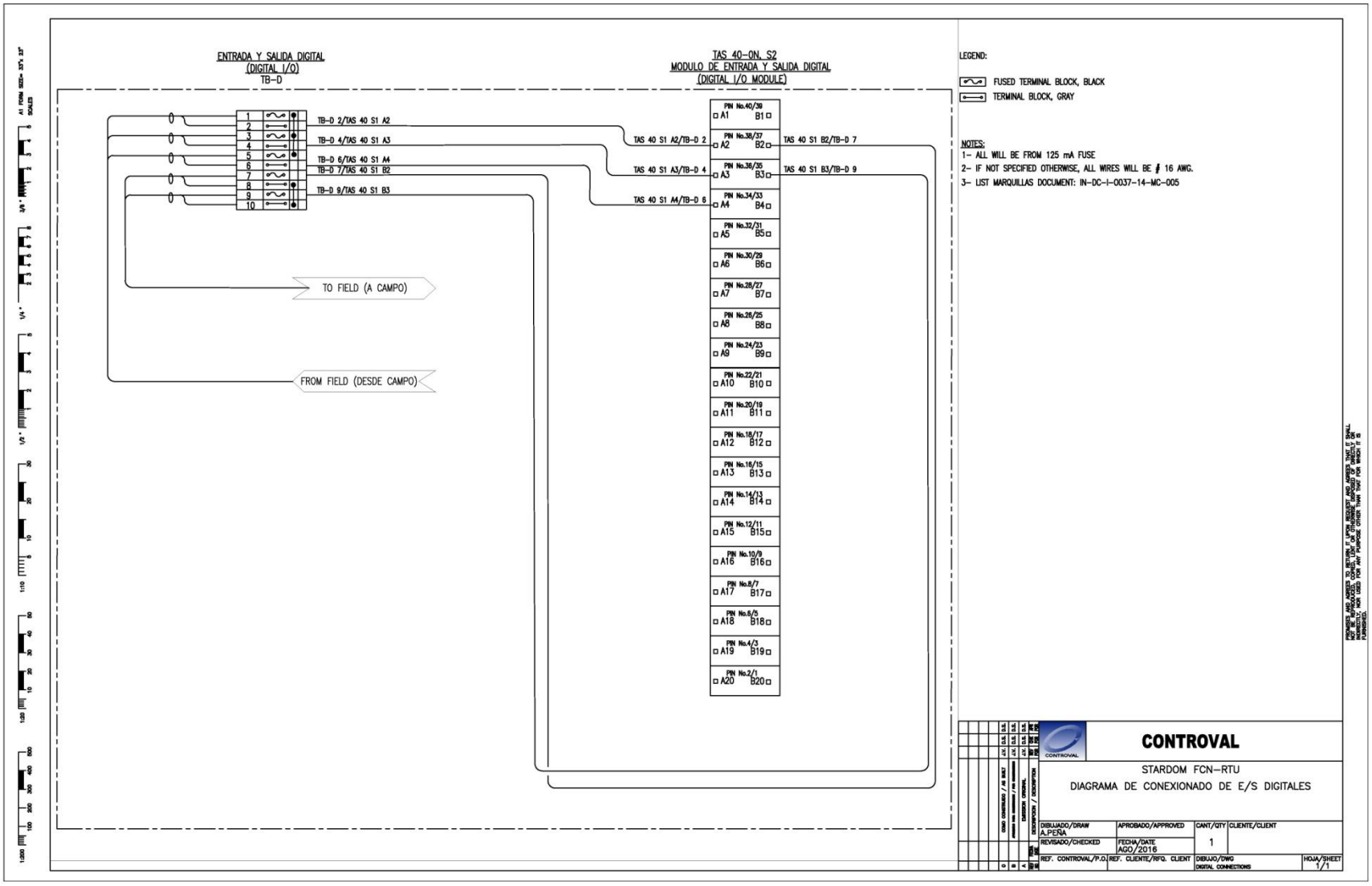


Figura B.2. Diagrama de conexionado de E/S digitales.

Apéndice C
Esquemas en Simulink

C.1. Esquemas de procesos a lazo abierto

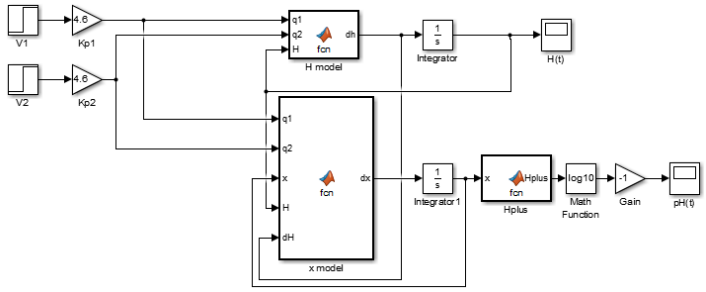


Figura C.1. Esquema a lazo abierto de la planta de neutralización.

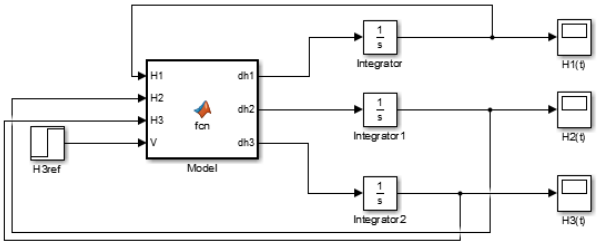


Figura C.2. Esquema a lazo abierto del llenado de tanques 1.

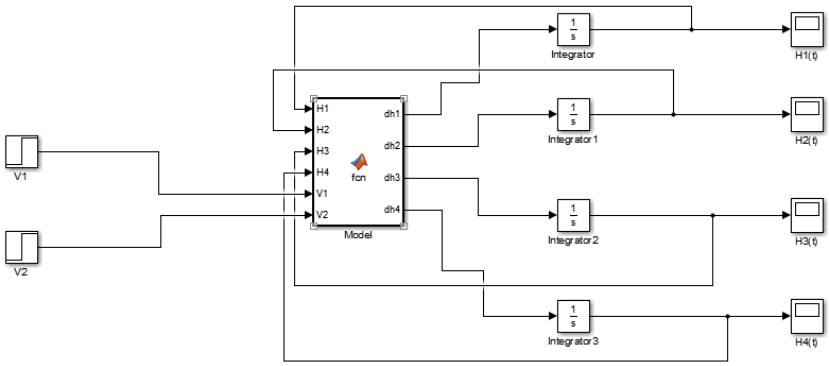


Figura C.3. Esquema a lazo abierto del llenado de tanques 2.

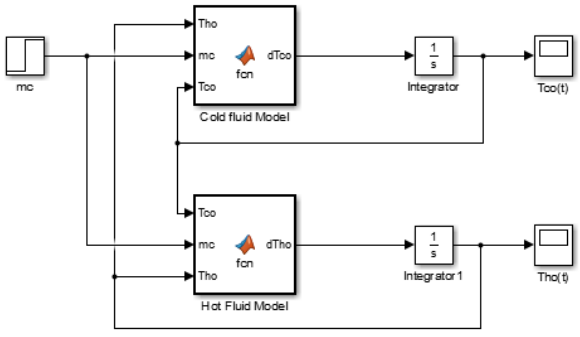


Figura C.4. Esquema a lazo abierto del intercambiador de calor.

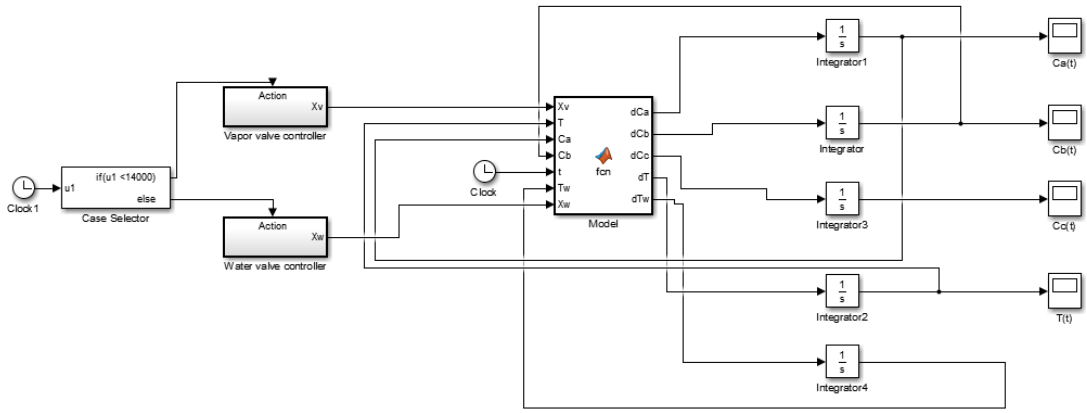


Figura C.5. Esquema a lazo abierto del reactor batch.

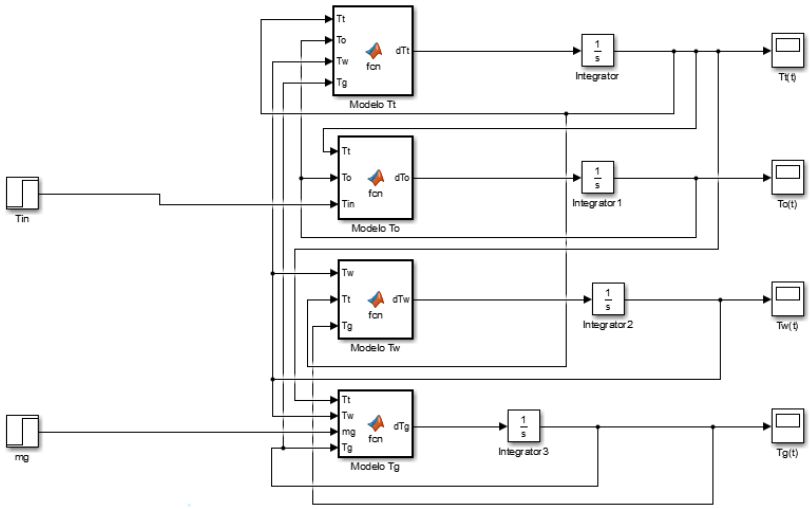


Figura C.6. Esquema a lazo abierto del horno.

C.2. Esquemas de procesos con estrategia de control aplicada

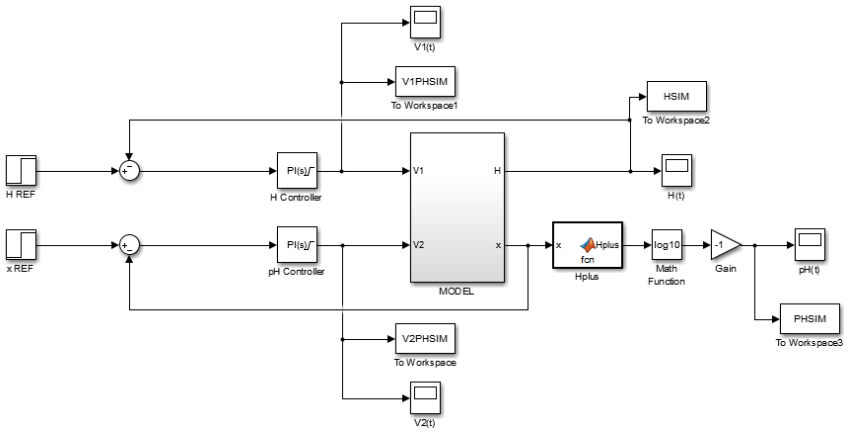


Figura C.7. Esquema a lazo cerrado de la planta de neutralización. Control PID en redundancia.

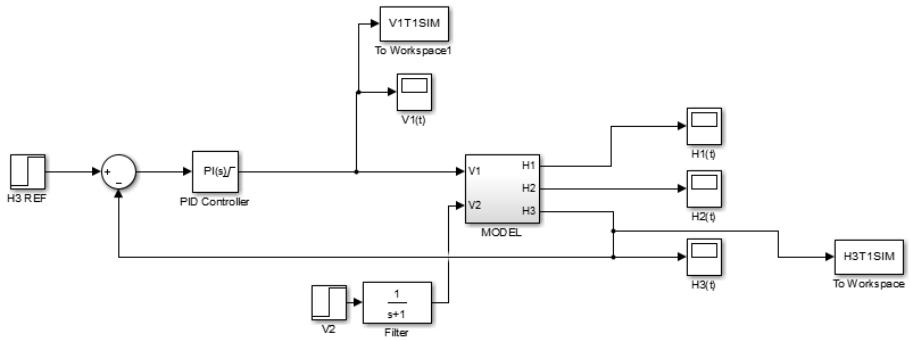


Figura C.8. Esquema a lazo cerrado del llenado de tanques 1. Control PID.

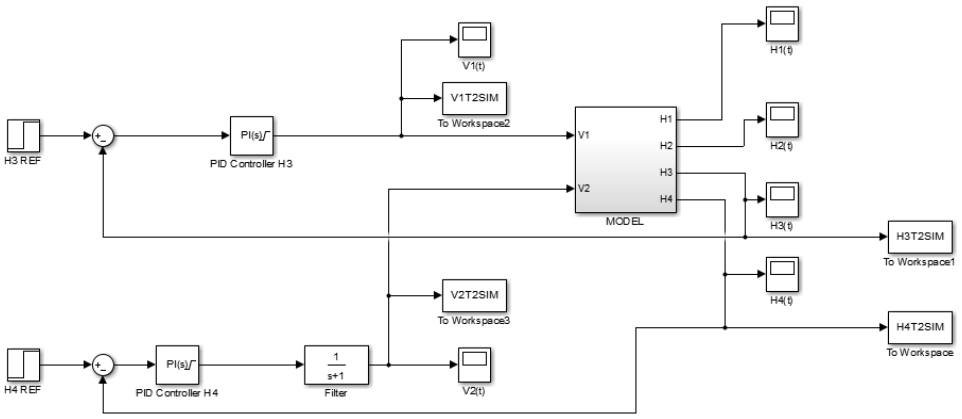


Figura C.9. Esquema a lazo cerrado del llenado de tanques 2. Control PID en redundancia.

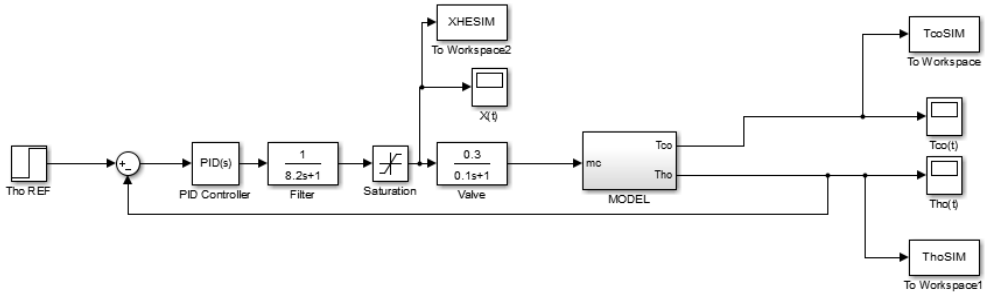


Figura C.10. Esquema a lazo cerrado del intercambiador de calor. Control PID.

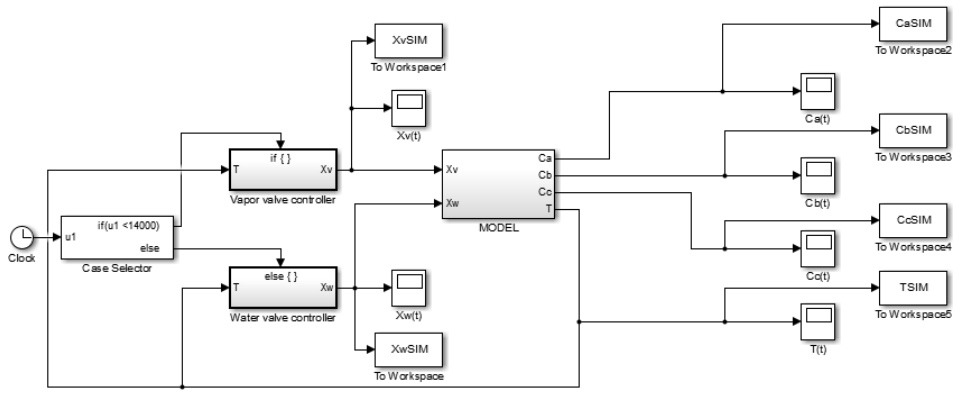


Figura C.11. Esquema a lazo cerrado del reactor batch. Control PID selectivo.

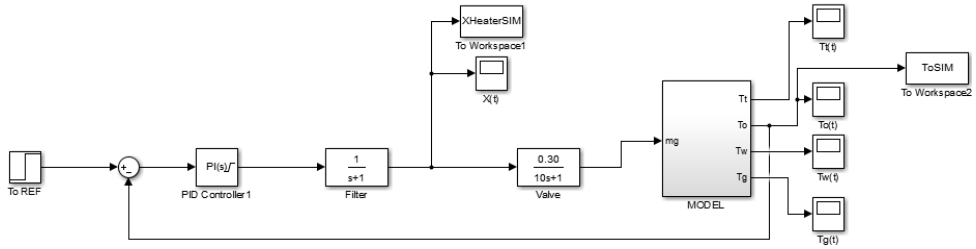


Figura C.12. Esquema a lazo cerrado del horno. Control PID.

C.3. Esquemas de procesos integrados con Stardom vía OPC.

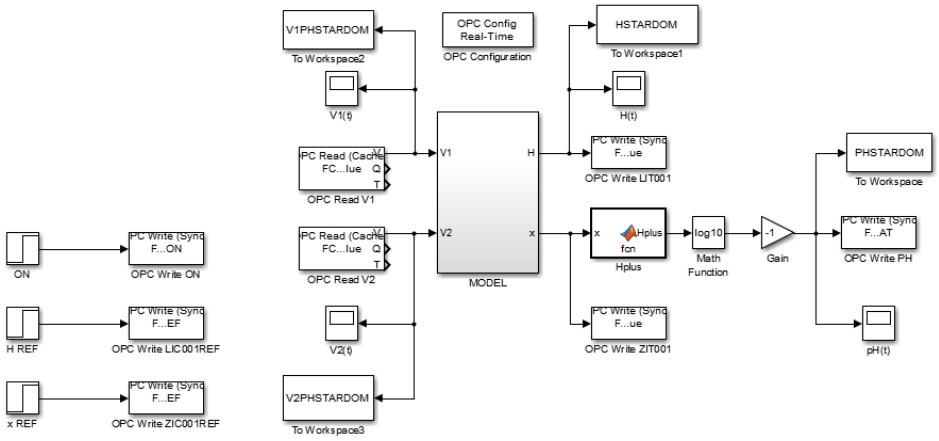


Figura C.13. Esquema de integración OPC de la planta de neutralización.

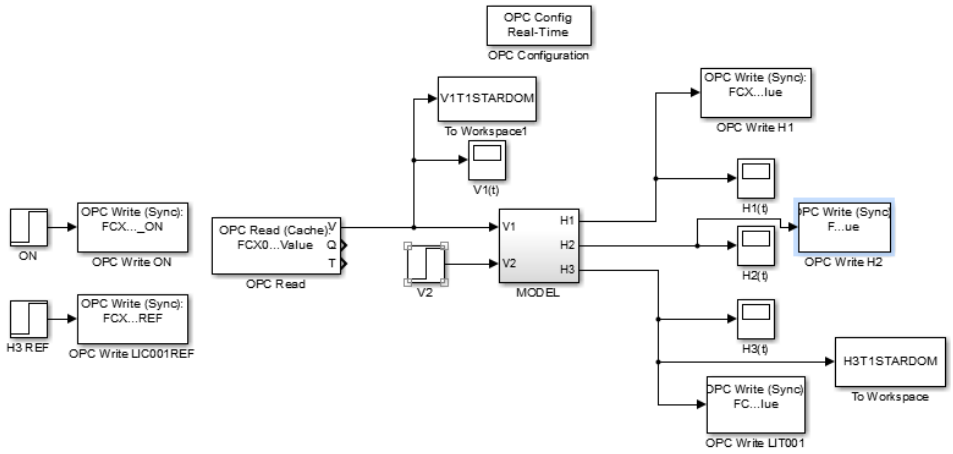


Figura C.14. Esquema de integración OPC del llenado de tanques 1.

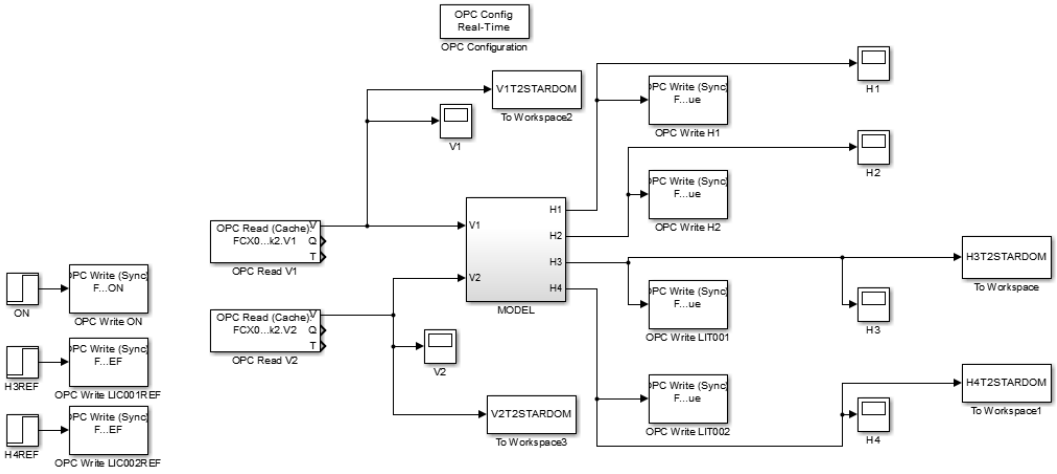


Figura C.15. Esquema de integración OPC del llenado de tanques 2.

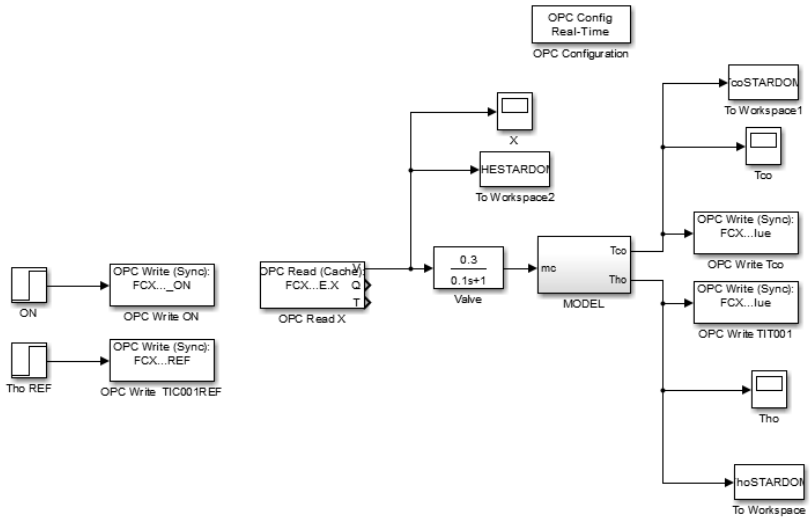


Figura C.16. Esquema de integración OPC del intercambiador de calor.

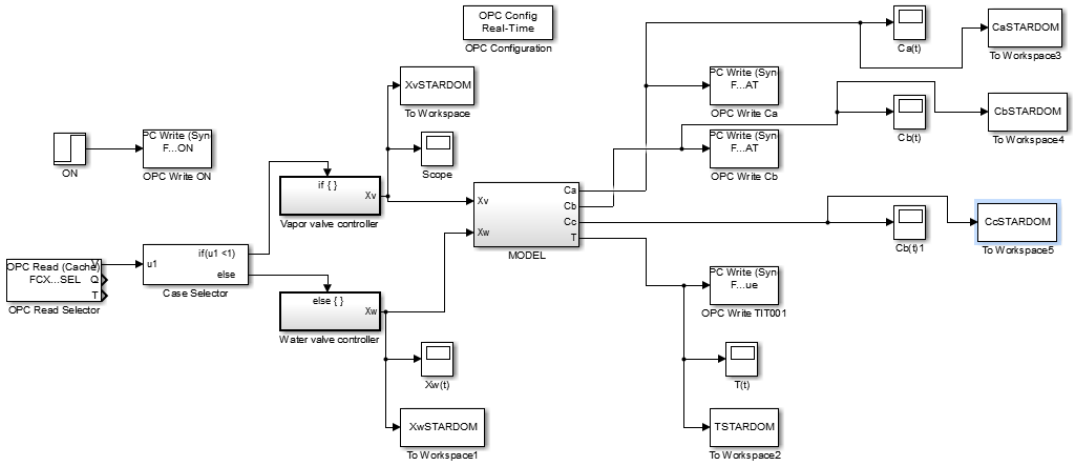


Figura C.17. Esquema de integración OPC del reactor batch.

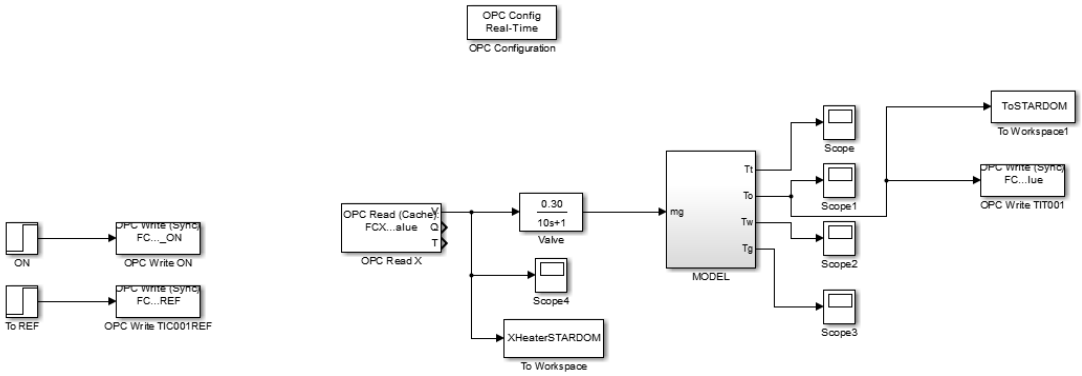


Figura C.18. Esquema de integración OPC del horno.

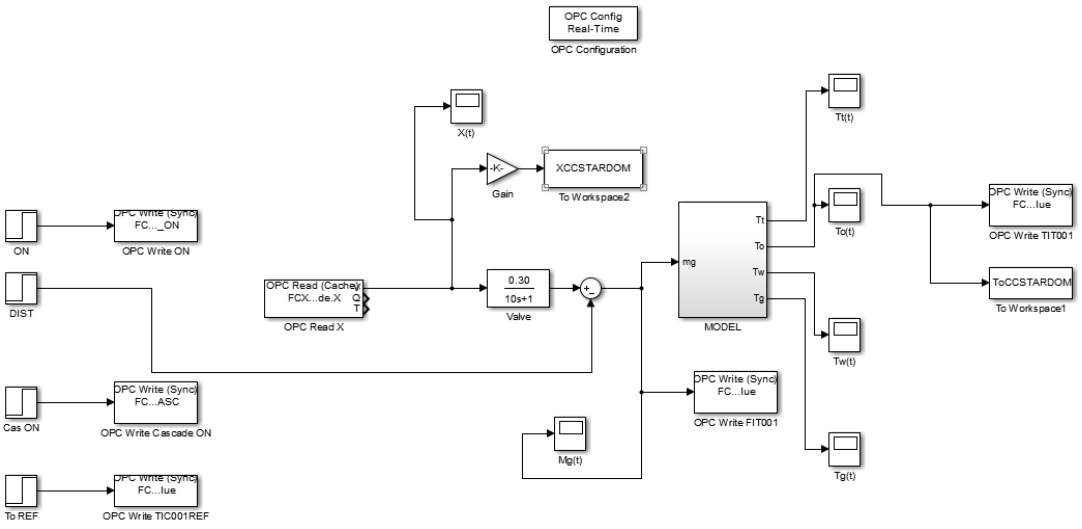


Figura C.19. Esquema de integración OPC del horno en cascada.

Apéndice D
Lógicas de control de Logic Designer

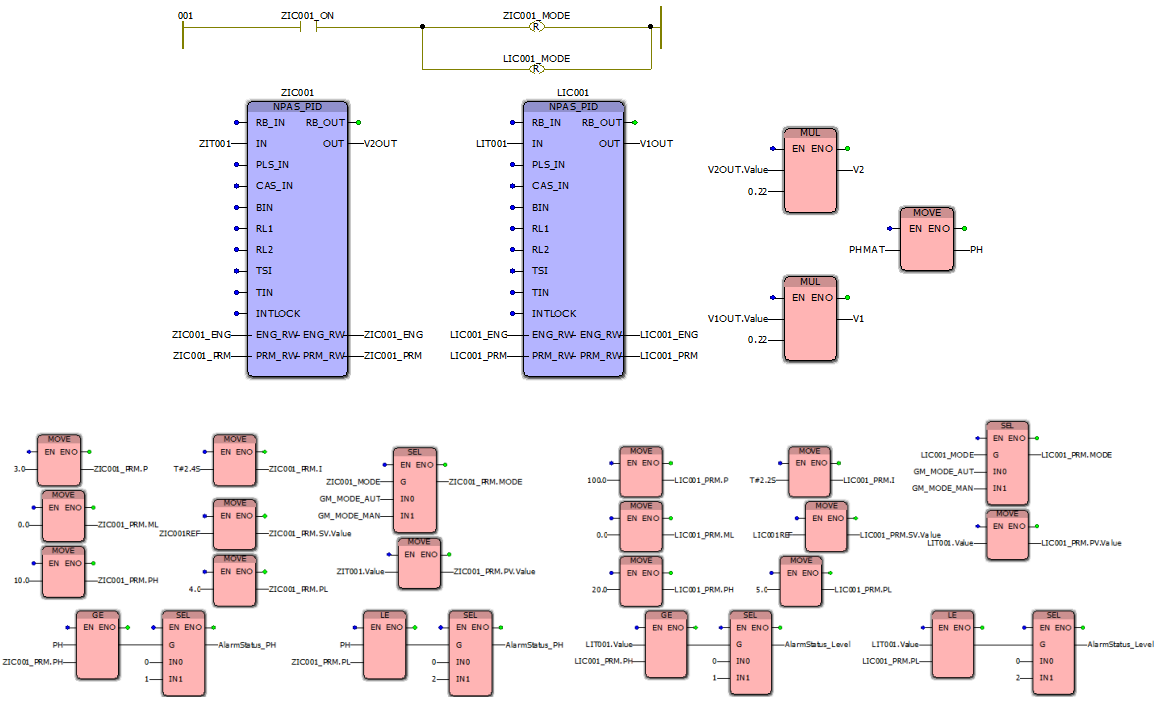


Figura D.1. Lógica de control del proceso de planta de neutralización para la estrategia de control PID.

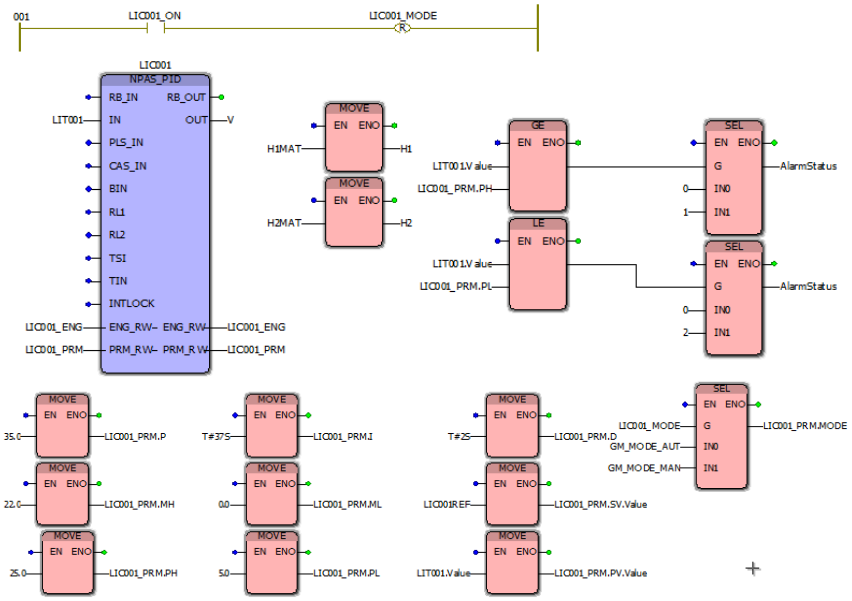


Figura D.2. Lógica de control del proceso de llenado de tanques 1 para la estrategia de control PID.

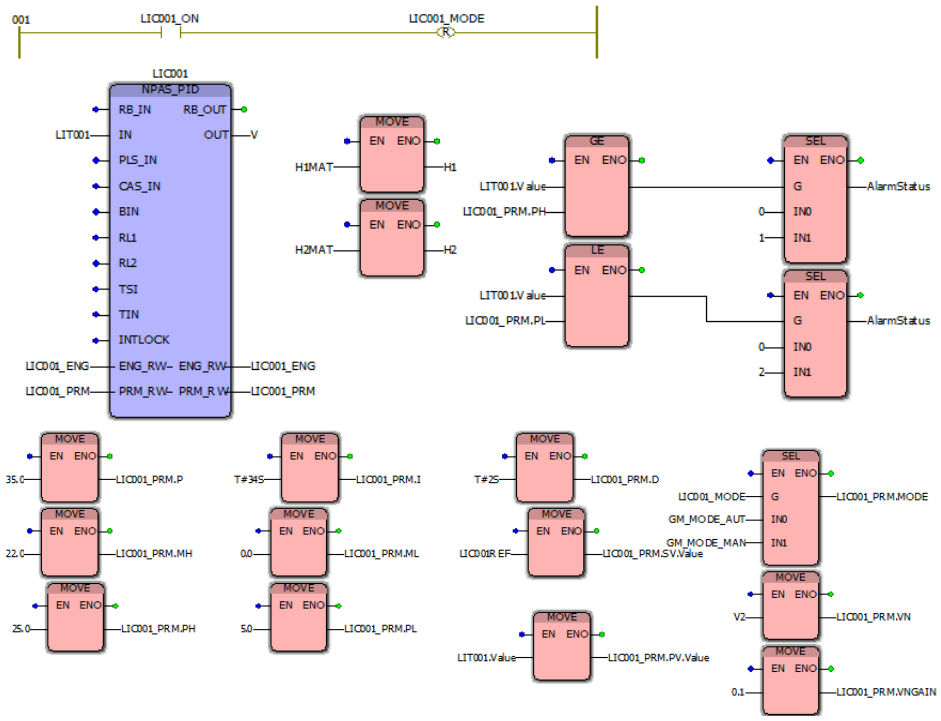


Figura D.3. Lógica de control del proceso de llenado de tanques 1 para la estrategia de control Feed-Forward.

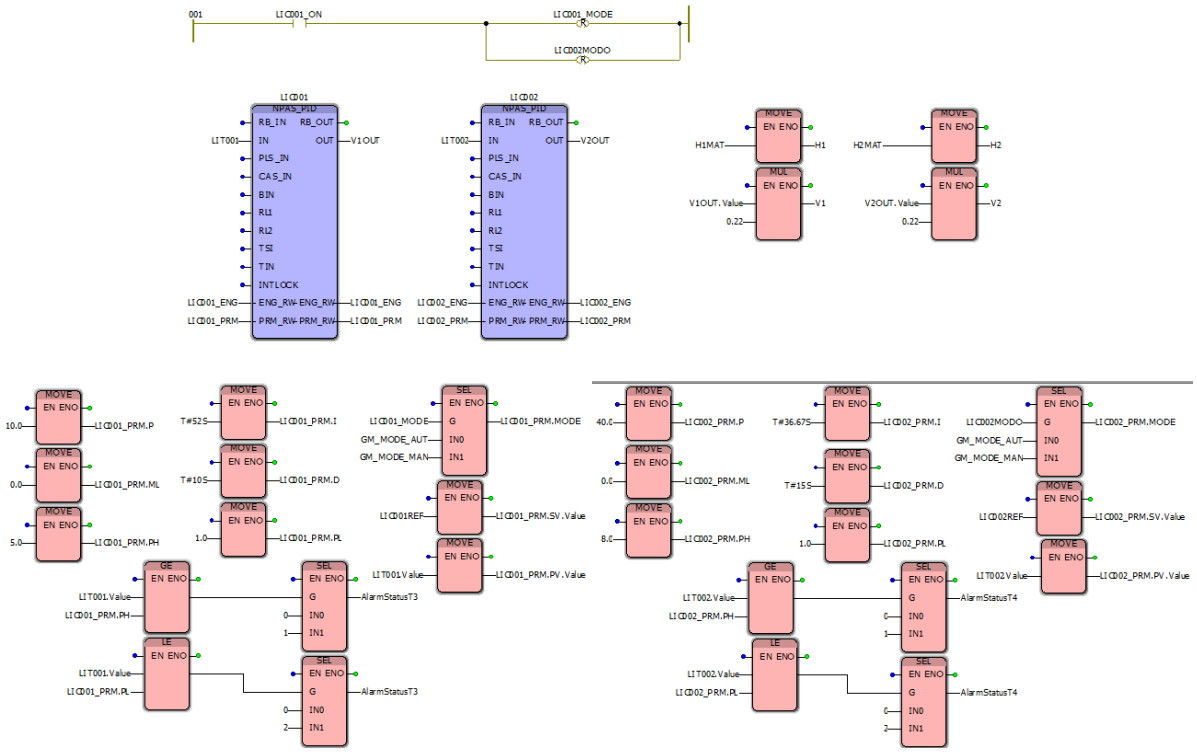


Figura D.4. Lógica de control del proceso de llenado de tanques 2 para la estrategia de control PID en redundancia.

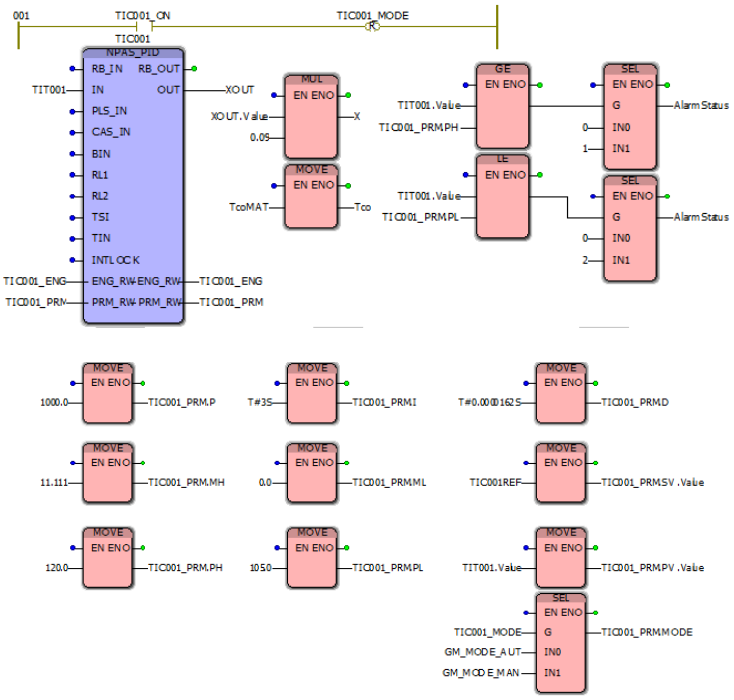


Figura D.5. Lógica de control del proceso de intercambiador de calor para la estrategia de control PID.

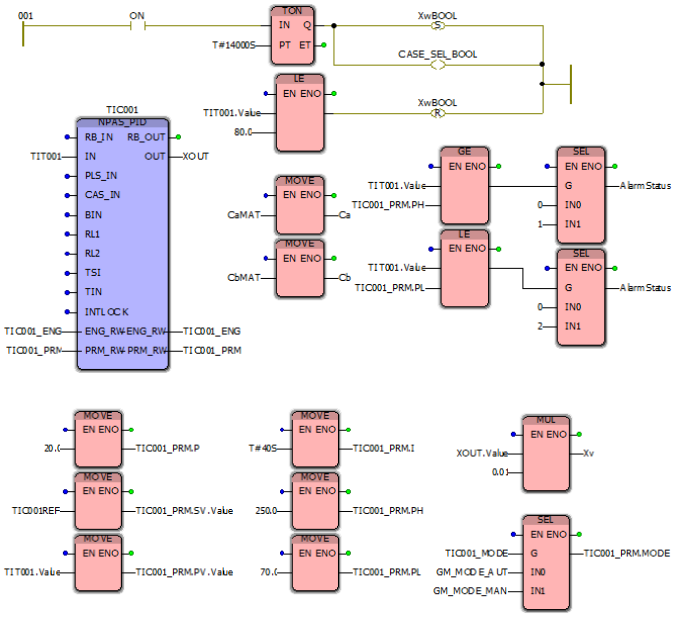


Figura D.6. Lógica de control del proceso de reactor batch para la estrategia de control PID selectivo.

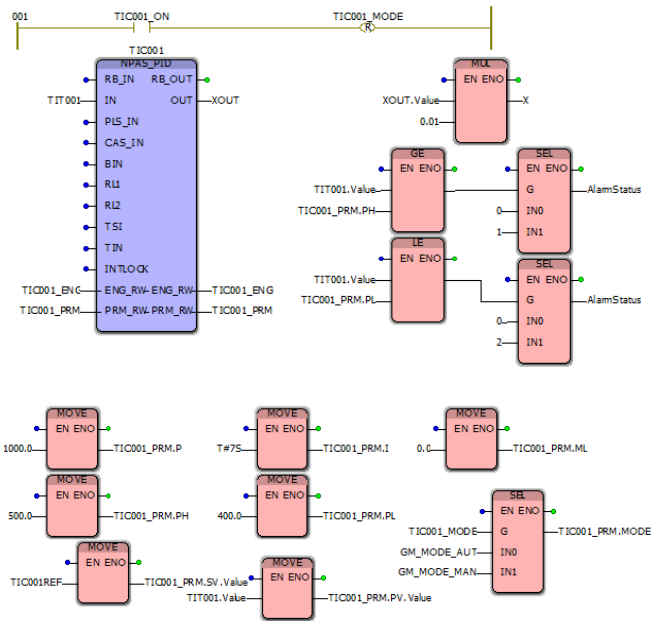


Figura D.7. Lógica de control del proceso de horno para la estrategia de control PID.

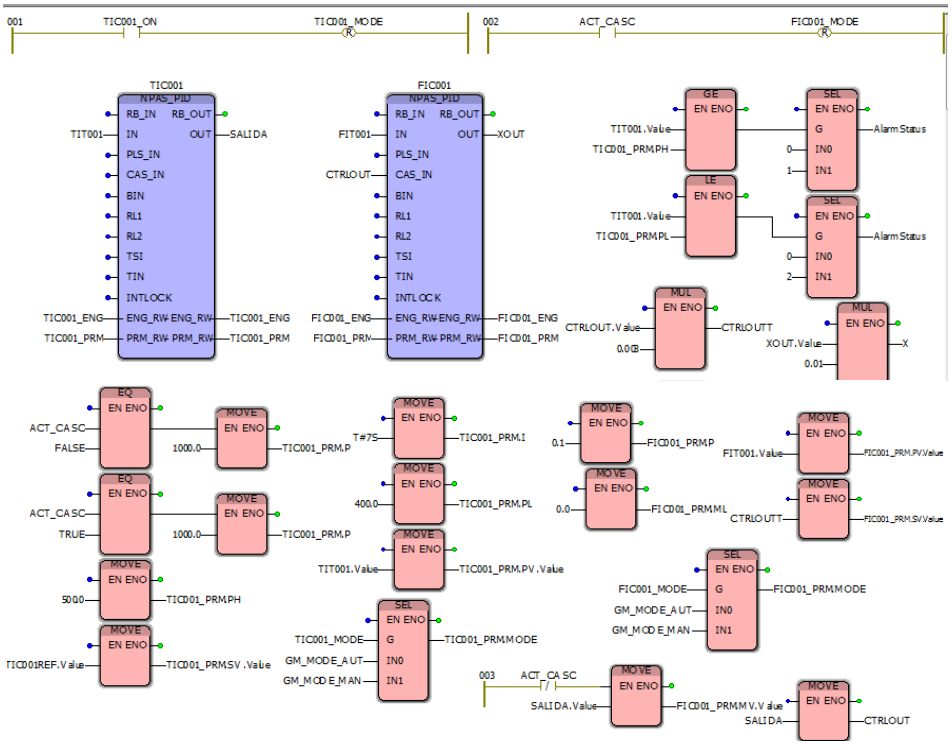


Figura D.8. Lógica de control del proceso de horno para la estrategia de control en cascada.

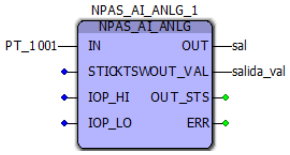


Figura D.9. Lógica de entrada analógica de instrumentos.

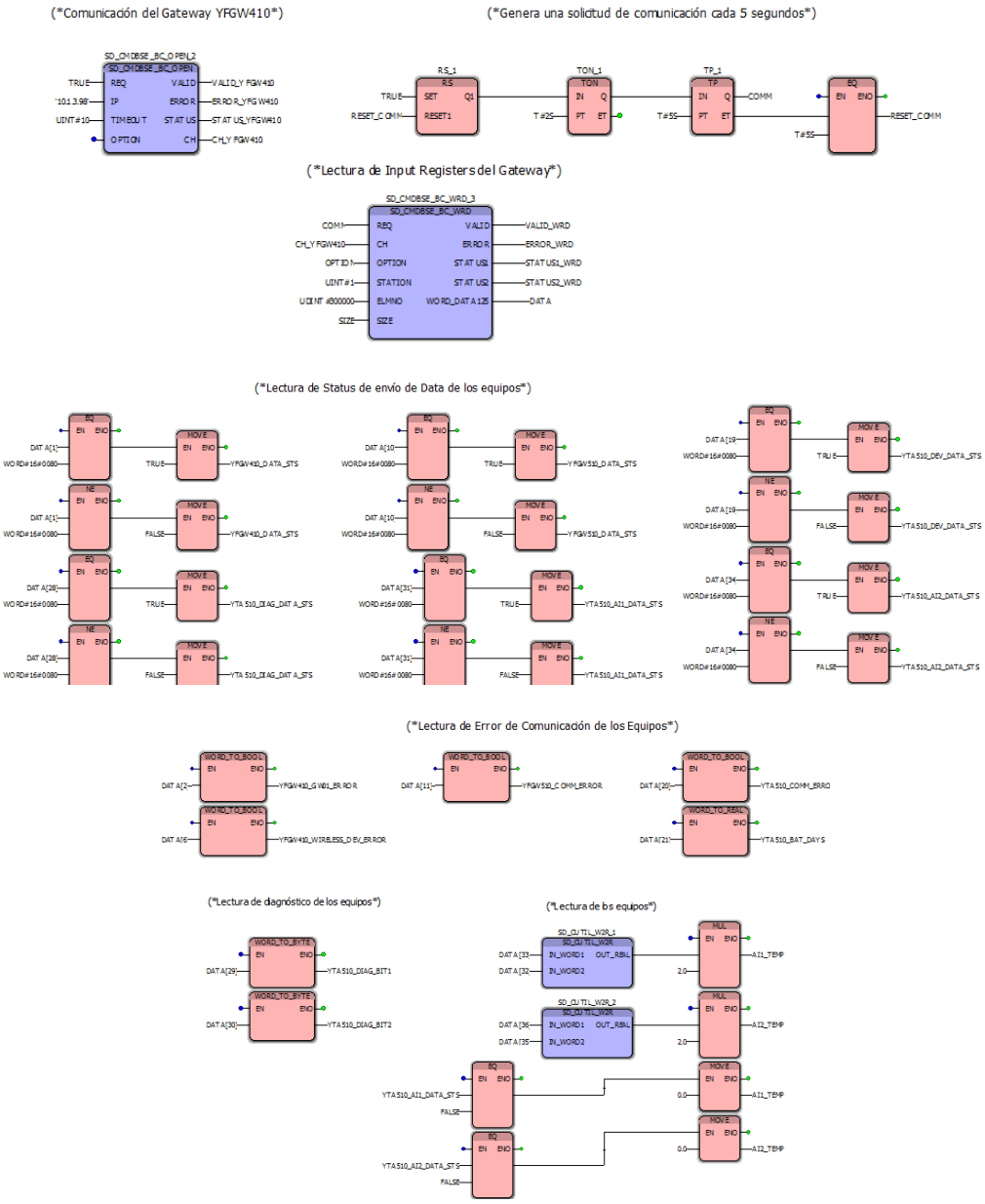


Figura D.10. Lógica de recepción de información Modbus del sistema de instrumentación inalámbrico..

Apéndice E
Despliegues gráficos en InfoWell

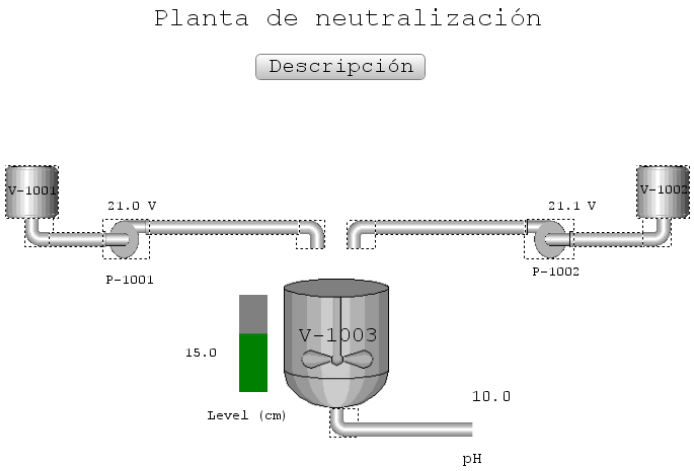


Figura E.1. Despliegue gráfico del proceso de planta de neutralización.

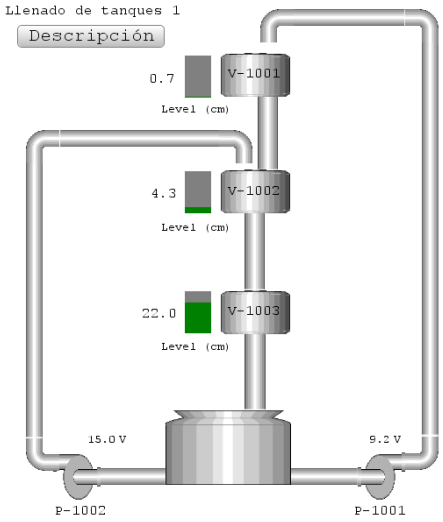


Figura E.2. Despliegue gráfico del proceso llenado de tanques 1.

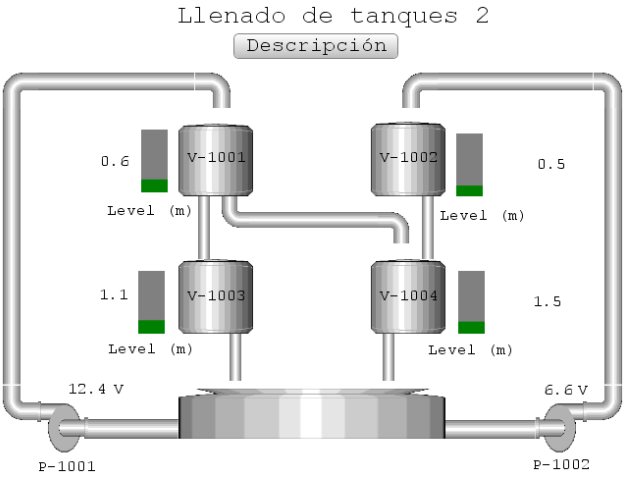


Figura E.3. Despliegue gráfico del proceso llenado de tanques 2.

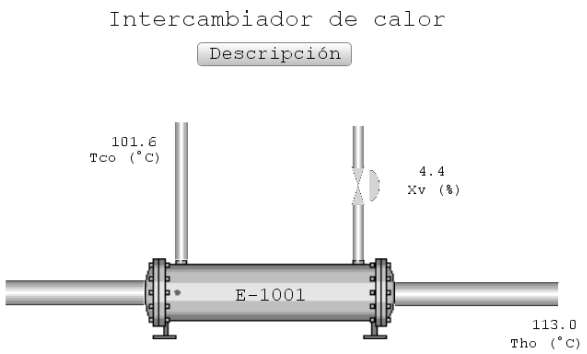


Figura E.4. Despliegue gráfico del proceso intercambiador de calor.

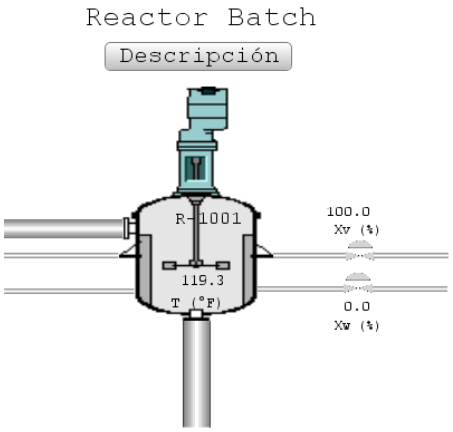


Figura E.5. Despliegue gráfico del proceso de reactor batch.



Figura E.6. Despliegue gráfico del proceso de horno.

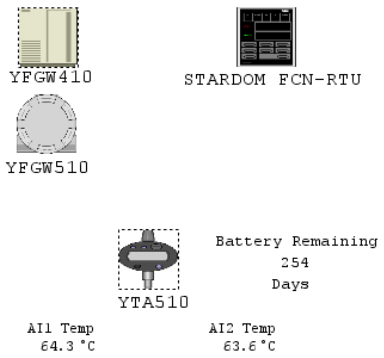


Figura E.7. Despliegue gráfico del sistema de instrumentación inalámbrico