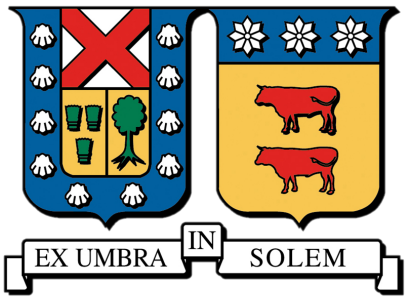
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA
VALPARAÍSO - CHILE



"MODELADO, SIMULACIÓN Y PUESTA EN MARCHA VIRTUAL DEL CONTROL MPC DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR"

KATIA ALEXANDRA URRUTIA GAJARDO

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRÓNICO, MENCIÓN CONTROL E INSTRUMENTACIÓN

PROFESOR GUÍA	**:**	**MANUEL OLIVARES S.**
PROFESOR CORREFERENTE	**:**	**ALEJANDRO SUÁREZ S.**

Febrero 2025

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Modelado, simulación y puesta en marcha virtual del control MPC de un intercambiador de calor

Nombre del candidato(a): Katia Alexandra Urrutia Gajardo

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Electrónica / Ingeniera Civil Electrónica

Campus: Casa Central Valparaiso **;** **Departamento**: Electrónica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Manuel Olivares Salinas, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 01/08/2025 ; **Firma:** Manuel Olivares S.

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 01/08/2025 ; **Firma:**

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de una u otra forma a la realización de esta memoria, titulada “Modelado, Simulación y Puesta en Marcha Virtual del Control MPC de un Intercambiador de Calor”.

En primer lugar, agradezco al profesor Manuel Olivares por proponerme este tema de memoria, por guiarme en cada momento en que me sentía estancada y, sobre todo, por su paciencia frente a los desafíos y problemas que surgieron a lo largo de este camino. Su apoyo y dedicación fueron fundamentales para llevar este trabajo a buen puerto.

A mi familia, que siempre ha sido mi pilar fundamental, quiero agradecerles por estar ahí en los momentos en que más los necesité. A mis padres, quienes han dado todo por sacarnos adelante. A mi abuela, que siempre me llamó para preguntarme cómo estaba. A mi hermano, por escucharme pacientemente cada vez que compartía mis preocupaciones y problemas sobre este trabajo, aunque no siempre entendiera del todo de qué estaba hablando.

A mis amigos de la universidad, quienes en su mayoría estuvieron conmigo desde el primer día, compartiendo no solo los desafíos académicos, sino que también incontables momentos de risas y buenos momentos que hicieron este camino mucho más llevadero.

A mis amigos del colegio, quienes se aventuraron conmigo a vivir en una nueva ciudad, donde no conocíamos a nadie. Durante los primeros años fueron mi segunda familia y siempre les tendré un aprecio especial.

Y, por último, pero no menos importante, a mi pequeña compañera peluda, que se desveló conmigo noche tras noche. Su simple presencia, siempre fue suficiente para darme fuerzas y seguir adelante.

Modelado, Simulación y Puesta en Marcha Virtual del Control MPC de un Intercambiador de Calor

Katia Urrutia

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico,
Mención Control e Instrumentación

Universidad Técnica Federico Santa María

Profesor Guía	:	Manuel Olivares S.
Profesor Correferente	:	Alejandro Suárez S.

Febrero 2025

Resumen

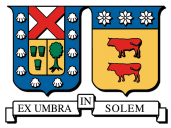
En la industria, existen numerosos procesos que deben ser controlados y/o automatizados. Sin embargo, trabajar directamente con los sistemas físicos puede ser limitado debido al riesgo de fallos en el control, los cuales podrían ocasionar daños graves en los equipos y/o personas. Esto plantea la necesidad de operar con sistemas de manera digital, lo que no solo aporta mayor tolerancia a fallos, sino que también facilita una transición amigable entre el entorno virtual y el físico.

Además, el uso de técnicas avanzadas de control aumenta a lo largo de los años, ya que suelen permitir una optimización más eficiente de los recursos disponibles.

En este documento se lleva a cabo el modelado y la simulación dinámica de un intercambiador de calor ubicado físicamente en el laboratorio de automatización industrial. Este sistema ha sido trabajado en memorias anteriores, por lo que cuenta con lazos de control PID local y la aplicación de control predictivo basado en modelo tipo supervisor de Honeywell, consituyendo el punto de partida de este desarrollo.

El enfoque de esta memoria se centra en la creación de dos simulaciones. La primera consiste en el control MPC directo del intercambiador de calor virtual, mientras que la segunda implementa el control MPC supervisor del sistema usando el programa LabVIEW. Finalmente, complementario a memorias anteriores, se realiza la conexión remota entre dos computadores vía OPC. En el primer computador, configurado como DCS, se ejecuta el control MPC, y en el segundo, se simula la dinámica del sistema en tiempo real, configurando de esta manera un gemelo digital del tipo "*Controller Hardware in the Loop* (C-HIL)".

Palabras claves: Intercambiador de calor, control PID, MPC, LabVIEW, modelado de sistemas, conexión vía OPC remoto, gemelos digitales.





Modeling, Simulation and Virtual Commissioning of MPC for a Heat Echanger

Katia Urrutia

Final project report towards the fulfillment of the Ingeniero Civil Electrónico, Minor in Control and Instrumentation

Universidad Técnica Federico Santa María

Advisor : Manuel Olivares S.
Co-advisor : Alejandro Suárez S.

February 2025

Abstract

In the industry, there are countless processes that need to be controlled and/or automated. However, working directly with physical systems can be challenging due to the risk of control failures, which could lead to significant damage to equipment or people. This highlights the need to operate systems digitally, which not only improves fault tolerance but also ensures a smoother transition between virtual and physical environments.

Moreover, the adoption of advanced control techniques has been steadily growing over the years, as they generally allow for more efficient resource optimization.

This document focuses on the modeling and dynamic simulation of a heat exchanger located in the industrial automation lab. This system has been addressed in previous studies, and it features local PID control loops along with the implementation of a supervisory model-based predictive control (MPC) made with Honeywell software, which makes the starting point of this study.

The core of this study involves creating two simulations. The first focuses on direct MPC control of the virtual heat exchanger, while the second applies supervisory MPC control to the system using LabVIEW software. Lastly, as a complement to previous studies, a remote connection is established between two computers using OPC. The first computer, configured as DCS, runs the MPC control, while the second simulates the system's dynamics on real time, thus configuring a digital twin of the "Controller Hardware-in-the-Loop (C-HIL)" type.

Keywords: Heat exchanger, PID control, MPC, LabVIEW, system modeling, remote OPC connection, digital twin.

Glosario

PLC: Programmable Logic Controller. Es un autómata programable usado para realizar tareas de forma automática en tiempo real.

PID: Control Proporcional, Integral y Derivativo. Es una estrategia de control por retroalimentación que calcula la actuación en base al valor deseado y el medido.

ARC: Advanced Regulatory Control. Estrategia de control regulatorio basados en la interconexión de lazos de control PID.

APC: Advanced Process Control. Estrategias de control avanzados de procesos.

MPC: Model Predictive Control, es una técnica de control que utiliza un modelo matemático para predecir el comportamiento futuro de un sistema, calculando la acción de control óptima.

HMI: Human Machine Interface. Como su nombre indica, es la interfaz gráfica entre el proceso y el operador. Se usa para la supervisión y control de procesos industriales.

P&ID: Piping and Instrumentation Diagram/Drawing. Es un diagrama de proceso que representa la instrumentación de este.

DCS: Distributed Control System. Es un sistema dedicado a la implementación de estrategias APC de control de procesos industriales complejos, integrando subsistemas conectados en red.

LabVIEW: Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench. Es un entorno de programación gráfica usado para soluciones de control.

OPC: Open Platform Communication. Es un estándar de comunicación basado en Windows utilizado en el control y supervisión de procesos industriales.

OPC DA: Es el acrónimo de OPC Data Access y es un estándar industrial que define la transferencia entre un servidor y un cliente.

TCP/IP: Protocolo de Control de Transmisión/Protocolo de Internet, es un protocolo para la transmisión de datos entre equipos en una misma red.

MIMO: Multiple Input Multiple Output, es decir, sistemas con múltiples entradas y múltimples salidas.

MV: Manipulated Variable. Corresponde a la variable manipulada por el controlador.

PV: Processed Variable. Es la variable controlada.

SP: Set Point. Es la referencia entregada al lazo de control.

VSD: Variable Speed Drive. En español son conocidos como variadores de frecuencia.

MU: Machine Unit.

IDCV: Intercambiador de calor virtual. Es el acrónimo utilizado para el gemelo digital del intercambiador de calor.

Índice de Contenidos

1. Introducción **1**
1.1. Problema a resolver y objetivos . . . 1
1.1.1. Objetivo Principal . . . 1
1.1.2. Objetivos Específicos . . . 2
1.2. Estado del arte . . . 3
1.2.1. Control predictivo basado en modelos . . . 3
1.2.2. LabVIEW . . . 6
1.3. Requerimientos funcionales . . . 9
1.3.1. Simulación dinámica del intercambiador de calor . . . 9
1.3.2. Estrategia de control MPC directo en DCS . . . 9
1.3.3. Estrategia de control MPC supervisor en DCS . . . 9
1.3.4. Estrategia MPC directo y supervisor . . . 9

2. Modelado del Intercambiador de Calor **10**
2.1. Instrumentación del intercambiador de calor . . . 10
2.1.1. Componentes del sistema . . . 11
2.1.2. Sensores . . . 14
2.1.3. Actuadores . . . 15
2.1.4. Controlador Lógico Programable (PLC) . . . 17
2.1.5. Computadores personales . . . 18
2.2. Dinámica del Intercambiador de Calor . . . 19
2.2.1. Balance de materia en el estanque . . . 20
2.2.2. Balance de energía en el estanque . . . 21
2.2.3. Balance de energía en el radiador . . . 22
2.2.4. Relación el calefactor y su potencia . . . 23
2.2.5. Relación entre la bomba y el flujo . . . 23
2.2.6. Relación el ventilador y su potencia . . . 23
2.2.7. Resumen ecuaciones . . . 24
2.2.8. Parámetros del sistema . . . 24
2.3. Simulación dinámica en LabVIEW . . . 26
2.3.1. Validación de la respuesta en lazo abierto . . . 27

3. Control Regulatorio Avanzado del Intercambiador de Calor **29**
3.1. Bloque PID_Compact en TIA Portal 29
3.2. Control PID del flujo del líquido circulante 31
3.2.1. Parámetros del controlador 31
3.2.2. Respuesta del lazo de control IDC real 32
3.3. Control PID de la temperatura del líquido que sale del estanque 33
3.3.1. Parámetros del controlador 33
3.3.2. Respuesta del lazo de control IDC real 34
3.4. Control PID de la temperatura del líquido que entra al estanque (ΔT) . 35
3.4.1. Parámetros del controlador 35
3.4.2. Respuesta del lazo de control IDC real 36
3.5. Diagrama P&ID del sistema completo 37
3.6. Simulación dinámica + PID en LabVIEW 39
3.6.1. Validación de la respuesta en lazo cerrado 41

4. Control Predictivo basado en Modelo del Intercambiador de Calor **44**
4.1. Características del control predictivo en LabVIEW 44
4.1.1. Descripción bloques utilizados 45
4.1.2. Etapas del diseño, parámetros e implementación del controlador 45
4.1.3. Integración del MPC en DCS con la simulación dinámica en LabVIEW mediante OPC 48
4.2. Diseño del MPC Directo del Intercambiador de Calor 48
4.2.1. Modelo lineal del intercambiador de calor 48
4.2.2. Diseño del MPC directo con modelo lineal discreto 54
4.2.3. Ajuste de parámetros del MPC directo con modelo no lineal y validación de la respuesta en lazo cerrado 59
4.2.4. Conexión del MPC directo en DCS con la simulación dinámica en LabVIEW 66
4.3. Diseño del MPC Supervisor del Intercambiador de Calor 70
4.3.1. Modelo lineal del intercambiador de calor + lazos PID 70
4.3.2. Diseño del MPC supervisor con modelo lineal 72
4.3.3. Ajuste de parámetros del MPC supervisor con modelo no lineal y validación de la respuesta en lazo cerrado 76
4.3.4. Conexión del MPC supervisor en DCS con la simulación dinámica en LabVIEW 84

5. Resultados y Conclusiones **87**
5.1. Análisis de resultados 87
5.1.1. Validación del modelo del intercambiador de calor virtual . . . 87
5.1.2. Implementación del control predictivo basado en modelo (MPC) 88
5.2. Aportes 90
5.3. Trabajo futuro 91

A. Detalles sobre el intercambiador de calor físico **93**
A.1. Diagrama detallado de cada subsistema 93
A.1.1. Calefactor y circuito de control de potencia 93
A.1.2. Bomba centrífuga y ventilador 95
A.2. Diagrama general del sistema completo 97

B. Configuraciones para comunicación entre computadores **98**
B.1. Creación del usuario 98
B.2. Reconocimiento entre los computadores 100
B.3. Configuración del Server Runtime 102
B.4. Configuración del DCOM 103
B.4.1. Configuraciones generales 104
B.4.2. Configuraciones del servidor OPC 106
B.4.3. Configuraciones del OPCEnum 108
B.4.4. Configuración de las políticas de seguridad local 108
B.5. Desactivación del Firewall de Windows 110

C. Creación y configuración de NI OPC Server **111**

D. Creación del OPC Client en LabVIEW **116**
D.1. Creación del Cliente OPC 116
D.2. Creación de las variables compartidas 118

E. Creación del OPC Client en NI OPC Servers 2016 **120**

Índice de Figuras

1.1. Diagrama de interacciones del proyecto 2
1.2. Estructura básica del control MPC 3
1.3. Arquitectura de MPC Regulatorio 4
1.4. Arquitectura de MPC Supervisor en Cascada 5
1.5. Arquitectura de MPC Supervisor en Paralelo 5
1.6. Módulo de Control Desing and Simulation 6
1.7. Submódulo “Simulation” 7
1.8. Submódulos de utilidad 7
1.9. Submódulo de control predictivo 8
1.10. Bloques necesarios para el control MPC 8

2.1. Diagrama del intercambiador de calor 10
2.2. Estanque físico 11
2.3. Bomba centrífuga Pedrollo CP130 12
2.4. Ventilador físico 13
2.5. Radiador físico 13
2.6. Sensor de flujo Nuflo 14
2.7. Componentes del variador de frecuencia SIEMENS G120 15
2.8. Conexión de TRIACS en calefactor de inmersión trifásico 16
2.9. Interior del circuito inegrado TCA280B 17
2.10. PLC SIEMENS S7-1500 17
2.11. Distribución de los computadores 18
2.12. Definición de variables 19
2.13. Entradas y salidas del IDC 19
2.14. Simplificación del sistema (estanque) 21
2.15. Simplificación del sistema (radiador) 22
2.16. Simulación IDC (lazo abierto) en LabVIEW 26
2.17. Respuesta en lazo abierto del IDCV 27

3.1. Esquema de control del bloque PID de en TIA Portal 30
3.2. Lazo de control de flujo del líquido circulante 31
3.3. Parámetros de control del bloque PID de flujo 31
3.4. Respuesta lazo de control de flujo 32

3.5. Lazo de control de la temperatura de salida 33
3.6. Parámetros de control del bloque PID de temperatura de salida 33
3.7. Respuesta lazo de control de temperatura de salida 34
3.8. Lazo de control de la diferencia de temperatura 35
3.9. Parámetros del bloque PID de la diferencia de temperatura 36
3.10. Respuesta lazo de control ΔT 36
3.11. Diagrama P&ID del intercambiador de calor 37
3.12. Simulación IDC (lazo cerrado) en LabVIEW 39
3.13. Control PID con antiwindup 40
3.14. Respuesta lazo de control de flujo (simulación) 41
3.15. Respuesta lazo de control de temperatura de salida (simulación) 42
3.16. Respuesta lazo de control ΔT (simulación) 43

4.1. Control predictivo sistema de primer orden 46
4.2. Panel frontal sistema de primer orden 47
4.3. Esquema de conexión servidor-cliente 48
4.4. Discretización del IDCV en LabVIEW 54
4.5. Esquema de control con modelo lineal 54
4.6. Diagrama de bloques IDCV Lineal discreto 55
4.7. Panel frontal MPC directo con IDCV Lineal discreto 58
4.8. Esquema de control con modelo no lineal en un mismo PC 59
4.9. Servidor OPC para el control MPC directo 59
4.10. Clientes de LabVIEW para MPC directo 60
4.11. Controlador MPC Directo modificado 61
4.12. Simulación IDCV modificado 62
4.13. MPC Directo: Control de caudal 63
4.14. MPC Directo: Control temperatura de salida 64
4.15. MPC Directo: Control diferencia de temperatura 65
4.16. Cliente OPC en NI OPC Servers (MPC directo remoto) 66
4.17. Cliente OPC en LabVIEW (MPC directo remoto) 67
4.18. Modificaciones para conexión remota MPC directo 68
4.19. MPC Directo: Conexión remota vía OPC 69
4.20. Control PI en diagrama de bloques 70
4.21. Esquema de control MPC supervisor con modelo lineal 72
4.22. Diagrama de bloques IDCV + PID lineal discreto 73
4.23. Panel frontal controlador MPC supervisor con IDCV+PID lineal discreto 76
4.24. Esquema de control MPC supervisor con IDCV no lineal en un mismo PC 76
4.25. Servidor OPC MPC supervisor 77
4.26. Cliente LabVIEW 77
4.27. Simulación MPC Directo modificado 78
4.28. Simulación IDCV modificado 79
4.29. MPC Supervisor: Control de caudal 81

4.30. MPC Supervisor: Control temperatura de salida 82
4.31. MPC Supervisor: Control diferencia de temperatura 83
4.32. ClienteOPC 84
4.33. Modificaciones para conexión remota MPC directo 85
4.34. MPC Supervisor: Conexión remota vía OPC 86

A.1. Diagrama detallado subsistema calefactor y circuito de potencia 94
A.2. Diagrama detallado subsistema bomba y ventilador 96
A.3. Diagrama general del IDC 97

B.1. Administración de equipos 99
B.2. Usuarios locales 99
B.3. Creación del nuevo usuario 99
B.4. Permisos de administración 100
B.5. Verificación grupo de trabajo 100
B.6. Búsqueda de la ventana de comandos 101
B.7. Ping desde el PC Bode02 101
B.8. Ping desde el PC BODE16 102
B.9. Opciones del Runtime 102
B.10. Proceso del Runtime 103
B.11. Búsqueda de los servicios de componente 104
B.12. ventana servicios de componente 104
B.13. Configuraciones generales 105
B.14. Permisos de acceso 105
B.15. Configuración DCOM NI OPC Servers 106
B.16. Propiedades de NI OPC Servers 2016 107
B.17. Configuración DCOM OPCEnum 108
B.18. Políticas DCOM 108
B.19. Políticas DCOM 109
B.20. Accso a la red: permiso para usuarios anónimos 109
B.21. Accso a la red: modelo de compartir y seguridad 109
B.22. Desactivación del Firewall de Windows 110

C.1. Interfaz NI OPC Server Configuration 111
C.2. Creación de un nuevo canal 112
C.3. Interfaz con canal añadido 113
C.4. Creación de un nuevo dispositivo 114
C.5. Interfaz con canal y dispositivo añadido 114
C.6. Propiedades del nuevo Tag por agregar 115

D.1. Árbol de proyecto en LabVIEW 116
D.2. Menú de creación de un servidor I/O 117
D.3. Configuración del cliente OPC 117
D.4. Librería creada 118

D.5. Propiedades de las variables compartidas 118
D.6. Creación de variables compartidas 119

E.1. Creación de un nuevo canal 121
E.2. Creación de un nuevo dispositivo 122
E.3. Agregar elementos 123
E.4. Cliente OPC creado 123
E.5. Cliente OPC en LabVIEW 124
E.6. Agregar variables en LabVIEW 124
E.7. Modo de conexión para las variables 125

Índice de Tablas

2.1. Especificaciones técnicas del estanque 11
2.2. Especificaciones técnicas del calefactor de inmersión 12
2.3. Especificaciones técnicas de la bomba centrífuga 12
2.4. Especificaciones técnicas del ventilador 13
2.5. Especificaciones técnicas del radiador 14
2.6. Especificaciones técnicas del sensor de flujo 14
2.7. Especificaciones técnicas del sensor de temperatura 15
2.8. Descripción del PC1 18
2.9. Descripción del PC2 18
2.10. Constantes del sistema 24
2.11. Rango de las variables de interés 25
2.12. Parámetros a sintonizar 25

3.1. Parámetros del bloque PID 30
3.2. TAGs del diagrama P&ID 38

C.1. Direcciones para los tags 115

1 Introducción

En este capítulo se presenta el problema a resolver durante el desarrollo de este trabajo junto con los objetivos y requerimientos funcionales que se esperan cumplir una vez finalizado. Además, se establece un resumen del estado actual de las herramientas que serán utilizadas a lo largo de este estudio, con el fin de contextualizar al lector.

1.1. Problema a resolver y objetivos

El proyecto "Modelado, Simulación y Puesta en Marcha Virtual del Control MPC de un Intercambiador de Calor" tiene como objetivo establecer el modelo dinámico del intercambiador de calor (IDC) presente en el laboratorio de control industrial, para posteriormente establecer dos estrategias de control predictivo: directo y supervisor, utilizando el programa LabVIEW.

Este sistema fue abordado previamente en las memorias de:

- Richard Vergara [1]: "Control Supervisor Difuso de un Intercambiador de Calor"
- Víctor Vicencio [2]: "Aplicación de MPC Supervisor a un Intercambiador de Calor"

En los gráficos obtenidos en estos trabajos, se observa que los tiempos de espera son considerablemente largos, donde la variable más lenta alcanza la referencia en aproximadamente 30 minutos, aumentando aún más para obtener los gráficos completos. Esto genera una problemática asociada a la lentitud para obtener resultados, donde una mala sintonización de los parámetros de control puede resultar en horas perdidas esperando al siguiente resultado.

Por lo tanto, el enfoque principal de esta memoria consiste en digitalizar el IDC, con el fin de reducir los tiempos espera para obtener respuestas del sistema y permitir la modificación de los parámetros del controlador sin riesgo de dañar los equipos físicos.

1.1.1. Objetivo Principal

- Poner en marcha y evaluar un controlador "Multivariable Predictive Control" (MPC) implementado en un DCS aplicado a un intercambiador de calor virtual (IDCV) alojado en un computador independiente, configurando un esquema *Controller Hardware In the Loop* (C-HIL).

1.1.2. Objetivos Específicos

- Modelar y simular el intercambiador de calor mediante el programa LabVIEW, para obtener una representación virtual escalada en tiempo real del IDC en un computador.
- Simular la estrategia de control regulatorio avanzado PID que posee el IDC real mediante LabVIEW.
- Diseñar un controlador MPC directo en LabVIEW en el DCS y conectarlo con la simulación del intercambiador de calor virtual (IDCV).
- Diseñar un controlador MPC supervisor en cascada con los lazos PID en el DCS y conectarlo con la simulación del IDCV junto a los lazos PID.
- Establecer una conexión remota entre el DCS y el computador dedicado a la simulación del proceso mediante el protocolo de comunicación OPC para los dos esquemas de control MPC.

Al finalizar este proyecto se pretende tener dos simulaciones del IDC, donde la primera corresponde únicamente a la dinámica del IDC, mientras que la segunda incluye el IDC junto a los lazos PID (IDCV-ARC).

La idea es poder interactuar con el sistema tal como se muestra en la figura 1.1, donde existe un servidor OPC alojado en el PC2 y dos clientes:

- El primer cliente OPC se encuentra dentro del mismo PC2 y es utilizado por la simulación del IDCV o bien, la simulación del IDCV + PID.
- El segundo cliente OPC se ubica en el PC1 (DCS) y es utilizado para implementar el control MPC directo o supervisor.

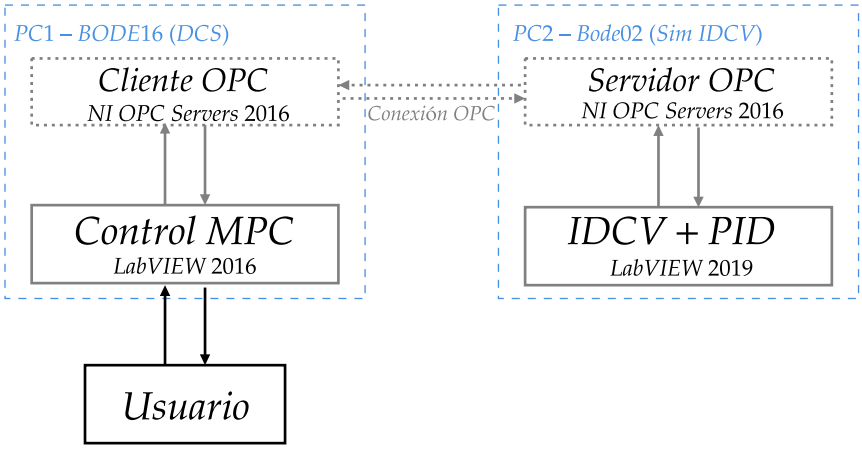


Figura 1.1: Diagrama de interacciones del proyecto

Además, el usuario interactúa principalmente con el PC1(DCS), estableciendo los parámetros del control MPC directo o supervisor, y definiendo las referencias deseadas para el sistema.

Este esquema puede permitir, en un futuro, reemplazar el contenido del PC2 por el HMI en LabVIEW creado por Víctor Vicencio en su memoria, conectado con el IDC real y su respectivo esquema de control regulatorio avanzado PID, el cual se encuentra implementado en un PLC físico en conjunto con dos variadores de frecuencia.

1.2. Estado del arte

Resulta de interés conocer el estado actual de las herramientas a utilizar, es por ello que se realiza un resumen con cada una de ellas, con el fin de comprender su rol dentro de este trabajo.

1.2.1. Control predictivo basado en modelos

El control predictivo por modelo (MPC por sus siglas en inglés) [3] es una estrategia de control avanzada que utiliza un modelo explícito del proceso para predecir y optimizar el comportamiento futuro del sistema. A diferencia de controladores tradicionales, como el PID, el MPC no se limita a reaccionar a los errores presentes, sino que también anticipa eventos futuros dentro de un intervalo conocido como horizonte de predicción. Esto le permite calcular las acciones de control óptimas para minimizar el error futuro, teniendo en cuenta las restricciones del sistema.

Esta estrategia de control es recomendable para sistemas multivariables (MIMO) o en aquellos donde las variables se encuentran acopladas. Su capacidad para manejar las restricciones y optimizar el rendimiento del sistema lo convierte en una herramienta poderosa en aplicaciones industriales.

El esquema general de implementación del MPC se muestra en la figura 1.2 [4].

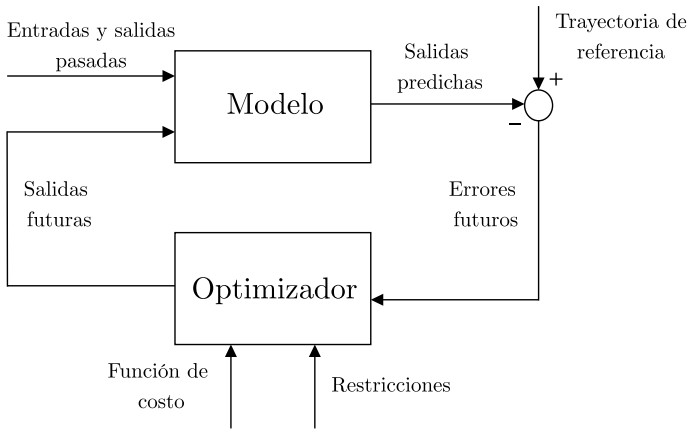


Figura 1.2: Estructura básica del control MPC

La estructura básica del MPC incluye los siguientes componentes:

- **Modelo del sistema:** Recibe las entradas y salidas pasadas y las entradas actuales y futuras, con el fin de predecir las salidas futuras.
- **Optimizador:** A partir de las salidas predichas y la trayectoria de referencia se calculan los errores futuros, donde el optimizador se encarga de minimizar la función de costo teniendo en cuenta las restricciones del sistema y así poder calcular las entradas futuras (actuaciones).

Por lo general, la función de costo utilizada para el control MPC es la mostrada en la ecuación (1.1).

$$J = \sum_{i=N_1}^{N_2} \delta_i[y(k+i \mid k) - w(k+i)]^2 + \sum_{i=0}^{N_u-1} \lambda_i[\Delta u(k+i)]^2 \tag{1.1}$$

donde:

- y son las salidas del sistema.
- Δu son los incrementos de actuaciones presentes y futuras.
- N_1 y N_2 son los límites del horizonte de predicción.
- N_u es el horizonte de control.
- δ_i pondera los errores de seguimiento de la trayectoria de referencia futura.
- λ_i pondera los incrementos futuros en la acción de control.
- $w(k+i)$ representa el valor deseado o referencia en el tiempo futuro $(k+i)$.

Esta estrategia de control cuenta con dos formas de implementación: MPC directo o regulatorio y MPC indirecto o supervisor. El uso de cada uno depende de la aplicación y optimización deseada.

1.2.1.1. MPC Directo o Regulatorio

Como su nombre lo indica, el control predictivo es aplicado directamente sobre la planta, tal como se muestra en la figura 1.3 [3].

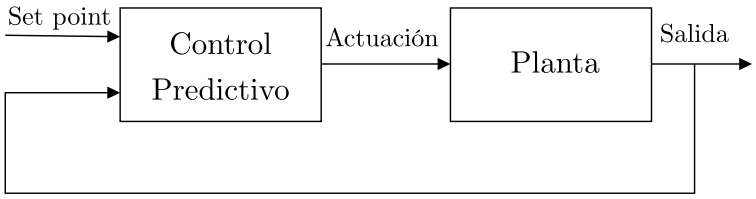


Figura 1.3: Arquitectura de MPC Regulatorio

Esta arquitectura resulta ventajosa, ya que como se comprueba en la referencia [3], su rendimiento supera al de un control PID tradicional. Además, permite incorporar las restricciones del sistema, lo que mejora la seguridad y eficiencia del proceso.

1.2.1.2. MPC Supervisor

Aunque en teoría el MPC directo ofrece un mejor rendimiento que el control PID, en la práctica, reemplazar toda la infraestructura del control PID puede resultar costoso y/o riesgoso para la industria. Por esta razón, generalmente se opta por implementar el MPC supervisor, que permite trabajar en conjunto con los controladores PID y, al mismo tiempo, optimizar el proceso. Existen dos arquitecturas comunes para esta implementación:

- ***MPC supervisor en cascada:*** En esta configuración, el MPC no interfiere directamente con el lazo cerrado del PID, sino que actúa sobre las referencias de los controladores PID. Esto se aprecia de mejor forma en la figura 1.4 [3].

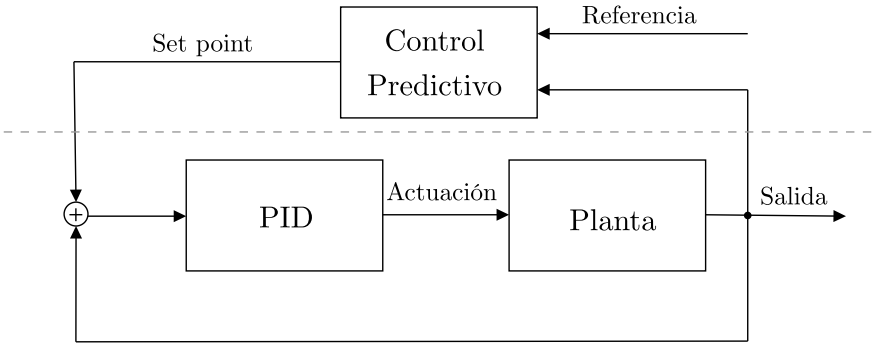


Figura 1.4: Arquitectura de MPC Supervisor en Cascada

  Esta arquitectura es utilizada en este trabajo, ya que permite mantener la infraestructura existente mientras se mejora el rendimiento del sistema.

- ***MPC supervisor en paralelo:*** En este caso, el MPC afecta directamente la dinámica del lazo cerrado, ya que se interactúa con la actuación de la planta, tal como se muestra en la figura 1.5 [3].

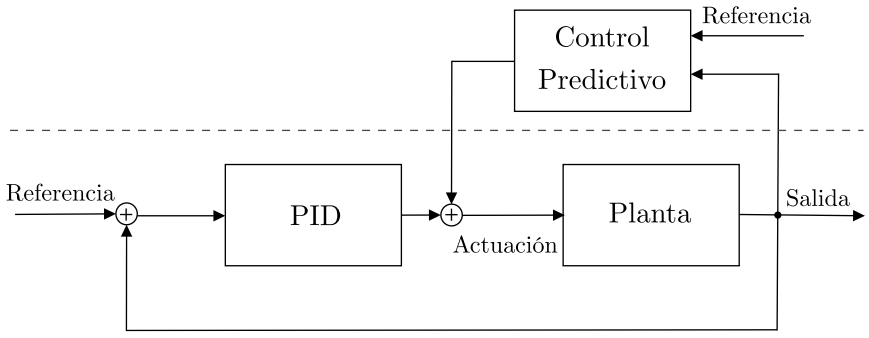


Figura 1.5: Arquitectura de MPC Supervisor en Paralelo

1.2.2. LabVIEW

LabVIEW es un entorno de programación gráfica desarrollado por National Instruments, diseñado para facilitar la creación de sistemas de adquisición de datos, control y pruebas automatizadas. Su principal característica es que posee una interfaz intuitiva que permite la programación mediante la conexión de bloques, lo que permite al usuario enfocarse en la solución del problema en lugar de la implementación del código.

Es compatible con una amplia variedad de *hardware* y dispositivos de adquisición de datos. Además, cuenta con extensas bibliotecas de funciones y algoritmos, lo que permite el análisis de datos en tiempo real, integración de otros lenguajes de programación y la creación de interfaces de usuario personalizadas para el control de sistemas. LabVIEW es compatible con diversas plataformas, como Windows, macOS y Linux y dispone de una amplia documentación en la página de National Instruments, así como una comunidad activa donde los usuarios pueden intercambiar conocimiento y resolver dudas.

Para el desarrollo de este proyecto, es necesario implementar dos simulaciones para la dinámica del intercambiador de calor: una en lazo abierto y otra en lazo cerrado (con lazos de control PID). Adicionalmente, se requieren dos simulaciones para el control predictivo: directo y supervisor. El módulo "Control & Simulation" mostrado en la figura 1.6, es fundamental para ambos propósitos.

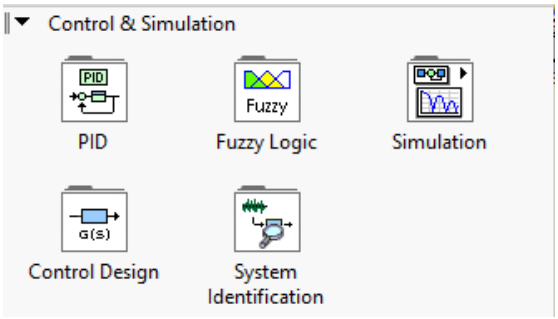


Figura 1.6: Módulo de Control Desing and Simulation

Como es posible observar, el módulo cuenta con una gran variedad de funciones. Sin embargo, no todas son utilizadas en este trabajo. A continuación se explican las funciones más relevantes para el desarrollo de la memoria.

1.2.2.1. Construcción de modelos

Las simulaciones asociadas al intercambiador de calor se basan en ecuaciones dinámicas, las cuales se construyen como diagramas de bloques. Para habilitar el uso de las funcionalidades necesarias, la estructura base que se debe incluir es el *Control & Simulation Loop* del submódulo *Simulation*, dentro de este, se pueden incluir todos los bloques de los submódulos que muestran en la figura 1.7.

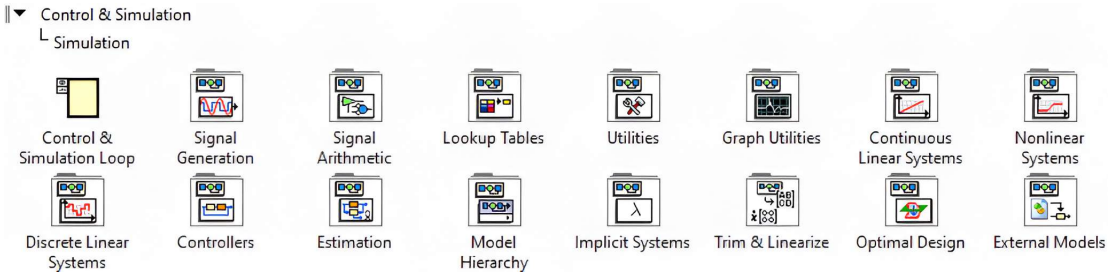
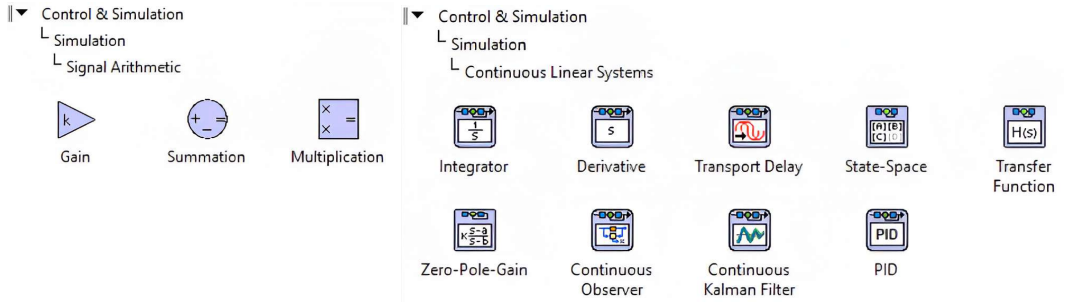


Figura 1.7: Submódulo “Simulation”

Entre las herramientas claves se encuentra:

- **Signal Arithmetic:** Su contenido se muestra en la figura 1.8 (a), este permite realizar operaciones matemáticas como suma, resta, multiplicación, división y amplificación de señales para la construcción de los diagramas de bloque que representan las ecuaciones dinámicas.
- **Continuous Linear Systems:** Se compone de los elementos mostrados en la figura 1.8 (b), donde el bloque fundamental es el integrador, ya que en las ecuaciones dinámicas representadas como bloques, la derivada de una variable se despeja, y mediante el integrador es posible obtener la señal de interés en función del tiempo.



(a) “Signal Arithmetic” (b) “Continous Linear Systems”

Figura 1.8: Submódulos de utilidad

1.2.2.2. Control Predictivo

Con el fin de implementar simulaciones asociadas al control predictivo, LabVIEW ofrece los bloques mostrados en la figura 1.9, a los cuales se puede acceder siguiendo la ruta *Control & Simulation >Control Design >Predictive Control*.

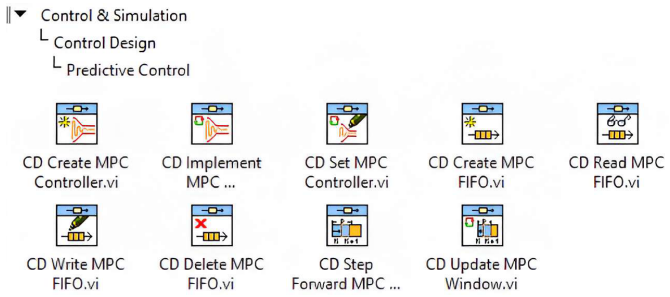
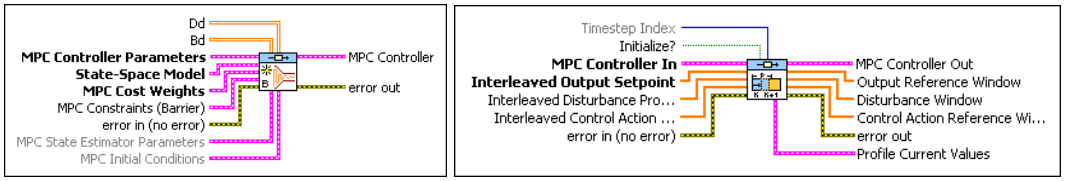


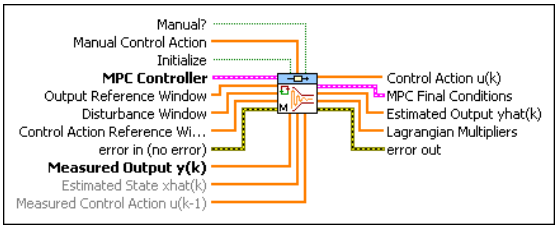
Figura 1.9: Submódulo de control predictivo

Como se puede observar, el programa ofrece una gran variedad de funcionalidades, pero las más relevantes para este proyecto son las presentadas en la figura 1.10 [5], donde se pueden apreciar todas las entradas y salidas de cada bloque.



(a) Crear controlador

(b) Siguiente paso del controlador



(c) Implementar controlador

Figura 1.10: Bloques necesarios para el control MPC

El propósito de estos bloques es:

- *CD Create MPC Controller:* Crea el controlador para el modelo en variables de estado discreto ingresado.
- *CD Step Forward MPC Window:* Calcula la ventana de predicción adecuada para los perfiles de referencia y/o perturbación, ajustando dinámicamente el horizonte de predicción.
- *CD Implement MPC Controller:* Usando el controlador creado, determina la actuación $u(k)$ óptima que se aplicará a la planta.

1.3. Requerimientos funcionales

Se describen los requisitos funcionales del proyecto, los cuales deben cumplirse para alcanzar los objetivos propuestos.

1.3.1. Simulación dinámica del intercambiador de calor

Se debe desarrollar una simulación en LabVIEW que modele las ecuaciones dinámicas del IDC en lazo abierto. Adicionalmente, se requiere una segunda instancia que, además de la dinámica del IDC, incorpore los lazos de control PID locales que posee el sistema físico para simular la dinámica en lazo cerrado. Estos lazos deben regular el flujo del líquido circulante, la temperatura de salida y la diferencia de temperatura.

1.3.2. Estrategia de control MPC directo en DCS

Utilizando **un solo computador** y la simulación dinámica del IDC en lazo abierto, se debe crear una simulación donde se configura el control MPC directo en LabVIEW. Para verificar el comportamiento de esta estrategia de control, se conectan ambas simulaciones mediante un servidor OPC.

1.3.3. Estrategia de control MPC supervisor en DCS

En esta etapa nuevamente se emplea **un computador**, pero esta vez con la simulación que incluye la dinámica del IDC junto a los lazos de control PID locales. Se genera una simulación para la configuración del control MPC supervisor en cascada en LabVIEW y se conectan ambas simulaciones a través de un servidor OPC.

1.3.4. Estrategia MPC directo y supervisor

Se aplican ambas estrategias de control, pero esta vez utilizando **dos computadores** en el primero (DCS) se establece el control predictivo directo o supervisor, según corresponda, mientras que en el segundo se simula la dinámica del IDC o bien, la dinámica del IDC junto a los lazos PID.

La conexión entre el DCS del controlador MPC y el PC de la simulación IDCV/IDCV-ARC es mediante el protocolo de comunicación OPC remoto.

2 | Modelado del Intercambiador de Calor

Se describen los sensores y actuadores que componen el sistema, para un mejor entendimiento de su funcionamiento en conjunto. Además se establece el modelo dinámico del intercambiador de calor y la validación de la respuesta en lazo abierto.

2.1. Instrumentación del intercambiador de calor

El diagrama de este sistema se puede apreciar en la figura 2.1 [2] y las partes que lo componen se resumen en:

- Estanque térmicamente aislado
- Calefactor de inmersión trifásico
- Bomba centrífuga trifásica
- Radiador
- Ventilador axial trifásico
- Válvula de bola manual de recirculación
- Válvula de bola manual de vaciado
- Sensores de temperatura PT-100
- Flujómetro de turbina

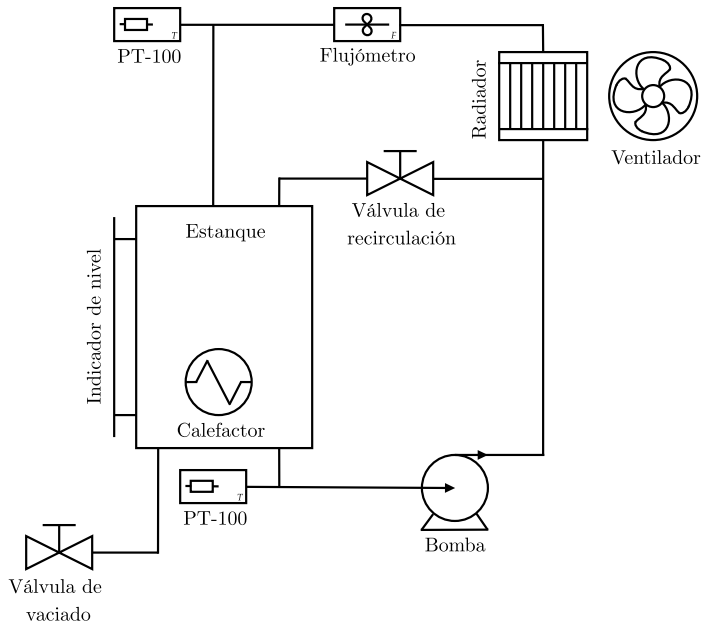


Figura 2.1: Diagrama del intercambiador de calor

Para más información respecto a la construcción de este sistema, se puede revisar el anexo A, donde se muestra en mayor detalle las conexiones y circuitos usados.

2.1.1. Componentes del sistema

Se describe en mayor profundidad los componentes del sistema "intercambiador de calor", que son aquellos que no pertenecen a la categoría de sensores, actuadores o controladores.

2.1.1.1. Estanque

El estanque tiene una geometría cilíndrica, cuya característica es que posee un forro exterior que le permite aislar de mejor manera el calor. La implementación física se puede observar en la figura 2.2, donde en frente se tiene un indicador de nivel.

Sus características principales y dimensiones físicas se presentan en la tabla 2.1.



Figura 2.2: Estanque físico

Característica	Descripción/Valor
Material	Acero inoxidable 2 mm de espesor
Material forro exterior	Latón 1 mm de espesor
Altura	72 cm
Diámetro	45 cm
Altura (forro exterior)	82 cm
Diámetro (forro exterior)	55 cm
Capacidad máxima	120 l

Tabla 2.1: Especificaciones técnicas del estanque

Su función dentro del sistema consiste en la acumulación del líquido circulante y, adicionalmente, cuenta con un indicador de nivel que consiste en un tubo delgado transparente. En su interior cuenta con un calefactor para poder elevar la temperatura que sale del estanque.

2.1.1.2. Calefactor

Está compuesto por tres resistencias independientes, las cuales se conectan en estrella. Posee una potencia máxima de $9{,}5\ kW$, la cual es controlada mediante un circuito de disparo con TRIACS. Sus características se pueden muestran en la tabla 2.2

Característica	Descripción/Valor
Tipo	Calefactor de inmersión
Fabricante	Trotter
Alimentación	Trifásica
Potencia máxima	9.5 kW
Material	Cobre
Resistencias	3 x 15.2 Ω

Tabla 2.2: Especificaciones técnicas del calefactor de inmersión

Como ya se ha mencionado, su función consiste en calentar el líquido que sale del estanque. La temperatura se modifica mediante un circuito de disparo con Triacs, lo cual permite controlar la temperatura que sale del estanque.

2.1.1.3. Bomba centrífuga

Corresponde a la bomba centrífuga Pedrollo CP130 de la figura 2.3. Esta bomba posee una alimentación trifásica en conexión Delta.

Es capaz de soportar temperaturas de hasta $90°C$, lo cual la convierte en una buena opción para esta aplicación. Las especificaciones técnicas de esta bomba se pueden apreciar en la tabla 2.3.



Figura 2.3: Bomba centrífuga Pedrollo CP130

Característica	Descripción/Valor
Fabricante	Pedrollo
Modelo	CP130
Velocidad nominal	2900 RPM
Potencia nominal	0.37 kW
Corriente nominal	2 A
Alimentación	Trifásica
Caudal máximo	80 lpm

Tabla 2.3: Especificaciones técnicas de la bomba centrífuga

Su función radica en la extracción de líquido del estanque y el impulso de esta para que complete el circuito hidráulico. Gracias al control del motor de esta bomba centrífuga mediante el uso de un variador de frecuencia, es posible controlar el caudal que circula a lo largo del sistema.

2.1.1.4. Ventilador

Corresponde a un ventilador fabricado por la empresa Soler & Palau, modelo HBT 2-275 N y es del tipo axial mural con hélice de aluminio, tal como se observa en la figura 2.4. Posee alimentación trifásica con conexión estrella y a pesar de ser un modelo descontinuado, la empresa suministra ventiladores con características similares en su línea HCBB.



Figura 2.4: Ventilador físico

Las especificaciones técnicas se presentan en la tabla 2.4.

Característica	Descripción/Valor
Fabricante	Soler & Palau
Modelo	HBT 2-275 N
Velocidad nominal	2650 RPM
Potencia nominal	0.22 kW
Corriente nominal	1.1 A
Alimentación	Trifásica

Tabla 2.4: Especificaciones técnicas del ventilador

Su función principal es enfriar el agua que circula por el radiador. Este ventilador permite el control de la diferencia de temperatura gracias al uso de un variador de frecuencia.

2.1.1.5. Radiador

Es un radiador utilizado por los antiguos vehículos Suzuki Fronte (ver figura 2.5). A pesar de ser diseñado para este tipo de automóviles, es una buena alternativa para esta aplicación. Este posee un bocatomas de entrada y otro de salida, donde el líquido circula por 42 tubos de forma ascendente. Las características físicas del radiador se muestran en la tabla 2.5.



Figura 2.5: Radiador físico

Debido a que el agua se distribuye por los tubos de este, facilita significativamente el trabajo del ventilador.

Característica	Descripción/Valor
Dimensiones	30 x 30 x 25 cm
Bocatomas	1 in
Tipo de aleta	Simple
Dimensión tubos	Área transversal de 2 x 15 mm

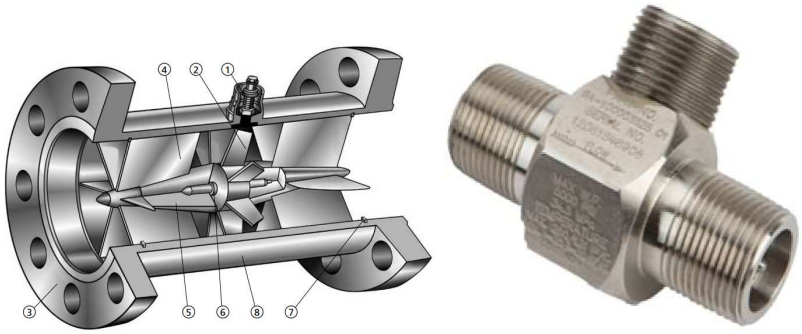
Tabla 2.5: Especificaciones técnicas del radiador

2.1.2. Sensores

Como se puede observar en la figura 2.1, el sistema cuenta con dos sensores de temperatura y un sensor de flujo.

2.1.2.1. Flujómetro

Se tiene un sensor de flujo tipo turbina, es decir, es capaz de generar una señal sinusoidal cuya frecuencia varía de forma aproximadamente lineal con el flujo que circula por este. En la figura 2.6 (a) [6] se muestra el interior del sensor, mientras que en la figura 2.6 (b) [2] se aprecia cómo se ve desde el exterior. Sus especificaciones se pueden ver en la tabla 2.6.



(a) Interior (b) Exterior

Figura 2.6: Sensor de flujo Nuflo

Característica	Descripción/Valor
Fabricante	Nuflo
Tipo	Sensor de turbina
Rango lineal de medición	2.8 - 28.1 l/min
Factor de calibración	14 474 pulsos/galón
Conexión	1 in

Tabla 2.6: Especificaciones técnicas del sensor de flujo

2.1.2.2. Sensores de temperatura

Se poseen dos sensores de temperatura, uno para la entrada del estanque y otro para la salida de este, donde ambos van sumergidos dentro del líquido de la cañería. Ambos sensores son del tipo PT100, es decir, poseen un bobinado fino de platino enrollado entre capas de material aislante que está protegido por un revestimiento metálico.

Las características de estos sensores se muestran en la tabla 2.7.

Característica	Descripción/Valor
Fabricante	RS Components Ltda.
Modelo	RS 158-402
Resistencia a $0°C$	$100 \pm 0{,}1\ \Omega$
Coeficiente de temperatura	$0.385\ \Omega/°C$
Temperatura máxima	$250°C$

Tabla 2.7: Especificaciones técnicas del sensor de temperatura

2.1.3. Actuadores

En el diagrama de la figura 2.1 no se pueden apreciar explícitamente los actuadores, por lo que se describen a continuación.

2.1.3.1. Variadores de frecuencia

Se utilizan dos variadores de frecuencia SIEMENS modelo G120, uno para controlar la velocidad de la bomba centrífuga y el otro para controlar la velocidad del ventilador. Cada variador cuenta con una unidad de control, un módulo de potencia y un panel de operación, tal como se muestra en la figura 2.7 [2].



(a) Unidad de control (b) Módulo de potencia (c) Panel de operación

Figura 2.7: Componentes del variador de frecuencia SIEMENS G120

- **Unidad de control:** Como su nombre indica, se encarga del procesamiento y control de los datos. Se tiene un modelo CU250S-2 PN con una interfaz PROFINET, donde a través de dos puertos es capaz de funcionar como un esclavo inteligente a través de una conexión PROFINET IO. Aunque es posible configurarlo mediante el panel de operación frontal, resulta más conveniente configurarlo mediante conexión con un computador usando el programa TIA Portal ya que existe una gran cantidad de parámetros involucrados en la puesta en marcha del proceso.

- **Módulo de potencia:** Cada unidad de control va acompañada de un módulo de potencia, pues este último se encarga de entregarle la energía al variador de frecuencia y a los motores. Se utiliza el modelo PM240-2 IP20, que es capaz de soportar cargas de hasta 0.55 kW (0.75 HP), lo que es suficiente para los motores a controlar debido a que son equipos que no llegan a superar los 0.5 HP.

- **Panel de operación:** El panel de operación frontal o *Basic Operator Panel* (BOP) es un modelo BOP-2 y va conectado a la unidad de control. Está diseñado para reconocer automáticamente todas las variables que le entrega la unidad de control, otorgando la capacidad de configurarlas localmente.

2.1.3.2. Circuito de disparo de los TRIACS

Calentar grandes volúmenes de agua requiere de una gran cantidad de potencia, esto implica que se necesita una corriente alta, que los semiconductores de baja potencia no son capaces de soportar. En estas condiciones resulta necesario el uso de TRIACS, los cuales permiten ajustar su activación mediante una señal de disparo, lo que se traduce en un control de la corriente que permiten circular.

El calefactor de inmersión trifásico cuenta tres termo-resistencias conectadas en estrella, tal como se ve en la figura 2.8 [1]. Se conecta un TRIAC por cada resistencia para poder regular la potencia que consumen.

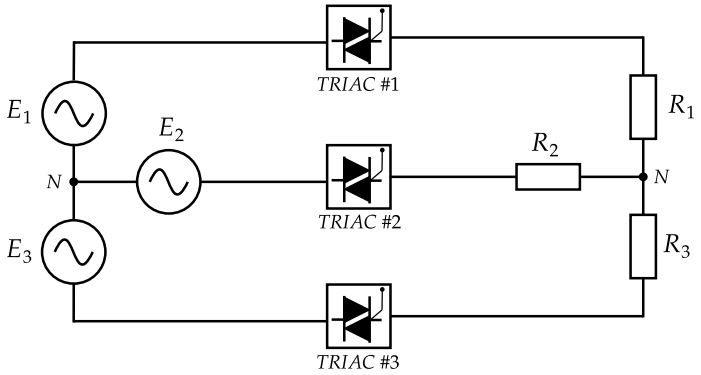


Figura 2.8: Conexión de TRIACS en calefactor de inmersión trifásico

El control de disparo de los TRIACS es realizado por el circuito integrado TCA280B, el cual posee la configuración mostrada en la figura 2.9 [7] y permite obtener ángulos de disparo en el rango $0°$ a $180°$ a partir de un voltaje de entrada entre 1.5V a 5.8V.

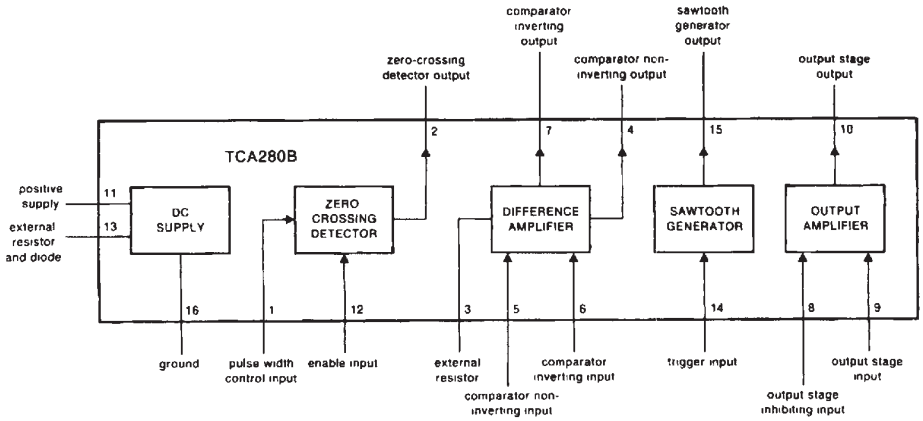


Figura 2.9: Interior del circuito inegrado TCA280B

Dado que el PLC entrega señales analógicas en el rango de 0V a 10V se necesita un circuito de acondicionamiento. Para más información al respecto se puede visitar la referencia [1] donde además se explican algunas características más de este actuador.

2.1.4. Controlador Lógico Programable (PLC)

El controlador lógico programable (PLC) utilizado es el PLC SIEMENS S7-1500 mostrado en la figura 2.10. Se encuentra instalado en un módulo en la parte superior del intercambiador de calor en el laboratorio de control industrial. Es la última versión de SIEMENS para la familia S7, asegurando un alto nivel de eficiencia para la aplicación que se está trabajando.

Los módulos instalados que posee este PLC, de izquierda a derecha son:

- Módulo fuente de poder
- CPU 1516-3 PN/DP
- Módulo de entradas digitales
- Módulo de salidas digitales
- Módulo de entradas analógicas
- Módulo de salidas analógicas



Figura 2.10: PLC SIEMENS S7-1500

2.1.5. Computadores personales

Para el desarrollo de este trabajo se utilizan dos computadores, tal como fue planteado en el diagrama de la figura 1.1.

El PC1 corresponde al *Distributed Control System* (DCS) debido al sistema operativo que posee y es donde se efectúa el control MPC directo y supervisor en LabVIEW. Sus características principales se presentan en la tabla 2.8.

Parámetro	**Descripción**
Nombre del equipo	BODE16
IP	10.31.212.54
Sistema operativo	Windows Server 2012 R2 Standard
Programas instalados	• LabVIEW 2016 32 bits • Profit Suite Version R440.1.00.64

Tabla 2.8: Descripción del PC1

Por otro lado, el PC2 es donde se emplea la simulación dinámica, ya sea del IDC o del sistema conjutno (IDC + PID). Sus características se observan en la tabla 2.9.

Parámetro	**Descripción**
Nombre del equipo	Bode02
IP	10.31.212.51
Sistema operativo	Windows 10
Programas instalados	• LabVIEW 2019 32 bits • TIA Portal V14

Tabla 2.9: Descripción del PC2

En la figura 2.11 se puede ver la distribución física de los computadores. A la izquierda se encuentra el PC1 (BODE16) y a la derecha el PC2 (Bode02), que posee dos pantallas para poder trabajar de forma más cómoda.

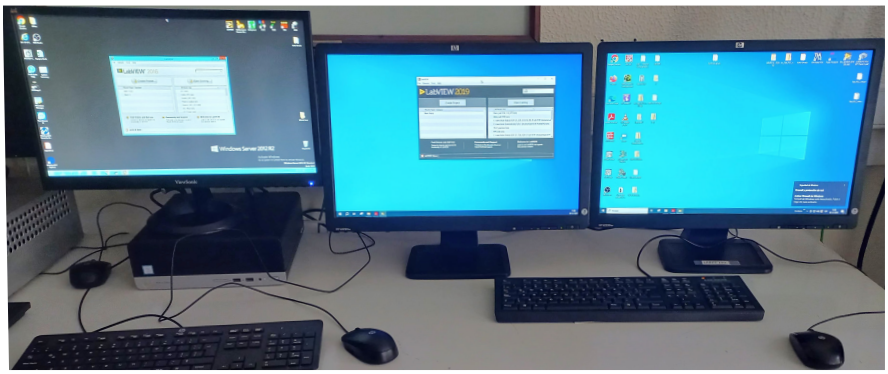


Figura 2.11: Distribución de los computadores

2.2. Dinámica del Intercambiador de Calor

Se definen las variables de interés del IDC, tal como se muestra en la figura 2.12. Las variables resaltadas en azul son:

- T_i: Temperatura de entrada
- q_i: Caudal de entrada
- T_o: Temperatura de salida
- q_o: Caudal de salida
- u_1: Actuación sobre el calefactor
- u_2: Actuación sobre la bomba centrífuga
- u_3: Actuación sobre el ventilador

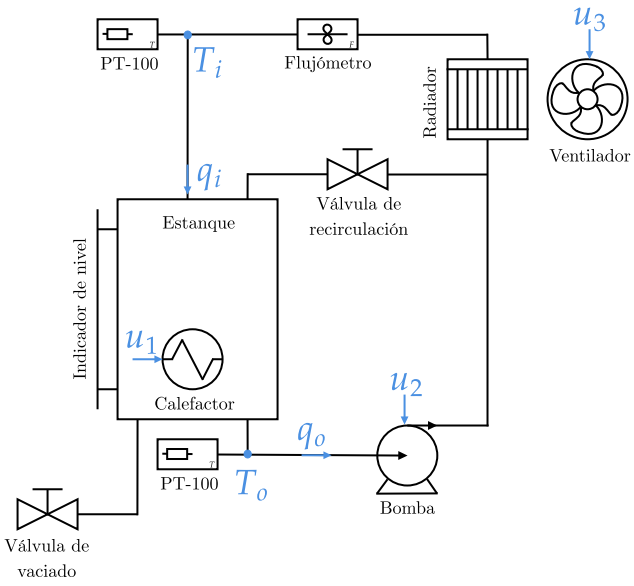


Figura 2.12: Definición de variables

El intercambiador de calor es un sistema MIMO 3x3, ya que tiene tres entradas y tres salidas, tal como se resume en la figura 2.13. Las variables controladas corresponden al caudal del líquido circulante (más adelante se verá que $q_i(t) = q_o(t) = q(t)$), la temperatura de salida y la diferencia de temperatura. Mientras que las variables manipuladas son la actuación del calefactor, la bomba centrífuga y el ventilador.

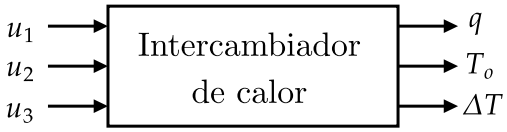


Figura 2.13: Entradas y salidas del IDC

Con el fin de establecer la dinámica del intercambiador de calor se utiliza:

- Balance de masa en el estanque
- Balance de energía en el estanque
- Balance de energía en el radiador
- Respuestas de primer orden en las entradas

2.2.1. Balance de materia en el estanque

Para establecer el balance de materia en el estanque, se realizan las siguientes suposiciones:

- **Las propiedades del líquido son constantes:** Esto implica que propiedades como densidad y el calor específico no cambian con el tiempo.
- **No hay reacciones químicas:** No se considera la generación ni el consumo de masa debido a reacciones químicas.

Bajo estas suposiciones, el balance de materia en el estanque se expresa mediante la ecuación (2.1).

$$\text{Acumulación} = \text{Entradas} - \text{Salidas} + \text{Generación} - \text{Consumo} \tag{2.1}$$

Dado que que no existen reacciones químicas, los términos de **Generación** y **Consumo** quedan anulados. Por otra parte, la **Acumulación** se refiere al cambio de masa en el estanque respecto al tiempo, mientras que las **Entradas** y **Salidas** corresponden al flujo másico (cantidad de masa por tiempo) que ingresa y sale del estanque, respectivamente. Esto se representa a través de la ecuación (2.2).

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_i - \dot{m}_o \tag{2.2}$$

La densidad (ρ) de un líquido, se define como la relación entre la masa (m) y el volumen (V), tal como se ve en la ecuación (2.3).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \longrightarrow \quad m = \rho V \tag{2.3}$$

El flujo másico ($\dot{m}$) puede expresarse en función del caudal volumétrico (q) y la densidad (ρ), como se indica en la ecuación (2.4).

$$\dot{m} = \rho \cdot q \tag{2.4}$$

Reemplazando las ecuaciones (2.3) y (2.4) en la ecuación (2.2), se obtiene:

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = \rho \cdot q_i - \rho \cdot q_o \tag{2.5}$$

Como el estanque es cilíndrico, su volumen está dado por el producto entre el área basal del estanque (A_E) y la altura del líquido (h_E), como se muestra en la ecuación (2.6).

$$V = A_E \cdot h_E \tag{2.6}$$

Sustituyendo la ecuación (2.6) en (2.5) se obtiene:

$$\rho A_E \frac{dh_E}{dt} = \rho \cdot q_i - \rho \cdot q_o \tag{2.7}$$

Finalmente, simplificando la densidad en ambos lados de la ecuación, se llega a:

$$\boxed{A_E \frac{dh_E(t)}{dt} = q_i(t) - q_o(t) = 0} \tag{2.8}$$

La ecuación (2.8) indica que la variación de altura del líquido en el estanque depende del caudal de entrada y del caudal de salida. Luego, la operación normal del circuito es cerrado, por lo que no se agrega ni quita agua, es decir $q_i(t) = q_o(t)$, indicando que la altura del líquido es constante.

2.2.2. Balance de energía en el estanque

Se realizan las mismas suposiciones que para el balance de materia en el estanque, agregando las siguientes consideraciones:

- El volumen dentro del estanque es constante.
- No hay cambios de fase, es decir, el líquido no llega al punto de ebullición.

Debido a que se asume que no existen reacciones químicas, los términos **Generación** y **Consumo** en la ecuación (2.1) se anulan. Por lo tanto, la variación de energía se expresa como:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{E}_i - \dot{E}_o \tag{2.9}$$

Donde $\dot{E}_i$ y $\dot{E}_o$ son la potencia neta de entrada y salida, respectivamente. La energía (E) se puede expresar en términos de la entalpía específica (H) mediante la ecuación (2.10).

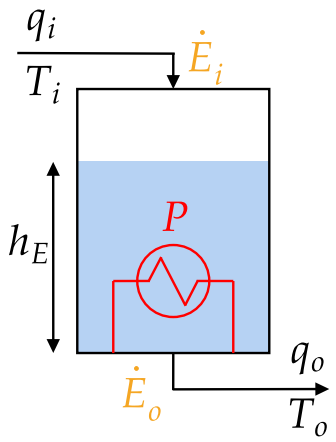


Figura 2.14: Simplificación del sistema (estanque)

$$E = m \cdot H \tag{2.10}$$

Esta relación es válida porque la entalpía específica está expresada en unidades de energía por unidad de masa. La entalpía se calcula a partir de la siguiente relación:

$$H = \int_{T_{ref}}^{T} c \cdot dT = c(T - T_{ref}) \tag{2.11}$$

donde:

- c es el calor específico del líquido.
- T es la temperatura del líquido.
- T_{ref} es la temperatura de referencia, que se asume como $0°C$ para simplificar modelo.

Reemplazando la ecuación (2.11) en (2.10) resulta en que la energía se puede escribir como:

$$E = mc \cdot T = (\rho V)c \cdot T = \rho c(A_E h_E)T \tag{2.12}$$

En la figura 2.14 se muestra una simplificación del estanque, donde se asume que la temperatura del estanque es igual a la temperatura de salida (T_o). Además, P representa la potencia entregada por el calefactor para calentar el agua.

Reemplazando la ecuación (2.12) en (2.9), se obtiene la ecuación (2.13), donde la potencia eléctrica (P) se suma debido a que se está entregando energía al sistema en forma de calor.

$$\rho c A_E \frac{(h_E T_o)}{dt} = \rho c q_i T_i + P - \rho c q_o T_o \tag{2.13}$$

Es importante destacar que el lado derecho de la ecuación se expresa en función del flujo másico ($\dot{E} = \dot{m}c \cdot T = (\rho q)c \cdot T$), ya que representa la energía por unidad de tiempo que ingresa y sale del estanque.

Dado que, como se explicó con anterioridad, la altura del líquido en el estanque (h_E) es constante, se obtiene finalmente:

$$\boxed{\rho c A_E h_E \frac{dT_o(t)}{dt} = \rho c q_i(t) T_i(t) + P(t) - \rho c q_o(t) T_o(t)} \tag{2.14}$$

2.2.3. Balance de energía en el radiador

En la figura 2.15 se presenta un diagrama simplificado del subsistema compuesto por el radiador y el ventilador. En este diagrama, G representa la potencia del ventilador, encargado de enfriar el agua.

Para este análisis, se realizan las mismas suposiciones que para el balance de energía en el estanque. Además, las ecuaciones (2.9) a (2.11) siguen siendo válidas. Por lo tanto, la energía en el radiador se define como:

$$E = mc \cdot T = (\rho V)c \cdot T = \rho c(A_R h_R)T \tag{2.15}$$

donde:

- A_R es el área basal del radiador.
- h_R es la altura del líquido en el radiador.

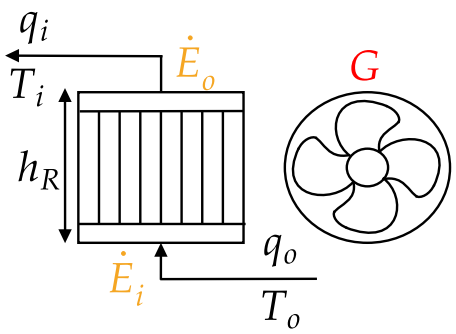


Figura 2.15: Simplificación del sistema (radiador)

Reemplazando la energía de la ecuación (2.15) en (2.9), se obtiene:

$$\rho c A_R \frac{(h_R T_i)}{dt} = \rho c q_o T_o - G - \rho c q_i T_i \tag{2.16}$$

Es importante destacar que el signo de la potencia del ventilador (G) es negativo, ya que se está quitando energía al enfriar el líquido.

Debido a la configuración del sistema, se puede asumir que el radiador está siempre lleno de líquido, ya que este recircula hacia el estanque. Por lo tanto, la altura del líquido (h_R) se considera constante. Aplicando la propiedad de la derivada de una constante multiplicada por una función, la ecuación que modela la temperatura de entrada del sistema es:

$$\boxed{\rho c A_R h_R \frac{dT_i(t)}{dt} = \rho c q_o(t) T_o(t) - G(t) - \rho c q_i(t) T_i(t)} \tag{2.17}$$

2.2.4. Relación el calefactor y su potencia

El calefactor se activa mediante TRIACS, que funcionan a través de la señal de disparo enviada por el PLC, denominada como u_1.

Dado que las señales no son instantáneas, se modela la dinámica entre la actuación y la potencia del calefactor como una respuesta de primer orden, tal como se muestra en la ecuación (2.18).

$$\boxed{\tau_1 \frac{dP(t)}{dt} = K_1 u_1(t) - P(t)} \tag{2.18}$$

2.2.5. Relación entre la bomba y el flujo

La bomba centrífuga funciona según el variador de frecuencia conectado a su motor. Esta actuación se denomina como u_2.

Nuevamente, existe un retarde entre el envío de la señal desde el PLC al variador de frecuencia y su efecto en el motor de la bomba. Esta dinámica se modela mediante la ecuación (2.19).

$$\boxed{\tau_2 \frac{dq_o(t)}{dt} = K_2 u_2(t) - q_o(t)} \tag{2.19}$$

2.2.6. Relación el ventilador y su potencia

De manera similar, el motor del ventilador es accionado por un variador de frecuencia conectado al PLC. Esta actuación se denomina como u_3.

Siguiendo el mismo enfoque, la dinámica se modela mediante la ecuación (2.20).

$$\boxed{\tau_3 \frac{dG(t)}{dt} = K_3 u_3(t) - G(t)} \tag{2.20}$$

2.2.7. Resumen ecuaciones

Dada la configuración del sistema, el líquido circula desde el estanque hacia la bomba, pasa por el radiador y regresa nuevamente hacia el estanque. Esto quiere decir que el caudal de entrada es igual al caudal de salida, es decir, $q_i(t) = q_o(t) = q(t)$. Por lo tanto, no hay variación de altura en el estanque $\left(\frac{dh_E(t)}{dt} = 0\right)$ y las ecuaciones se pueden simplificar de la siguiente manera:

$$\rho c A_E h_E \frac{dT_o(t)}{dt} = \rho c q(t) \left[T_i(t) - T_o(t)\right] + P(t) \tag{2.21}$$

$$\rho c A_R h_R \frac{dT_i(t)}{dt} = \rho c q(t) \left[T_o(t) - T_i(t)\right] - G(t) \tag{2.22}$$

$$\tau_1 \frac{dP(t)}{dt} = K_1 u_1(t) - P(t) \tag{2.23}$$

$$\tau_2 \frac{dq(t)}{dt} = K_2 u_2(t) - q(t) \tag{2.24}$$

$$\tau_3 \frac{dG(t)}{dt} = K_3 u_3(t) - G(t) \tag{2.25}$$

2.2.8. Parámetros del sistema

2.2.8.1. Constantes del sistema

Para tener la información de forma resumida, en la tabla 2.10 se presentan las constantes del sistema junto a su respectivo valor.

Descripción	Símbolo	Valor
Densidad del agua	ρ	$997\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
Calor específico del agua	c	$4184\left[\frac{J}{kgK}\right]$
Área basal del estanque	A_E	$0{,}63617[m]$
Altura del estanque	h_E	$0{,}72[m]$
Área basal del radiador	A_R	$0{,}0105[m]$
Altura del radiador	h_R	$0{,}3[m]$

Tabla 2.10: Constantes del sistema

Cabe destacar que:

- A_E y h_E se obtienen a partir de las especificaciones del estanque detalladas en la sección 2.1.1.1.
- A_R y h_R se obtienen a partir de las dimensiones del radiador, detalladas en la sección 2.1.1.5

2.2.8.2. Rangos de las variables de interés

En la tabla 2.11 se encuentran rangos de las variables de interés.

Descripción	Símbolo	Rango
Temperatura de salida	$T_o(t)$	$[0-100]°C$
Temperatura de entrada	$T_i(t)$	$[0-100]°C$
Caudal	$q(t)$	$[2{,}8-28]lpm$
Potencia del calefactor	$P(t)$	$[0-9{,}5]kW$
Potencia del ventilador	$G(t)$	$[0-0{,}22]kW$
Voltaje de entrada al circuito de acondicionamiento	$u_1(t)$	$[0-10]V$
Voltaje de entrada al variador de frecuencia de la bomba	$u_2(t)$	$[0-10]V$
Voltaje de entrada al variador de frecuencia del ventilador	$u_3(t)$	$[0-10]V$

Tabla 2.11: Rango de las variables de interés

Los rangos corresponden a:

- Los rangos lineales de los sensores de temperatura y caudal.
- La potencia del calefactor y del ventilador.
- Los valores que entrega el PLC.

Es importante mencionar que no siempre se trabaja dentro de estos rangos, debido a restricciones físicas, las cuales serán explicadas a lo largo de este documento. Además, resulta más conveniente representar las actuaciones en porcentaje, para evitar modelar los circuitos de acondicionamiento intermedios.

2.2.8.3. Parámetros a sintonizar

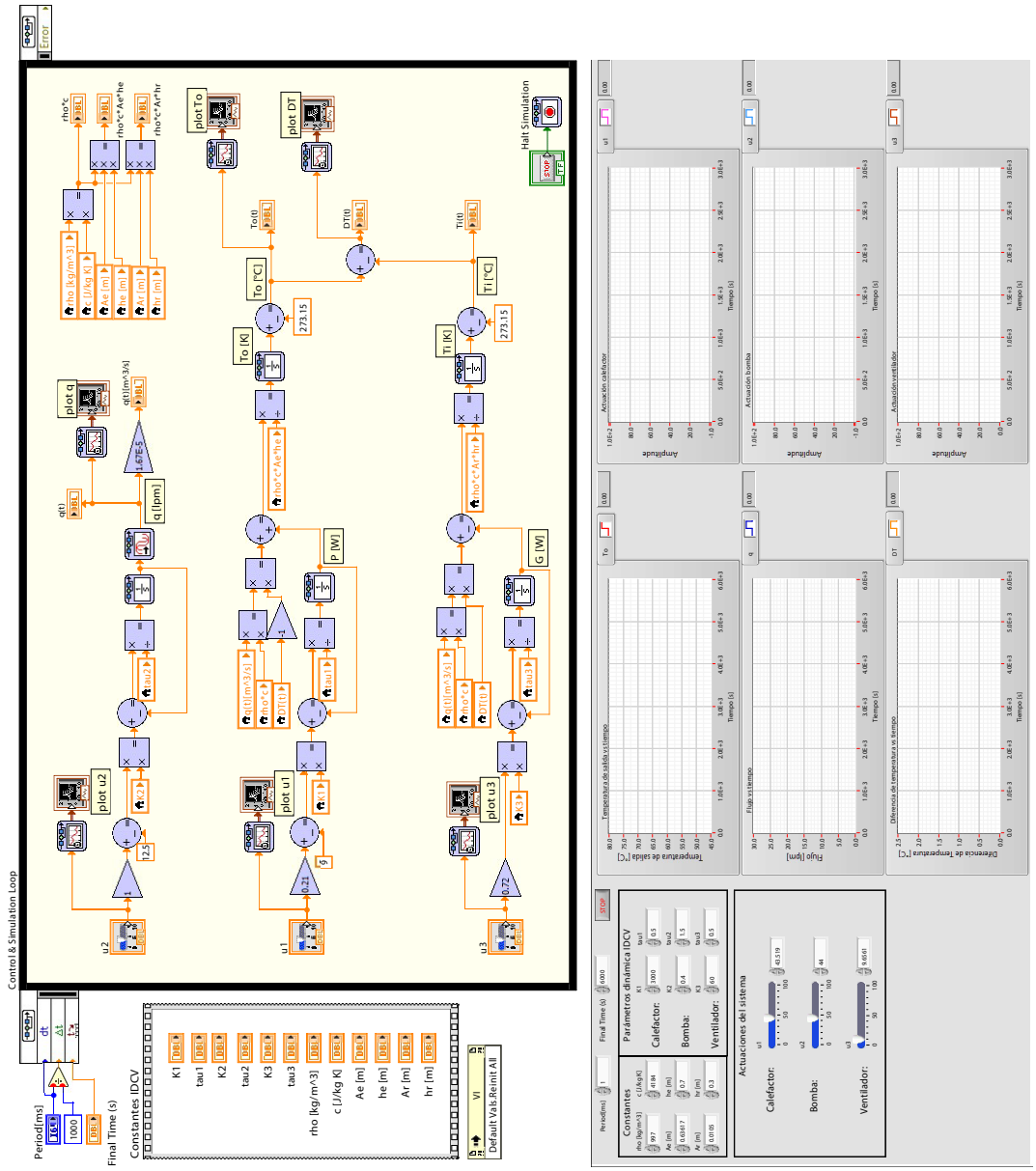
Las variables que deben determinarse para imitar el comportamiento del intercambiador de calor se resumen en la tabla 2.12. Estos parámetros son claves para ajustar el modelo y garantizar que la simulación refleje lo más fiel posible la dinámica del sistema físico.

Descripción	Símbolo	Unidades
Ganancia circuito acondicionamiento del calefactor	K_1	$\left[\frac{V}{W}\right]$
Constante de tiempo del calefactor	τ_1	$[s]$
Ganancia variador de frecuencia de la bomba	K_2	$\left[\frac{V}{W}\right]$
Constante de tiempo del variador de frecuencia de la bomba	τ_2	$[s]$
Ganancia variador de frecuencia del ventilador	K_3	$\left[\frac{V}{W}\right]$
Constante de tiempo del variador de frecuencia del ventilador	τ_3	$[s]$

Tabla 2.12: Parámetros a sintonizar

2.3. Simulación dinámica en LabVIEW

Una vez obtenidas las ecuaciones dinámicas del intercambiador de calor, es posible implementar dichas ecuaciones en forma de diagramas de bloque con la ayuda del programa LabVIEW, donde la simulación realizada se puede observar en la figura 2.16.



(a) Diagrama de bloques (b) HMI

Figura 2.16: Simulación IDC (lazo abierto) en LabVIEW

En la figura 2.16 (a) se presenta el diagrama de bloques, donde para cada ecuación se despeja la derivada, se incluyen las sumas, restas, multiplicaciones y divisiones ne-

cesarias y se obtiene la respectiva variable en el tiempo mediante un bloque integrador. Además, se puede ver que a continuación de las actuaciones se transforma dicho valor, esto con la intención de que el usuario se centre en indicar las actuaciones en un rango de 0 a 100 %.

Por otra parte, en la figura 2.16 (b) se tiene el respectivo HMI, donde se incluyen las constantes del intercambiador de calor, así como los parámetros que pueden cambiar la dinámica de este. A continuación se encuentran las actuaciones del sistema, que son ingresados por el usuario al tratarse de un sistema en lazo abierto. Finalmente hay seis gráficas correspondientes a las variables de interés y su respectiva actuación.

2.3.1. Validación de la respuesta en lazo abierto

En las memorias de Víctor Vicencio y Richard Vergara se trabaja en todo momento con el sistema en lazo cerrado, por lo que no hay referencia de las respuestas en lazo abierto. En un trabajo más antiguo "Actualización de la instrumentación, control y supervisión de un sistema intercambiador de calor" realizado por Gino Alberti y Nicolás Yaksic sí que se encuentran pruebas en lazo abierto. Sin embargo, el sistema ha sufrido diversos cambios desde la realización de esa memoria.

Teniendo en consideración lo anterior, se opta por trabajar únicamente a partir de la respuesta en lazo cerrado. Para ello, se arma la simulación de la sección 3.6 y se sintonizan los parámetros del IDC hasta obtener una respuesta similar a la de memorias anteriores.

Una vez determinados estos parámetros, se realizan pruebas de lazo abierto para observar cómo las entradas del sistema influyen en el IDCV. Los resultados se presentan en la figura 2.17.

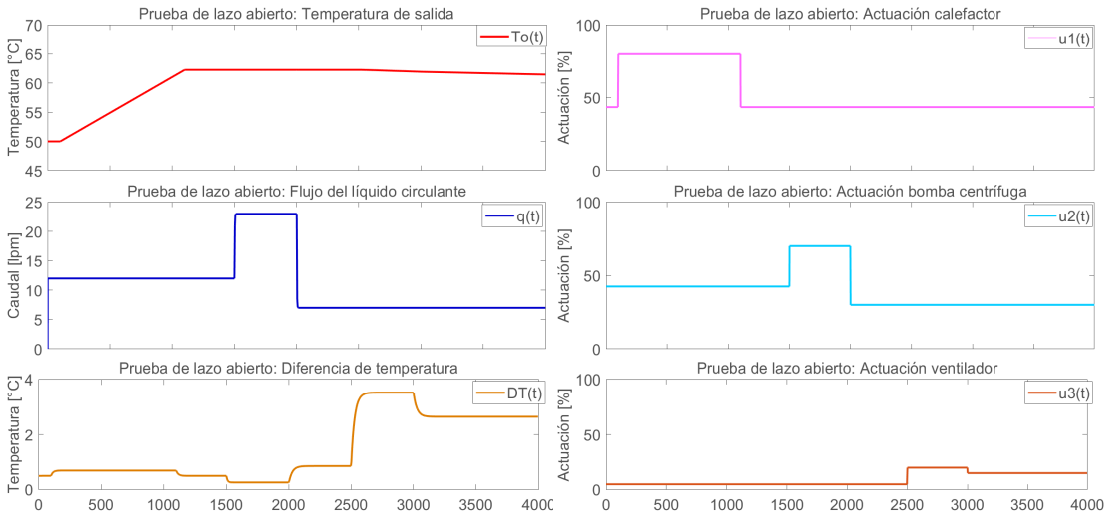


Figura 2.17: Respuesta en lazo abierto del IDCV

Como se puede apreciar, se aplican actuaciones tipo escalón. A continuación se presenta un análisis de las respuestas en lazo abierto:

- Respuesta a $u_1(t)$: Cuando se aplica un pulso al calefactor, se observa que la temperatura de salida aumenta lentamente y luego se estabiliza. El caudal no se ve afectado por esta variable, lo cual coincide con las ecuaciones del modelo. Por otro lado, la diferencia de temperatura se ve influenciada por los cambios en T_o.

- Respuesta a $u_2(t)$: Al aplicar un pulso a la bomba centrífuga, el caudal (q) aumenta y disminuye proporcionalmente. Según las ecuaciones dinámicas del IDC, tanto la temperatura de entrada (T_i) como la temperatura de salida (T_o) dependen del caudal. Sin embargo, este efecto es más notable en la diferencia de temperatura (ΔT), ya que se trata de valores más pequeños.

- Respuesta a $u_3(t)$: Finalmente, al aplicar un pulso en el ventilador, se logra que la diferencia de temperatura aumente su valor para luego disminuir. Ninguna de las otras variables se ve afectada por estos cambios.

A partir de las respuestas en lazo abierto se puede comprobar que la diferencia de temperatura es la variable más dinámica, ya que se ve influenciada tanto por los cambios en el caudal como en la temperatura de salida. Además, la dinámica de la temperatura de salida es mucho más lenta en comparación con las otras variables, lo cual tiene sentido físicamente, ya que el calefactor tarda en calentar o enfriar el agua del estanque debido a la gran masa de líquido involucrada.

Aunque no se dispone de gráficas comparativas directas, teniendo en consideración la respuesta en lazo cerrado, se infiere que la respuesta en lazo abierto debiese ser similar al del IDC real.

3 | Control Regulatorio Avanzado del Intercambiador de Calor

El intercambiador de calor físico actualmente cuenta con una estrategia de control regulatorio avanzado, que utiliza lazos de cotnrol PID local para controlar las variables de interés del IDC: flujo del líquido circulante, temperatura de salida del líquido y diferencia de temperatura.

En este capítulo, se describen los parámetros de los controladores en TIA Portal, con el fin de representarlos como ecuaciones para la simulación dinámica en el programa LabVIEW. Además, se presenta la validación de la respuesta en lazo cerrado.

3.1. Bloque PID_Compact en TIA Portal

En el capítulo 4 "Control PID local de Flujo, Temperatura y ΔT" de la memoria de Víctor Vicencio [2] se explica cómo están implementados los lazos de control dentro del programa TIA Portal. Este documento detalla las configuraciones necesarias para los bloques PID y todos los ajustes requeridos para obtener las actuaciones adecuadas. Es importante destacar que los bloques PID utilizados para esta aplicación son del tipo *PID_Compact*, lo cual define la estructura y comportamiento de cada controlador.

En la página 80 del manual para el PLC S7-1500 [8], se describen las configuraciones del bloque *PID_Compact*. Para esta memoria, la sección **Parámetros PID** es de especial interés, ya que indica que el algoritmo PID funciona según la ecuación (3.1).

$$y = K_p \left[(b \cdot w - x) + \frac{1}{T_I \cdot s}(w - x) + \frac{T_D \cdot s}{a \cdot T_D \cdot s + 1}(c \cdot w - x) \right] \tag{3.1}$$

Como se puede observar, esta ecuación es similar a la forma estándar de un control PID, mostrada en en la ecuación (3.2), con la diferencia de que tanto la referencia como el filtro derivativo están escalados por las constantes a, b y c.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I \cdot s} + \frac{T_D \cdot s}{NT_D \cdot s + 1} \right) \tag{3.2}$$

Para comprender mejor cada una de las variables de la ecuación (3.1), en la tabla 3.1 se presenta una breve descripción de cada parámetro.

Símbolo	Descripción
y	Valor de salida del controlador PID
K_p	Ganancia proporcional
s	Operador laplaciano
b	Ponderación de la acción P
w	Referencia
x	Valor real medido
T_i	Tiempo de integración
a	Coeficiente para el retardo de la acción derivada
T_D	Tiempo derivativo
c	Ponderación de la acción D

Tabla 3.1: Parámetros del bloque PID

Comparando con la ecuación estándar (3.2), la variable $y(t)$ corresponde a la actuación $u(t)$ del IDC, y el error $e(t)$ es la diferencia $w(t) - x(t)$.

La ecuación (3.1) puede representarse mediante el esquema de la figura 3.1 [8], donde se aprecia cómo afectan las acciones proporcional, integral y derivativa. Este diagrama será útil para establecer los diagramas de bloques que se implementarán en la simulación.

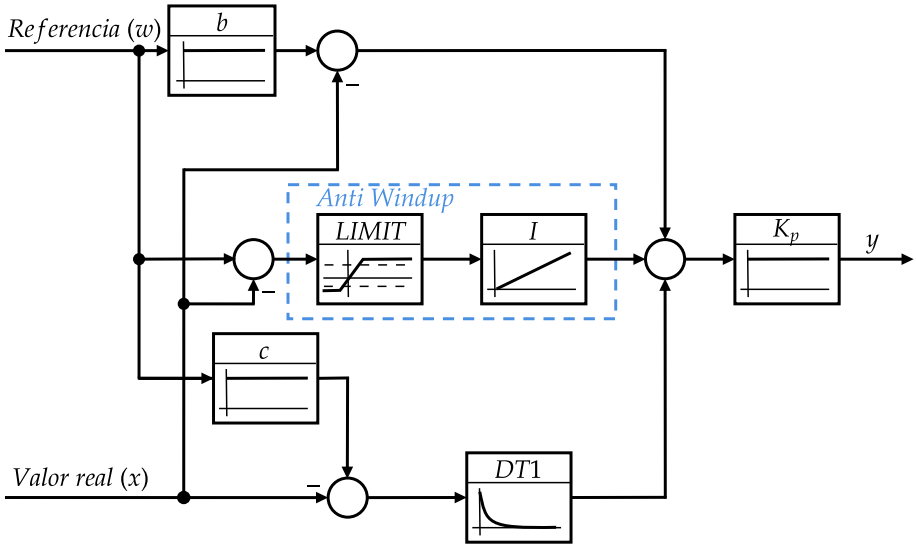


Figura 3.1: Esquema de control del bloque PID de en TIA Portal

3.2. Control PID del flujo del líquido circulante

El primer lazo de control a implementar corresponde al flujo del líquido circulante, ya que esta variable no se ve afectada por los cambios en la temperatura de entrada (T_i) o la temperatura de salida (T_o). Además, es fundamental que este lazo funcione correctamente, ya que de lo contraio, los otros dos lazos de control no podrán operar de manera adecuada.

En la figura 3.2 [2] se muestra el lazo de control de flujo del líquido circulante. Se compone de una referencia de caudal, la cual es ingresada mediante un HMI, una medición realizada por el sensor de flujo tipo turbina, y un controlador PID conectado a un variador de frecuencia que determina el movimiento del motor de la bomba centrífuga para mover una mayor o menor cantidad de masa de agua.

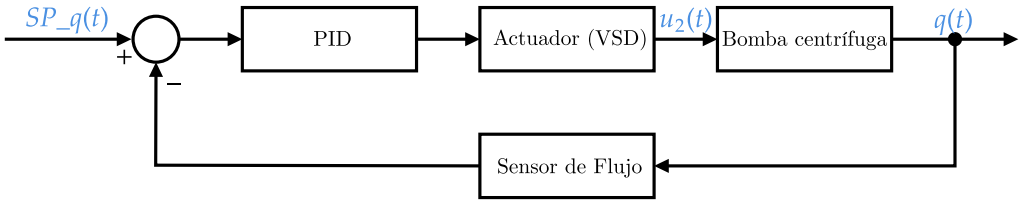


Figura 3.2: Lazo de control de flujo del líquido circulante

3.2.1. Parámetros del controlador

El controlador físico para este lazo se encuentra implementado en el programa TIA Portal, donde los parámetros utilizados se muestran en la figura 3.3. Estos valores fueron empleados por Richard Vergara [1] en su memoria.

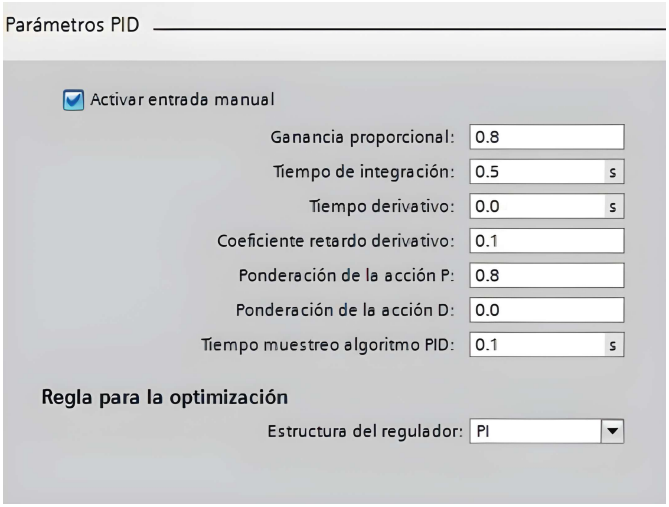


Figura 3.3: Parámetros de control del bloque PID de flujo

Según lo explicado en la sección 3.1, la ecuación (3.3) representa el comportamiento del controlador. Resulta relevante mencionar que la estructura del controlador es un PI, por lo que la parte derivativa se omite. Por lo tanto, la ecuación que representa el controlador de flujo es:

$$y = 0{,}8\left[(0{,}8 \cdot w - x) + \frac{1}{0{,}5 \cdot s}(w - x)\right] \tag{3.3}$$

3.2.2. Respuesta del lazo de control IDC real

A continuación, se presenta la respuesta del lazo de control de flujo del intercambiador de calor físico, utilizando únicamente con el control PID implementado.

Para determinar el desempeño del lazo de control, se aplica un escalón en la entrada del sistema y se observa la salida obtenida, la cual se muestra en la figura 3.4 [2]. La prueba comienza con una referencia de $12\ l/min$ y luego cambia a $22\ l/min$, ambos valores dentro del rango lineal de operación del sensor de flujo.

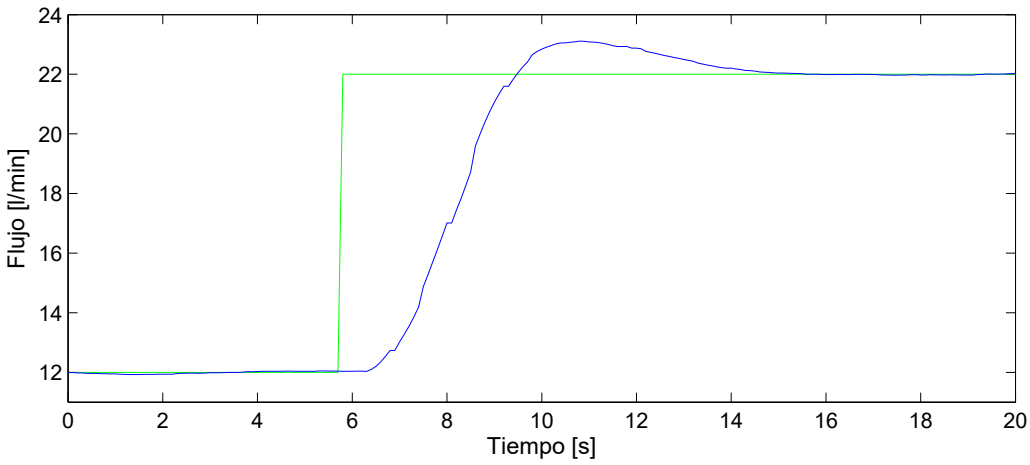


Figura 3.4: Respuesta lazo de control de flujo

Se puede apreciar que la respuesta de lazo es rápida, ya que alcanza el valor deseado en pocos segundos y presenta un error cero en estado estacionario. Esto demuestra la eficacia del controlador PID para regular el flujo del líquido circulante.

Respecto a la simulación dinámica que se debe implementar, el caudal simulado debe ser lo mas fiel posible a esta gráfica. Por ello, se destaca que la variable posee un retardo de $0{,}4$ segundos, alcanza por primera vez la referencia a los $9{,}5$ segundos, el *overshoot* apenas supera los $23\ l/min$ y llega a la referencia definitivamente a los 15 segundos.

3.3. Control PID de la temperatura del líquido que sale del estanque

La cantidad de agua que se encuentra dentro del estanque es considerablemente grande, lo que permite considerar que la temperatura de salida puede controlarse de forma independiente.

En la figura 3.5 [2] se presenta el lazo de control correspondiente, el cual se compone de la temperatura de referencia ingresada mediante un HMI, la medición realizada por un sensor tipo PT100 y un controlador PID que activa el disparo de los TRIACS para poder conectar las termo-resistencias y así poder calentar el agua dentro del estanque.

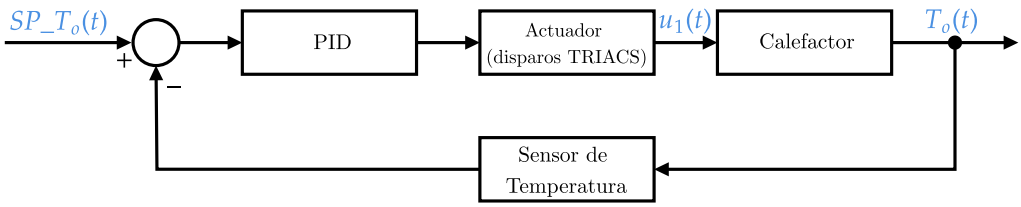


Figura 3.5: Lazo de control de la temperatura de salida

3.3.1. Parámetros del controlador

Los parámetros para el controlador de temperatura de salida se muestran en la figura 3.6, donde los parámetros son los utilizados en la memoria de Richard Vergara [1].

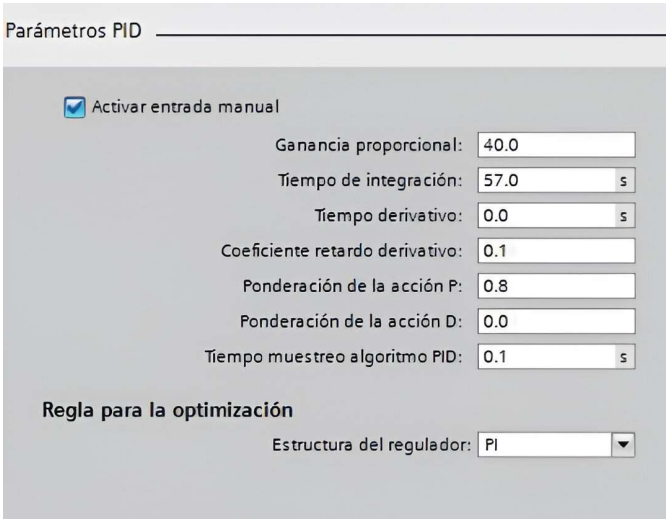


Figura 3.6: Parámetros de control del bloque PID de temperatura de salida

La figura anterior en forma de ecuación queda como se muestra en la ecuación (3.4). Esto servirá posteriormente para implementarlo dentro de la simulación.

$$y = 40\left[(0{,}8 \cdot w - x) + \frac{1}{57 \cdot s}(w - x)\right] \tag{3.4}$$

3.3.2. Respuesta del lazo de control IDC real

Para evaluar el desempeño del lazo de control de la temperatura de salida, se aplican escalones a la entrada del sistema y se mide la salida obtenida. Como se muestra en la figura 3.7 [2], inicialmente se establece una referencia de $50°C$. Luego, se cambia la referencia a $65°C$, y una vez que el valor se estabiliza, se vuelve a $50°C$.

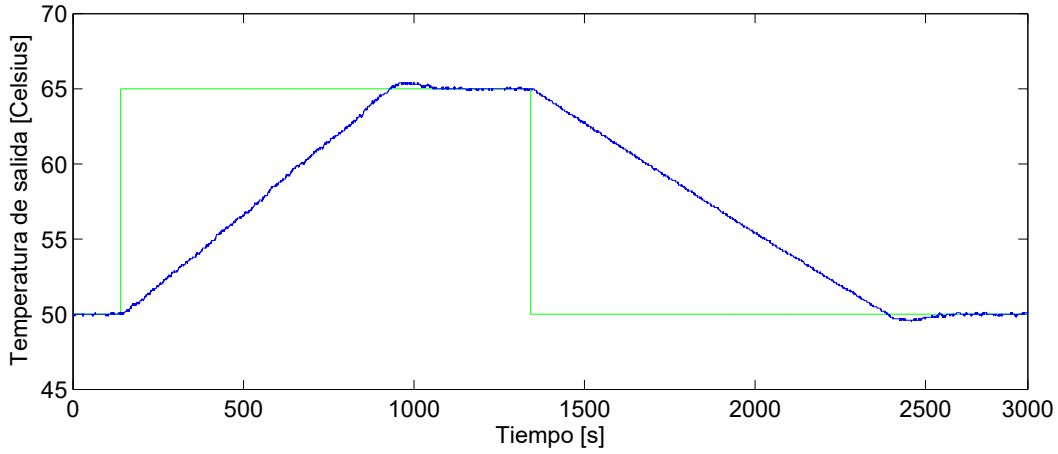


Figura 3.7: Respuesta lazo de control de temperatura de salida

Es fundamental tener en cuenta que la temperatura de referencia ingresada por el usuario no debe extender los $80°C$. Esta restricción se debe a que temperaturas más altas pueden causar fugas, ya que el calor expande la juntura de la bomba centrífuga. Aunque el sensor es capaz de medir valores superiores, esta limitación física debe ser respetada para garantizar la seguridad y el correcto funcionamiento del sistema.

Respecto a la respuesta del lazo cerrado, la referencia se alcanza en aproximadamente 15 minutos para el proceso de calentado y media hora para el proceso de enfriado. Esto lo convierte en la variable más lenta del sistema, a pesar de esto, se logra error cero en estado estacionario.

Resulta relevante mencionar que la referencia de $65°C$ se alcanza a los 933 segundos y se vuelve a $50°C$ a los 2400 segundos. Estos datos serán relevantes para la simulación dinámica.

3.4. Control PID de la temperatura del líquido que entra al estanque (ΔT)

Este lazo de control tiene como propósito mantener la diferencia entre la temperatura entre la entrada y salida del líquido que circula por el estanque. Dado que el objetivo es controlar la diferencia de temperatura, al lazo se ingresa una referencia usando la ecuación (3.5), de esta forma la temperatura de entrada se está controlando de manera indirecta (asumiendo que $T_o > T_i$ en todo momento).

$$\Delta T = T_o - Ti \equiv T_i = T_o - \Delta T \tag{3.5}$$

El lazo de la figura la figura 3.8 [2] se compone por la referencia de ΔT ingresada por un HMI, la medición de la temperatura de entrada y salida realizada por sensores tipo PT100 y un controlador PID que activa un ventilador mediante un variador de frecuencia para poder enfriar el radiador.

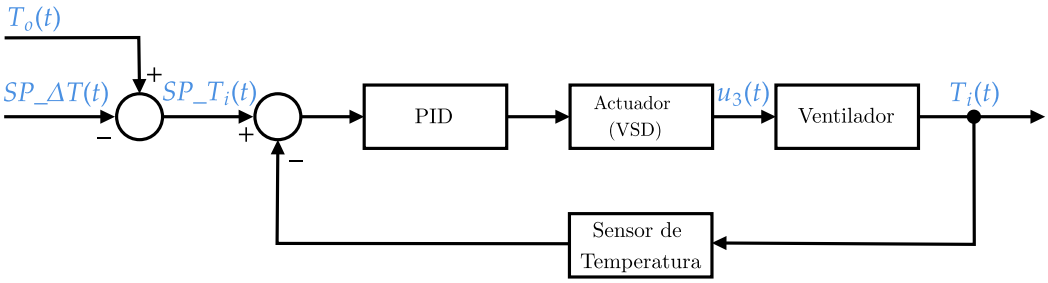


Figura 3.8: Lazo de control de la diferencia de temperatura

Es importante que tanto el lazo de flujo como el de temperatura de salida estén funcionando correctamente, ya que se necesita un flujo de agua constante por las cañerías y una regulación precisa de la temperatura cuando sale del estanque, solo entonces este lazo podrá controlarse de manera adecuada.

3.4.1. Parámetros del controlador

En la figura 3.9 se pueden observar los parámetros para el PID de la diferencia de temperatura, con los parámetros establecidos por Richard Vergara [1].

Luego, este controlador en su forma de ecuación se muestra en la ecuación (3.6), que es de utilidad para ser implementado dentro de un entorno de simulación.

$$y = 0{,}017 \left[(0{,}8 \cdot w - x) + \frac{1}{0{,}02 \cdot s}(w - x) \right] \tag{3.6}$$

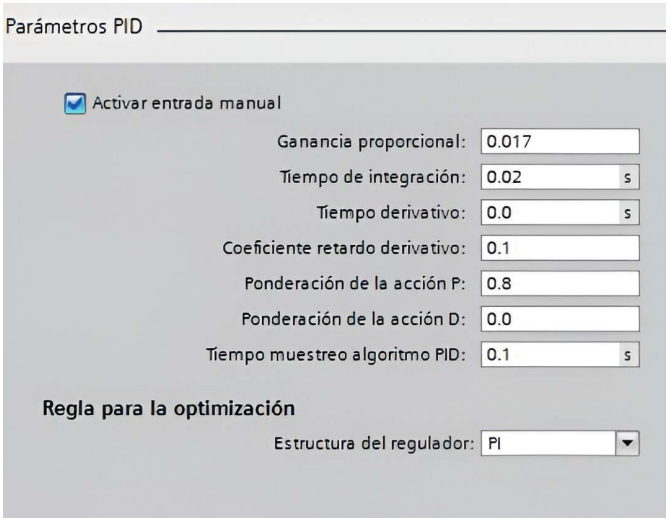


Figura 3.9: Parámetros del bloque PID de la diferencia de temperatura

3.4.2. Respuesta del lazo de control IDC real

En el sistema real se analiza el desempeño del control implementado. Para ello se establece una referencia inicial de $0{,}5°C$, luego se cambia por una de $1°C$, se vuelve a la referencia anterior, se incrementa a $2°C$ y finalmente se vuelve a la referencia inicial, tal como se ve en la figura 3.10 [2].

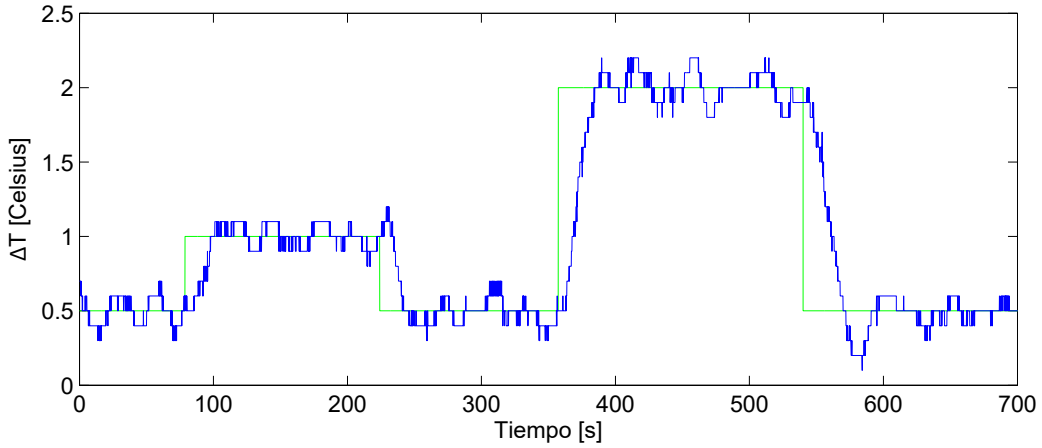


Figura 3.10: Respuesta lazo de control ΔT

Este lazo es el más dinámico de los tres, ya que se ve afectado por las variables de flujo y temperatura de salida, donde para este caso el flujo es de $22\ l/min$ y la temperatura de salida es de $75°C$. Lo anterior resulta importante ya que mientras mayor es la temperatura de salida, mayor es la referencia que se puede dar a este lazo, alcanzando un límite de $2°C$ para salidas mayores a $65°C$.

El primer cambio de referencia ocurre a los 80 segundos, llegando a la referencia a los 100 segundos aproximadamente. Luego, a los 220 segundos se regresa a la referencia inicial, alcanzando el valor deseado a los 240 segundos. A continuación, a los 360 ocurre un nuevo cambio, alcanzando el valor definido a los 390 segundos. Finalmente, el último cambio sucede a los 540 segundos, volviendo a la referencia a los 570 segundos. Estos valores serán útiles al momento de sintonizar los parámetros del IDC.

3.5. Diagrama P&ID del sistema completo

Con los lazos de control previamente explicados de forma individual, a continuación, en la figura 3.11 se presenta el diagrama P&ID (*piping and instrument diagram*) del intercambiador de calor, en el que se aprecian los tres lazos de control detallados anteriormente.

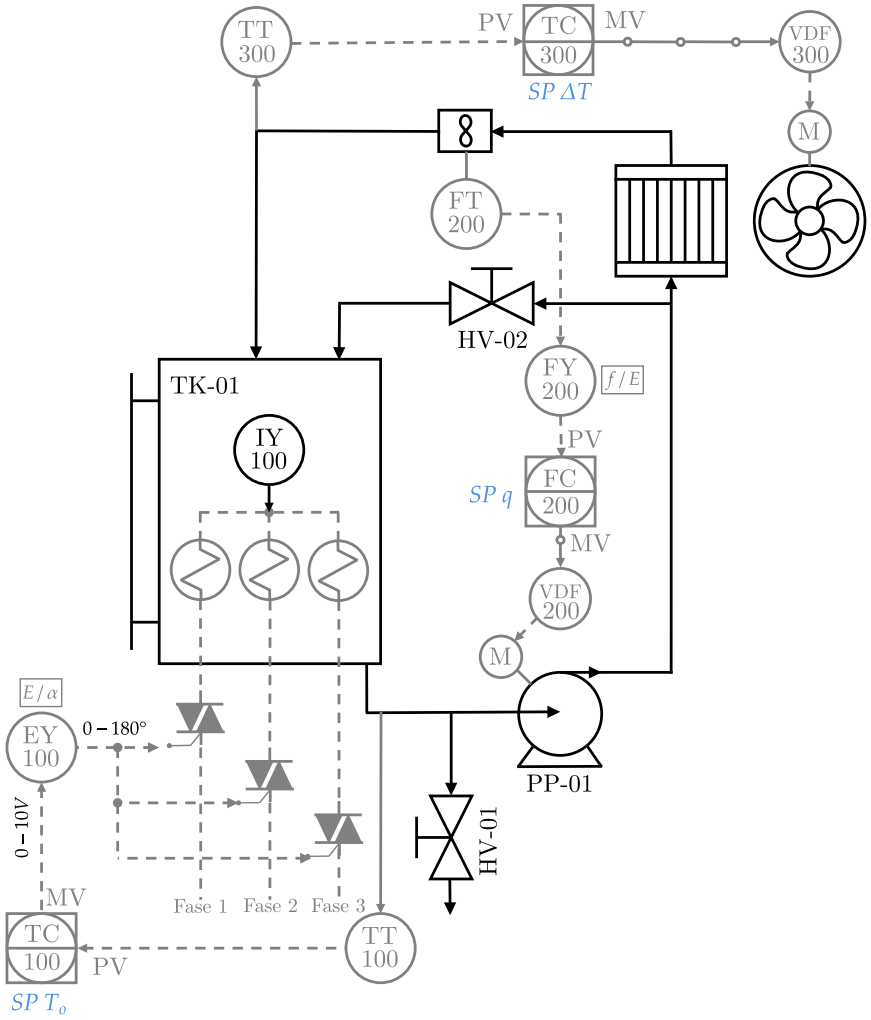


Figura 3.11: Diagrama P&ID del intercambiador de calor

En este diagrama, las flechas indican el flujo de las señales, con el fin de otorgar una mayor claridad. En la tabla 3.2, se presentan todos los *tags* (etiquetas) del sistema junto a una breve descripción de cada uno.

Identificación funcional	Número de lazo	Descripción
TT	100	Sensor de temperatura tipo PT100
TC		Controlador de temperatura de salida
EY		Circuito de acondicionamiento de voltaje en ángulo
IY		Fuente de tensión trifásica (neutro)
FT	200	Sensor de flujo tipo turbina
FY		Circuito de conversión de frecuencia en voltaje
FC		Controlador de caudal
VDF		Variador de frecuencia motor bomba centrífuga
TT	300	Sensor de temperatura tipo PT100
TC		Controlador de diferencia de temperatura
VDF		Variador de frecuencia motor ventilador

Tabla 3.2: TAGs del diagrama P&ID

A continuación se realiza la descripción de los lazos de control:

- **Lazo n°100:** Realiza el control de T_o. Se compone de un sensor de temperatura, que entrega al PLC el valor de la temperatura de salida del estanque. En base a esta medición y la referencia ingresada, el controlador genera la actuación para el calefactor en un rango de 0V a 10V. El voltaje se transforma mediante un circuito acondicionador para establecer el rango adecuado para el dispositivo TCA280B, el cual traduce el voltaje en ángulo de disparo para encender el circuito de TRIACS, que se encuentra alimentado por una fuente trifásica.

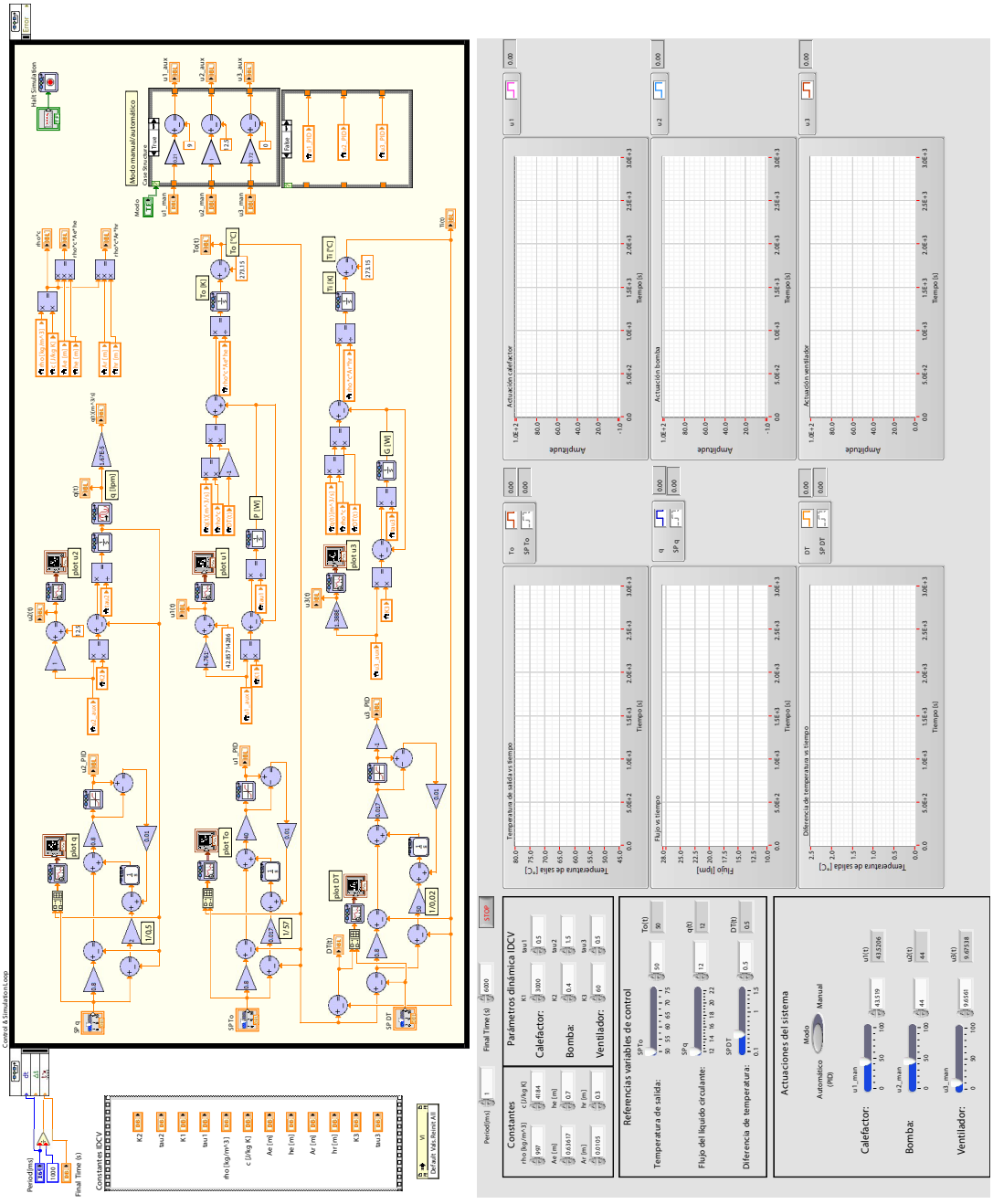
- **Lazo n°200:** Se encarga de controlar el caudal. Consiste en un sensor de flujo que mide el caudal del sistema. Luego, la frecuencia entregada por este sensor se transforma en voltaje y posteriormente se acondiciona para la entrada del PLC. El controlador calcula la actuación y la envía al variador de frecuencia mediante la red PROFINET. Finalmente, el variador acciona el motor de la bomba centrífuga.

- **Lazo n°300:** Establece el control de diferencia de temperatura. Incluye un sensor de temperatura, el cual se conecta directamente al PLC. A este lazo se le entrega una referencia de diferencia de temperatura, calculando la referencia para la temperatura de entrada al interior del PLC. La actuación generada por el controlador se envía al segundo variador de frecuencia a través de la red PROFINET, accionando el motor del ventilador.

Para obtener más detalles sobre las conexiones y los circuitos que componen los subsistemas, se recomienda consultar el anexo A. En este anexo, se presenta una explicación más específica, junto con un diagrama general de las conexiones.

3.6. Simulación dinámica + PID en LabVIEW

La simulación en LabVIEW de la dinámica del intercambiador de calor en junto con los controladores PI definidos en las ecuaciones (3.3), (3.4) y (3.6) se presenta en la figura 3.12.



(a) Diagrama de bloques (b) HMI

Figura 3.12: Simulación IDC (lazo cerrado) en LabVIEW

Todos los valores necesarios por la simulación son conocidos, a excepción de los valores K_i y τ_i (para $i = 1, 2, 3$) de la tabla 2.12. Estos parámetros se sintonizan a partir de las respuestas en lazo cerrado del IDC físico, hasta conseguir una respuesta lo más fiel posible.

En la figura 3.12 (a) se muestra el diagrama de bloques de la simulaciónn en lazo cerrado. Los componentes principales son:

1. **Referencias:** El usuario establece la referencia que es ingresada al lazo de control de cada variable.

2. **Controladores PI con antiwindup:** Se realiza el diagrama de bloques de los controladores según las ecuaciones definidas por TIA Portal. Luego, el efecto *antiwindup* se muestra en la figura 3.13 de color azul.

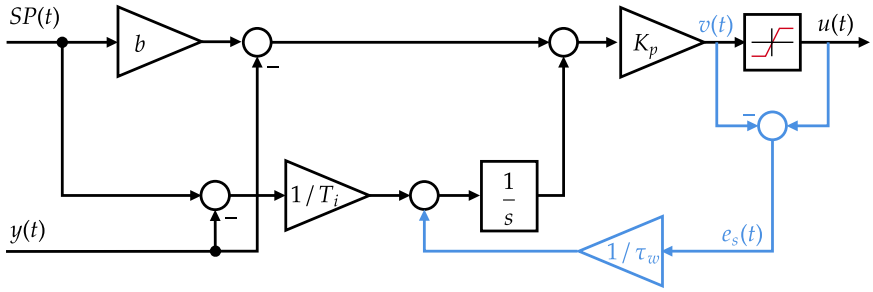


Figura 3.13: Control PID con antiwindup

   Se calcula la diferencia entre $u(t)$ y $v(t)$ para obtener el error de saturación $e_s(t)$. Cuando el sistema no está saturado, $e_s(t) = 0$, mientras que cuando existe saturación $e_s(t) \neq 0$. En el primer caso, la parte *antiwindup* no tiene efecto sobre el control PI. En el segundo caso, el error es amplificado según el valor de τ_w y descargando la acción integral.

   Es importante mencionar que la ganancia *antiwindup* (τ_w) determina la velocidad de descarga de la acción integral. Mientras más pequeña, la descarga será rápida, en contraste, cuando es más grande, la descarga será lenta, pudiendo incluso no tener efecto sobre la acción integral.

3. **Estructura tipo *case*:** Permite cambiar la modalidad de la situación entre manual y automático según la posición del botón **Modo**.

En la figura 3.12 se presenta al HMI diseñado para esta simulación. Al igual que en la simulación en lazo abierto, se incluyen las constantes del IDCV.

Cuando el modo es **Automático**, el usuario puede modificar las referencias y las actuaciones son calculadas por los lazos de control PID. Por otra parte, si el modo es **Manual**, el usuario puede establecer directamente las actuaciones del IDCV, en un rango de 0 % a 100 %. A la derecha se muestran las gráficas de las variables de interés.

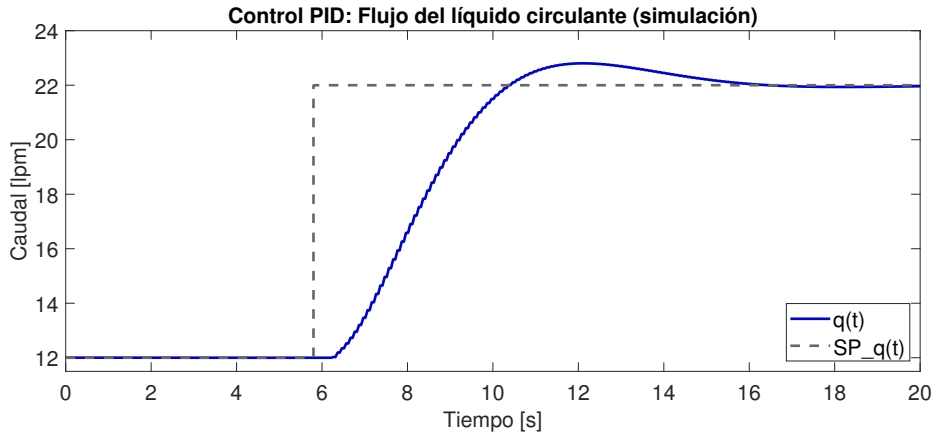
3.6.1. Validación de la respuesta en lazo cerrado

Con los parámetros del IDCV sintonizados solo queda comparar con las respuestas lazo cerrado del intercambiador de calor real para cada variable.

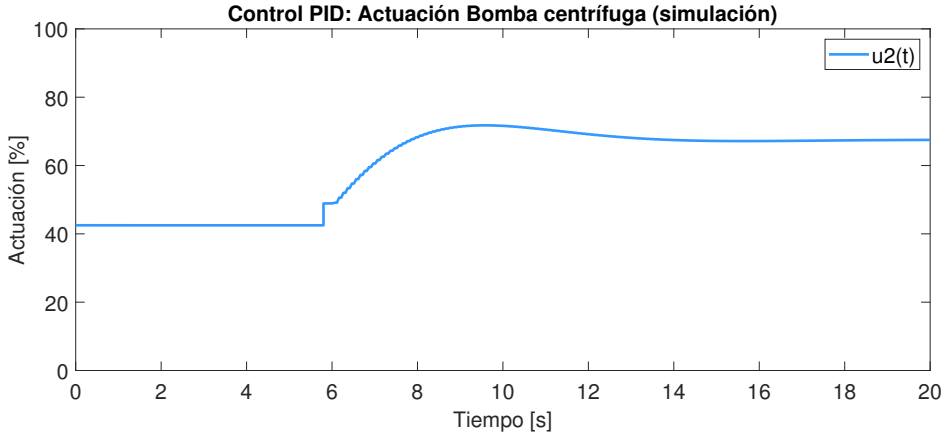
3.6.1.1. Respuesta del líquido circulante

En la figura 3.14 (a) se muestra la respuesta en lazo cerrado del flujo del líquido circulante para el IDCV. Se puede afirmar que la respuesta es bastante similar al IDC real, respetando tanto el retardo característico de la variable como el tiempo de asentamiento.

Por otra parte, en la figura 3.14 (b) se observa la actuación de la bomba centrífuga. Se aprecia que esta actuación es proporcional al flujo, tal como lo indica la ecuación dinámica correspondiente. Además, se nota un pequeño escalón en la señal, el cual es producto del retardo del caudal.



(a) Flujo del IDC Virtual



(b) Actuación Bomba centrífuga

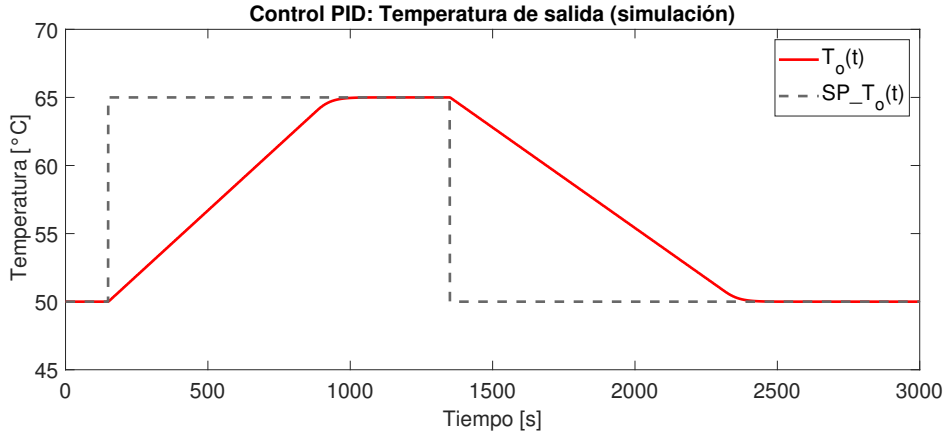
Figura 3.14: Respuesta lazo de control de flujo (simulación)

3.6.1.2. Respuesta de la temperatura de salida

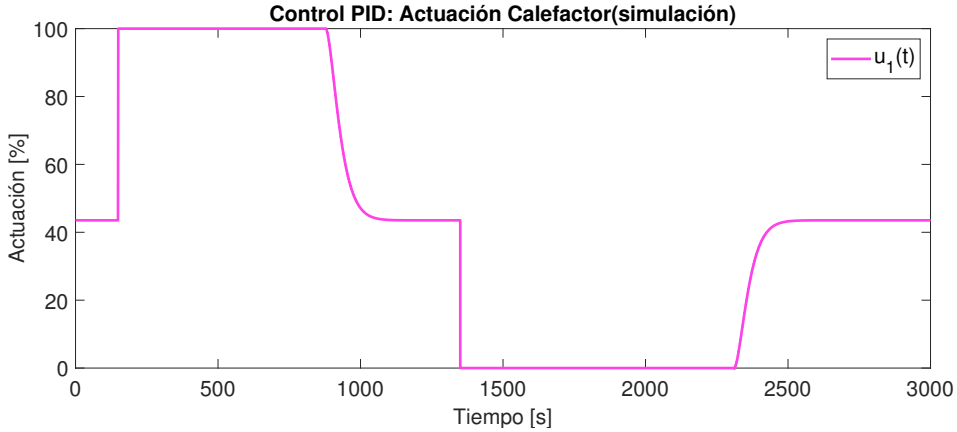
La segunda variable a validar es la temperatura de salida. Es importante destacar que, en la respuesta del IDC real, durante el periodo en que la temperatura sigue una tendencia lineal, la actuación del calefactor se encuentra saturada, lo que significa que el sistema opera en lazo abierto durante ese intervalo.

Para simular esta dinámica, se utiliza un bloque de saturación, el cual se ajusta según el comportamiento observado en el IDC real. Como resultado, se obtiene la figura 3.15 (a), donde se puede apreciar que el comportamiento de ambas gráficas (simulación y sistema real) es muy similar.

En la figura 3.15 (b) se muestra la actuación del calefactor en porcentaje. Aquí es más evidente que la actuación se encuentra saturada tanto para el proceso de calefacción como para el enfriamiento.



(a) T° de salida del IDC Virtual



(b) Actuación Calefactor

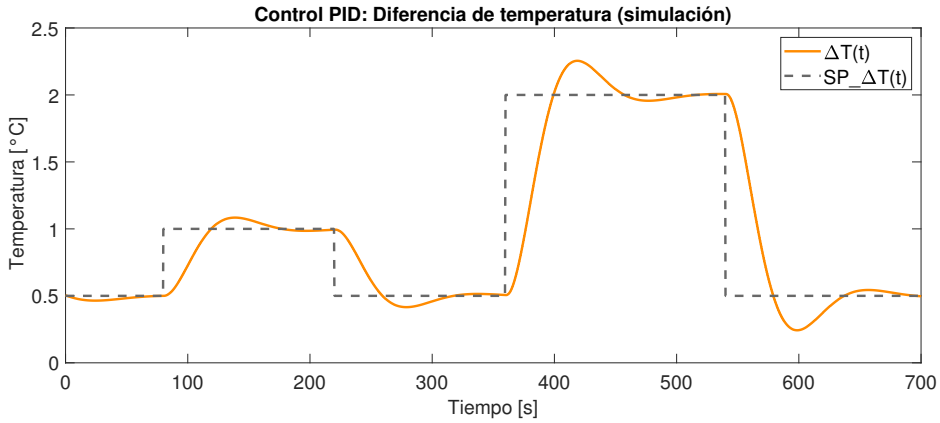
Figura 3.15: Respuesta lazo de control de temperatura de salida (simulación)

3.6.1.3. Respuesta de la diferencia de temperatura

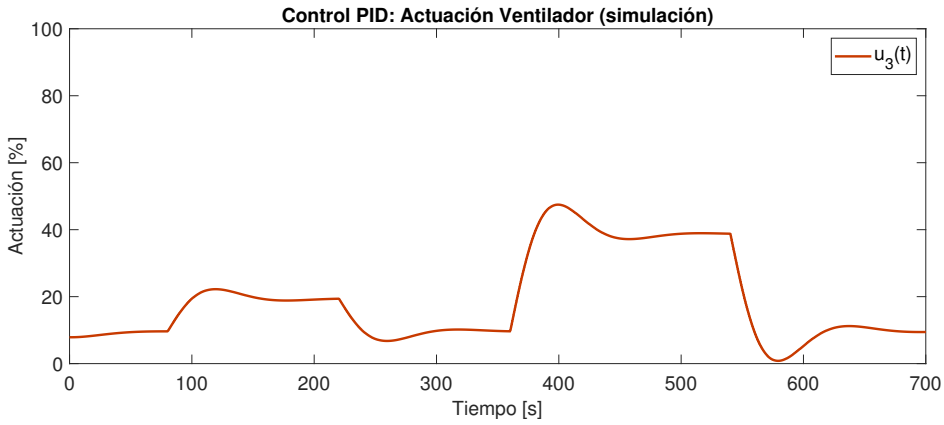
La respuesta del sistema real presenta una dinámica discreta producto del uso de un conversor A/D, además pareciera ser ruidosa, sin embargo, esto es debido a la resolución de dicho conversor

En la figura 3.16 (a) se muestra la respuesta del IDCV, donde el efecto del conversor A/D no se logra apreciar puesto que todo está elaborado de forma digital dentro de LabVIEW. Sin embargo, las constantes de tiempo de ambas respuestas son similares, lo que confirma que la dinámica de este lazo está correctamente modelada.

Finalmente, en la figura 3.16 (b) se presenta la actuación del ventilador. Es evidente que se utiliza un bajo porcentaje de la actuación, lo cual se debe a las limitaciones físicas del IDC real, donde ΔT no puede superar los $2°C$. Esta restricción asegura que el sistema opere dentro de rangos seguros y evita daños en los componentes.



(a) $T°$ de salida del IDC Virtual



(b) Actuación Calefactor

Figura 3.16: Respuesta lazo de control ΔT (simulación)

4 | Control Predictivo basado en Modelo del Intercambiador de Calor

En este capítulo se presenta de manera breve la librería de control predictivo que posee el programa LabVIEW. Se describen los bloques necesarios y su configuración correspondiente, utilizando como ejemplo un sistema de primer orden.

Se implementan dos tipos de control: MPC directo (o regulatorio) y MPC indirecto (o supervisor). Para ello se obtiene el modelo lineal discreto del sistema a controlar y se sintoniza el controlador para este. Luego, se ajustan los parámetros de control para el modelo no lineal y se valida su comportamiento. Finalmente se establece la conexión mediante el protocolo OPC entre dos computadores: en el primero (DCS) se ejecuta el control MPC, mientras que en el segundo se realiza la simulación dinámica del sistema no lineal IDCV e IDCV-ARC.

4.1. Características del control predictivo en LabVIEW

Como se exploró previamente en el estado del arte (sección 1.2.2.2), LabVIEW cuenta con una amplia librería de control predictivo. No obstante, existen muchas combinaciones posibles de los bloques disponibles, dependiendo de la aplicación que se desee implementar, lo cual puede apreciarse con mayor detalle en los ejemplos proporcionados por LabVIEW.

En esta sección, se estudia el uso específico de esta librería para el control predictivo de un sistema de primer orden con una entrada y una salida, cuya función de transferencia se describe en la ecuación (4.1), donde $K = 2$ y $\tau = 1$. Este estudio tiene como objetivo sentar las bases para posteriormente extender la aplicación al sistema del intercambiador de calor MIMO 3x3.

$$H(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \tag{4.1}$$

En la figura 4.1 se muestra el diagrama de bloques para el control predictivo del sistema de primer orden. Esta simulación se basa en una de las explicadas en la referencia [9], con algunas modificaciones realizadas por el profesor Manuel Olivares.

En términos generales, la simulación consiste en dos etapas: un preprocesamiento

de las variables necesarias para el funcionamiento del controlador y un ciclo temporizado del tipo *while*, en el cual se hacen los cálculos del control predictivo.

4.1.1. Descripción bloques utilizados

El diagrama de bloques se divide en tres grandes secciones. La primera etapa está compuesta por una *Stacked Sequence Structure*, que permite alternar entre la primera y segunda pestaña al presionar las flechas ubicadas en la parte superior.

En la primera pestaña, los bloques relevantes son:

- **CD Create MPC Controller:** En este bloque se ingresan los parámetros del controlador, el modelo en variables de estado discreto, las matrices de peso, las restricciones y el error de entrada. Su función es crear el controlador para dicho modelo.
- **CD Draw State-Space Equation:** Este bloque se utiliza exclusivamente para representar el sistema en variables de estado en el panel frontal de la simulación.

En la segunda pestaña, los bloques destacados son:

- **Generate Profile:** Recibe el tiempo de muestreo T_s, el tiempo final de la simulación y la referencia, generando los perfiles de referencia para cada iteración del ciclo.
- **Property Node:** Se conecta con los gráficos para la modificación de sus propiedades.

En el ciclo temporizado, los bloques principales son:

- **CD Step Forward MPC Window:** Calcula la ventana adecuada de los perfiles de referencia y perturbación y además mueve el horizonte de control y predicción hacia adelante.
- **CD Implement MPC Controller:** Recibe el controlador generado anteriormente y la referencia, calculando la actuación $u(k)$ que se aplica a la planta.
- **Discrete State-Space:** Se ingresa el modelo en variables de estado en tiempo discreto y se aplica la actuación correspondiente, simula el comportamiento del modelo ingresado.
- **Write To Measurement File:** Se encarga de escribir los resultados de la simulación en una planilla de Excel, para su posterior procesamiento en Matlab.

4.1.2. Etapas del diseño, parámetros e implementación del controlador

Una vez explicado el diagrama de bloques, se procede a detallar el diseño del control MPC. En la figura 4.2 se muestra el panel frontal de configuración del controlador MPC, el cual está organizado en tres pestañas y los gráficos de interés.

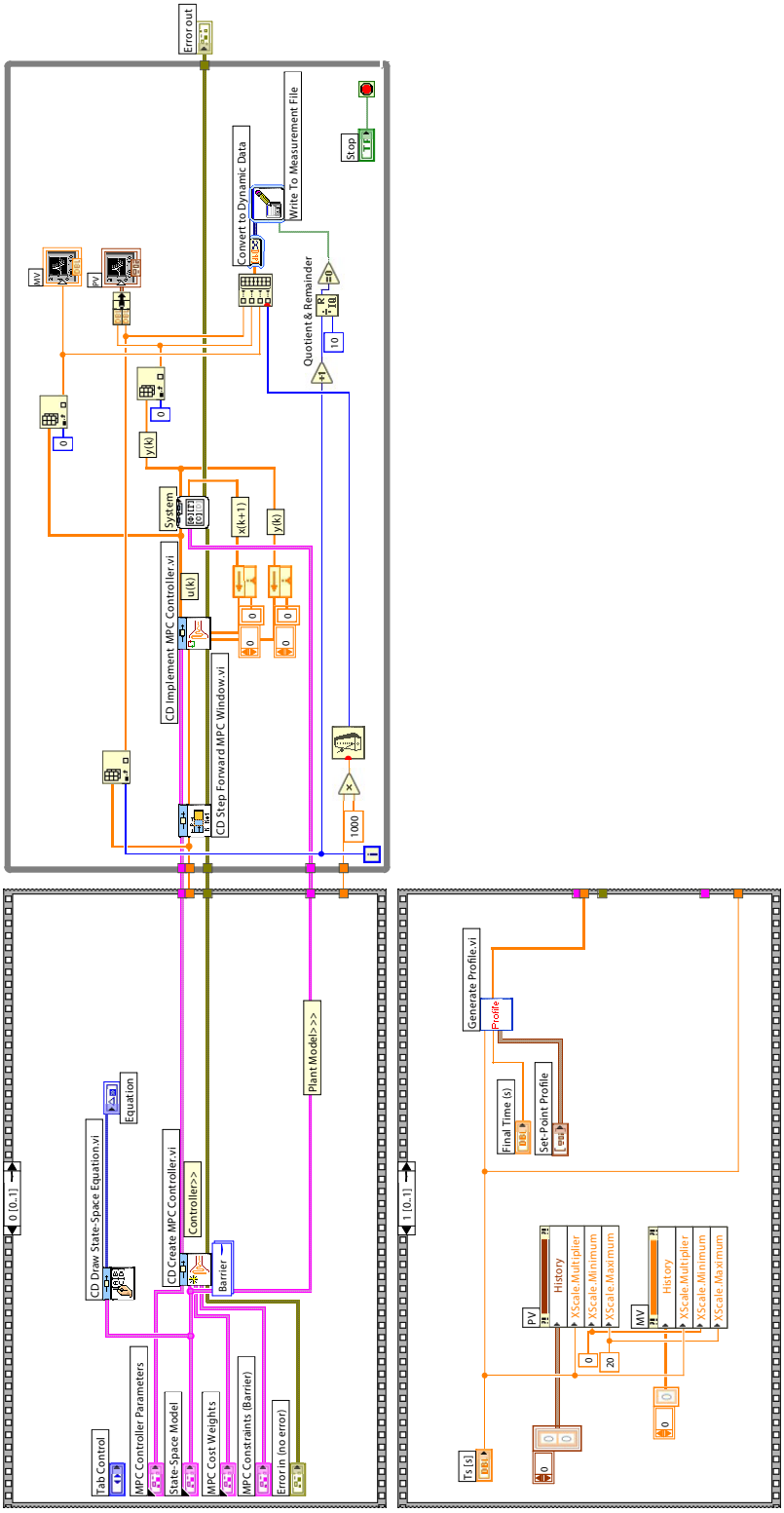
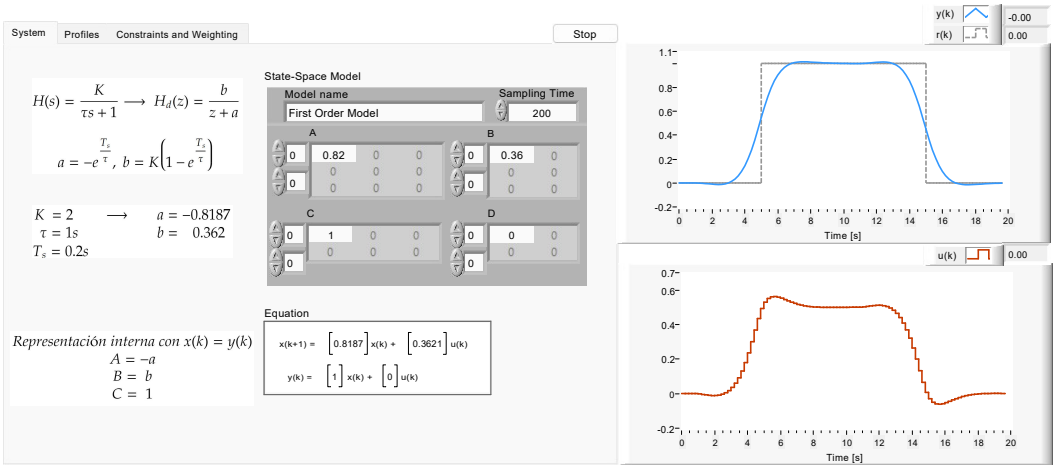
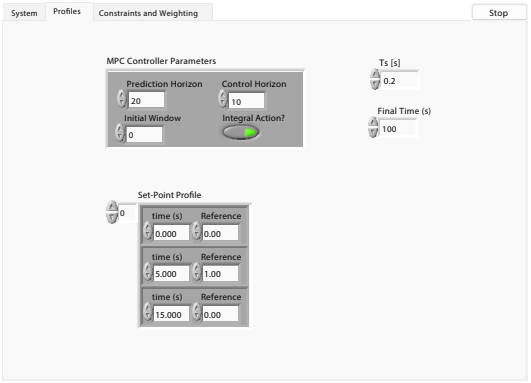


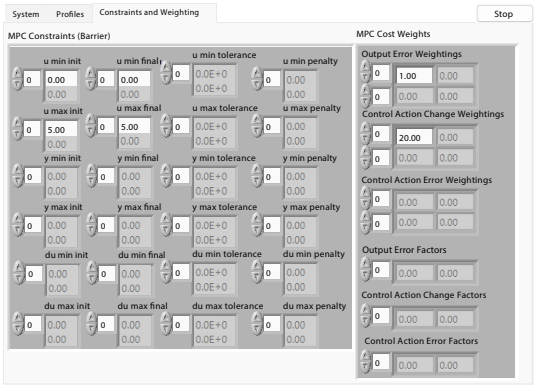
Figura 4.1: Control predictivo sistema de primer orden



(a) System



(b) Profiles



(c) Constraints and Weighting

Figura 4.2: Panel frontal sistema de primer orden

La pestaña *System* se observa en la figura 4.2 (a). Aquí se ingresan los parámetros A, B, C y D del modelo discreto en variables de estado junto al tiempo de muestreo (*Sampling Time*). Estos valores se pueden obtener al discretizar la función de transferencia de primer orden continua.

En la figura 4.2 (b) se presenta la pestaña *Profiles*, donde se configura el horizonte de predicción y el horizonte de control, además de activar o desactivar la acción integral del controlador. También se ingresa el tiempo de muestreo y el tiempo final de simulación. Por último, se define la referencia que el sistema debe seguir. En este caso, la referencia cambia de 0 a 1 a los 5 segundos y vuelve a 0 a los 15 segundos.

La última pestaña *Constraints and Weighting* se muestra en la figura 4.2 (c). La configuración se divide en dos partes. En la primera, se establecen las restricciones del sistema, donde la actuación está limitada entre 0 y 5, provocando que el controlador respete estos límites dependiendo de la tolerancia y penalización permitidas. En la segunda parte, se ingresan los pesos de la función de costo, los cuales se sintonizan a partir de la respuesta del sistema.

4.1.3. Integración del MPC en DCS con la simulación dinámica en LabVIEW mediante OPC

Uno de los objetivos de esta memoria es establecer la conexión entre dos computadores mediante OPC, siguiendo el diagrama de interacciones de la figura 1.1. Este diagrama tiene como finalidad permitir, en un futuro, reemplazar la simulación dinámica del IDCV por el HMI del intercambiador de calor real con control ARC.

La conexión entre ambos computadores se implementa tal como se muestra en la figura 4.3. Se crea un servidor con las variables de interés y dos clientes (uno por cada computador) que se conectan a este vía OPC.

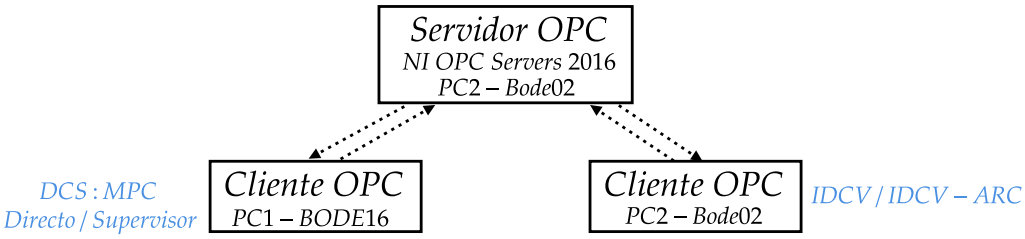


Figura 4.3: Esquema de conexión servidor-cliente

Para poder establecer este esquema, es importante y necesario realizar las configuraciones explicadas en el anexo B, con el fin de garantizar que ambos computadores puedan comunicarse correctamente vía OPC.

El servidor se crea en el PC2, siguiendo los pasos descritos en el anexo C. Posteriormente, en el mismo PC2, se crea el primer cliente en LabVIEW de acuerdo con las instrucciones del anexo D.

Finalmente, en el PC1, se debe crear un cliente OPC utilizando el programa *NI OPC Servers 2016*, el cual se conecta de forma remota al servidor del PC2. Para ello, se siguen los pasos detallados en el anexo E.

4.2. Diseño del MPC Directo del Intercambiador de Calor

4.2.1. Modelo lineal del intercambiador de calor

El control predictivo por modelo como su nombre lo indica, requiere conocer el modelo del sistema a controlar, específicamente su versión discretizada en variables de estado. Esto se debe a que, a partir de este modelo discreto, es posible realizar los cálculos correspondientes para predecir las salidas futuras y determinar las actuaciones adecuadas. Por ello, en esta sección se transforma el intercambiador de calor a variables de estado y posteriormente se discretiza.

4.2.1.1. Linealización del intercambiador de calor

Como se puede apreciar en la sección 2.2.7, el sistema es no lineal, debido a que la variable de caudal está multiplicando a las variables de temperatura. Por esta razón, antes de expresar sistema en variables de estado, es necesario linealizar el IDC.

Punto de equilibrio

El punto de equilibrio se calcula en estado estacionario, donde las derivadas del sistema se vuelven cero. Por lo tanto, se debe resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$0 = \rho c q_Q \left[T_{iQ} - T_{oQ}\right] + P_Q \tag{4.2}$$
$$0 = \rho c q_Q \left[T_{oQ} - T_{iQ}\right] - G_Q \tag{4.3}$$
$$0 = K_1 u_{1Q} - P_Q \tag{4.4}$$
$$0 = K_2 u_{2Q} - q_Q \tag{4.5}$$
$$0 = K_3 u_{3Q} - G_Q \tag{4.6}$$

De las ecuaciones (4.2) y (4.3) se obtiene que las potencias en el punto de equilibrio son iguales. Despejando el resto de ecuaciones:

$$P_Q = G_Q = \rho c q_Q \left[T_{oQ} - T_{iQ}\right] \tag{4.7}$$
$$u_{1Q} = \frac{P_Q}{K_1} \tag{4.8}$$
$$u_{2Q} = \frac{q_Q}{K_2} \tag{4.9}$$
$$u_{3Q} = \frac{G_Q}{K_3} \tag{4.10}$$

De esta forma, basta con indicar un valor para la temperatura de entrada, salida y el caudal para poder obtener las potencias correspondientes y así saber bajo qué valores de actuaciones se cumple ese punto de equilibrio.

Se escoge el siguiente punto de equilibrio, donde los valores para las actuaciones fueron transformadas a porcentaje con el fin de que coincidan con la simulación de lazo abierto en LabVIEW.

$$T_{iQ} = 49{,}5°C \qquad u_{1Q} = 0{,}1390 \equiv 43{,}5190\,\%$$
$$T_{oQ} = 50°C \qquad u_{2Q} = 30 \equiv 42{,}5\,\%$$
$$q_Q = 12lpm \qquad u_{3Q} = 6{,}9524 \equiv 9{,}6561\,\%$$
$$P_Q = G_Q = 417{,}1448W$$

Aproximación por series de Taylor

Se utiliza la aproximación por series de Taylor de orden 1, donde se evalúa la función en el punto de equilibrio y se suma con las derivadas parciales evaluadas en el punto de equilibrio.

$$f(\cdot) \approx f_Q + \left(\frac{\partial f}{\partial u}\right)\Bigg|_Q (u(t) - u_Q) + \left(\frac{\partial f}{\partial u'}\right)\Bigg|_Q \left(u'(t) - u'_Q\right) + \cdots \tag{4.11}$$

Por lo tanto, se debe aplicar esta aproximación en todas las ecuaciones del intercambiador de calor.

Temperatura de salida

La ecuación que describe la dinámica de la temperatura de salida es:

$$\rho c A_E h_E \frac{dT_o(t)}{dt} = \rho c q(t) \left[T_i(t) - T_o(t)\right] + P(t) \tag{4.12}$$

Aplicando la aproximación por series de Taylor:

$$\begin{aligned}\left[\rho c A_E h_E \frac{dT_{oQ}}{dt}\right] + \rho c A_E h_E \frac{d\Delta T_o(t)}{dt} = \left[\rho c q_Q \left[T_{iQ} - T_{oQ}\right] + P_Q\right] + \\ \left[\rho c \left[T_{iQ} - T_{oQ}\right]\right] \Delta q(t) + \left[\rho c q_Q\right] \Delta T_i(t) - \left[\rho c q_Q\right] \Delta T_o(t) + \Delta P(t)\end{aligned} \tag{4.13}$$

Como ya se estableció con anterioridad, $\dot{T}_o(t)$ en el punto de equilibrio es cero, al igual que el término $\rho c q_Q \left[T_{iQ} - T_{oQ}\right] + P_Q$, por lo que la linealización queda finalmente como en la ecuación (4.14).

$$\rho c A_E h_E \frac{d\Delta T_o(t)}{dt} = \rho c \left[T_{iQ} - T_{oQ}\right] \Delta q(t) + \rho c q_Q \Delta T_i(t) - \rho c q_Q \Delta T_o(t) + \Delta P(t) \tag{4.14}$$

Temperatura de entrada

La ecuación que describe la dinámica de la temperatura de entrada es:

$$\rho c A_R h_R \frac{dT_i(t)}{dt} = \rho c q(t) \left[T_o(t) - T_i(t)\right] - G(t) \tag{4.15}$$

De manera similar, al aplicar series de Taylor:

$$\begin{aligned}\left[\rho c A_R h_R \frac{dT_{iQ}}{dt}\right] + \rho c A_R h_R \frac{d\Delta T_i(t)}{dt} = \left[\rho c q_Q \left[T_{oQ} - T_{iQ}\right] - G_Q\right] + \\ \left[\rho c \left[T_{oQ} - T_{iQ}\right]\right] \Delta q(t) + \left[\rho c q_Q\right] \Delta T_o(t) - \left[\rho c q_Q\right] \Delta T_i(t) - \Delta G(t)\end{aligned} \tag{4.16}$$

Nuevamente, los términos asociados al punto de equilibrio se anulan, provocando que la ecuación de la temperatura de salida linealizada sea la mostrada en la ecuación (4.17).

$$\rho c A_R h_R \frac{d\Delta T_i(t)}{dt} = \rho c \left[T_{oQ} - T_{iQ}\right] \Delta q(t) + \rho c q_Q \Delta T_o(t) - \rho c q_Q \Delta T_i(t) - \Delta G(t) \quad (4.17)$$

Potencia en el calefactor

La ecuación que representa la dinámica de la potencia en el calefactor viene dada por:

$$\tau_1 \frac{dP(t)}{dt} = K_1 u_1(t) - P(t) \quad (4.18)$$

Esta ecuación ya es lineal, por lo que al realizar las derivadas parciales se obtienen las mismas constantes. Entonces, la versión linealizada queda como en la ecuación (4.19).

$$\tau_1 \frac{d\Delta P(t)}{dt} = K_1 \Delta u_1(t) - \Delta P(t) \quad (4.19)$$

Caudal del líquido circulante

La dinámica del caudal que circula por el intercambiador de calor se representa como:

$$\tau_2 \frac{dq(t)}{dt} = K_2 u_2(t) - q(t) \quad (4.20)$$

Al igual que con la potencia del calefactor, esta ecuación es lineal, por lo que cerca del punto de equilibrio se puede reescribir como la ecuación (4.21).

$$\tau_2 \frac{d\Delta q(t)}{dt} = K_2 \Delta u_2(t) - \Delta q(t) \quad (4.21)$$

Potencia en el ventilador

La ecuación que representa la dinámica de la potencia en el ventilador es:

$$\tau_3 \frac{dG}{dt} = K_3 u_3(t) - G(t) \quad (4.22)$$

Por ende, la ecuación (4.23) es su versión linealizada.

$$\tau_3 \frac{d\Delta G(t)}{dt} = K_3 \Delta u_3(t) - \Delta G(t) \quad (4.23)$$

4.2.1.2. Modelo intercambiador de calor linealizado

A continuación se presentan las ecuaciones del intercambiador de calor linealizado.

$$\rho c A_E h_E \frac{d\Delta T_o(t)}{dt} = -\rho c q_Q \Delta T_o(t) + \rho c q_Q \Delta T_i(t) + \Delta P(t) + \rho c \left[T_{iQ} - T_{oQ}\right] \Delta q(t) \tag{4.24}$$

$$\rho c A_R h_R \frac{d\Delta T_i(t)}{dt} = \rho c q_Q \Delta T_o(t) - \rho c q_Q \Delta T_i(t) + \rho c \left[T_{oQ} - T_{iQ}\right] \Delta q(t) - \Delta G(t) \tag{4.25}$$

$$\tau_1 \frac{d\Delta P(t)}{dt} = K_1 \Delta u_1(t) - \Delta P(t) \tag{4.26}$$

$$\tau_2 \frac{d\Delta q(t)}{dt} = K_2 \Delta u_2(t) - \Delta q(t) \tag{4.27}$$

$$\tau_3 \frac{d\Delta G(t)}{dt} = K_3 \Delta u_3(t) - \Delta G(t) \tag{4.28}$$

4.2.1.3. Intercambiador de calor en variables de estado

A partir del modelo linealizado se definen las siguientes variables de estado:

$$x_1(t) = \Delta T_o(t) \qquad x_4(t) = \Delta q(t) \tag{4.29}$$

$$x_2(t) = \Delta T_i(t) \qquad x_5(t) = \Delta G(t) \tag{4.30}$$

$$x_3(t) = \Delta P(t) \tag{4.31}$$

De esta forma, el vector de estado $x(t)$, su respectiva derivada $\dot{x}(t)$, el vector de entradas $u(t)$ y el vector de salidas $y(t)$ queda definido por:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \Delta\dot{T}_o(t) \\ \Delta\dot{T}_i(t) \\ \Delta\dot{P}(t) \\ \Delta\dot{q}(t) \\ \Delta\dot{G}(t) \end{bmatrix} \qquad x(t) = \begin{bmatrix} \Delta T_o(t) \\ \Delta T_i(t) \\ \Delta P(t) \\ \Delta q(t) \\ \Delta G(t) \end{bmatrix} \tag{4.32}$$

$$u(t) = \begin{bmatrix} \Delta u_1(t) \\ \Delta u_2(t) \\ \Delta u_3(t) \end{bmatrix} \qquad y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \end{bmatrix} \tag{4.33}$$

Finalmente, el modelo del intercambiador de calor linealizado en variables de estado queda como se muestra a continuación, donde como ya se ha mencionado, las salidas de interés son $y_1(t) = \Delta T_o(t)$, $y_2(t) = \Delta q(t)$ e $y_3(t) = \Delta T(t) = \Delta T_o(t) - \Delta T_i(t)$.

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \frac{-q_Q}{A_E h_E} & \frac{q_Q}{A_E h_E} & \frac{1}{\rho c A_E h_E} & \frac{T_{iQ}-T_{oQ}}{A_E h_E} & 0 \\ \frac{q_Q}{A_R h_R} & \frac{-q_Q}{A_R h_R} & 0 & \frac{T_{oQ}-T_{iQ}}{A_R h_R} & \frac{-1}{\rho c A_R h_R} \\ 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_3} \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_1}{\tau_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_2}{\tau_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_3}{\tau_3} \end{bmatrix} u(t) \tag{4.34}$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} u(t) \tag{4.35}$$

4.2.1.4. Discretización del intercambiador de calor

Se tiene un sistema en variables de estado de la forma:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \tag{4.36}$$
$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \tag{4.37}$$

El cual puede ser representado como un sistema en variables de estado discreto como:

$$x(kh + h) = \Phi(h)x(kh) + \Gamma(h)u(kh) \tag{4.38}$$
$$y(kh) = Cx(kh) + Du(kh) \tag{4.39}$$

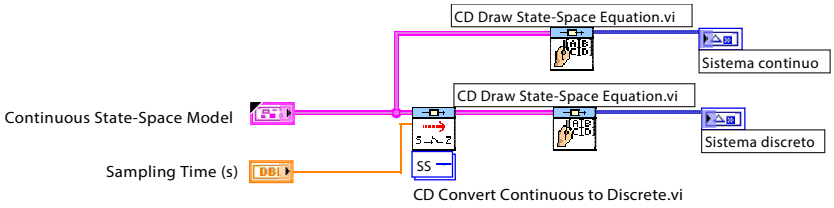
Donde las matrices $\Phi(h)$ y $\Gamma(h)$ están definidas como:

$$\Phi(h) = \mathcal{L}^{-1}\{[sI - A]^{-1}\}\Big|_{t=h} \qquad \Gamma(h) = \int_0^h \Phi(s)ds \cdot B \tag{4.40}$$

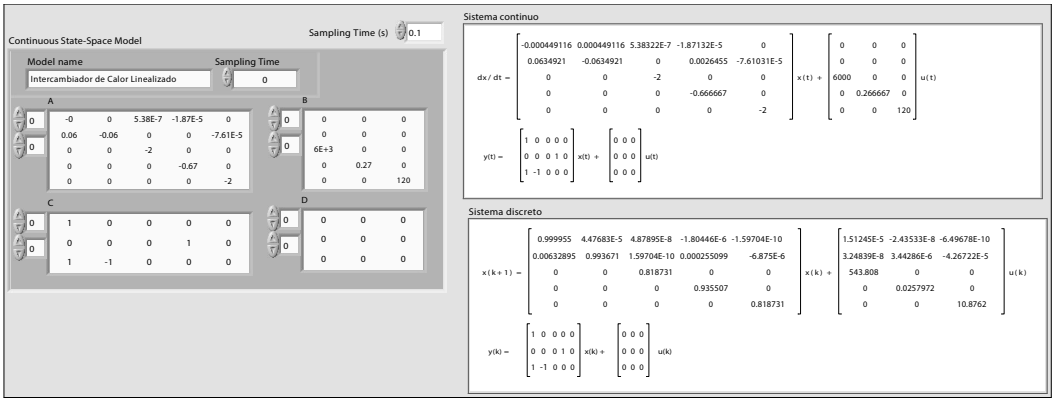
Como se aprecia en la ecuación asociada a la matriz $\Phi(h)$, es necesario calcular la inversa de la matriz $[sI - A]$. Sin embargo, al analizar la ecuación (4.34), la matriz A tiene dimensión 5x5. Realizar estos cálculos manualmente puede ser complejo y propenso a errores, por lo que se aprovecha la funcionalidad de LabVIEW para simplificar este proceso.

En la figura 4.4 (a) se presenta el diagrama de bloques utilizado. En este, el bloque *CD Convert Continous to Discrete* recibe como entrada el modelo continuo en variables de estado y el tiempo de muestreo. Los otros dos bloques se utilizan únicamente para visualizar las ecuaciones en el panel frontal.

En la figura 4.4 (b) se puede apreciar el panel frontal del programa. Aquí, el modelo continuo se ingresa de forma manual. A la derecha se puede apreciar el sistema continuo con mayor precisión decimal y, posteriormente, el modelo discretizado calculado por el bloque de LabVIEW para un tiempo de muestreo $T_s = 0{,}1s$.



(a) Bloques usados



(b) Discretización con Ts = 0.1s

Figura 4.4: Discretización del IDCV en LabVIEW

La ventaja de implementar la discretización de esta manera es que si por cualquier motivo se desea cambiar el tiempo de muestreo, no es necesario calcular el sistema discreto manualmente de nuevo, sino que basta con cambiar el tiempo de muestreo y el programa se encarga de realizar los cálculos necesarios.

4.2.2. Diseño del MPC directo con modelo lineal discreto

Se definen las variables de la figura 4.5, donde se puede apreciar el esquema de control a implementar. En este esquema, el vector $r(k)$ corresponde a la referencia ingresada por el usuario, $u(k)$ representa las actuaciones e $y(k)$ son las salidas del sistema.

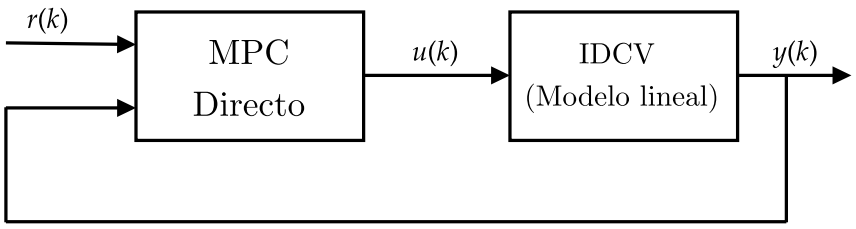


Figura 4.5: Esquema de control con modelo lineal

Dado que se obtuvo el modelo lineal discreto del intercambiador de calor, es posible extender la simulación de un sistema de primer orden a un sistema MIMO 3x3. Es conveniente trabajar de esta manera antes de utilizar el modelo no lineal, ya que permite aumentar la complejidad de la simulación de forma gradual, evitando así errores adicionales.

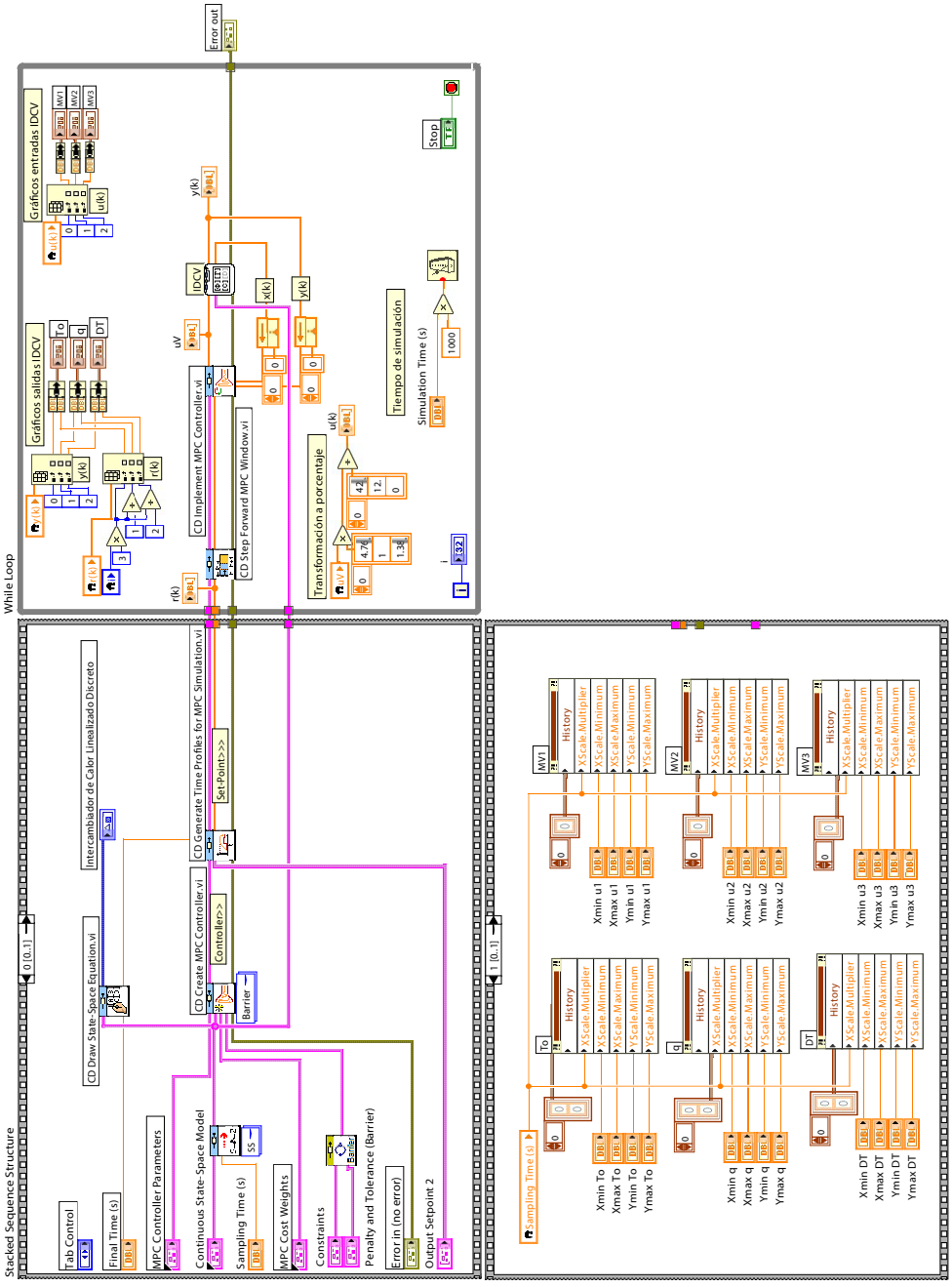


Figura 4.6: Diagrama de bloques IDCV Lineal discreto

En la figura 4.6 se presenta el diagrama de bloques modificado para el control MPC directo del IDCV lineal. Se observa que la segunda pestaña de la secuencia de dos pasos queda dedicada a la configuración de los gráficos, sacando la generación de referencias que estaba en la simulación del ejemplo.

A continuación se detallan los cambios principales realizados:

1. **Restricciones, penalización y tolerancia:** Inicialmente el controlador no estaba respetando las restricciones de actuación, por lo que realizando un estudio de los ejemplos de control MPC proporcionados por LabVIEW, se modifican estos parámetros. Al realizar este cambio se comenzaron a respetar las limitaciones definidas para la actuación.

2. **Discretización del sitema:** En vez de ingresar el modelo discreto, se entrega el modelo continuo en variables de estados y se utiliza el bloque que transforma un sistema continuo a discreto.

3. **Referencia:** El bloque *Generate Profile* utilizado en el sistema de primer orden, solo funciona con una entrada y una salida. Tras explorar los ejemplos de LabVIEW, se encontró el bloque *Generate Time Profiles for MPC Simulation*, que permite ingresar más de una referencia.

4. **Estructura del *loop while*:** La estructura se mantiene bastante similar. Sin embargo, se utilizan indicadores y variables locales para mejorar visualmente el diagrama de bloques.

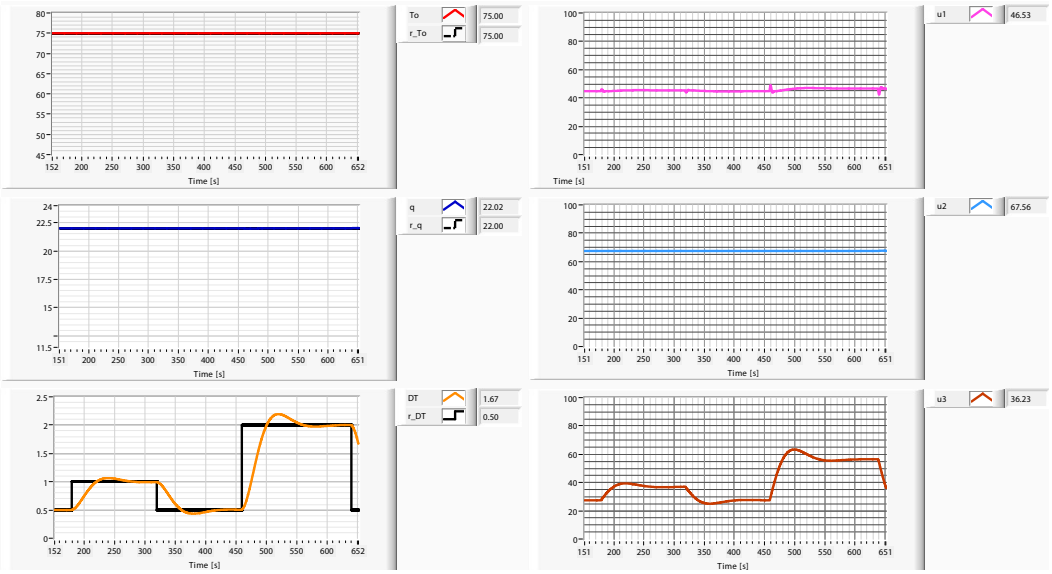
5. **Variables del sistema:** Las variables $u(k)$ e $y(k)$ tienen tres elementos cada una, por lo que para separar estos vectores, se utilizan los índices 0, 1, 2. Por otra parte, la variable $r(k)$ es generada como un arreglo de largo i, donde $r_1(k)$ aparece en las posiciones $[0, 3, 6...]$, $r_2(k)$ aparece en las posiciones $[1, 4, 7...]$ y $r_3(k)$ aparece en las posiciones $[2, 5, 8...]$. Esto se traduce en que para separar la referencia, se deben usar los índices $3i$, $3i + 1$ y $3i + 2$, respectivamente.

En la figura 4.7 se muestra el panel frontal modificado para el control MPC directo del IDCV lineal, en la parte (a) de la figura, se observan los gráficos con las variables de interés, que en este caso corresponden a $T_o(t)$, $q(t)$, $\Delta T(t)$, $u_1(t)$, $u_2(t)$ y $u_3(t)$.

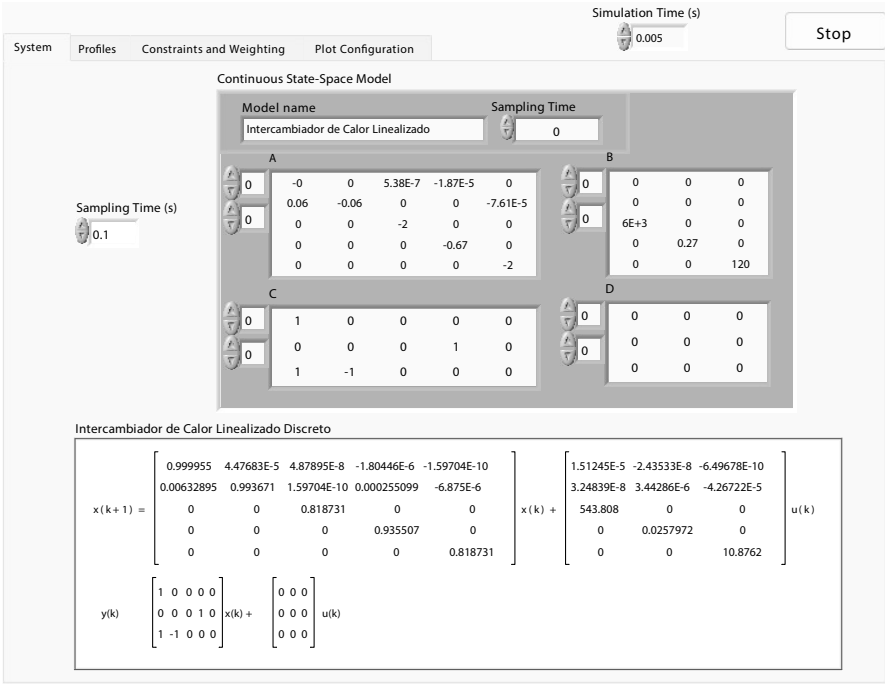
En la figura 4.7 (b), se presenta la pestaña *System*. Aquí se ingresa el IDCV linealizado en variables de estado y el tiempo de muestreo, obteniendo así el modelo discreto. Además, es importante mencionar que el parámetro *Simulation Time (s)* permite acelerar o realentizar la velocidad de los gráficos.

A continuación, en la figura 4.7 (c) se muestra la pestaña *Profiles*. En esta sección, la configuración de los parámetros del controlador se mantiene igual que en el ejemplo, mientras que se aprecia el cambio al ingresar las referencias. Es posible especificar el valor deseado de cada referencia y en qué momento ocurre el cambio, permitiendo implementar referencias tipo escalón o pulso.

Finalmente, en la pestaña *Constraints and Weighting* (figura 4.7 (d)) es claro el cambio para ingresar las restricciones, penalización y tolerancia. También se configuran las matrices de peso, las cuales son 3x3 debido a que el sistema posee 3 entradas y 3 salidas.



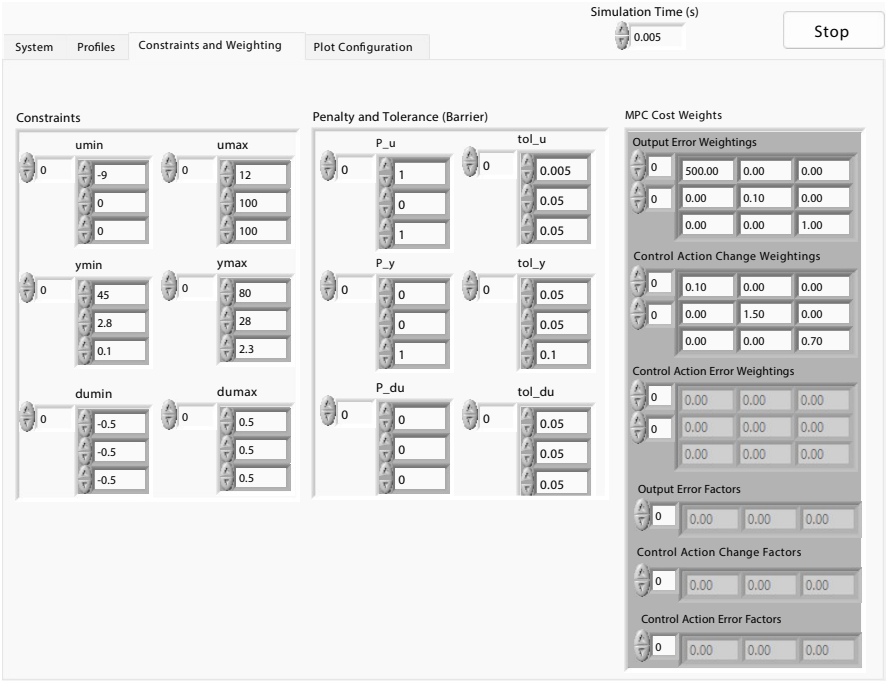
(a) Gráficos



(b) Pestaña System



(c) Pestaña Profiles



(d) Pestaña Constraints and Weighting

Figura 4.7: Panel frontal MPC directo con IDCV Lineal discreto

El objetivo principal de esta simulación es permitir la sintonización de los parámetros del controlador antes de utilizar el sistema no lineal.

4.2.3. Ajuste de parámetros del MPC directo con modelo no lineal y validación de la respuesta en lazo cerrado

Como se presentó en la sección 2.3, en una simulación de LabVIEW se modela el comportamiento dinámico del intercambiador de calor. Posteriormente, en la sección 4.2.2 se implementa el control MPC diseñado para el modelo lineal del IDCV.

Entonces, el objetivo es conectar estas dos simulaciones mediante el protocolo de comunicación OPC, dentro de un solo computador, siguiendo el esquema de control mostrado en la figura 4.8. Para ello es necesario modificar ambas simulaciones con el fin de poder comunicar las variables necesarias para el correcto funcionamiento del esquema conjunto.

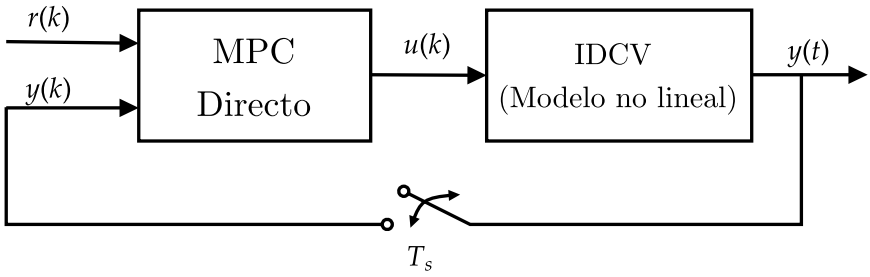


Figura 4.8: Esquema de control con modelo no lineal en un mismo PC

El proceso de implementación, consiste primeramente en crear un servidor con las variables que se compartirán entre ambas simulaciones. Siguiendo los pasos detallados en el anexo C, se configura el servidor de la figura 4.9. En este servidor, las actuaciones se envían desde el controlador hacia la simulación dinámica, mientras que el resto de variables se transmiten en sentido contrario.

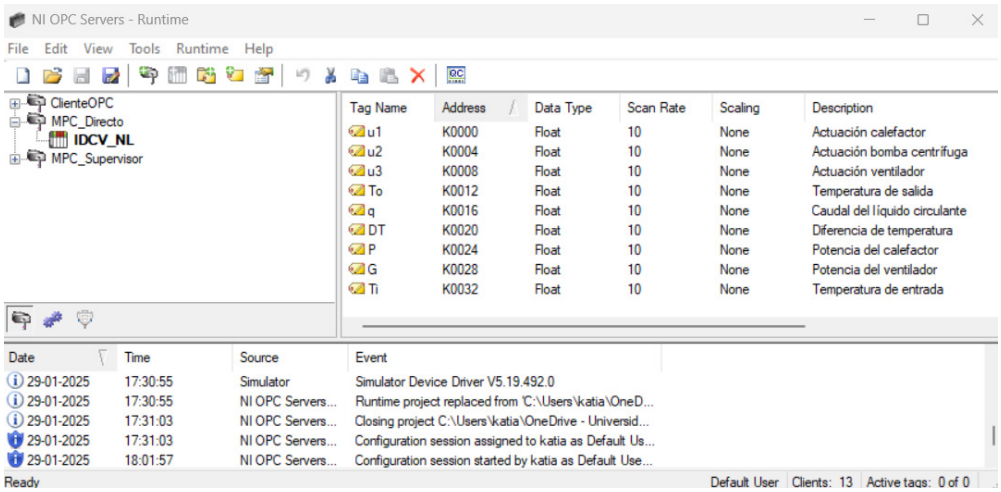


Figura 4.9: Servidor OPC para el control MPC directo

Una vez creado el servidor, se configuran dos clientes en LabVIEW (uno para el controlador MPC y otro para la simulación del IDCV no lineal) siguiendo las instrucciones del anexo D. Esto permite obtener las librerías mostradas en la figura 4.10. Cabe destacar que las librerías extendidas corresponden a las simulaciones resaltadas en azul, respectivamente.

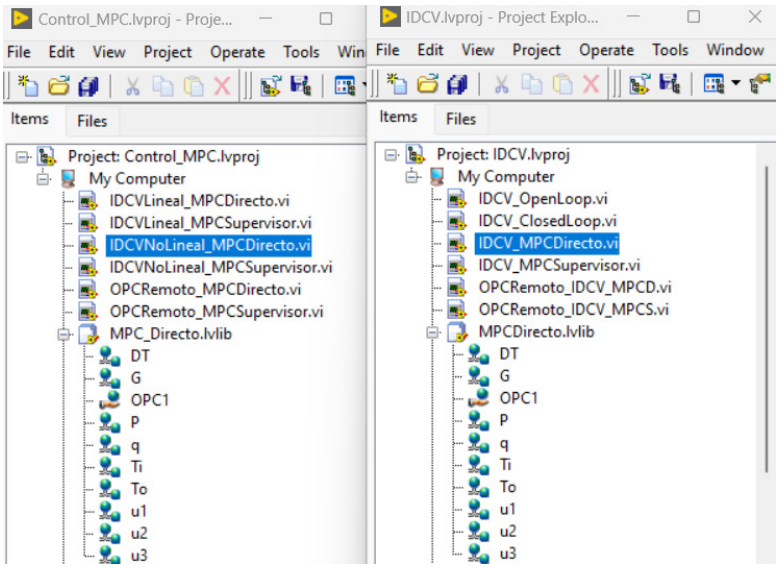


Figura 4.10: Clientes de LabVIEW para MPC directo

4.2.3.1. Modificación simulación MPC Directo

A continuación, se presentan los cambios realizados para el control MPC. En la figura 4.11 se puede ver el diagrama de bloques modificado. Cabe destacar que el panel frontal no se incluye, ya que permanece con los mismos parámetros que para el modelo lineal.

Los cambios se aprecian principalmente en el ciclo *while*. Se añade un *Control and Simulation Loop*, donde se integran las variables compartidas, generando dos vectores: el vector de estados del sistema y las salidas del sistema. Estas variables se agrupan, se procesan mediante un retentor de orden cero, se retrasan una muestra y finalmente se nombran utilizando indicadores.

Se elimina el bloque *Discrete State-Space*, que anteriormente se utilizaba para ingresar el IDCV lineal discreto y simular su dinámica. Ahora, al bloque *CD Implement MPC Controller* se le ingresan las variables $y(k)$ y $x(k+1)$ del modelo no lineal y entrega el vector $u(k)$, que luego de ser separado en $u_1(k)$, $u_2(k)$ $u_3(k)$, se envía mediante variables compartidas al servidor OPC.

Se incluye una sección dedicada a escribir los datos en Excel, ya que a partir de esta simulación se generan los gráficos de control posteriomente en Matlab.

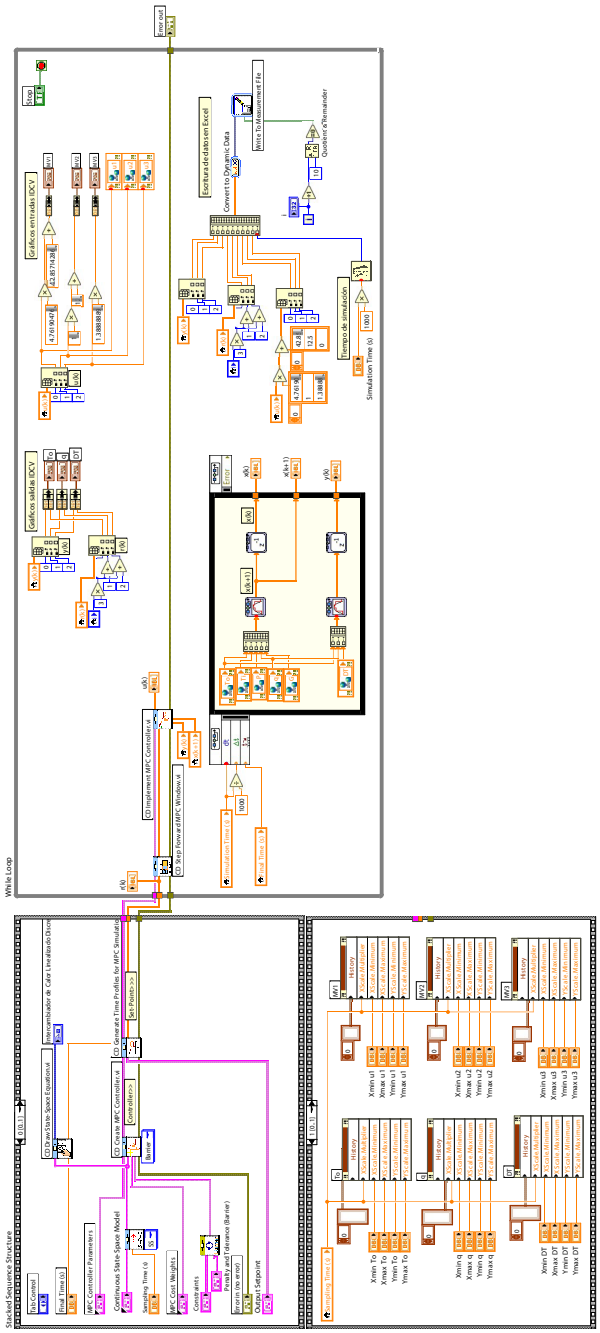


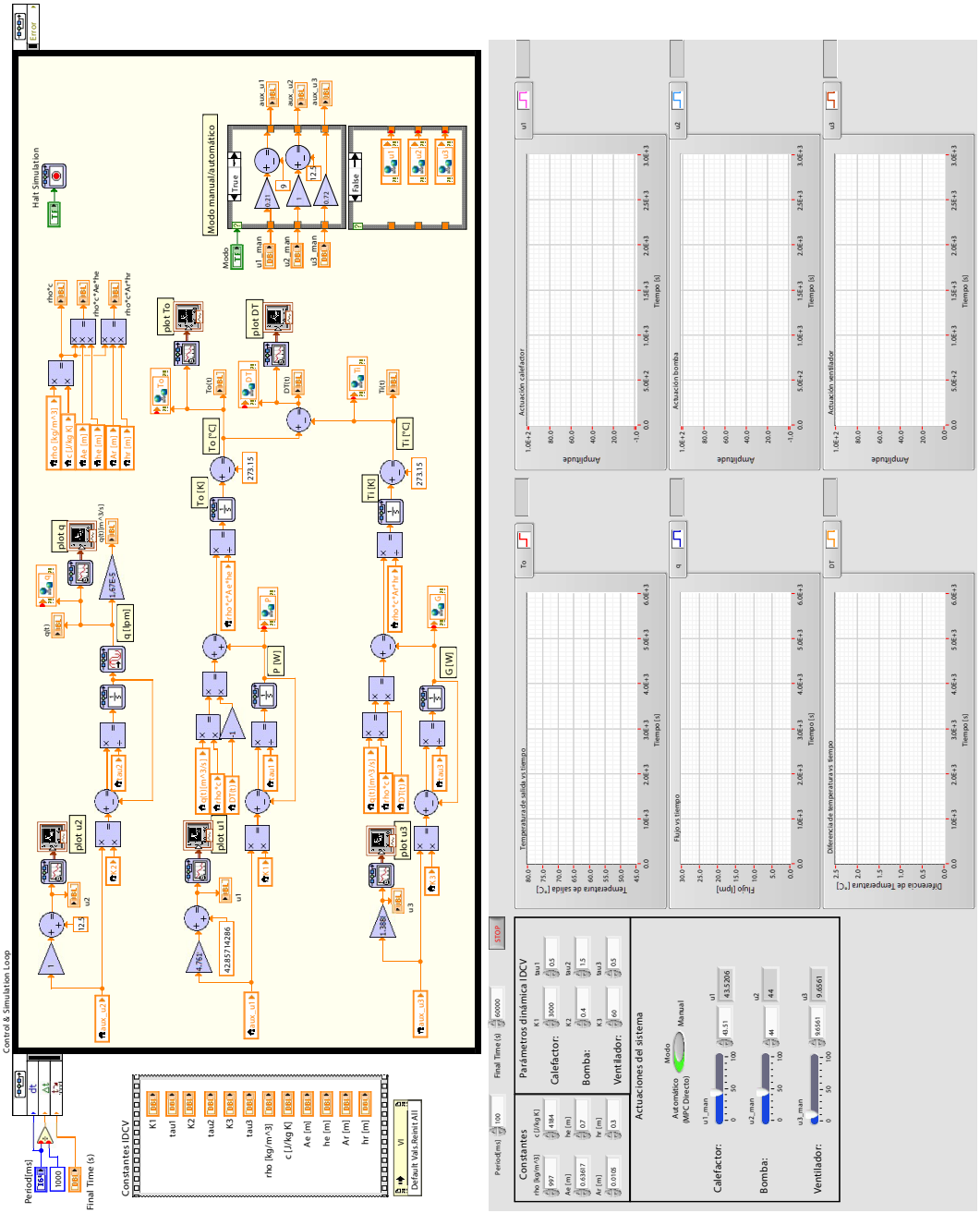
Figura 4.11: Controlador MPC Directo modificado

4.2.3.2. Modificación simulación dinámica IDCV

En la figura 4.12 se muestra la simulación dinámica del IDCV modificado. En el diagrama de bloques se añade una estructura del tipo *Case* enlazada a un botón. Esta estructura permite operar en dos modos: manual, donde el usuario puede ingresar las actuaciones y automático, en que las actuaciones son proporcionadas por las variables

compartidas de la simulación de control MPC directo.

En el panel frontal, esto se refleja en un botón que indica el modo de operación. Si se selecciona el modo manual, el usuario puede ajustar las actuaciones mediante los deslizadores; en cambio, en modo automático no es necesario realizar ninguna acción.



(a) Diagrama de bloques (b) HMI

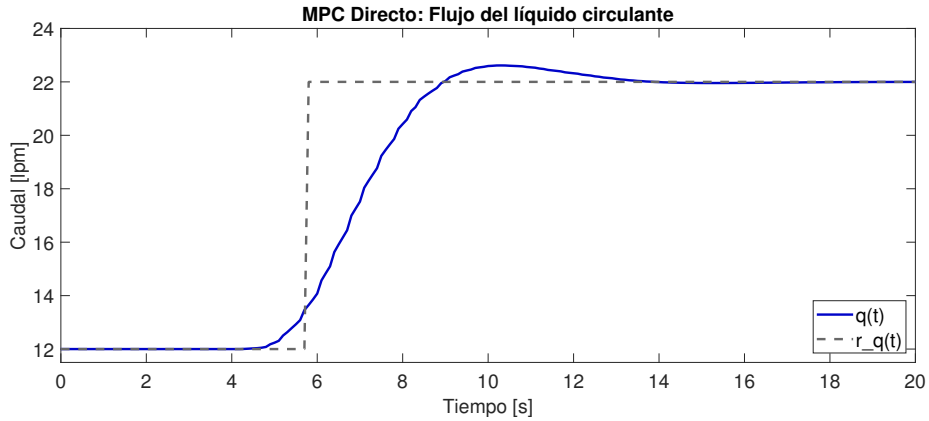
Figura 4.12: Simulación IDCV modificado

4.2.3.3. Validación de la respuesta en lazo cerrado

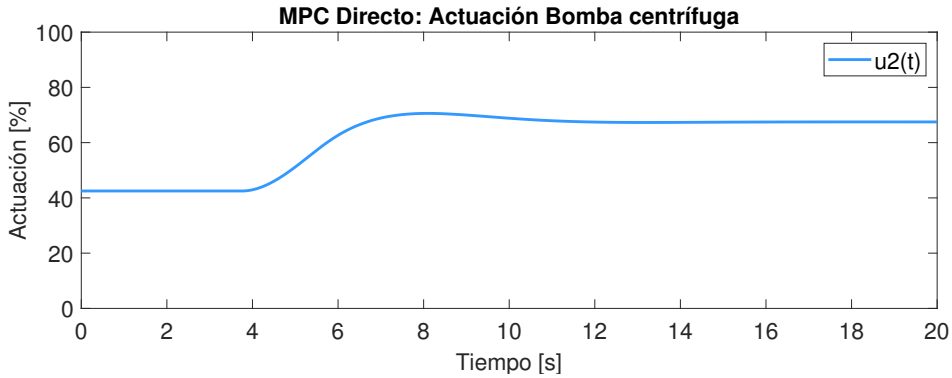
Una vez establecida la conexión mediante OPC entre las dos simulaciones modificadas, se procede a ejecutar primero la simulación del IDCV no lineal y luego la del controlador MPC directo. Todo esto dentro del mismo computador (PC2).

Respuesta caudal del líquido circulante

Se realiza el control MPC directo del caudal del líquido circulante. Para ello, se establece como referencia $T_o = 50°C$ y $\Delta T = 0{,}5°C$. La referencia de caudal es de $12\ lpm$ y luego cambia a $22\ lpm$ a los $125{,}8$ segundos. Este cambio se realiza después de esperar a que el sistema alcance el estado estacionario.



(a) Caudal del líquido circulante



(b) Actuación bomba centrífuga

Figura 4.13: MPC Directo: Control de caudal

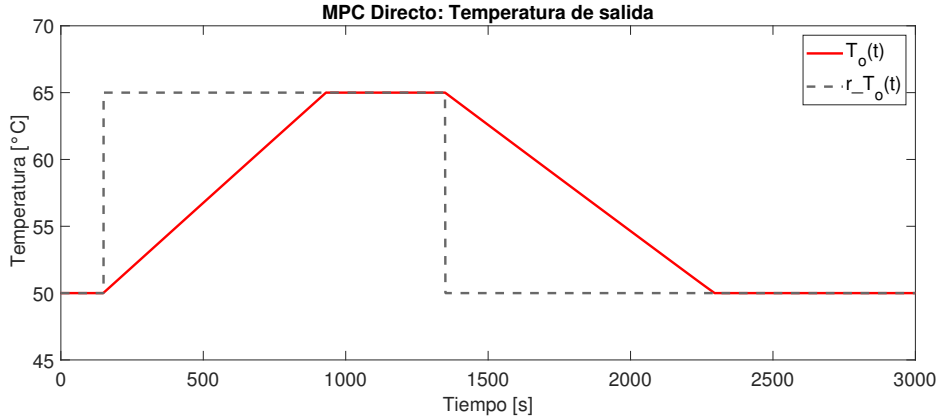
En la figura 4.13 (a) se observa el comportamiento del caudal. Es notable que, antes de que la referencia cambie, el caudal comienza a aumentar, lo que demuestra que se trata de un control predictivo. Por otro lado, en la figura 4.13 (b) se muestra la actuación de la bomba centrífuga, expresada en porcentaje. Esta actuación es similar a

la del control PID, pero comienza antes y es más suave, ya que no se ve afectado por el retraso de esta variable.

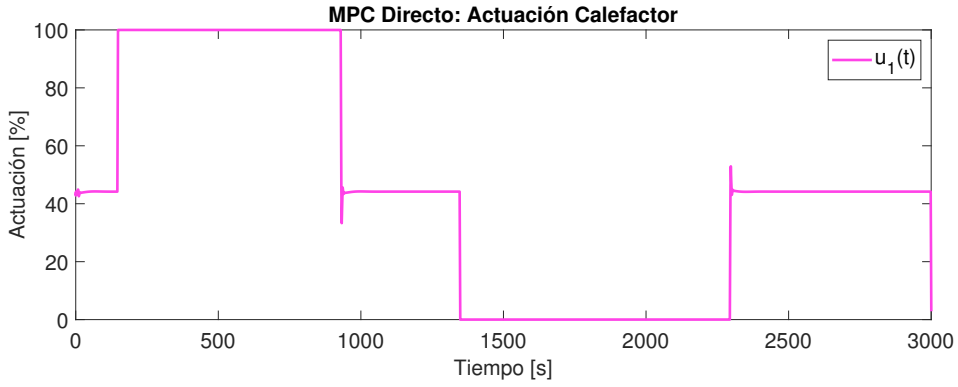
Respuesta de la temperatura de salida

Para el control MPC directo de la temperatura de salida, se establece como referencia $q = 12\ lpm$ y $\Delta T = 0{,}5$. La referencia de temperatura de salida cambia de $50°C$ a $65°C$ a los 150 segundos, y luego vuelve a $50°C$ a los 1350 segundos.

En la figura 4.14 (a) se aprecia el comportamiento de la temperatura de salida, la cual es bastante similar al del control PID del IDC real. Luego, en figura 4.14 (b) se muestra la actuación del calefactor en porcentaje, la cual en comparación al control PID, es mucho más agresiva.



(a) Temperatura de salida



(b) Actuación calefactor

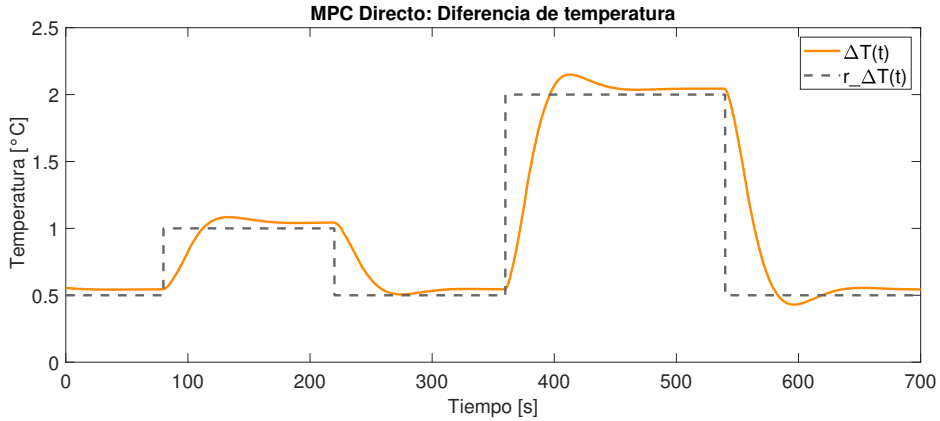
Figura 4.14: MPC Directo: Control temperatura de salida

Esta variable casi no cambia respecto al control PID ya que la actuación necesaria para calentar grandes masas de agua es muy alta. Debido a los límites de la actuación, es inevitable la saturación de esta variable para este tipo de referencias.

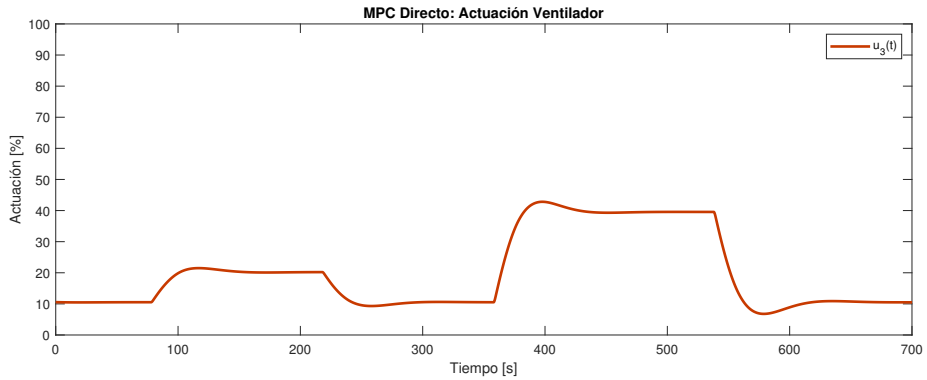
Respuesta de la diferencia de temperatura

El control MPC directo de la diferencia de temperatura se realiza estableciendo como referencia $q = 12\ lpm$ y $T_o = 50°C$. La referencia de diferencia de temperatura sigue el mismo patrón que el control PID: comienza en $0{,}5°C$, cambia a $1°C$ a los 180 segundos, vuelve a $0{,}5°C$ en los 320 segundos, sube a $2°C$ a los 460 segundos y finalmente regresa a $0{,}5°C$ a los 640 segundos, una vez que el sistema alcanza el estado estacionario.

En la figura 4.15 (a) se muestra la respuesta de la diferencia de temperatura, la cual sigue bastante bien la referencia establecida, con un error del $8\,\%$. Sin embargo, en esta variable tampoco se aprecia el efecto del control predictivo. Por otra parte, en la figura 4.15 (b) se observa la actuación del ventilador en porcentaje, cuyo comportamiento es semejante al del control PID, donde no llega a saturarse.



(a) Diferencia de temperatura



(b) Actuación ventilador

Figura 4.15: MPC Directo: Control diferencia de temperatura

Cabe destacar que estas gráficas se obtienen secuencialmente en estado estacionario para poder apreciar correctamente su comportamiento. No obstante, con el fin de

facilitar la comparación con las respuestas del IDC real, se inicia la escala de tiempo en cada caso.

4.2.4. Conexión del MPC directo en DCS con la simulación dinámica en LabVIEW

En la sección anterior, se mostró la conexión OPC entre la simulación del IDCV no lineal y el control predictivo directo en un mismo computador, obteniendo gráficas satisfactorias para el control de caudal, temperatura de salida y diferencia de temperatura.

Habiendo incrementado gradualmente la complejidad de las simulaciones, el objetivo final consiste en conectar el controlador MPC directo con la simulacion IDCV no lineal, pero esta vez en dos computadores distintos. Para ello se cuenta con: PC1 (BODE16), en que se ejecuta el control predictivo y PC2 (Bode02), en que se simula la dinámica del IDCV.

Para implementar la conexión primero se configura el PC2, donde la simulación utiliza el mismo servidor de la figura 4.9. Luego, en el PC1, se crea un cliente configurado en el programa **NI OPC Servers**, tal como se muestra en la figura 4.16. El canal se crea siguiendo las instrucciones del anexo E, y se agregan las variables de interés del servidor ubicado en el PC2.

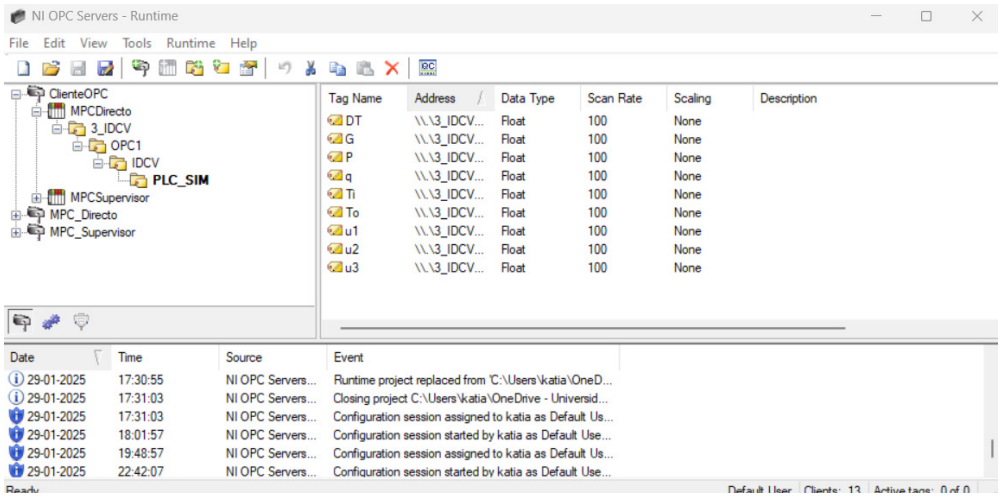


Figura 4.16: Cliente OPC en NI OPC Servers (MPC directo remoto)

Una vez configurado el servidor y los clientes, es necesario modificar las simulaciones existentes para garantizar la correcta comunicación de las variables. Estos cambios consisten en reemplazar los nodos de variables compartidas por indicadores o controladores, según corresponda; y luego enlazar estos elementos con las respectivas variables del servidor OPC.

El proceso para enlazar las variables consiste en:

1. Hacer clic derecho sobre el indicador o control deseado.

2. Ir a las propiedades del elemento.
3. Encontrar la pestaña *Data Bindig*.
4. En la opción **Data Binding Selection** escoger *Shared Variable Engine*.
5. En el tipo de acceso seleccionar la que más se adapte al tipo de variable.
6. En **Path** buscar la variable correspondiente en la librería creada.

Lo anterior se puede apreciar de mejor manera en la figura 4.17, donde se muestra el ejemplo para la variable temperatura de salida.

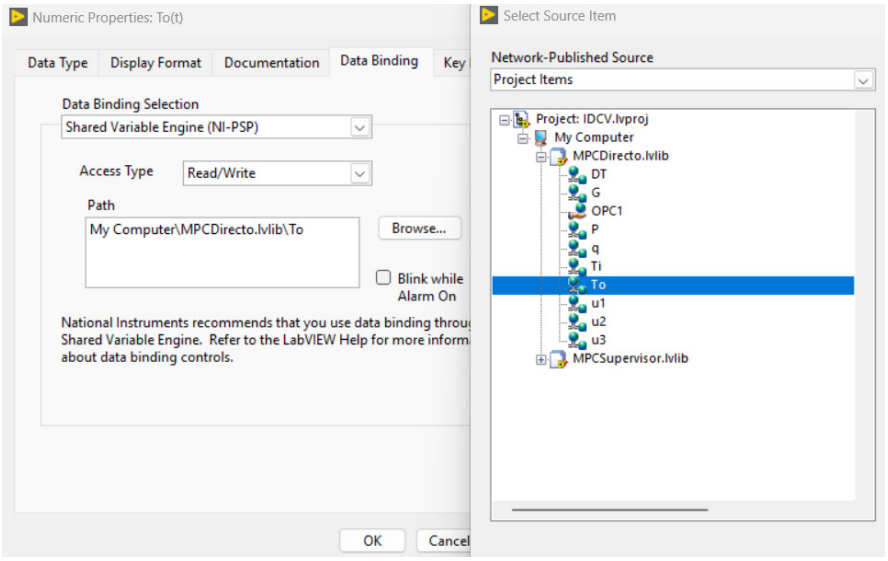


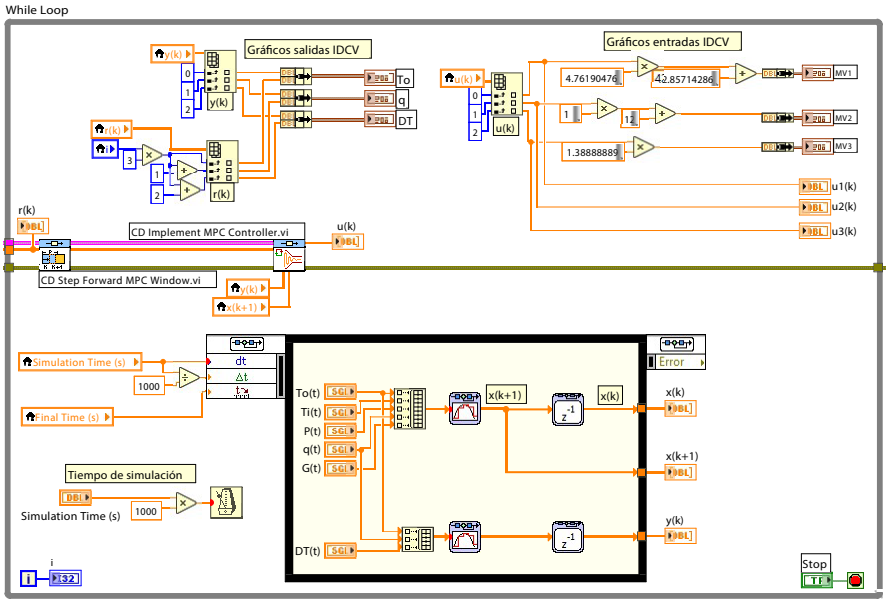
Figura 4.17: Cliente OPC en LabVIEW (MPC directo remoto)

Este procedimiento debe realizarse tanto en la simulación dinámica del IDCV no lineal, como en la configuración del controlador MPC directo.

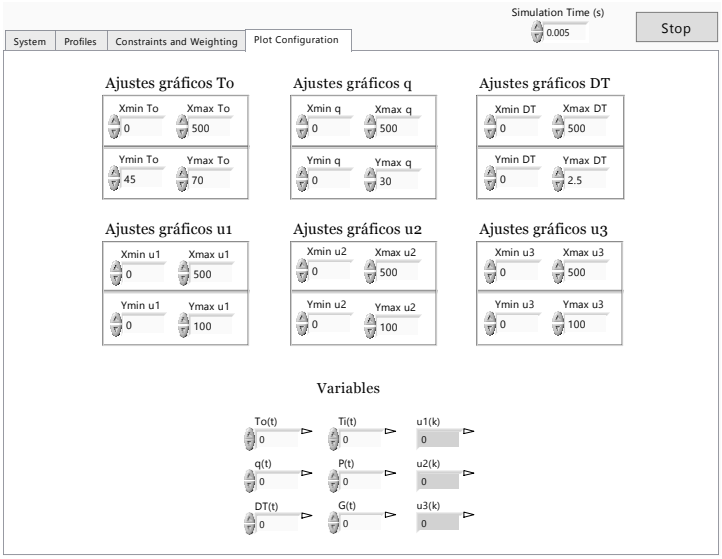
En la figura 4.18 (a) se aprecia el diagrama de bloques de la simulación del IDCV. Aquí, se ve de mejor manera los cambios realizados, donde las señales que genera la simulación dinámica del IDCV son del tipo control. Por otro lado, las variables ingresadas a esta simulación (las actuaciones del MPC), son del tipo indicador. El resto de la simulación permanece sin cambios.

A continuación, en la figura 4.18 (b) se muestra el panel frontal del controlador MPC directo modificado. En la última pestaña se añaden las mismas variables de interés.

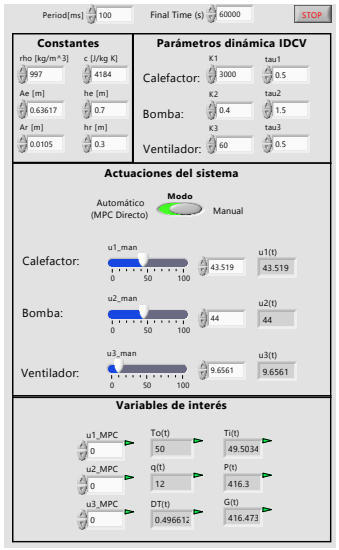
Finalmente, en la figura 4.18 (c) se muestra el panel frontal de la simulación dinámica del IDCV modificado. En la parte inferior, se observan las variables de interés. Es importante verificar que, al ejecutar la simulación, el triángulo a la derecha de cada variable se ilumine en verde, lo que indica una comunicación exitosa. Si se enciende de color rojo, significa que la comunicación no se ha establecido correctamente.



(a) Control MPC diagrama de bloques



(b) Control MPC panel frontal

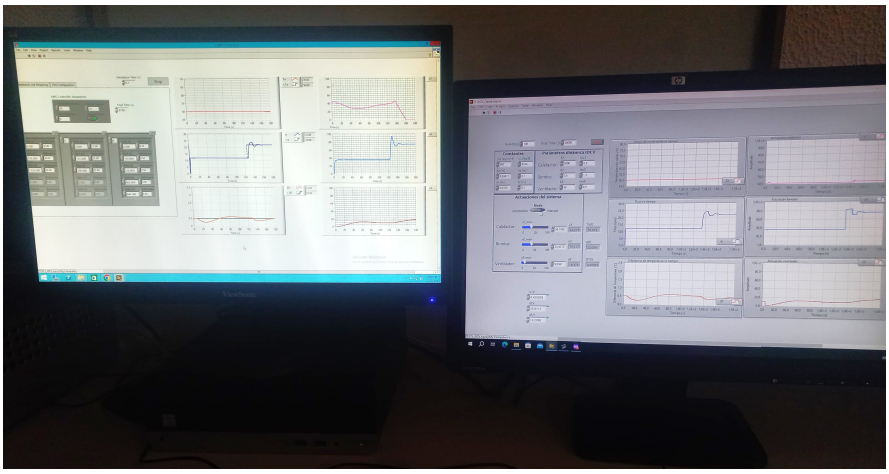


(c) IDCV panel frontal

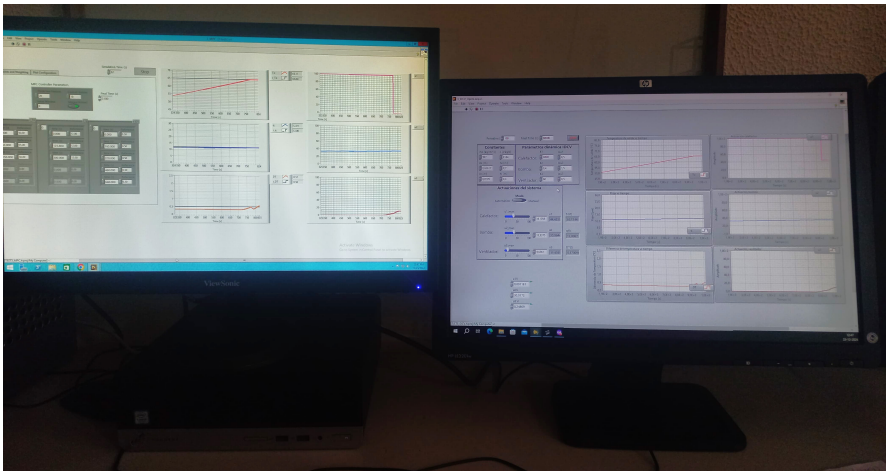
Figura 4.18: Modificaciones para conexión remota MPC directo

Con las modificaciones pertinentes realizadas, se ejecuta el control predictivo para cada variable, obteniendo las gráficas de la figura 4.19. A la izquierda se encuentra el computador BODE16, mientras que a la derecha el Bode02.

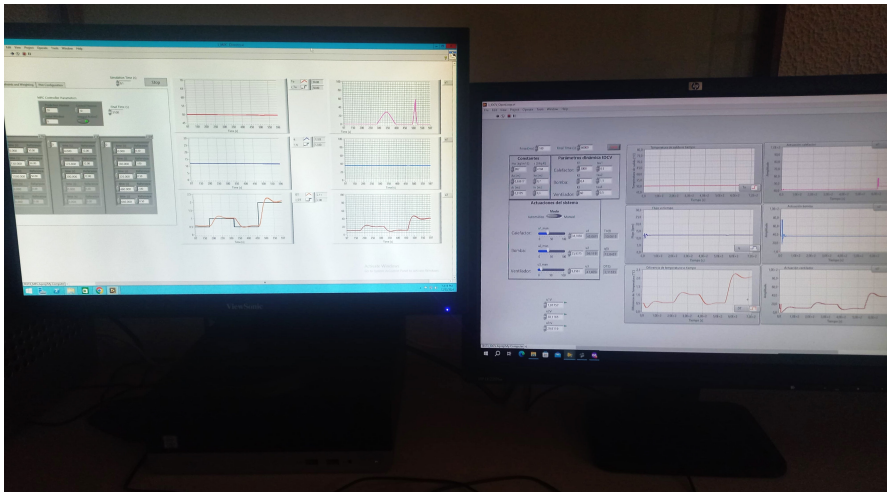
Es posible observar que las gráficas se mantienen prácticamente iguales a las obtenidas dentro de un solo computador, a excepción del caudal, que parece oscilar un poco más. Esto puede deberse a la conexión remota, más específicamente a la velocidad con la que se transmiten los datos.



(a) Caudal del líquido circulate



(b) Temperatura de salida



(c) Diferencia de temperatura

Figura 4.19: MPC Directo: Conexión remota vía OPC

4.3. Diseño del MPC Supervisor del Intercambiador de Calor

4.3.1. Modelo lineal del intercambiador de calor + lazos PID

Al igual que en el caso del control predictivo por modelo directo, para implementar el control MPC supervisor es necesario contar con el modelo discreto del sistema. Este modelo incluye el IDCV junto con los tres lazos de control PID. Por ello, en esta sección se expresan los lazos PID en variables de estado, integrándolos con el modelo lineal del IDCV para formar el sistema conjunto, el cual posteriormente se discretiza.

4.3.1.1. IDCV + lazos PID en variables de estado

Como ya se ha mencionado anteriormente, se utilizan tres controladores PI para controlar las variables de interés. En la figura 4.20 se presenta un esquema más detallado de cómo están implementados estos controladores en la simulación. Es importante destacar que la variable z corresponde a la entrada del bloque de ganancia y que b es un vvalor común para los tres lazos, razón por la cual se presenta como una constante.

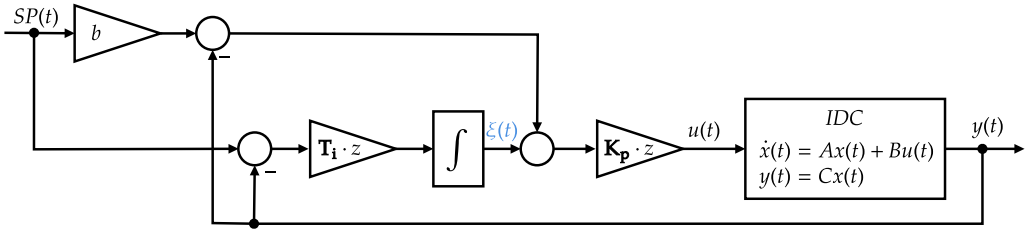


Figura 4.20: Control PI en diagrama de bloques

Como se puede observar, para representar este sistema en variables de estado, se introduce una variable intermedia $\xi(t)$ después de la integración. Esto implica la adición de tres nuevas variables de estado, una por cada lazo de control.

Siguiendo la notación propuesta en la figura, se definen las matrices mostradas a continuación. Los parámetros utilizados son: $b = 0{,}8$, $K_{p1} = 40$, $K_{p2} = 0{,}8$, $K_{p3} = 0{,}017$, $T_{i1} = 57$, $T_{i2} = 0{,}5$ y $T_{i3} = 0{,}02$.

$$SP(t) = \begin{bmatrix} SP\_T_o(t) \\ SP\_q(t) \\ SP\_\Delta T(t) \end{bmatrix} \quad \xi(t) = \begin{bmatrix} \xi_1(t) \\ \xi_2(t) \\ \xi_3(t) \end{bmatrix} \quad \mathbf{T_i} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{i1}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{i2}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{i3}} \end{bmatrix} \tag{4.41}$$

$$u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \end{bmatrix} \quad y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \end{bmatrix} \quad \mathbf{K_p} = \begin{bmatrix} K_{p1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{p2} & 0 \\ 0 & 0 & K_{p3} \end{bmatrix} \tag{4.42}$$

Respecto al vector de salida, se puede reescribir como en la ecuación (4.43), recordando que $y(t) = Cx(t)$.

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_o(t) \\ q(t) \\ \Delta T(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_4(t) \\ x_1(t) - x_2(t) \end{bmatrix} \tag{4.43}$$

Por lo tanto, siguiendo el diagrama de bloques de la figura 4.20, se cumplen las siguientes ecuaciones para el vector $\dot{\xi}(t)$:

$$\dot{\xi}_1(t) = \frac{1}{T_{i1}} \left(SP_1(t) - y_1(t)\right) = \frac{1}{T_{i1}} \left(SP_1(t) - x_1(t)\right) \tag{4.44}$$

$$\dot{\xi}_2(t) = \frac{1}{T_{i2}} \left(SP_2(t) - y_2(t)\right) = \frac{1}{T_{i2}} \left(SP_2(t) - x_4(t)\right) \tag{4.45}$$

$$\dot{\xi}_3(t) = \frac{1}{T_{i3}} \left(SP_3(t) - y_3(t)\right) = \frac{1}{T_{i3}} \left(SP_3(t) - [x_1(t) - x_2(t)]\right) \tag{4.46}$$

Además, las actuaciones se pueden escribir como:

$$u_1(t) = K_{p1} \left[bSP_1(t) - y_1(t) + \xi_1(t)\right] = K_{p1} \left[bSP_1(t) - x_1(t) + \xi_1(t)\right] \tag{4.47}$$

$$u_2(t) = K_{p2} \left[bSP_2(t) - y_2(t) + \xi_2(t)\right] = K_{p2} \left[bSP_2(t) - x_4(t) + \xi_2(t)\right] \tag{4.48}$$

$$u_3(t) = K_{p3} \left[bSP_3(t) - y_3(t) + \xi_3(t)\right] = K_{p3} \left[bSP_3(t) - [x_1(t) - x_2(t)] + \xi_3(t)\right] \tag{4.49}$$

Con lo anterior, quedan definidas las ecuaciones para cada controlador PI. Al incorporar estas ecuaciones al modelo del intercambiador de calor expresado en variables de estado, se obtiene el siguiente sistema ampliado:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\xi}(t) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} A & 0 \\ -\mathbf{T_i}C & 0 \end{bmatrix}}_{8\times 8} \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}}_{8\times 3} u(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{T_i} \end{bmatrix}}_{8\times 3} SP(t) \tag{4.50}$$

$$u(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} -\mathbf{K_p}C & \mathbf{K_p} \end{bmatrix}}_{3\times 8} \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} + \underbrace{b\mathbf{K_p}}_{3\times 3} SP(t) \tag{4.51}$$

Sin embargo, este sistema se puede trabajar aún más con el fin de que la única entrada del sistema sean los *set point* de los lazos de control. Para ello, se reemplaza la ecuación (4.51) en (4.50), lo cual resulta en:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\xi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -\mathbf{T_i}C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -BK_pC & BK_p \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} bBK_p \\ 0 \end{bmatrix} SP(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{T_i} \end{bmatrix} SP(t) \tag{4.52}$$

Se define el vector del sistema controlador + IDC como:

$$x_c(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} \tag{4.53}$$

Por lo tanto, el sistema IDC junto con los lazos PID se resume a continuación:

$$\dot{x}_c(t) = \begin{bmatrix} A - BK_pC & BK_p \\ -\mathbf{T_i}C & 0 \end{bmatrix} x_c(t) + \begin{bmatrix} bBK_p \\ \mathbf{T_i} \end{bmatrix} SP(t) \tag{4.54}$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} x_c(t) + [0]\, SP(t) \tag{4.55}$$

4.3.1.2. Discretización IDCV + lazos PID

En este caso, la matriz A tiene dimensión 8x8, aumentando su tamaño respecto al modelo del IDC debido a la incorporación de las variables de estado adicionales de los lazos PID.

Esto refuerza la decisión de realizar la discretización mediante LabVIEW, ya que el cálculo realizado manualmente se complica aún más. En el programa, basta con extender las matrices mostradas en la figura 4.4 (b) tanto como se necesita y seleccionar el tiempo de muestreo deseado.

Este enfoque simplifica significativamente el proceso y reduce el riesgo de errores.

4.3.2. Diseño del MPC supervisor con modelo lineal

En la figura 4.24 se ve el esquema de control a implementar, que consiste en un control MPC supervisor en cascada. Esto significa que el control predictivo no interfiere con el sistema de lazo cerrado, sino que actúa sobre la referencia del control PID.

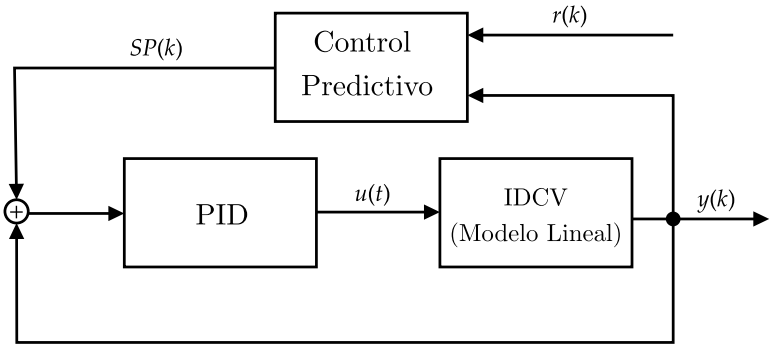


Figura 4.21: Esquema de control MPC supervisor con modelo lineal

En este esquema, el vector $r(k)$ representa las referencias ingresadas por el usuario, a partir de las cuales el control predictivo calcula el vector $SP(k)$ que se envía al lazo de control PID.

El modelo lineal discreto del IDCV junto con los lazos PID sigue siendo un sistema MIMO 3x3, ya que tiene tres entradas (referencias) y tres salidas. Esto implica que, en lugar de modificar el sistema de primer orden, resulta más práctico editar la simulación del control MPC directo con el IDCV lineal discreto, cuya funcionalidad ya ha sido comprobada.

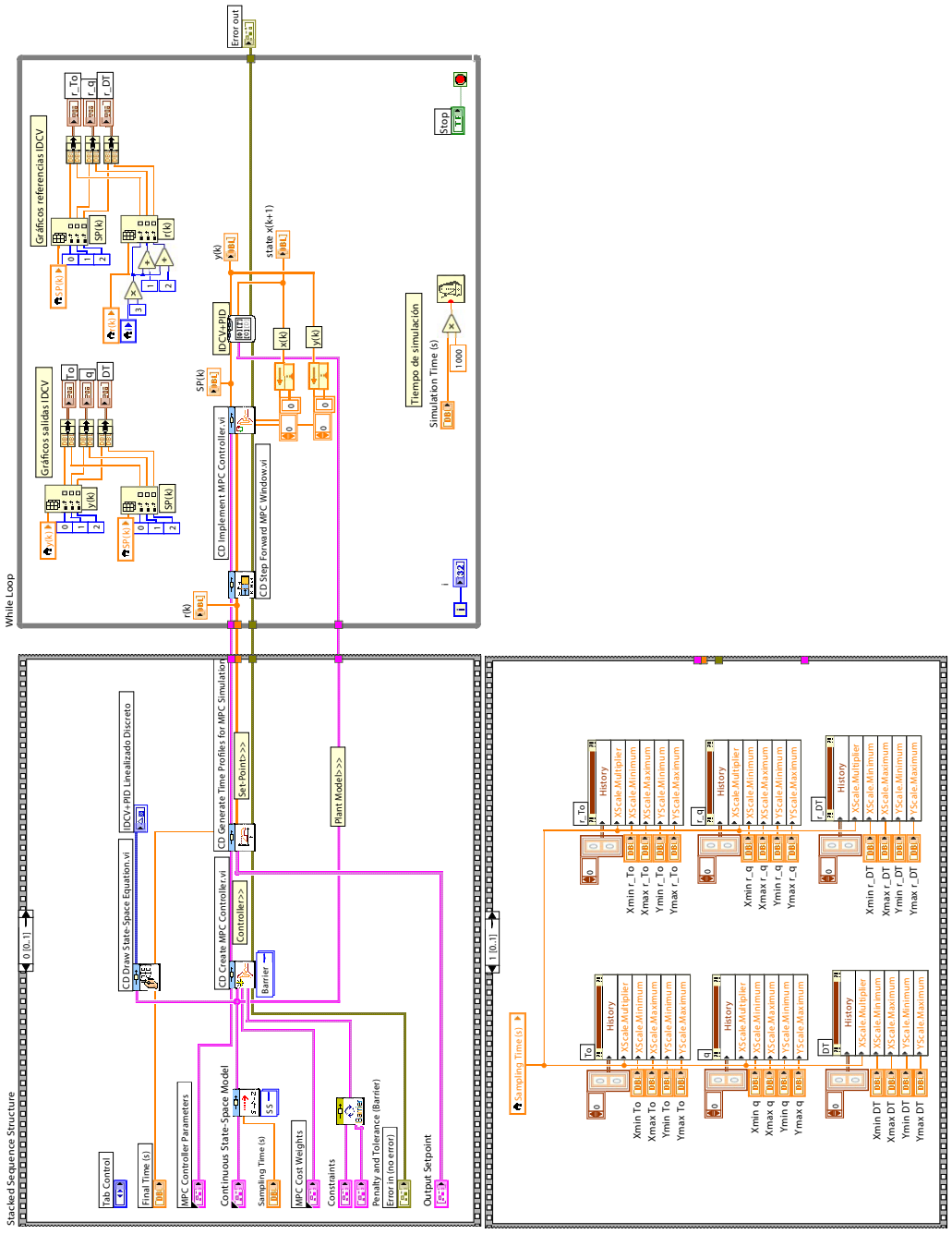
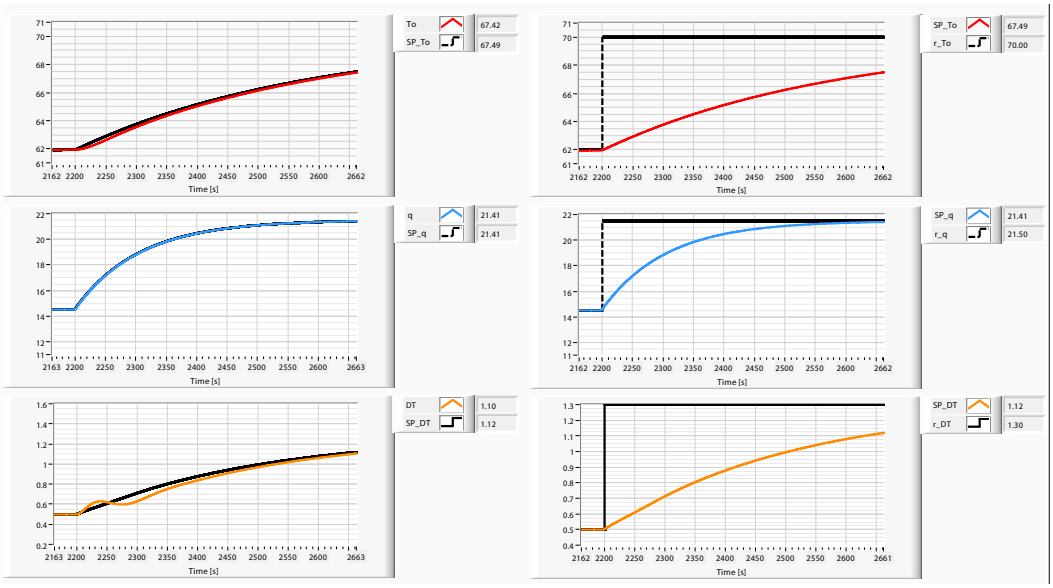


Figura 4.22: Diagrama de bloques IDCV + PID lineal discreto

En la figura 4.22 se muestra el diagrama de bloques modificado para el control MPC supervisor del sistema conjunto lineal discreto. En comparación con el diagrama de la figura 4.6, la estructura no cambia significativamente. Sin embargo se destaca que:

- El modelo continuo ahora corresponde al sistema conjunto (IDCV + lazos PID).
- La generación de gráficos incluye:
    1. La salida del sistema en relación con los puntos de ajuste (*set points*) de los lazos PID.
    2. Los *set points* generados a partir de la referencia ingresada por el usuario.

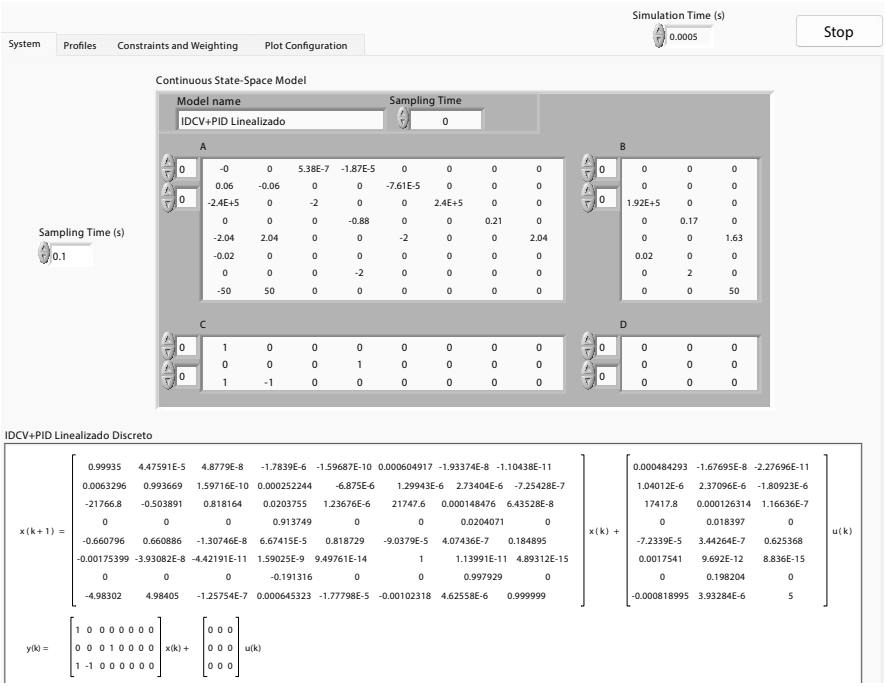
A continuación, en la figura 4.23 se muestra el panel frontal para el control MPC supervisor del sistema conjunto lineal discreto. En la parte (a) de esta figura se observan los gráficos de las variables de interés. Es importante destacar que las actuaciones $u(k)$ no se incluyen en este caso, ya que en el modelo en variables de estado no aparecen explícitamente debido a su reemplazo para establecer el sistema ampliado. Sin embargo, si fuera necesario, podrían implementarse utilizando las ecuaciones (4.47), (4.48) y (4.49).



(a) Gráficos

En la figura 4.23 (b) se presenta la pestaña *System*, donde se aprecian claramente las dimensiones extendidas de las matrices. Una vez ingresado el modelo lineal y el tiempo de muestreo, en la parte inferior se observa la versión discreta del sistema.

Luego, en la figura 4.23 (c) se ve la pestaña *Profiles*, en la que se configuran los parámetros del controlador, el tiempo final de la simulación y las referencias deseadas. En este caso, las referencias están configuradas como señales de tipo escalón.



(b) Sistema



(c) Referencias

Finalmente, en la figura 4.23 (d) se aprecia la pestaña *Constraints and Weighting*, donde se modifican las restricciones del sistema, considerando que ahora la salida del control predictivo son los *set points* de los lazos PID, Además, se configuran las matrices de peso para ajustar las respuestas y que sean similares a las respuestas del IDC real.



(d) Restricciones y matrices de peso

Figura 4.23: Panel frontal controlador MPC supervisor con IDCV+PID lineal discreto

4.3.3. Ajuste de parámetros del MPC supervisor con modelo no lineal y validación de la respuesta en lazo cerrado

En la sección 3.6 se presentó la simulación dinámica del sistema conjunto en LabVIEW, mientras que en la sección 4.3.2 se sintonizó el controlador para el modelo lineal del IDCV junto a los lazo PID.

Por lo tanto, el objetivo principal consiste en conectar estas dos simulaciones mediante el protocolo OPC dentro de un mismo computador, siguiendo el esquema de control mostrado en la figura 4.24. El bloque de control predictivo se conecta para configura el esquema de control MPC supervisor, mientras que el lazo de control PID representa la simulación no lineal del sistema conjunto.

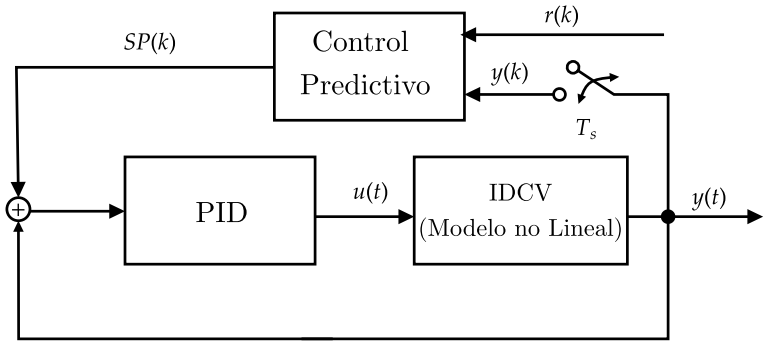


Figura 4.24: Esquema de control MPC supervisor con IDCV no lineal en un mismo PC

Para conectar ambas simulaciones, es necesario modificar la configuración OPC añadiendo las variables compartidas. Primero, se crea un servidor con las variables de interés siguiendo los pasos detallados en el anexo C. En la figura 4.25 se muestra el

servidor creado, el cual incluye las variables asociadas al IDCV, así como las variables relacionadas con el vector $\xi(t)$. Además, se incorporan las variables SP_T_o, SP_q y $SP\_\Delta T$, que son calculadas por el controlador MPC supervisor.

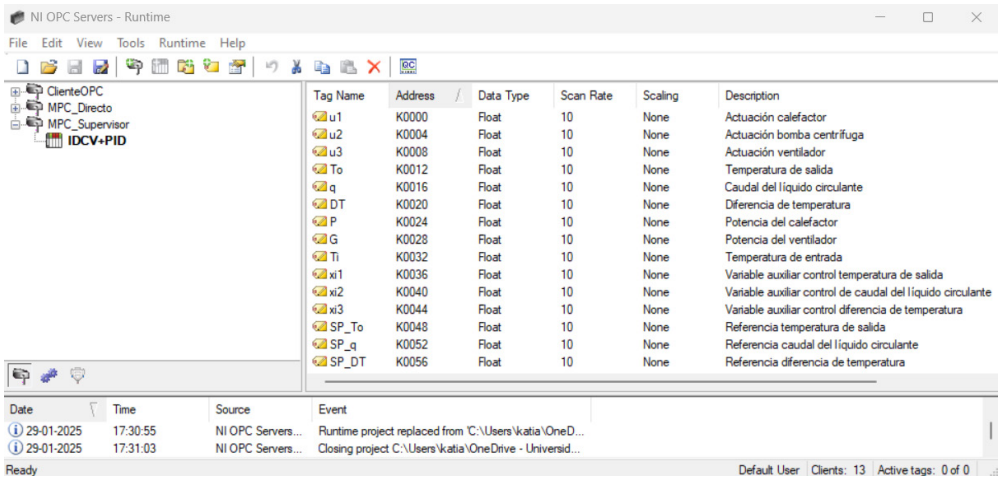


Figura 4.25: Servidor OPC MPC supervisor

Una vez creado el servidor, se configuran dos clientes en LabVIEW siguiendo las instrucciones del anexo D. Esto permite obtener las librerías mostradas en la figura 4.26, las cuales están asociadas a las simulaciones resaltadas en azul, respectivamente.

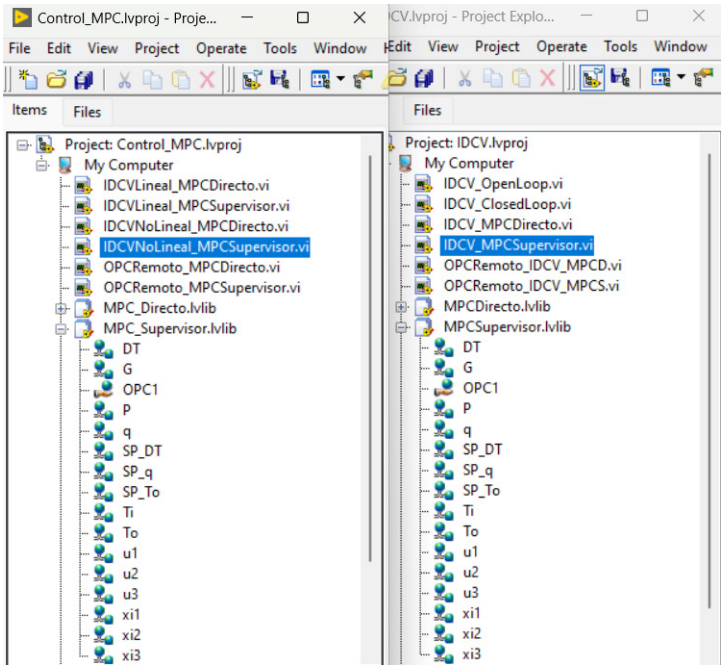


Figura 4.26: Cliente LabVIEW

4.3.3.1. Configuración del controlador MPC supervisor

A continuación, se presentan los cambios realizados para controlador MPC supervisor. En la figura 4.27 se puede ver el diagrama de bloques modificado. Es importante mencionar que el panel frontal no se incluye, ya que se mantienen los parámetros para controlar el modelo lineal.

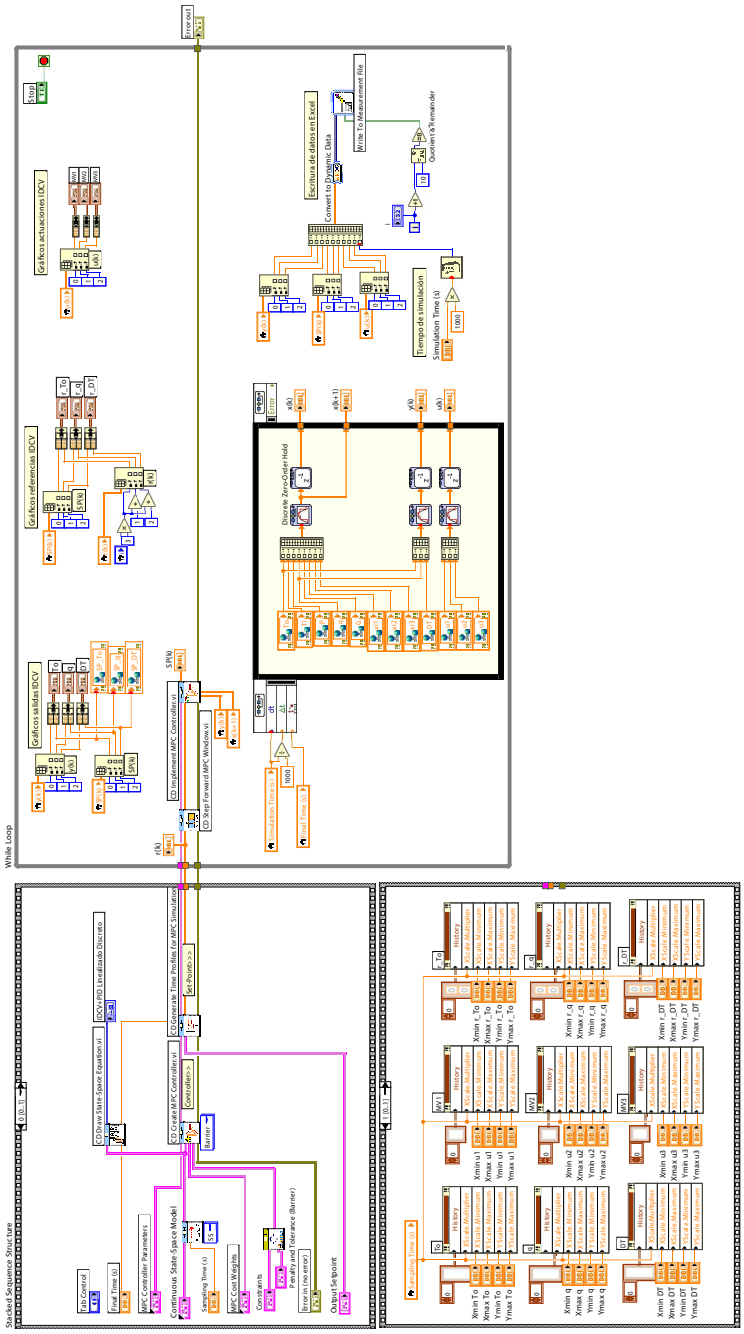
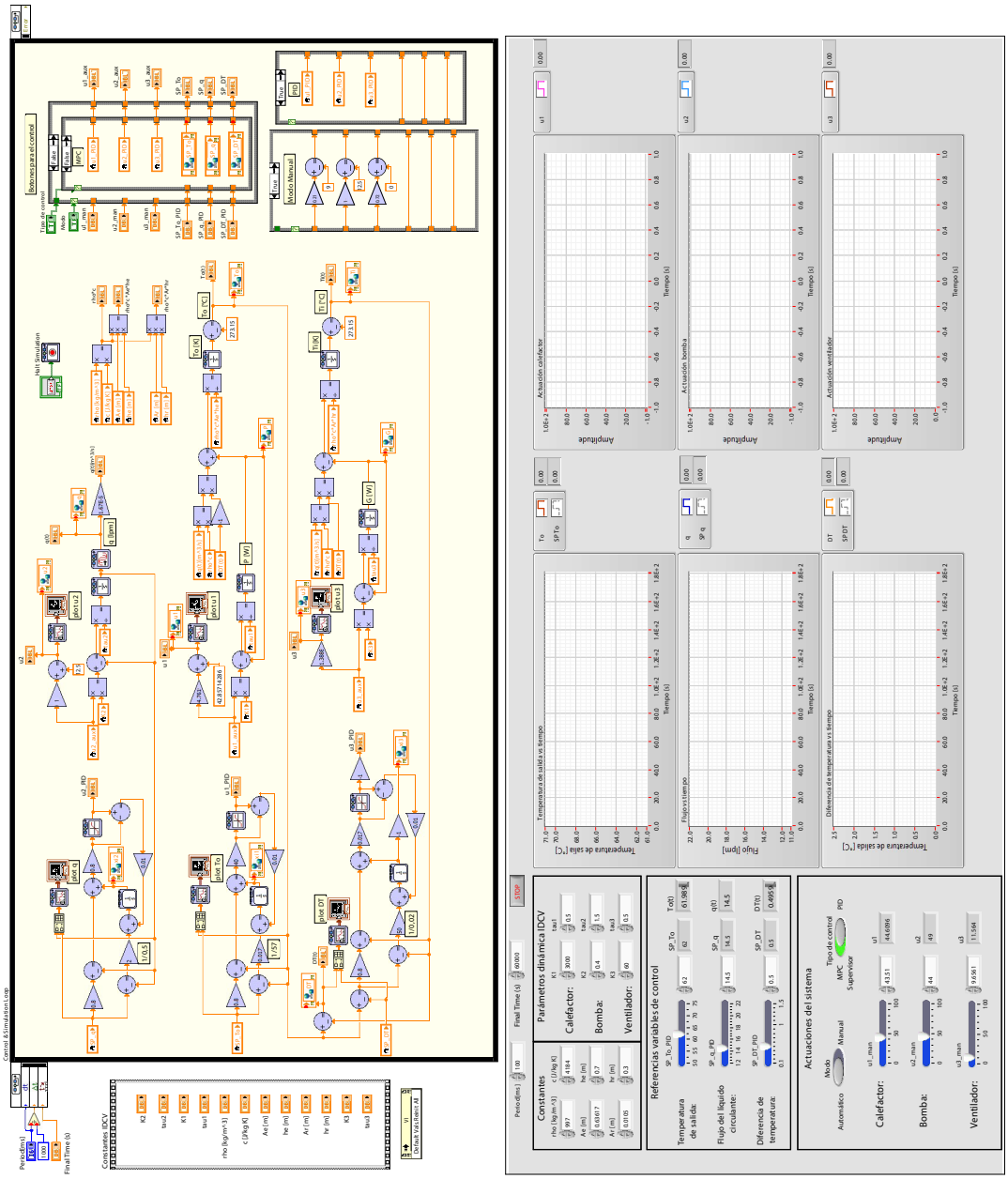


Figura 4.27: Simulación MPC Directo modificado

Los cambios principales consisten en el armado del vector $x(k+1)$ y se añaden los gráficos de las actuaciones del sistema, las cuales se obtienen a partir de la simulación del modelo no lineal.

4.3.3.2. Modificación simulación dinámica IDCV + Lazos PID

En la figura 4.28 se aprecia la simulación dinámica del sistema conjunto.



(a) Diagrama de bloques (b) HMI

Figura 4.28: Simulación IDCV modificado

La simulación original ya incluía la opción de intercambiar entre los modos manual y automático. Por ello, en el diagrama de bloques de la figura 4.28 (a), se añade una nueva estructura tipo *case* que, al operar en modo automático, permite elegir si el control es realizado únicamente por los lazos PID o por el control MPC supervisor.

Esta modificación se refleca en el panel frontal de la figura 4.28 (b), donde se incorpora un botón para seleccionar el tipo de control.

4.3.3.3. Validación de la respuesta en lazo cerrado

Una vez establecida la conexión mediante OPC entre el controlador MPC discreto y la simulación continua del IDCV + lazos PID, se procede a su ejecución conjunta dentro de un mismo computador.

A diferencia de la simulación para el MPC directo, en este caso todas las variables cambian simultáneamente. Para el caudal, su valor inicial es de $14{,}5\ lpm$ y aumenta a $21{,}5\ lpm$. La temperatura de salida cambia de $62°C$ a $70°C$, y la diferencia de temperatura pasa de $0{,}5°C$ a $1{,}3°C$. Estos cambios ocurren en los 2200 segundos, momento en el que el sistema ya ha alcanzado el estado estacionario.

Respuesta caudal líquido circulante

En la figura 4.29 se muestra la respuesta del caudal respecto al punto de ajuste (*set point*) entregado por el control MPC supervisor, tanto para el IDC real [2] como virtual.

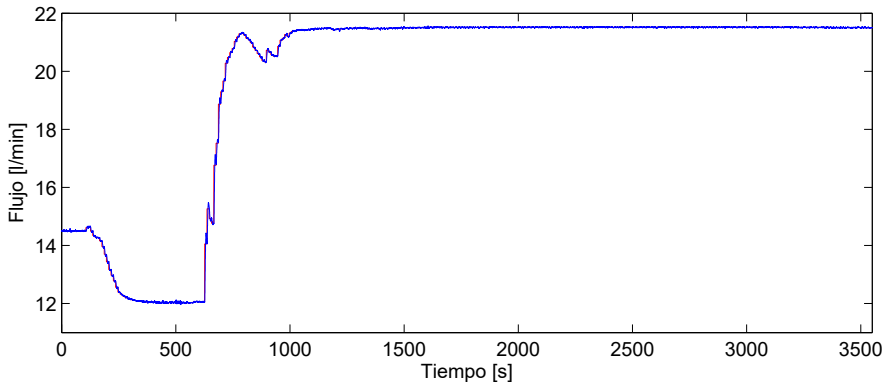
Se observa que ambos sistemas alcanzan la referencia en tiempo similares. Sin embargo, la respuesta real presenta una disminución inicial antes de comenzar a aumentar. Este comportamiento puede deberse a dos razones:

- **Cero de fase no mínima:** El sistema podría tener un cero en el semiplano derecho del plano complejo, lo cual genera un "*undershoot*" inicial.
- **Algoritmo de control RMPCT de Honeywell:** El algoritmo de control podría estar disminuyendo intencionalmente el caudal para permitir que la temperatura de salida aumente más rápido.

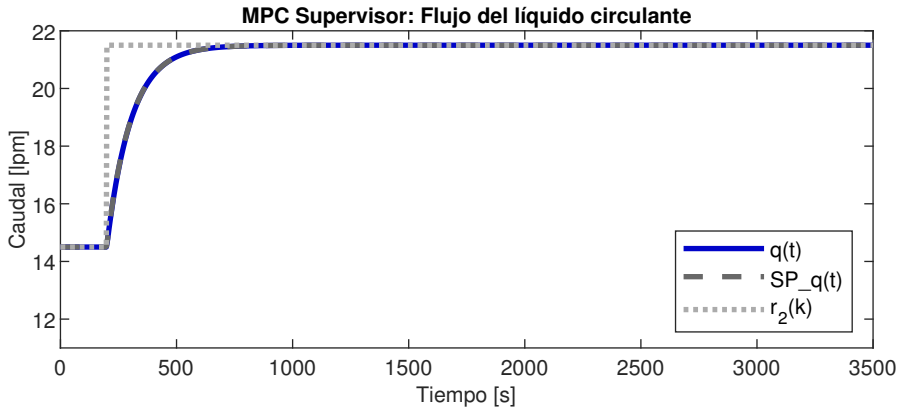
Ambas opciones son plausibles. Para la primera, es posible que el controlador PID ajuste el lazo de manera que este comportamiento no sea evidente en la respuesta de lazo cerrado. Para la segunda, considerando la ecuación dinámica de la temperatura de salida (2.21), tiene sentido que al reducir el caudal, la temperatura aumente.

Para comprobar esto adecuadamente, lo más apropiado sería implementar el control RMPCT de Honeywell sobre el IDCV junto con los lazos PID. Si el comportamiento es similar al del IDC real, se podría descartar la primera opción.

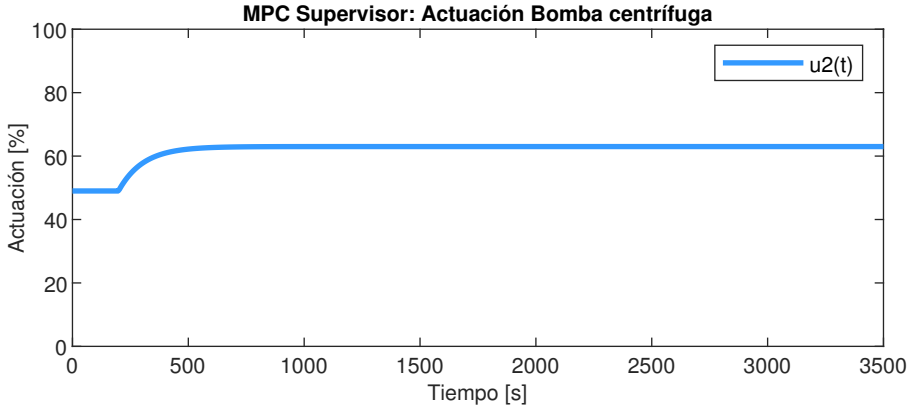
Respecto a la actuación de la bomba centrífuga, esta se mantiene proporcional al caudal del líquido circulante, tal como está definida.



(a) Caudal del líquido circulante IDC real



(b) Caudal del líquido circulante

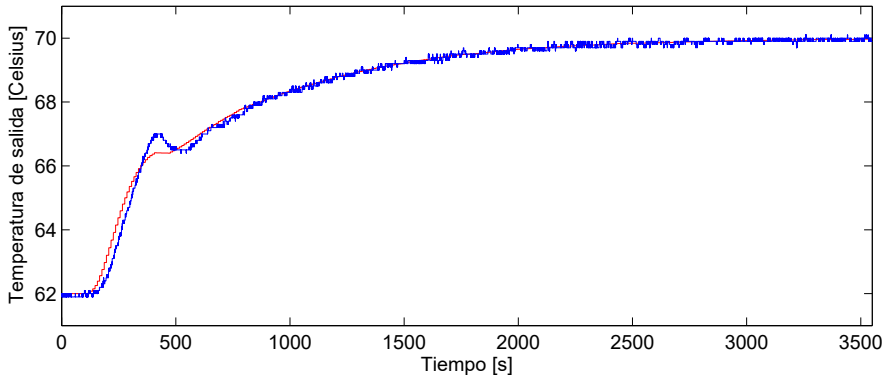


(c) Actuación bomba centrífuga

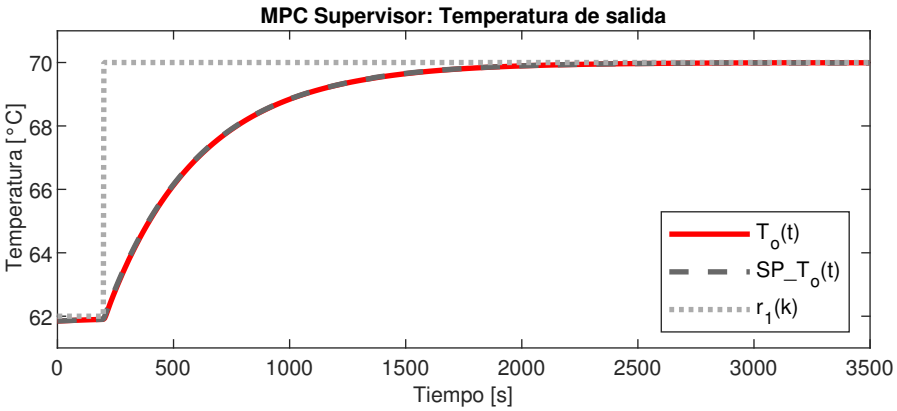
Figura 4.29: MPC Supervisor: Control de caudal

Respuesta temperatura de salida

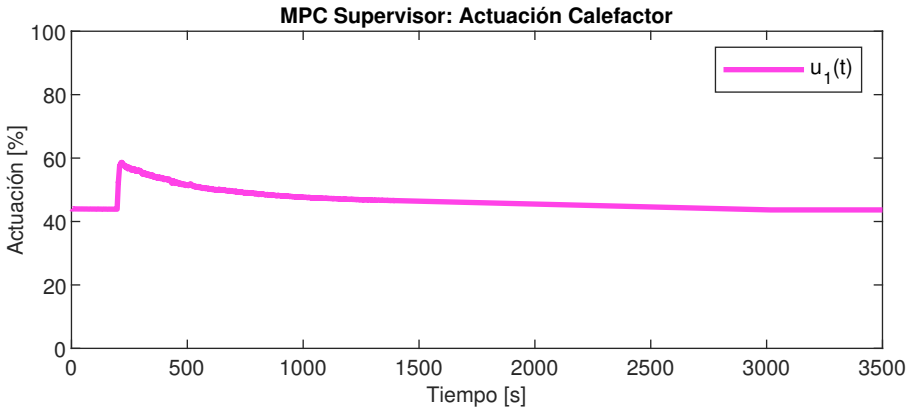
En la figura 4.30 se presenta la respuesta de la temperatura de salida respecto a el *set point* calculado por el control MPC supervisor, tanto para el IDC real [2] como virtual.



(a) Temperatura de salida IDC real



(b) Temperatura de salida

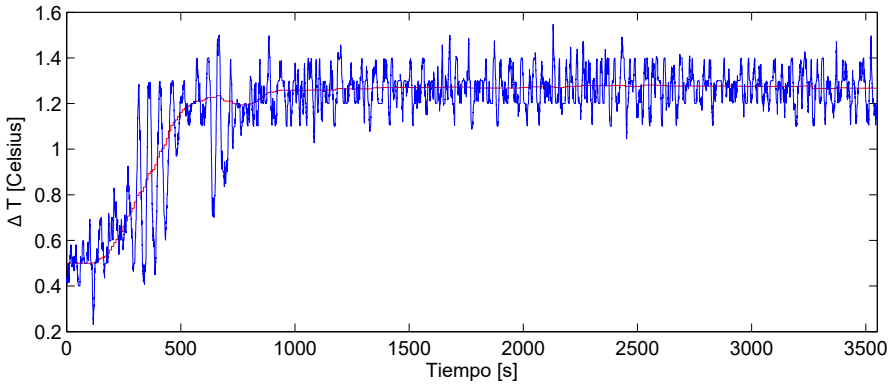


(c) Actuación calefactor

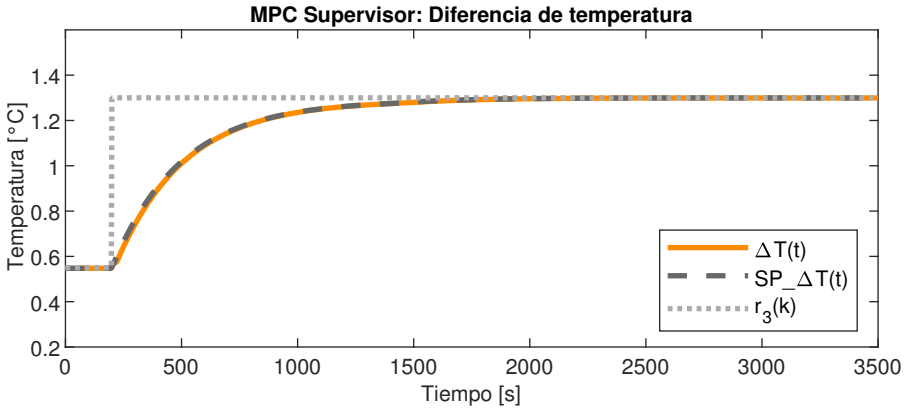
Figura 4.30: MPC Supervisor: Control temperatura de salida

Se observa que la respuesta es bastante similar, excepto por una dinámica adicional en torno a los 500 segundos. Esto podría deberse a aspectos de la dinámica no considerados en las ecuaciones planteadas, por lo que en sí el IDCV se encuentra en condiciones más “ideales”.

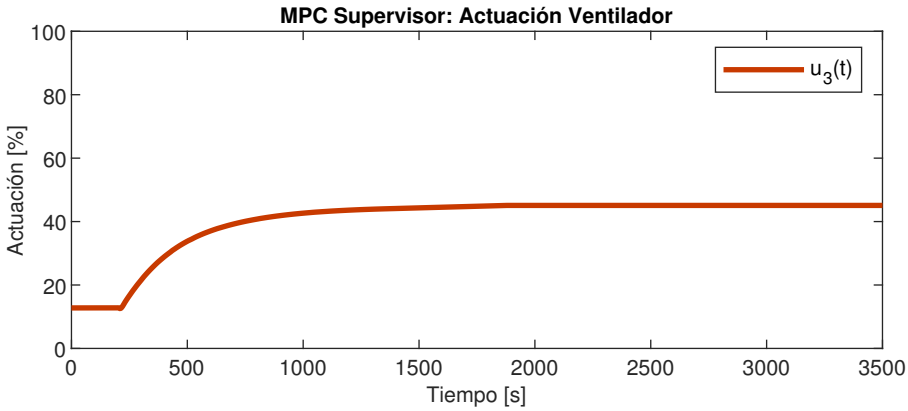
Por otro lado, es evidente que la actuación del calefactor no se satura, disminuyendo gradualmente hasta que se alcanza la referencia establecida. Esto demuestra una clara ventaja del control MPC supervisor.



(a) Diferencia de temperatura IDC real



(b) Diferencia de temperatura



(c) Actuación ventilador

Figura 4.31: MPC Supervisor: Control diferencia de temperatura

Respuesta diferencia de temperatura

Finalmente, en la figura 4.31 se puede ver la respuesta de la diferencia de temperatura en comparación con la referencia calculada por el control MPC supervisor tanto para el sistema real [2] como para el virtual.

Nuevamente, la respuesta es bastante similar, aunque sin el ruido asociado a la medición del sensor en el sistema real. Por otra parte, la actuación del ventilador es proporcional a la diferencia de temperatura, mostrando una transición mucho más suave en comparación con el control PID.

4.3.4. Conexión del MPC supervisor en DCS con la simulación dinámica en LabVIEW

En la sección anterior, se mostró la conexión OPC entre la simulación del sistema conjunto no lineal y el control predictivo supervisor dentro de un solo computador, obteniendo gráficas similares al comportamiento del IDC real cuando se le aplica control MPC supervisor.

Ahora, el objetivo es conectar las dos simulaciones en dos computadores distintos. El PC1 (BODE16) ejecuta el control MPC supervisor, mientras que el PC2 (Bode02) simula la dinámica del IDCV junto con los lazos PID. Para ello, el PC2 utiliza el mismo servidor que el mostrado en la figura 4.25. Luego, en el PC1, se crea el cliente OPC de la figura 4.32 siguiendo los paso del anexo E

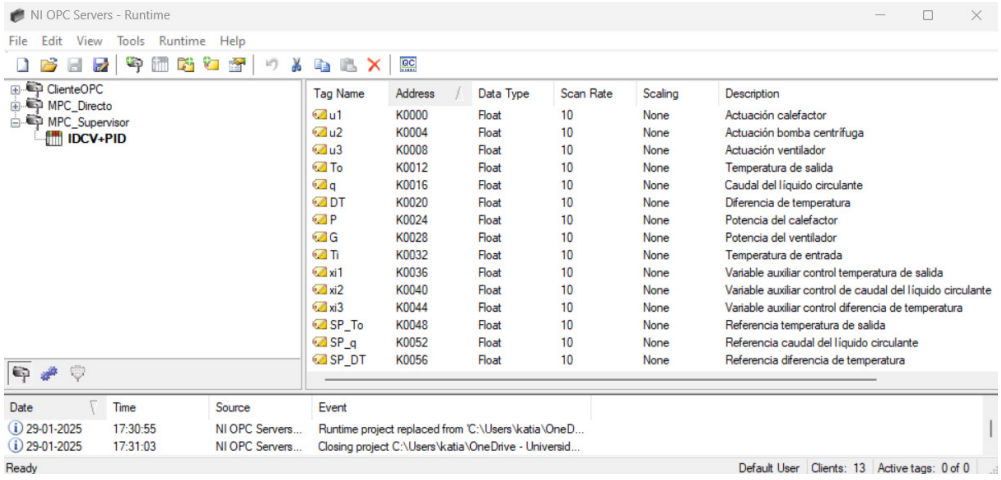
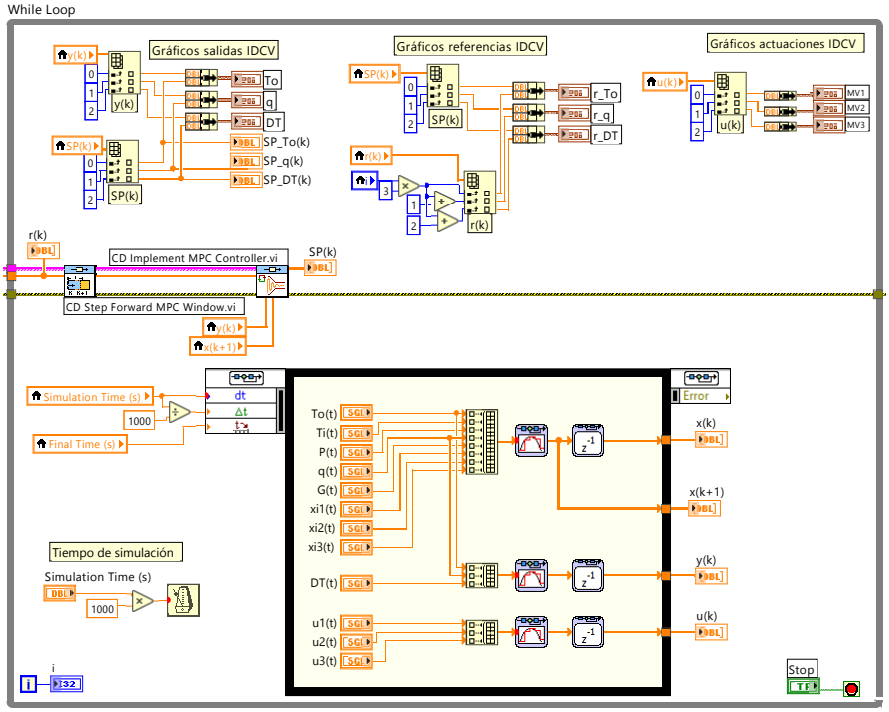
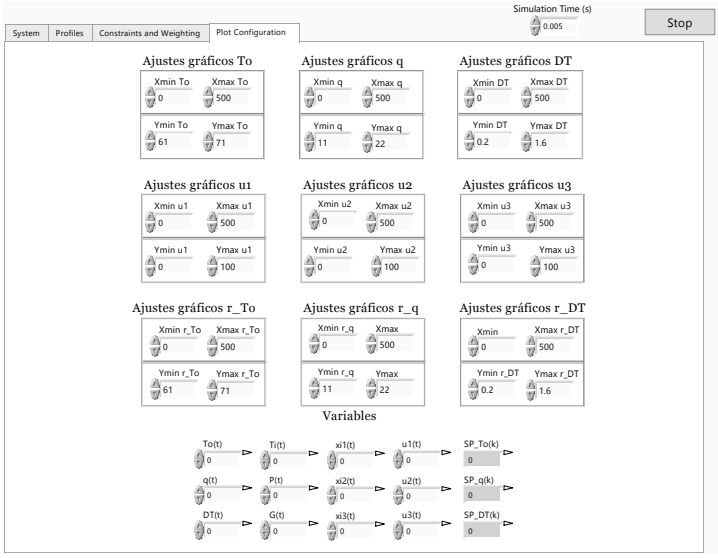


Figura 4.32: ClienteOPC

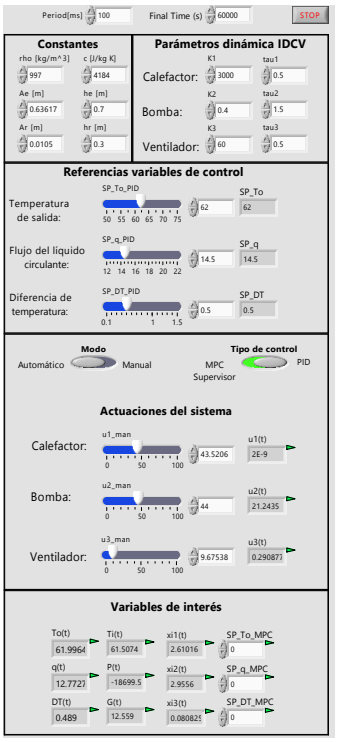
A continuación, para establecer una conexión remota exitosa, se reemplazan los nodos de variables compartidas por indicadores o controles, según corresponda. Estos elementos se enlazan con las variables compartidas modificando las propiedades de *Data Binding* siguiendo los pasos explicados en la sección 4.2.4.



(a) Control MPC diagrama de bloques



(b) IDCV panel frontal



(c) Control MPC panel frontal

Figura 4.33: Modificaciones para conexión remota MPC directo

En la figura 4.33 (a) se muestra una sección del diagrama de bloques del control MPC supervisor, donde se aprecia el cambio de los nodos por los indicadores y controles correspondientes.

Luego, en la figura 4.33 (b) se presenta la pestaña *Plot Configuration* del panel frontal, donde se evidencia que las señales están enlazadas a las variables del servidor mediante la pestaña *Data Binding*. Esto se confirma al observar los triángulos a la derecha de cada variable.

Finalmente, en la figura 4.33 (c) se observa una sección del panel frontal correspondiente a la simulación no lineal del sistema conjunto, donde también se han reemplazado los nodos correspondientes. Las variables se muestran en el recuadro inferior, donde el color verde confirma una correcta comunicación.

Una vez realizadas las modificaciones pertinentes, se ejecutan las simulaciones simultáneamente. En la figura 4.34, se muestran las gráficas obtenidas, donde a la izquierda se encuentra el computador BODE16 (PC1-DCS), mientras que a la derecha el Bode02 (PC2).

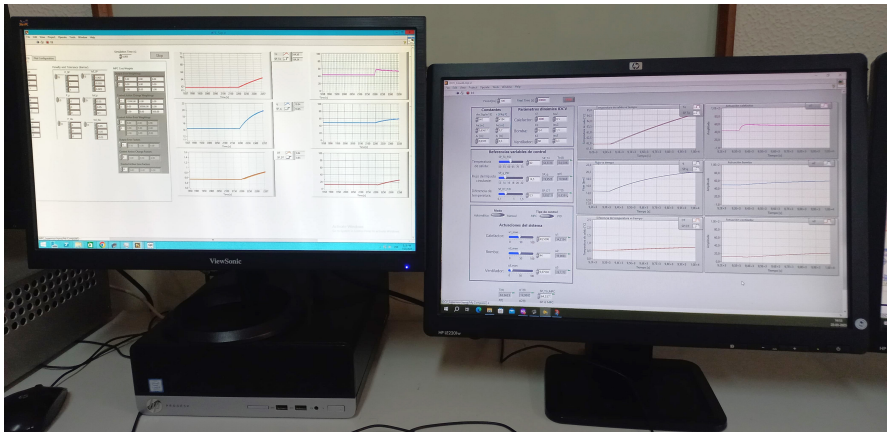


Figura 4.34: MPC Supervisor: Conexión remota vía OPC

Es posible apreciar que el comportamiento de las variables es similar al obtenido cuando las simulaciones se ejecutan en un solo computador. Sin embargo, en el PC1, lo gráficos solo permiten visualizar un ancho de 500 segundos, lo que limita la visualización completa de las respuestas.

Por otro lado, las gráficas del PC2 se ven ligeramente diferentes debido a la escala de tiempo utilizada. No obstante, al comparar las actuaciones, estas son más parecidas a las del PC1 debido a la escala de tiempo, lo que confirma que las respuestas son consistentes.

5 | Resultados y Conclusiones

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos durante el desarrollo de la memoria "Modelado, Simulación y Puesta en Marcha Virtual del Control MPC de un Intercambiador de Calor", se destacan los aportes realizados por este trabajo y se proponen posibles líneas de investigación para proyectos futuros.

5.1. Análisis de resultados

Se analiza la validez del modelo del intercambiador de calor virtual (IDCV), los resultados del control predictivo basado en modelos (MPC) tanto directo como supervisor, y la conexión remota realizada mediante el protocolo OPC.

5.1.1. Validación del modelo del intercambiador de calor virtual

El proceso de validación del IDCV se realizó estableciendo las ecuaciones dinámicas a partir del balance de masa en el estanque, el balance de energía en el estanque y radiador, y las respuestas de primer orden para la bomba centrífuga, el calefactor y el ventilador.

Al implementar estas ecuaciones en una simulación en LabVIEW, y debido a la falta de pruebas recientes en lazo abierto, se optó por incorporar los lazos de control PID locales del IDC real, basados en las ecuaciones de los controladores en TIA Portal, y compararlos con las respuestas en lazo cerrado.

Los resultados muestran que el modelo virtual replica con precisión la dinámica del sistema físico para las variables de interés: flujo del líquido circulante (q), temperatura de salida (T_o) y diferencia de temperatura (ΔT). La respuesta para el caudal del IDCV es casi idéntica respetando el retardo, el tiempo de asentamiento y el valor máximo del *overshoot*. Se captura adecuadamente la dinámica lenta de la temperatura de salida, tanto para el proceso de calentamiento como enfriamiento, dejando en evidencia los periodos de saturación del calefactor. La respuesta para la diferencia de temperatura es la que más difiere aparentemente, sin embargo, estas diferencias son principalmente producto la cuantización por resolución del conversor A/D, mientras que las constantes de tiempo son similares, lo que valida la dinámica del lazo.

Estos resultados confirman que el IDCV es una representación fiel del sistema físico, lo que permite su uso como una herramienta confiable para la simulación y diseño

de estrategias de control.

Una vez validado el modelo en lazo cerrado, se realizaron pruebas en lazo abierto, para observar cómo las entradas del sistema ($u_1(t)$, $u_2(t)$ y $u_3(t)$) influyen en las variables de salida ($q(t)$, $T_o(t)$ y ΔT). Los resultados mostraron que el flujo responde rápidamente a cambios en la actuación de la bomba, pero no se ve afectado por la actuación del calefactor o ventilador. La temperatura de salida tiene una dinámica lenta y responde principalmente a cambios en la actuación del calefactor, lo que refleja el tiempo necesario para calentar el agua en el estanque. Finalmente, la diferencia de temperatura es la variable más dinámica, ya que se ve afectada tanto por cambios en el caudal como en la temperatura de salida.

Estos comportamientos son consistentes con las ecuaciones del modelo y las limitaciones físicas del sistema.

5.1.2. Implementación del control predictivo basado en modelo (MPC)

El trabajo también sentó las bases para la implementación del control predictivo basado en modelo (MPC) en el IDCV. Se validaron dos estrategias: MPC directo y supervisor.

5.1.2.1. Criterios de diseño

La sintonización adecuada de los parámetros en controladores predictivos es fundamental para garantizar un desempeño óptimo del sistema en términos de estabilidad, robustez y eficiencia computacional. En el caso del control predictivo basado en modelo, los principales parámetros a configurar son:

- **Horizonte de predicción (N):** Representa el número de pasos futuros considerados por el controlador para predecir el comportamiento del sistema. Su selección se basa el la dinámica del sistema, donde para sistemas rápidos un valor de N menor es adecuado, mientras que para sistemas lentos se requieren horizontes más extensos. Además, otro aspecto fundamental es la estabilidad, ya que un N demasiado pequeño puede causar inestabilidad, mientras que uno excesivo incrementa la carga computacional sin mejorar significativamente el desempeño. Para el IDCV, cuya dinámica es lenta, se seleccionó $N = 20$ como equilibrio entre precisión y eficiencia.

- **Horizonte de control (N_u):** Corresponde al número de pasos futuros donde se calculan las acciones de control, con $N_u \leq N$. Su diseño también considera la carga computacional y la flexibilidad de control. En este caso se escogió $N_u = 10$.

- **Ponderación del error de predicción (Q):** Penaliza las desviaciones enetre la salida y la referencia. Su ajuste se realiazó mediante un análisis de compromiso, ya que valores altos de Q generan respuestas rápidas pero con posible *overshoot*;

valores bajos proporcionan estbailidad a costa de velocidad. En LabVIRE se iteró con distintos valores hasta imitar la dinámica del IDCV real.

- **Ponderación del esfuerzo de control (R):** Penaliza cambios bruscos en las señales de control. Su selección se basó en resultados experimentales, ya que al aumentar el valor de R la actuación se volvía más suave, con una respuesta más lenta. Mientras que con un R más pequeño el control es más agresivo. La relación entre Q y R determinó el *trade-off* entre velocidad de respuesta y suavidad de actuación.

5.1.2.2. Control MPC directo del IDCV

Se obtuvo el modelo lineal a partir de las ecuaciones dinámicas del IDC, ya que estas ecuaciones indican que el IDC es no lineal. Posteriormente, se estableció el modelo en variables de estado y se discretizó utilizando LabVIEW.

A partir de un ejemplo de control MPC directo para un sistema de primer orden, se extrapoló esta información para un sistema MIMO 3x3, estableciendo una estrategia que permite ir aumentando gradualmente la complejidad de la simulación:

- **Control MPC directo con modelo lineal:** Utilizando este modelo, se ajustaron los parámetros del controlador. Al reducir el tiempo de simulación fue posible acelerar el tiempo para ir sintonizando los parámetros hasta obtener las respuestas deseadas.

- **Control MPC directo con modelo no lineal:** Se conectó el control MPC directo con la simulación dinámica del IDCV mediante OPC en un solo computador. No fue necesario cambiar los parámetros del controlador, ya que se su comportamiento fue prácticamente idéntico al modelo lineal discreto, validando así este último.

  Los resultados mostraron un control satisfactorio, donde en el flujo se aprecia la acción del control predictivo, ya que el caudal comienza a aumentar antes de que la referencia cambie de valor. Para la temperatura de salida se establece un control más agresivo que el control PID, aunque es difícil evitar la saturación del actuador para referencias tipo escalón. Por otro lado, en el gráfico para la diferencia de temperatura se observa un buen seguimiento de la referencia, aunque que existe un error del $8\,\%$ en estado estacionario, posiblemente debido al modelo lineal implementado.

- **Control MPC remoto:** Al conectar dos computadores mediante OPC, se observó que las respuestas se mantuvieron en general, excepto por una ligera oscilación en el caudal, probablemente causada por una conexión inestable en ese momento.

El control MPC directo mejora ligeramente la respuesta del sistema, aunque la acción predictiva solo es notable en el caudal. Sin embargo, incluso una mejora pequeña

puede optimizar significativamente el rendimiento de un sistema y aumentar la producción, eficiencia, ingresos, etc.

5.1.2.3. Control MPC supervisor del IDCV

El control MPC supervisor en cascada se implementó a partir del modelo discreto del IDCV junto con los lazos PID. Al modelo linealizado del IDCV se le agregaron las tres variables auxiliares de los controladores para poder obtener un modelo en variables de estado ampliado para luego discretizarlas en conjunto.

Basándose en la configuración del MPC directo, se extiende para el modelo ampliado encontrado. Los resultados muestran un control predictivo supervisor satisfactorio, donde el comportamiento del flujo es similar a control MPC supervisor del IDC real en cuanto a tiempos de asentamiento. Sin embargo, al inicio se observa una disminución del caudal en la respuesta, posiblemente debido a un cero de fase no mínima en el sistema, no considerado en las ecuaciones del sistema, o al algoritmo de control RMPCT de Honeywell, que podría reducir el caudal para aumentar rápidamente la temperatura de salida. Para el gráfico de temperatura de salida, la dinámica es bastante similar, con excepción a una dinámica adicional cerca de los 500 segundos, que podría ser debido a aspectos de la dinámica que no se consideraron al momento de plantear las ecuaciones. Además, ignorando el ruido presente en la diferencia de temperatura del IDC real, el tiempo de asentamiento es bastante similar.

Al conectar las simulaciones mediante OPC en dos computadores distintos, se observó que la dinámica se mantuvo, aunque no fue posible presentar la respuesta completa debido a restricciones de tiempo en los gráficos de LabVIEW.

El control MPC supervisor en cascada es una alternativa más adecuada para este sistema, ya que al controlar las referencias de los lazos de control PID, las actuaciones son mucho más suaves y no llegan a saturarse, lo que representa una gran ventaja respecto a los resultados obtenidos con el control MPC directo.

5.2. Aportes

El mayor aporte de este trabajo es el desarrollo del modelo no lineal del intercambiador de calor virtual, que permite realizar pruebas y diseñar estrategias de control sin riesgo de dañar el sistema físico. Además:

- Se obtuvo el modelo linealizado del IDCV en variables de estado, y la representación en variables de estado del modelo linealizado en conjunto con la estrategia ARC, necesarios para el diseño del controlador MPC directo y supervisor, respectivamente.
- Se logró acortar los tiempos de espera para obtener resultados, ya que la simulación de lazo abierto y lazo cerrado del IDCV pueden acelerarse según sea necesario. También es posible acelerar la simulación para el control MPC directo o supervisor con modelo lineal.

- Se estableció una conexión efectiva entre el IDCV y el control predictivo, tanto directo como supervisor, sentando las bases para futuras implementaciones en el sistema físico.
- El IDCV no solo replica fielmente la dinámica del sistema, sino que también proporciona una plataforma segura y eficiente para el diseño y prueba de estrategias de control avanzadas, como el MPC. Esto reduce la dependencia de experimentación con el sistema físico, siendo una alternativa más amigable.

5.3. Trabajo futuro

Este trabajo sienta las bases para varias líneas de investigación futura, las cuales podrían ampliar y mejorar los resultados obtenidos. A continuación, se detallan algunas opciones:

1. **Control MPC supervisor en LabVIEW con el IDC real:** El objetivo es validar el control MPC supervisor en el IDC real, comparando los resultados obtenidos en este trabajo y en la memoria de Victor Vicencio. Esto permitiría validar la efectividad del control MPC supervisor en LabVIEW y comparar su rendimiento con el RMPCT de Honeywell, identificando las ventajas y desventajas de cada plataforma.
2. **Control RMPCT de un intercambiador de calor virtual:** Contrario a la primera opción, el objetivo es implementar el control MPC supervisor en Profit Suite y conectarlo con el IDCV, comparando los resultados con esta memoria y el IDC real. Siguiendo la memoria de Victor Vicencio, se podría realizar adicionalmente la identificación del IDCV y compararlo con la identificación del IDCV real.
3. **Implementación de otras estrategias de control:** Tiene como objetivo hacer uso del IDCV para implementar otras estrategias de control como control difuso, adaptativo, robusto, etc. O bien, combinar más de una estrategia con el fin de mejorar el rendimiento del sistema.

Las líneas de trabajo propuestas permitirían ampliar y profundizar los resultados obtenidos en esta memoria. Además, gracias al IDCV, eventualmente se podría elaborar una experiencia de laboratorio para explorar otras alternativas de control.

Bibliografía

[1] R. Vergara, *Control Supervisor Difuso de un Intercambiador de Calor*. Memoria de titulación, UTFSM, Departamento de Electrónica, Valparaíso, Chile, 2018.

[2] V. Vicencio, *Aplicación de MPC Supervisor a un Intercambiador de Calor*. Memoria de titulación, UTFSM, Departamento de Electrónica, Valparaíso, Chile, 2019.

[3] L. Balbis, R. Katebi y A. Ordys, "Model Predictive Control Design for Industrial Applications," University of Strathclyde, UK, ene. de 2006.

[4] E. Camacho y C. Bordons, "Control Predictivo: Pasado, Presente y Futuro," *Revista iberoamericana de automatica e informatica industrial (RIAI), ISSN 1697-7912, Vol. 1, Nº. 3, 2004*, vol. 1, oct. de 2010. DOI: 10.4995/riai.v1i3.10587.

[5] national instruments, *Predictive Control VIs*, Available at National Instruments: Predictive Control VIs.

[6] Cameron, "NUFLO Liquid Turbine Flow Meters," datasheet, 2013.

[7] philips semiconductors integrated circuits, "General-purpose triggering circuit," datasheet, sep. de 1990.

[8] Siemens, *S7-1200, S7-1500 Regulación PID manual de funciones*, 2014.

[9] H.-P. Halvorsen, *Model Predictive Control*, Available at Halvorsen Blog: Model Predictive Control.

[10] Logitek, *Guía de comunicación remota por OPC DA con KEPServerEX*, 2018.

[11] S. Toolbox, *DCOM for Windows 7,10, & Server 2008R2 and Newer*, Available at Software Toolbox: DCOM for Windows 7,10, Server 2008R2 and Newer.

A | Detalles sobre el intercambiador de calor físico

Se indican los detalles más finos respecto al intercambiador de calor físico, mencionando las configuraciones que se encuentran implementadas junto a sus respectivos diagramas. Para mayor información, revisar la memoria de Richard Vergara [1].

A.1. Diagrama detallado de cada subsistema

De forma general, el sistema intercambiador de calor se puede dividir en dos subsistemas.

A.1.1. Calefactor y circuito de control de potencia

El primer subsistema se compone del circuito de potencia conectado al calefactor, la medición de temperatura de entrada y temperatura de salida del estanque. El diagrama detallado se muestra en la figura A.1.

En el estanque hay tres termo-resistencias conectadas en estrella. Debido a que calentar un gran volumen de agua requiere de altas corrientes, cada resistencia va conectada a un TRIAC. Estos semiconductores son bastante delicados, ya que requieren de un tiempo mínimo para conducir la corriente de manera uniforme y para evitar el ruido, razón por la que se utilizan *redes snubber*. Estas redes tienen como función ajustar las transiciones y así evitar el daño de los semiconductores. Adicionalmente, cuentan con un circuito de aislación con opto-acopladores para compensar el hecho de que en los terminales de los TRIACS circula una corriente AC y en el textitgate circulan bajos pulsos de corriente.

La siguiente etapa se encarga de la generación de pulsos de disparo, los cuales son realizados a partir del circuito integrado TCA280B. Dada la configuración implementada, se pueden obtener ángulos de disparo en el rango 0 a 180° para voltajes de $1{,}5$ a $5{,}8$V.

Producto estas condiciones, se necesita un circuito de acondicionamiento, pues el PLC entrega voltajes de 0 a 10V. Es posible notar la existencia de un selector, que permite elegir entre el voltaje entregado por el PLC o bien, un voltaje manual operado

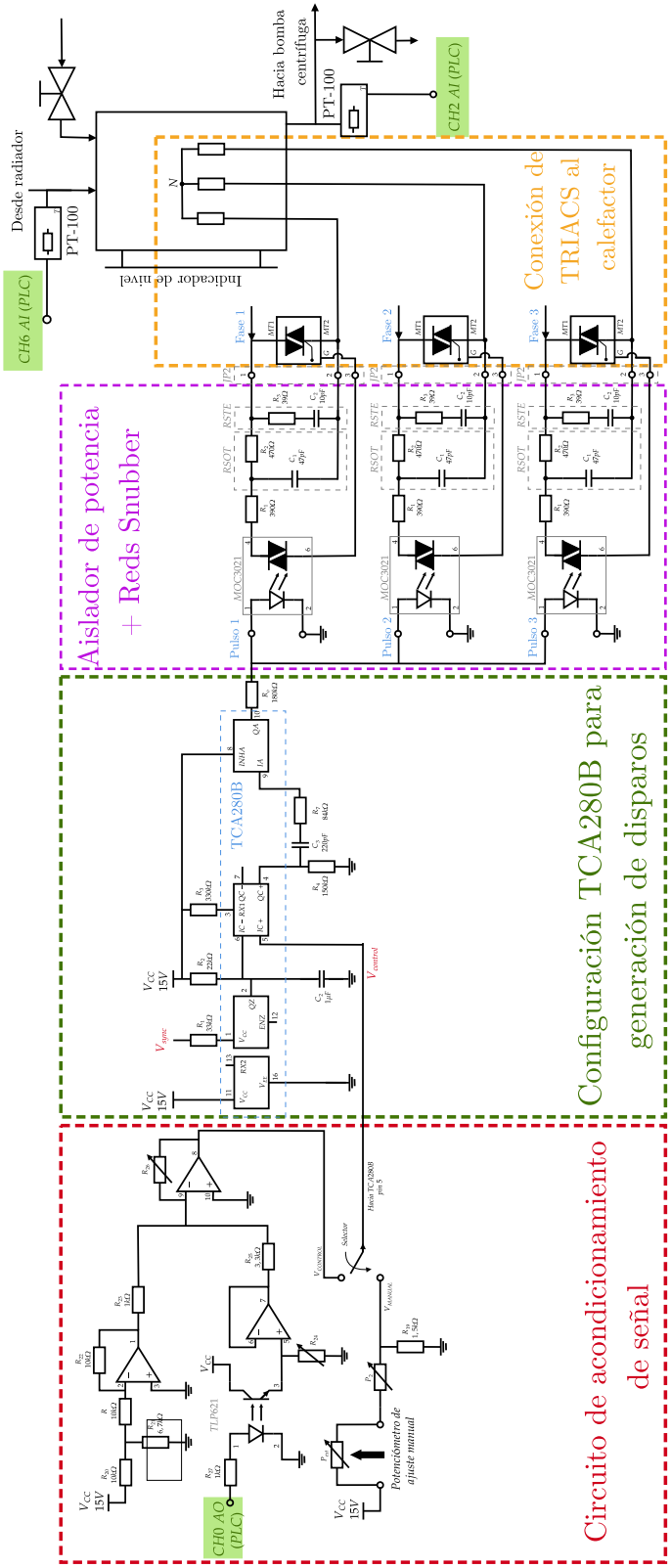


Figura A.1: Diagrama detallado subsistema calefactor y circuito de potencia

por un potenciómetro ubicado en el panel frontal. El circuito está diseñado para seguir la ecuación (A.1).

$$V_{control} = -0{,}43V_{PLC} + 5{,}8 \tag{A.1}$$

Adicionalmente, se destaca en verde tanto las entradas (temperatura de entrada y salida del estanque) como las salidas del PLC (voltaje hacia el calefactor).

A.1.2. Bomba centrífuga y ventilador

Este subsistema contiene las conexiones de los motores de la bomba centrífuga y el ventilador. Se incorpora además, el circuito relacionado a la medición de flujo. Lo anterior se puede apreciar en la figura A.2.

El motor del ventilador posee una conexión tipo estrella a la red, mientras que el motor de la bomba centrífuga se encuentra conectado en delta. La diferencia de conexión se debe a una decisión de diseño debido a un ruido molesto al oído humano persistente en el motor de la bomba centrífuga cuando se conecta en delta. Sin embargo, este cambio no mejora el ruido, sino que la solución se encuentra cambiando el parámetro "consigna de frecuencia de pulsación".

Por otra parte, el sensor de flujo consiste en una turbina ferromagnética, una bobina y un imán permanente, donde el paso de agua genera una señal sinusoidal de amplitud y frecuencia variable siguiendo la ecuación (A.2).

$$v(t) = K_2 \cdot qsin(K_1 \cdot q \cdot t) \tag{A.2}$$

Este sensor otorga una señal que no es compatible en forma directa con algún módulo del PLC, lo cual implica la necesidad de adaptarla mediante el uso de una tarjeta acondicionadora.

Primero se realiza una conversión de frecuencia a voltaje a través del circuito integrado LM2907N, el cual permite convertir de manera lineal las variaciones de frecuencia. Para más información sobre cómo funciona este circuito integrado en su interior y las conexiones realizadas a este, se recomienda revisar la referencia [1] o bien, el respectivo datasheet.

Luego, se realiza una etapa de acondicionamiento de voltaje, que se encarga de adaptar la amplitud de la señal entre 0 y 10V mediante el uso de dos potenciómetros. Cabe destacar que el diseño de todas los componentes se encuentra detallado también en la memoria de Richard Vergara.

De la misma forma que en el subsistema anterior, en la figura A.2 se destacan en verde las entradas al PLC (medición de flujo) y las salidas del PLC (Conexión a bomba centrífuga y ventilador mediante variadores de frecuencia).

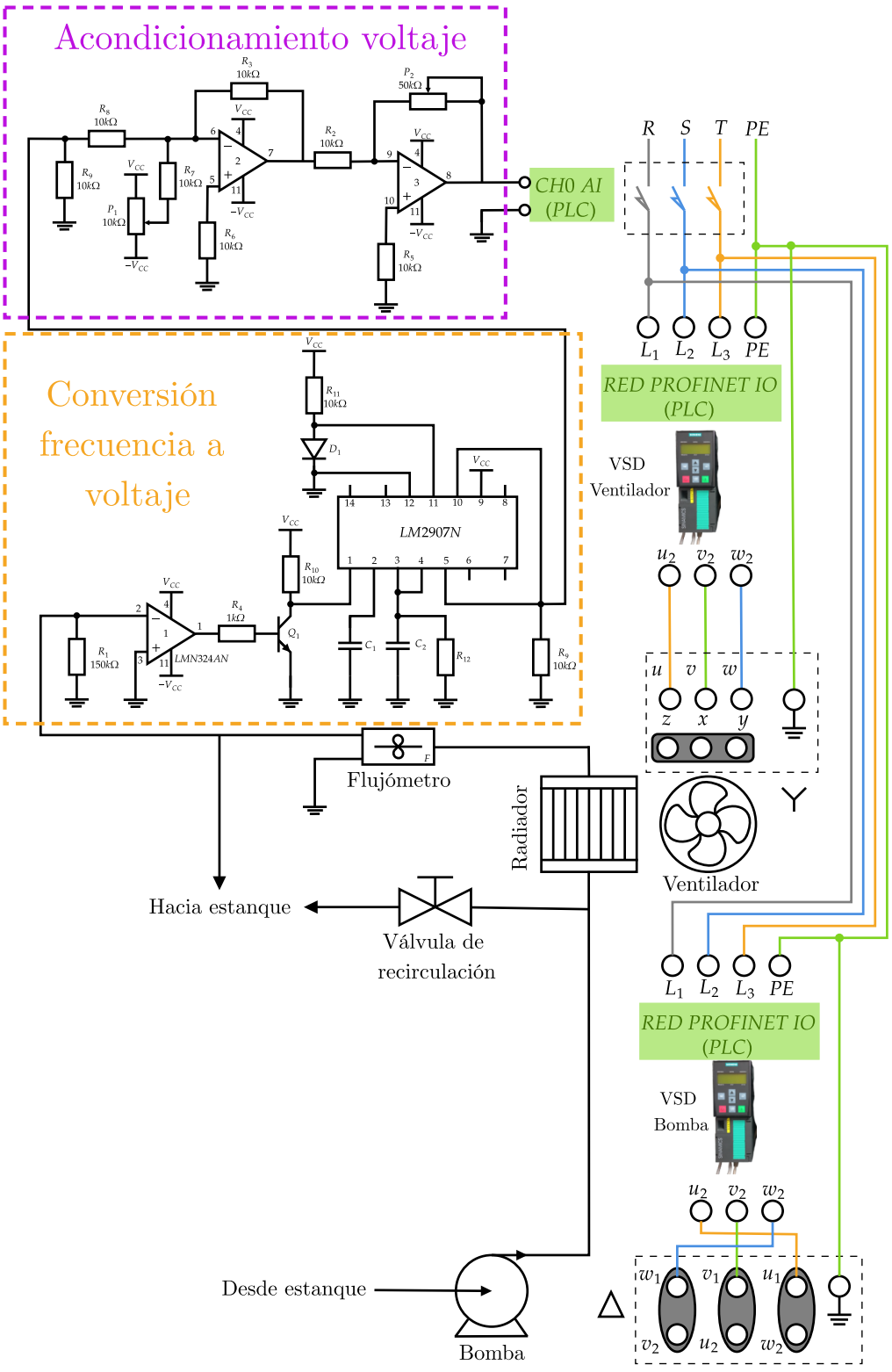


Figura A.2: Diagrama detallado subsistema bomba y ventilador

A.2. Diagrama general del sistema completo

Una vez explicado el funcionamiento a detalle de cada subsistema, se presenta un diagrama general de las conexiones y componentes del intercambiador de calor físico en la figura A.3.

Se destaca en verde las entradas al PLC (salidas del IDC) y en naranja las salidas del PLC (entradas al IDC).

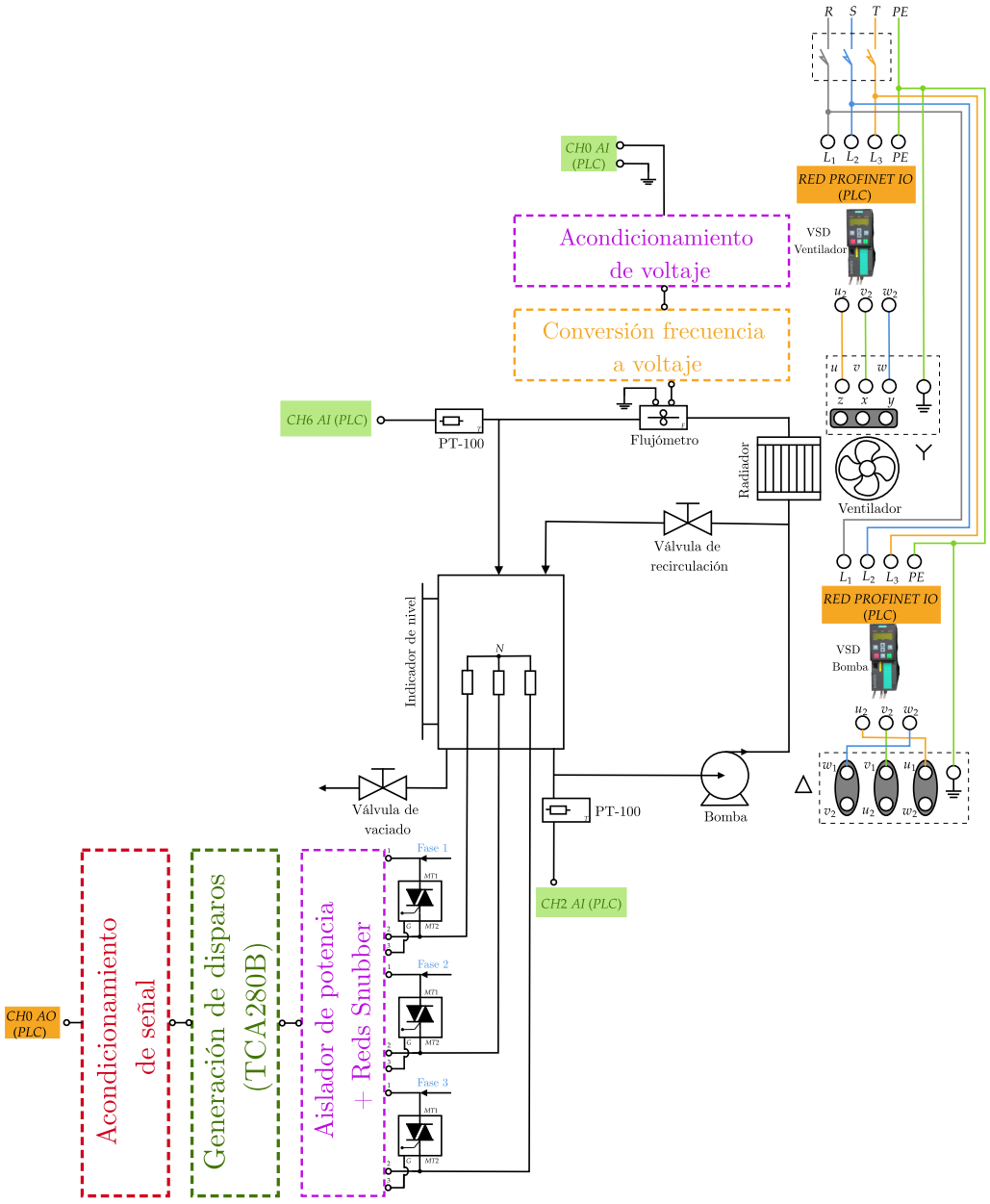


Figura A.3: Diagrama general del IDC

B | Configuraciones para comunicación entre computadores

Para permitir la comunicación remota entre dos computadores cualquiera es necesario cumplir con una serie de requisitos en ambos computadores según las referencias [10] y [11].

- Crear usuarios y grupos de usuarios que sean exclusivos para la comunicación vía OPC.
- Ambos computadores deben estar conectados a la misma red vía Ethernet, pertenecer al mismo grupo de trabajo y reconocerse mediante el comando *ping*.
- Verificar la configuración del *Server Runtime*.
- Realizar la configuración del DCOM.
- Desactivar el *Firewall* de Windows.

B.1. Creación del usuario

Es importante tener en consideración que para ambos computadores se debe crear un usuario con el mismo nombre y contraseña. Además dicho usuario debe tener permisos de administración.

Para agregar un usuario se debe acceder al panel de control y seguir la ruta *System and security*>*Administrative tools*. Luego hacer doble clic sobre *Computer management* tal como se ve en la figura B.1.

Esto abrirá una nueva ventana, en la cual se busca la opción *Local Users and Groups* y seguidamente *User* (ver figura B.2). En esta se ven los usuarios que posee el computador.

Para agregar un nuevo usuario basta con hacer clic derecho dentro de la ventana y presionar *New User*, lo cual abre la ventana de la figura B.3. Se debe escoger un nombre y una contraseña, donde ambas características deben ser igual para los dos computadores. Adicionalmente se marca la casilla *Password never expires*.

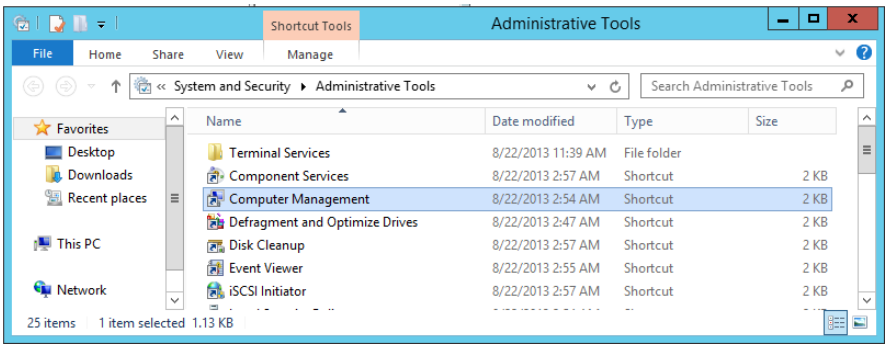


Figura B.1: Administración de equipos

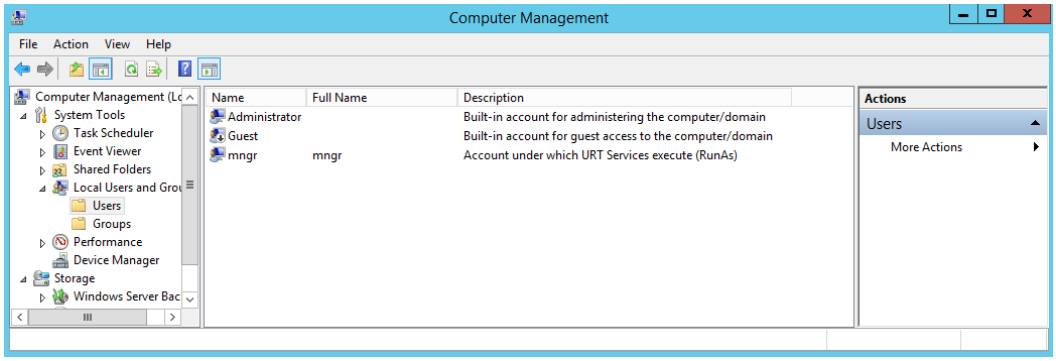


Figura B.2: Usuarios locales

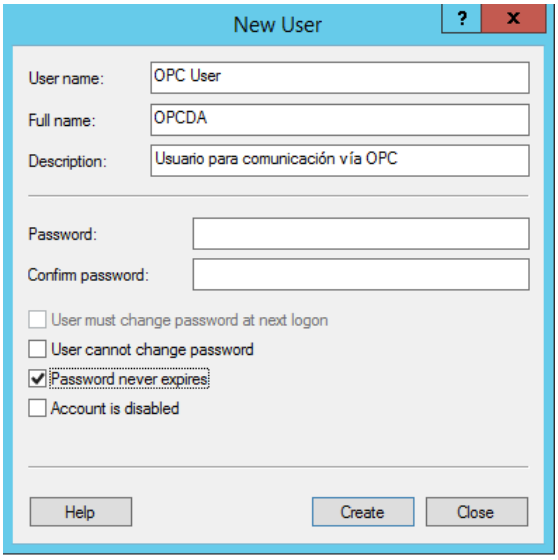


Figura B.3: Creación del nuevo usuario

Finalmente se deben garantizar permisos de administración para el nuevo usuario, es por ello que se accede a la opción de *Groups*, se busca el grupo *Administrators* y se añade a la lista OPC User tal como se ve en la figura B.4.

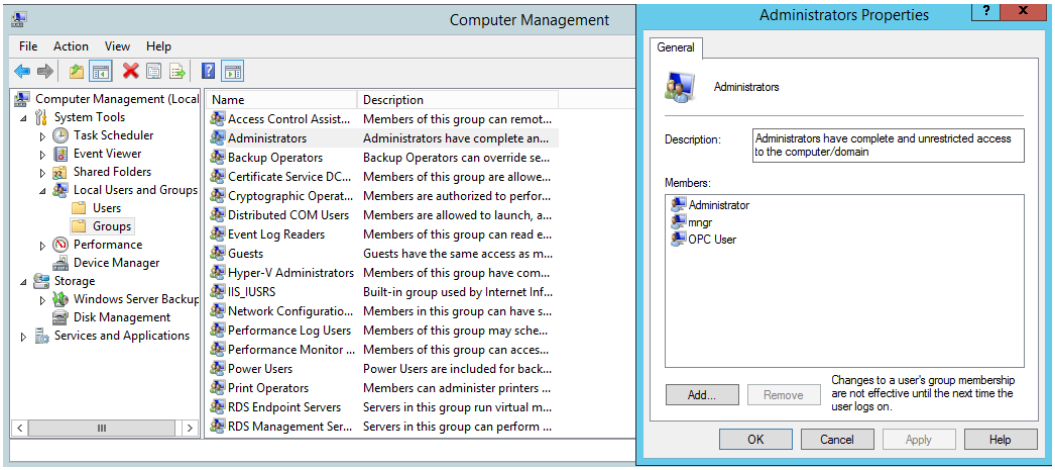
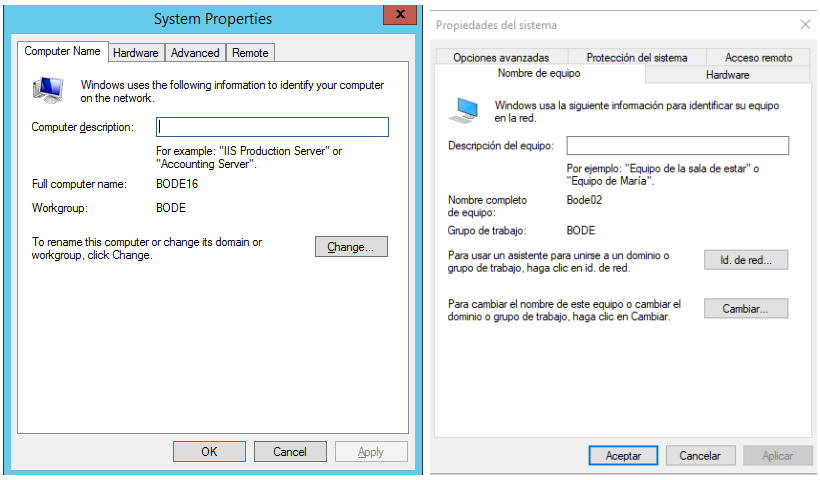


Figura B.4: Permisos de administración

B.2. Reconocimiento entre los computadores

Como ya se mencionó anteriormente, ambos computadores deben estar conectados a la misma red vía Ethernet. En adición a esto deben pertener al mismo grupo de trabajo, por lo que para verificar esto en el panel de control se debe ir a sistema y corroborar la información del equipo.

Para el caso específico de esta memoria, el computador destinado al control MPC se llama BODE16, mientras que el computador para la simulación dinámica Bode02, donde ambos pertenecen al grupo de trabajo BODE, tal como se aprecia en la figura B.5.



(a) BODE16 (b) Bode02

Figura B.5: Verificación grupo de trabajo

En caso de que no estén en el mismo grupo de trabajo, basta con seleccionar la opción *Change...* y usar el mismo nombre para ambos computadores.

El siguiente paso es verificar que los ordenadores se reconocen mutuamente, para ello se usa la combinación tecla de Windows + R y en la ventana emergente se escribe **cmd** (ver figura B.6).

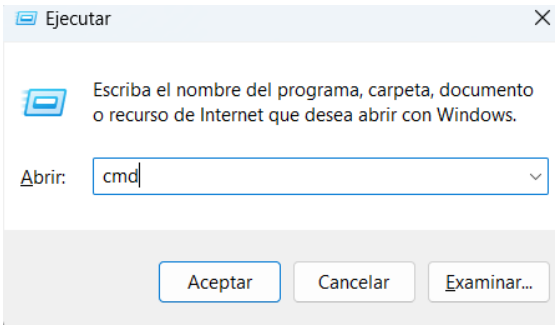


Figura B.6: Búsqueda de la ventana de comandos

Esto abre la ventana de comandos de Windows, en la cual se escribe la instrucción **ipconfig** para obtener la IP de cada computador. A continuación se escribe el comando **ping <IP del otro computador>**, tal como se ve en las figuras B.7 y B.8.

Es importante verificar que no haya paquetes perdidos, de lo contrario significa que los computadores no están conectados a la misma red o bien, hay algo que no esté correctamente conectado físicamente.

Que ambos computadores puedan reconocerse mediante este medio no es una garantía por si sola para que luego la comunicación vía OPC funcione, por lo que es importante realizar las otras configuraciones que son mencionadas más adelante.

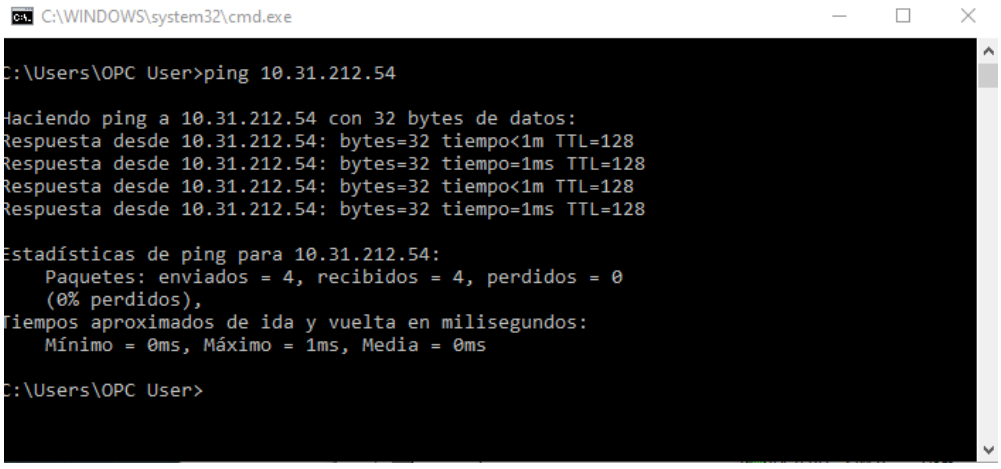


Figura B.7: Ping desde el PC Bode02

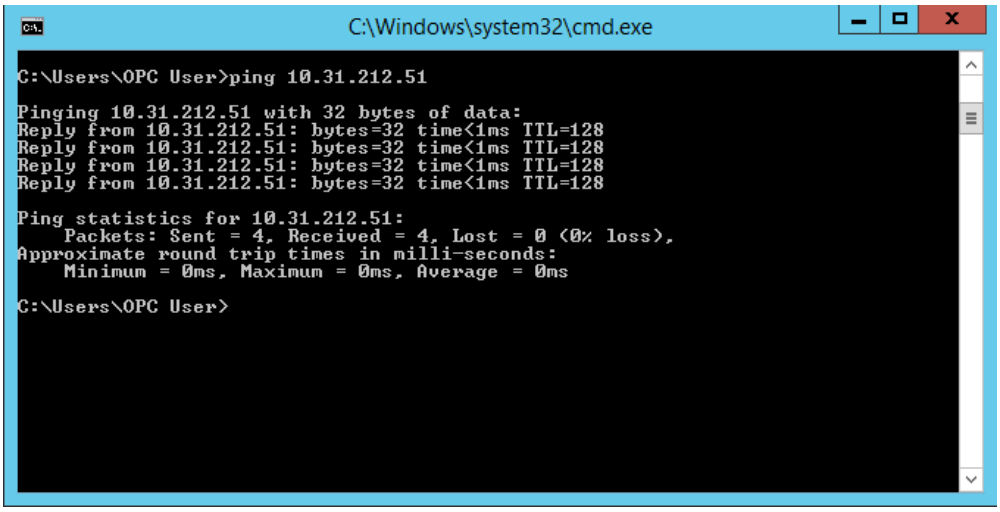


Figura B.8: Ping desde el PC BODE16

B.3. Configuración del Server Runtime

El modo de proceso del *Runtime* de NI OPC Servers debe ser elegido antes de realizar la configuración del DCOM. Primero se debe hacer clic derecho sobre el icono de NI OPC Servers y presionar la opción *Settings*. Esto abre una ventana con diversas pestañas, por lo que se accede a *Runtime Options* y se habilita la casilla *Use DCOM configuration utility settings* tal como se ve en la figura B.9.

Esto es realizado con el fin de proveer el máximo nivel de seguridad. Por defecto esta opción debería estar habilitada, pero en caso de no estarlo debe cambiarse.

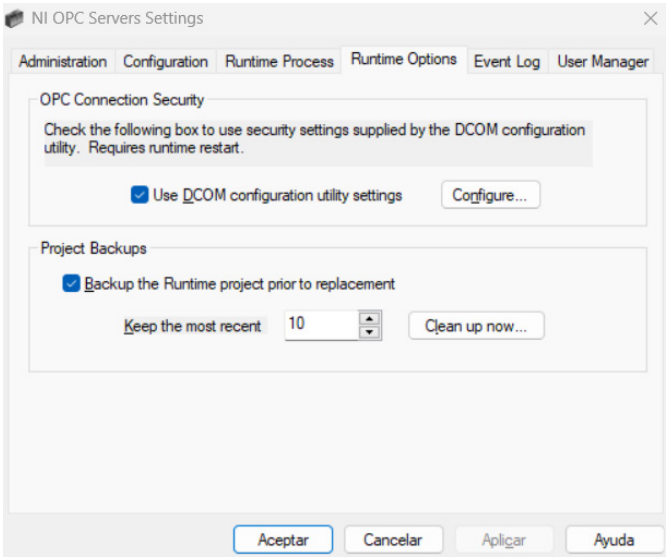


Figura B.9: Opciones del Runtime

El *Runtime* del servidor puede funcionar como servicio o interactivo. Sin embargo, cuando se desea establecer una conexión remota OPC, el modo *System Service* produce resultados más predecibles, puesto que será iniciado cuando el sistema inicie sin necesidad de una intervención por parte del usuario.

Para configurar esta opción, dentro de la misma ventana abierta con anterioridas, se debe acceder a la pestaña *Runtime Process* y en la opción *Process Mode* se debe seleccionar **System service**, como se aprecia en la figura B.10.

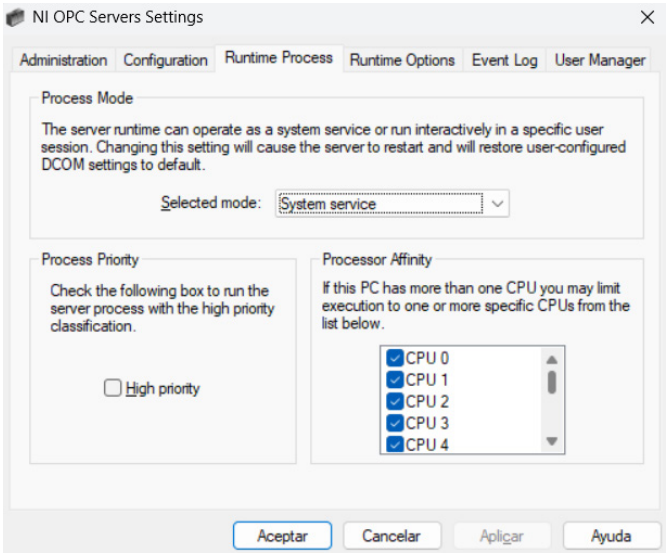


Figura B.10: Proceso del Runtime

B.4. Configuración del DCOM

Una vez realizadas las secciones anteriores recién se puede proceder a establecer las configuraciones del DCOM. A rasgos generales se deben seguir cinco pasos:

- Abrir la ventana de servicios de componentes
- Configuraciones generales
- Configuraciones del servidor OPC
- Configuraciones del OPCEnum
- Configuración de las políticas de seguridad local

Lo primero consiste en acceder a la ventana de servicios de componentes, para ello la forma más rápida consiste en usar la combinación tecla de Windows + R y escribir **dcomcnfg** (ver figura B.11).

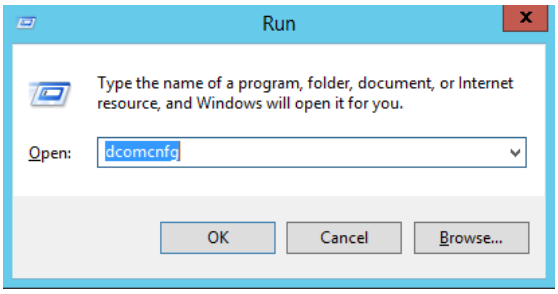


Figura B.11: Búsqueda de los servicios de componente

B.4.1. Configuraciones generales

Lo anterior abre la ventana de la figura B.12, donde se accede a equipos. Se debe realizar clic derecho sobre el icono y presionar sobre propiedades.

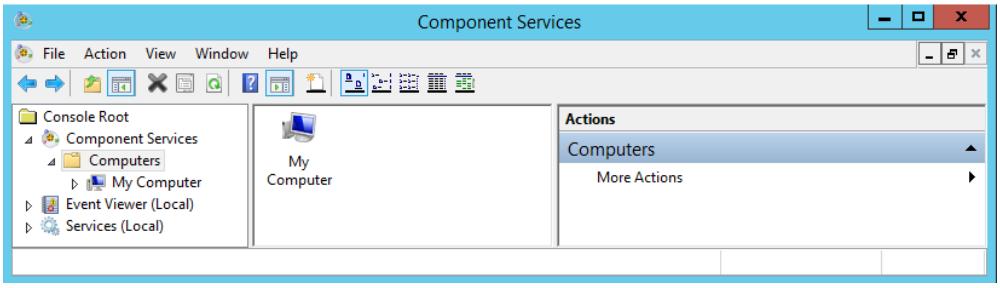
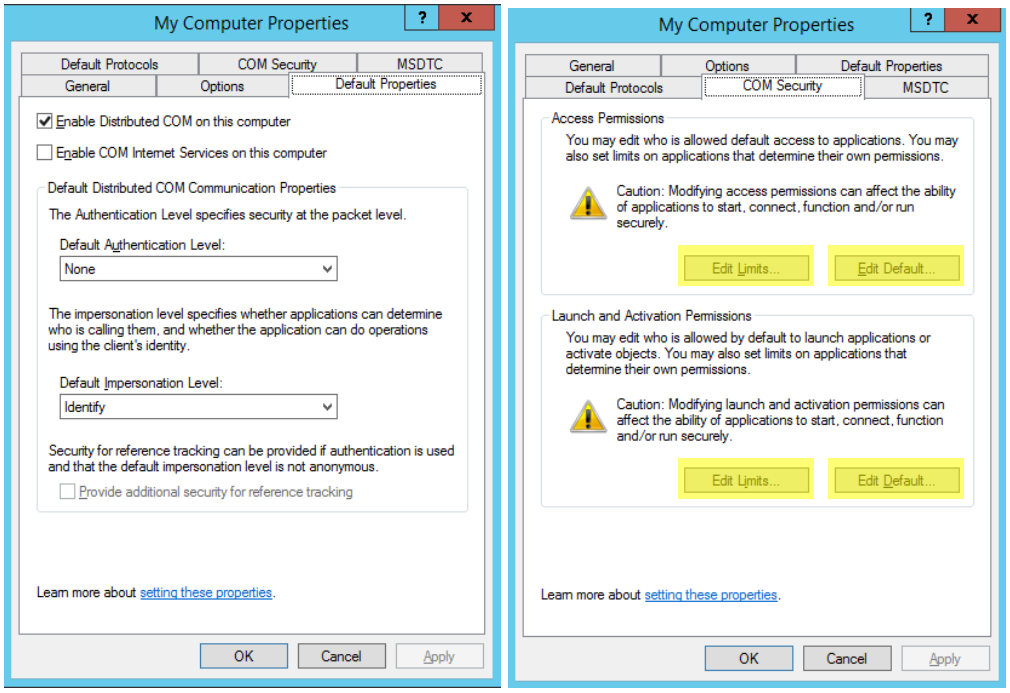


Figura B.12: ventana servicios de componente

Dentro de la ventana emergente ir a la pestaña *Default Properties* y dejar las configuraciones que se ven en la figura B.13 (a), es decir, habilitar el DCOM, definir el nivel de autenticación en ninguno y el nivel suplantación en identificar.

A continuación pasar a la pestaña *COM Security*, donde todos los botones resaltados en la figura B.13 (b) deben ser modificados. Al presionar cualquiera de ellos se debe garantizar el acceso de las siguientes cuentas:

- Anonymous
- Everyone
- Guests
- Interactive
- Network
- System
- El usuario creado



(a) Propiedades por defecto (b) Seguridad COM

Figura B.13: Configuraciones generales

A los usuarios ya mencionados se les debe habilitar tanto el acceso local como el acceso remoto, lo cual se puede observar en la figura B.14.

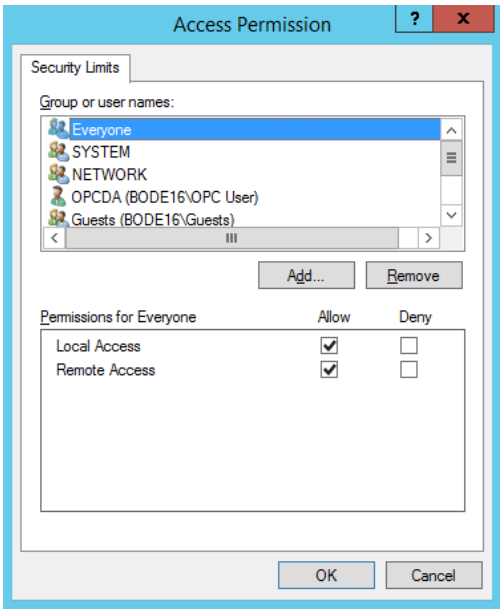


Figura B.14: Permisos de acceso

B.4.2. Configuraciones del servidor OPC

Con el fin de realizar las configuaciones del DCOM asociadas al servidor OPC, se debe realizar doble clic sobre *My Computer* en la ventana de la figura B.12 y posteriormente sobre *DCOM Config*.

De esta manera aparecerán varios elementos como los mostrados en la figura B.15, donde se deberá buscar el servidor OPC correspondiente, en este caso NI OPC Servers 2016.

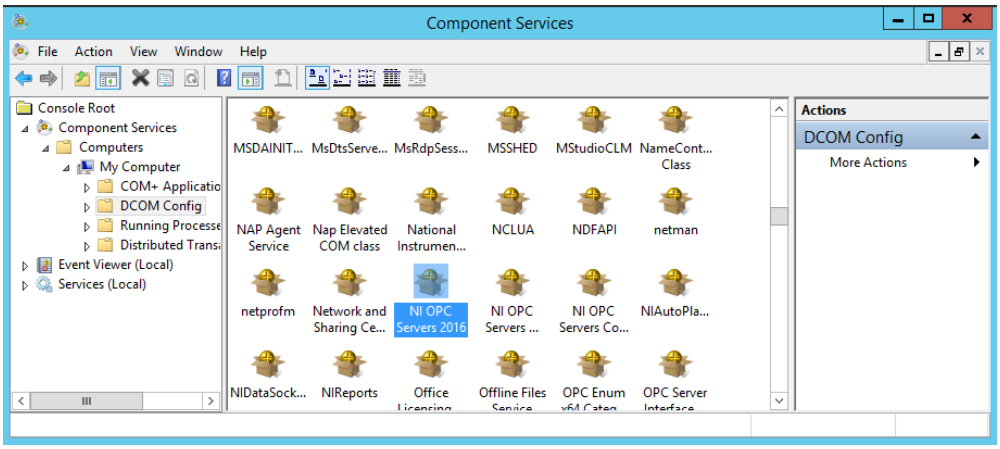


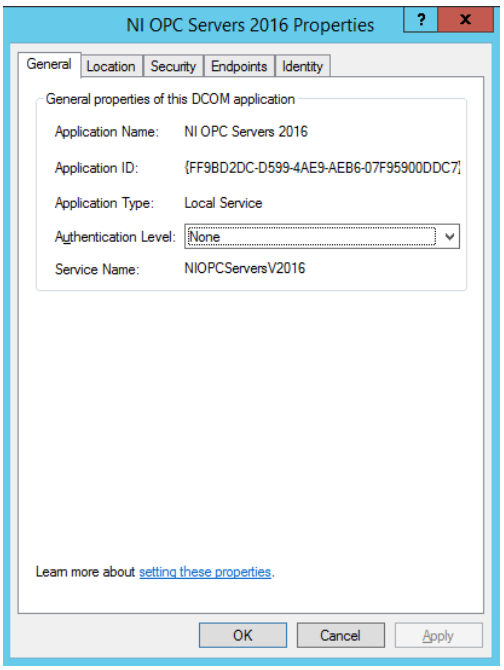
Figura B.15: Configuración DCOM NI OPC Servers

Al hacer clic derecho sobre este elemento se debe ir a propiedades, donde aparecerá una ventana emergente. En la pestaña general (figura B.16 (a)) el nivel de autenticación se debe seleccionar en ninguno.

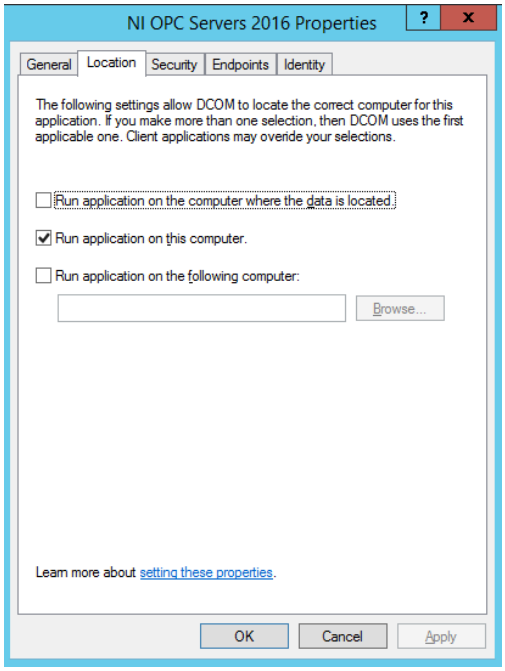
A continuación en la pestaña de ubicación (figura B.16 (b)) se debe habilitar la casilla *Run application on this computer*.

Finalmente en la pestaña de seguridad (figura B.16 (c)) las primeras dos opciones se establecen como *Use Default*, mientras que en la configuración de los permisos se selecciona como *Customize*. Al seleccionarlo se habilitará el botón para editar, donde se habilita control total y lectura para las siguientes cuentas:

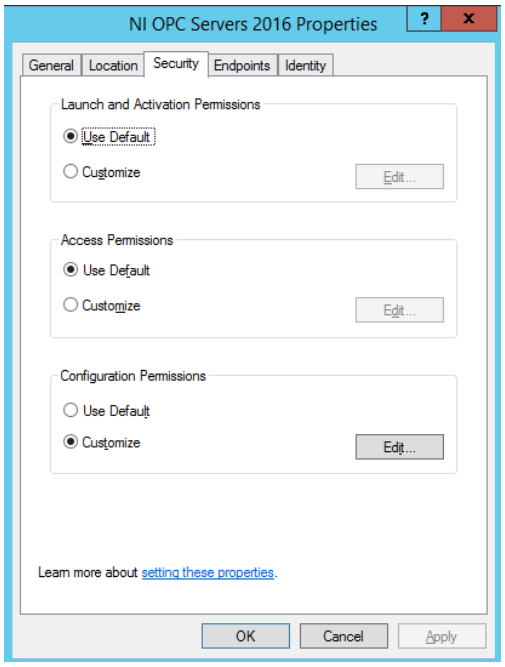
- Anonymous
- Everyone
- Guests
- Interactive
- Network
- System
- El usuario creado



(a) General



(b) Ubicación



(c) Seguridad

Figura B.16: Propiedades de NI OPC Servers 2016

B.4.3. Configuraciones del OPCEnum

Dentro de la ventana de configuración DCOM esta vez se debe buscar el elemento OPCEnum, como se ve en la figura B.17, hacer clic derecho sobre él e ir a propiedades.

Se deben seguir los mismos pasos que para el NI OPC Servers 2016.

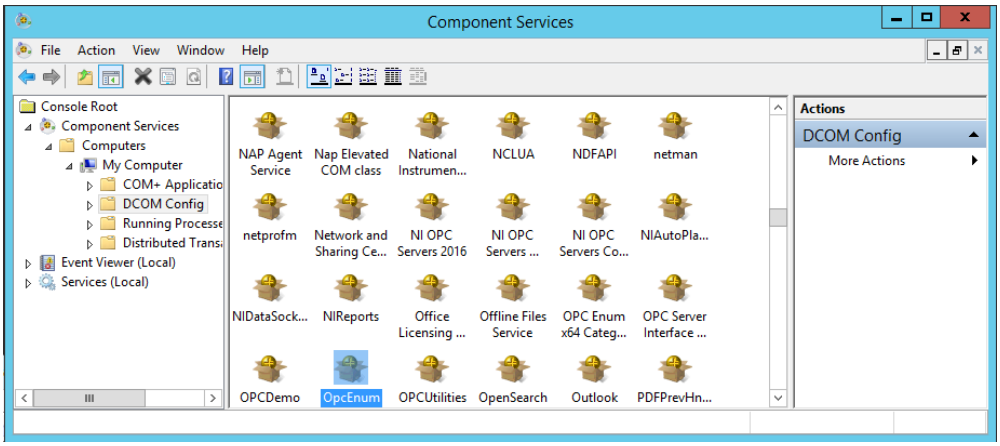


Figura B.17: Configuración DCOM OPCEnum

B.4.4. Configuración de las políticas de seguridad local

Para acceder a las políticas de seguridad local se debe seguir la ruta *Control Panel >System and Security >Administrative Tools >Local Security Policy* (figura B.18) y expandir esta última para encontrar las opciones de seguridad.

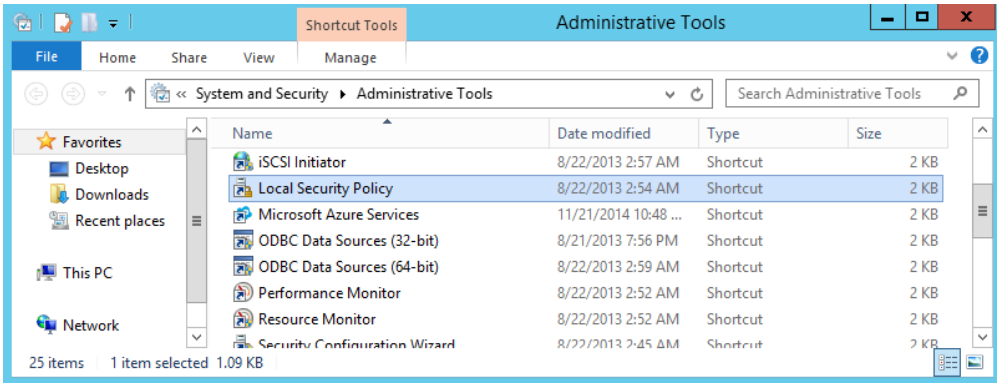


Figura B.18: Políticas DCOM

Dentro de las políticas se debe buscar las dos resaltadas en la figura B.19, donde ambas deberían estar establecidas como **Not Defined**.

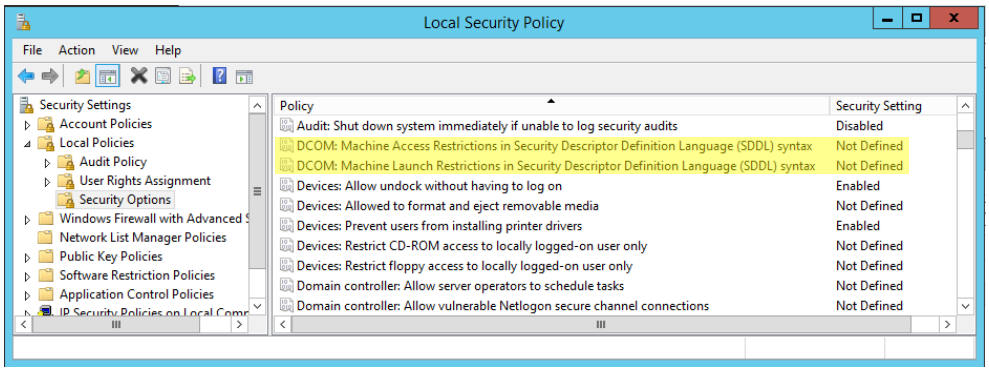


Figura B.19: Políticas DCOM

A continuación se debe ubicar la opción de la figura B.20, la cual debiese estar habilitada, de lo contrario se hace clic derecho y se habilita manualmente.

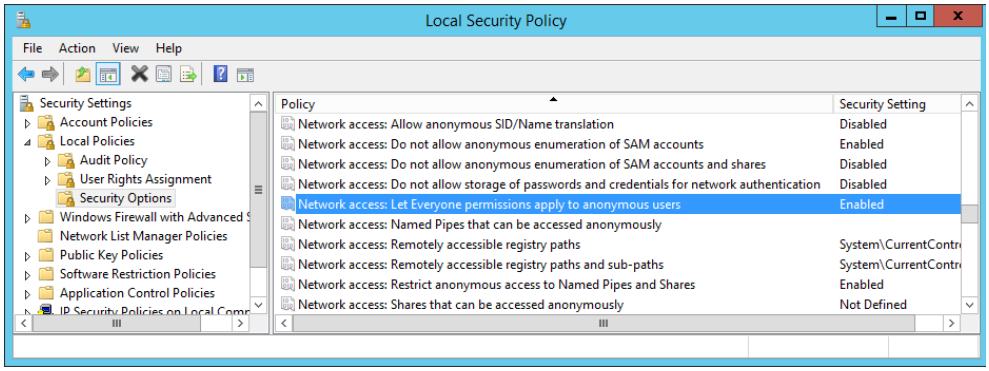


Figura B.20: Accso a la red: permiso para usuarios anónimos

Finalmente se debe localizar la opción de la figura B.21, la cual por defecto se encuentra en clásico. Sin embargo, hay que verificar que esta opción no se encuentre en *Guest Only* ya que puede prevenir las conexiones OPC.

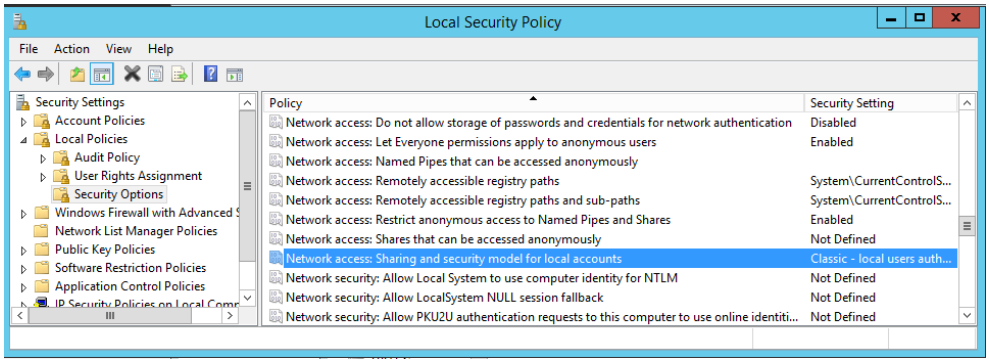


Figura B.21: Accso a la red: modelo de compartir y seguridad

B.5. Desactivación del Firewall de Windows

Con el fin de garantizar la comunicación entre ambos computadores es recomendable desactivar completamente el firewall de Windows y cualquier tipo de antivirus tanto en el ordenador que actúa como servidor como en el del cliente.

Para acceder a esta función se debe acceder al panel de control e ir a sistema y seguridad, donde se encontrará el Firewall de Windows que se ve en la figura B.22. Basta con seleccionar la opción “Activar o desactivar el Firewall de Windows Defender”.

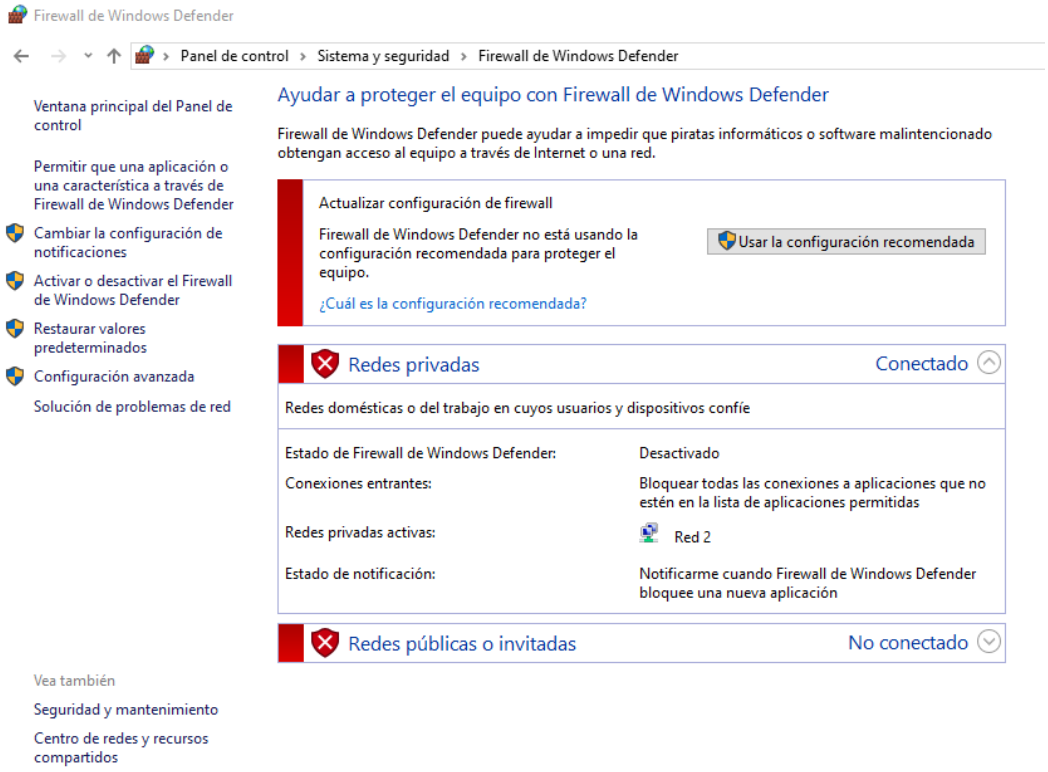


Figura B.22: Desactivación del Firewall de Windows

C | Creación y configuración de NI OPC Server

Para crear el servidor que será capaz de comunicar las simulación del IDCV con la de control MPC en el programa LabVIEW mediante un servidor OPC, se accede al programa **OPC Servers Configuration** perteneciente a la empresa *National Instruments*.

Una vez abierto el programa, se abre la ventana de la figura C.1, donde se puede apreciar la interfaz de este. Se debe hacer clic en la opción *Click to add a channel* o bien, en los íconos superiores seleccionar el quinto (*New channel*).

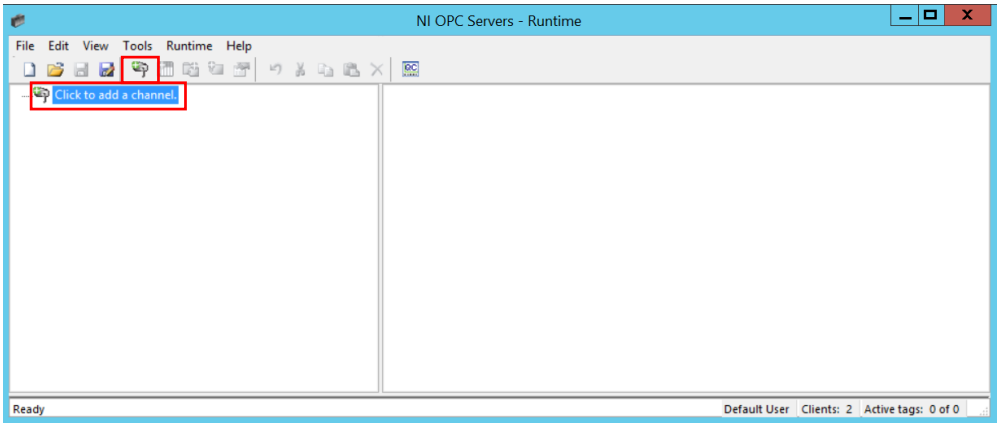


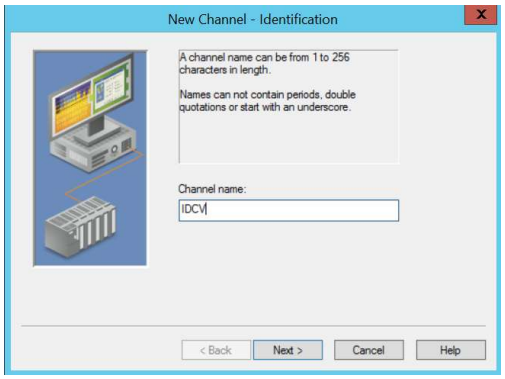
Figura C.1: Interfaz NI OPC Server Configuration

Realizado lo anterior, aparece la ventana de la figura C.2 (a) donde se debe indicar el nombre del canal y presionar *Next*. Luego, en la ventana de la figura C.2 (b) hay que elegir el driver del canal a configurar y, considerando que todo será implementado como simulación, se utiliza el driver **Simulator**, que viene siendo como un PLC virtual.

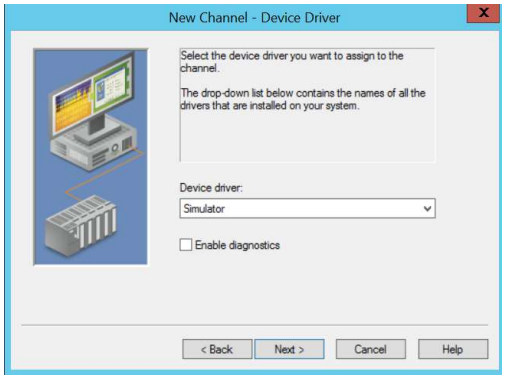
A continuación, toca configurar las opciones de escritura, escogiendo que se escriba únicamente el último valor de los *tags* y que se realicen 10 escrituras por cada lectura, tal como se puede observar en la figura C.2 (c). El siguiente paso es indicar cómo se tratarán los valores de punto flotante no normalizados, eligiendo que sean reemplazados con cero como se ve en la figura C.2 (d).

Una vez presionado *Next*, en la ventana de la figura en la figura C.2 (e) se debe seleccionar la persistencia de los datos, donde la casilla se activa en caso de requerir que

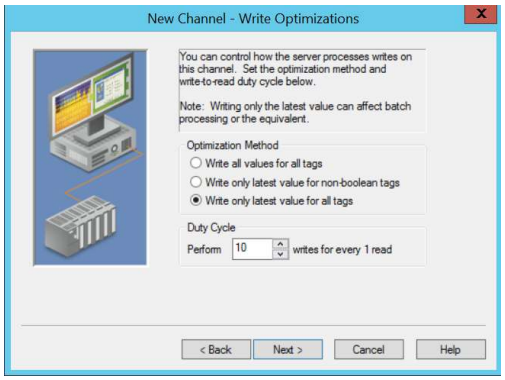
los datos de los *tags* sean guardados una vez que el computador se encuentre apagado. Por último, aparece la ventana de la la figura C.2 (f) con un resumen de todas las configuraciones realizadas al canal, si se está conforme con lo mostrado, basta con presionar en *Finish*.



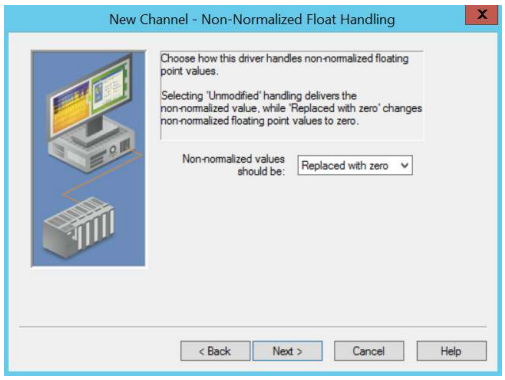
(a) Nombre del canal



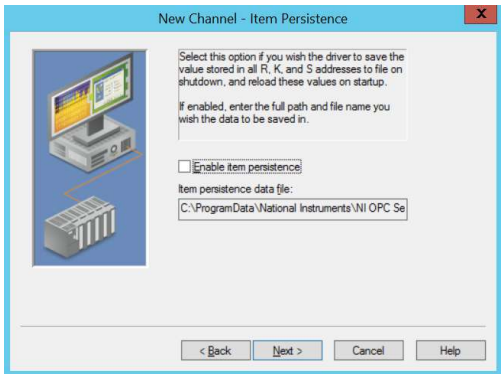
(b) Selección del Driver



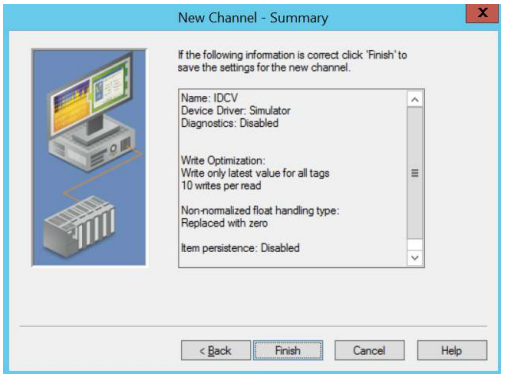
(c) Optimizaciones de escritura



(d) Tratamiento de valores no normalizados



(e) Persistencia de los datos



(f) Resumen

Figura C.2: Creación de un nuevo canal

Con la configuración del canal realizada, la interfaz cambia a como se muestra en

la figura C.3, donde el canal ya está creado. Ahora se debe configurar un dispositivo seleccionando en *Click to add a device* o bien, presionando el sexto ícono, que aparece cuando se tiene seleccionado un canal.

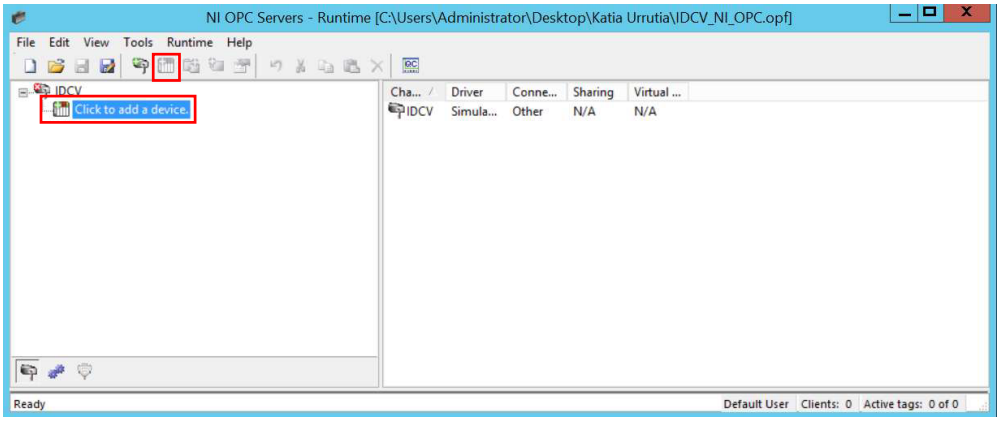
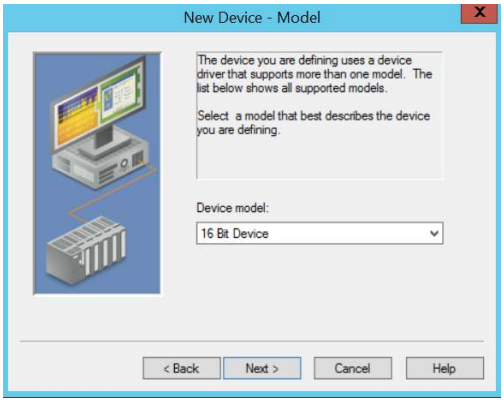


Figura C.3: Interfaz con canal añadido

Con lo anterior aparece la ventana de la figura C.4 (a), donde se debe indicar el nombre que tendrá el dispositivo y presionar *Next*. Luego se debe seleccionar el modelo del dispositivo, sin embargo, como se está utilizando un driver de simulación, únicamente se puede escoger un dispositivo de 8 o 16 bits, tal como se ve en la figura C.4 (b).



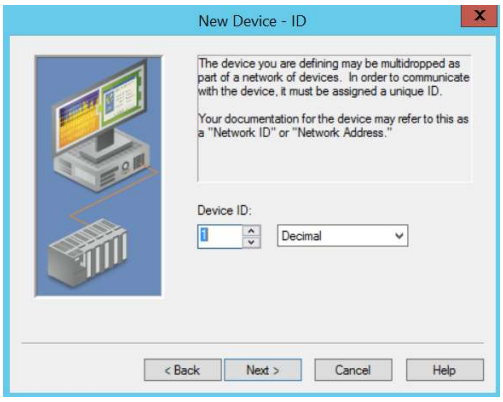
(a) Nombre del dispositivo



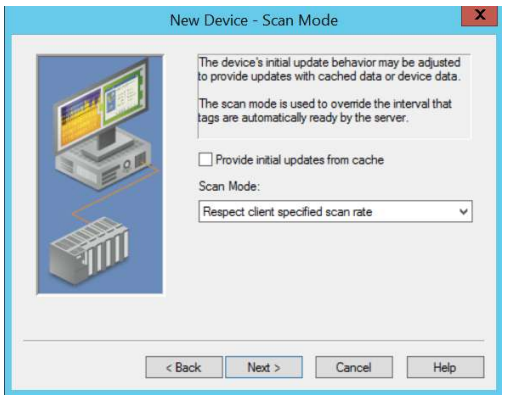
(b) Modelo

A continuación, se debe indicar el ID del dispositivo como se muestra en la figura C.4 (c), el cual es único para cada dispositivo. Continuando con la configuración, hay que optar por un modo de escaneo del dispositivo, donde se decide respetar la tasa de escaneo del cliente, lo cual es observable en la figura C.4 (d).

Finalmente, con todas las configuraciones completadas, aparece la ventana de la figura C.4 (e), la cual muestra un resumen de los pasos anteriores. Si se está conforme con la información mostrada en pantalla, hay que presionar *Finish*



(c) ID



(d) Modo de escaneo



(e) Resumen

Figura C.4: Creación de un nuevo dispositivo

Cuando tanto el canal como el dispositivo han sido configurados, la interfaz del programa se ve como en la figura C.5. Lo único que falta es agregar los *tags* de las variables que se desea comunicar entre los programas. Para ello se debe presionar sobre *Click to add a static tag* o, de forma equivalente, hacer clic sobre el octavo ícono.

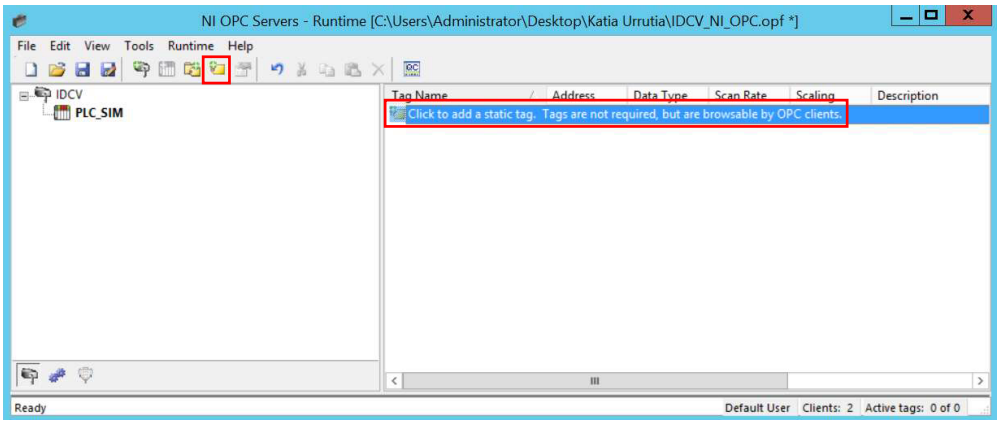


Figura C.5: Interfaz con canal y dispositivo añadido

Al efectuar lo anterior, aparece la ventana de la figura C.6, en la cual se deben incluir todas las propiedades de los *tags* correspondientes. Es importante que el nombre sea lo más entendible posible, donde además se puede agregar una breve descripción con el fin de que cualquier cliente sepa a qué se refiere cada variable.

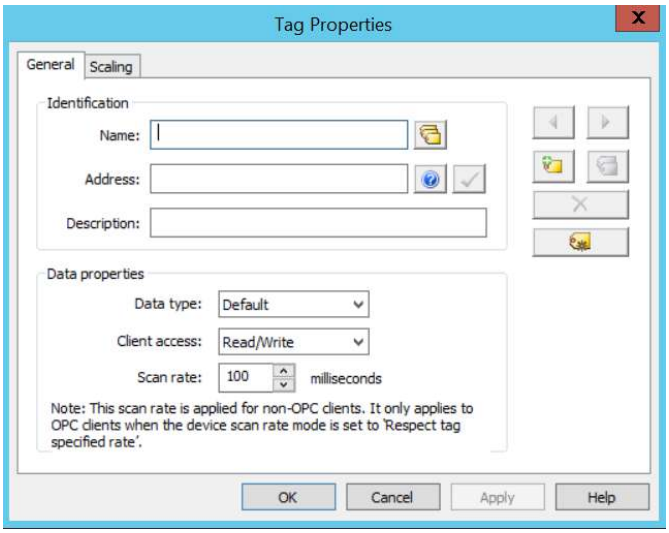


Figura C.6: Propiedades del nuevo Tag por agregar

Respecto a las direcciones, como se está utilizando un dispositivo simulado, se pueden utilizar direcciones que empiezan por la letra **R**, **S** y **K**, donde el uso de cada una se presenta en la tabla C.1, que se puede obtener a través del ícono de ayuda.

Device Type	Range	Data Type	Access
Registers	R0000-R9999 R0000-R9998 R0000-R9996	Word, Short, BCD DWord, Long, LBCD, Float LLong, QWord, Double, Date, Boolean	Read/Write
Constants	K0000-K9999 K0000-K9998 K0000-K9996	Word, Short, BCD DWord, Long, LBCD, Float LLong, QWord, Double, Date, Boolean	Read/Write
Bits	R0000.00-R9999.15 K0000.00-K9999.15	Boolean	Read/Write
Strings	S000 -S999	String	Read/Write

Tabla C.1: Direcciones para los tags

Para el caso de esta memoria, se utilizan variables de tipo flotante (se puede cambiar en la opción *Data type*), por lo que se escogen las direcciones que empiezan por la letra **K**.

D | Creación del OPC Client en LabVIEW

En este apéndice se describe la creación de un cliente OPC usando LabVIEW para poder comunicar dos simulaciones. Adicionalmente se explica cómo agregar las variables del servidor OPC ya generado en el apéndice C.

D.1. Creación del Cliente OPC

Para empezar se debe tener un proyecto creado en LabVIEW, al cual se le añaden las simulaciones pertinentes, teniendo un árbol de proyecto como en la figura D.1.

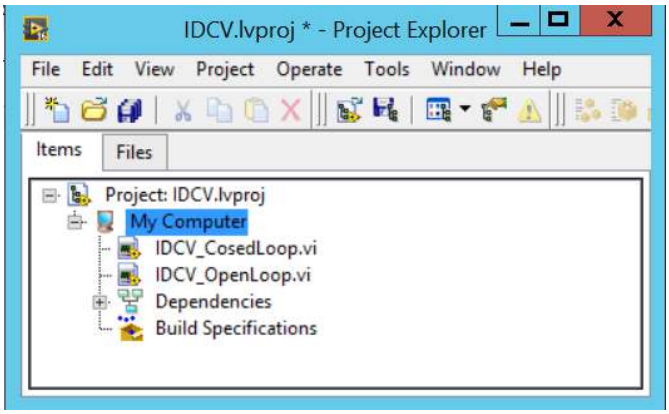


Figura D.1: Árbol de proyecto en LabVIEW

El siguiente paso es hacer clic derecho sobre *My Computer*, buscar la opción *New* y seleccionar *I/O Server*. Esto abre la ventana de la figura D.2, en la que se debe seleccionar el tipo de servidor a utilizar.

Para este caso se requiere comunicar los programas mediante un servidor OPC, por lo que se presiona la opción *OPC Client*. Esto quiere decir que los programas son clientes del servidor OPC, pudiendo leer o escribir sobre las variables definidas en dicho servidor, según se haya configurado anteriormente.

Al presionar el botón *Continue...* se abre la ventana de la figura D.3, la cual corresponde a la configuración del cliente OPC. En la pestaña de ajustes se utiliza el

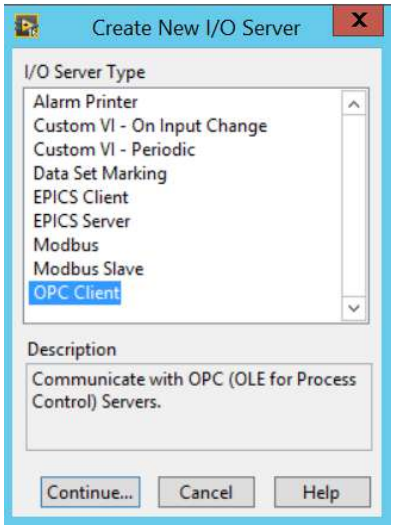


Figura D.2: Menú de creación de un servidor I/O

botón *Browse...* para buscar el equipo en donde se encuentra el servidor OPC. Una vez seleccionado aparece una lista con todos servidores disponibles.

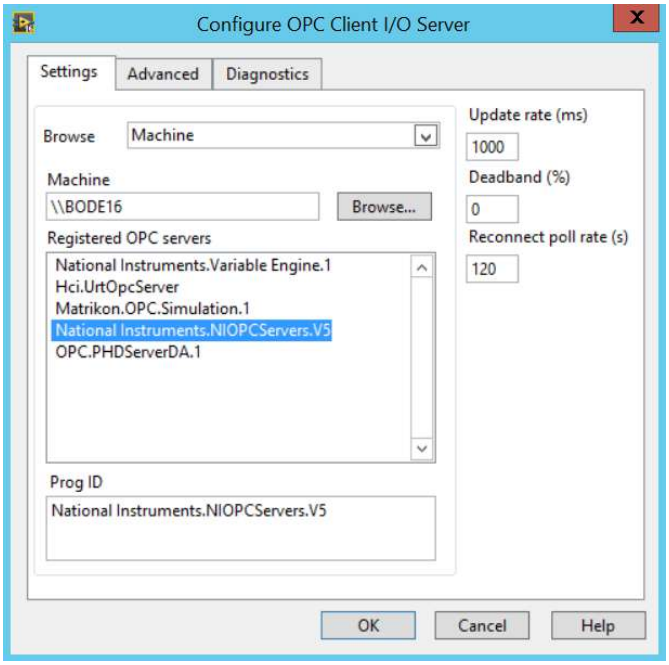


Figura D.3: Configuración del cliente OPC

Para este caso el servidor que contiene las variables creadas corresponde a *National.Instruments.NIOPC.Servers.V5*, por lo que se presiona *OK*.

Una vez finalizado este proceso se crea una librería como la mostrada en la figura D.4, la cual debe ser nombrada y guardada junto al resto de elementos del proyecto.

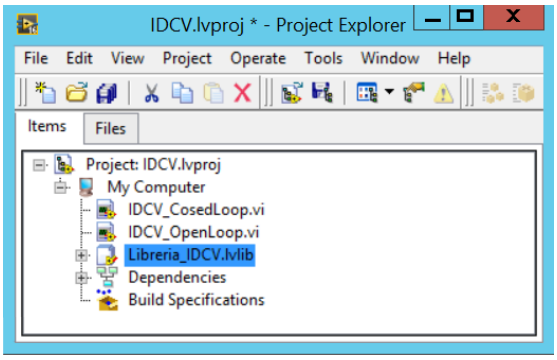


Figura D.4: Librería creada

D.2. Creación de las variables compartidas

Para crear variables que se puedan utilizar dentro de los VI de LabVIEW existen dos formas y la forma de escoger cuál utilizar depende únicamente del usuario ya que son equivalentes.

La primera opción consiste en hacer clic derecho sobre la librería, buscar la alternativa *New* y escoger *Variable*, con lo cual se abre la ventana de la figura D.5.

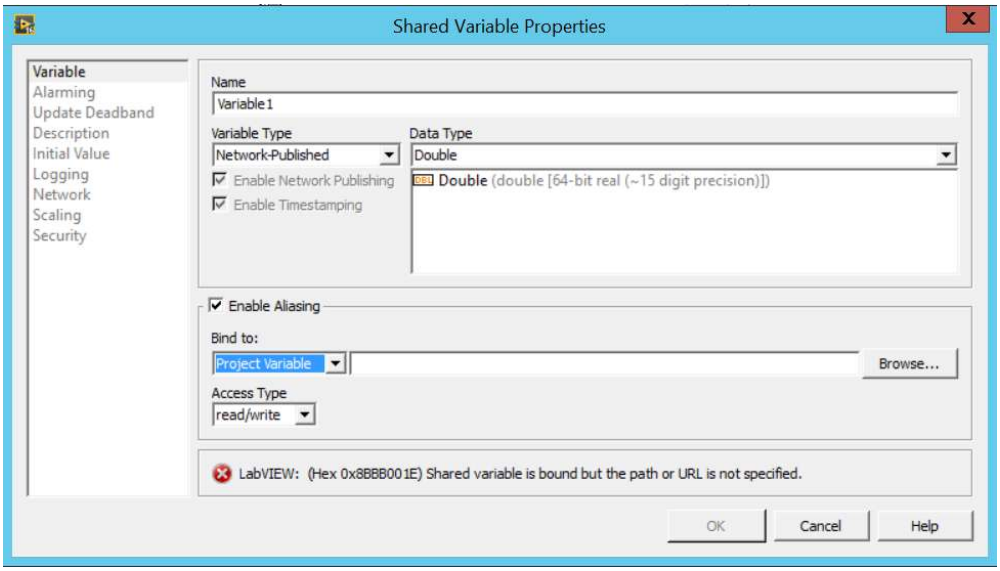


Figura D.5: Propiedades de las variables compartidas

Como es posible ver en esta figura, lo primero es darle un nombre a la variable. A continuación se habilita la casilla *Enable Aliasing* para poder enlazar la variable del proyecto con la del servidor OPC. Se debe presionar el botón *Browse...* y en la ventana emergente que aparece hay que buscar el canal del servidor y el dispositivo creado, pudiendo así ver todas las variables disponibles.

Una vez seleccionada la variable correspondiente, en la sección *Data Type*, el tipo se ajusta automáticamente para coincidir con lo especificado en el servidor, al igual que la sección *Access Type*. Para finalizar la creación de la variable, se debe presionar *OK*, pudiendo así ver la variable creada expandiendo la librería.

Esta opción tiene como desventaja que se debe agregar una variable a la vez, por lo que si se tienen demasiadas señales puede resultar un poco tedioso. Es por ello que también se presenta una segunda opción.

En este caso se hace clic derecho sobre la librería y se busca la opción *Create Bound Variables*, donde aparece la ventana de la figura D.6. De la misma forma que anteriormente, se debe buscar el canal y dispositivo creado del servidor OPC.

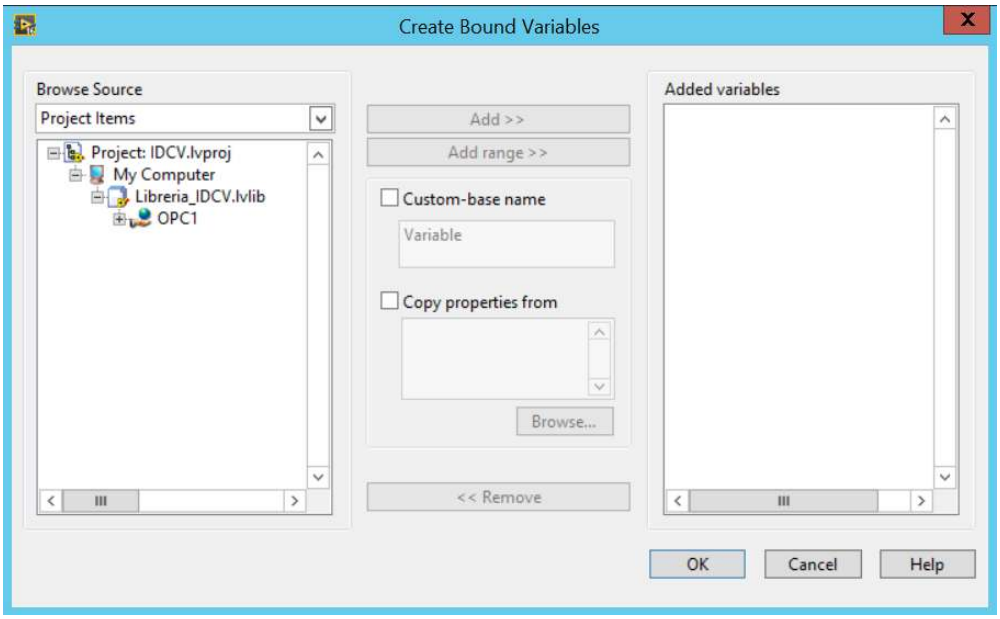


Figura D.6: Creación de variables compartidas

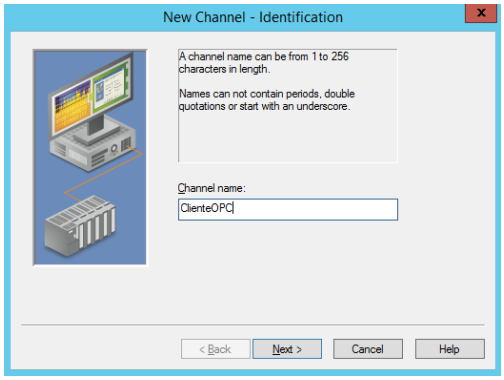
Una vez encontrada la variable se hace clic en *Add* y esta podrá verse en la sección de *Added Variables*. Este proceso se repite para cada una de las variables a incluir y finalmente se presiona el botón *OK*.

La ventaja de esta opción es que se pueden agregar múltiples variables a la vez, contrario a la primera opción, donde hay que buscar una por una. Además, cuando la librería ya está creada, si se hace doble clic sobre alguna variable OPC, aparecerá la ventana de la figura D.5, ya que corresponde a sus propiedades.

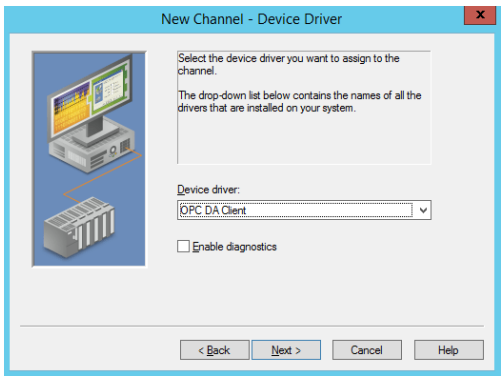
E | Creación del OPC Client en NI OPC Servers 2016

En este apéndice se presenta la creación de un cliente OPC usando NI OPC Servers 2016. A diferencia del apéndice D, este tipo de cliente es utilizado para realizar una conexión remota vía OPC, teniendo en cuenta la referencia [10].

El primer paso consiste en abrir el programa *NI OPC Servers 2016* y agregar un nuevo canal, apareciendo así la ventana de la figura E.1 (a) donde se debe establecer un nombre para el canal a utilizar. Al presionar *Next* se deberá escoger el tipo de dispositivo a utilizar y dado que se desea implementar un cliente OPC, se selecciona la opción **OPC DA Client**, tal como se aprecia en la figura E.1 (b).



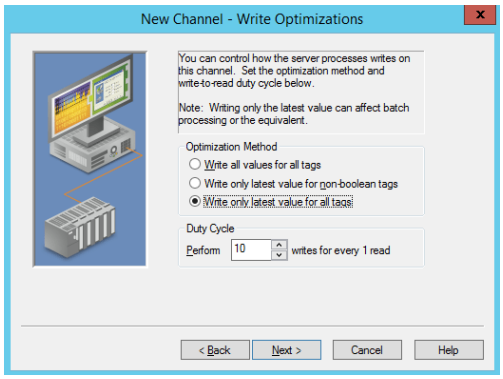
(a) Nombre del canal



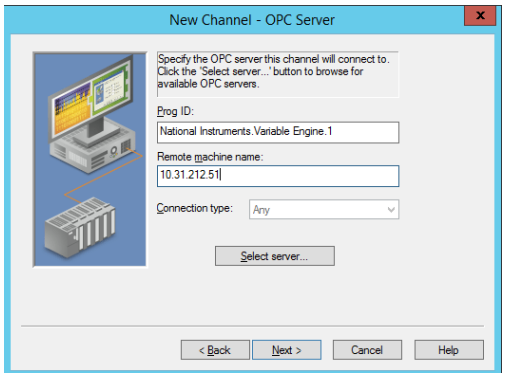
(b) Selección del Driver

A continuación, en la ventana de la figura E.1 (c) se establecen la optimización de escritura, dejando los valores por defecto. Una vez se pasa a la configuración de la figura E.1 (d), se debe seleccionar el servidor OPC, el cual se encuentra en un ordenador remoto, por lo que se ingresa directamente la IP y el Prog ID correspondiente.

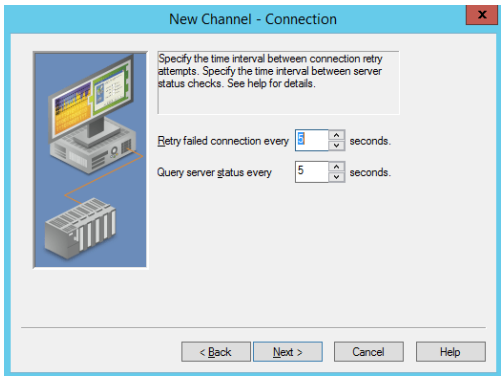
La siguiente ventana corresponde al tiempo entre intentos de conexión, donde se dejan los valores de la figura E.1 (e), que corresponden a los por defecto. Finalmente, una vez todo configurado aparece el resumen de la figura E.1 (f) con todas las opciones seleccionadas. Si se está de acuerdo con la información presentada se debe presionar *Finish* y se tendrá el nuevo canal creado.



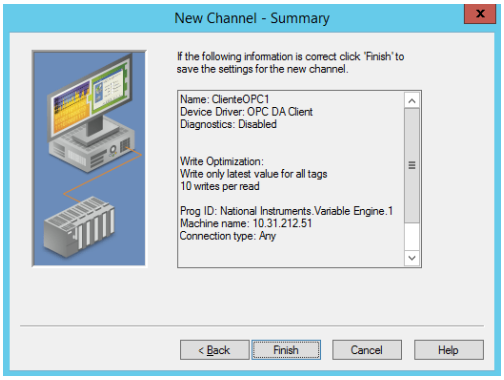
(c) Optimizaciones de escritura



(d) Selección del servidor



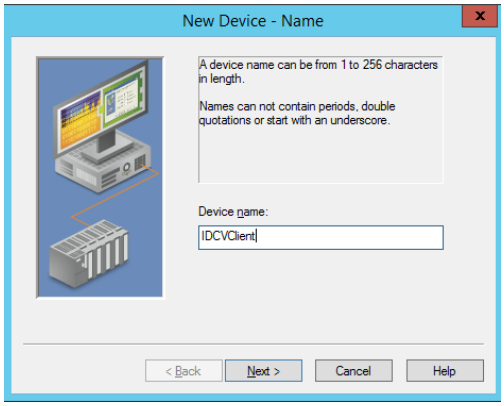
(e) Conexión



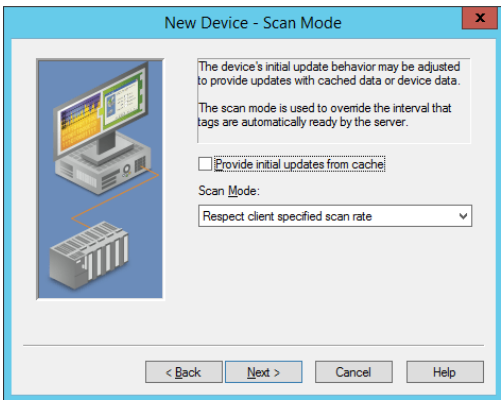
(f) Resumen

Figura E.1: Creación de un nuevo canal

Con el canal correspondiente creado, se habilita la opción para agregar un nuevo dispositivo, apareciendo así la ventana emergente de la figura E.2 (a), en la que se establece el nombre del dispositivo. Seguidamente, en la E.2 (b) se elige el modo de escaneo, dejándolo en su valor por defecto.



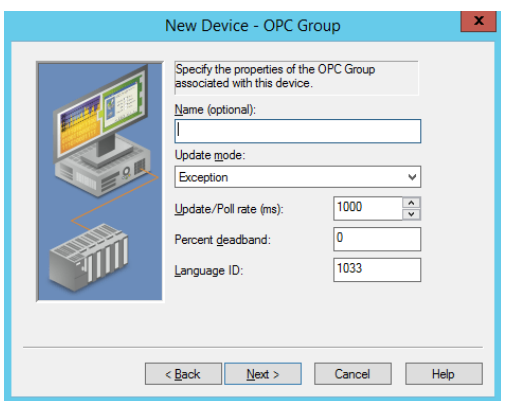
(a) Nombre del dispositivo



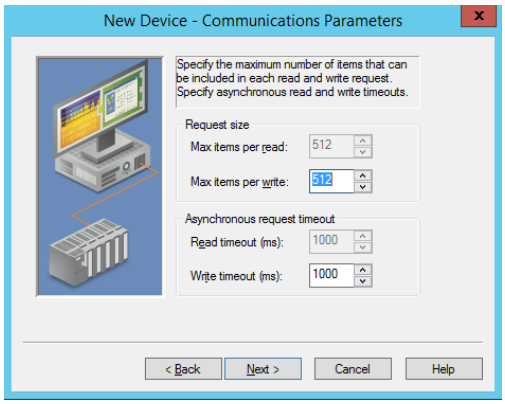
(b) Modo de escaneo

El siguiente paso corresponde a la figura E.2 (c), donde se especifican las propiedades del grupo OPC, las cuales son opcionales, por lo que basta con presionar *Next* y pasar a la ventana de la figura E.2 (d), en donde se indican los parámetros para al comunicación. Nuevamente, se deja su valor por defecto.

Luego, en la ventana de la figura E.2 (e) se configura el *Watchdog*, sin embargo, se deja desactivado y se avanza a la ventana de la figura E.2 (f), en la cual se deben importar los elementos o *tags* que se encuentran en el servidor deseado.



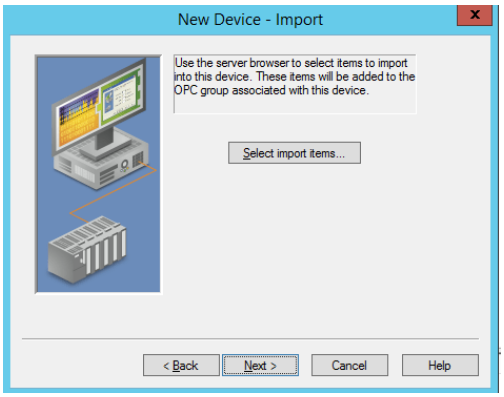
(c) Grupo OPC



(d) Parámetros de comunicación



(e) Watchdog



(f) Importar elementos

Figura E.2: Creación de un nuevo dispositivo

Al presionar el botón *Select import items...* aparecerá la ventana de la figura E.3, en la que se debe navegar hasta encontrar las variables del servidor creado en el ordenador remoto y agregarlas al cliente OPC presionado el botón **Add items**.

Una vez añadidos todos los elementos de interés, basta con presionar el botón *OK* y se efectuarán todas las configuraciones implementadas al dispositivo creado.

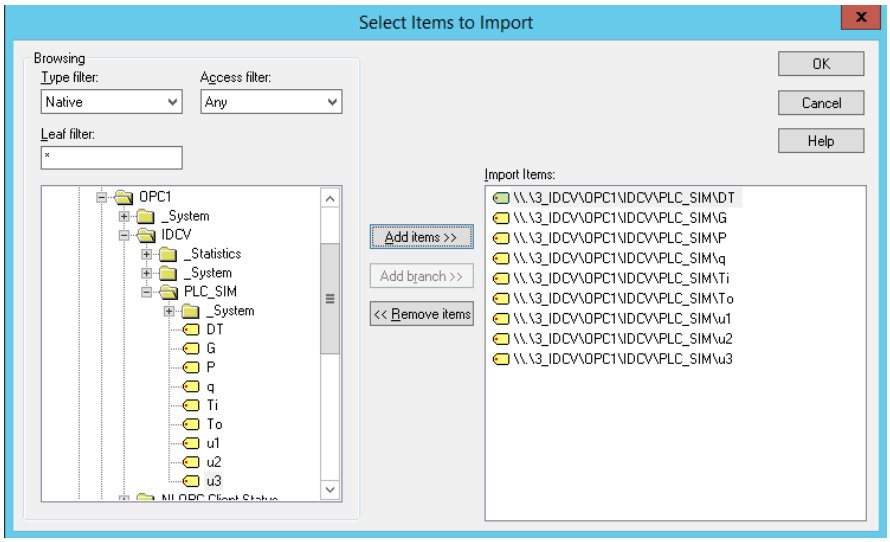


Figura E.3: Agregar elementos

Una vez finalizada la creación del dispositivo, en la ventana principal se debería ver algo parecido a la figura E.4, donde se tiene un canal que actúa como cliente OPC, un dispositivo y los respectivos *tags* del servidor OPC añadidos.

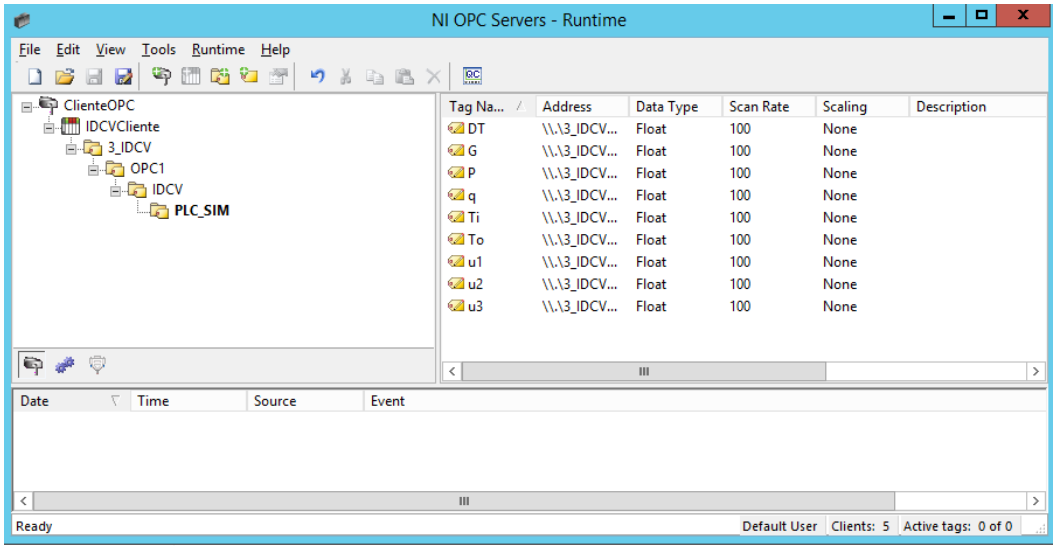


Figura E.4: Cliente OPC creado

Con el cliente OPC creado, se deben conectar las variables a LabVIEW. Para ello en un proyecto se debe hacer clic derecho sobre *My computer*, buscar la opción *New* y seleccionar *I/O Server*, para posteriormente elegir la opción *OPC Client*. Con esto aparecerá la ventana de la figura E.5, donde se debe seleccionar el servidor mostrado en esta.

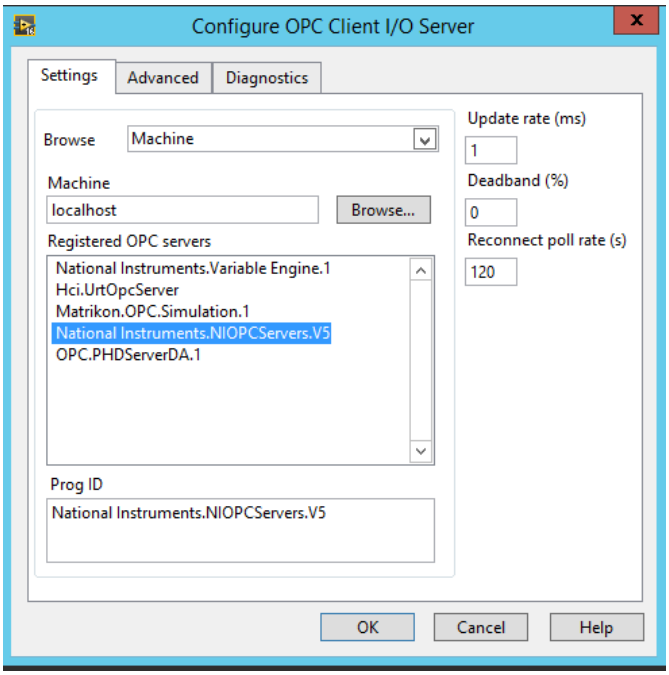


Figura E.5: Cliente OPC en LabVIEW

A continuación, sobre el cliente OPC creado se hace clic derecho y se elige la opción *Create Bound Variables*, apareciendo la ventana de la figura E.6, donde se debe buscar el cliente OPC recientemente creado y agregar las variables de interés.

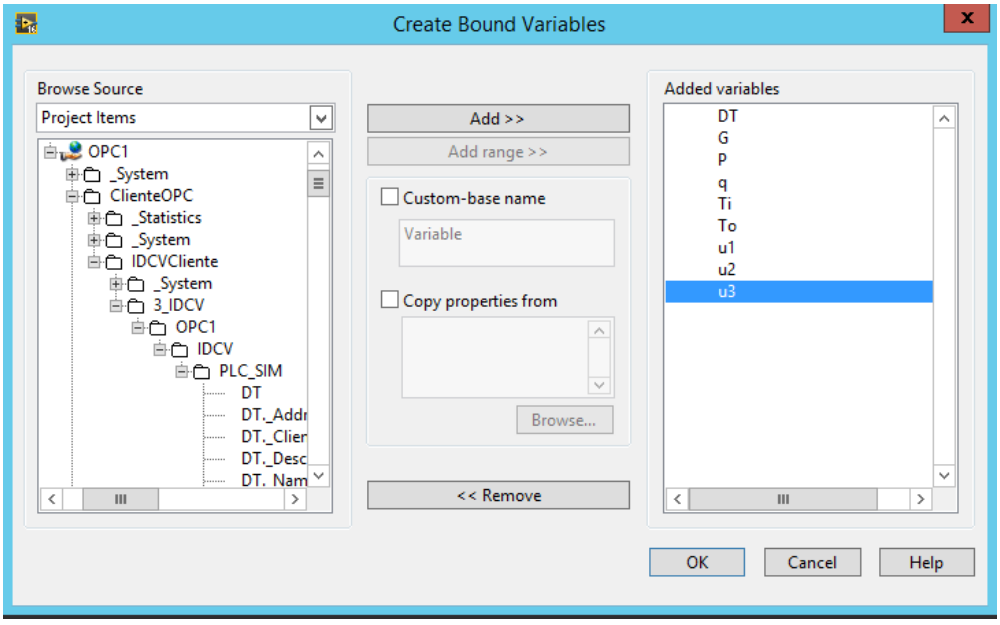


Figura E.6: Agregar variables en LabVIEW

Una vez realizado esto, dentro de los diagramas de bloques de LabVIEW se deben crear indicadores o controladores según sea el caso de la variable y hacer clic derecho sobre estos. Se seleccionan las propiedades y tal como se ve en la figura E.7, se busca la pestaña *Data Binding* y se busca la opción **Shared Variable Engine**, buscando así cada variable correspondiente.

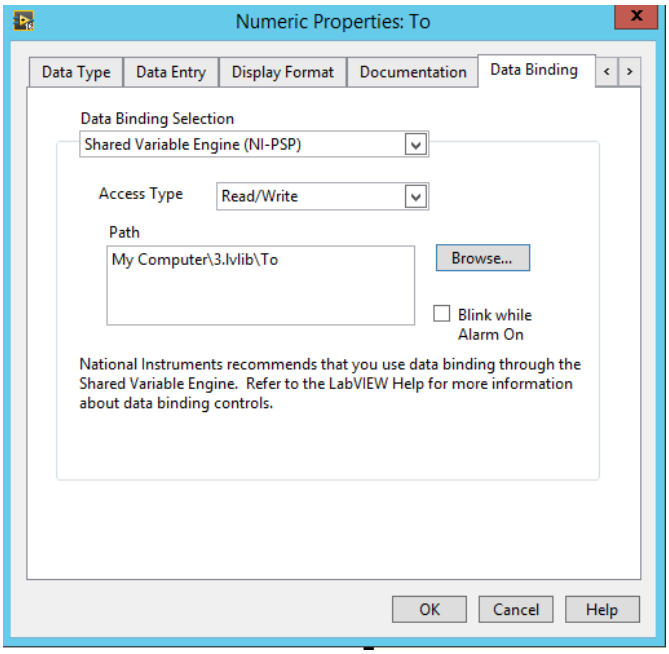


Figura E.7: Modo de conexión para las variables

Esta configuración además podrá verse al acceder al panel frontal de la simulación, donde a las variables conectadas de esta forma les aparece un triángulo a la derecha, el cual si se ilumina verde al ejecutar la simulación, indica que la variable está correctamente conectada, mientras que si está en rojo significa que la comunicación está fallando.