

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación



“Diseño y Construcción de una Planta de Tres Vasos Comunicantes e Implementación de un Sistema de Control Automático de Nivel de Agua de Tipo PID (Proporcional-Integral-Derivativo) desarrollado por el Método Clásico en MATLAB”

INFORME DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

Presentado por:

ROBERTO LÓPEZ MORÁN

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2013

AGRADECIMIENTO

A Dios y a la Virgen María, por haberme dado la fuerza para culminar este trabajo.

A mis padres, por su paciencia, soporte y comprensión en todo, siempre.

Al Ing. Juan Del Pozo, por brindarme la oportunidad de realizar un trabajo de calidad.

Al Sr. Rufino Manuel Assan Chang, a Bryan Ávila y a la Arq. Mariela Vera, por su gran colaboración y aporte en este Proyecto.

A Verónica y a Yéssica: sin su ayuda y apoyo, nada de esto habría sido posible.

A mi familia y a mis amigos, por haberme dado el ánimo que necesitaba para seguir.

DEDICATORIA

A mis padres, que han esperado tanto este culminante momento. Son mi razón de ser, mi fuente de inspiración, y los mejores ejemplos que tengo a seguir de fortaleza y sacrificio. Los quiero mucho.

A mi familia, por haber estado presente siempre para recordarme que sí se puede.

A mis amigos, por haberme ayudado a continuar en los momentos más difíciles.

A los Dres. Augusto Riofrío y Sergio Paz, por sus fructíferos trabajos en mí, de los cuales estaré eternamente agradecido.

Este trabajo es de ustedes y para ustedes, con todo mi cariño y respeto.

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

PhD. Boris Vintimilla B.

SUB-DECANO FIEC

MSc. Juan Del Pozo L.

DIRECTOR DEL PROYECTO DE GRADUACIÓN

MSc. Dennys Cortéz A.

VOCAL PRINCIPAL

DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad del contenido de este Informe de Proyecto de Graduación, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo, a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.

(Art. 18 del Reglamento 4256 de Graduación de Pregrado de la ESPOL)

ROBERTO LÓPEZ MORÁN

RESUMEN

Este trabajo tiene como finalidad presentar la nueva planta del Laboratorio de Control Automático de la FIEC, consistente en un sistema de tres vasos comunicantes, describiendo su diseño y construcción, donde se incluyen los criterios empleados en la selección de los materiales utilizados para su construcción, en la selección de los equipos a ser instalados, así como también en los criterios de selección de los elementos a ser usados para las estrategias de control, protección y seguridad de estos equipos durante la operación de la planta. También se busca mostrar el comportamiento de la planta mediante el desarrollo de un sistema de control automático de nivel de agua, por medio de un controlador de tipo PID, desarrollado por el método clásico utilizando MATLAB.

Para este propósito, en el primer capítulo se hace la descripción general de la planta de tres vasos comunicantes, y se detalla el diseño de la misma, dividido en tres partes: lo que respecta a la parte hidráulica de la planta como los tanques y la red de tuberías; lo referente a la parte eléctrica de la planta como las etapas de fuerza y de control; y, lo que concierne a la estructura de soporte, con todos los criterios considerados para el diseño de cada una de estas partes.

En el segundo capítulo, se hace referencia al proceso de construcción de la planta, iniciando con la selección de los equipos a ser instalados como sensores, actuadores, controles de fuerza, y los criterios específicos para su elección; continuando con la selección de los materiales de construcción para la estructura de soporte y las partes hidráulica y eléctrica, incluyendo también sus criterios de selección; finalizando con el detalle de la construcción en sí de la planta, como el ensamblaje e instalación de las partes y equipos de la misma.

El tercer y cuarto capítulos, muestran paso a paso la identificación de la planta, el desarrollo del controlador PID en MATLAB, las simulaciones de prueba del mismo, su respectiva implementación en la planta, y la obtención de los índices de rendimiento del controlador. En primer lugar, se realiza la adquisición de datos a través del equipo de campo cFP, y se identifica la planta utilizando la herramienta IDENT de MATLAB. A partir del sistema identificado, se procede con el desarrollo del controlador utilizando la herramienta SISOTOOL de MATLAB, que incluye el diseño del compensador y de un pre-filtro de señal si lo amerita, estableciendo los requerimientos de diseño deseados para el control de la planta como el tiempo de estabilización y el sobrenivel porcentual máximo permitido de para la señal controlada. Las pruebas del controlador desarrollado se las realiza simulando tres modelos del sistema en la herramienta SIMULINK de MATLAB y de acuerdo a los

resultados obtenidos, se decide si hay que hacer algún ajuste fino al controlador previamente a su implementación en la planta real. Luego de esto, se dedica a la implementación del controlador desarrollado para que actúe sobre la planta real, y se hacen las correspondientes pruebas con la planta en funcionamiento. En caso de ser necesario, se hacen ajustes al controlador implementado para alcanzar los resultados deseados, y se muestra el resultado final del comportamiento de la planta con el controlador ajustado e implementado en la misma. Con este resultado, se describen, calculan y comparan los cuatro índices de rendimiento más conocidos y utilizados, que se constituyen en un método cuantitativo para determinar la calidad de un controlador PID, comprobando el nivel de efectividad de su tarea de control.

Finalmente se procede a enunciar tantas conclusiones como recomendaciones puedan obtenerse, producto de todo el proceso analizado, partiendo desde la construcción de la planta, pasando por el desarrollo del controlador para el sistema, hasta los resultados obtenidos de la implementación en la planta del controlador desarrollado y toda la información que estos pasos puedan proveer, con el fin de realizar las acotaciones pertinentes que permitan proponer mejoras en la mayor cantidad de aspectos posibles, a ser aplicables tanto a nivel de pregrado como de postgrado.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-------|
| RESUMEN | i |
| ÍNDICE GENERAL..... | iv |
| ABREVIATURAS | vi |
| SIMBOLOGÍA | viii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | xviii |
| ÍNDICE DE TABLAS | xxvii |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1. DISEÑO DE LA PLANTA | 4 |
| 1.1. Descripción de la Planta..... | 4 |
| 1.2. Diseño de la Parte Hidráulica..... | 7 |
| 1.2.1. Diseño de Tanques y Reservorio..... | 8 |
| 1.2.2. Diseño de la Red de Tuberías | 17 |
| 1.3. Diseño de la Parte Eléctrica | 22 |
| 1.3.1. Diseño de la Etapa de Fuerza | 25 |
| 1.3.2. Diseño de la Etapa de Control..... | 29 |
| 1.4. Diseño de la Estructura de Soporte..... | 34 |
| 2. CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA..... | 36 |
| 2.1. Selección de Equipos..... | 36 |
| 2.1.1. Sensores | 37 |
| 2.1.2. Actuadores | 38 |
| 2.1.3. Controles de Fuerza | 41 |
| 2.2. Selección de Materiales | 46 |
| 2.3. Construcción de la Planta | 49 |
| 3. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DE LA PLANTA EN MATLAB..... | 53 |
| 3.1. Identificación de la Planta usando la Herramienta IDENT de MATLAB | 53 |
| 3.2. Controlador Clásico Proporcional-Integral-Derivativo (PID) | 156 |

| | |
|--|-----|
| 3.2.1. Desarrollo del Controlador utilizando la Herramienta SISOTOOL de MATLAB..... | 168 |
| 3.2.2. Pruebas y Ajuste Fino del Controlador | 203 |
| 4. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL CONTROLADOR IMPLEMENTADO SOBRE LA PLANTA | 286 |
| 4.1. Pruebas y Ajustes del Controlador sobre la Planta | 286 |
| 4.2. Resultados de la Aplicación del Controlador sobre la Planta | 298 |
| 4.3. Cálculo de Índices de Rendimiento del Controlador..... | 306 |
| CONCLUSIONES | 338 |
| RECOMENDACIONES | 342 |
| ANEXO A. Vistas del Diseño de la Planta..... | 346 |
| ANEXO B. Fotografías Adicionales de la Planta..... | 375 |
| ANEXO C. Diagrama de Fuerza y Control del Panel Eléctrico | 380 |
| ANEXO D. Especificaciones Técnicas de los Equipos | 382 |
| ANEXO E. Configuración del Variador de Frecuencia | 419 |
| ANEXO F. Cálculo para la Conversión de Corriente a Altura de los Sensores de Presión..... | 438 |
| ANEXO G. Cálculo de la Constante K_U del Caudal de Entrada por Voltaje | 448 |
| ANEXO H. Obtención de la Función de Transferencia del Tercer Tanque con Respecto al Voltaje de Entrada de la Planta..... | 452 |
| ANEXO I. Código de la Función optimPID para MATLAB | 461 |
| ANEXO J. Licencia de Uso de la Función optimPID para MATLAB..... | 463 |
| GLOSARIO | 464 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 468 |

ABREVIATURAS

| | |
|------|---|
| AC | Corriente Alterna |
| cFP | Compact FieldPoint |
| DC | Corriente Continua |
| GE | General Electric |
| GUI | Graphical User Interface (Interfaz Gráfica del Usuario) |
| IAE | Integral of the Absolute value of Error (Integral del valor Absoluto del Error) |
| IGBT | Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor Bipolar de Compuerta Aislada) |
| IMC | Internal Model Control (Control por Modelo Interno) |
| ISE | Integral of the Squared Error (Integral del Cuadrado del Error) |
| ITSE | Integral of Time multiplied by the Squared Error (Integral del Tiempo multiplicado por el Cuadrado del Error) |
| ITAE | Integral of Time multiplied by the Absolute value of Error (Integral del Tiempo multiplicado por el valor Absoluto del Error) |
| LAN | Local Area Network (Red de Área Local) |
| LTI | Linear, Time-Invariant (Lineal Invariante en el Tiempo) |

| | |
|------|--|
| ODE | Ordinary Differential Equations (Ecuaciones Diferenciales Ordinarias) |
| OPC | OLE (Object Linking and Embedding) for Process Control-Open Process Control (Incrustación y Enlazado de Objetos para Control de Procesos-Control de Proceso Abierto) |
| PID | Proporcional-Integral-Derivativo |
| PLC | Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programable) |
| PSI | Pound-force per Square Inch (Libra-fuerza por Pulgada Cuadrada) |
| PVC | Cloruro de Polivinilo |
| S.P. | Sobrenivel Porcentual |
| SISO | Single Input, Single Output (Entrada Única, Salida Única) |
| VPN | Virtual Private Network (Red Privada Virtual) |

SIMBOLOGÍA

| | |
|------------------------------------|---|
| [A] | Unidad de medida de intensidad de corriente en amperios |
| [atm] | Unidad de medida de longitud en atmósferas |
| [cm] | Unidad de medida de longitud en centímetros |
| [<i>cm</i>] | Unidad de medida de longitud en centímetros |
| [cm/sec ²] | Unidad de medida de aceleración |
| [cm ²] | Unidad de medida de área en centímetros cuadrados |
| [cm ³] | Unidad de medida de volumen en centímetros cúbicos |
| [<i>cm</i> ³ /sec] | Unidad de medida de caudal |
| [<i>cm</i> ³ /(V•sec)] | Unidad de medida de caudal por unidad de voltaje |
| [HP] | Unidad de medida de potencia en caballos de fuerza |
| [Hz] | Unidad de medida de frecuencia en Hertz |
| [KW] | Unidad de medida de potencia en kilovatios |
| [mA] | Unidad de medida de intensidad de corriente en miliamperios |

| | |
|-------------------|---|
| [PSI] | Unidad de medida de presión en PSI |
| [pul] | Unidad de medida de longitud en pulgadas |
| [RPM] | Unidad de medida de frecuencia en revoluciones por minuto |
| [sec] | Unidad de medida de tiempo en segundos |
| [V] | Unidad de medida de voltaje en voltios DC |
| [V] _{AC} | Unidad de medida de voltaje en voltios AC |
| [V] _{DC} | Unidad de medida de voltaje en voltios DC |
| [W] | Unidad de medida de potencia en vatios |
| A_{12} | Área de la sección transversal de la válvula entre el primer y segundo tanque |
| A_{12} | Área de la sección transversal de la válvula entre el primer y segundo tanque |
| A_{23} | Área de la sección transversal de la válvula entre el segundo y tercer tanque |
| A_{23} | Área de la sección transversal de la válvula entre el segundo y tercer tanque |
| A_3 | Área de la sección transversal de la válvula de salida del tercer tanque |
| A_3 | Área de la sección transversal de la válvula de salida del tercer tanque |

| | |
|----------|--|
| Adq_Data | Variable con los datos adquiridos de la planta para su identificación |
| C | Señal de salida del sistema |
| c_1 | Constante de linealización del caudal entre el primer y segundo tanque |
| c_2 | Constante de linealización del caudal entre el segundo y tercer tanque |
| c_3 | Constante de linealización del caudal de salida del tercer tanque |
| dt | Derivada con respecto al tiempo |
| E | Error actuante del sistema |
| Entrada | Señal del término integral del controlador PID que ingresa a la función Anti Wind-Up |
| e_{ss} | Error en estado estacionario |
| $e^2(t)$ | Función del cuadrado del error en el dominio del tiempo |
| $ e(t) $ | Valor absoluto de la función del error en el dominio del tiempo |
| g | Aceleración de la gravedad |
| g | Aceleración de la gravedad |
| G | Variable con la función de transferencia identificada de la planta |

| | |
|----------------------|---|
| G | Función de transferencia desarrollada de la planta |
| $G_c(s)$ | Función de transferencia del controlador PID en el dominio de la frecuencia |
| G_p | Función de transferencia identificada de la planta |
| G_{estable} | Variable con la función de transferencia identificada estable de la planta |
| H_{max} | Altura máxima permisible de la columna de agua de los tres tanques |
| H_1 | Altura de la columna de agua del primer tanque |
| H_1 | Altura de la columna de agua del primer tanque |
| h_1 | Incremental de la altura de la columna de agua del primer tanque |
| H_2 | Altura de la columna de agua del segundo tanque |
| H_2 | Altura de la columna de agua del segundo tanque |
| h_2 | Incremental de la altura de la columna de agua del segundo tanque |
| H_3 | Altura de la columna de agua del tercer tanque |
| H_3 | Altura de la columna de agua del tercer tanque |
| h_3 | Incremental de la altura de la columna de agua del tercer tanque |

| | |
|-----------------------|--|
| $\frac{h_3(s)}{U(s)}$ | Función de transferencia del tercer tanque con respecto al voltaje de entrada de la planta |
| IAE | Criterio IAE |
| ISE | Criterio ISE |
| $ITAE$ | Criterio ITAE |
| $ITSE$ | Criterio ITSE |
| I_1 | Corriente del sensor de presión del primer tanque |
| I_1 | Corriente del sensor de presión del primer tanque |
| I_2 | Corriente del sensor de presión del segundo tanque |
| I_2 | Corriente del sensor de presión del segundo tanque |
| I_3 | Corriente del sensor de presión del tercer tanque |
| I_3 | Corriente del sensor de presión del tercer tanque |
| K | Ganancia |
| K | Ganancia |
| K_D | Constante Derivativa del controlador PID |

| | |
|----------------|--|
| Kd | Constante Derivativa del controlador PID |
| K _D | Constante Derivativa del controlador PID |
| K_I | Constante Integral del controlador PID |
| Ki | Constante Integral del controlador PID |
| K _I | Constante Integral del controlador PID |
| K_p | Constante Proporcional del controlador PID |
| Kp | Constante Proporcional del controlador PID |
| K _P | Constante Proporcional del controlador PID |
| K _U | Constante del caudal de entrada por voltaje |
| K_U | Constante del caudal de entrada por voltaje |
| K _V | Factor de fricción de la válvula de salida del tercer tanque |
| K_V | Factor de fricción de la válvula de salida del tercer tanque |
| K_estable | Variable con la constante de estabilización de la función de transferencia identificada de la planta |
| L | Longitud del lado de la base de los tanques |

| | |
|------------------------------------|--|
| L | Longitud del lado de la base de los tanques |
| $L\acute{m}iteInferiorSP$ | Límite superior del sobrenivel porcentual de la señal de respuesta |
| $L\acute{m}iteSuperiorSP$ | Límite superior del sobrenivel porcentual de la señal de respuesta |
| $L\acute{m}iteInferiorNegativoEss$ | Límite inferior negativo del error en estado estacionario de la señal de respuesta |
| $L\acute{m}iteSuperiorNegativoEss$ | Límite superior negativo del error en estado estacionario de la señal de respuesta |
| $L\acute{m}iteInferiorPositivoEss$ | Límite inferior positivo del error en estado estacionario de la señal de respuesta |
| $L\acute{m}iteSuperiorPositivoEss$ | Límite superior positivo del error en estado estacionario de la señal de respuesta |
| M | Señal de salida del controlador PID |
| m | Señal de salida del controlador PID que ingresa a la función Anti Wind-Up |
| Md | Componente Derivativa de la señal de salida del controlador PID |
| Mi | Componente Integral de la señal de salida del controlador PID |
| M_{max} | Límite superior del voltaje DC a ser aplicado al variador de frecuencia |
| M_{min} | Límite inferior del voltaje DC a ser aplicado al variador de frecuencia |
| Mp | Componente Proporcional de la señal de salida del controlador PID |

| | |
|--------------|---|
| mydata | Variable con los datos importados para identificar la planta |
| mydatae | Variable con el rango de trabajo para identificar la planta |
| mydataed | Variable con el rango de trabajo sin promedios para identificar la planta |
| mydatav | Variable con el rango de trabajo para validar la identificación |
| mydatavd | Variable con el rango de trabajo sin promedios para validar la identificación |
| Muestras [t] | Unidad de medida de muestreo de datos tomados en un intervalo de tiempo |
| M_max | Límite superior del voltaje DC a ser aplicado al variador de frecuencia |
| M_min | Límite inferior del voltaje DC a ser aplicado al variador de frecuencia |
| p_1 | Primer polo |
| $p_{2,3}$ | Segundo y tercer polos |
| p_2 | Segundo polo |
| P3 | Variable con la función de transferencia identificada de la planta |
| $P3$ | Función de transferencia identificada de la planta |
| p_3 | Tercer polo |

| | |
|--------------------|--|
| Q_{in} | Caudal de entrada |
| Q_{out} | Caudal de salida |
| Q_{12} | Caudal entre el primer y segundo tanque |
| R | Señal de entrada o referencia del sistema |
| s | Variable de Laplace en el dominio de la frecuencia |
| Salida | Señal de salida de la función Anti Wind-Up |
| $S.P.$ | Sobrenivel porcentual |
| Sat_max | Límite de acumulación superior del término integral del controlador PID |
| Sat _{max} | Límite de acumulación superior del término integral del controlador PID |
| Sat_min | Límite de acumulación inferior del término integral del controlador PID |
| Sat _{min} | Límite de acumulación inferior del término integral del controlador PID |
| T | Límite superior de integración para el cálculo de los índices de rendimiento |
| t | Tiempo |
| T_s | Tiempo de estabilización |

| | |
|-------------|---|
| T_{p1} | Constante de tiempo del primer polo |
| T_{p2} | Constante de tiempo del segundo polo |
| T_{p3} | Constante de tiempo del tercer polo |
| U | Voltaje de entrada |
| V_{in} | Voltaje DC a ser aplicado al variador de frecuencia |
| Ψ_{12} | Factor de fricción de la válvula entre el primer y segundo tanque |
| ψ_{12} | Factor de fricción de la válvula entre el primer y segundo tanque |
| Ψ_{23} | Factor de fricción de la válvula entre el segundo y tercer tanque |
| ψ_{23} | Factor de fricción de la válvula entre el segundo y tercer tanque |
| z_1 | Primer cero |
| z_2 | Segundo cero |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1. Esquema del Sistema de Vasos Comunicantes | 4 |
| Figura 1.2. Vista Frontal de la Planta..... | 7 |
| Figura 1.3. Vista Frontal de un Tanque..... | 10 |
| Figura 1.4. Vista del Sensor de Presión..... | 11 |
| Figura 1.5. Dispositivo Anti-Rebose..... | 12 |
| Figura 1.6. Vista del Dispositivo Anti-Rebose | 13 |
| Figura 1.7. Visor del Nivel de Agua del Reservorio..... | 15 |
| Figura 1.8. Vista de la Red de Desfogue de los Tanques..... | 17 |
| Figura 1.9. Válvula de Bola..... | 18 |
| Figura 1.10. Vista de la Derivación a la Salida de la Bomba | 19 |
| Figura 1.11. Vista del Retorno del Tercer Tanque al Reservorio | 20 |
| Figura 1.12. Vista Frontal del Panel Eléctrico | 23 |
| Figura 1.13. Diagrama de Bloques Simplificado de un Sistema Voltaje/Frecuencia | 28 |
| Figura 1.14. Partes de una Bomba Centrífuga..... | 29 |
| Figura 1.15. Vista de las Luces Piloto y Pulsadores | 30 |
| Figura 1.16. Tarjeta CB-68LPR de National Instruments | 31 |
| Figura 1.17. Esquema de Conectores e Instalación del Dispositivo Anti- Rebose..... | 33 |
| Figura 2.1. Transmisor de Presión DANFOSS MBS 4510..... | 38 |
| Figura 2.2. Bomba GOULDS NPE 316L SS | 39 |
| Figura 2.3. Manómetro de Bourdon | 40 |
| Figura 2.4. Relevador Térmico GE RT-1K..... | 42 |
| Figura 2.5. Contactor Eléctrico GE CL-00..... | 43 |
| Figura 2.6. Variador de Frecuencia SIEMENS SINAMICS G110..... | 43 |
| Figura 2.7. Diagrama de Bloques del Variador de Frecuencia..... | 45 |
| Figura 2.8. Bornes Frontales del Variador de Frecuencia..... | 46 |
| Figura 2.9. Elementos de Tuberías de Polipropileno | 48 |
| Figura 2.10. Tecnología de la Línea Roscable de Polipropileno..... | 49 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.11. Instalación Eléctrica Adicional de 220[V] _{AC} | 51 |
| Figura 3.1. Esquema General de Interacción entre los Usuarios y la Planta | 55 |
| Figura 3.2. Pantalla de Bienvenida de MATLAB R2008a..... | 56 |
| Figura 3.3. Modelo para la Adquisición de Datos..... | 57 |
| Figura 3.4. Bloque de Constante | 58 |
| Figura 3.5. Bloque Conmutador de Señal..... | 60 |
| Figura 3.6. Bloque de Suma | 62 |
| Figura 3.7. Bloque Indicador Visual tipo Light Bulb..... | 63 |
| Figura 3.8. Bloque Multiplexor | 65 |
| Figura 3.9. Bloque de Transición de Tasa de Muestreo..... | 65 |
| Figura 3.10. Bloque de Ganancia Variable | 67 |
| Figura 3.11. Interfaz Gráfica del Bloque de Ganancia Variable de Voltaje DC | 68 |
| Figura 3.12. Estado Estable de la Altura de las Columnas de Agua en el Punto de Operación | 70 |
| Figura 3.13. Bloque Generador de Señales..... | 71 |
| Figura 3.14. Interfaz de Parámetros del Bloque Generador de Señales para la Adquisición de Datos | 72 |
| Figura 3.15. Bloque de Osciloscopio | 74 |
| Figura 3.16. Interfaz de Parámetros del Bloque de Osciloscopio | 75 |
| Figura 3.17. Bloque Tres Tanques..... | 77 |
| Figura 3.18. Bloque Monoestable | 80 |
| Figura 3.19. Interfaz de Parámetros del Bloque Monoestable Pulsador MARCHA | 81 |
| Figura 3.20. Bloque de Retardo de Transporte de Señal..... | 82 |
| Figura 3.21. Interfaz de Parámetros del Bloque de Retardo de Transporte de Señal..... | 83 |
| Figura 3.22. Bloque de Configuración OPC..... | 84 |
| Figura 3.23. Interfaz de Parámetros del Bloque de Configuración OPC..... | 86 |
| Figura 3.24. Interfaz de Parámetros del Administrador de Clientes OPC | 88 |
| Figura 3.25. Bloque de Escritura OPC..... | 89 |
| Figura 3.26. Interfaz de Parámetros del Bloque OPC Write | 90 |

| | |
|--|-----|
| Figura 3.27. Interfaz de Parámetros del Bloque OPC Write1..... | 92 |
| Figura 3.28. Interfaz de Parámetros del Bloque OPC Write2..... | 93 |
| Figura 3.29. Interfaz de Parámetros del Bloque OPC Write3..... | 95 |
| Figura 3.30. Bloque de Lectura OPC | 96 |
| Figura 3.31. Interfaz de Parámetros del Bloque OPC Read | 98 |
| Figura 3.32. Interfaz de Parámetros del Bloque OPC Read1 | 101 |
| Figura 3.33. Interfaz de Parámetros del Bloque OPC Read2 | 103 |
| Figura 3.34. Bloque Subsystem | 105 |
| Figura 3.35. Bloque de Polinomio | 108 |
| Figura 3.36. Interfaz de Parámetros del Bloque Polynomial | 110 |
| Figura 3.37. Interfaz de Parámetros del Bloque Polynomial1 | 111 |
| Figura 3.38. Interfaz de Parámetros del Bloque Polynomial2 | 112 |
| Figura 3.39. Bloque de Función de Transferencia | 113 |
| Figura 3.40. Interfaz de Configuración de Parámetros de Simulación | 115 |
| Figura 3.41. Ambiente de Trabajo de MATLAB posterior a la Simulación para la Adquisición de Datos..... | 118 |
| Figura 3.42. Adquisición de Datos para la Identificación de la Planta..... | 119 |
| Figura 3.43. Detalle de las Alturas Promedio Máximas y Mínimas de H3... | 120 |
| Figura 3.44. Invocación de la Herramienta IDENT en MATLAB | 121 |
| Figura 3.45. Interfaz Gráfica del Usuario (GUI) de la Herramienta IDENT . | 122 |
| Figura 3.46. Importación de Datos en el Dominio del Tiempo | 123 |
| Figura 3.47. Muestra del Formato de la Variable Adq_Data | 124 |
| Figura 3.48. Importación de Datos para la Identificación | 125 |
| Figura 3.49. Conjunto de Datos Importados MYDATA en IDENT | 127 |
| Figura 3.50. Gráfica en el Tiempo de los Datos Importados MYDATA | 127 |
| Figura 3.51. Comando para la Selección del Rango de Trabajo..... | 129 |
| Figura 3.52. Ventana para la Selección del Rango de Trabajo para Identificación..... | 130 |
| Figura 3.53. Rango de Trabajo para Identificación MYDATAE en IDENT .. | 131 |
| Figura 3.54. Gráfica en el Tiempo del Rango de Trabajo MYDATAE | 132 |
| Figura 3.55. Comando para la Remoción del Promedio del Rango de Trabajo | 134 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.56. Rango de Trabajo sin Promedio para Identificación MYDATAED en IDENT | 135 |
| Figura 3.57. Gráfica en el Tiempo del Rango de Trabajo sin Promedio MYDATAED | 136 |
| Figura 3.58. Ventana para la Selección del Rango de Trabajo para Validación | 137 |
| Figura 3.59. Gráfica en el Tiempo del Rango de Trabajo para Validación MYDATAV..... | 138 |
| Figura 3.60. Gráfica en el Tiempo del Rango de Trabajo para Validación sin Promedio MYDATAVD..... | 139 |
| Figura 3.61. Gráfica en el Tiempo de los Rangos de Trabajo MYDATAED y MYDATAVD | 140 |
| Figura 3.62. Conjuntos de Datos MYDATAED y MYDATAVD y Comando para la Identificación | 141 |
| Figura 3.63. Métodos Disponibles para la Identificación de Sistemas en IDENT | 142 |
| Figura 3.64. Cuadro de Diálogo de Process Models..... | 143 |
| Figura 3.65. Cuadro de Diálogo de Process Models y Resultados de la Identificación..... | 146 |
| Figura 3.66. Resultados de la Identificación P3 en IDENT | 148 |
| Figura 3.67. Gráfica de Validación del Modelo Identificado P3..... | 149 |
| Figura 3.68. Ambiente de Trabajo de MATLAB posterior a la Identificación de la Planta..... | 150 |
| Figura 3.69. Muestra de la Variable P3..... | 151 |
| Figura 3.70. Función zpk aplicada a la Variable P3 | 152 |
| Figura 3.71. Función tf aplicada a la Variable P3..... | 153 |
| Figura 3.72. Diagrama de Bloques de un Controlador PID..... | 157 |
| Figura 3.73. Invocación de la Herramienta SISOTOOL en MATLAB..... | 169 |
| Figura 3.74. Ventana de Control and Estimation Tools Manager..... | 170 |
| Figura 3.75. Arquitectura de Control Utilizada | 172 |
| Figura 3.76. Ventana de Ajuste Gráfico de SISOTOOL..... | 173 |
| Figura 3.77. Lugar Geométrico de una Función de Transferencia con 3 Polos Diferentes..... | 174 |
| Figura 3.78. Creación de Nuevos Requisitos de Diseño en SISOTOOL | 175 |

| | |
|--|-----|
| Figura 3.79. Cuadro de Diálogo para la Especificación del Tiempo de Estabilización | 176 |
| Figura 3.80. Lugar Geométrico con la Especificación del Tiempo de Estabilización | 177 |
| Figura 3.81. Cuadro de Diálogo para la Especificación del Sobrenivel Porcentual..... | 177 |
| Figura 3.82. Lugar Geométrico con la Especificación del Sobrenivel Porcentual..... | 178 |
| Figura 3.83. Inclusión del Integrador en el Diseño del Controlador | 179 |
| Figura 3.84. Alteración del Lugar Geométrico por la Inclusión del Integrador | 180 |
| Figura 3.85. Inclusión de un Cero Real en el Diseño del Controlador | 181 |
| Figura 3.86. Ubicación del Primer Cero en la Posición del Polo Dominante | 182 |
| Figura 3.87. Alteración del Lugar Geométrico por la Inclusión del Primer Cero | 183 |
| Figura 3.88. Ubicación del Segundo Cero en la Posición Elegida | 185 |
| Figura 3.89. Alteración del Lugar Geométrico por la Inclusión del Segundo Cero | 186 |
| Figura 3.90. Alteración del Lugar Geométrico por el Reposicionamiento del Segundo Cero..... | 187 |
| Figura 3.91. Ubicación del Segundo Cero Reposicionado..... | 188 |
| Figura 3.92. Reubicación de las Raíces por la Modificación de la Ganancia | 189 |
| Figura 3.93. Vista Ampliada de la Reubicación de las Raíces..... | 190 |
| Figura 3.94. Valor de la Ganancia Modificada | 191 |
| Figura 3.95. Invocación de la Herramienta de Respuesta a la Señal Escalón en SISOTOOL..... | 193 |
| Figura 3.96. Ventana del LTI Viewer de MATLAB | 195 |
| Figura 3.97. Invocación del Comando de Características de la Curva de Respuesta..... | 196 |
| Figura 3.98. Características de la Curva de la Respuesta Simulada..... | 197 |
| Figura 3.99. Invocación del Comando de Exportación del Diseño de Controladores | 199 |
| Figura 3.100. Cuadro de Diálogo del Comando de Exportación del Diseño de Controladores | 200 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.101. Ambiente de Trabajo de MATLAB posterior al Desarrollo del Controlador | 200 |
| Figura 3.102. Cálculo de los Parámetros del Controlador PID..... | 202 |
| Figura 3.103. Modelo para la Simulación sobre la Función de Transferencia del Tercer Tanque..... | 205 |
| Figura 3.104. Interfaz Gráfica del Bloque de Ganancia Variable del Nivel de Referencia..... | 206 |
| Figura 3.105. Interfaz de Parámetros del Bloque Generador de Señales para la Simulación sobre la Función de Transferencia del Tercer Tanque | 208 |
| Figura 3.106. Bloque Controlador PID | 210 |
| Figura 3.107. Estructura Interna del Bloque Controlador PID | 210 |
| Figura 3.108. Interfaz de Parámetros del Bloque controlador PID..... | 211 |
| Figura 3.109. Bloque de Exportación de Datos al Espacio de Trabajo | 213 |
| Figura 3.110. Vista de la Simulación sobre la Función de Transferencia del Tercer Tanque | 215 |
| Figura 3.111. Ambiente de Trabajo de MATLAB posterior a la Simulación sobre la Función de Transferencia del Tercer Tanque | 216 |
| Figura 3.112. Resultados de la Simulación sobre la Función de Transferencia del Tercer Tanque..... | 217 |
| Figura 3.113. Modelo para la Simulación sobre el Modelado Matemático No Lineal de la Planta | 219 |
| Figura 3.114. Bloque de Inicialización | 221 |
| Figura 3.115. Interfaz de Parámetros del Bloque de Inicialización de los Modelos Matemáticos de la Planta | 221 |
| Figura 3.116. Ambiente de Trabajo de MATLAB posterior a la Evaluación del Bloque de Inicialización..... | 223 |
| Figura 3.117. Bloque TresTanques_NL | 224 |
| Figura 3.118. Interfaz de Parámetros del Bloque K_U | 227 |
| Figura 3.119. Estructura Interna del Bloque Tanque 1 No Lineal | 229 |
| Figura 3.120. Interfaz de Parámetros del Bloque Tanque 1 | 229 |
| Figura 3.121. Estructura Interna del Bloque Valvula 1-2..... | 231 |
| Figura 3.122. Interfaz de Parámetros del Bloque Valvula 1-2..... | 232 |
| Figura 3.123. Estructura Interna del Bloque Valvula 3..... | 235 |
| Figura 3.124. Interfaz de Parámetros del Bloque Valvula 3..... | 235 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.125. Vista de la Simulación sobre el Modelo Matemático No Lineal de la Planta..... | 237 |
| Figura 3.126. Ambiente de Trabajo de MATLAB posterior a la Simulación sobre el Modelo Matemático No Lineal de la Planta..... | 237 |
| Figura 3.127. Resultados de la Simulación sobre el Modelo Matemático No Lineal de la Planta..... | 238 |
| Figura 3.128. Vista Ampliada de los Resultados de la Simulación sobre el Modelo Matemático No Lineal de la Planta..... | 239 |
| Figura 3.129. Modelo para la Simulación sobre el Modelado Matemático Linealizado de la Planta..... | 241 |
| Figura 3.130. Bloque TresTanques_Lin_CL..... | 242 |
| Figura 3.131. Bloque de Ganancia..... | 244 |
| Figura 3.132. Estructura Interna del Bloque Tanque 1 Linealizado..... | 246 |
| Figura 3.133. Estructura Interna del Bloque Tanque 2 Linealizado..... | 247 |
| Figura 3.134. Estructura Interna del Bloque Tanque 3 Linealizado..... | 248 |
| Figura 3.135. Vista de la Simulación sobre el Modelo Matemático Linealizado de la Planta..... | 249 |
| Figura 3.136. Ambiente de Trabajo de MATLAB posterior a la Simulación sobre el Modelo Matemático Linealizado de la Planta..... | 250 |
| Figura 3.137. Resultados de la Simulación sobre el Modelo Matemático Linealizado de la Planta..... | 251 |
| Figura 3.138. Vista Ampliada de los Resultados de la Simulación sobre el Modelo Matemático Linealizado de la Planta..... | 252 |
| Figura 3.139. Ilustración de los Efectos de la Saturación y las Acciones del Controlador..... | 261 |
| Figura 3.140. Modelo para la Implementación del Controlador PID Desarrollado sobre la Planta..... | 263 |
| Figura 3.141. Interfaz de Parámetros del Bloque de Inicialización del Modelo para la Implementación del Controlador PID Desarrollado sobre la Planta..... | 265 |
| Figura 3.142. Bloque Controlador PID con Anti Wind-Up..... | 266 |
| Figura 3.143. Bloque de Función Embebida de MATLAB..... | 270 |
| Figura 3.144. Código para la Etapa “Anti Wind-Up” del Controlador PID Desarrollado..... | 271 |
| Figura 3.145. Histograma del Voltaje DC que se aplica al Variador de Frecuencia..... | 273 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.146. Bloque Derivativo..... | 276 |
| Figura 3.147. Bloque Integrador | 276 |
| Figura 3.148. Bloque de Saturación..... | 278 |
| Figura 3.149. Interfaz de Parámetros del Bloque de Saturación..... | 279 |
| Figura 3.150. Bloque de Visualización..... | 281 |
| Figura 3.151. Estado Estable de la Altura de las Columnas de Agua en el Nivel de Referencia..... | 283 |
| Figura 4.1. Ambiente de Trabajo de MATLAB posterior a la Implementación del Controlador PID Desarrollado sobre la Planta | 287 |
| Figura 4.2. Resultados de la Implementación del Controlador PID Desarrollado sobre la Planta..... | 287 |
| Figura 4.3. Vista Ampliada de los Resultados de la Implementación del Controlador PID Desarrollado sobre la Planta | 289 |
| Figura 4.4. Interfaz de Parámetros del Bloque de Inicialización del Modelo para la Implementación del Controlador PID Ajustado sobre la Planta..... | 297 |
| Figura 4.5. Ambiente de Trabajo de MATLAB posterior a la Implementación del Controlador PID Ajustado sobre la Planta..... | 299 |
| Figura 4.6. Resultados de la Implementación del Controlador PID Ajustado sobre la Planta | 300 |
| Figura 4.7. Filtrado de los Datos Adquiridos de la altura de la columna de agua del Tercer Tanque para la Minimización del Ruido | 302 |
| Figura 4.8. Análisis de los Resultados de la Implementación del Controlador PID Ajustado sobre la Planta | 304 |
| Figura 4.9. Función margin aplicada a la Variable G | 318 |
| Figura 4.10. Márgenes de Ganancia y Fase de la Función de Transferencia Identificada de la Planta..... | 319 |
| Figura 4.11. Estabilización de la Función de Transferencia Identificada de la Planta..... | 321 |
| Figura 4.12. Función margin aplicada a la Variable G_estable..... | 322 |
| Figura 4.13. Márgenes de Ganancia y Fase de la Función de Transferencia Identificada Estable de la Planta..... | 323 |
| Figura 4.14. Código para Calcular Controladores PID según Índices de Comportamiento y Simular su Respuesta al Escalón Unitario | 324 |
| Figura 4.15. Simulación de Respuesta al Escalón Unitario de los Controladores PID Calculados y del Controlador PID Ajustado..... | 325 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.16. Interpretación Gráfica de la Integral de una Función | 327 |
| Figura 4.17. Código para Calcular y Graficar el Criterio IAE de los Controladores PID | 330 |
| Figura 4.18. Gráfica del Valor Absoluto del Error Actuante de los Controladores PID | 331 |
| Figura 4.19. Gráfica del Criterio IAE de los Controladores PID | 332 |
| Figura 4.20. Cálculo del Criterio IAE de los Controladores PID | 333 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 1.1. Señales conectadas a la Tarjeta CB-68LPR | 32 |
| Tabla 3.1. Resumen de las Especificaciones de Diseño del Controlador ... | 168 |
| Tabla 3.2. Nomenclatura de los Elementos del Lazo de Control | 171 |
| Tabla 3.3. Comparación de los Resultados del Desarrollo del Controlador | 198 |
| Tabla 3.4. Parámetros del Controlador PID Desarrollado..... | 212 |
| Tabla 3.5. Comparación de los Resultados de la Simulación sobre la Función de Transferencia del Tercer Tanque..... | 218 |
| Tabla 3.6. Comparación de los Resultados de la Simulación sobre el Modelo Matemático No Lineal de la Planta | 240 |
| Tabla 3.7. Comparación de los Resultados de la Simulación sobre el Modelo Matemático Linealizado de la Planta | 253 |
| Tabla 3.8. Análisis Estadístico de los Resultados de las Simulaciones de Prueba | 256 |
| Tabla 3.9. Distribución de Frecuencias del Voltaje DC aplicado al Variador de Frecuencia | 274 |
| Tabla 3.10. Comparación de la Operación de la Planta en Estado Estable | 283 |
| Tabla 4.1. Comparación de los Resultados de la Implementación del Controlador PID Desarrollado sobre la Planta | 291 |
| Tabla 4.2. Efectos del Incremento Independiente de los Parámetros de un Controlador PID | 294 |
| Tabla 4.3. Comparación del Ajuste de los Parámetros del Controlador PID Desarrollado..... | 296 |
| Tabla 4.4. Comparación de los Resultados de la Implementación del Controlador PID Ajustado sobre la Planta..... | 306 |
| Tabla 4.5. Valores de los Parámetros Característicos de la Curva de Respuesta Simulada de los Controladores PID | 326 |
| Tabla 4.6. Criterio IAE y Porcentaje de Rendimiento de los Controladores PID | 334 |
| Tabla 4.7. Análisis Comparativo de los Parámetros Característicos de la Curva de Respuesta y del Criterio IAE de los Controladores PID..... | 336 |

INTRODUCCIÓN

En la mayoría de los ambientes industriales y en otros entornos como el educativo, en el cual hay laboratorios didácticos que permiten poner en práctica los conocimientos teóricos adquiridos, existe maquinaria o sistemas de trabajo de diversa naturaleza. Estos sistemas de trabajo pueden ser categorizados de acuerdo a varios factores que los caractericen y los distingan unos de otros, permitiendo agruparlos bajo diferentes criterios como similitudes o aplicaciones. Entre una de las tantas clasificaciones existentes, los sistemas pueden clasificarse básicamente en dos grandes grupos: los sistemas lineales y los sistemas no lineales. Algunos, tienen que ser supervisados cuando realizan una tarea específica, independientemente del grupo al que pertenezcan, y casi todos tienen que ser controlados cuando han sido diseñados para trabajar automáticamente.

La nueva planta de tres vasos comunicantes, construida para el Laboratorio de Control Automático de la FIEC, que es el objeto de estudio en este Proyecto de Graduación para ser analizado y controlado, es un sistema no lineal y de tercer orden, y para efectos de su estudio, es inherente el control sobre el mismo. El sistema es no lineal ya que las expresiones matemáticas de algunas variables físicas involucradas como la altura de la columna de agua en los tanques, no son lineales: contienen una raíz cuadrada en su

cálculo. Por otro lado, es un sistema de tercer orden al haber tres tanques, y se corre el riesgo de caer fácilmente en una zona de inestabilidad, en la que se perdería la controlabilidad sobre el sistema produciendo resultados totalmente indeseados. Esto motiva a desarrollar el controlador de una manera especial, no convencional, y tener posteriores ajustes finos, hasta lograr la idoneidad de un controlador PID que pueda gobernar con buenos resultados esta planta de tercer orden. Pero dada su naturaleza, esta planta no puede ser controlada directamente aplicando las técnicas de control de sistemas lineales conocidas, aun siendo éstas las más difundidas.

El enfoque que se ha decidido es el de desarrollar un controlador PID para que la gobierne. Sin embargo, los controladores PID tienen sus limitaciones, como por ejemplo: no garantizar la estabilidad en todos los sistemas en que se implementan; no proporcionar un control óptimo sobre el sistema (mantener el control aun cuando éste cambie o evolucione en el tiempo); la limitación de ser lineales, por lo que su aplicación a sistemas no lineales puede ser variable, errática o totalmente inesperada; y el hecho que el ruido de las señales a controlar pueden afectar a la respuesta del sistema debido a la parte derivativa, que ante las oscilaciones propias del ruido, pueden producir cambios demasiado bruscos en la señal de salida del sistema. Son estas limitaciones las que hacen que el desarrollo de un controlador PID para

la nueva planta de tres vasos comunicantes se convierta en un verdadero desafío.

La presentación y descripción de la nueva planta de tres vasos comunicantes, todos los pasos previos al desarrollo y el desarrollo del controlador en sí, la implementación del mismo, los ajustes que se le realicen en caso de ser necesario, y los resultados de la operación de la planta con el controlador implementado serán debida y exhaustivamente explicados e ilustrados durante el progreso del desarrollo de este Proyecto de Graduación.

CAPÍTULO 1

1. DISEÑO DE LA PLANTA

1.1. Descripción de la Planta

La planta de tres vasos comunicantes se compone de siete partes que son: el sistema de vasos comunicantes, el reservorio, la red de tuberías, el panel eléctrico, los sensores, el actuador, y la estructura de soporte.

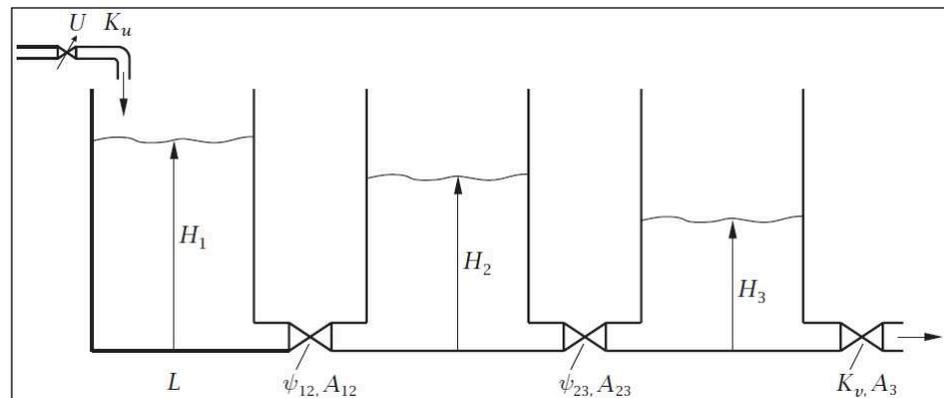


Figura 1.1. Esquema del Sistema de Vasos Comunicantes [1]

El proceso de la planta de tres vasos comunicantes se basa completamente en la representación del modelo físico de la misma, mostrado en la Figura 1.1.

El sistema de vasos comunicantes se llena de agua a través del primer tanque desde el reservorio gracias al actuador: una bomba alimentada eléctricamente por un variador de frecuencia ubicado en el panel eléctrico, que permite modular la velocidad de la bomba, y en consecuencia, el caudal enviado a los tanques.

La red de tuberías permite el llenado de los tres tanques interconectados por válvulas, y también el retorno de agua desde el tercer tanque para mantener el nivel de agua en los mismos gracias a la acción de control del variador de frecuencia sobre la bomba.

Los sensores ubicados en cada uno de los tanques, transmiten la presión de la columna de agua presente en cada uno de ellos como una señal proporcional de corriente eléctrica, que es transformada en altura en centímetros por medio de un modelo en SIMULINK de MATLAB.

La altura de la columna de agua que se obtiene del tercer tanque, es la variable controlada que se mide y compara contra la referencia definida en el modelo anteriormente mencionado.

A partir de la identificación de la planta utilizando la herramienta IDENT, se desarrolla un controlador PID en la herramienta SISOTOOL, ambas de MATLAB.

Éste se encarga de enviar los cambios de voltaje a ser aplicados a la bomba a través del variador de frecuencia, para que el nivel de agua en el tercer tanque llegue y se mantenga en el nivel de referencia especificado, de acuerdo a la comparación con el nivel obtenido desde los sensores.

Con esto se cierra el ciclo, y la planta se mantiene en operación ubicando siempre el nivel de agua en los tanques según la referencia definida.



Figura 1.2. Vista Frontal de la Planta

Las vistas del diseño de la planta se encuentran en el Anexo A.

1.2. Diseño de la Parte Hidráulica

La parte hidráulica está constituida por el sistema de vasos comunicantes, el reservorio y la red de tuberías.

1.2.1. Diseño de Tanques y Reservorio

El sistema de vasos comunicantes está constituido por tres tanques interconectados de idénticas dimensiones. Cada uno de ellos mide 70[cm] de alto, 15[cm] de ancho y 15[cm] de fondo, dando un volumen de 15750[cm³] equivalentes a una capacidad de 15.75 litros.

El criterio para el diseño de los tanques con estas medidas, está íntimamente relacionado con el diseño del reservorio.

En primer lugar, al tratarse de tres tanques, se buscó diseñar los mismos de manera que su medida derive en un volumen que pueda ser llenado en un tiempo que no sea extremadamente largo, y que permita tener una ventana de trabajo que no se vea limitada porque el tiempo de llenado sea muy corto, lo cual significaría que las dimensiones de diseño de los tanques son pequeñas.

Y en segundo lugar, asumiendo que los tanques estuvieran llenos a su máxima capacidad (lo cual no sucedería según se ha concebido el funcionamiento de la planta), esto significaría

un volumen de 47250[cm³] de agua. Esta va a ser la referencia para el dimensionamiento del reservorio.

Cada tanque tiene un visor del nivel de agua protegido por una pieza plástica en forma de U, un desfogue en el fondo de 1/2[pul] para vaciar el agua por medio de una válvula de bola de acción rápida y operación manual (elemento que será descrito más adelante), y una tapa con un respiradero de 1/2[pul] para evitar que se produzca presión de gases al interior del tanque.

Las tapas de los tanques están provistas de una tira de material antideslizante adherida a su cara inferior, que al hacer contacto con la parte superior de cada tanque, las mantiene más firmemente en su posición.

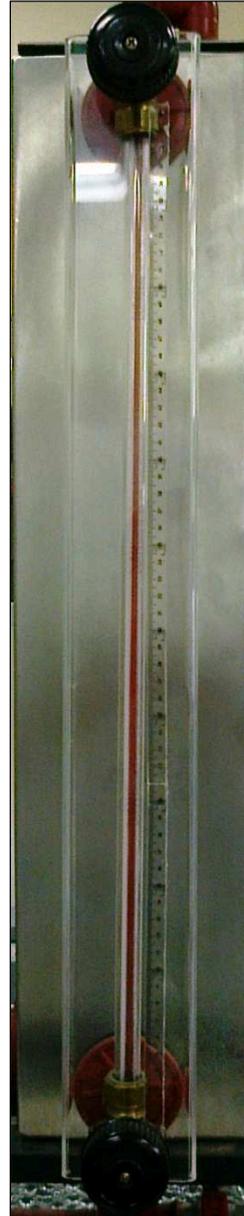


Figura 1.3. Vista Frontal de un Tanque

Además, cada uno de los tanques tiene en su parte posterior, un sensor de presión a la altura de las tuberías de interconexión entre ellos, punto escogido como la altura

basal de los mismos y ubicado a exactamente 4[cm] de su base, para medir la presión y consiguientemente la altura de la columna de agua en el tanque con respecto a este punto (mediante una relación matemática implementada en el modelo SIMULINK de MATLAB, que convierte la lectura de la corriente que produce la presión de la columna de agua en el tanque sobre el sensor, para obtener la altura de la misma; este cálculo se lo detalla en el Anexo F).



Figura 1.4. Vista del Sensor de Presión

Como el primer tanque es por donde ingresa el agua al sistema, tiene instalado como elemento adicional un dispositivo de protección anti-rebose, basado en dos boyas que conectan o desconectan su interruptor dependiendo del nivel de agua presente en el tanque.



Figura 1.5. Dispositivo Anti-Rebose

Se ha configurado para que el interruptor permanezca conectado mientras la altura del nivel de agua sea inferior a 55[cm], medidos a partir de la altura basal del tanque, dejando una holgura de 11[cm] del borde superior del mismo. Cuando el agua alcanza esta altura, las boyas han subido por acción del nivel de agua presente, el interruptor se

desconecta a la altura descrita abriendo el circuito eléctrico, y la bomba se apaga, por lo que inmediatamente la operación de la misma se detiene y el suministro de agua se corta, evitando que el tanque se llene y se produzca un desbordamiento.



Figura 1.6. Vista del Dispositivo Anti-Rebose

El reservorio, mide 50[cm] de alto, 1.50[m] de ancho y 50[cm] de fondo, dando un volumen de 375000[cm³] equivalentes a una capacidad de 375 litros.

Está conectado directamente a la bomba y tiene un respiradero lateral de 1/2[pul] para evitar que se produzca

presión de gases al interior del reservorio, un desfogue de 1/2[pul] para vaciarlo cuando se requiera cambio de agua (centrado cerca del borde inferior de una de sus caras laterales), y una tapa para evitar que el agua acumule impurezas, minimizando el depósito de sedimentos.

El tamaño del reservorio es relativamente grande con respecto al tamaño de los tanques del sistema de vasos comunicantes, y se debe a que de esta manera, se trata de garantizar que el régimen de trabajo de la bomba sea constante, o que varíe de manera despreciable.

Por este motivo, en una de las caras frontales del reservorio se adecuó un visor del nivel de agua con termómetro incluido, que funciona como medidor del nivel de referencia, con el fin de comprobar que el nivel de agua en el reservorio sea el adecuado según lo explicado.

El nivel de referencia escogido es la línea negra en la parte superior del visor del nivel de agua del reservorio, que se muestra en la fotografía a continuación:



Figura 1.7. Visor del Nivel de Agua del Reservorio

En este punto se retoma el caso virtual que los tres tanques estén totalmente llenos, ocupando un volumen de $47250[\text{cm}^3]$ de agua, lo cual significaría el 12.6% de la capacidad del reservorio.

Dado el dispositivo anti-rebose instalado, ningún tanque se llenará más arriba de $55[\text{cm}]$. Si este fuera el caso para los tres tanques, estarían ocupando un volumen de $37125[\text{cm}^3]$ de agua, equivalente al 9.9% de la capacidad del reservorio.

Este escenario, significaría una variación de 4.95[cm] del nivel de agua del mismo, el cual siempre va a ser menor, ya que la altura de la columna de agua de los tanques no va a alcanzar valores tan altos, ni va a ser igual en todos ellos al mismo tiempo.

Esto se lo comprobará más adelante en el Capítulo 3, cuando se estudie el comportamiento de la planta en estado estable.

Lo que se busca es que el régimen de trabajo de la bomba sea prácticamente constante, y con ello, que la función de transferencia de la planta no cambie dentro del rango de trabajo que se va a establecer.

Los tanques y el reservorio, se los mandó a construir en la compañía DIMETAL S.A., de acuerdo a las especificaciones expuestas.

1.2.2. Diseño de la Red de Tuberías

La red de tuberías de la que se compone la planta, forma un lazo cerrado de circulación de agua entre el reservorio, la bomba y el sistema de vasos comunicantes.

Hay una pequeña red independiente de 1/2[pul], que está formada por el desfogue de cada uno de los tanques del sistema de vasos comunicantes para su vaciado rápido, que van a una tubería común de tres secciones que recorre por debajo de ellos, desembocando en el reservorio.



Figura 1.8. Vista de la Red de Desfogue de los Tanques

Cada sección se une por medio de una válvula de bola de acción rápida. Las tres válvulas de esta tubería normalmente están cerradas.



Figura 1.9. Válvula de Bola

La red de tuberías inicia con el adaptador de 1 1/2[pul] entre el reservorio y la bomba: sale de ésta, y para tener una mayor ventana de trabajo, se hizo una derivación de 1[pul] a la salida de la bomba que retorna al reservorio, de manera que no toda el agua impulsada por la bomba ingresa al primer tanque superior, permitiendo así tener un rango de valores más amplio para trabajar.



Figura 1.10. Vista de la Derivación a la Salida de la Bomba

Esta derivación tiene una válvula de bola de acción rápida, en caso de que se desee variar la ventana de trabajo, pero su estado predeterminado es que esté totalmente abierta.

El primer tanque tiene una tubería de 1 [pul] ubicada en una de sus caras laterales cerca del borde superior, por donde se alimenta el agua al mismo y por medio de las interconexiones de los tanques, a todo el sistema de vasos comunicantes.

Las tuberías de interconexión de los tanques son de 3/4[pul], unidas por una válvula de bola, y están ubicadas en las caras laterales de los mismos, cerca de su borde inferior.

La última tubería, también de 3/4[pul], interconecta por medio de otra válvula de bola, la salida del tercer tanque con el reservorio (como realimentación del agua), llegando a este último en el centro cerca del borde superior de una de sus caras laterales.



Figura 1.11. Vista del Retorno del Tercer Tanque al Reservorio

Estas interconexiones son las que dan origen al sistema de vasos comunicantes.

El arreglo de la apertura de las válvulas de las tuberías de interconexión de los tanques es el siguiente: el estado predeterminado de la válvula ubicada entre el primer y segundo tanque, es totalmente abierta. La válvula ubicada entre el segundo y el tercer tanque, está ligeramente cerrada (girada un ángulo de 17° con respecto a la posición totalmente abierta; reduciendo aproximadamente al 80% del valor original del área transversal para el paso de agua). La válvula ubicada en el camino entre el tercer tanque y el reservorio, está cerrada aproximadamente a la mitad (girada un ángulo de 39° con respecto a la posición totalmente abierta, reduciendo al 50% del valor original del área transversal para el paso de agua).

Este arreglo fue determinado de manera experimental, y escogido según lo explicado previamente, para lograr que la altura de las columnas de agua en los tanques se visualice de forma escalonada entre cada uno de ellos, de manera que la altura de la columna de agua del tanque central, sea aproximadamente el promedio de la altura de las columnas de agua de los tanques en los extremos.

Para más información acerca de estos cálculos, refiérase al Proyecto de Graduación “Análisis Comparativo del Funcionamiento de Dos Sistemas de Control Automático de Nivel de Agua en una Planta de Tres Vasos Comunicantes, diseñados aplicando los Métodos de Control de Reubicación de Polos del Modelo Interno y de Lógica Difusa, diseñados e implementados usando MATLAB/SIMULINK”, desarrollado por Franklin Ilich Kuonquí Gaínza.

1.3. Diseño de la Parte Eléctrica

La parte eléctrica está constituida por el panel eléctrico, los sensores y los actuadores.

El panel eléctrico contiene los elementos y equipos para la puesta en marcha y el control de la planta. Su diseño fue concebido con la idea de tener una planta funcional y confiable ante cualquier anomalía de naturaleza eléctrica, y se lo mandó a construir en la compañía CORPECEL S.A., de acuerdo a las especificaciones detalladas a continuación.

La caja metálica del panel mide 70[cm] de alto, 25[cm] de ancho y 25[cm] de fondo. Tiene una puerta frontal abatible hacia la izquierda,

con un visor de acrílico de 42[cm] de alto y 16[cm] de ancho. Está construida de plancha de hierro negro de 1.4[mm] de espesor, con capa de pintura electrostática horneable de epoxi-poliéster color beige.



Figura 1.12. Vista Frontal del Panel Eléctrico

El circuito eléctrico del panel se divide en la parte del circuito de fuerza y la del circuito de control.

El circuito de fuerza es el principal, es la razón de ser de la planta, pues lo constituyen todos los elementos de alta demanda energética

por los cuales pasa directamente la corriente del dispositivo que se va a controlar.

El circuito de control es el cableado auxiliar que interconecta todos los elementos de control, por donde no pasa la corriente del dispositivo que se va a controlar. Su función principal es gobernar el circuito de fuerza.

Casi todos los elementos del circuito de fuerza se encuentran dentro del panel, mientras que la gran mayoría de los elementos del circuito de control se encuentran fuera del panel.

Para el diseño de la parte eléctrica, se desarrolló un sistema robusto, que esté en la capacidad de responder rápida y eficazmente ante fallas de la red eléctrica a la que la planta se conecta, proporcionando una protección sólida para todos los equipos de la planta. Por esto, tanto para el circuito de control como para el de fuerza, se utilizan fusibles en vez de disyuntores (breakers) como elementos de protección contra cortocircuitos, puesto que los fusibles actúan más rápidamente que los disyuntores, y en caso de requerirse un cambio, se lo puede hacer muy fácilmente y son económicos. Con los disyuntores ocurre lo

contrario, son de acción lenta y son dispositivos mecánicos que pueden sufrir desgaste con el tiempo, y su reemplazo es más complicado y costoso.

Los diagramas de fuerza y control del panel eléctrico se encuentran en el Anexo C.

1.3.1. Diseño de la Etapa de Fuerza

En uno de los costados del panel, se encuentra el interruptor principal, de dos posiciones (encendido y apagado), que energiza todos los equipos y controles de la planta.

Dentro del panel, se encuentran todos los elementos de protección que se determinaron convenientes para los equipos: los fusibles de fuerza ubicados en sus respectivos portafusibles, un contactor y un relevador térmico o guardamotor.

El contactor es un dispositivo cuya función más general es la de establecer e interrumpir repetidamente el flujo de corriente en un circuito, con la posibilidad de hacer esto a distancia o remotamente. Esto nos permite realizar dos funciones

básicas: energizar y desenergizar el circuito de fuerza, y está diseñado para realizar un número elevado de operaciones, a diferencia de otros circuitos con similares prestaciones, como un disyuntor. Por lo general, suele darse que el contactor viene equipado con un contacto auxiliar, que no está diseñado para soportar niveles de corriente del circuito de fuerza, sino que soporta el nivel de corriente del circuito de control. La utilidad de ese contacto auxiliar es para ayudar a manejar el control o una parte del circuito de control.

El relevador térmico, también llamado guardamotor, es un dispositivo sensor de temperatura de los conductores eléctricos, especialmente diseñado para la protección de bombas y motores contra sobrecargas o también llamadas sobrecorrientes, es decir una elevación de corriente por encima de los niveles normales establecidos. Se denomina relevador térmico porque es un relevador que opera por elevación de temperatura, sensando sobrecorrientes que producen calor en el cableado y, con esto, en el dispositivo, ya sea por consumo de corriente mayor de lo normal, o por la falla o caída de una o más fases donde se necesita compensar la pérdida de corriente, aumentando la corriente

que fluye por las fases que queden activas. El relevador percibe el exceso de corriente indirectamente, a través de la elevación de la temperatura en el cableado, y produce el accionamiento de uno o más contactos auxiliares. Cuando en el relevador sobrepasa el nivel de corriente establecido como normal, el relevador opera pero no en forma inmediata sino con un retardo, porque aunque haya una sobrecorriente, no se desconecta el circuito inmediatamente, pues la sobrecarga puede desaparecer. Esto se da si el tiempo que permanece la sobrecarga es tolerable, entonces el relevador no cambiará de estado sino que esperará, dando continuidad al servicio. Pero si la sobrecarga sigue por mucho tiempo, se podría entrar en una región crítica que cause mal funcionamiento o daños en los elementos y/o el cableado, entonces el relevador cambia de estado y procede a desconectar el circuito que está protegiendo.

El variador de frecuencia, también conocido como convertidor de frecuencia, es un dispositivo que está diseñado para regular la velocidad en motores trifásicos por medio del control de la frecuencia del voltaje de alimentación suministrado al motor, pudiendo ser utilizado tanto en

aplicaciones donde se encuentre aislado o integrado en sistemas de automatización.

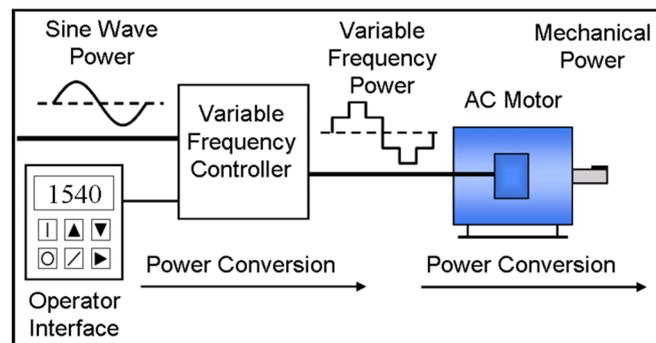


Figura 1.13. Diagrama de Bloques Simplificado de un Sistema Voltaje/Frecuencia

Fuera del panel, se tiene al actuador. Un actuador es un dispositivo capaz de transformar energía hidráulica, neumática o eléctrica en la activación de un proceso con la finalidad de generar un efecto sobre un proceso automatizado. Éste recibe la orden de un regulador o controlador y en función a ella genera la orden para activar un elemento final de control [2]. En esta planta, el actuador es una bomba centrífuga.

Una bomba centrífuga es un dispositivo constituido por un conjunto de paletas rotatorias perfectamente encajadas dentro de una cubierta metálica, de manera que son capaces de impulsar al líquido que esté contenido dentro de la cubierta, gracias a la fuerza centrífuga que se genera cuando giran las paletas [3].

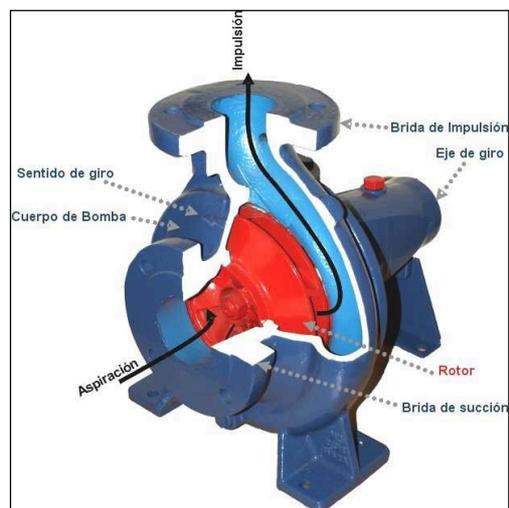


Figura 1.14. Partes de una Bomba Centrífuga

1.3.2. Diseño de la Etapa de Control

Dentro del panel, se encuentran los fusibles de control ubicados en sus respectivos portafusibles, encargados de proteger el circuito de control.

3 Introducción a las bombas centrífugas: <http://bombascentrifugas.info-tecnica.org/introduccion-a-las-bombas-centrifugas>, Fecha de consulta: Enero 2013

Sobre la puerta del panel, están colocadas 3 luces piloto de 22[mm] de diámetro, una de color rojo (indicando que la planta está energizada pero detenida), una de color verde (indicando que la planta está en funcionamiento) y una de color amarillo (indicando que la planta se ha detenido forzosamente debido a un disparo térmico). Así mismo, están colocados 2 pulsadores o botoneras, también de 22[mm] de diámetro, uno de color rojo (pulsador de paro) y uno de color verde (pulsador de marcha). Todos estos elementos están debidamente rotulados, con una leyenda que indica claramente sus respectivas funciones.



Figura 1.15. Vista de las Luces Piloto y Pulsadores

En uno de los costados del panel, se encuentra un selector de dos posiciones (para la selección del modo de funcionamiento, local o remoto), y la entrada de la tarjeta CB-68LPR de National Instruments. Esta tarjeta de

comunicación, conecta la planta con el cFP, constituyendo a este conjunto, como la interfaz de hardware entre el usuario y la planta.

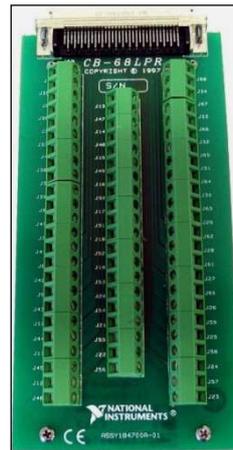


Figura 1.16. Tarjeta CB-68LPR de National Instruments

A continuación se muestra una tabla con el detalle de todas las señales conectadas a la tarjeta CB-68LPR, para la interacción entre el usuario y la planta, a través del cFP:

| MÓDULO | NOMBRE SEÑAL | CANAL | RANGO | TIPO SEÑAL | COLOR CABLE | BORNERA |
|-------------|---------------|-------|-------------------------|------------------|-------------|---------|
| cFP-AO-210 | Voltaje_Bomba | 2 | 0-10.2[V] _{DC} | V _{OUT} | Rojo | 15 |
| | | | | COM | Negro | 16 |
| cFP-RLY-421 | Marcha_3T | 2 | 0-1 (Booleano) | NO | Rojo | 41 |
| | | | | IC | Negro | 42 |
| cFP-RLY-421 | Paro_3T | 3 | 0-1 (Booleano) | NO | Rojo | 23 |
| | | | | IC | Azul | 24 |
| cFP-RLY-421 | EncVf3T | 4 | 0-1 (Booleano) | NO | Rojo | 55 |
| | | | | IC | Azul | 56 |
| cFP-AI-100 | Presion1 | 5 | 0-0.024[A] | I _{IN} | Azul | 1 |
| | | | | COM | Negro | 2 |
| | | | | V _{SUP} | Rojo | 3 |
| cFP-AI-100 | Presion2 | 6 | 0-0.024[A] | I _{IN} | Azul | 4 |
| | | | | COM | Negro | 5 |
| | | | | V _{SUP} | Rojo | 6 |
| cFP-AI-100 | Presion3 | 7 | 0-0.024[A] | I _{IN} | Azul | 8 |
| | | | | COM | Negro | 9 |
| | | | | V _{SUP} | Rojo | 10 |

Tabla 1.1. Señales conectadas a la Tarjeta CB-68LPR

Estas conexiones se las puede apreciar en su correspondiente fotografía que se encuentra en el Anexo B.

Fuera del panel, el dispositivo de protección anti-rebose instalado en el primer tanque, se conecta desde los terminales A1 y A2 de su interruptor, que es de tipo normalmente cerrado, directamente al circuito de control del panel eléctrico.

Así, cuando las boyas han subido por acción del nivel de agua presente, el interruptor se desconecta abriendo el circuito eléctrico, y por consiguiente, se apaga la bomba.

Con esto, se causa el efecto de control deseado sobre la planta.

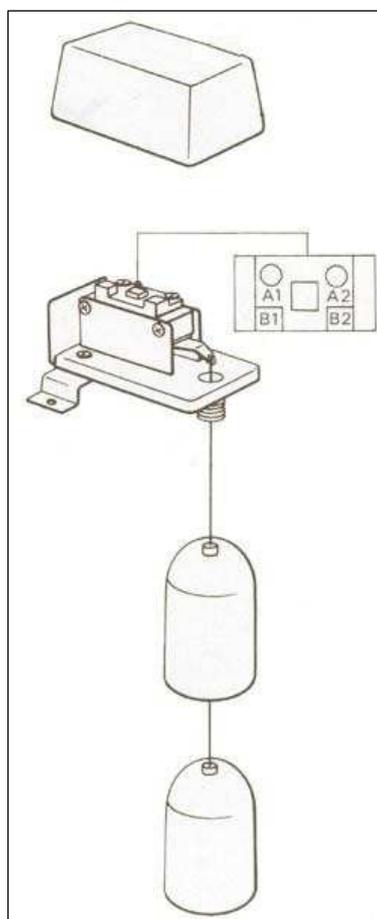


Figura 1.17. Esquema de Conectores e Instalación del Dispositivo Anti-Rebose

Este detalle se lo puede apreciar en el diagrama de control del panel eléctrico que se encuentra en el Anexo C.

También fuera del panel, se tiene a los sensores. Un sensor es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas que se quieren medir o controlar, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en una señal que facilita su medida. En esta planta, la variable de instrumentación que los sensores detectan, es la presión de la columna de agua presente en cada tanque. La señal a la que esta presión es transformada por los sensores, es una corriente eléctrica. Por esto, un sensor es un tipo de transductor.

1.4. Diseño de la Estructura de Soporte

La estructura de soporte mide 1.20[m] de alto, 1.60[m] de ancho y 70[cm] de fondo y está pintada de color gris oscuro. Tiene cuatro ruedas, una en cada esquina, para facilitar su transporte dentro del Laboratorio de Control Automático de la FIEC.

La estructura tiene dos niveles: un nivel inferior donde descansa el reservorio y donde está instalada la bomba, y un nivel superior a 70[cm], donde descansan el sistema de vasos comunicantes y el panel eléctrico.

El nivel superior se lo diseñó a dicha altura para dar cabida al reservorio de 50[cm] de alto y dejar espacio para las tuberías de desfogue rápido de los tres tanques.

El nivel superior tiene además, una barra de soporte que se eleva 50[cm] más, que sirve de apoyo y para asegurar la parte trasera de los tres tanques. Así, pueden mantener el equilibrio y permanecer erguidos de forma segura.

Las dimensiones de la estructura de soporte fueron determinadas en base a las dimensiones de los elementos de la planta a ser instalados: en el nivel inferior, la bomba y el reservorio; y en el nivel superior el panel eléctrico y los tres tanques, dejando el espacio correspondiente para las tuberías de interconexión de los tanques.

CAPÍTULO 2

2. CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA

2.1. Selección de Equipos

La selección de los equipos utilizados en la construcción de la planta, se la hizo teniendo en cuenta la manera de poder tener equipos de calidad en todos los aspectos y para todas las áreas de la misma, de acuerdo a lo más conveniente entre lo que normalmente se maneja en el mercado nacional ecuatoriano.

De igual manera se pensó para aquellos equipos que, al no ser comercializados localmente por tratarse de un nivel de especialidad no tradicional, sólo se los puede conseguir vía importación, como por ejemplo, los sensores de bajas presiones para cada tanque, que son de producción danesa.

También se creyó conveniente aprovechar algunos equipos que fueron adquiridos antes que la idea de este Proyecto de Graduación fuera concebida, como por ejemplo, el variador de frecuencia.

Finalmente, la planta no podía trabajar aislada en el entorno del Laboratorio de Control Automático de la FIEC con la infraestructura que éste cuenta actualmente, por lo que de manera indudable e inherente desde el inicio de su desarrollo, se tuvo presente su integración con el cFP para su operación y control, tanto de manera local como remota.

2.1.1. Sensores

Los sensores instalados en cada tanque, que son transmisores de presión para aplicaciones industriales, son de marca Danfoss, modelo MBS 4510, que se alimentan con $24[V]_{DC}$ y en respuesta ofrecen una salida lineal de corriente de 4 a 20[mA], equivalentes a una escala del 0 al 100% de la presión de trabajo presente sobre la membrana del sensor. La presión que mide es relativa o manométrica, es decir la diferencia entre la presión real o absoluta y la presión atmosférica, cuando se utiliza la presión atmosférica como nivel de referencia [4]. Su rango de medición es de 0 a 0.25[bar], es decir, bajas presiones (considerando que la presión de 1 bar equivale a casi una atmósfera de presión, exactamente 0.987[atm] o 14.504[PSI] para efectos de

4 Presión manométrica: http://es.wikipedia.org/wiki/Presi3n_manom3trica, Fecha de consulta: Enero 2013

comparación [5]), por lo cual su precisión es mayor que los sensores de aplicaciones generales, haciéndolo ideal para trabajar en esta planta.



Figura 2.1. Transmisor de Presión DANFOSS MBS 4510

2.1.2. Actuadores

La bomba instalada, que es una bomba centrífuga de acero inoxidable, es de marca GOULDS, modelo NPE 316L SS.



Figura 2.2. Bomba GOULDS NPE 316L SS

Esta bomba puede trabajar ya sea con una alimentación trifásica de 208 a 230 o de 460[V]_{AC}, consumiendo una corriente nominal de 2.8 a 2.7[A] o de 1.4[A] respectivamente, dependiendo del voltaje de entrada aplicado, puede proveer una potencia de hasta 3/4[HP] (559.275[W] o 0.56[KW]) y su rotor puede girar hasta 3450[RPM] cuando se aplica el voltaje máximo soportado.

Esta bomba es adecuada para esta planta, por los siguientes aspectos:

Su construcción de acero inoxidable garantiza que el agua permanezca limpia en el tanque reservorio, al no haber prácticamente ninguna corrosión en su interior que pueda ser arrastrada por el agua.

Funcionando con alimentación trifásica, ésta puede ser modificada por medio del variador de frecuencia, resultando en un cambio de voltaje de alimentación suministrado, aumentando o disminuyendo la velocidad de la misma con este cambio, para llegar al nivel de agua establecido como referencia, para causar el efecto de control deseado.

En la bomba se instaló un manómetro de Bourdon, el manómetro metálico más común. El rango de medición del manómetro instalado es de 0 a 30[PSI], y fue colocado para propósitos de control preventivo externo, al proveer información visual rápida de la presión interna del agua en la bomba, cuando está en funcionamiento.



Figura 2.3. Manómetro de Bourdon

2.1.3. Controles de Fuerza

El relevador térmico instalado es de marca General Electric, modelo RT-1K, regulable entre 2.5 y 4[A], adecuado para el modelo de bomba utilizado.

Está configurado para que detecte como corriente crítica, un valor de 2.7[A] que es la corriente nominal de trabajo de la bomba a plena carga, que es la corriente máxima trabajando a 230[V]_{AC}, lo que da incluso un margen de 0.1[A], ya que la bomba se alimenta con 220[V]_{AC} de la red eléctrica a la que la planta se conecta. Además de esto, la configuración de paro y reinicialización (RESET) del relevador térmico, se la ha establecido en modo manual, de manera que ante las fallas que este dispositivo detecte, se requiera la intervención del usuario para regresar al relevador a su estado normal de funcionamiento, luego de haber revisado y comprobado la solución efectiva de la falla que provocó la parada por disparo térmico, brindando de esta manera un nivel de seguridad superior previo a la puesta en marcha de la planta luego de una falla de este tipo.



Figura 2.4. Relevador Térmico GE RT-1K

El contactor instalado es de marca General Electric, modelo CL-00 diseñado para aplicaciones industriales, trabaja con voltaje trifásico de 220 a 230[V]_{AC} (lo cual coincide con uno de los voltajes de alimentación de la bomba), puede trabajar con corrientes de hasta 9[A] y manejar cargas de hasta 2200[W] (2.2[KW] o 3[HP]), convirtiéndose en el contactor apropiado para esta planta, aun tratándose del más pequeño de su serie.



Figura 2.5. Contactor Eléctrico GE CL-00

El variador de frecuencia que gobierna la bomba, es de marca SIEMENS, modelo SINAMICS G110.



Figura 2.6. Variador de Frecuencia SIEMENS SINAMICS G110

Este variador de frecuencia está controlado por un microprocesador y utiliza tecnología IGBT de última

generación. Esto lo hace fiable y versátil. Un método especial de modulación por ancho de impulsos con frecuencia de pulsación seleccionable permite un funcionamiento silencioso del motor. Extensas funciones de seguridad ofrecen una protección excelente tanto del convertidor como del motor.

El SINAMICS G110 es ideal para una gran gama de aplicaciones sencillas de control de motores V/F (Voltaje/Frecuencia).

La configuración del variador de frecuencia para el caso particular de este Proyecto de Graduación, se encuentra en el Anexo E.

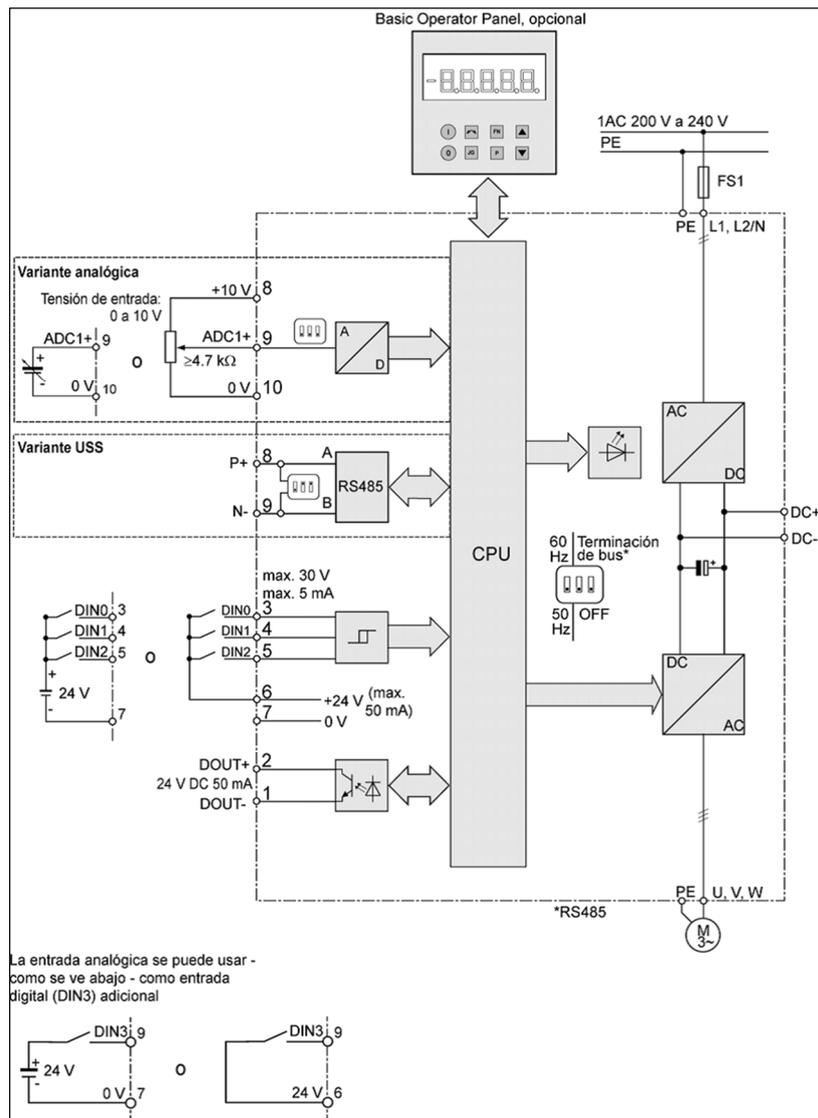


Figura 2.7. Diagrama de Bloques del Variador de Frecuencia [6]

Las entradas 9 y 10 del variador de frecuencia, se conectan a la tarjeta CB-68LPR para recibir desde el cFP, una señal analógica con un valor de voltaje entre 0 a 10[V]_{DC}, calculada

en una computadora por el controlador PID desarrollado, produciendo una variación proporcional de la frecuencia entre 0 y 60[Hz], que se traduce en un voltaje trifásico variable de salida entre 0 y 230[V]_{AC}, que es aplicado a la bomba según lo requerido.

| Borne | Significado | Funciones | |
|-------|-------------|---------------------------|----------|
| 1 | DOUT- | Salida digital (-) | |
| 2 | DOUT+ | Salida digital (+) | |
| 3 | DIN0 | Entrada digital 0 | |
| 4 | DIN1 | Entrada digital 1 | |
| 5 | DIN2 | Entrada digital 2 | |
| 6 | - | Salida +24 V / máx. 50 mA | |
| 7 | - | Salida 0 V | |
| | Variante | Análogica | USS |
| 8 | - | Salida +10 V | RS485 P+ |
| 9 | ADC1 | Entrada analógica | RS485 N- |
| 10 | - | Salida 0 V | |



Figura 2.8. Bornes Frontales del Variador de Frecuencia [7]

2.2. Selección de Materiales

Pensando en su uso como contenedores de agua, el reservorio y los tanques del sistema de vasos comunicantes, están construidos totalmente de acero inoxidable de grado alimenticio, para evitar tanto su corrosión, como la proliferación de algas en ellos.

La tapa del reservorio y los protectores de los visores de nivel de agua de los tanques, están hechos de acrílico, un termoplástico

7 Bornes: Instrucciones de Servicio Resumidas, SINAMICS G110, Documentación de Usuario, Siemens, Edición Abril 2004, p. 5

transparente de Ingeniería, para usos especiales por las características que posee, ideales para esta aplicación, como: transparencia de alrededor del 93% (convirtiéndolo en el más transparente de los plásticos), alta resistencia al impacto (10 a 20 veces la del vidrio), resistencia a la intemperie, entre otras [8].

La estructura de soporte está construida de acero al carbono también llamado acero de construcción, conocido comúnmente como “hierro negro”. Este material es ideal para estructuras, porque una de sus características más representativas es su resistencia a fuerzas estáticas o dinámicas como flexión, torsión, tracción y compresión [9].

Además está pintada con pintura acrílica, por su fuerte adhesión a cualquier tipo de superficie, resistencia al moho y la humedad, resultados duraderos, sólo por citar algunas de sus ventajas, por las cuales ha sido usada inclusive como pintura para autos [10].

8 Polimetilmetacrilato: <http://es.wikipedia.org/wiki/PMMA>, Fecha de consulta: Enero 2013

9 Acero al carbono: http://es.wikipedia.org/wiki/Acero_al_carbono, Fecha de consulta: Enero 2013

10 Pintura acrílica para la construcción: <http://www.canalconstruccion.com/pintura-acrilica-para-la-construccion.html>, Fecha de consulta: Enero 2013

La pintura acrílica, al igual que en el caso de los autos, se recubre con una capa de laca acrílica, que le da un acabado brillante y es de alta resistencia al ser diseñada para proteger contra condiciones climatológicas, lo cual permite preservar la pintura de una manera superior a la de otras lacas o barnices [11].

Toda la red de tuberías está hecha completamente de tubos y accesorios (codos, neoplos, uniones, adaptadores, reductores) roscables de polipropileno de color rojo, como los que se acostumbra a utilizar en instalaciones para agua caliente.



Figura 2.9. Elementos de Tuberías de Polipropileno

La línea roscable de polipropileno ofrece alta resistencia a la presión y a temperaturas extremas (altas o bajas), superior a los tubos de PVC utilizados típicamente en las instalaciones para agua potable, lo que garantiza una mayor durabilidad de la red de tuberías a lo largo del tiempo, por lo cual fue seleccionada para esta planta.



Figura 2.10. Tecnología de la Línea Roscable de Polipropileno

2.3. Construcción de la Planta

La construcción de la planta se la hizo de la siguiente manera:

Primero, se instaló la bomba, ya que su ubicación determinaría la posición de los tanques y reservorio, y con esto, la longitud de la red de tuberías.

Luego, se realizó la instalación de todos los adaptadores para las tuberías en los tanques y reservorio.

Con esto, se procedió a instalar, en primer lugar, la red de tuberías de desfogue rápido de los tanques; en segundo lugar, la tubería de interconexión entre el reservorio y la bomba, la tubería de derivación a la salida de la bomba, y la tubería que alimenta de agua desde la bomba al primer tanque; en tercer lugar, las tuberías de interconexión entre los tanques; y finalmente, el retorno desde el tercer tanque al reservorio.

Posterior a esto, se colocaron los accesorios en los tanques y en el reservorio: los respiraderos en las tapas de los tanques, los visores del nivel de agua en la parte frontal de los mismos, y el desfogue del reservorio.

Una vez ensamblada la parte hidráulica, se instaló el panel eléctrico, que permitió colocar los sensores de presión en la parte trasera de los tanques y conectarlos al mismo, y realizar la conexión eléctrica de la bomba.

Con el fin de proteger los cables, se instalaron canaletas la parte trasera de la estructura de soporte, y también detrás y debajo del panel eléctrico.

Para obtener el suministro de energía eléctrica destinado como fuente de alimentación de la planta, fue necesario solicitar al personal encargado en la ESPOL, la instalación de una toma bifásica de $220[V]_{AC}$ dentro del Laboratorio de Control Automático de la FIEC, la misma que está debidamente rotulada y protegida, y cuyo uso es exclusivo del sistema desarrollado en este Proyecto de Graduación.



Figura 2.11. Instalación Eléctrica Adicional de $220[V]_{AC}$

Habiendo finalizado la construcción de la planta, se hicieron pruebas para comprobar que no haya fugas de agua, y el funcionamiento general de la misma.

De esta manera, la planta quedó lista para su uso en el Laboratorio de Control Automático de la FIEC.

Fotografías adicionales de la planta se encuentran en el Anexo B.

CAPÍTULO 3

3. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DE LA PLANTA EN MATLAB

3.1. Identificación de la Planta usando la Herramienta IDENT de MATLAB

La identificación de una planta es un procedimiento mediante el cual se obtiene, de manera experimental, una expresión conocida como “Función de Transferencia Identificada”, que es la representación matemática de una planta o un sistema, que normalmente se presenta en el dominio de la frecuencia.

El proceso de identificación se compone de dos partes: la primera es la adquisición de datos y la segunda es la identificación en sí, a partir de estos datos adquiridos.

La adquisición de datos se obtiene a base del comportamiento natural de la planta (sin ser controlada), haciéndola trabajar mediante una señal de referencia, en un valor específico conocido como “punto de operación” y sometiéndola a variaciones específicas

alrededor del mismo, para observar la respuesta de la planta ante estas variaciones. Esto permitirá el posterior análisis completo del funcionamiento y comportamiento de la planta en la etapa de identificación, para obtener su representación matemática lo más fiel o aproximado a la realidad como sea posible.

La identificación se la lleva a cabo por medio de la herramienta IDENT (System Identification Tool) de MATLAB, que se encarga de realizar la interpretación de los datos adquiridos de la planta en el dominio del tiempo, y entregar la expresión matemática correspondiente a la planta representada en el dominio de la frecuencia.

MATLAB es un software matemático que entre sus numerosas funcionalidades, a más de las de cálculos y análisis matemáticos, tiene la capacidad de comunicarse con diferentes dispositivos de hardware por medio de una interfaz de software. En este caso, la interfaz de software se comunica desde una computadora, a través de Internet por medio de una VPN, o de la red LAN del Laboratorio de Control Automático de la FIEC, con el cFP (ubicado en este último), que es la interfaz de hardware entre el usuario y la planta, tal como se lo describió en el Capítulo 1.

Para más información acerca del acceso a las diferentes plantas del Laboratorio de Control Automático de la FIEC, refiérase al Proyecto de Graduación “Adaptación de la Tecnología de Control Abierto de Procesos (OPC) al Laboratorio de Control Automático de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación (FIEC) para la Administración Remota de sus Plantas de Trabajo”, desarrollado por Verónica Julissa Raza García.

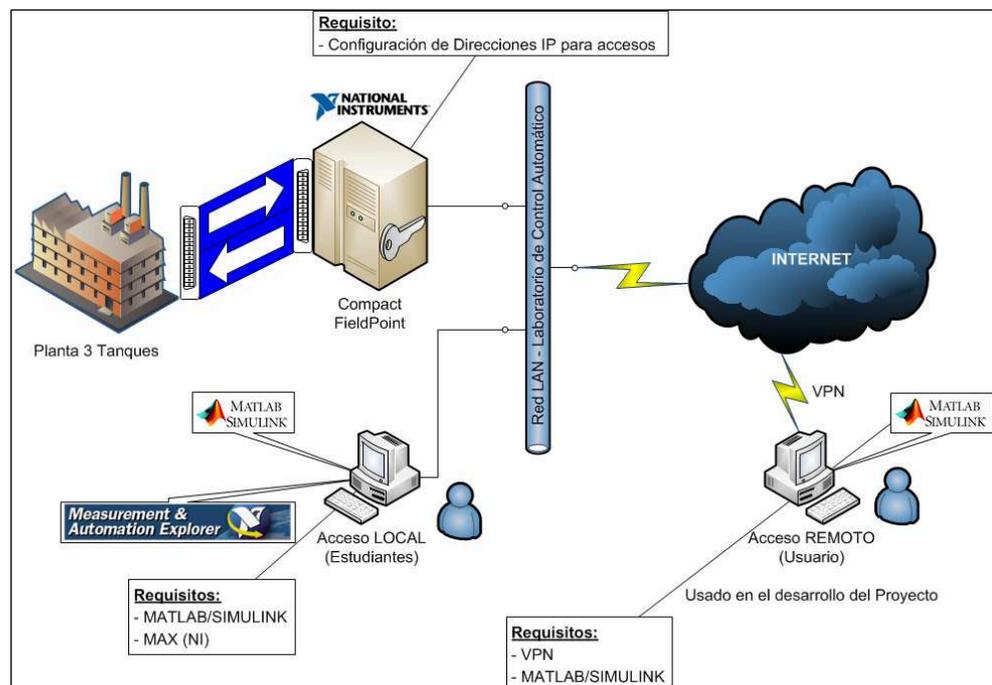


Figura 3.1. Esquema General de Interacción entre los Usuarios y la Planta

Por los motivos expuestos anteriormente, MATLAB se convierte en la plataforma ideal de interfaz, desarrollo, implementación y análisis

de este Proyecto de Graduación. La versión que se ha utilizado en todas las etapas del mismo es la 7.6.0.324, también conocida como “MATLAB R2008a” (Release 2008a).

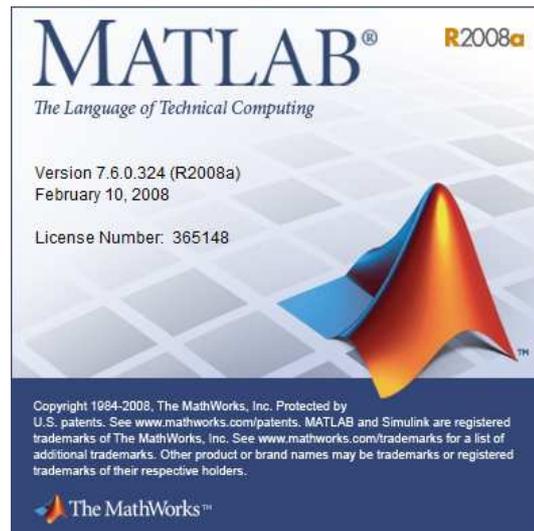


Figura 3.2. Pantalla de Bienvenida de MATLAB R2008a

A continuación se mostrará detalladamente el paso a paso de ambas partes del proceso de identificación.

Como primer paso, se tiene la creación de un modelo en el entorno de programación visual SIMULINK de MATLAB, que servirá como la interfaz de software entre el usuario y la planta, y para este caso, primordialmente como mecanismo para la adquisición de los datos necesarios para la identificación de la misma.

El modelo creado es el siguiente:

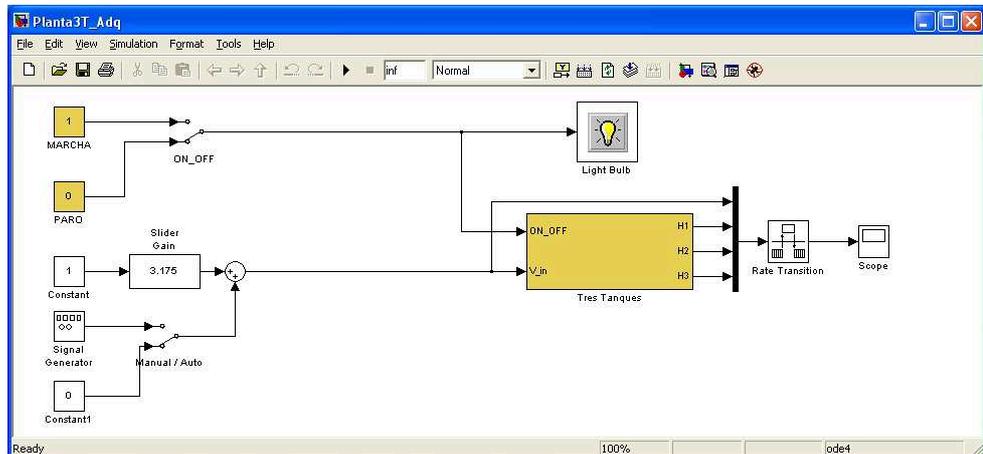


Figura 3.3. Modelo para la Adquisición de Datos

Se pueden apreciar los siguientes elementos presentes:

- 4 bloques de constantes
- 2 bloques conmutadores de señal
- 1 bloque de suma
- 1 bloque indicador visual (Light Bulb)
- 1 bloque multiplexor
- 1 bloque de transición de tasa de muestreo (Rate Transition)
- 1 bloque de ganancia variable (Slider Gain)
- 1 bloque generador de señales (Signal Generator)
- 1 bloque de osciloscopio (Scope)

- 1 bloque Tres Tanques (representativo de la planta)

Los bloques de constantes, son elementos a los que se les asigna un valor numérico de acuerdo a las necesidades del modelo y que sirven como una señal fija de una magnitud determinada. Algunas veces, son colocados en serie con bloques que requieren una señal de entrada para trabajar, como por ejemplo, el bloque de ganancia variable.

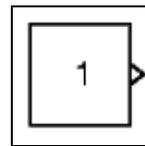


Figura 3.4. Bloque de Constante

Las constantes presentes en este modelo son:

- MARCHA (Valor=1)
- PARO (Valor=0)
- Constant (Valor=1)
- Constant1 (Valor=0)

La constante MARCHA, asignada con un valor de 1, es para este caso, el equivalente a una señal binaria (booleana) que ingresa al

bloque Tres Tanques (que será detallada más adelante en esta sección) por medio de un conmutador de señal, para propósitos de puesta en marcha del sistema. Es la señal que da la orden de iniciar el funcionamiento de la planta y equivale al valor de 1 lógico.

La constante PARO, asignada con un valor de 0, también es equivalente a una señal binaria (booleana) que ingresa al bloque Tres Tanques por medio del mismo conmutador de señal para el ingreso de la señal de MARCHA, para propósitos de parada del sistema. Es la señal que da la orden de detener el funcionamiento de la planta y equivale al valor de 0 lógico.

La constante Constant, asignada con un valor de 1, es una señal numérica que ingresa al bloque de ganancia variable, como requisito de señal de entrada de este último. En este caso, equivale a un bloque de ganancia unitaria fija, haciendo que la señal de salida que emite el bloque de ganancia variable sea igual a la establecida en el mismo.

La constante Constant1, asignada con un valor de 0, es una señal numérica que ingresa a un conmutador de señal, para que la señal de referencia que ingresa al bloque Tres Tanques sea fija. En este

caso, la señal de referencia tendrá el valor establecido en el bloque de ganancia variable, por lo que el bloque Constant1 equivale a una señal de $0[V]_{DC}$.

Estas constantes son exactamente iguales en cualquier modelo de este proyecto en que se encuentren implementadas.

Los bloques conmutadores de señal, son elementos que sirven para que señales distintas puedan ingresar en un mismo puerto de entrada de un bloque. En este caso, los conmutadores de señal permiten intercambiar hasta dos señales, pasando únicamente la señal que esté seleccionada en ese momento, pudiendo actuar como interruptores o selectores.

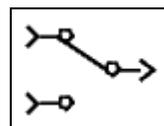


Figura 3.5. Bloque Conmutador de Señal

Los conmutadores de señal presentes en este modelo son:

- ON_OFF
- Manual/Auto

El conmutador ON_OFF, permite el cambio de las señales de MARCHA y PARO que ingresan al bloque Tres Tanques. Cuando el conmutador pasa de PARO a MARCHA (0 a 1), la planta energizada entra en funcionamiento. Cuando el conmutador pasa de MARCHA a PARO (1 a 0), la planta detiene su funcionamiento, permaneciendo energizada. Mientras el selector no sea conmutado, la planta continuará en el estado que se encuentre, ya sea éste en funcionamiento o en espera.

Para este caso, el conmutador hace la función de interruptor. En este punto, es válido recordar que, tal como se lo describió en el Capítulo 1, el interruptor principal de dos posiciones (encendido y apagado) del panel eléctrico de la planta, es el que permite que se energice la misma, pasando de inmediato a un estado de espera de la señal proveniente del accionamiento del conmutador ON_OFF para entrar en funcionamiento.

El conmutador Manual/Auto, permite el intercambio entre la forma de onda emitida por el bloque generador de señales, y la constante Constant1, equivalente a una señal de $0[V]_{DC}$. Cuando el conmutador esté seleccionando Constant1, la señal de referencia tendrá el valor fijo establecido en el bloque de ganancia variable.

Cuando el conmutador esté seleccionando el generador de señales, la señal de referencia tendrá la influencia de la forma de onda que éste emite, convirtiéndose en una señal de valor variable de acuerdo a lo configurado en dicho bloque.

Para este caso, el conmutador hace la función de selector.

Estos conmutadores de señal son exactamente iguales en cualquier modelo de este proyecto en que se encuentren implementados.

Un bloque de suma, es un elemento que, dependiendo del signo de sus puertos de entrada, puede realizar la suma o resta de señales o de cantidades numéricas (escalares), y también de vectores o matrices.

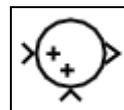


Figura 3.6. Bloque de Suma

El bloque de suma presente en este modelo, realiza la suma de la señal proveniente del bloque de ganancia variable y la forma de onda que el generador de señales emite, cuando el conmutador

esté seleccionando dicho bloque. Este es el caso para cuando se necesitan hacer variaciones del punto de operación, donde se desea observar la respuesta de la planta ante estas variaciones, como en la adquisición de datos para el proceso de identificación del sistema. Si el conmutador está seleccionando el bloque Constant1, la suma será la misma señal de referencia fijada en el bloque de ganancia variable, ya que Constant1 equivale a una señal de $0[V]_{DC}$. Este caso es para cuando se desea que el sistema se estabilice según la referencia establecida en el bloque de ganancia variable. Para cualquiera de los escenarios descritos, la suma resultante ingresa al bloque Tres Tanques como el valor del voltaje DC a ser aplicado al variador de frecuencia, para propósitos de funcionamiento de la bomba de agua.

Un bloque indicador visual, es un elemento de dos estados (encendido y apagado) que sirve como ayuda gráfica al usuario dentro del modelo.

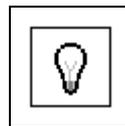


Figura 3.7. Bloque Indicador Visual tipo Light Bulb

En este caso, el bloque está representado por una bombilla (Light Bulb) que recibe las señales de MARCHA o PARO, según la posición del conmutador conectado a sus respectivos bloques. Si el conmutador está seleccionando el bloque MARCHA, la imagen de la bombilla del bloque Light Bulb cambiará de color, dando la apariencia de encendido, para indicar que la planta se encuentra en funcionamiento. Si el conmutador está seleccionando el bloque PARO, la imagen de la bombilla del bloque Light Bulb cambiará de color o aparecerá en su estado natural, dando la apariencia de apagado, para indicar que la planta se encuentra detenida. Este bloque es exactamente igual en cualquier modelo de este proyecto en que se encuentre implementado.

Un bloque multiplexor, es un elemento que permite el enrutamiento de dos o más señales, convirtiéndolas en una sola señal de elementos múltiples. Es ideal para cuando se necesita trabajar con varias señales en bloques que teniendo la capacidad para hacerlo, sólo tienen un puerto de entrada, como por ejemplo, el bloque de osciloscopio.



Figura 3.8. Bloque Multiplexor

El bloque multiplexor presente en este modelo, está configurado para recibir cuatro señales: la señal de referencia, y las tres señales de la altura de la columna de agua de cada tanque (H1 para el Tanque 1, H2 para el Tanque 2 y H3 para el Tanque 3), provenientes del bloque Tres Tanques.

Un bloque de transición de tasa de muestreo, es un elemento que permite ajustar automáticamente la tasa de muestreo de una señal, de manera que no existan conflictos en la lectura, transferencia o el almacenamiento de datos, ni entre dos bloques que tienen tasas de muestreo diferentes, ni con la tasa de muestreo fundamental configurada en los parámetros de la simulación de un modelo.

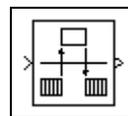


Figura 3.9. Bloque de Transición de Tasa de Muestreo

El bloque de transición de tasa de muestreo presente en este modelo, está ubicado entre el bloque multiplexor y el bloque de osciloscopio, precisamente para que la información de las 4 señales combinadas que agrupa el multiplexor puedan ser correctamente mostradas en el osciloscopio, ya que este último tiene su propia tasa de muestreo para propósitos de despliegue en pantalla, y las señales a graficarse provienen de distintas fuentes, que tienen sus propias tasas de muestreo diferentes: la señal de referencia tiene la tasa de muestreo fundamental de la simulación del modelo, y las señales de la altura de la columna de agua de cada tanque tienen la tasa de muestreo especificada en la configuración de lectura de señal de sus respectivos sensores de presión.

El detalle de todas las tasas de muestreo de cada elemento que requiera su especificación, será ampliado más adelante en esta sección.

Este bloque es exactamente igual en cualquier modelo de este proyecto en que se encuentre implementado. Un bloque de ganancia variable, es un elemento que posee un control posicional deslizante que opera entre dos extremos, uno mínimo y uno máximo, para multiplicar numéricamente una señal por un valor que

puede ser especificado, o por el que corresponda a la ubicación del control posicional sobre el deslizador. Su representación gráfica es la misma que la del bloque de constantes explicado previamente en esta sección, con la diferencia que tiene un puerto de entrada para la señal cuya magnitud se desea variar.

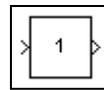


Figura 3.10. Bloque de Ganancia Variable

Este bloque, posee además su propia interfaz gráfica ya que su funcionamiento es dinámico, dada la interacción directa con el usuario, por su funcionalidad de la variación de ganancia.

Los valores extremos de mínimo y máximo, se especifican directamente en campos disponibles en el bloque para este efecto, estableciendo así su rango de operación. La variación de ganancia se la puede realizar por medio de la interfaz gráfica, deslizando el control posicional, o especificando el valor en un campo destinado para esta acción. En este último caso, el control posicional se ubicará automáticamente en la posición que corresponda sobre el deslizador. Esta ubicación se determina de manera proporcional al

rango de operación establecido, en una escala lineal, donde el valor mínimo representa el 0% de la escala y el valor máximo, el 100% de la escala.

El bloque de ganancia variable presente en este modelo, determina la magnitud del voltaje DC de la señal de referencia que se aplica al variador de frecuencia por medio del bloque Tres Tanques, y se constituye en el elemento que especifica el punto de operación de la planta, alrededor del cual se va a hacer operar la planta para la adquisición de datos y su posterior procesamiento para realizar la identificación del sistema.

A continuación se muestra la interfaz gráfica del bloque de ganancia variable de voltaje DC de este modelo:

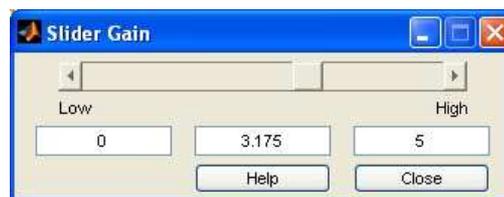


Figura 3.11. Interfaz Gráfica del Bloque de Ganancia Variable de Voltaje DC

Aunque algunos bloques de SIMULINK muestran valores numéricos adimensionales, para este caso, se asume que las unidades están en Voltios DC. Se puede observar que:

Los valores establecidos como máximo y mínimo son de $0[V]_{DC}$ y $5[V]_{DC}$, respectivamente. El valor elegido dentro del rango establecido, y que se constituye en el punto de operación de la planta, es de $3.175[V]_{DC}$. Este valor fue determinado experimentalmente, después de comprobar que al aplicarse dicho voltaje al variador de frecuencia, éste hace que la bomba de agua trabaje de manera que la altura de la columna de agua del tercer y último tanque, que tiene el retorno al tanque reservorio, y que siempre tiene la columna de agua más baja, sea de $30[cm]$ cuando la planta se estabiliza. Dado que esta altura coincide con la mitad de la altura del tanque, se toma a este nivel como referencia, determinando así, como punto de operación de la planta, al voltaje de $3.175[V]_{DC}$.

En estas condiciones, cuando la planta se estabiliza al trabajar en el punto de operación elegido ($3.175[V]_{DC}$), y con el arreglo de las aperturas de las válvulas descrito en el Capítulo 1, la altura de la columna de agua del primer tanque, que tiene la entrada desde la

bomba de agua, y que siempre tiene la columna de agua más alta, es de 39.6[cm]. La altura de la columna de agua del tercer tanque, que siempre tiene la columna de agua más baja, es de 30[cm]. El tanque intermedio tiene el promedio de la altura de las columnas de agua de los dos tanques ya citados (34.8[cm]), habiendo entre ésta y cada una de las otras, una diferencia de alturas de las columnas de agua de exactamente 4.8[cm], que se alcanzan cuando la planta entra en estado estable.

En este punto, la presión que indica el manómetro instalado en la bomba de agua es de alrededor de 5[PSI].

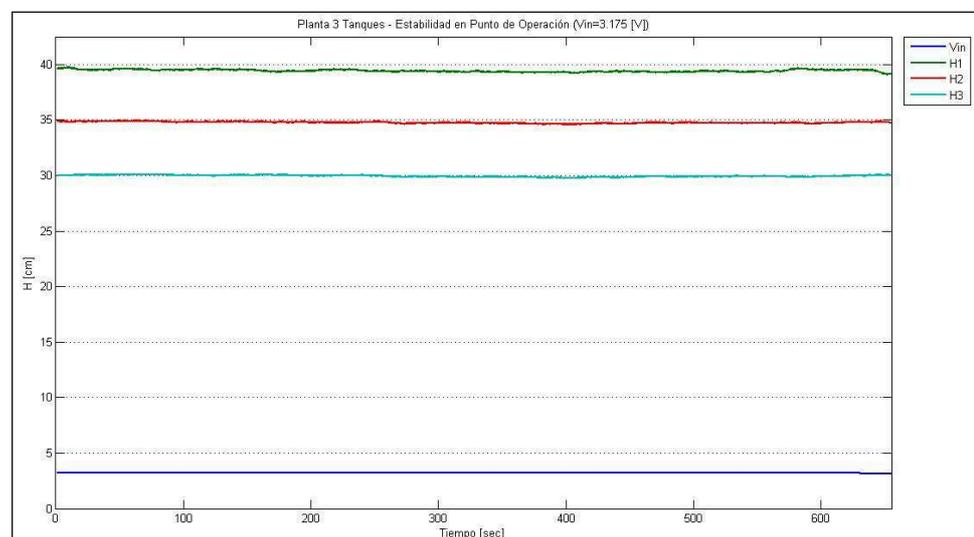


Figura 3.12. Estado Estable de la Altura de las Columnas de Agua en el Punto de Operación

Un bloque generador de señales, es un elemento que tiene la funcionalidad de operar como fuente de diferentes formas de onda con características específicas, según los parámetros que se determinen de acuerdo a las necesidades del modelo.

Las formas de onda que este bloque puede generar son: sinusoidal, cuadrada, diente de sierra y aleatoria. Los parámetros configurables más comúnmente usados para la forma de onda a emitir son: amplitud y frecuencia.

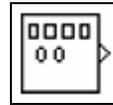


Figura 3.13. Bloque Generador de Señales

El bloque generador de señales presente en este modelo, se encarga de generar un tren de pulsos, necesario para hacer variaciones del punto de operación, como parte fundamental del proceso de identificación del sistema.

A continuación se muestra la interfaz de parámetros del bloque generador de señales de este modelo:

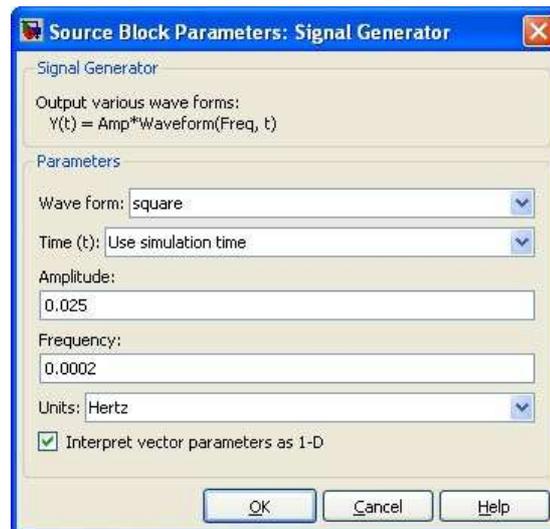


Figura 3.14. Interfaz de Parámetros del Bloque Generador de Señales para la Adquisición de Datos

Se puede observar que:

La forma de onda elegida para la generación del tren de pulsos, es cuadrada. La señal de reloj para el cálculo de la frecuencia de la onda, es el tiempo de ejecución de la simulación del modelo, que es el valor por defecto para este campo. La amplitud de la señal cuadrada, que se muestra adimensional, se ha establecido en 0.025. Para este caso, se asume que las unidades están en Voltios DC. Este bloque no maneja el concepto estándar de amplitud de una señal alterna que es el voltaje de pico a pico de la señal, sino la mitad de este valor. Es decir que la señal de referencia será de

$3.175 \pm 0.025[V]_{DC}$, dando un valor de $3.2[V]_{DC}$ durante el pulso alto y $3.15[V]_{DC}$ durante el pulso bajo de la onda.

Este valor de amplitud fue determinado experimentalmente, después de comprobar que produce un cambio aproximado de $\pm 5[cm]$ en la altura de la columna de agua del tercer tanque, suficiente para proveer una señal apropiada para la identificación del sistema.

En este punto, es válido recordar que, tal como se lo describió previamente en esta sección, la señal de referencia resultante con las características indicadas, sólo se dará para el caso cuando el conmutador Manual/Auto esté seleccionando el generador de señales.

La frecuencia de la señal cuadrada, que se muestra en Hertz, se ha establecido en $0.0002[Hz]$, es decir, un periodo de $5000[sec]$. Este bloque funciona siempre con un ciclo de trabajo del 50%, por lo que el periodo se reparte en $2500[sec]$ para el pulso alto y $2500[sec]$ para el pulso bajo de la onda.

Este valor de frecuencia fue determinado experimentalmente, después de comprobar que proporciona el tiempo suficiente para garantizar la estabilización del cambio en la altura de la columna de agua del tercer tanque, producida por la variación de la señal de referencia que se aplica al variador de frecuencia por medio del bloque Tres Tanques.

Un bloque de osciloscopio, es un elemento que despliega visualmente todas las señales que recibe, y que han sido generadas durante la simulación del modelo. Las señales recibidas son mostradas con respecto al tiempo transcurrido de la simulación.

Dado que este bloque posee sólo un puerto de entrada, es necesaria la inclusión de un bloque multiplexor para la agrupación de varias señales, que permita el correcto despliegue visual de las mismas, en el caso que así lo requiera.



Figura 3.15. Bloque de Osciloscopio

El bloque de osciloscopio presente en este modelo, muestra las señales que el bloque multiplexor descrito previamente en esta sección, se ha encargado de agrupar: la señal de referencia, y las tres señales de la altura de la columna de agua de cada tanque (H1 para el Tanque 1, H2 para el Tanque 2 y H3 para el Tanque 3), provenientes del bloque Tres Tanques.

A continuación se muestra la interfaz de parámetros del bloque de osciloscopio de este modelo:

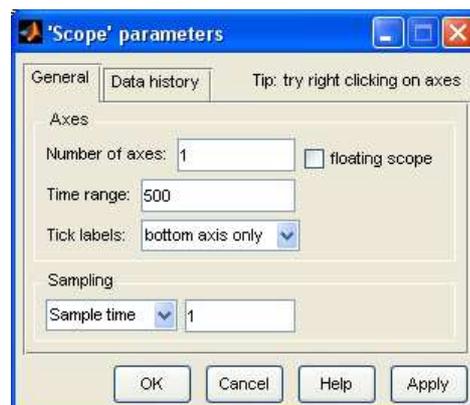


Figura 3.16. Interfaz de Parámetros del Bloque de Osciloscopio

Se puede observar que:

El número de ejes para el despliegue visual de las señales, se ha establecido en 1. Este eje corresponde al tiempo transcurrido de la

simulación, tal como se explicó previamente en la descripción de este bloque, y es el valor por defecto para este campo. El rango de tiempo a ser mostrado es de 500[sec]. Este valor fue elegido, ya que en todos los modelos posteriores al que se está describiendo, permitirá observar completamente la respuesta de las señales por cada ciclo alto o bajo del tren de pulsos que emite el bloque generador de señales.

El tiempo de muestreo establecido para el despliegue visual de las señales, es de 1[sec], es decir que cada segundo se realiza la toma de las muestras de los valores de las señales recibidas por el puerto de entrada del bloque, para ser mostradas en pantalla. Este bloque es, por las razones expuestas, exactamente igual en cualquier modelo de este proyecto en que se encuentre implementado.

El bloque Tres Tanques fue creado íntegramente, y es la fiel representación de la planta en el modelo de la misma, constituyéndose en la interfaz de lectura/escritura de datos entre el modelo y el cFP. Por esto, es el corazón de todos los modelos con los que se trabaja directamente sobre la planta, es decir, el núcleo de la interfaz de software y el vínculo con la interfaz de hardware entre el usuario y la planta.

Por lo tanto, el bloque creado es el siguiente:

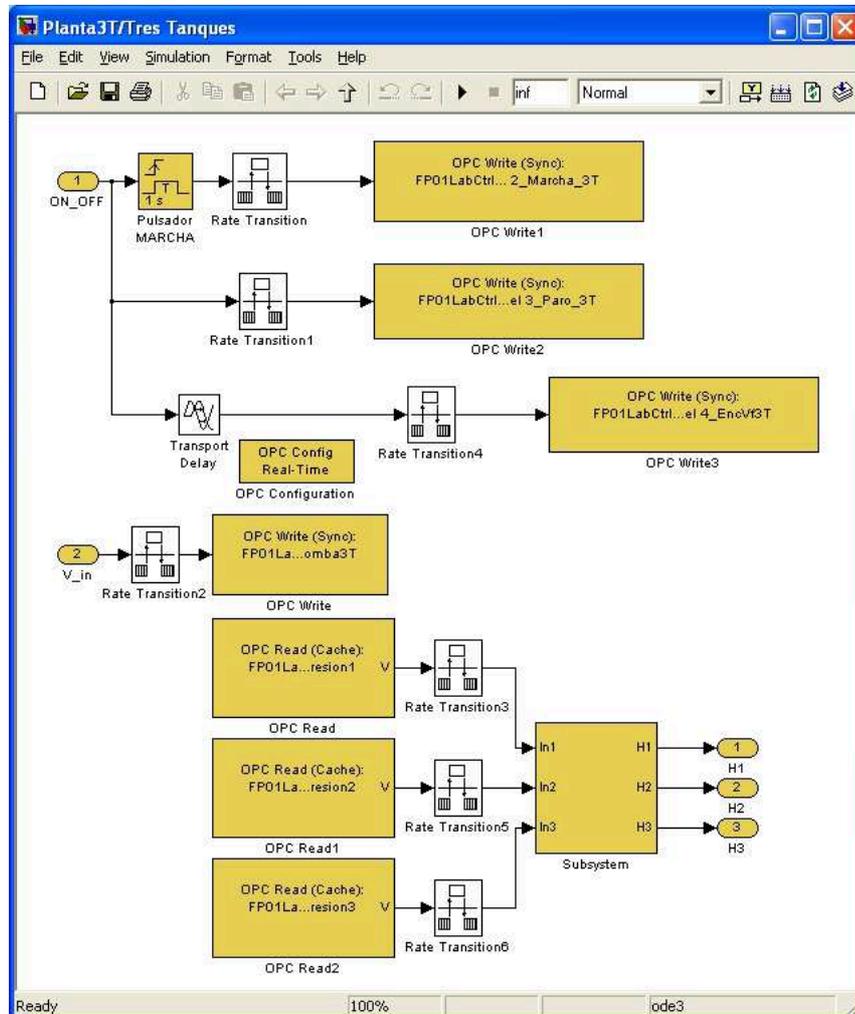


Figura 3.17. Bloque Tres Tanques

El bloque Tres Tanques está compuesto por los siguientes elementos:

- 2 puertos de entrada
- 3 puertos de salida
- 1 bloque monoestable (Pulsador MARCHA)
- 1 bloque de retardo de transporte de señal (Transport Delay)
- 7 bloques de transición de tasa de muestreo
- 1 bloque de configuración OPC (OPC Configuration)
- 4 bloques de escritura OPC (OPC Write)
- 3 bloques de lectura OPC (OPC Read)
- 1 bloque Subsystem (para la conversión de presión a altura de la columna de agua de los tres tanques)

Este bloque, y todos los elementos que lo conforman, incluyendo sus respectivas configuraciones y especificaciones, son exactamente iguales en cualquier modelo de este proyecto en que se encuentre implementado.

Los puertos de entrada de este bloque son:

- ON_OFF
- V_in

El puerto ON_OFF recibe el valor lógico (0 o 1), de la señal de las constantes MARCHA o PARO del modelo, según la posición en que se encuentre el interruptor ON_OFF en el mismo.

El puerto V_in recibe el valor del voltaje DC, de la señal de referencia fija o variable del modelo, según la posición en que se encuentre el selector Manual/Auto en el mismo.

Los puertos de salida de este bloque son:

- H1
- H2
- H3

El puerto H1 entrega al modelo el valor en centímetros, de la señal correspondiente a la altura de la columna de agua del primer tanque. El puerto H2 entrega al modelo el valor en centímetros, de la señal correspondiente a la altura de la columna de agua del segundo tanque. El puerto H3 entrega al modelo el valor en centímetros, de la señal correspondiente a la altura de la columna de agua del tercer tanque.

Un bloque monoestable, es un elemento cuya señal de salida cambia de valor o estado en el momento que recibe una señal de entrada que actúa como activador (señal de disparo), manteniéndose en el nuevo valor o estado durante un tiempo determinado y volviendo a su valor o estado original luego de que este tiempo ha transcurrido.

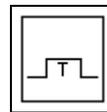


Figura 3.18. Bloque Monoestable

El bloque monoestable presente en este modelo, equivale al pulsador físico “Marcha” del panel eléctrico de la planta. Recibe y procesa la señal del puerto ON_OFF para propósitos de puesta en marcha del sistema. La señal de salida que emite este bloque tiene un valor de 1 lógico, convirtiéndose así, en un pulso unitario. El bloque monoestable de SIMULINK, permite especificar el tiempo de duración de la señal de salida, y el criterio de activación que debe considerarse con respecto a la señal de entrada.

A continuación se muestra la interfaz de parámetros del bloque monoestable de este modelo:

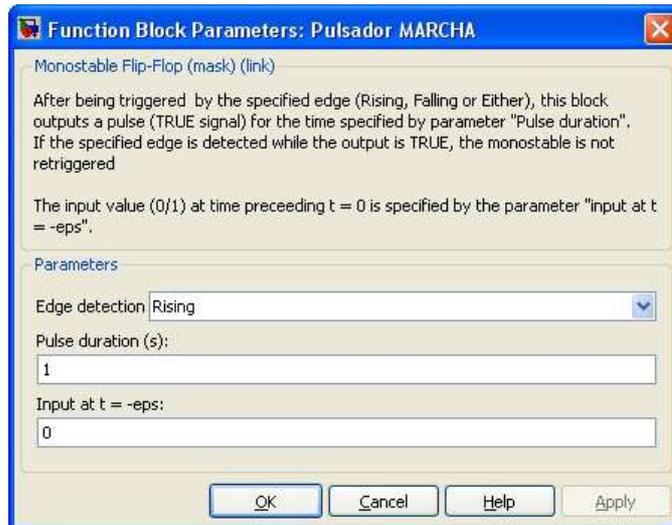


Figura 3.19. Interfaz de Parámetros del Bloque Monoestable Pulsador MARCHA

Se puede observar que:

El criterio de activación (Edge detection) de la señal de entrada es un cambio de valor positivo (Rising) de la misma. En este caso, cuando el valor de la señal del puerto ON_OFF pasa de 0 a 1, es decir, cuando en el modelo se selecciona la constante MARCHA desde la posición de la constante PARO. La duración del pulso unitario de salida se ha determinado que sea de 1[sec], suficiente para proveer una señal apropiada para la función equivalente al pulsador físico “Marcha” del panel eléctrico de la planta.

Un bloque de retardo de transporte de señal, es un elemento que retarda la transmisión de una señal sin alterar ninguna de sus características, con el fin de simular un retardo de tiempo.



Figura 3.20. Bloque de Retardo de Transporte de Señal

El bloque de retardo de transporte de señal presente en este modelo, recibe y procesa la señal del puerto ON_OFF para propósitos de puesta en funcionamiento del variador de frecuencia que se encuentra el panel eléctrico de la planta.

Para este caso, el bloque funciona como un temporizador físico a la conexión. La implementación de este bloque en el modelo fue necesaria, debido a que, como muchos dispositivos eléctricos y electrónicos, un variador de frecuencia tiene su tiempo de puesta en marcha o servicio específico.

No existe un valor fijo para este tiempo, ya que es característico de cada modelo y del voltaje de alimentación aplicado al variador de

frecuencia, motivo por el que no se lo especifica en ninguna documentación relacionada con el mismo.

Este bloque permite, por las razones expuestas, evitar la inclusión de un temporizador a la conexión en el panel eléctrico, y el poder utilizar una sola señal tanto para energizar como para iniciar el funcionamiento el variador de frecuencia.

A continuación se muestra la interfaz de parámetros del bloque de retardo de transporte de señal de este modelo:

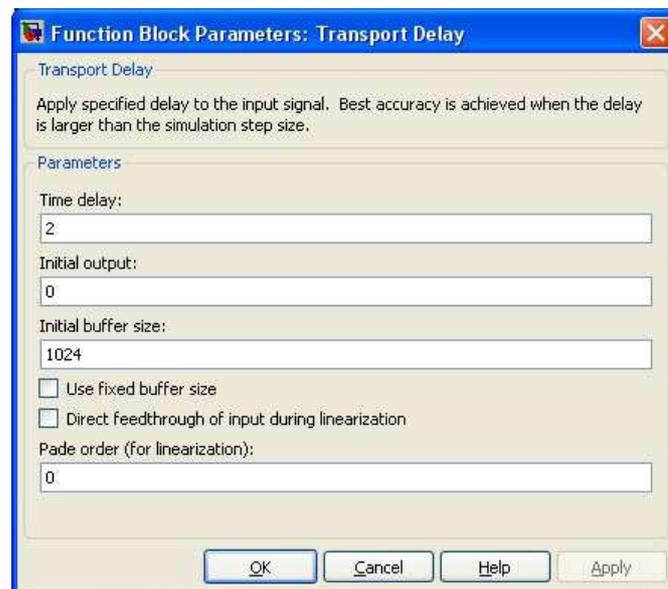


Figura 3.21. Interfaz de Parámetros del Bloque de Retardo de Transporte de Señal

Se puede observar que:

La duración del retardo de la señal se ha determinado que sea de 2[sec], suficientes para producir el retraso apropiado de la misma para este caso, en espera de que pase el tiempo de puesta en marcha o servicio del variador de frecuencia, y así garantizar que esté listo para recibir la orden de funcionamiento.

Los demás campos contienen los valores por defecto del bloque, y no son de gran relevancia para este modelo.

Un bloque de configuración OPC, es un elemento que permite configurar el o los clientes OPC que van a ser utilizados en el modelo.

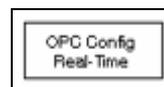


Figura 3.22. Bloque de Configuración OPC

El OPC es un estándar de comunicación en el campo del control y la supervisión de procesos industriales, basado en la tecnología OLE de la compañía Microsoft, que ofrece una interfaz común para

comunicación, que permite que componentes software individuales interaccionen y compartan datos, con el propósito de ofrecer a las aplicaciones que lo necesiten (como MATLAB), una manera común de acceder a los datos de cualquier fuente, como un dispositivo o una base de datos.

La comunicación OPC se realiza a través de una arquitectura Cliente-Servidor. El Servidor OPC es la fuente de datos (como un dispositivo hardware a nivel de planta), y el Cliente es cualquier aplicación basada en OPC que puede acceder a dicho Servidor para leer/escribir el valor de cualquier variable que éste entregue [12].

De aquí se desprende la razón de incluir este bloque en el modelo, pues así se puede establecer al cFP (definido en el Capítulo 1 como la interfaz de hardware entre el usuario y la planta), como el Servidor OPC y al controlador del cFP instalado en el computador en el que corre la simulación del modelo, como el Cliente OPC, al ser el protocolo de comunicación entre el computador y el equipo de campo.

Además, sin este bloque, no se puede realizar la lectura/escritura de datos desde y hacia el cFP. A continuación se muestra la interfaz de parámetros del bloque de configuración OPC:

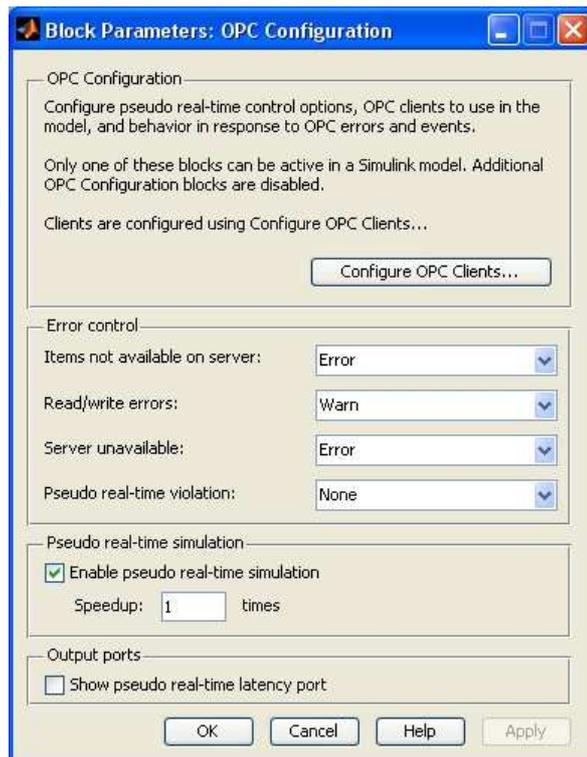


Figura 3.23. Interfaz de Parámetros del Bloque de Configuración OPC

Se puede observar que:

Hay una sección destinada al control de errores, donde los valores que se utilizan son los valores por defecto del bloque, a excepción del último, que se refiere al comportamiento frente a una violación

de pseudo tiempo real (cuando la simulación corre a menor velocidad que el tiempo real), donde se especifica que no se tome acción alguna dado un error.

La sección de simulación en pseudo tiempo real está activada para que el tiempo de ejecución del modelo coincida con el reloj del computador lo más cercanamente posible. La opción “Speedup” determina cuánto más rápido corre la simulación que el tiempo real. Al ser este valor igual a 1, la simulación toma el mismo tiempo real en ejecutarse (por ejemplo, una simulación de 10 segundos, tomará 10 segundos de tiempo real en completarse) [13].

Para establecer al cFP como el Cliente OPC de este modelo, se accede al Administrador de Clientes OPC, por medio de la opción “Configure OPC Clients...”. A continuación se muestra la interfaz de parámetros del Administrador de Clientes OPC:

13 Referencia del Bloque de Configuración OPC, Ayuda de MATLAB

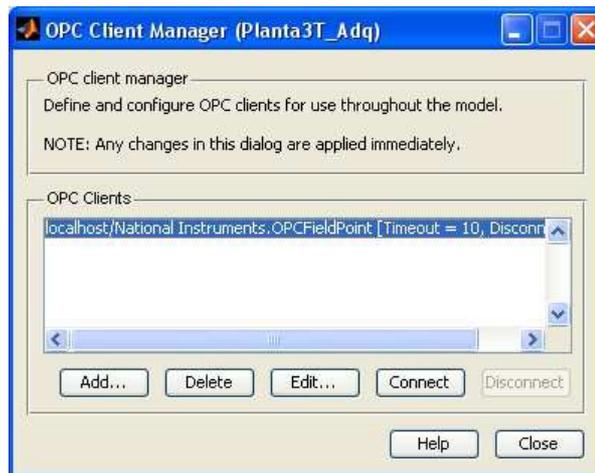


Figura 3.24. Interfaz de Parámetros del Administrador de Clientes OPC

Aquí puede apreciarse que efectivamente, el controlador del equipo de campo Compact FieldPoint (cFP) de la marca National Instruments instalado y configurado en el computador, se ha establecido como el Cliente OPC para el modelo (nótese la dirección “localhost” que corrobora este enunciado).

Un bloque de escritura OPC, es un elemento que permite la escritura de datos recibidos por una señal de entrada, en un bloque de puertos de salida de un Servidor OPC, destinado para el efecto. A cada uno de estos puertos, se lo conoce como “Canal”, en este caso, de salida (escritura) de los datos de la señal de entrada (recibidos).

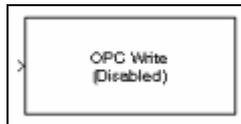


Figura 3.25. Bloque de Escritura OPC

Los bloques de escritura OPC presentes en este modelo son:

- OPC Write (para enviar voltaje a la bomba de agua)
- OPC Write1 (para iniciar el funcionamiento del sistema)
- OPC Write2 (para detener el funcionamiento del sistema)
- OPC Write3 (para iniciar el funcionamiento del variador de frecuencia)

El bloque OPC Write, recibe la señal que ingresa por el puerto V_{in} , que contiene el valor del voltaje DC a ser escrito en un canal del cFP, y así ser enviado y aplicado al variador de frecuencia, para propósitos de funcionamiento de la bomba de agua. A continuación se muestra la interfaz de parámetros del bloque OPC Write:

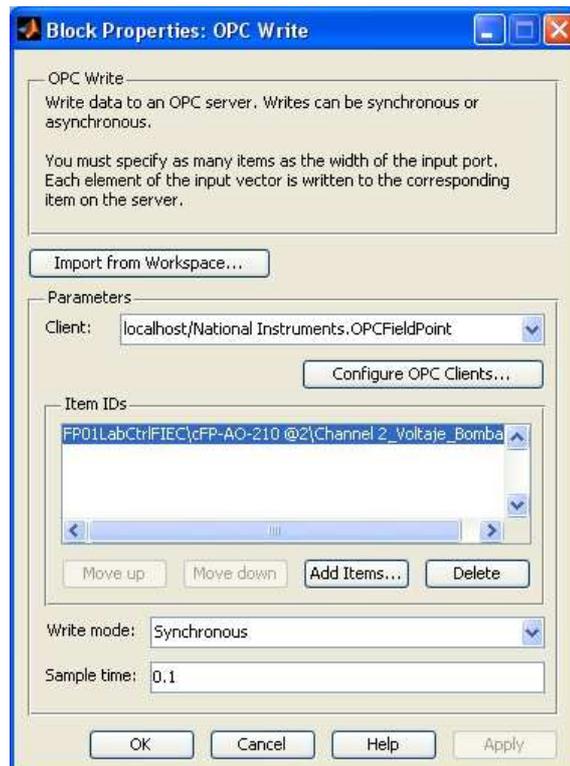


Figura 3.26. Interfaz de Parámetros del Bloque OPC Write

Se puede observar que:

El Cliente OPC es el controlador del cFP, tal como se mostró que fue establecido en el paso anterior. Esta configuración es la misma para todos los bloques de escritura OPC presentes en este proyecto.

El canal asignado para la escritura de los datos, es el segundo canal (Channel 2) denominado “Voltaje_Bomba”, que pertenece a un

bloque de puertos de salidas analógicas del cFP, denominado AO-210 (donde AO son las iniciales de Analog Output, salida analógica). El tipo de escritura de este canal es sincrónica, es decir que los datos se escriben de acuerdo a la captura según el muestreo establecido para la lectura de los mismos desde el modelo. El tiempo de muestreo establecido para la escritura de los datos, es de 0.1[sec], es decir que cada 100 milisegundos se realiza la toma de la muestra (lectura) de los datos desde el modelo por el puerto de entrada de este bloque, y el valor capturado se envía (escribe) al canal correspondiente para este efecto.

El bloque OPC Write1, recibe la señal de salida que emite el bloque monoestable, que contiene el pulso unitario a ser escrito en un canal del cFP, y así ser enviado y aplicado a un relevador para energizarlo y cerrar sus contactos de salida, para propósitos de puesta en marcha del sistema.

A continuación se muestra la interfaz de parámetros del bloque OPC Write1:

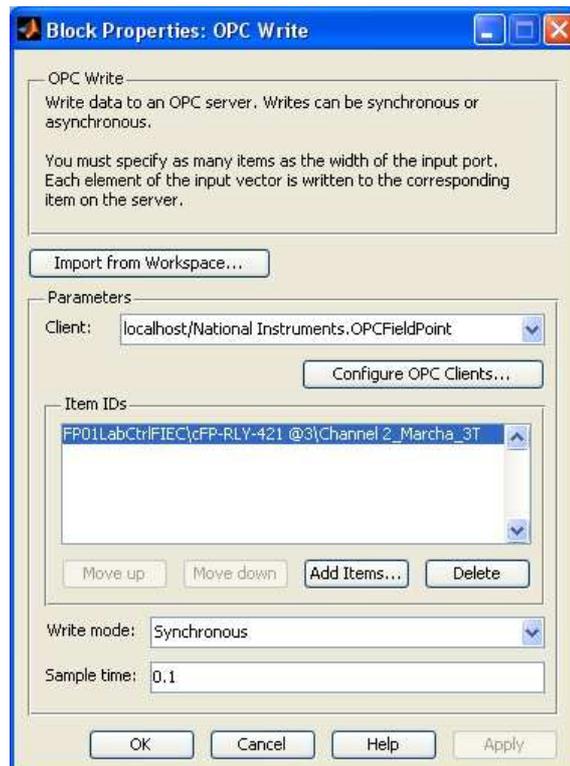


Figura 3.27. Interfaz de Parámetros del Bloque OPC Write1

Se puede observar que:

El canal asignado para la escritura de los datos, es el segundo canal (Channel 2) denominado "Marcha_3T", que pertenece a un bloque de relevadores del cFP, denominado RLY-421 (donde RLY es la abreviatura de RELAY, relevador). El tipo de escritura de este canal también es sincrónica, como el bloque OPC Write. El tiempo de muestreo establecido para la escritura de los datos, también es de 0.1[sec], como el bloque OPC Write.

El bloque OPC Write2, recibe la señal que ingresa por el puerto ON_OFF, que contiene el valor lógico a ser escrito en un canal del cFP, y así ser enviado y aplicado a un relevador para desenergizarlo y abrir sus contactos de salida, para propósitos de parada del sistema.

A continuación se muestra la interfaz de parámetros del bloque OPC Write2:

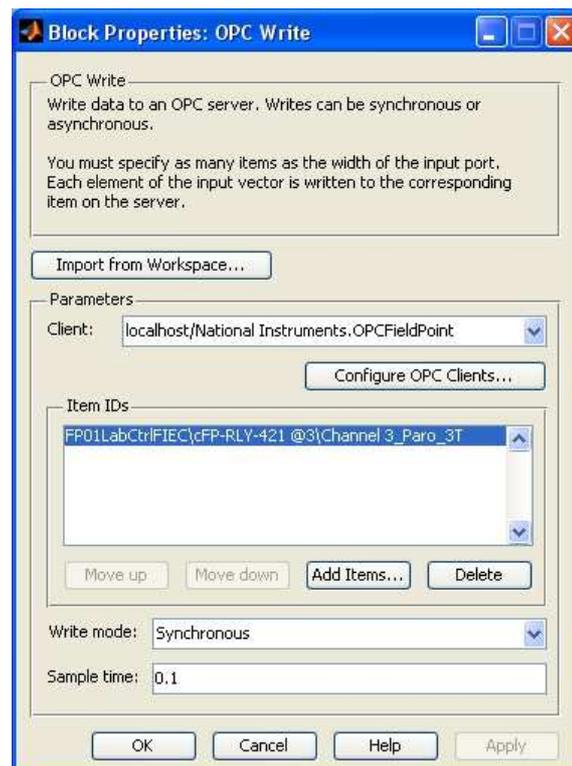


Figura 3.28. Interfaz de Parámetros del Bloque OPC Write2

Se puede observar que:

El canal asignado para la escritura de los datos, es el tercer canal (Channel 3) denominado "Paro_3T", que también pertenece al bloque de relevadores RLY-421 del cFP. El tipo de escritura de este canal también es sincrónica, como el bloque OPC Write1. El tiempo de muestreo establecido para la escritura de los datos, también es de 0.1[sec], como el bloque OPC Write1.

El bloque OPC Write3, recibe la señal de salida que emite el bloque de retardo de transporte de señal, que contiene la señal retardada del puerto ON_OFF a ser escrita en un canal del cFP, y así ser enviado y aplicado a un relevador para energizarlo y cerrar sus contactos de salida, para propósitos de puesta en funcionamiento del variador de frecuencia.

A continuación se muestra la interfaz de parámetros del bloque OPC Write3:

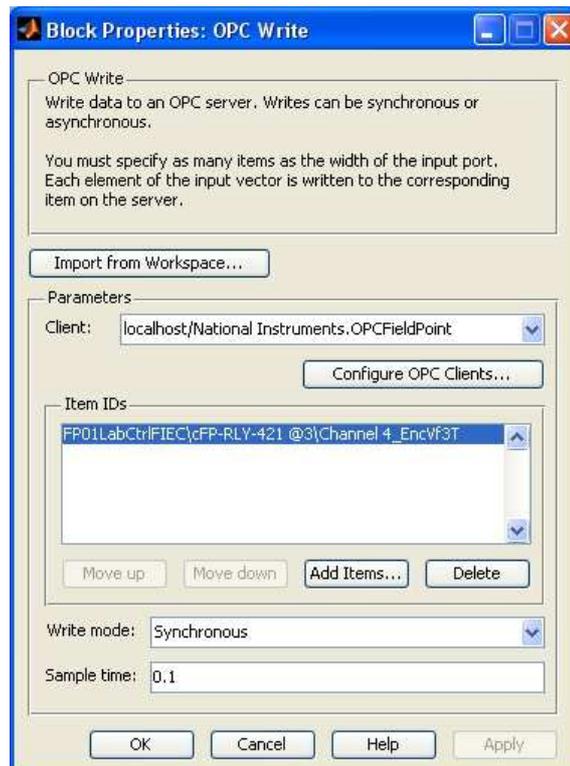


Figura 3.29. Interfaz de Parámetros del Bloque OPC Write3

Se puede observar que:

El canal asignado para la escritura de los datos, es el cuarto canal (Channel 4) denominado “EncVf3T”, que también pertenece al bloque de relevadores RLY-421 del cFP. El tipo de escritura de este canal también es sincrónica, como el bloque OPC Write2. El tiempo de muestreo establecido para la escritura de los datos, también es de 0.1[sec], como el bloque OPC Write2.

Un bloque de lectura OPC, es un elemento que permite la lectura de datos entregados por una señal de salida, en un bloque de puertos de entrada de un Servidor OPC, destinado para el efecto. A cada uno de estos puertos, se lo conoce como “Canal”, en este caso, de captura, adquisición o entrada (lectura) de los datos de la señal de salida (entregados).

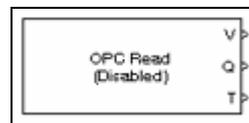


Figura 3.30. Bloque de Lectura OPC

Los bloques de lectura OPC tienen tres puertos de salida:

Puerto V: el más comúnmente utilizado. Es el puerto que contiene los valores de los datos que han sido capturados o adquiridos para ser leídos.

Puerto Q: es un puerto opcional, y por ende configurable, que contiene información acerca de la calidad del acceso a los datos adquiridos.

Puerto T: es un puerto opcional, también configurable por este motivo, que contiene información acerca del tiempo de la captura o adquisición de los datos, ya sea el tiempo real o el tiempo de simulación [14].

Los puertos Q y T no son de gran relevancia para este modelo, por lo que no están configurados, permaneciendo inactivos. Esta configuración es la misma para todos los bloques de lectura OPC presentes en este proyecto.

Los bloques de lectura OPC presentes en este modelo son:

- OPC Read (para obtener el valor de la señal correspondiente a la presión de la columna de agua del primer tanque)
- OPC Read1 (para obtener el valor de la señal correspondiente a la presión de la columna de agua del segundo tanque)
- OPC Read2 (para obtener el valor de la señal correspondiente a la presión de la columna de agua del tercer tanque)

El bloque OPC Read, entrega la señal adquirida por un canal del cFP, que contiene el valor de la corriente proveniente del sensor de presión del primer tanque a ser escrita en el puerto V, y así ser enviado al bloque Subsystem, para la conversión de presión a centímetros de altura de la columna de agua del tanque especificado.

A continuación se muestra la interfaz de parámetros del bloque OPC Read:

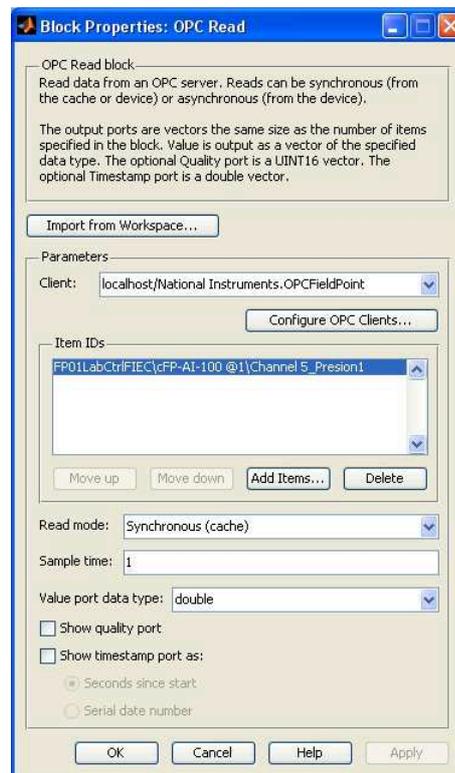


Figura 3.31. Interfaz de Parámetros del Bloque OPC Read

Se puede observar que:

El Cliente OPC es el controlador del cFP, tal como se mostró que fue establecido para los bloques de escritura. Esta configuración es la misma para todos los bloques de lectura OPC presentes en este proyecto.

El canal asignado para la lectura de los datos, es el quinto canal (Channel 5) denominado "Presion1", que pertenece a un bloque de puertos de entradas analógicas del cFP, denominado AI-100 (donde AI son las iniciales de Analog Input, entrada analógica). El tipo de lectura de este canal es sincrónica, es decir que los datos se leen de acuerdo a la captura según el muestreo establecido para la escritura de los mismos hacia el modelo. El tiempo de muestreo establecido para la lectura de los datos, es de 1[sec], es decir que cada segundo se realiza la toma de la muestra (lectura) de los datos desde el canal correspondiente para este efecto, y el valor capturado se envía (escribe) hacia el modelo por el puerto de salida de este bloque.

Los demás campos contienen los valores por defecto del bloque, y no son de gran relevancia para este modelo, tal como se explicó

previamente en la descripción de este bloque. Esta configuración también es la misma para todos los bloques de lectura OPC presentes en este proyecto.

El bloque OPC Read1, entrega la señal adquirida por un canal del cFP, que contiene el valor de la corriente proveniente del sensor de presión del segundo tanque a ser escrita en el puerto V, y así ser enviado al bloque Subsystem, para la conversión de presión a centímetros de altura de la columna de agua del tanque especificado.

A continuación se muestra la interfaz de parámetros del bloque OPC Read1:

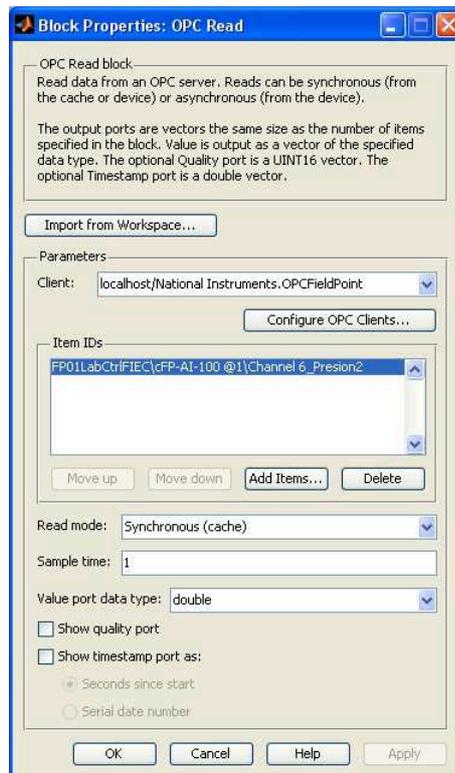


Figura 3.32. Interfaz de Parámetros del Bloque OPC Read1

Se puede observar que:

El canal asignado para la lectura de los datos, es el sexto canal (Channel 6) denominado “Presion2”, que también pertenece al bloque de entradas analógicas AI-100 del cFP. El tipo de lectura de este canal también es sincrónica, como el bloque OPC Read. El tiempo de muestreo establecido para la lectura de los datos, también es de 1[sec], como el bloque OPC Read.

El bloque OPC Read2, entrega la señal adquirida por un canal del cFP, que contiene el valor de la corriente proveniente del sensor de presión del tercer tanque a ser escrita en el puerto V, y así ser enviado al bloque Subsystem, para la conversión de presión a centímetros de altura de la columna de agua del tanque especificado.

A continuación se muestra la interfaz de parámetros del bloque OPC Read2:

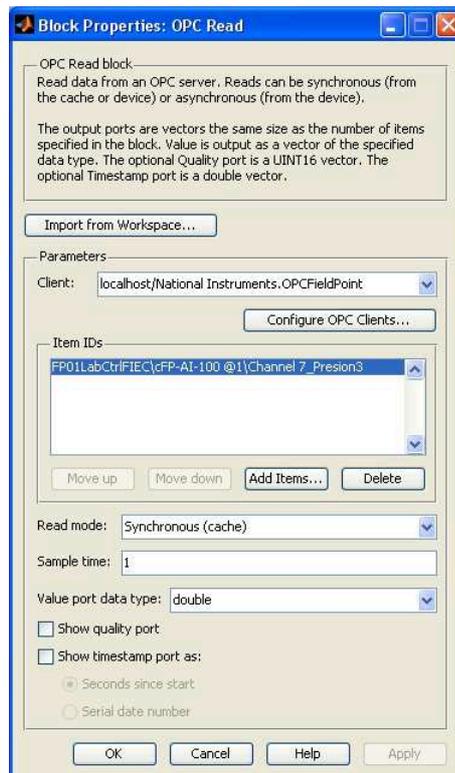


Figura 3.33. Interfaz de Parámetros del Bloque OPC Read2

Se puede observar que:

El canal asignado para la lectura de los datos, es el séptimo canal (Channel 7) denominado “Presion3”, que también pertenece al bloque de entradas analógicas AI-100 del cFP. El tipo de lectura de este canal también es sincrónica, como el bloque OPC Read1. El tiempo de muestreo establecido para la lectura de los datos, también es de 1[sec], como el bloque OPC Read1.

Para más información acerca del estándar de comunicación OPC, refiérase al Proyecto de Graduación “Adaptación de la Tecnología de Control Abierto de Procesos (OPC) al Laboratorio de Control Automático de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación (FIEC) para la Administración Remota de sus Plantas de Trabajo”, desarrollado por Verónica Julissa Raza García.

El bloque Subsystem también fue creado íntegramente, y es la agrupación de la operación matemática para la conversión de los valores de presión a altura en centímetros de las columnas de agua de los tres tanques, para ser mostradas en pantalla. Estos valores provienen de la adquisición de los datos que llegan desde las señales de los sensores de presión ubicados en cada tanque, por medio de los bloques de lectura OPC.

Previo a la salida de las señales convertidas, éstas han sido sometidas a un proceso de filtrado, para eliminar el efecto del ruido debido a la alta sensibilidad de los sensores de presión, permitiendo así obtener en pantalla una señal suavizada, conservando su magnitud, con menores oscilaciones instantáneas y por consiguiente, una señal más precisa, más cómoda de visualizar y más fácil para analizar.

Por lo tanto, el bloque creado es el siguiente:

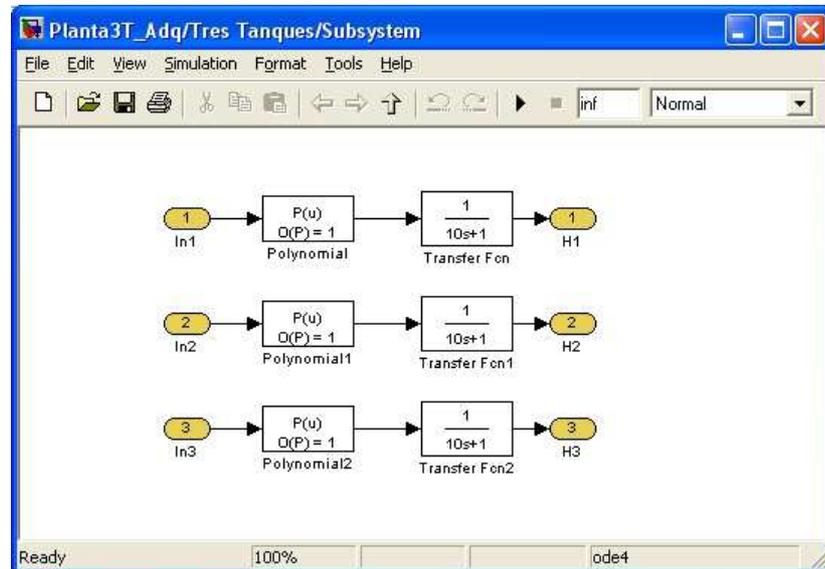


Figura 3.34. Bloque Subsystem

El bloque Subsystem está compuesto por los siguientes elementos:

- 3 puertos de entrada
- 3 puertos de salida
- 3 bloques de polinomio (Polynomial)
- 3 bloques de función de transferencia (Transfer Fcn, para el filtrado de las señales)

Este bloque, y todos los elementos que lo conforman, incluyendo sus respectivas configuraciones y especificaciones, son

exactamente iguales en cualquier modelo de este proyecto en que se encuentre implementado.

Los puertos de entrada de este bloque son:

- In1
- In2
- In3

El puerto In1 recibe del modelo el valor en presión, de la señal correspondiente a la altura de la columna de agua del primer tanque. El puerto In2 recibe del modelo el valor en presión, de la señal correspondiente a la altura de la columna de agua del segundo tanque. El puerto In3 recibe del modelo el valor en presión, de la señal correspondiente a la altura de la columna de agua del tercer tanque.

Los puertos de salida de este bloque son:

- H1
- H2
- H3

El puerto H1 entrega al modelo el valor en centímetros, de la señal correspondiente a la altura de la columna de agua del primer tanque. El puerto H2 entrega al modelo el valor en centímetros, de la señal correspondiente a la altura de la columna de agua del segundo tanque. El puerto H3 entrega al modelo el valor en centímetros, de la señal correspondiente a la altura de la columna de agua del tercer tanque.

Un bloque de polinomio, es un elemento que permite obtener el valor numérico de un polinomio en un punto dado, según el valor de la señal de entrada.

Un polinomio P de grado n en la variable x , es una expresión matemática de la forma:

$$P(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0, n \geq 0$$

Donde las constantes $a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n$ se conocen como coeficientes del polinomio [15].

La señal de salida $P(x)$ del bloque de polinomio, es el cálculo del valor numérico que el polinomio toma, obtenido de su evaluación en un valor fijo de la variable x , dado por el valor numérico presente la señal de entrada [16].

Dentro del bloque de polinomio se especifican los coeficientes para su evaluación, incluyendo sus signos, y ordenados del más alto orden al más bajo orden de la variable a la que acompañan.

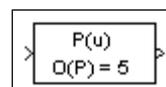


Figura 3.35. Bloque de Polinomio

Los bloques de polinomio implementados en este modelo, realizan la conversión de presión a altura de las columnas de agua de los

15 Polinomio: <http://es.wikipedia.org/wiki/Polinomio>, Fecha de consulta: Septiembre 2012

16 Operaciones con polinomios: http://es.wikipedia.org/wiki/Operaciones_con_polinomios, Fecha de consulta: Septiembre 2012

tres tanques, ya que se comprobó experimentalmente que la respuesta de corriente que los sensores de presión producen es, tal como lo muestran sus especificaciones, linealmente proporcional a la presión de la columna de agua, entregando valores entre 4 y 20[mA].

Una respuesta lineal se expresa matemáticamente por medio de la función general de una recta $y = mx + b$, que se puede expresar como un polinomio, donde $y = P(x)$, $m = a_1$ y $b = a_0$, lo que permite utilizar perfectamente el bloque de polinomio, haciéndolo ideal para la evaluación de las expresiones que convierten la entrada que contiene valores de corriente, en una salida que contiene valores en centímetros.

Para tener una representación lo más fiel posible, se obtuvo las rectas de las señales de respuesta específicas de cada uno de los tres sensores de presión instalados, cuyos cálculos se los detalla en el Anexo F.

Los bloques de polinomio presentes en este modelo son:

- Polynomial
- Polynomial1
- Polynomial2

El bloque Polynomial, contiene la expresión correspondiente a la representación de la señal de respuesta del sensor de presión del primer tanque.

A continuación se muestra la interfaz de parámetros del bloque Polynomial:

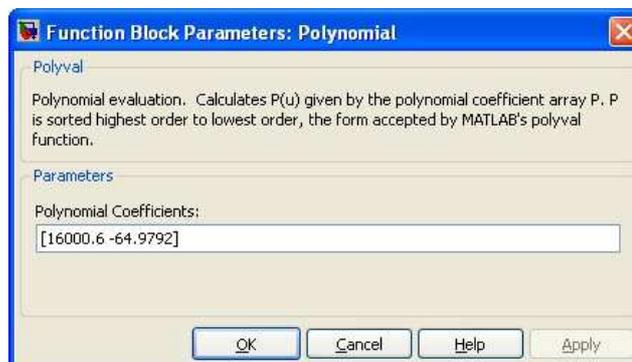


Figura 3.36. Interfaz de Parámetros del Bloque Polynomial

Se puede observar que la expresión obtenida es:

$$H_1 = (16000.6I_1 - 64.9792)[cm]$$

Ecuación 3.1. Función de H1 con respecto a I1

Se deduce que $m = a_1 = 16000.6$ y $b = a_0 = -64.9792$, valores que se han ingresado como coeficientes del respectivo polinomio.

El bloque Polynomial1, contiene la expresión correspondiente a la representación de la señal de respuesta del sensor de presión del segundo tanque.

A continuación se muestra la interfaz de parámetros del bloque Polynomial1:

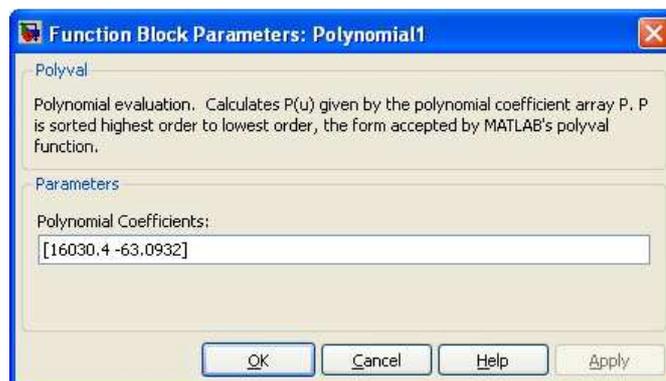


Figura 3.37. Interfaz de Parámetros del Bloque Polynomial1

Se puede observar que la expresión obtenida es:

$$H_2 = (16030.4I_2 - 63.0932)[cm]$$

Ecuación 3.2. Función de H2 con respecto a I2

Se deduce que $m = a_1 = 16030.4$ y $b = a_0 = -63.0932$, valores que se han ingresado como coeficientes del respectivo polinomio.

El bloque Polynomial2, contiene la expresión correspondiente a la representación de la señal de respuesta del sensor de presión del tercer tanque.

A continuación se muestra la interfaz de parámetros del bloque Polynomial2:

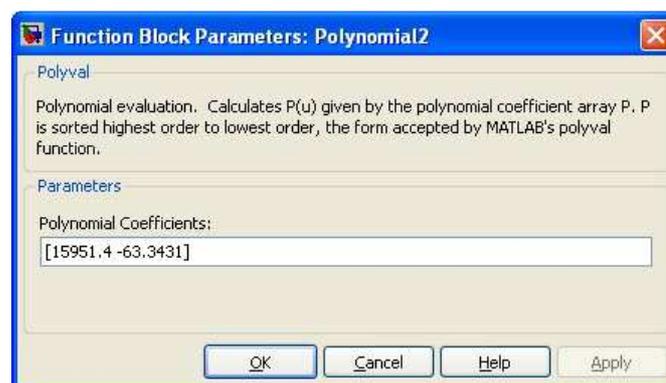


Figura 3.38. Interfaz de Parámetros del Bloque Polynomial2

Se puede observar que la expresión obtenida es:

$$H_3 = (15951.4I_3 - 63.3431)[cm]$$

Ecuación 3.3. Función de H3 con respecto a I3

Se deduce que $m = a_1 = 15951.4$ y $b = a_0 = -63.3431$, valores que se han ingresado como coeficientes del respectivo polinomio.

Un bloque de función de transferencia, es un elemento que permite modelar un sistema lineal por medio de su función de transferencia expresada en el dominio de la frecuencia.

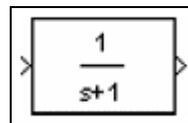


Figura 3.39. Bloque de Función de Transferencia

Los bloques de función de transferencia presentes en este modelo son:

- Transfer Fcn
- Transfer Fcn1
- Transfer Fcn2

Los tres bloques presentan la siguiente función de transferencia:

$$\frac{1}{10s+1}$$

Ecuación 3.4. Función de Transferencia del Filtro para la Visualización en Pantalla

Su finalidad es la de actuar como filtros, para minimizar el efecto del ruido sobre las señales provenientes desde los sensores de presión, y así obtener en pantalla señales suavizadas, sin que sus magnitudes se vean afectadas por la acción del filtrado. Este filtro fue determinado experimentalmente, después de comprobar que produce un muy buen efecto en la minimización del ruido de las señales, sin comprometer en absoluto sus magnitudes.

Una vez explicado todo el modelo creado para la adquisición de datos, se procede con la configuración previa a la simulación del mismo. SIMULINK utiliza la integración numérica para resolver ecuaciones de sistemas dinámicos. Solver (editor de resolución) es el motor utilizado para la integración numérica. Los parámetros

clave son los tiempos de inicio y finalización, y el tipo y método de integración de Solver [17].

A continuación se muestra la interfaz de configuración de parámetros de simulación del modelo:

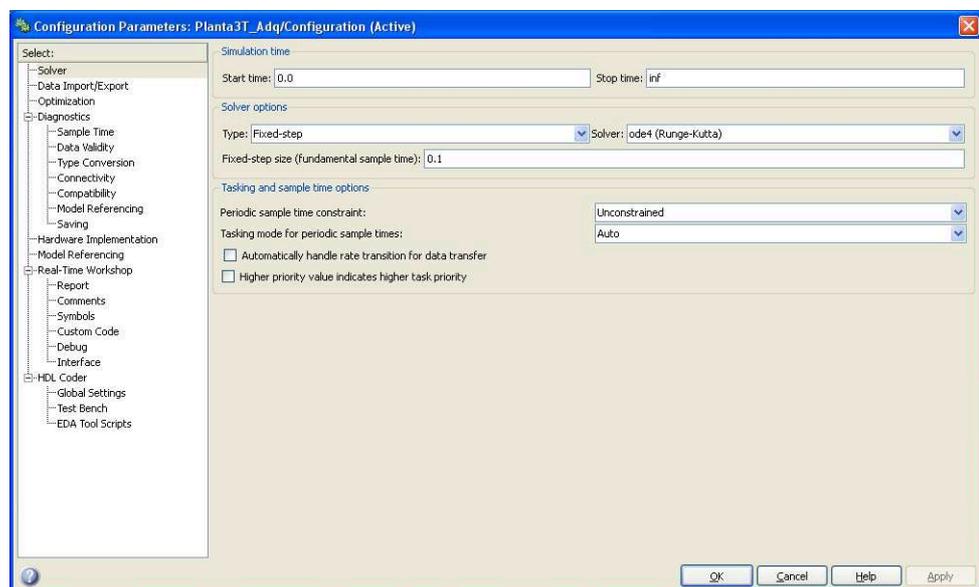


Figura 3.40. Interfaz de Configuración de Parámetros de Simulación

Se puede observar que:

El tiempo de inicio de la simulación es en 0.0[sec], que es el valor por defecto para este campo, y significa que, tan pronto se da la

orden de iniciar la simulación, los elementos del modelo también inician su funcionamiento, sin que haya tiempo de espera alguno.

El tiempo de finalización de la simulación es infinito (inf), y significa que la simulación correrá continuamente por un tiempo indefinido, sólo pudiendo ser detenida por la intervención del usuario, accionando la orden de finalizar la simulación.

El tipo de Solver ajusta el método de integración numérica como de paso variable o paso fijo. El paso fijo utiliza el mismo tamaño de paso durante toda la simulación. Al elegir paso fijo, es necesario establecer el tamaño del paso, en este caso, 0.1[sec], es decir, 100 milésimas de segundo para cada paso [18].

El método de integración selecciona el Solver para calcular los estados del modelo durante la simulación, en este caso, ode4 (Runge-Kutta), que calcula el estado del modelo en el próximo paso del tiempo como una función explícita del valor actual del estado y

las derivadas del estado, mediante la técnica de integración de la Fórmula Runge-Kutta de Cuarto Orden [19].

Este tipo y método de Solver fueron determinados experimentalmente, después de comprobar que los resultados de la simulación balancean una precisión adecuada con respecto al tiempo de simulación, para los modelos en los que no se trabaja directamente con o sobre la planta, en los cuales el tiempo de simulación es igual al tiempo real.

Los demás campos contienen los valores por defecto del bloque, y no son de gran relevancia para este modelo.

Esta configuración de parámetros de simulación, es exactamente igual para todos los modelos de este proyecto.

Una vez que se ejecuta la simulación del modelo para la adquisición de datos, los datos adquiridos se almacenan en la variable `Adq_Data` dentro del espacio de trabajo de MATLAB, provenientes desde el bloque de osciloscopio presente en el modelo.

A continuación se muestra el ambiente de trabajo de MATLAB, posterior a la ejecución de la simulación de dicho modelo:

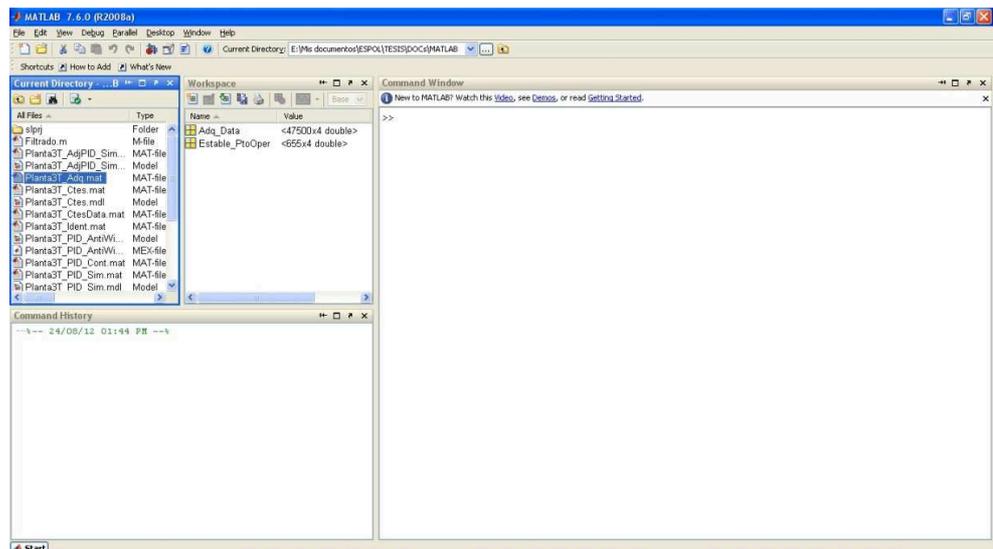


Figura 3.41. Ambiente de Trabajo de MATLAB posterior a la Simulación para la Adquisición de Datos

Los resultados de la simulación almacenados en la variable Adq_Data, son los siguientes:

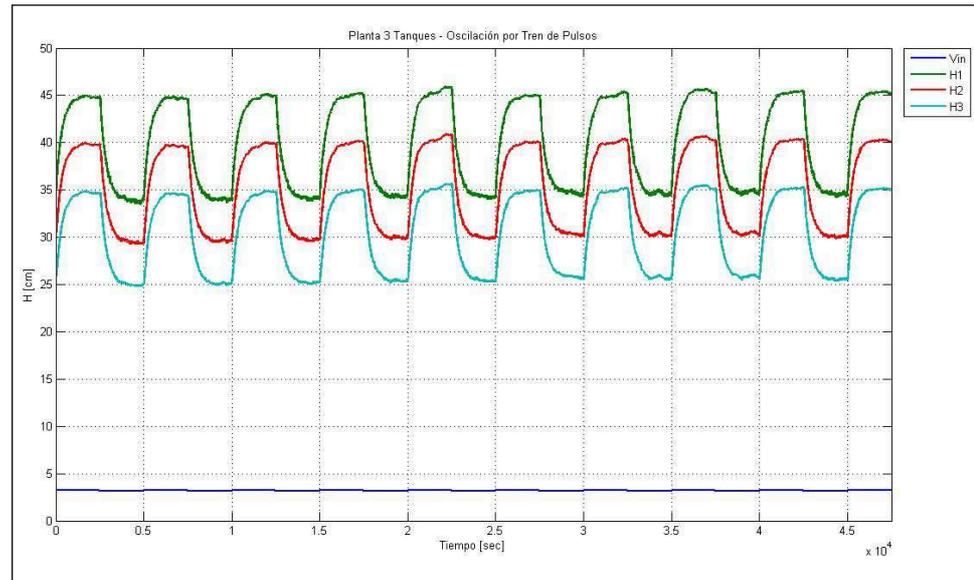


Figura 3.42. Adquisición de Datos para la Identificación de la Planta

Se puede observar que:

La altura máxima promedio de la columna de agua del tercer tanque es de alrededor de 34.9[cm], es decir, 4.9[cm] por encima del nivel de referencia de 30[cm]. La altura mínima promedio de la columna de agua del tercer tanque es de alrededor de 25.5[cm], es decir, 4.5[cm] por debajo del nivel de referencia de 30[cm].

El tiempo promedio en que la columna de agua del tercer tanque se estabiliza en este cambio de 9.4[cm] es de alrededor de 1300[sec], es decir que un cambio de 1[cm] de altura de la columna de agua

del tercer tanque se esperaría que se estabilice en alrededor de 140[sec].

Esto se lo puede apreciar en la siguiente gráfica:

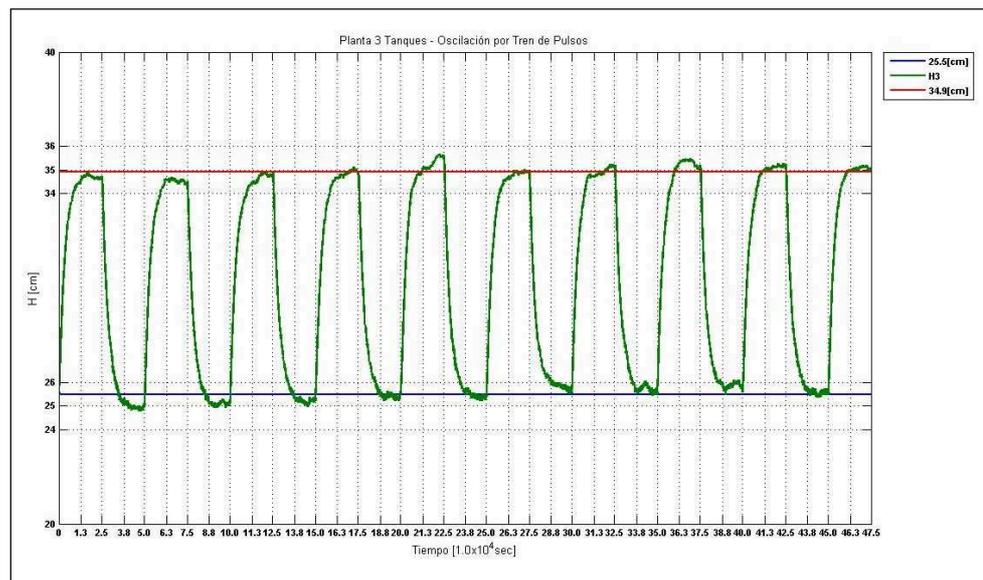


Figura 3.43. Detalle de las Alturas Promedio Máximas y Mínimas de H3

Con estos datos adquiridos, se procede a realizar la identificación de la planta por medio de la herramienta IDENT (System Identification Tool) de MATLAB.

Para esto, se invoca a la herramienta IDENT desde la ventana de comandos de MATLAB:

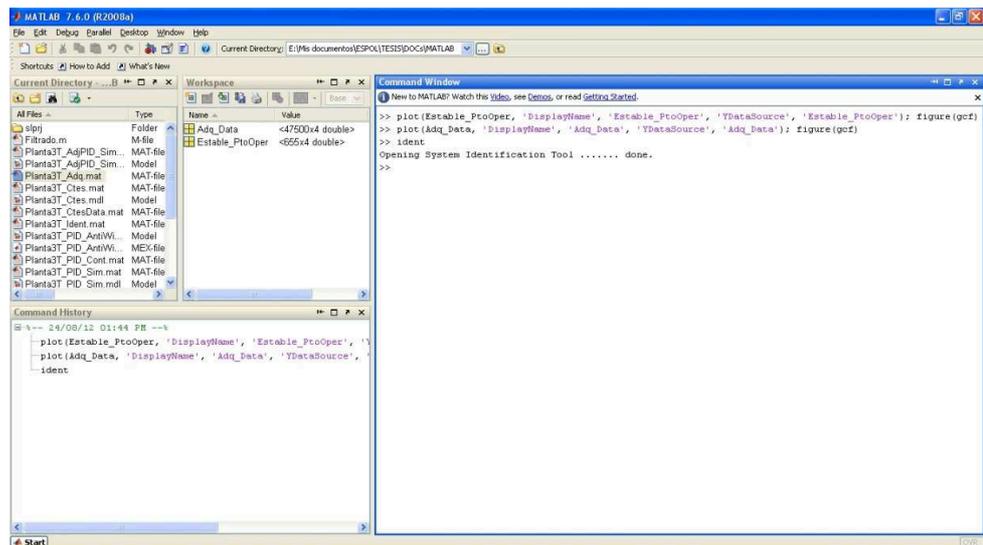


Figura 3.44. Invocación de la Herramienta IDENT en MATLAB

Este comando carga la GUI de la herramienta IDENT, abriendo su ambiente de trabajo que se muestra a continuación:

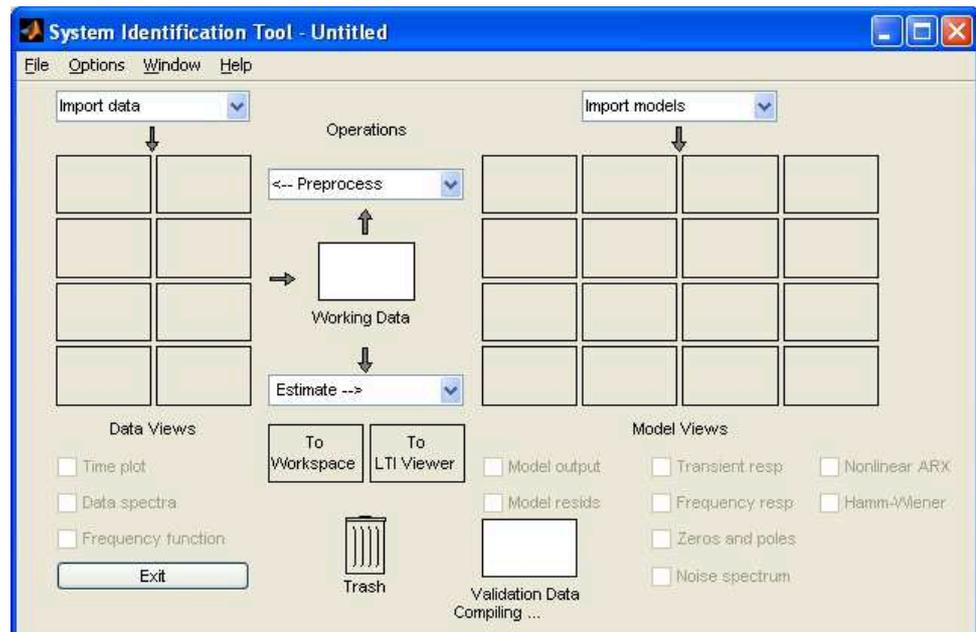


Figura 3.45. Interfaz Gráfica del Usuario (GUI) de la Herramienta IDENT

Una vez abierta la herramienta IDENT, se procede a importar los datos adquiridos a ser identificados.

Dado que los datos fueron adquiridos mediante una simulación ejecutada en tiempo real y, por esto, su representación siempre será con respecto al tiempo, se realiza la importación de los datos desde el dominio del tiempo en que han sido almacenados:

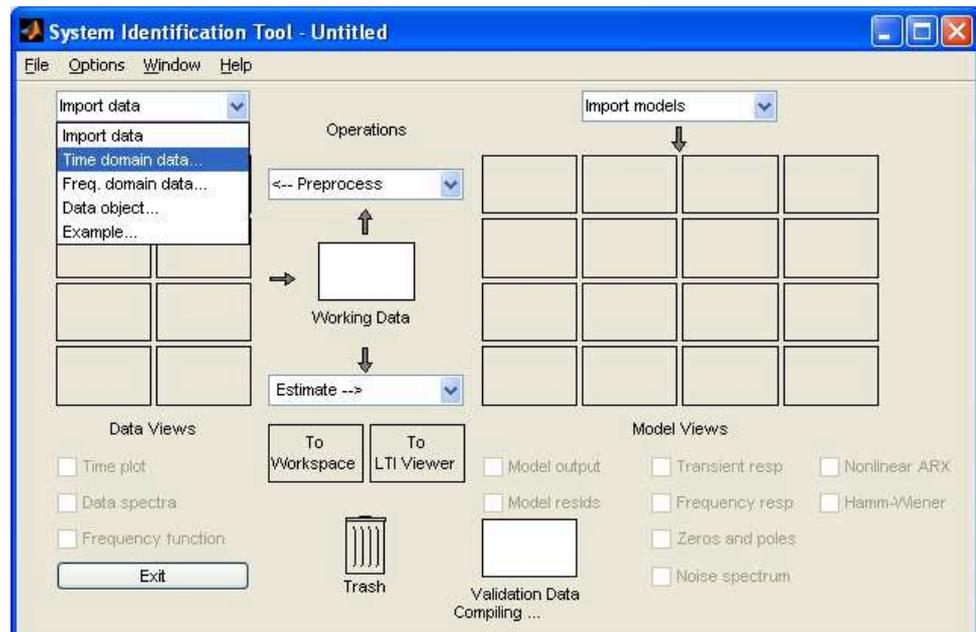


Figura 3.46. Importación de Datos en el Dominio del Tiempo

Los datos fueron almacenados en la variable `Adq_Data`, tal como se lo indicó previamente en esta sección, y contiene 47500 datos (1 dato tomado por cada segundo de simulación) agrupados por el bloque multiplexor presente en el modelo, en un formato ordenado por columnas.

La primera columna contiene los valores del voltaje DC de referencia, la segunda columna contiene los valores en centímetros de la altura de la columna de agua del primer tanque, la tercera columna contiene los valores en centímetros de la altura de la columna de agua del segundo tanque y la cuarta columna contiene

los valores en centímetros de la altura de la columna de agua del tercer tanque, tal como se muestra a continuación:

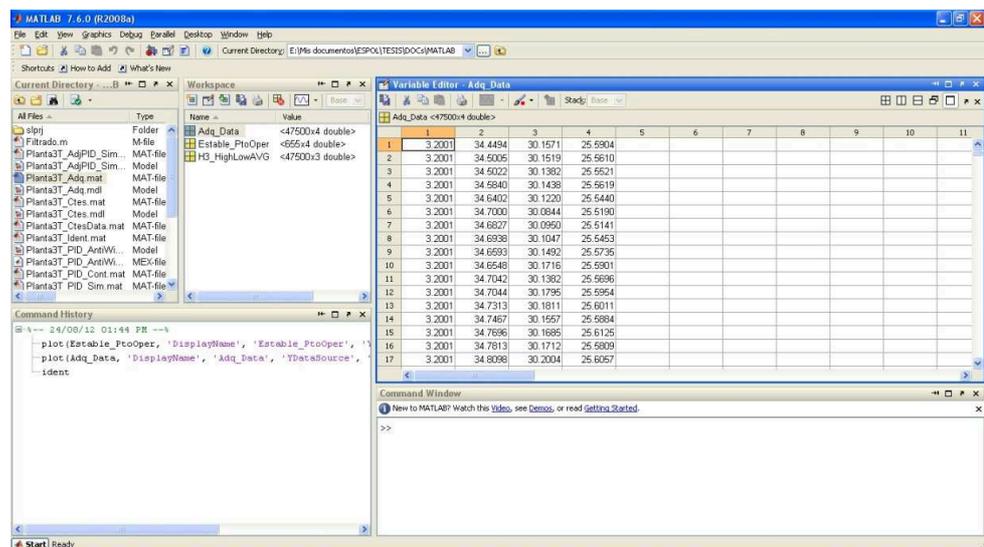


Figura 3.47. Muestra del Formato de la Variable Adq_Data

Los datos a seleccionarse son datos de entrada y salida, es decir, los valores de los datos de la señal de estímulo, y los valores de los datos de la(s) señal(es) resultante(s) en respuesta a este estímulo. En este caso, la señal de estímulo es la señal con el tren de pulsos de voltaje DC que se aplica al variador de frecuencia, por lo que los valores de los datos de esta señal, corresponden a los datos de entrada, y se han almacenado en la primera columna de la variable Adq_Data.

Como la señal de respuesta que nos interesa controlar es la señal resultante de respuesta de la altura en centímetros de la columna de agua del tercer tanque, sus valores corresponden a los datos de salida, y se han almacenado en la cuarta columna de la variable Adq_Data.

La selección de los datos se muestra a continuación:

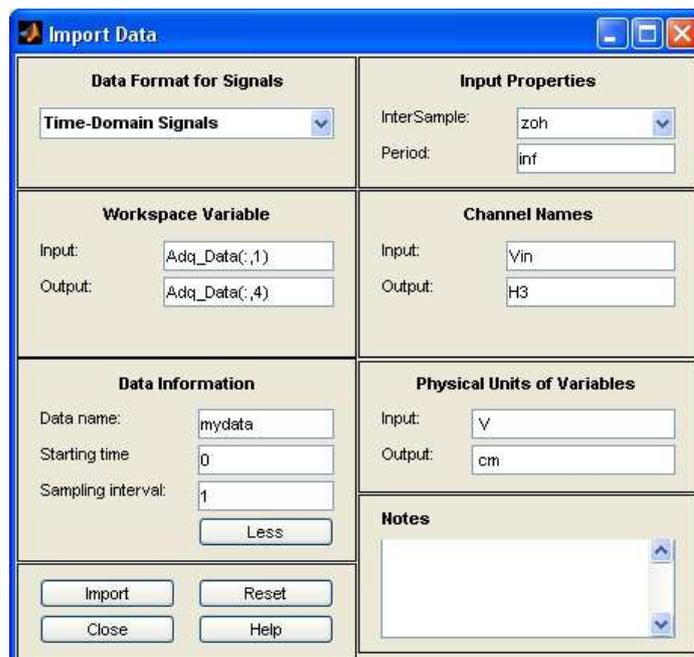


Figura 3.48. Importación de Datos para la Identificación

Se puede observar que:

El nombre dado a los datos de entrada es V_{in} . El nombre dado a los datos de salida es H_3 . Las unidades especificadas para los datos de entrada, se las ha llamado V (de voltios). Las unidades especificadas para los datos de salida, se las ha llamado cm (de centímetros). El conjunto de datos importados se almacena en el área de trabajo de IDENT con el nombre de `mydata`. El tiempo de inicio se lo ha establecido en $0[sec]$, de manera que el inicio del eje del tiempo en las gráficas se encuentre en el origen ($t=0$). El intervalo de muestreo se lo ha establecido en $1[sec]$, de manera que coincida con el intervalo de muestreo de la señal de la altura de la columna de agua del tercer tanque, tal como se lo indicó previamente en esta sección.

Cuando se procede a dar la orden de la importación de los datos especificados, éstos se almacenan en el área de trabajo de IDENT con el nombre establecido, tal como se muestra a continuación:

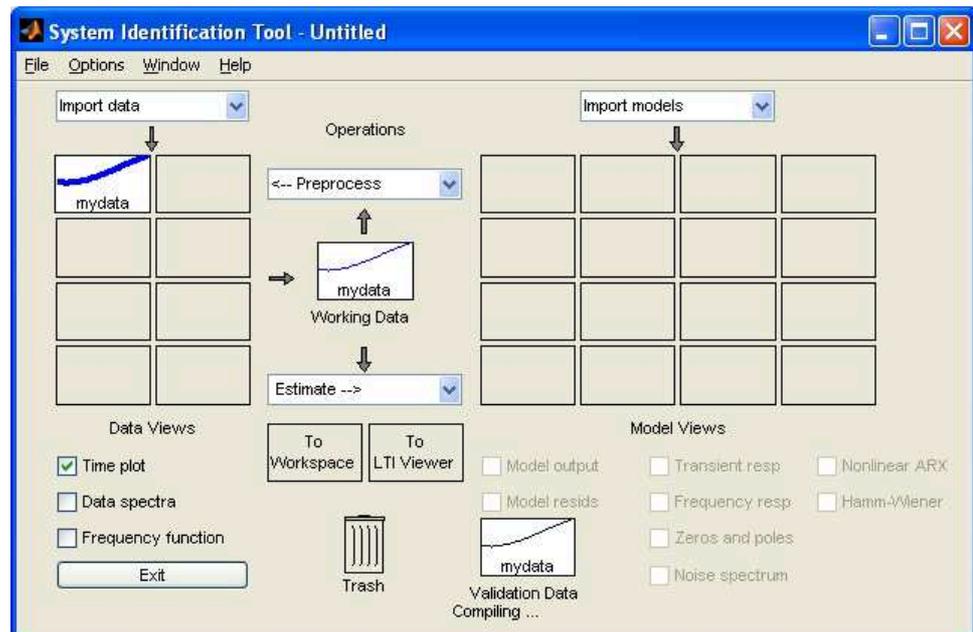


Figura 3.49. Conjunto de Datos Importados MYDATA en IDENT

Para comprobar que los datos importados son los correctos, se obtiene una gráfica en el tiempo de los mismos. El resultado se muestra a continuación:

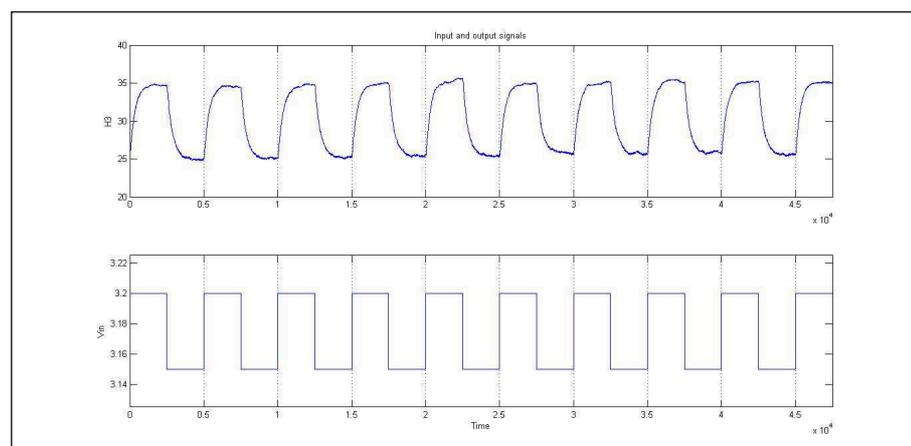


Figura 3.50. Gráfica en el Tiempo de los Datos Importados MYDATA

Se puede observar en la parte superior de la gráfica, la curva correspondiente a los datos adquiridos de la señal con los valores de la altura de la columna de agua del tercer tanque; y en la parte inferior de la gráfica, la curva correspondiente a los datos adquiridos de la señal con el tren de pulsos de voltaje DC que se aplica al variador de frecuencia, ambas entre 0 y 47500 segundos.

Con esto se comprueba que la importación de los datos adquiridos, ha sido exitosa.

El siguiente paso, es seleccionar dos rangos de trabajo de estos datos importados, almacenados en el área de trabajo de IDENT con el nombre de mydata.

El primer rango de trabajo será utilizado para el proceso de identificación de la planta, y el segundo rango de trabajo será utilizado para validar esta identificación. Esto se lo hace con el fin de obtener una identificación más fiel, ya que la identificación se la realiza sobre un rango de trabajo, y el resultado del modelo identificado se compara con un rango de trabajo diferente, pero obtenido de los mismos datos importados, haciendo su contraste más real, dando así una mejor validación de la identificación

realizada y por tanto, una verificación más acertada a la que se obtendría si los rangos utilizados para la identificación y validación de la misma, fueran iguales.

A continuación se procede con la selección del rango de trabajo para el proceso de identificación:

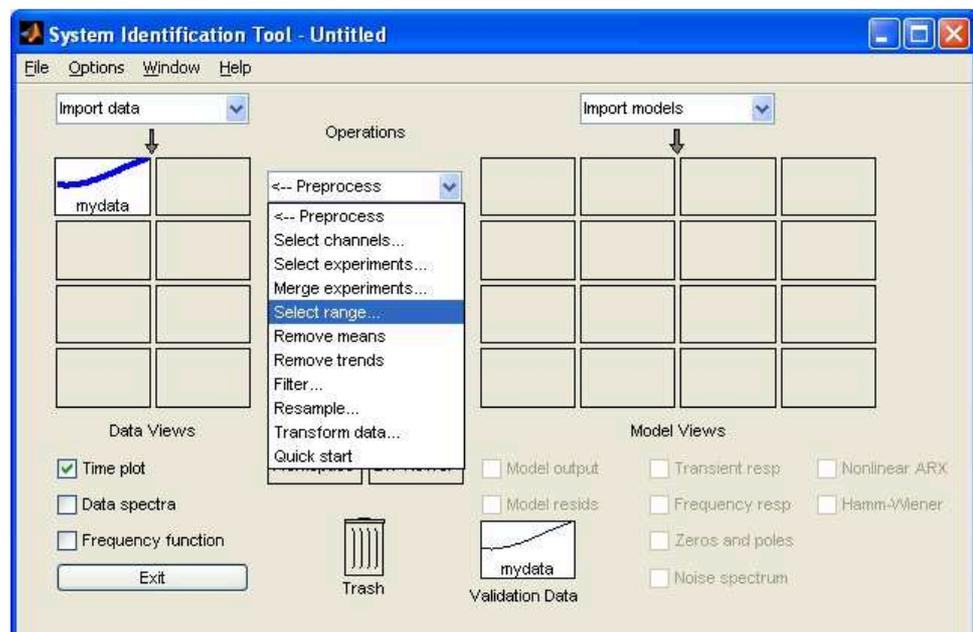


Figura 3.51. Comando para la Selección del Rango de Trabajo

Cuando se invoca al comando para la selección del rango de trabajo, se presenta en pantalla una ventana como la siguiente:

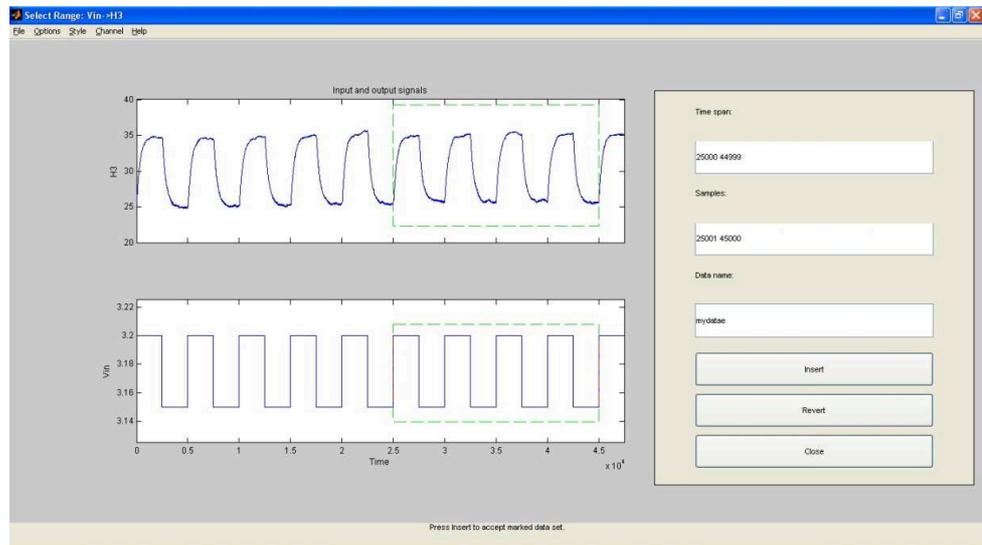


Figura 3.52. Ventana para la Selección del Rango de Trabajo para Identificación

Aquí se puede observar que se dispone de 9 ciclos completos de la curva correspondiente a los datos adquiridos de la señal con los valores de la altura de la columna de agua del tercer tanque, de los cuales un ciclo aparece con una amplitud ligeramente mayor al resto, motivo por el cual va a ser descartado, lo que nos deja con 8 ciclos completos para trabajar. Esto permite tener 4 ciclos completos para ser utilizados en el proceso de identificación y 4 ciclos completos para ser utilizados en el proceso de validación de la identificación.

Los 4 ciclos completos para el proceso de identificación a seleccionar, son los correspondientes al rango entre 25000 y 45000

segundos, y se almacenan en el área de trabajo de IDENT con el nombre de mydatae. Aunque también se pudo seleccionar los ciclos correspondientes al rango entre 0 y 20000 segundos, se comprobó que los ciclos seleccionados entre 25000 y 45000 segundos producen una mejor identificación.

Cuando se procede a dar la orden de insertar el rango especificado, éste se almacena en el área de trabajo de IDENT con el nombre establecido, tal como se muestra a continuación:

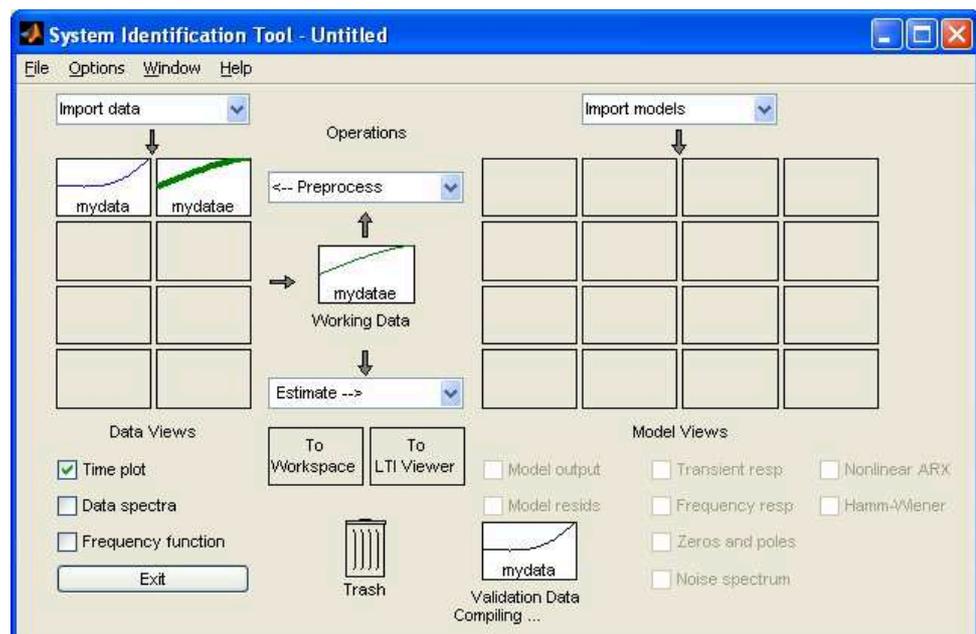


Figura 3.53. Rango de Trabajo para Identificación MYDATAE en IDENT

Para comprobar que el rango especificado es el correcto, se obtiene una gráfica en el tiempo del mismo. El resultado se muestra a continuación:

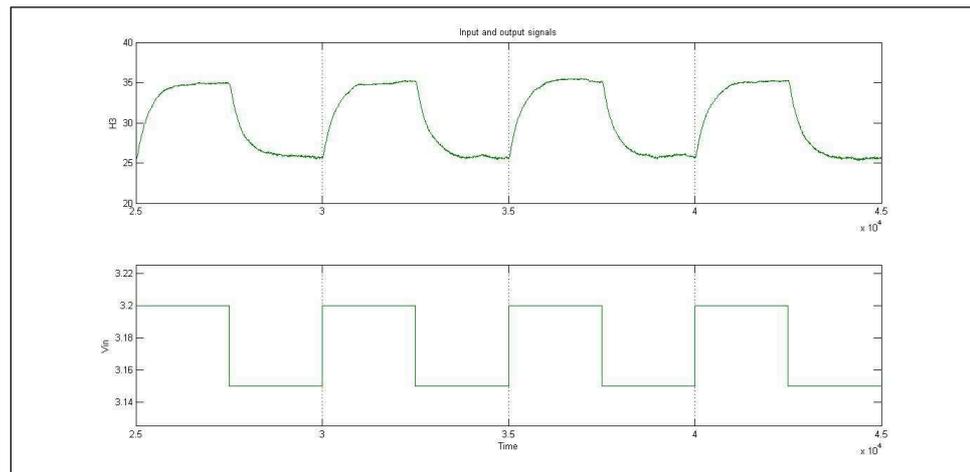


Figura 3.54. Gráfica en el Tiempo del Rango de Trabajo MYDATAE

Se puede observar en la parte superior de la gráfica, la curva correspondiente a los datos adquiridos de la señal con los valores de la altura de la columna de agua del tercer tanque; y en la parte inferior de la gráfica, la curva correspondiente a los datos adquiridos de la señal con el tren de pulsos de voltaje DC que se aplica al variador de frecuencia, ambas entre 25000 y 45000 segundos.

Con esto se comprueba que la inserción del rango especificado en IDENT, ha sido exitosa.

El siguiente paso, es eliminar el promedio de los datos del rango especificado, almacenados en el área de trabajo de IDENT con el nombre de mydatae.

Este procedimiento es equivalente a quitar un offset DC de una señal AC. En este caso, más específicamente, equivale a restar el valor en centímetros de la altura de la columna de agua del tercer tanque en el punto de operación de la planta, y a restar el valor de voltaje del punto de operación del tren de pulsos que se aplica al variador de frecuencia, de manera que ambas señales varíen alrededor de cero, y no de sus respectivos valores alrededor del punto de operación de la planta.

A continuación se procede con la remoción del promedio de los datos del rango especificado para el proceso de identificación:

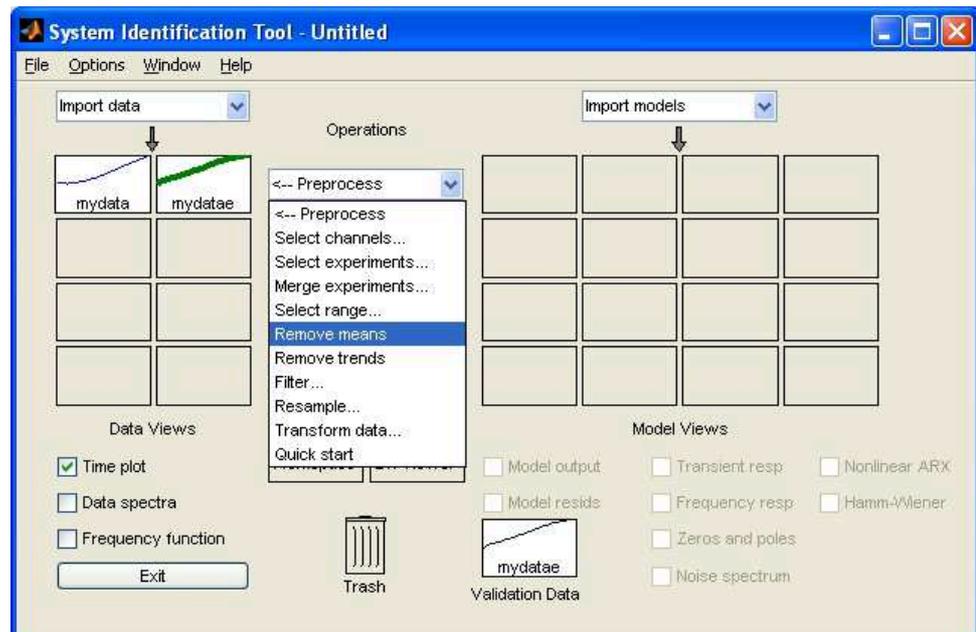


Figura 3.55. Comando para la Remoción del Promedio del Rango de Trabajo

Cuando se invoca al comando para la remoción del promedio del rango de trabajo, estos datos se almacenan en el área de trabajo de IDENT con el nombre de mydataae, tal como se muestra a continuación:

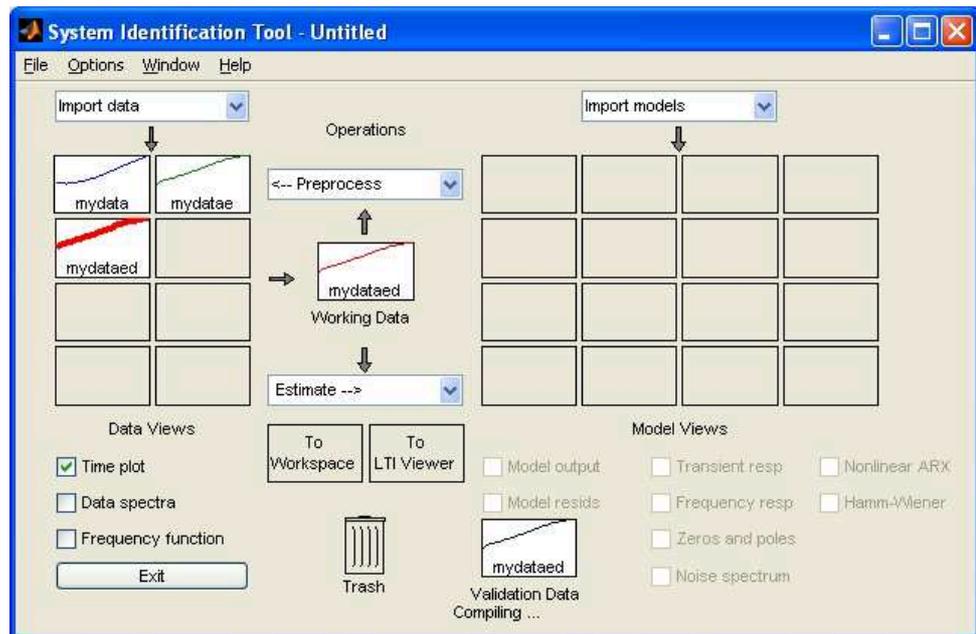


Figura 3.56. Rango de Trabajo sin Promedio para Identificación MYDATAED en IDENT

Para comprobar que el rango especificado se encuentra ya sin promedio, es decir, sin los valores del punto de operación, se obtiene una gráfica en el tiempo del mismo.

El resultado se muestra a continuación:

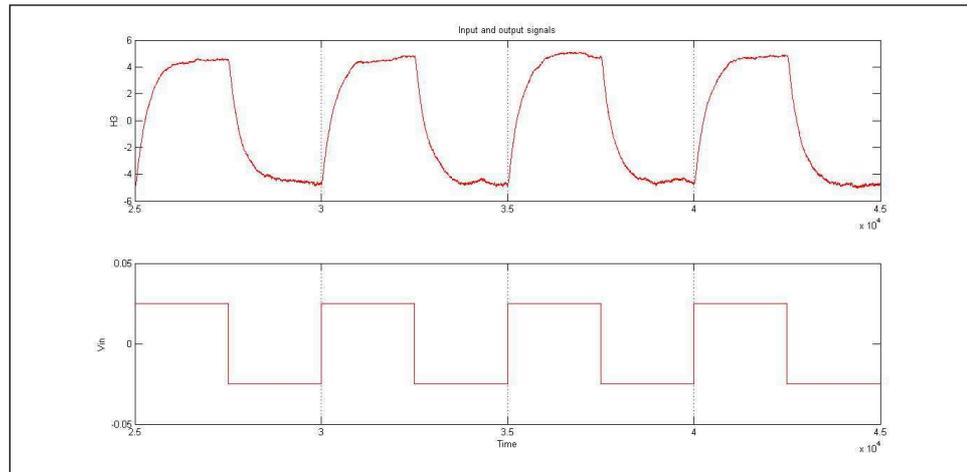


Figura 3.57. Gráfica en el Tiempo del Rango de Trabajo sin Promedio MYDATAED

Se puede observar en la parte superior de la gráfica, la curva correspondiente a los datos adquiridos de la señal con los valores de la altura de la columna de agua del tercer tanque; y en la parte inferior de la gráfica, la curva correspondiente a los datos adquiridos de la señal con el tren de pulsos de voltaje DC que se aplica al variador de frecuencia, ambas variando ya alrededor de cero, y no de sus respectivos valores alrededor del punto de operación de la planta.

Con esto se comprueba que la remoción de promedios del rango especificado, ha sido exitosa.

A continuación se procede con la selección del rango de trabajo para el proceso de validación de la identificación que se va a obtener. Para esto, se realizan los mismos procedimientos de selección de rango y remoción del promedio para su acondicionamiento, tal como ya se lo hizo con el rango de trabajo para el proceso de identificación:

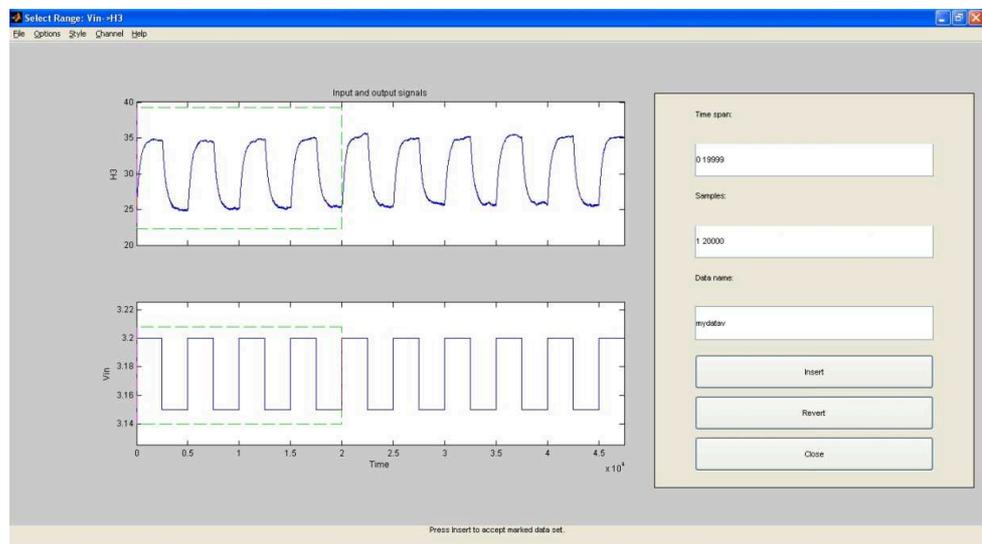


Figura 3.58. Ventana para la Selección del Rango de Trabajo para Validación

Los 4 ciclos completos para el proceso de identificación a seleccionar, son los correspondientes al rango entre 0 y 20000 segundos, y se almacenan en el área de trabajo de IDENT con el nombre de mydatav.

El resultado se muestra a continuación:

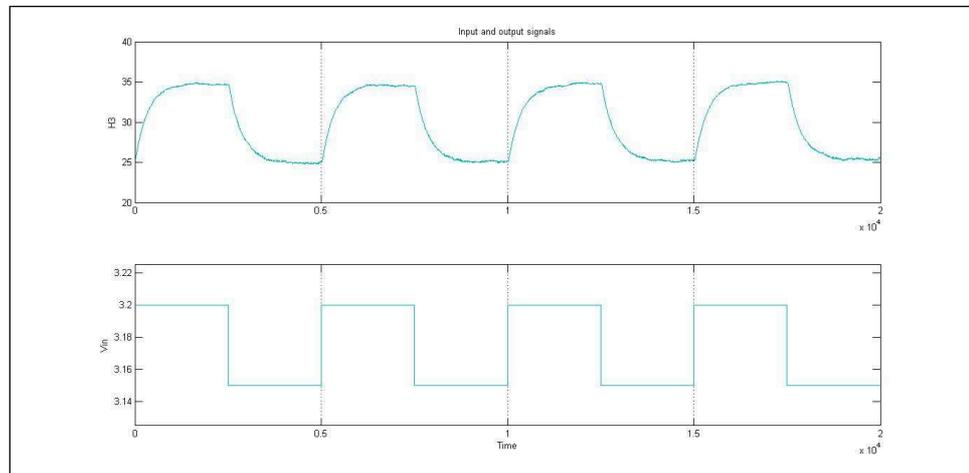


Figura 3.59. Gráfica en el Tiempo del Rango de Trabajo para Validación MYDATAV

El siguiente paso, es eliminar el promedio de los datos del rango especificado, almacenados en el área de trabajo de IDENT con el nombre de mydatav. Estos datos se almacenan en el área de trabajo de IDENT con el nombre de mydatavd.

El resultado se muestra a continuación:

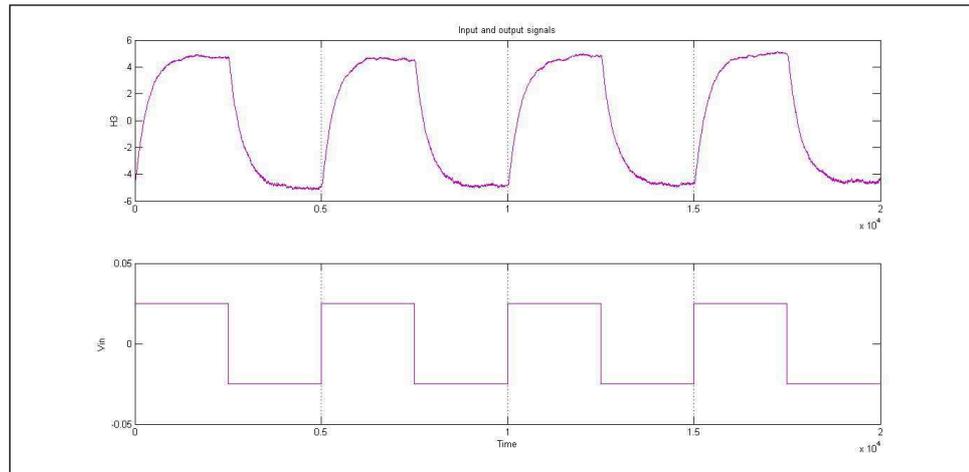


Figura 3.60. Gráfica en el Tiempo del Rango de Trabajo para Validación sin Promedio MYDATAVD

En este punto, se puede obtener una gráfica simultánea de los rangos de trabajo acondicionados para los procesos de identificación y validación de la identificación, mydataed y mydatavd, respectivamente.

El resultado se muestra a continuación:

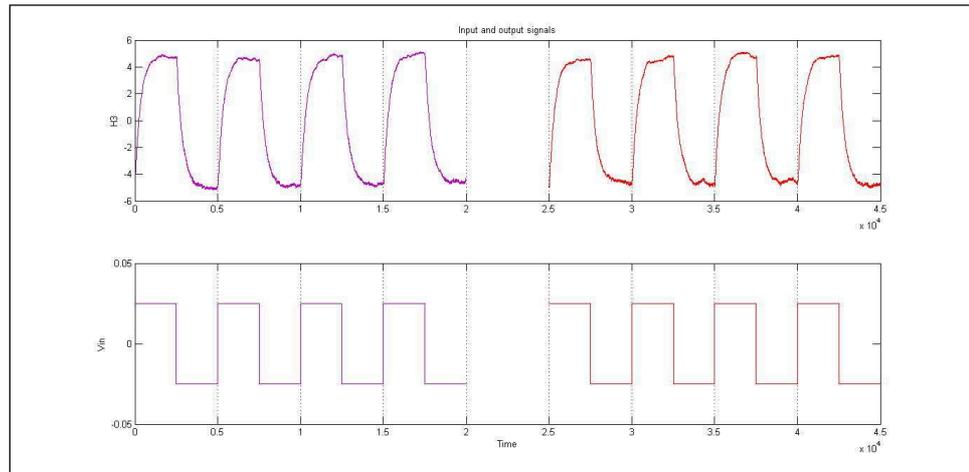


Figura 3.61. Gráfica en el Tiempo de los Rangos de Trabajo MYDATAED y MYDATAVD

En esta gráfica se pueden observar los 8 ciclos completos listos para trabajar, en dos grupos de 4 ciclos completos cada uno, tal como se lo había indicado inicialmente, previo a sus respectivos procesos de selección.

El siguiente paso, consiste en especificar a la herramienta IDENT que los datos almacenados en mydataed serán utilizados para la identificación, ubicándolos dentro del campo Working Data; y que los datos almacenados en mydatavd serán utilizados para la validación de la identificación, ubicándolos dentro del campo Validation Data.

El resultado se muestra a continuación:

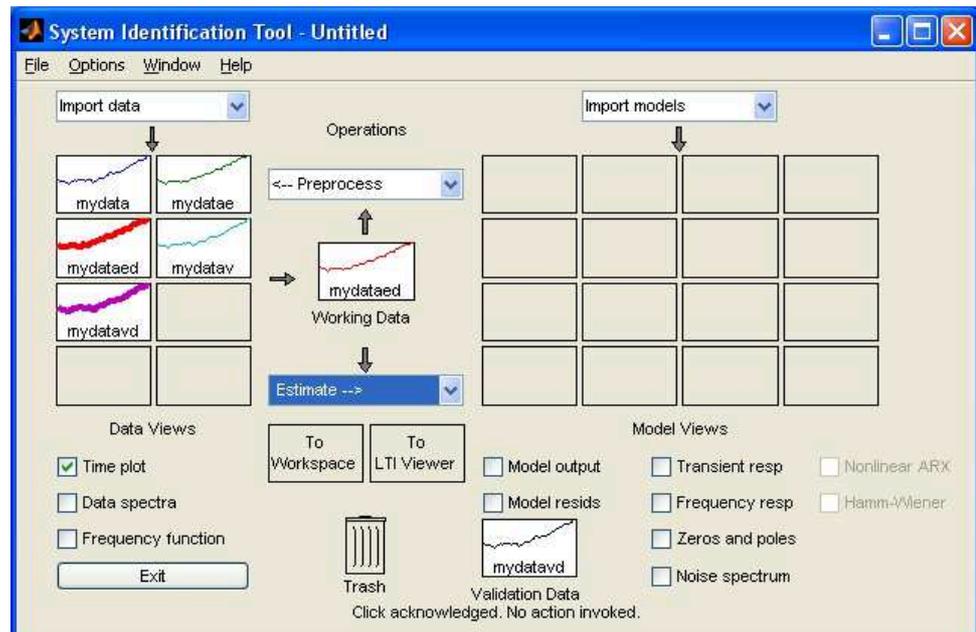


Figura 3.62. Conjuntos de Datos MYDATAED y MYDATAVD y Comando para la Identificación

Con todo el ambiente de trabajo de la herramienta IDENT listo, se invoca al comando Estimate para elegir y preparar el método a ser utilizado para la identificación del sistema.

Cuando se ejecuta este comando, se despliega una lista con los distintos métodos disponibles para estimar y proveer un modelo matemático del sistema, identificado a partir de los conjuntos de datos seleccionados para el efecto, tal como se muestra a continuación:

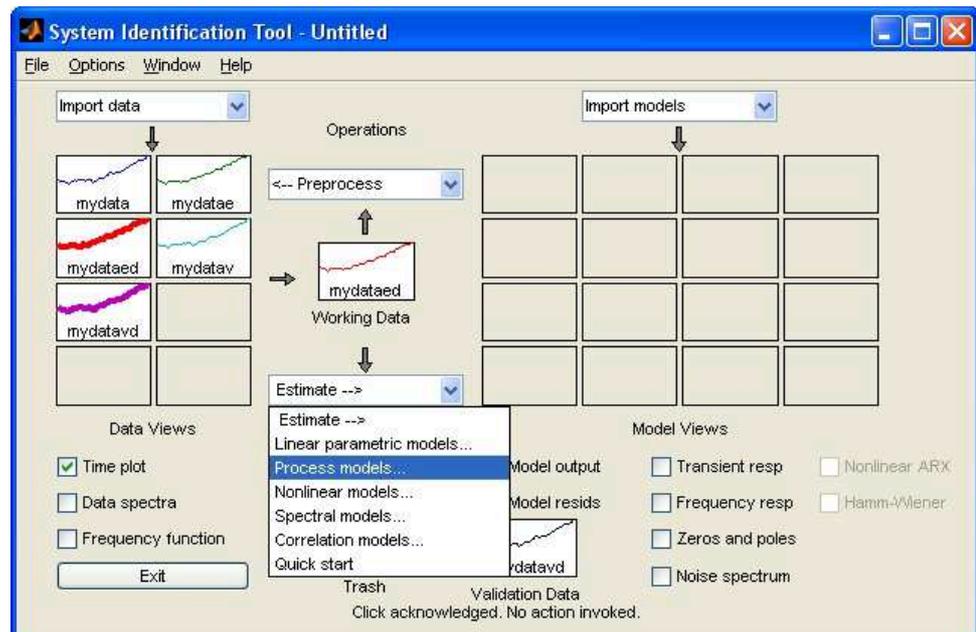


Figura 3.63. Métodos Disponibles para la Identificación de Sistemas en IDENT

De todos los métodos disponibles que ofrece IDENT para la identificación de sistemas, el que mejor se ajusta en términos a datos de entrada conocidos y configurables, al tipo de sistema, y a la forma de salida del modelo identificado (una función de transferencia expresada en el dominio de la frecuencia), es el método Process Models (Modelo de Procesos), por lo cual fue elegido para realizar la identificación.

Los modelos de procesos, son modelos lineales dinámicos simples, continuos en el tiempo, que se describen en términos de las constantes de tiempo, la ganancia estática, un posible tiempo

muerto, y un posible cero de proceso (numerador no constante) del sistema [20].

A continuación se muestra el cuadro de diálogo de este método:

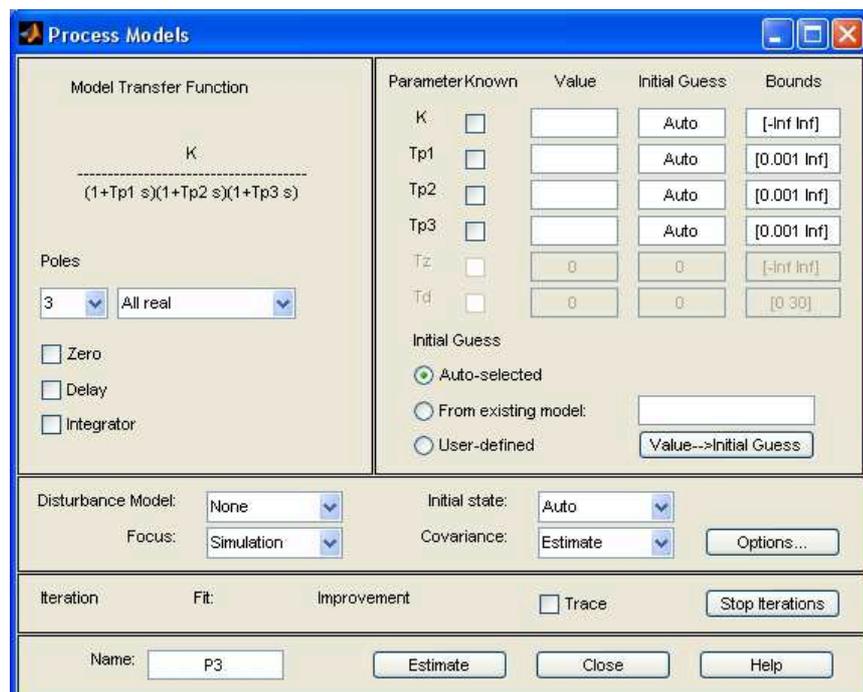


Figura 3.64. Cuadro de Diálogo de Process Models

Se puede observar que:

La salida del método, es un modelo expresado por una función de transferencia en el dominio de la frecuencia. A partir de la función de

transferencia del tercer tanque con respecto al voltaje de entrada de la planta, cuyo desarrollo se lo detalla en el Anexo H, se infiere que el sistema no tiene ceros en su numerador, y que tiene tres polos en su denominador:

$$\frac{h_3(s)}{U(s)} = \frac{K_U c_1 c_2}{s^3 (L^6) + s^2 (2L^4 c_2 + L^4 c_3 + 2L^4 c_1) + s (3L^2 c_1 c_2 + 2L^2 c_1 c_3 + L^2 c_2 c_3) + c_1 c_2 c_3}$$

Ecuación 3.5. Función de Transferencia del Tercer Tanque [21]

Esto se especifica en el cuadro de diálogo de Process Models: Se asume que los tres polos (Poles) son todos reales (All real).

Se dejan en blanco las casillas correspondientes a: un cero de proceso en el numerador (Zero), un retardo o tiempo muerto (Delay), y la presencia de un polo en el origen o integrador (Integrator).

También se especifica que:

21 Nichtrekursive Parametrische Identifikation: ABEL, D.; BOLLIG, A., Rapid Control Prototyping: Methoden und Anwendungen, Erste Auflage, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2006, p. 346

No hay un modelo de perturbación (Disturbance Model) a identificar en el sistema. El enfoque (Focus) de la identificación se orienta a la simulación, que aproxima la dinámica del modelo (la función de transferencia de las salidas con respecto a las entradas medidas) en una norma que está dada por el espectro de entrada [22].

La covarianza (Covariance) será calculada para mejorar los resultados de la identificación, al no suprimir la estimación y el manejo de medidas de incertidumbre: el análisis de la covarianza es una técnica estadística que, utilizando un modelo de regresión lineal múltiple, busca comparar los resultados obtenidos en diferentes grupos de una variable cuantitativa, pero "corrigiendo" las posibles diferencias existentes entre los grupos en otras variables que pudieran afectar también al resultado (covariantes) [23].

Los demás campos, correspondientes al valor del estado inicial (Initial state) y a los valores de estimación inicial (Initial Guess), se han establecido para que sean calculados y/o seleccionados automáticamente (Auto, Auto-selected). La estimación se calcula mediante la búsqueda iterativa de un modelo que da la mínima

22 Process Models, Ayuda de MATLAB

23 Análisis de la covarianza: <http://www.seh-lelha.org/ancova.htm>, Fecha de consulta: Septiembre 2012

varianza del error de predicción, aplicada a los datos de trabajo [24]. Para ejecutar el proceso de identificación, se invoca al comando Estimate en el cuadro de diálogo de Process Models.

El resultado se muestra a continuación:

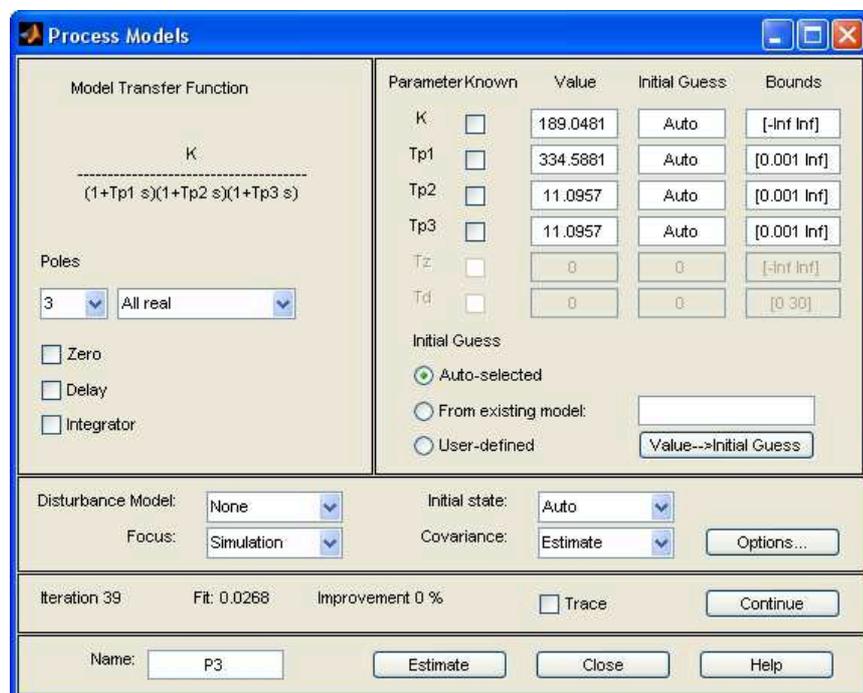


Figura 3.65. Cuadro de Diálogo de Process Models y Resultados de la Identificación

Se puede observar que:

Los resultados se obtienen después de 39 iteraciones, donde ya no se evidencia mejora en el proceso de identificación (Improvement: 0%). El ajuste (Fit) de la identificación es de 0.0268. También se lo conoce como función de pérdida (Loss Function), y es la suma de los cuadrados de los errores de predicción de salida, normalizada por el número de puntos de datos [25]. Se trata de una medida de discrepancia entre los datos y la estimación de un modelo matemático a partir de ellos. El valor obtenido, al ser pequeño, indica un buen ajuste del modelo identificado con respecto a los datos adquiridos [26].

El valor obtenido de la ganancia K , es de 189.0481. El valor obtenido de la constante de tiempo del primer polo T_{p1} , es de 334.5881[sec]. Los valores obtenidos de las constantes de tiempo de los dos polos restantes T_{p2} y T_{p3} , son de 11.0957[sec], lo cual quiere decir que se trata de un polo doble. Estos resultados se almacenan en el área de trabajo de IDENT con el nombre de P3, tal como se muestra a continuación:

25 Iteration Information, Ayuda de MATLAB

26 Residual sum of squares: http://en.wikipedia.org/wiki/Residual_sum_of_squares,
Fecha de consulta: Septiembre 2012

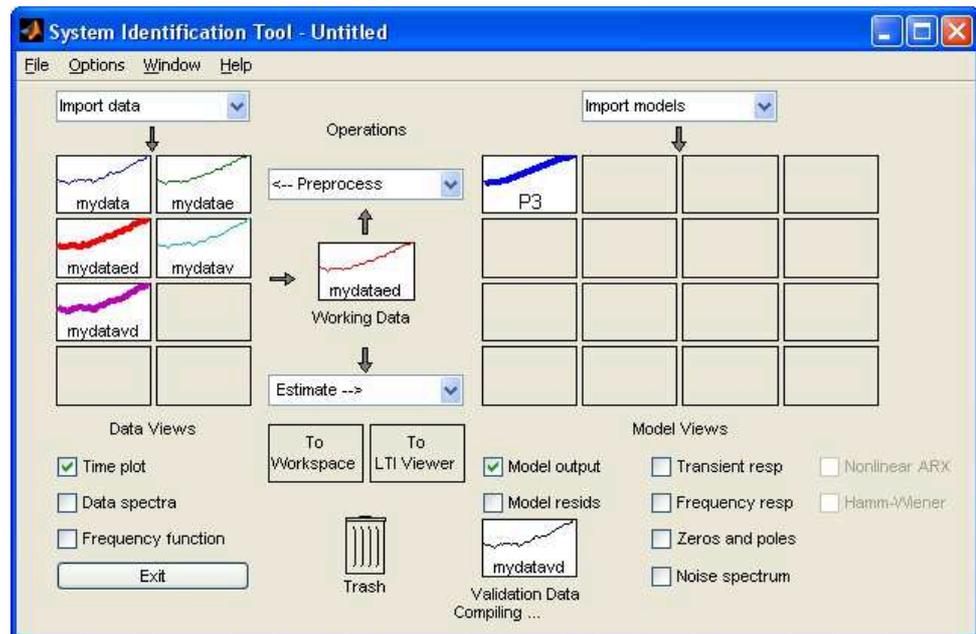


Figura 3.66. Resultados de la Identificación P3 en IDENT

Un buen modelo identificado, es el modelo más simple que mejor explica la dinámica de un sistema, y exitosamente simula o predice la salida para diferentes entradas del mismo [27].

Para verificar esto, se marca la casilla Model output, que genera una gráfica para comprobar cuánto coincide la salida del modelo identificado con la salida medida en el conjunto de validación de datos del sistema.

El resultado se muestra a continuación:

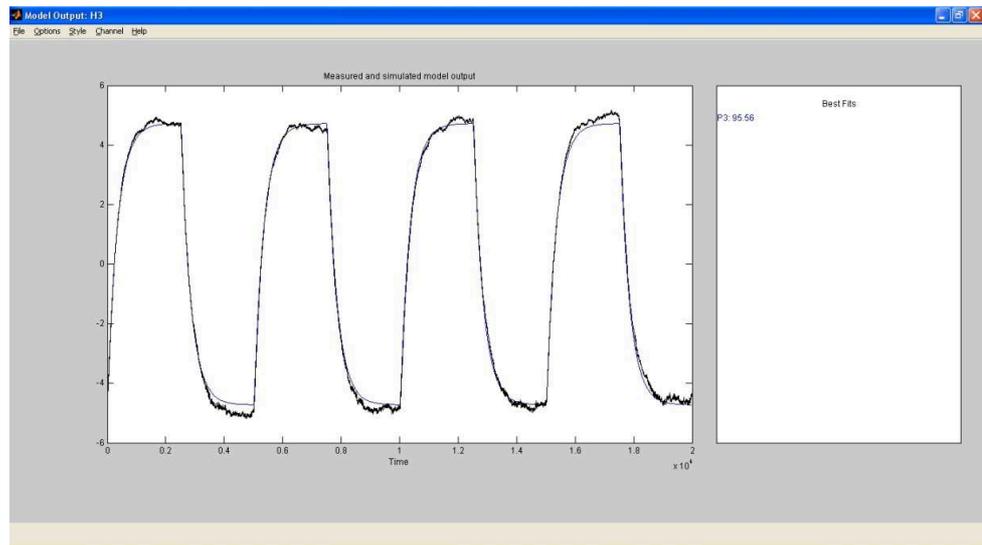


Figura 3.67. Gráfica de Validación del Modelo Identificado P3

Se puede observar que:

El porcentaje de ajuste entre el modelo identificado y los datos de validación es de 95.56%. Dado que el 100% significa un valor de ajuste perfecto, se concluye que el modelo identificado obtenido es muy bueno, y que la identificación ha sido exitosa.

Una vez finalizado el proceso de identificación, se exportan los resultados al espacio de trabajo de MATLAB.

El resultado se muestra a continuación:

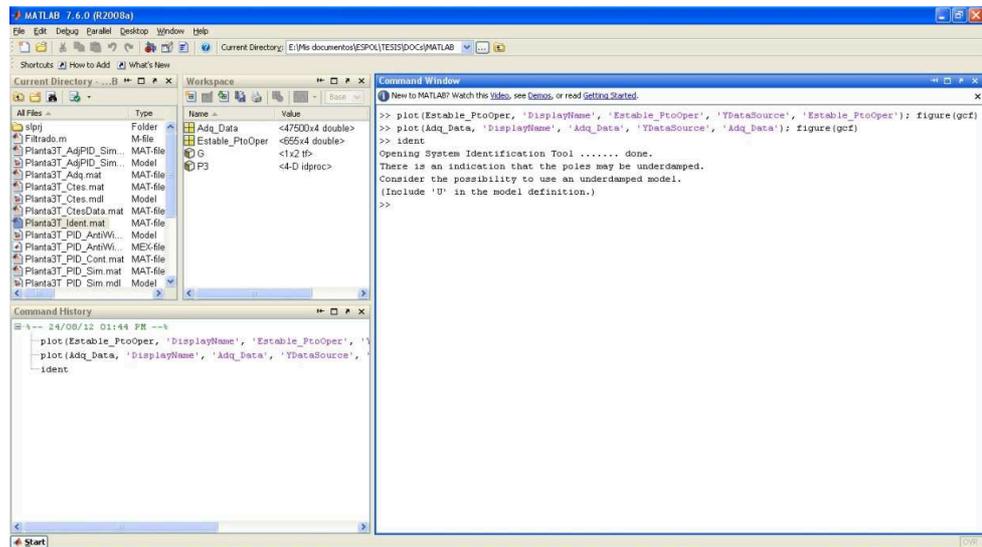


Figura 3.68. Ambiente de Trabajo de MATLAB posterior a la Identificación de la Planta

Para comprobar que los resultados exportados son los correctos, se examina la variable P3 en el ambiente de trabajo de MATLAB.

El resultado se muestra a continuación:

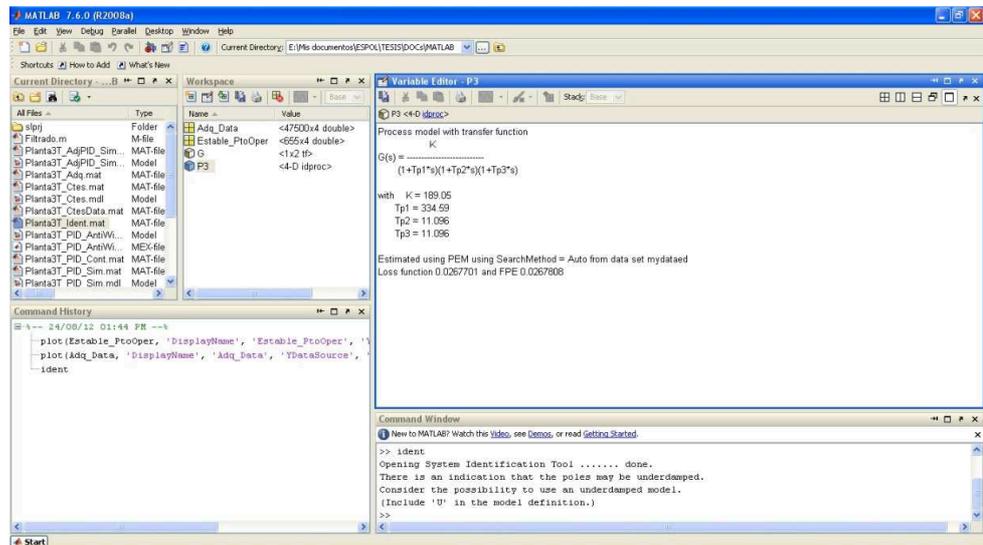


Figura 3.69. Muestra de la Variable P3

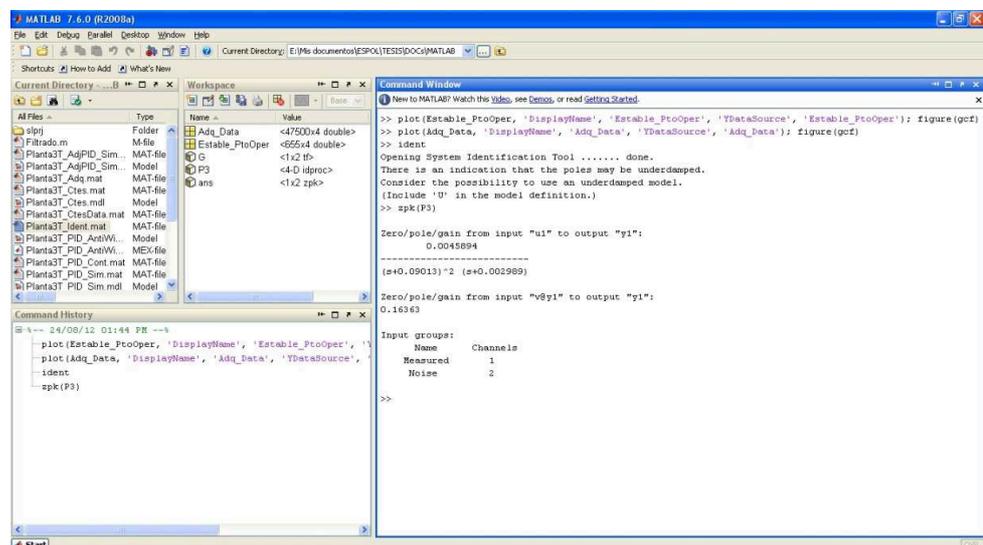
Se puede observar que:

La variable contiene la forma de la función de transferencia de la planta, obtenida del modelo identificado. Los valores de K, Tp1, Tp2 y Tp3 son los mismos que se obtuvieron y visualizaron en el cuadro de diálogo de Process Models, una vez finalizado el proceso de identificación del sistema. Con esto se comprueba que la exportación de los resultados de la identificación, ha sido exitosa.

Para obtener una representación de la función de transferencia de la planta, obtenida del modelo identificado en el dominio de la frecuencia, se utiliza la función zpk de MATLAB.

La función `zpk` convierte una función de transferencia, al formato cero/polo/ganancia, creando un modelo continuo en el tiempo en este formato, con ceros Z , polos P y ganancia K .

El resultado se muestra a continuación:



```

>> plot(Estable_PtoOper, 'DisplayName', 'Estable_PtoOper', 'YDataSource', 'Estable_PtoOper'); figure(gcf)
>> plot(Adq_Data, 'DisplayName', 'Adq_Data', 'YDataSource', 'Adq_Data'); figure(gcf)
>> ident
Opening System Identification Tool ..... done.
There is an indication that the poles may be underdamped.
Consider the possibility to use an underdamped model.
(Include 'D' in the model definition.)
>> zpk(P3)

Zero/pole/gain from input "u1" to output "y1":
0.0045894
-----
(s+0.09013)^2 (s+0.002989)

Zero/pole/gain from input "theta1" to output "y1":
0.16243

Input groups:
      Name      Channels
  Reasured         1
     Noise         2
  >>

```

Figura 3.70. Función `zpk` aplicada a la Variable $P3$

Se puede observar que la función de transferencia identificada del sistema Planta 3 Tanques expresada en este formato es:

$$P3 = \frac{0.0045894}{(s + 0.09013)^2 (s + 0.002989)}$$

Ecuación 3.6. Función de Transferencia Identificada de la Planta

- La ganancia, es $K = 0.0045894$.
- El polo simple, está ubicado en $s = -0.002989$.
- El polo doble, está ubicado en $s = -0.09013$.

Para obtener esta función de transferencia en forma desarrollada, se utiliza la función `tf` de MATLAB. El resultado se muestra a continuación:

The screenshot shows the MATLAB 7.6.0 (R2008a) environment. The Command Window displays the following output:

```

New to MATLAB? Watch the Video, see Demos, or read Getting Started.
CONSIDER THE POSSIBILITY TO USE AN UNDERSAMPLED MODEL.
(Include '0' in the model definition.)
>> spk(P3)

Zero/pole/gain from input "u1" to output "y1":
-----
0.0045894
(s+0.09013)^2 (s+0.002989)

Zero/pole/gain from input "v@y1" to output "y1":
-----
0.16363

Input groups:
  Name      Channels
  Measured    1
  Noise       2

>> G=tf(spK(P3))

Transfer function from input "u1" to output "y1":
-----
0.004589
s^3 + 0.1832 s^2 + 0.008661 s + 2.428e-005

Transfer function from input "v@y1" to output "y1":
-----
0.1636

Input groups:
  Name      Channels
  Measured    1
  Noise       2

```

Figura 3.71. Función `tf` aplicada a la Variable P3

Se puede observar que la función de transferencia desarrollada del sistema Planta 3 Tanques es:

$$G = \frac{0.0045894}{s^3 + 0.1832s^2 + 0.008661s + 0.00002428}$$

Ecuación 3.7. Función de Transferencia Desarrollada de la Planta

Con esto finaliza el proceso de identificación del sistema Planta 3 Tanques.

Los resultados mostrados producto de este proceso, tanto para la parte de adquisición de datos como para la parte de identificación en sí, son los mejores que se obtuvieron después de realizar varias pruebas, con el fin de lograr su calidad de definitivos.

Para alcanzar esto, en cada prueba se escogían y variaban distintos parámetros, hasta llegar a los que han sido descritos para cada elemento, configuración o procedimiento. Los elementos y configuraciones que más contribuyeron para obtener los mejores resultados, fueron los correspondientes a:

- Frecuencia de emisión de la onda del bloque generador de señales.
- Tiempo de muestreo para la adquisición de datos (lectura de datos desde la planta).

- Tiempo de muestreo de la simulación (captura de los datos adquiridos para su almacenamiento).
- Filtrado de las señales de los datos adquiridos.

Al elegir la frecuencia de emisión de la onda del bloque generador de señales, se determinó cuál era el periodo que permitía obtener la mejor respuesta, en términos de estabilización de la salida respecto del cambio del punto de operación. Un periodo de 5000[sec], 2500[sec] para el pulso alto y 2500[sec] para el pulso bajo de la onda, proporcionó un tiempo adecuado para la estabilización.

Al hacer coincidir en 1[sec] el tiempo de muestreo de los datos adquiridos con el tiempo de muestreo de la simulación en el bloque de osciloscopio, y ayudados por la implementación de los bloques de transición de tasa de muestreo, se minimizó la ocurrencia de posibles conflictos en la lectura, transferencia o el almacenamiento de datos, ya que los tiempos de muestreo especificados son iguales y a un intervalo de moderada exigencia, evitando que el tiempo natural de latencia sea excesivo y que haya lugar para alguna conversión entre estas tasas de muestreo, permitiendo que la captura de los datos sea confiable: continua y sin pérdidas.

Al filtrar las señales provenientes desde los sensores de presión, se minimizó el efecto del ruido sobre las mismas, sin que sus magnitudes se vean afectadas por la acción del filtrado, derivando en una identificación más fiel del sistema, más aproximada a la realidad, ya que se parte de señales suavizadas.

Los puntos mencionados, permitieron lograr una mejora ligeramente mayor al 8% en el ajuste del modelo identificado resultante: desde un 87% inicial, hasta el 95.56% conseguido finalmente.

3.2. Controlador Clásico Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

El controlador PID es un controlador realimentado, cuyo propósito es hacer que el error en estado estacionario entre la señal de referencia y la señal de salida de la planta, sea cero de manera asintótica en el tiempo, lo que se logra mediante el uso de la acción integral. Además, el controlador tiene la capacidad de anticipar el futuro a través de la función derivativa que tiene un efecto predictivo sobre la salida del proceso.

El algoritmo de cálculo del control PID se da en tres parámetros distintos: el valor proporcional, determina la reacción del error actual; el valor integral, genera una corrección proporcional a la

integral del error, asegurando que al aplicar un esfuerzo de control suficiente, el error de seguimiento se reduce a cero; el valor derivativo, determina la reacción del tiempo en el que se produce el error. La suma de estas tres acciones es usada para ajustar el proceso a través de un elemento de control. Ajustando estas tres variables en el algoritmo de control PID, el controlador puede proveer un control diseñado para lo que el proceso requiera realizar.

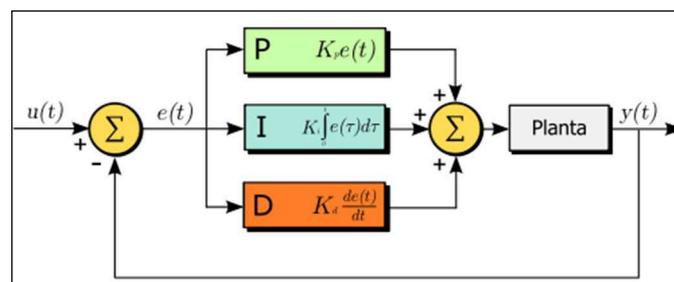


Figura 3.72. Diagrama de Bloques de un Controlador PID

En ausencia del conocimiento del proceso subyacente, un controlador PID ha sido considerado históricamente como el mejor controlador. Los controladores PID son suficientes para resolver el problema de control de muchas aplicaciones en la industria, particularmente cuando la dinámica del proceso lo permite (en general, procesos que pueden ser descritos por dinámicas de primer y segundo orden), y los requerimientos de desempeño son

modestos (generalmente limitados a especificaciones del comportamiento del error en estado estacionario y una rápida respuesta a cambios en la señal de referencia).

Su uso extensivo en este campo es tal, que el 95% de los controladores que existen en las aplicaciones industriales son PID, de los cuales, la mayoría son PI, mostrando la preferencia del usuario en el uso de leyes de control muy simples. La popularidad de los controladores PID, puede atribuirse en parte a su buen comportamiento en un amplio intervalo de condiciones de operación, y en parte a su sencillez funcional, lo cual permite a los ingenieros operar con ellos de manera sencilla y directa.

El uso de los controladores PID, no garantiza el control óptimo del sistema o la estabilidad del mismo. Algunas aplicaciones pueden requerir únicamente uno o dos modos de los que éste sistema de control es capaz de proveer. Un controlador PID, también puede ser llamado PI, PD, P o I, en ausencia de las acciones de control respectivas. Los controladores PI son particularmente comunes, ya que la acción derivativa es muy sensible al ruido, y la ausencia del proceso integral puede evitar que se alcance el valor deseado, debido a la acción de control.

La respuesta del controlador puede ser descrita en términos de la respuesta del control ante un error, del grado en el que el controlador llega a la referencia o del grado de oscilación del sistema.

Un controlador PID tiene una función de transferencia de este tipo:

$$G_C(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s$$

Ecuación 3.8. Función de Transferencia General de un Controlador PID [28]

Factorizando, se llega a:

$$G_C(s) = \frac{K_D (s + z_1)(s + z_2)}{s}$$

Ecuación 3.9. Función de Transferencia Factorizada de un Controlador PID

Por lo tanto, un controlador PID introduce en un sistema, una función de transferencia con un polo en el origen y dos ceros que

28 Controlador de Tres Términos (PID): DORF, RICHARD C.; BISHOP, ROBERT H., Sistemas de control moderno, Décima edición, Pearson Educación, S.A., Madrid, 2005, p. 391

pueden estar situados en cualquier parte del lado izquierdo del plano complejo s [29].

Es precisamente esta flexibilidad de la ubicación de los ceros de la función de transferencia del controlador PID, la que se va a aprovechar como técnica para desarrollar el controlador para el sistema Planta 3 Tanques. Con el objeto de analizar y diseñar controladores, se debe definir y medir el comportamiento de un sistema. Este paso ya fue realizado con la adquisición de datos del proceso de identificación del sistema Planta 3 Tanques.

Basándose en el comportamiento que se desea de este sistema, deben ajustarse los parámetros del mismo, con el objeto de proporcionar la respuesta deseada. Como los controladores son dinámicos por naturaleza, por lo general se especifica su comportamiento en términos de la respuesta transitoria y la respuesta en estado estacionario. La respuesta transitoria es la respuesta que desaparece con el tiempo. La respuesta en estado

29 Controlador de Tres Términos (PID): DORF, RICHARD C.; BISHOP, ROBERT H., Sistemas de control moderno, Décima edición, Pearson Educación, S.A., Madrid, 2005, p. 392

estacionario es la respuesta que existe durante mucho tiempo, siguiendo a cualquier iniciación de señal de entrada [30].

La respuesta transitoria del sistema puede describirse en función de dos factores:

- La rapidez de la respuesta, representada por el tiempo de subida y el tiempo de pico.
- La proximidad de la respuesta a los valores deseados, representada por el sobrenivel y el tiempo de estabilización [31].

Como en este caso lo que se busca es optimizar la respuesta del sistema a los valores deseados, las especificaciones de diseño del controlador estarán dictadas por el sobrenivel porcentual y el tiempo de estabilización. El comportamiento y la respuesta temporal de los sistemas de orden superior, es decir, de aquellos que poseen tres o más polos, depende fundamentalmente de la posición relativa y del carácter de los polos más lentos del sistema. El polo más lento, es el que posee la constante de tiempo más grande, es decir, aquel

30 Introducción al Comportamiento de los Sistemas de Control con Retroalimentación: DORF, RICHARD C.; BISHOP, ROBERT H., Sistemas de control moderno, Décima edición, Pearson Educación, S.A., Madrid, 2005, p. 244

31 Señales de Entrada de Prueba: DORF, RICHARD C.; BISHOP, ROBERT H., Sistemas de control moderno, Décima edición, Pearson Educación, S.A., Madrid, 2005, p. 250

polo que se encuentra más cerca del origen en el plano complejo s . A los polos lentos, se los denomina polos dominantes del sistema [32].

Se ha determinado experimentalmente, que el comportamiento de la respuesta de un sistema de tercer orden, puede aproximarse mediante los polos dominantes del sistema de segundo orden (como el indicado por el sobrenivel porcentual y el tiempo de estabilización), pero esto siempre que dichos polos se encuentren suficientemente cercanos al origen del plano complejo s .

Por norma general, se puede admitir que los polos que sean menores a $1/10$ de la parte real del polo más lento [33], es decir, que se encuentren alejados más de diez veces la distancia del polo

32 Sistemas de Orden Superior: GIL NOBAJAS, JORGE JUAN; RUBIO DÍAZ-COROVÉS, ÁNGEL, Ingeniería de Control – Control de Sistemas Continuos, Segunda edición, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Navarra, San Sebastián, 2004, p. 30

33 Efectos de un Tercer Polo y un Cero sobre la Respuesta de un Sistema de Segundo Orden: DORF, RICHARD C.; BISHOP, ROBERT H., Sistemas de control moderno, Décima edición, Pearson Educación, S.A., Madrid, 2005, p. 254

más cercano al origen del plano complejo s , tienen una influencia muy pequeña en la respuesta temporal del sistema [34].

Pero el sistema Planta 3 Tanques, de tercer orden según su identificación, no es un caso como éste. El análisis que se realiza es el siguiente:

La función de transferencia identificada del sistema Planta 3 Tanques representada en la Ecuación 3.6., que será denominada G_p , es:

$$G_p = \frac{0.0045894}{(s+0.09013)^2 (s+0.002989)}$$

Ecuación 3.10. Función de Transferencia Identificada de la Planta

El polo simple P_1 está ubicado en $s = -0.002989$, y el polo doble $P_{2,3}$ está ubicado en $s = -0.09013$.

Comparando P_1 y $P_{2,3}$, se puede observar que:

34 Sistemas de Orden Superior: GIL NOBAJAS, JORGE JUAN; RUBIO DÍAZ-COROVÉS, ÁNGEL, Ingeniería de Control – Control de Sistemas Continuos, Segunda edición, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Navarra, San Sebastián, 2004, p. 31

$$-0.09013 < 10(-0.002989)$$

$$-0.09013 < -0.02989$$

Esto quiere decir que:

$$p_{2,3} < 10p_1$$

Lo que significa que el polo doble $p_{2,3}$ es más rápido que p_1 , por lo cual el polo dominante, que es el que se encuentra más cerca del origen, es p_1 . Al ser el polo simple p_1 el más lento, este sistema presenta dominancia de primer orden y no de segundo orden, como se lo desearía.

Dado este escenario, es claro que no se puede aplicar el criterio de la dominancia de segundo orden para este sistema, por lo cual, habrá que utilizar otra técnica para aproximar el sistema que es de tercer orden, a uno de segundo orden.

El recurso a utilizar entonces, es el que fue mencionado al terminar de describir el controlador PID y su función de transferencia representada en la Ecuación 3.9.:

$$G_C(s) = \frac{K_D (s + z_1)(s + z_2)}{s}$$

Los ceros de la función de transferencia pueden estar situados en cualquier parte del lado izquierdo del plano complejo s . Esto permite ubicar uno de los ceros en la misma posición del polo simple dominante para anular su efecto, y ubicar el cero restante de manera que se consiga que la trayectoria de las raíces pase por el lugar necesario para obtener la respuesta de salida deseada del sistema, según las especificaciones de diseño que se definan para el desarrollo del controlador.

También debe observarse que las medidas de comportamiento del sistema, sólo son correctas para una función de transferencia sin ceros finitos [35], como lo es el caso del sistema Planta 3 Tanques, según su identificación. Por estos motivos, se puede continuar con el diseño del controlador bajo las consideraciones de segundo orden, aun cuando se trata de un sistema de tercer orden.

35 Efectos de un Tercer Polo y un Cero sobre la Respuesta de un Sistema de Segundo Orden: DORF, RICHARD C.; BISHOP, ROBERT H., Sistemas de control moderno, Décima edición, Pearson Educación, S.A., Madrid, 2005, p. 254

De los resultados obtenidos al terminar de analizar el comportamiento natural de la planta (sin ser controlada), para la adquisición de datos previa a su identificación, se estimó que:

Un cambio de 1[cm] de altura de la columna de agua del tercer tanque, que sería equivalente a una señal de entrada de tipo escalón unitario, se esperaría que tenga un tiempo de estabilización de alrededor de 140[sec].

Al tratarse del comportamiento natural de la planta, no existe sobrenivel porcentual y el error en estado estacionario no es aplicable, ya que la planta trabaja a base de variaciones alrededor del punto de operación y no a cambios en una señal de referencia de la altura de la columna de agua del tercer tanque, pues ésta no existe en este caso, por lo tanto no se puede establecer si hay un error o no, al no haber un valor de referencia contra el cual la respuesta del sistema se pueda comparar.

El objetivo será diseñar un controlador PID que permita bajar el tiempo de estabilización ante una señal de entrada de tipo escalón unitario de alrededor de los 140[sec] estimados, a un valor menor o igual a 90[sec] como máximo.

Según lo estudiado, para hacer esto posible, el controlador PID demandará una exigencia al sistema, que se refleja en la aparición de un sobrenivel porcentual. Por lo tanto, dado que la señal de entrada es de tipo escalón unitario, se desea que el sobrenivel porcentual sea menor o igual al 10% del cambio del valor de la señal de entrada, lo que se traduce en un valor menor o igual a un milímetro para un escalón unitario.

Finalmente, se desea que el error de estacionario sea cero, y tal como se lo concluyó previamente en esta sección, el sistema Planta 3 Tanques es de Tipo 0, y para que el error en estado estacionario sea cero ante una señal de entrada de prueba de tipo escalón, el sistema debe ser por lo menos de Tipo 1. Pero recordando que la función de transferencia de un controlador PID es precisamente de Tipo 1 al introducir en los sistemas un polo en el origen por su efecto integrador, el controlador, por su propia definición, garantiza el error en estado estacionario igual a cero deseado.

Resumiendo, la siguiente tabla compara el comportamiento observado y el comportamiento deseado o esperado, mostrando las especificaciones de diseño del controlador PID a desarrollar:

| Planta 3 Tanques | Sobrenivel porcentual | Tiempo de estabilización | Error en estado estacionario |
|-----------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|---|
| Sin Controlador | $S.P. = 0\%$ | $T_s \approx 140[\text{sec}]$ | No aplicable |
| Con Controlador | $S.P. \leq 10\%$ | $T_s \leq 90[\text{sec}]$ | $e_{ss} = 0$ |

Tabla 3.1. Resumen de las Especificaciones de Diseño del Controlador

Teniendo presentes todas estas consideraciones y las especificaciones de diseño definidas, se procede a desarrollar el controlador PID para el sistema Planta 3 Tanques, por medio de la herramienta SISOTOOL (Single-Input/Single-Output Design Tool), que forma parte del software Control System Toolbox de MATLAB.

3.2.1. Desarrollo del Controlador utilizando la Herramienta SISOTOOL de MATLAB

Para el desarrollo del controlador, se invoca a la herramienta SISOTOOL desde la ventana de comandos de MATLAB:

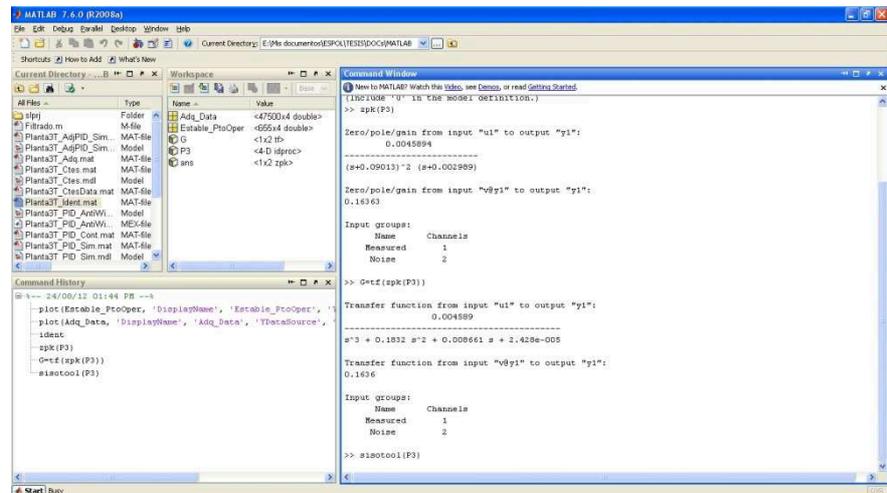


Figura 3.73. Invocación de la Herramienta SISOTOOL en MATLAB

Este comando carga la GUI de la herramienta SISOTOOL, abriendo sus ambientes de trabajo que se describen a continuación:

El primero, es la ventana de Control and Estimation Tools Manager (Administrador de Herramientas de Control y Estimación), que forma parte del software SIMULINK Control Design de MATLAB, y que permite realizar una diversidad de tareas y análisis relacionados con sistemas de control, como el diseño de controladores.

La ventana de Control and Estimation Tools Manager es la siguiente:

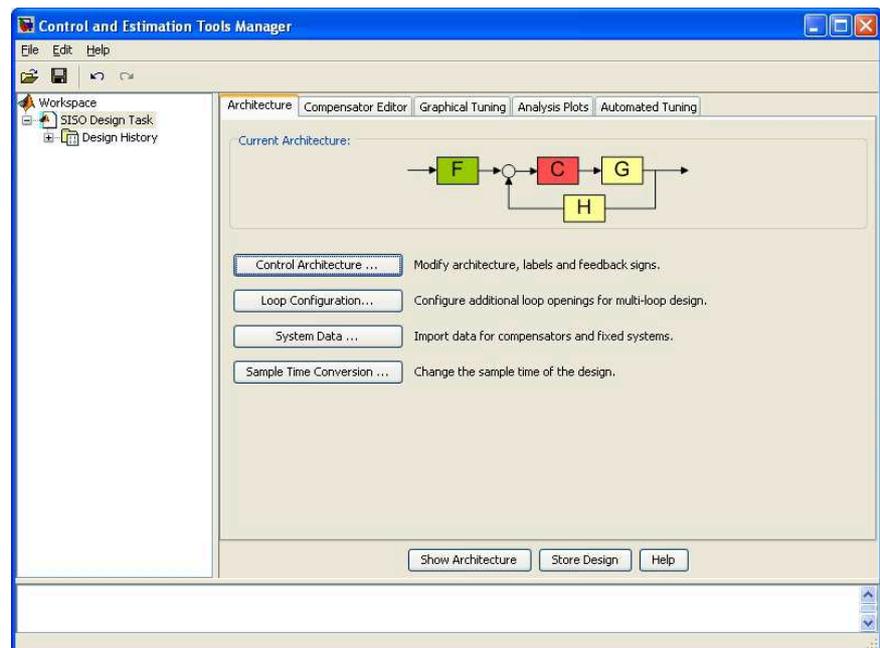


Figura 3.74. Ventana de Control and Estimation Tools Manager

Se puede observar que:

La primera pestaña de Control and Estimation Tools Manager es Architecture (Arquitectura), en la que se muestra la estructura del lazo de control con el que se va a trabajar, y que puede ser elegida entre varias opciones, dependiendo del caso particular de cada sistema.

Para el sistema Planta 3 Tanques, la arquitectura del lazo de control elegida, es un lazo de control clásico con realimentación unitaria negativa, con un filtro opcional (también conocido como “Pre-Filtro”) para la señal de entrada, y el controlador del sistema en serie con la función de transferencia de la planta, dentro del lazo de control.

La nomenclatura utilizada es la siguiente:

| Elemento | Nomenclatura |
|-------------------------|---------------------|
| Señal de Entrada | r |
| Señal de Salida | y |
| Filtro (Pre-Filtro) | F |
| Controlador | C |
| Planta | G |
| Sensor (Realimentación) | H |

Tabla 3.2. Nomenclatura de los Elementos del Lazo de Control

Existen otros elementos presentes, pero no son tomados en cuenta ya que no son utilizados en esta estructura del lazo de control. El detalle de la arquitectura de control utilizada para el sistema Planta 3 Tanques se muestra en la siguiente figura:

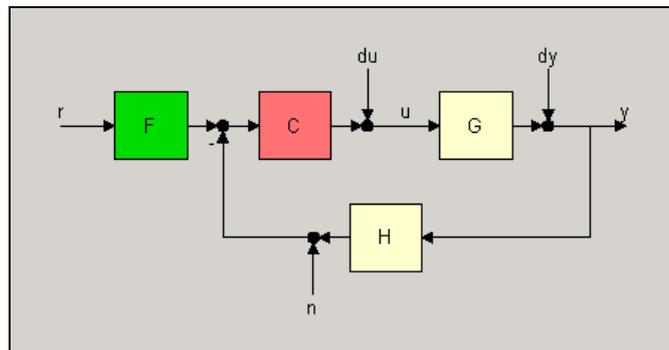


Figura 3.75. Arquitectura de Control Utilizada

El segundo ambiente de trabajo de SISOTOOL, es la Ventana de Ajuste Gráfico, una GUI para visualizar y manipular, entre otras gráficas, el lugar geométrico del sistema cuyo controlador que se esté diseñando.

La Ventana de Ajuste Gráfico lleva por título SISO Design (Diseño SISO), y es la siguiente:

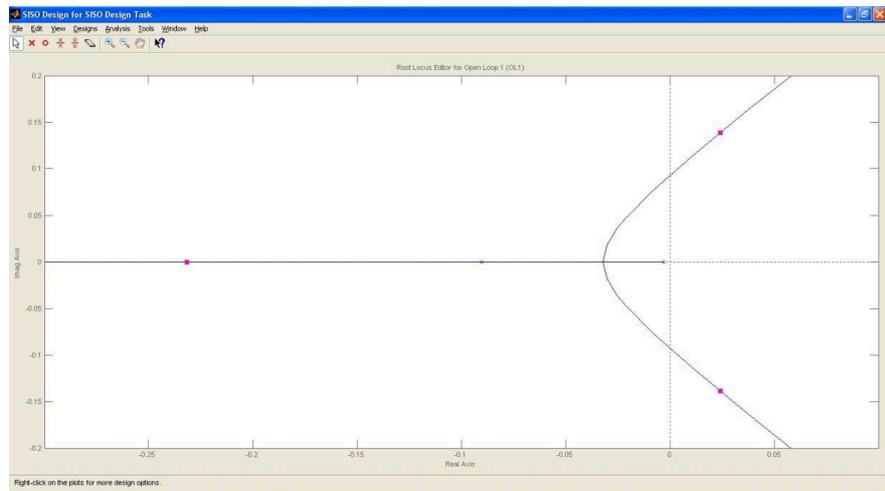


Figura 3.76. Ventana de Ajuste Gráfico de SISOTOOL

Para este caso en particular, se muestra de color azul la gráfica del lugar geométrico de la ecuación característica del sistema Planta 3 Tanques de tercer orden, $p(s) = -(s + 0.09013)^2 (s + 0.002989)$, y sus raíces se muestran de color rojo ubicadas en el lugar que corresponde cuando la ganancia del controlador en desarrollo se ha establecido en $K = 1$, que es el valor inicial por defecto en SISOTOOL.

Se puede observar que el lugar geométrico mostrado es muy similar al lugar geométrico de una función de transferencia de

tercer orden, del tipo $G(s) = \frac{K}{(s+p_1)(s+p_2)(s+p_3)}$, tal como se muestra a continuación:

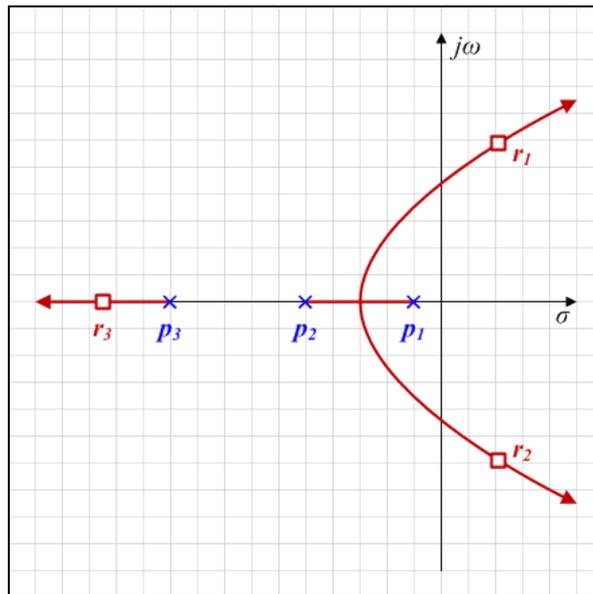


Figura 3.77. Lugar Geométrico de una Función de Transferencia con 3 Polos Diferentes

La diferencia es que $p_2 = p_3$, lo cual ubica al polo p_3 en la misma posición del polo p_2 , haciendo que el lugar geométrico sea continuo desde el polo p_1 hacia la izquierda, tal como se aprecia en la trayectoria mostrada en SISOTOOL. El desarrollo del controlador se inicia

estableciendo las especificaciones de diseño definidas en la Sección 3.2.

Para esto, se crean requisitos de diseño en SISOTOOL, tal como se muestra a continuación:

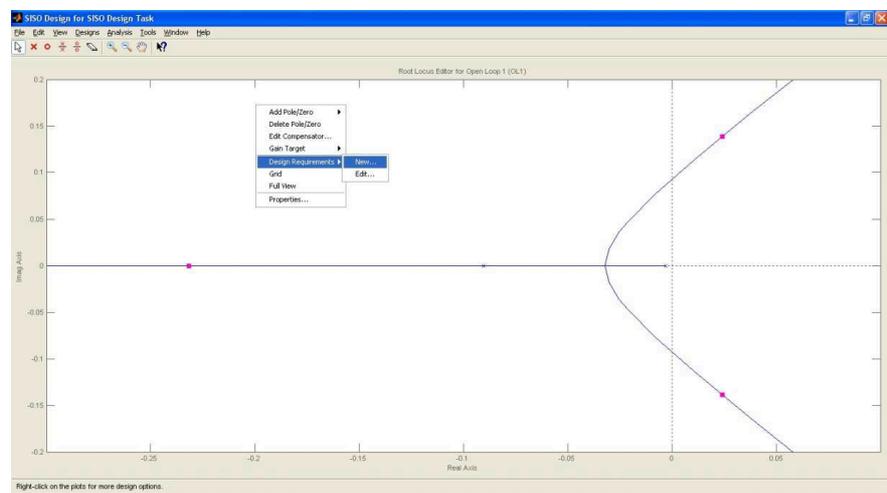


Figura 3.78. Creación de Nuevos Requisitos de Diseño en SISOTOOL

Al invocar el comando de creación de un nuevo requisito de diseño, aparece en pantalla un cuadro de diálogo con una lista desplegable para seleccionar el tipo de requisito de diseño, y un campo para introducir el valor de los parámetros del requisito de diseño seleccionado.

A continuación se muestra el caso de la especificación del tiempo de estabilización, definida en 90[sec]:



Figura 3.79. Cuadro de Diálogo para la Especificación del Tiempo de Estabilización

Cuando se especifica el tiempo de estabilización, aparece una línea vertical en la gráfica del lugar geométrico, en las posiciones de los polos asociados con el valor del tiempo de estabilización definido (con una aproximación de primer orden). Esta línea vertical es exacta para un sistema de segundo orden y es sólo una aproximación para sistemas de orden superior [36].

El resultado se muestra a continuación:

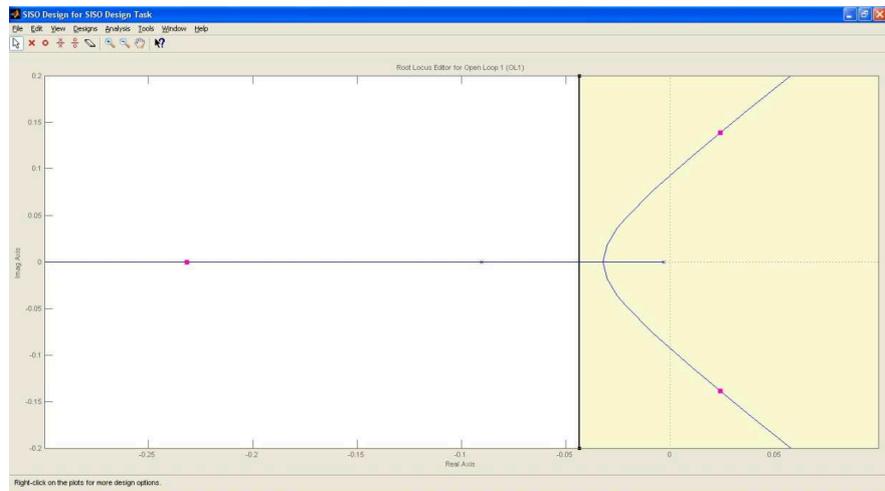


Figura 3.80. Lugar Geométrico con la Especificación del Tiempo de Estabilización

A continuación se muestra el caso de la especificación del sobrenivel porcentual, definido en menor o igual al 10%:



Figura 3.81. Cuadro de Diálogo para la Especificación del Sobrenivel Porcentual

Cuando se especifica el sobrenivel porcentual, aparecen dos semirrectas que salen del origen del plano complejo s . Estas semirrectas son el lugar geométrico de los polos asociados

con el valor del sobrenivel porcentual definido (usando una aproximación de segundo orden) [37].

El resultado se muestra a continuación:

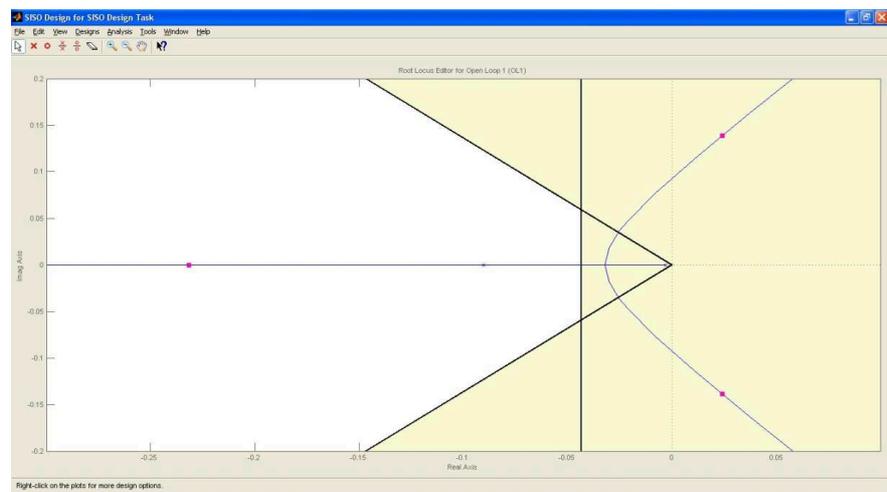


Figura 3.82. Lugar Geométrico con la Especificación del Sobrenivel Porcentual

La segunda pestaña de Control and Estimation Tools Manager es Compensator Editor (Editor del Compensador), en la que se puede ajustar la ganancia y agregar o quitar polos y ceros del controlador C o del pre-filtro F (este último en caso de ser necesario) que se esté diseñando.

En este punto, se comienza añadiendo el polo en el origen (Integrador) que todo controlador PID lleva, tal como se lo describió en la Sección 3.2.

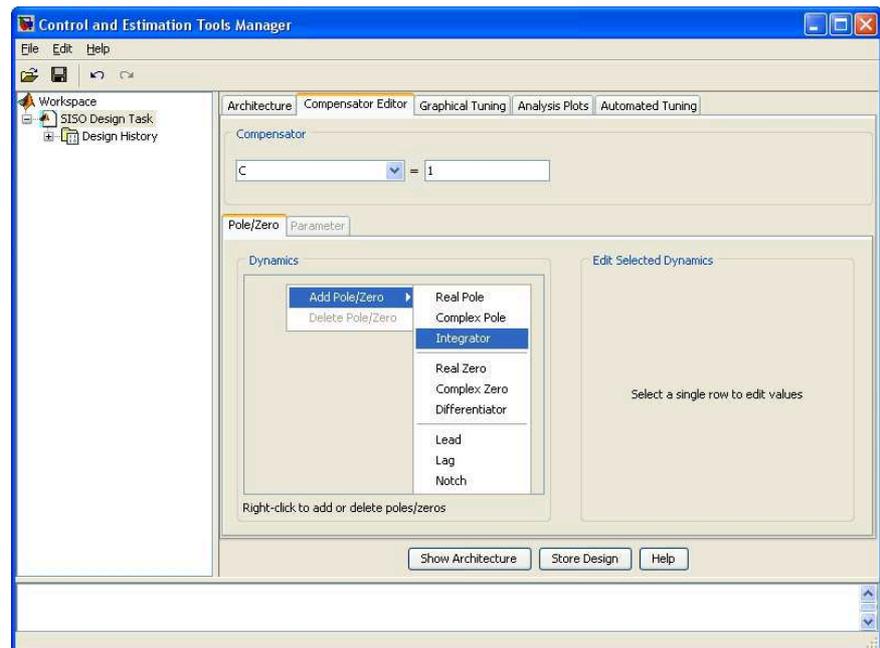


Figura 3.83. Inclusión del Integrador en el Diseño del Controlador

Cuando se diseña un controlador, es de esperar que cambios en el valor de la ganancia del mismo, así como cualquier actividad de los polos y ceros, como la inclusión o eliminación de alguno de ellos o cambios en su ubicación, produzcan una alteración en el lugar geométrico del sistema.

El resultado de la inclusión del integrador se muestra a continuación:

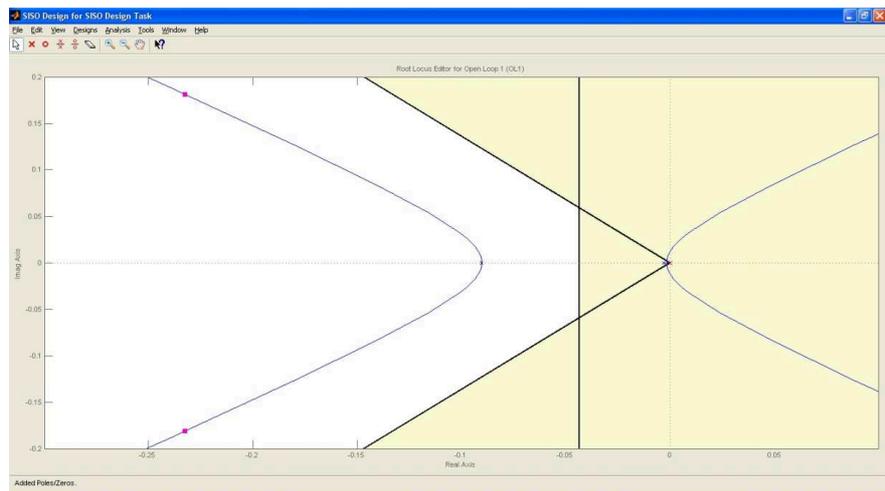


Figura 3.84. Alteración del Lugar Geométrico por la Inclusión del Integrador

El siguiente paso es añadir el primero de los dos ceros que todo controlador PID lleva, tal como se lo describió en la Sección 3.2.

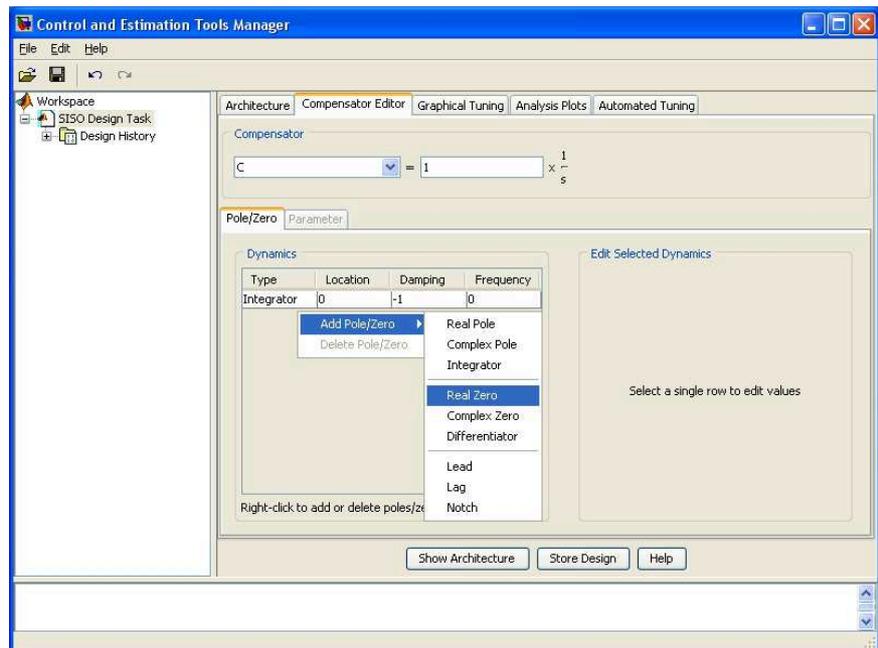


Figura 3.85. Inclusión de un Cero Real en el Diseño del Controlador

En este punto, es necesario tener presente la primera parte de la técnica que se va a utilizar para el desarrollo del controlador: ubicar uno de los ceros en la misma posición del polo simple dominante para anular su efecto. Para esto, hay que recordar la función de transferencia identificada del sistema Planta 3 Tanques, representada en la Ecuación 3.10.:

$$G_p = \frac{0.0045894}{(s+0.09013)^2 (s+0.002989)}$$

Con esto se recuerda que el polo dominante es el que se encuentra en $s = -0.002989$, por lo que se procede a añadir el primer cero en la misma posición:

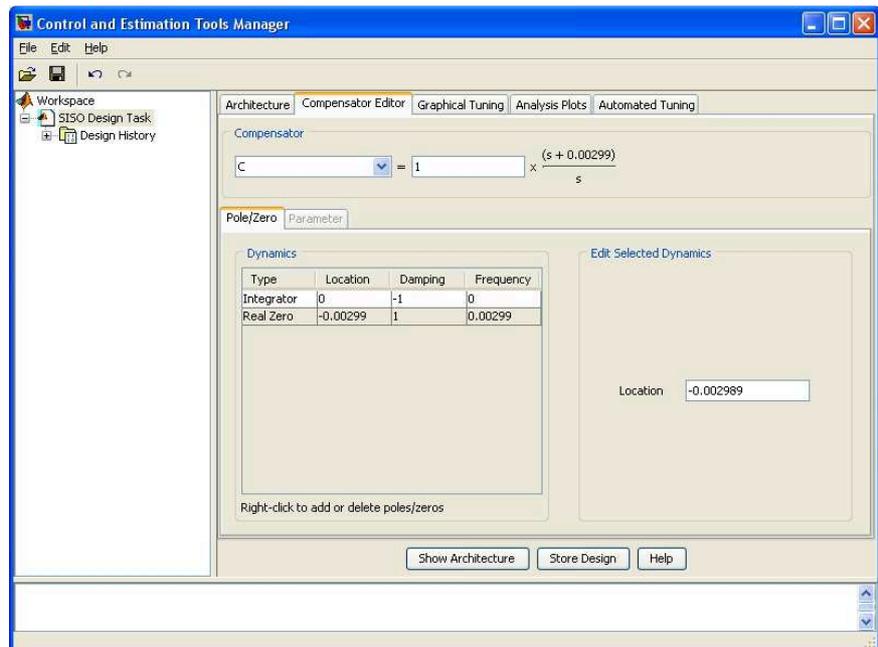


Figura 3.86. Ubicación del Primer Cero en la Posición del Polo Dominante

El resultado de la inclusión del primer cero en la misma posición del polo dominante se muestra a continuación:

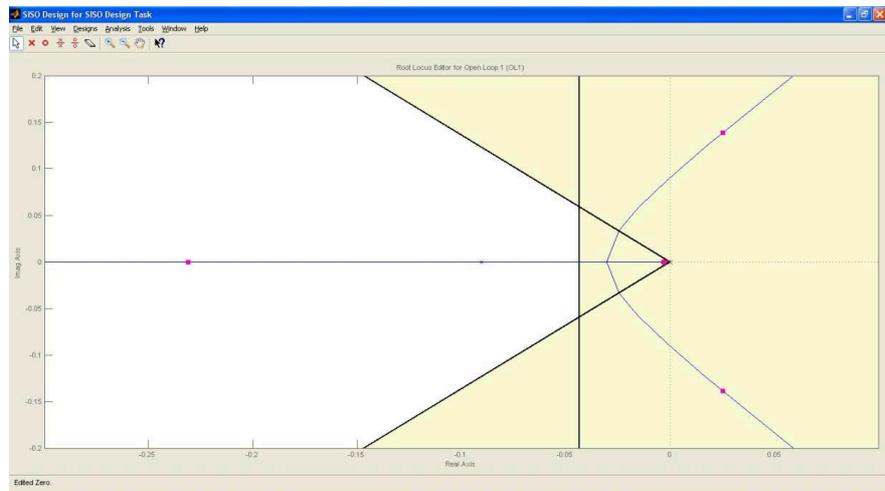


Figura 3.87. Alteración del Lugar Geométrico por la Inclusión del Primer Cero

El siguiente paso es añadir el segundo cero que todo controlador PID lleva.

En este punto, cabe citar la segunda parte de la técnica que se va a utilizar para el desarrollo del controlador: ubicar el cero restante de manera que se consiga que la trayectoria de las raíces pase justamente por el lugar indicado para obtener la respuesta de salida deseada, según las especificaciones de diseño del controlador definidas en la Sección 3.2.

Con base en lo expuesto, la respuesta de salida deseada depende de las especificaciones de diseño definidas. Esto es, por lo menos, en el lugar de la intersección entre la línea vertical (relacionada con el tiempo de estabilización) y las dos semirrectas (relacionadas con el sobrenivel porcentual), ya que en esos puntos, las especificaciones de diseño del controlador se cumplen simultáneamente.

En este caso, desde los puntos de intersección hacia la izquierda en el plano complejo s , las especificaciones de diseño se exceden, y hacia la derecha en el plano complejo s , las especificaciones de diseño mínimas no se cumplen. Cualquiera de estos dos escenarios, pueden ser perjudiciales para el sistema, ya que el controlador resultante sería menos o más agresivo, respectivamente; la respuesta de salida no será la deseada y su forma podría hasta cambiar, e inclusive hacer caer al sistema en una zona de inestabilidad.

Dado que los ceros de la función de transferencia de un controlador PID son de libre ubicación, inicialmente se ubicará al cero en una posición intermedia, y se lo irá reposicionando hasta que la trayectoria de las raíces pase

por los puntos de intersección de las especificaciones de diseño del controlador.

Con esto se procede a añadir el segundo cero inicialmente en la posición $s = -0.05$:

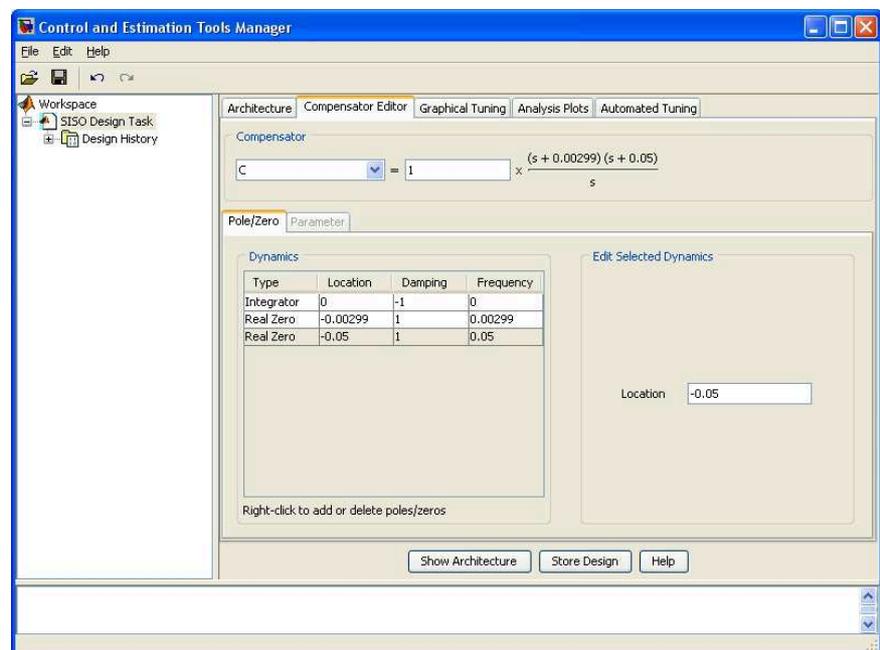


Figura 3.88. Ubicación del Segundo Cero en la Posición Elegida

El resultado de la inclusión del segundo cero en la posición elegida se muestra a continuación:

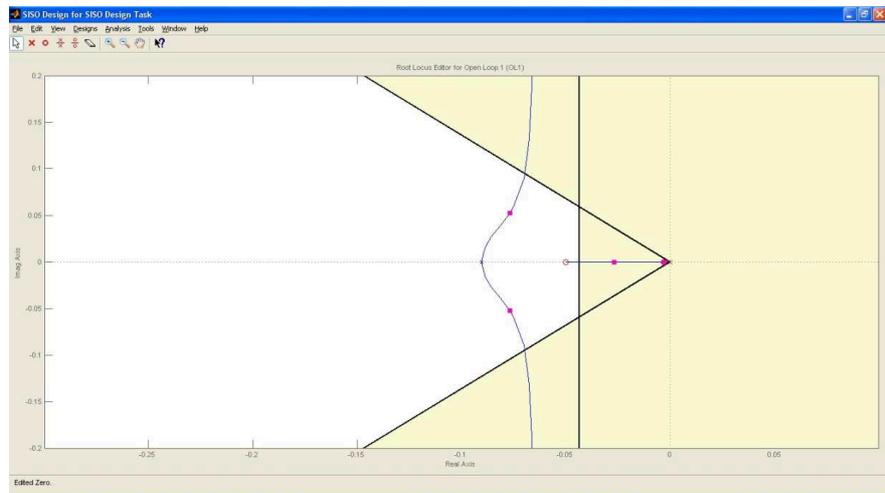


Figura 3.89. Alteración del Lugar Geométrico por la Inclusión del Segundo Cero

Se puede observar que:

El lugar geométrico cambia considerablemente con la inclusión del segundo cero, mostrando que la tendencia del lugar que estarán ocupando las raíces se aproxima al lugar deseado: los puntos de intersección de las especificaciones de diseño del controlador.

La ventana de ajuste gráfico de SISOTOOL es una GUI, por lo que se aprovecha esta cualidad para reposicionar el segundo cero de manera manual y directa, hasta lograr que la trayectoria de las raíces pase justamente por el lugar

deseado. Con el fin de tener mayor precisión en este procedimiento, la zona crítica es ampliada.

El resultado se muestra a continuación:

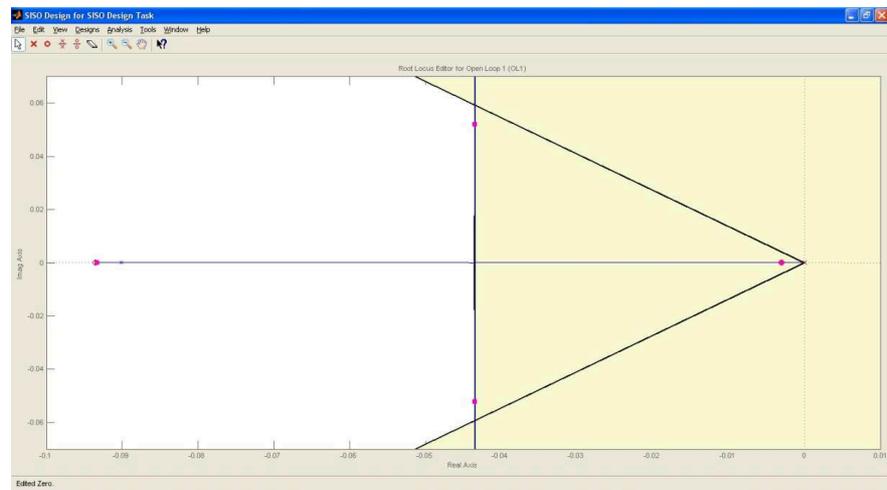


Figura 3.90. Alteración del Lugar Geométrico por el Reposicionamiento del Segundo Cero

Dado que este procedimiento se lo ha realizado gráficamente, los cambios numéricos se los puede apreciar en la pestaña Compensator Editor de la ventana Control and Estimation Tools Manager:

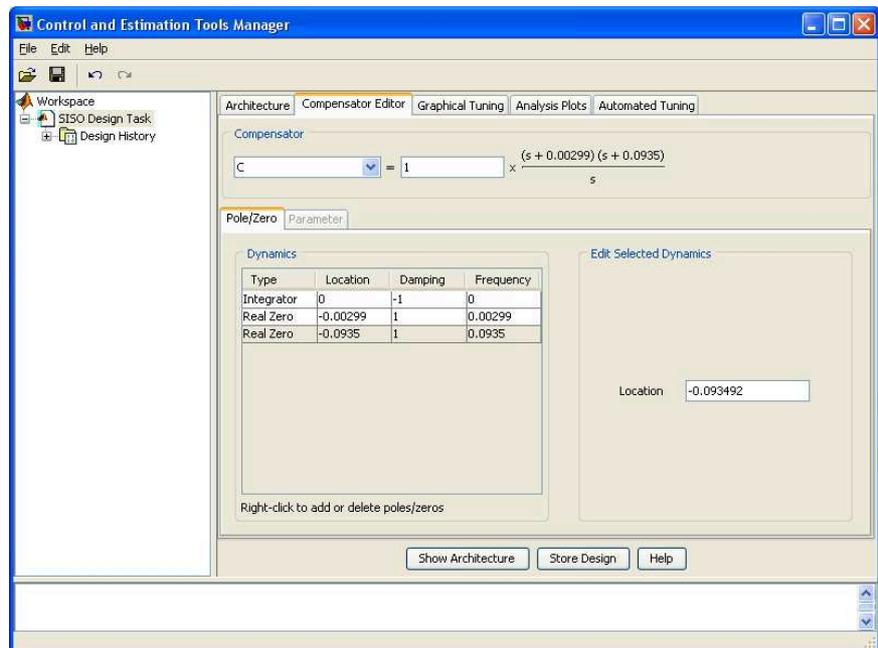


Figura 3.91. Ubicación del Segundo Cero Reposicionado

Se puede observar que:

El reposicionamiento del segundo cero se encuentra finalmente ubicado en $s = -0.093492$, haciendo que la trayectoria de las raíces pase virtualmente por los puntos de intersección de las especificaciones de diseño del controlador. Sin embargo, las raíces no están ubicadas sobre los puntos de intersección, por lo que hay que modificar la ganancia del controlador para conseguirlo. Esto, nuevamente se lo realiza de manera manual y directa sobre la ventana de

ajuste gráfico de SISOTOOL, como en el caso del reposicionamiento del segundo cero.

El resultado se muestra a continuación:

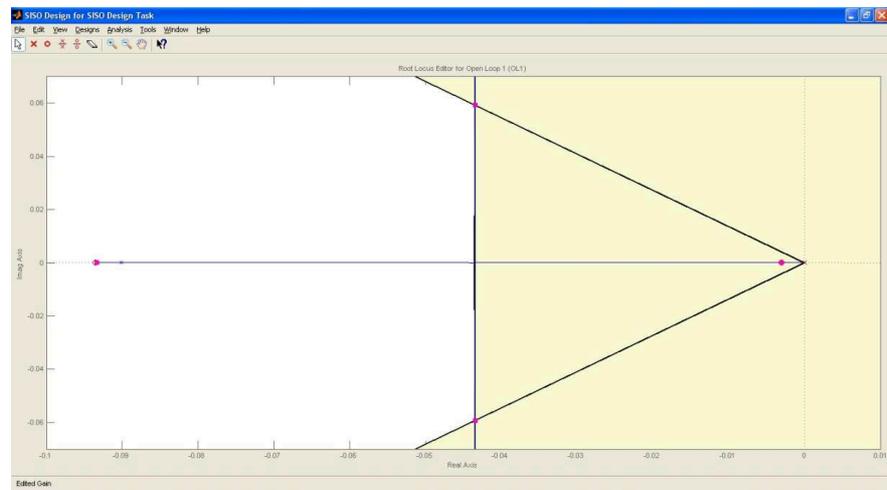


Figura 3.92. Reubicación de las Raíces por la Modificación de la Ganancia

Con el fin de tener mayor seguridad en este procedimiento, la zona crítica es ampliada. El resultado se muestra a continuación:

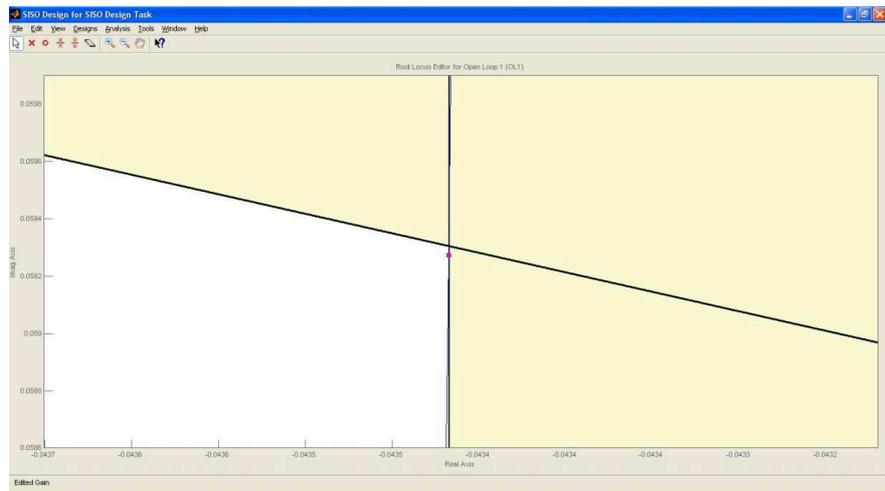


Figura 3.93. Vista Ampliada de la Reubicación de las Raíces

Dado que este procedimiento se lo ha realizado gráficamente, los cambios numéricos se los puede apreciar en la pestaña Compensator Editor de la ventana Control and Estimation Tools Manager:

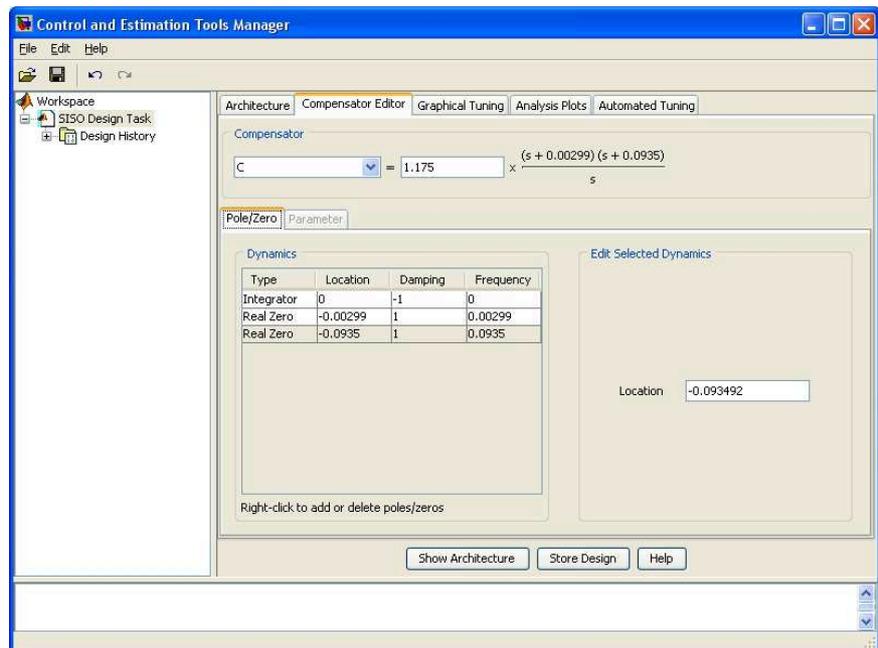


Figura 3.94. Valor de la Ganancia Modificada

Se puede observar que:

La modificación de la ganancia hace que ésta finalmente sea de $K = 1.175$, de manera que las raíces se ubiquen virtualmente sobre los puntos de intersección de las especificaciones de diseño del controlador.

Un cambio de una milésima en la ganancia, habría significado que ésta sea de $K = 1.174$ o $K = 1.176$. Si hubiera sido de $K = 1.174$, las raíces se habrían ubicado más alejadas de los puntos de intersección, en la zona de

cumplimiento de las especificaciones de diseño. Si hubiera sido de $K = 1.176$, las raíces se habrían ubicado superando los puntos de intersección, en la zona donde las especificaciones de diseño ya no se cumplen.

Aunque la vista ampliada muestra que las raíces no quedan exactamente sobre las intersecciones, el valor de la ganancia de $K = 1.175$ es el mejor resultado que se pudo obtener.

Una vez que todos los valores de la función de transferencia del controlador PID están aparentemente listos, se realiza la prueba de respuesta a una señal de entrada de escalón unitario, para observar el comportamiento simulado que tendría el sistema con el controlador PID desarrollado ante una señal de prueba de este tipo.

El acceso a esta herramienta la proporciona SISOTOOL en su ambiente de trabajo, con el nombre de Response to Step Command (Respuesta a la Señal Escalón):

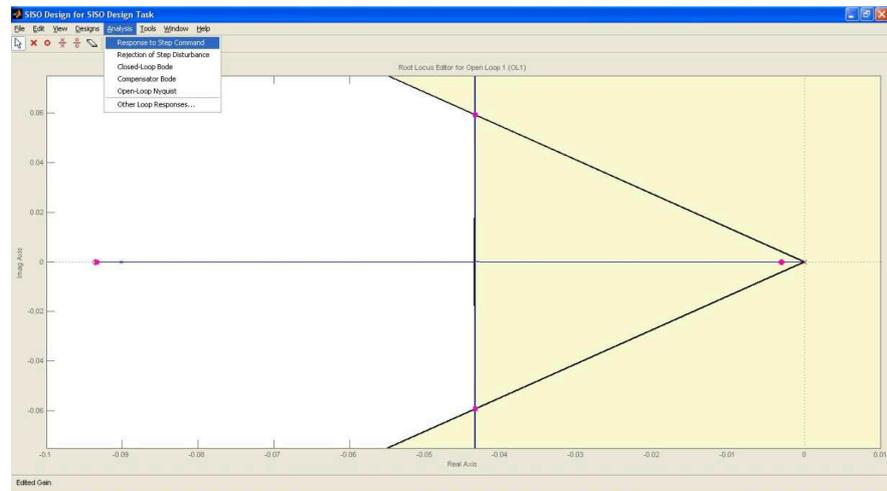


Figura 3.95. Invocación de la Herramienta de Respuesta a la Señal Escalón en SISOTOOL

Cuando se invoca al comando para la obtención de la respuesta a la señal escalón, aparece en pantalla la ventana del LTI Viewer (Visor LTI).

El LTI Viewer es una GUI de MATLAB, que permite analizar fácilmente sistemas lineales invariantes en el tiempo.

Cualquier sistema que puede ser modelado como una ecuación diferencial lineal homogénea con coeficientes constantes en el dominio del tiempo, es un sistema LTI. Y dado que la Transformada de Laplace de dicha ecuación diferencial es una función de transferencia (como la que

describe al sistema Planta 3 Tanques), se concluye que ésta es la representación equivalente de un sistema LTI en el dominio de la frecuencia [38].

El LTI Viewer se puede utilizar para ver la respuesta de un sistema a una señal de entrada de prueba dada, y estudiar parámetros clave de respuesta, tales como tiempo de subida, sobrenivel porcentual, márgenes de estabilidad, entre otros.

La ventana del LTI Viewer es la siguiente:

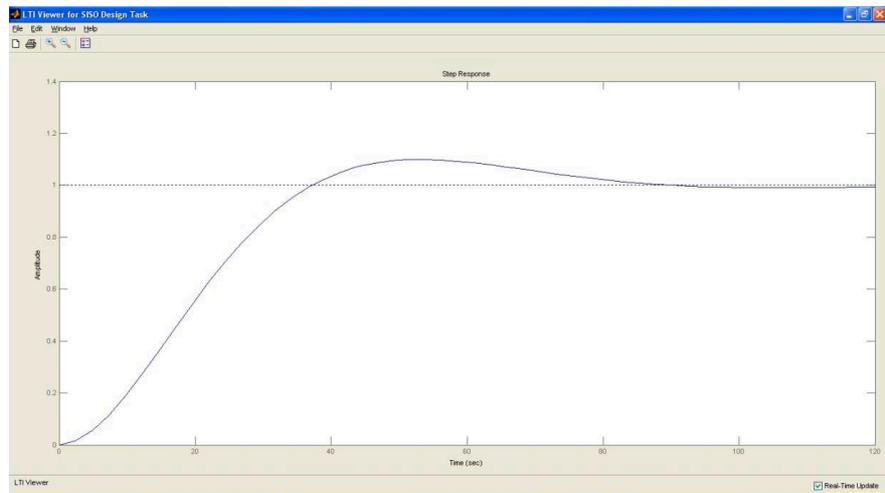


Figura 3.96. Ventana del LTI Viewer de MATLAB

Tal como se lo esperaba, se muestra de color azul la gráfica correspondiente a la simulación de respuesta del sistema a una señal de entrada de prueba de escalón unitario, con características muy similares a la respuesta de un sistema de segundo orden con un controlador PID, descrita en la Sección 3.2.

Además, se puede observar una línea punteada referencial de amplitud unitaria, que representa a la señal de entrada de prueba ya mencionada.

Para comprobar la efectividad del controlador PID desarrollado, se invoca el comando de características de la

curva de respuesta, y se selecciona que se muestren aquellas que son de particular interés para este caso, por ser las especificaciones de diseño del controlador: el sobrenivel porcentual, el tiempo de estabilización y el valor final. Este último provee el valor del error en estado estacionario de manera indirecta.

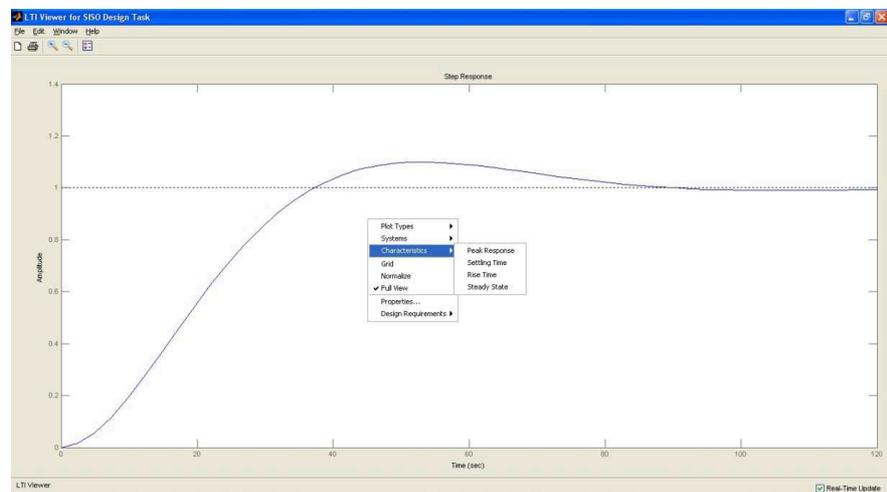


Figura 3.97. Invocación del Comando de Características de la Curva de Respuesta

El resultado se muestra a continuación:

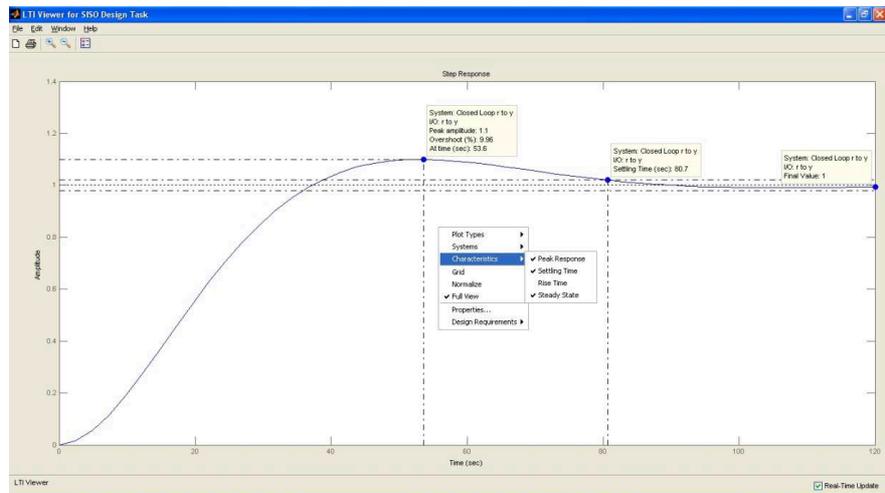


Figura 3.98. Características de la Curva de la Respuesta Simulada

Se puede observar que:

El valor pico (máximo) que alcanza la señal de respuesta es de 1.0996, por lo que el sobrenivel porcentual es del 9.96%. El tiempo de estabilización es de 80.7[sec]. El valor final es 1, por lo que el error en estado estacionario es 0, es decir, un error del 0%.

Recordando las especificaciones de diseño del controlador, se construye la siguiente tabla para efectos de comparación:

| Valor | Sobrenivel porcentual | Tiempo de estabilización | Error en estado estacionario |
|---------------------|-----------------------|---------------------------|------------------------------|
| Deseado | $S.P. \leq 10\%$ | $T_s \leq 90[\text{sec}]$ | $e_{ss} = 0$ |
| Obtenido | $S.P. = 9.96\%$ | $T_s = 80.7[\text{sec}]$ | $e_{ss} = 0$ |
| Cumplimiento | SÍ | SÍ | SÍ |

Tabla 3.3. Comparación de los Resultados del Desarrollo del Controlador

Después de comprobar que el nivel de cumplimiento de las especificaciones de diseño del controlador es del 100%, se concluye que el desarrollo del controlador ha sido exitoso.

Una vez finalizado el proceso de desarrollo del controlador, se exportan los resultados al espacio de trabajo de MATLAB:

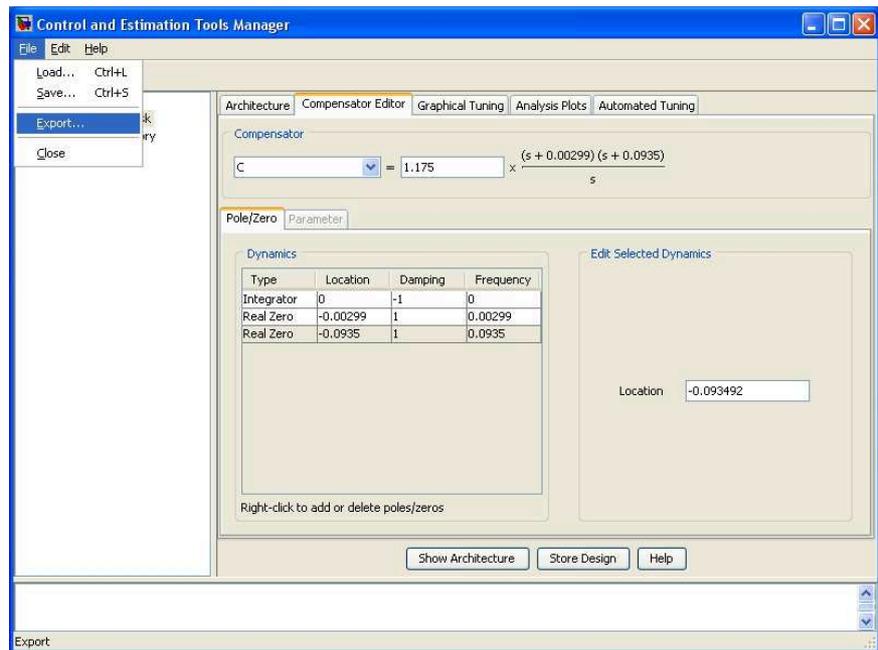


Figura 3.99. Invocación del Comando de Exportación del Diseño de Controladores

Se selecciona que se exporten aquellos componentes que son de particular interés para este caso: las funciones de transferencia del controlador (C), de la planta (G_p), y del Lazo Cerrado de la entrada “r” a la salida “y” (T_{r2y}).



Figura 3.100. Cuadro de Diálogo del Comando de Exportación del Diseño de Controladores

El resultado se muestra a continuación:

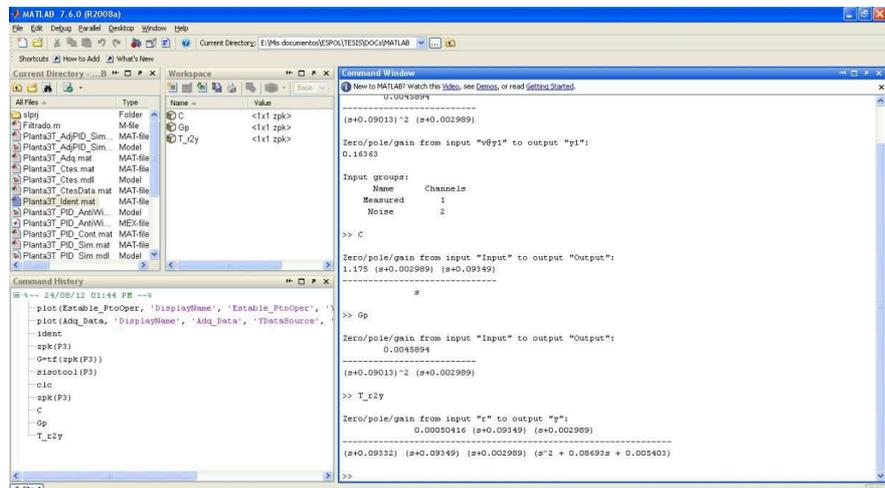


Figura 3.101. Ambiente de Trabajo de MATLAB posterior al Desarrollo del Controlador

Se puede observar que:

La función de transferencia C del controlador PID desarrollado, que será denominada G_c , es:

$$G_c = 1.175 \frac{(s + 0.002989)(s + 0.093492)}{s}$$

Ecuación 3.9. Función de Transferencia del Controlador PID Desarrollado

La función de transferencia G_p , es exactamente la misma. La función de transferencia de Lazo Abierto de la entrada "r" a la salida "y" T_{r2y} , es:

$$T_{r2y} = 0.00050416 \frac{(s + 0.093492)(s + 0.002989)}{(s + 0.09332)(s + 0.093492)(s + 0.002989)(s^2 + 0.08693s + 0.005403)}$$

Ecuación 3.10. Función de Transferencia de Lazo Abierto de la Planta

Se puede apreciar que la función de transferencia de Lazo Abierto T_{r2y} , es de tercer orden y sin ceros finitos, ya que éstos se eliminan con sus respectivos polos.

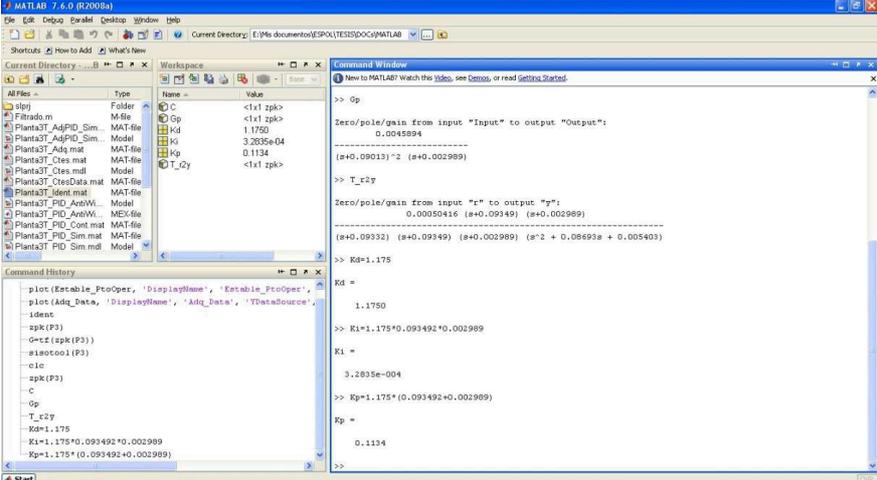
Como paso final en esta etapa, se calculan los valores de los parámetros del controlador PID desarrollado, K_P y K_I , a partir de su función de transferencia, de acuerdo a las siguientes fórmulas:

$$K_P = K (z_1 + z_2)$$

$$K_I = K (z_1 z_2)$$

El valor de K_D es igual a K .

El resultado se muestra a continuación:



```

MATLAB 7.6.0 (R2008a)
File Edit Debug Evaluate Desktop Window Help
Current Directory: E:\Me documentos\ESPOLTE2\DOC\MATLAB
Workspace
Name Value
C <1x1 zpk>
Gp <1x1 zpk>
Kd 1.1750
Ki 3.2835e-04
Kp 0.1134
T_z2y <1x1 zpk>
Command Window
New to MATLAB? Watch this video, see Getmo, or read Getting Started.
>> Gp
Zero/pole/gain from input "Input" to output "Output":
0.0045894
-----
(s+0.09013)^2 (s+0.002989)
>> T_z2y
Zero/pole/gain from input "r" to output "p":
0.00050416 (s+0.09349) (s+0.002989)
-----
(s+0.09332) (s+0.09349) (s+0.002989) (s^2 + 0.08693s + 0.005403)
>> Kd=1.175
Kd =
1.1750
>> Ki=1.175*(0.093492+0.002989)
Ki =
3.2835e-004
>> Kp=1.175*(0.093492+0.002989)
Kp =
0.1134
Command History
plot(Estable_PtoOper, 'DisplayName', 'Estable_PtoOper',
plot(Adq_Data, 'DisplayName', 'Adq_data', 'YDataSource',
'idatac
zpk(P3)
G=tt(zpk(P3))
sisotool(P3)
c1c
zpk(P3)
c
Op
T_z2y
Rp=1.175
Kz=1.175*(0.093492+0.002989)
Kp=1.175*(0.093492+0.002989)
Start

```

Figura 3.102. Cálculo de los Parámetros del Controlador PID

Se puede observar que:

- $K_p = 0.1133652$
- $K_I = 0.000328351$
- $K_D = 1.175$

Si se remplazan estos valores en la función de transferencia del controlador PID, se obtiene:

$$G_C(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \Rightarrow 0.1133652 + \frac{0.000328351}{s} + 1.175s$$

Con estos valores obtenidos, se procede a simular el controlador PID desarrollado para el sistema Planta 3 Tanques, sobre algunos modelos de prueba en la herramienta SIMULINK de MATLAB.

3.2.2. Pruebas y Ajuste Fino del Controlador

Una forma de comprobar que el controlador ha sido desarrollado exitosamente previo a su implementación sobre el sistema Planta 3 Tanques, es llevar a cabo simulaciones sobre modelos representativos de dicho sistema para

analizar la calidad de su respuesta, y así determinar que poner en funcionamiento al sistema bajo el gobierno del controlador PID desarrollado, sea un procedimiento seguro.

Se dispone de tres modelos creados en SIMULINK para realizar estas simulaciones de prueba:

- Sobre la función de transferencia del tercer tanque.
- Sobre el modelo matemático no lineal de la planta.
- Sobre el modelo matemático linealizado de la planta.

Para más información acerca del desarrollo de los modelos matemáticos de la planta, refiérase al Proyecto de Graduación “Análisis Comparativo del Funcionamiento de Dos Sistemas de Control Automático de Nivel de Agua en una Planta de Tres Vasos Comunicantes, diseñados aplicando los Métodos de Control de Reubicación de Polos del Modelo Interno y de Lógica Difusa, diseñados e implementados usando MATLAB/SIMULINK”, desarrollado por Franklin Ilich Kuonquí Gaínza.

El primer modelo creado es el siguiente:

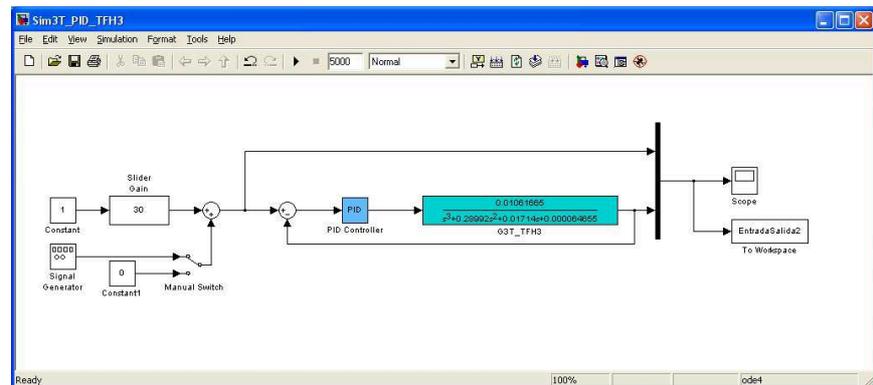


Figura 3.103. Modelo para la Simulación sobre la Función de Transferencia del Tercer Tanque

Se pueden apreciar los siguientes elementos presentes:

- 2 bloques de constantes
- 1 bloque conmutador de señal (Manual Switch)
- 2 bloques de suma
- 1 bloque multiplexor
- 1 bloque de ganancia variable (Slider Gain)
- 1 bloque generador de señales (Signal Generator)
- 1 bloque controlador PID (PID Controller)
- 1 bloque de osciloscopio (Scope)
- 1 bloque de exportación de datos al espacio de trabajo (To Workspace)
- 1 bloque de función de transferencia (G3T_TFH3, representativo del tercer tanque)

El bloque de ganancia variable presente en este modelo, determina el valor en centímetros, del nivel de referencia de la altura de la columna de agua del tercer tanque, alrededor del cual se va a simular la operación la planta, para comprobar el comportamiento que tendría el sistema con el controlador PID desarrollado, observando la señal de respuesta del modelo.

A continuación se muestra la interfaz gráfica del bloque de ganancia variable del nivel de referencia de este modelo:

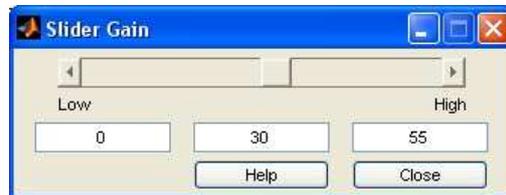


Figura 3.104. Interfaz Gráfica del Bloque de Ganancia Variable del Nivel de Referencia

Para este caso, se asume que las unidades están en centímetros.

Se puede observar que:

Los valores establecidos como máximo y mínimo son de 0[cm] y 55[cm], respectivamente. El valor elegido dentro del rango establecido, y que se constituye en el nivel de referencia de la altura de la columna de agua del tercer tanque, es de 30[cm]. Este valor fue elegido, dado que esta altura coincide con la mitad de la altura del tanque. Esta configuración es la misma para todos los bloques de ganancia variable del nivel de referencia de los modelos en esta sección.

El bloque generador de señales presente en este modelo, se encarga de generar un tren de pulsos, necesario para hacer variaciones del nivel de referencia de la altura de la columna de agua del tercer tanque, como parte fundamental del proceso de simulación del modelo.

A continuación se muestra la interfaz de parámetros del bloque generador de señales de este modelo:

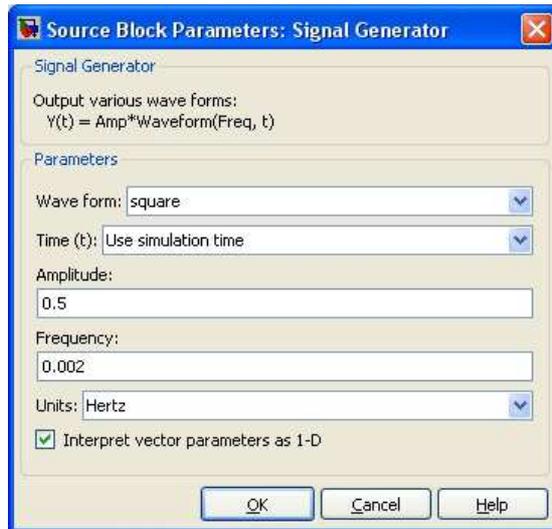


Figura 3.105. Interfaz de Parámetros del Bloque Generador de Señales para la Simulación sobre la Función de Transferencia del Tercer Tanque

Se puede observar que:

La amplitud de la señal cuadrada, que se muestra adimensional, se ha establecido en 0.5. Para este caso, se asume que las unidades están en centímetros. Es decir que la señal de referencia será de $30 \pm 0.5[\text{cm}]$, dando un valor de $30.5[\text{cm}]$ durante el pulso alto y $29.5[\text{cm}]$ durante el pulso bajo de la onda.

Este valor de amplitud fue elegido, para producir un cambio de $\pm 1[\text{cm}]$ en el nivel de referencia de la altura de la columna

de agua del tercer tanque, obteniendo así la variación equivalente a una señal de entrada de tipo escalón unitario.

La frecuencia de la señal cuadrada, que se muestra en Hertz, se ha establecido en $0.002[\text{Hz}]$, es decir, un periodo de $500[\text{sec}]$, por lo que el periodo se reparte en $250[\text{sec}]$ para el pulso alto y $250[\text{sec}]$ para el pulso bajo de la onda.

Este valor de frecuencia fue determinado experimentalmente, después de comprobar que proporciona el tiempo suficiente para estudiar la simulación del cambio en la altura de la columna de agua del tercer tanque. Esta configuración es la misma para todos los bloques generadores de señales de los modelos en esta sección.

Un bloque controlador PID, es un elemento que implementa un sistema de control PID en el modelo, cuyos parámetros son ingresados para los términos proporcional, integral y derivativo.

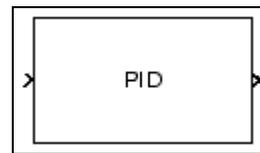


Figura 3.106. Bloque Controlador PID

Si se examina la estructura interna de este bloque, está compuesta prácticamente de la misma manera como se muestra en el diagrama de la Figura 3.71.

La estructura interna del bloque controlador PID es la siguiente:

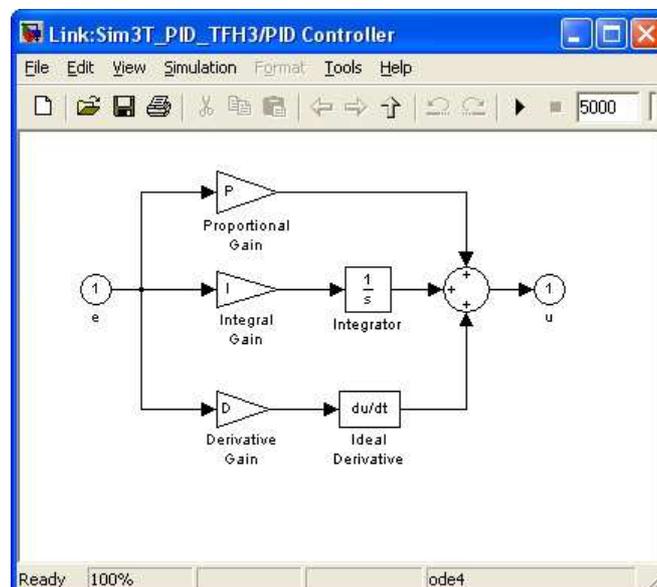


Figura 3.107. Estructura Interna del Bloque Controlador PID

A continuación se muestra la interfaz de parámetros del bloque controlador PID de este modelo:

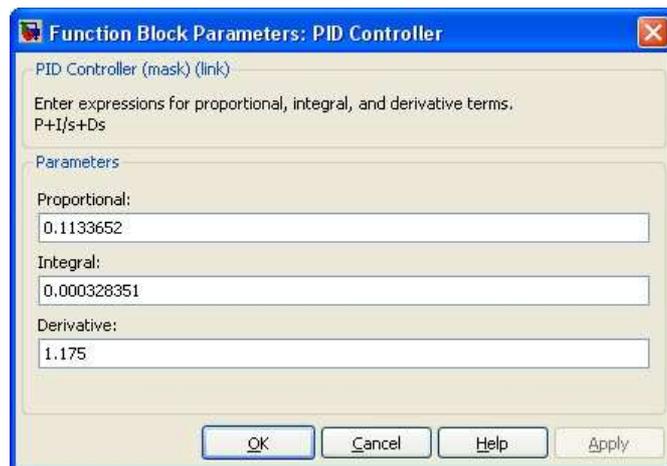


Figura 3.108. Interfaz de Parámetros del Bloque controlador PID

Se puede observar que:

El bloque está diseñado para responder a una función de

transferencia del tipo $K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s$.

Recordando los valores calculados de los parámetros del controlador PID desarrollado en la Sección 3.2.1., se obtiene la siguiente tabla:

| Parámetro | Valor |
|-----------|-------------|
| K_P | 0.1133652 |
| K_I | 0.000328351 |
| K_D | 1.175 |

Tabla 3.4. Parámetros del Controlador PID Desarrollado

El parámetro proporcional, correspondiente al término K_P , contiene el valor calculado de la constante K_P del controlador: 0.1133652.

El parámetro integral, correspondiente al término $\frac{K_I}{s}$, contiene el valor calculado de la constante K_I del controlador: 0.000328351.

El parámetro derivativo, correspondiente al término $K_D s$, contiene el valor calculado de la constante K_D del controlador: 1.175.

Esta configuración es la misma para todos los bloques controladores PID de los modelos en esta sección.

Un bloque de exportación de datos al espacio de trabajo, es un elemento que almacena dentro del espacio de trabajo de MATLAB, el valor de la señal que recibe, en una variable cuyo nombre se especifica dentro del bloque.

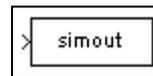


Figura 3.109. Bloque de Exportación de Datos al Espacio de Trabajo

El bloque de exportación de datos al ambiente de trabajo presente en este modelo, que lleva por nombre EntradaSalida2, se encarga de almacenar dentro del espacio de trabajo de MATLAB, en una variable con dicho nombre, los valores de las señales de referencia y de salida del bloque de función de transferencia G3T_TFH3, representativo del tercer tanque, agrupadas por el bloque multiplexor presente en el modelo.

El bloque de función de transferencia presente en este modelo, que lleva por nombre G3T_TFH3, tiene la finalidad de representar el comportamiento de la altura de la columna de agua del tercer tanque. Su función de transferencia, cuyo desarrollo se lo detalla en el Anexo H, es la siguiente:

$$\frac{h_3(s)}{U(s)} = \frac{0.01061665}{s^3 + 0.28992s^2 + 0.01714s + 0.000064655}$$

Ecuación 3.11. Función de Transferencia Desarrollada del Tercer Tanque

Los demás bloques de los modelos de esta sección, son exactamente iguales y cumplen las mismas funciones que los bloques descritos en la Sección 3.1.

De igual manera, los parámetros de simulación son exactamente iguales a los descritos en dicha sección, con la única diferencia que para este caso, y en las simulaciones restantes de esta sección, se especifica un tiempo de finalización de la simulación de 5000[sec].

Este valor fue elegido, ya que al finalizar la simulación, permitirá tener 10 ciclos completos de las curvas correspondientes a las señales de respuesta obtenidas de cada simulación en particular.

A continuación se muestra el despliegue visual de las señales recibidas por el bloque de osciloscopio, que han sido generadas durante la ejecución de la simulación de este modelo:

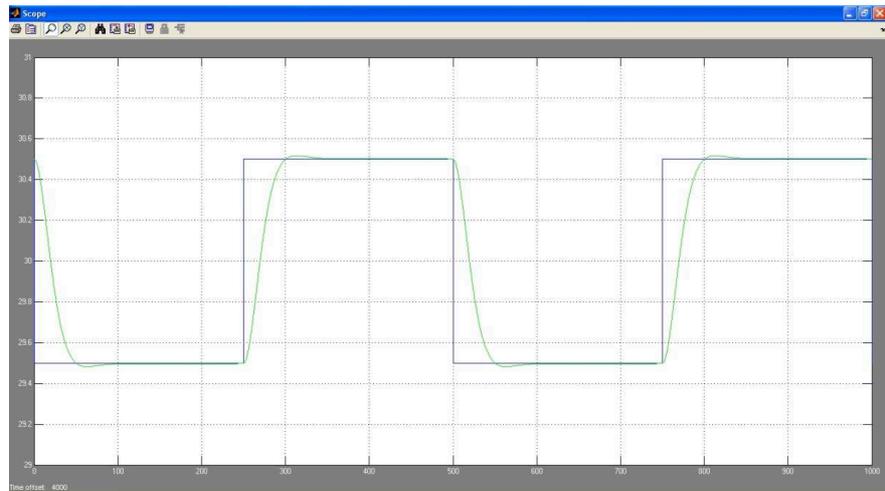


Figura 3.110. Vista de la Simulación sobre la Función de Transferencia del Tercer Tanque

A continuación se muestra el ambiente de trabajo de MATLAB, posterior a la ejecución de la simulación de este modelo:

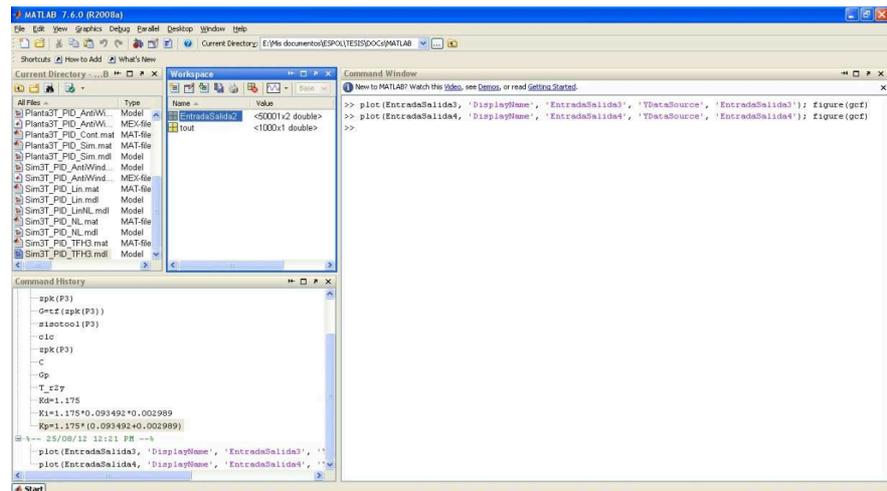


Figura 3.111. Ambiente de Trabajo de MATLAB posterior a la Simulación sobre la Función de Transferencia del Tercer Tanque

Los resultados de la simulación almacenados en EntradaSalida2, son los siguientes:

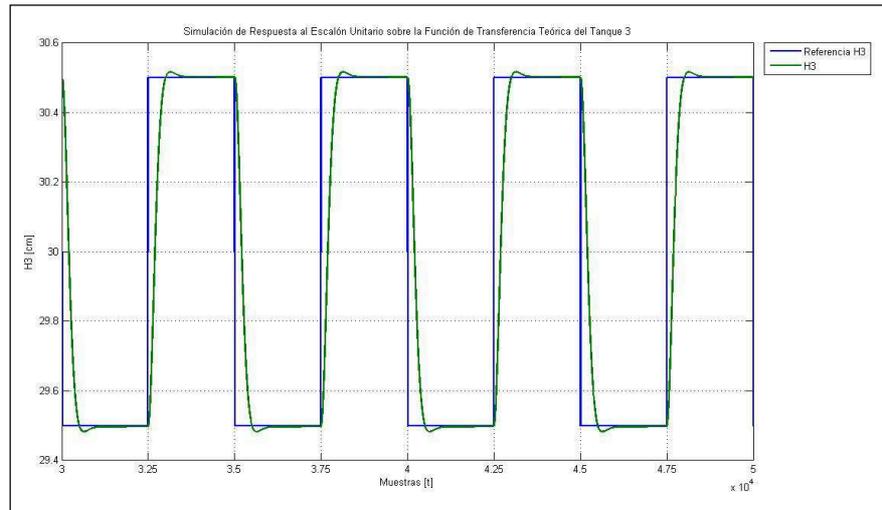


Figura 3.112. Resultados de la Simulación sobre la Función de Transferencia del Tercer Tanque

Se puede observar que:

Se muestra de color verde la gráfica correspondiente a la señal de respuesta de la simulación sobre la función de transferencia del tercer tanque, a una señal de entrada de prueba de escalón unitario, y tal como se lo esperaba, tiene características muy similares a la respuesta de un sistema de segundo orden con un controlador PID, descrita en la Sección 3.2.1.

Además, se muestra de color azul la gráfica correspondiente a la señal de referencia, que representa a la señal de entrada de prueba ya mencionada.

El valor pico (máximo) que alcanza la señal de respuesta es de 30.517222[cm], por lo que el sobrenivel porcentual es del 1.7222%. El tiempo de estabilización es de 45.9[sec]. El valor final es 30.502324[cm], por lo que el error en estado estacionario es de 0.002324[cm] (menor a una décima de milímetro), es decir, un error del 0.2324%.

Recordando las especificaciones de diseño del controlador, se construye la siguiente tabla para efectos de comparación:

| Valor | Sobrenivel porcentual | Tiempo de estabilización | Error en estado estacionario |
|---------------------|-----------------------|---------------------------|------------------------------|
| Deseado | $S.P. \leq 10\%$ | $T_s \leq 90[\text{sec}]$ | $e_{ss} = 0$ |
| Obtenido | $S.P. = 1.7222\%$ | $T_s = 45.9[\text{sec}]$ | $e_{ss} \approx 0$ |
| Cumplimiento | SÍ | SÍ | SÍ |

Tabla 3.5. Comparación de los Resultados de la Simulación sobre la Función de Transferencia del Tercer Tanque

Después de comprobar que el nivel de cumplimiento de las especificaciones de diseño del controlador es del 100%, se

concluye que la simulación del controlador PID desarrollado sobre la función de transferencia del tercer tanque ha sido exitosa.

El segundo modelo creado es el siguiente:

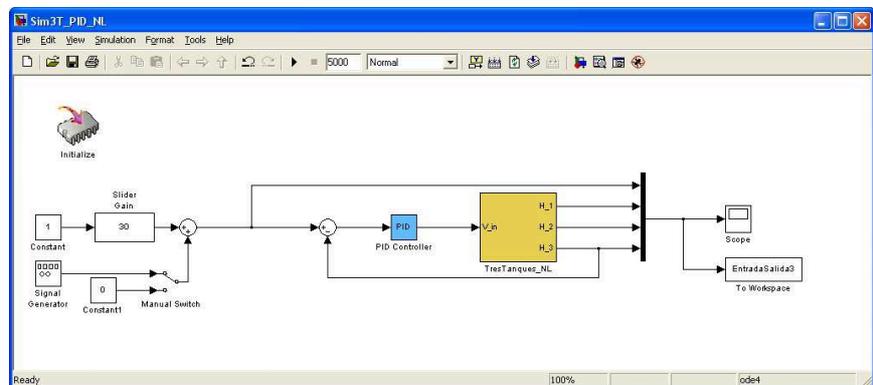


Figura 3.113. Modelo para la Simulación sobre el Modelado Matemático No Lineal de la Planta

Se pueden apreciar los siguientes elementos presentes:

- 1 bloque de inicialización (Initialize)
- 2 bloques de constantes
- 1 bloque conmutador de señal (Manual Switch)
- 2 bloques de suma
- 1 bloque multiplexor
- 1 bloque de ganancia variable (Slider Gain)

- 1 bloque generador de señales (Signal Generator)
- 1 bloque controlador PID (PID Controller)
- 1 bloque de osciloscopio (Scope)
- 1 bloque de exportación de datos al espacio de trabajo (To Workspace)
- 1 bloque TresTanques_NL (representativo del modelo matemático no lineal de la planta)

Un bloque de inicialización, es un elemento que permite definir una cadena de texto que se evalúa y almacena dentro del espacio de trabajo de MATLAB en tiempo de ejecución. Es útil para inicializar rápidamente bloques de sistemas o subsistemas, sólo especificando sus parámetros en la cadena de texto ingresada. Además permite cambiar el valor del parámetro de uno o varios bloques manera rápida y directa, evitando tener que hacerlo manualmente por cada uno de ellos.

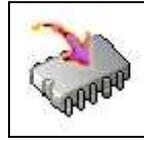


Figura 3.114. Bloque de Inicialización [39]

El bloque de inicialización presente en este modelo, asigna los valores de las constantes involucradas en el bloque TresTanques_NL, cuyo cálculo se lo detalla en el Anexo H.

A continuación se muestra la interfaz de parámetros del bloque de inicialización de este modelo:

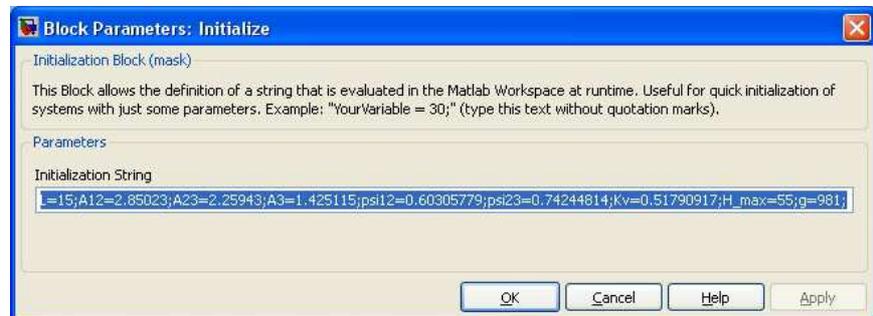


Figura 3.115. Interfaz de Parámetros del Bloque de Inicialización de los Modelos Matemáticos de la Planta

39 Bloque de MATLAB proporcionado por el Ing. Juan Del Pozo para el desarrollo de este Proyecto de Graduación.

Creación: Institut für Regelungstechnik d. RWTH Aachen, Octubre 2003.

Sitio Web: <http://www.irt.rwth-aachen.de/en/>

Se puede observar que los valores a asignar, corresponden a las siguientes constantes:

- $L=15[\text{cm}]$ (L)
- $A_{12}=2.85023[\text{cm}^2]$ (A12)
- $A_{23}=2.25943[\text{cm}^2]$ (A23)
- $A_3=1.425115[\text{cm}^2]$ (A3)
- $\Psi_{12}=0.60305779$ (psi12)
- $\Psi_{23}=0.74244814$ (psi23)
- $K_V=0.51790917$ (Kv)
- $H_{\text{max}}=55[\text{cm}]$ (H_max)
- $g=981[\text{cm}/\text{sec}^2]$ (g)

Esta configuración es la misma para todos los bloques de inicialización de los modelos en esta sección.

Una vez que se invoca el comando para abrir y cargar el modelo, el contenido de la cadena de texto del bloque de inicialización se evalúa y almacena en variables dentro del espacio de trabajo de MATLAB.

A continuación se muestra el ambiente de trabajo de MATLAB, posterior a la invocación de la simulación del modelo:

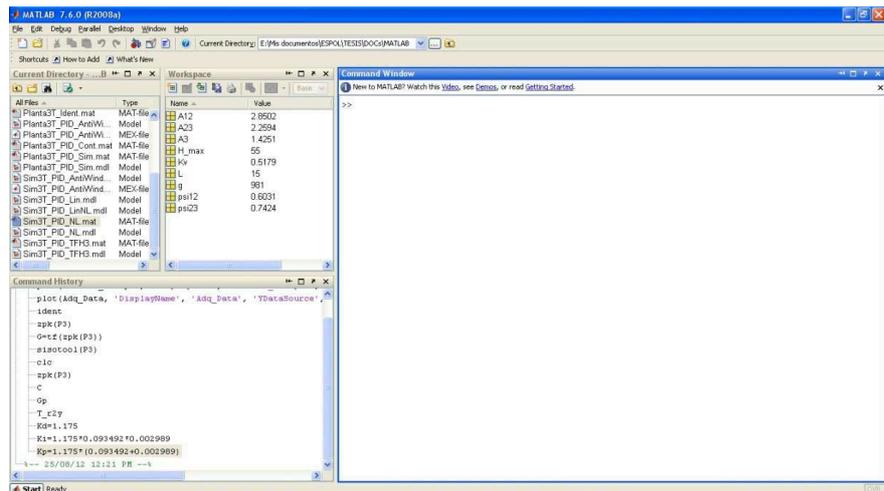


Figura 3.116. Ambiente de Trabajo de MATLAB posterior a la Evaluación del Bloque de Inicialización

Se puede observar que:

Todas las constantes especificadas en el bloque de inicialización (L , A_{12} , A_{23} , A_3 , Ψ_{12} , Ψ_{23} , K_V , H_{\max} , g), se han almacenado dentro del espacio de trabajo de MATLAB, en variables con los nombres y valores definidos en la cadena de texto del bloque.

El bloque TresTanques_NL fue creado íntegramente, y es la fiel representación del modelo matemático no lineal de la planta.

Por lo tanto, el bloque creado es el siguiente:

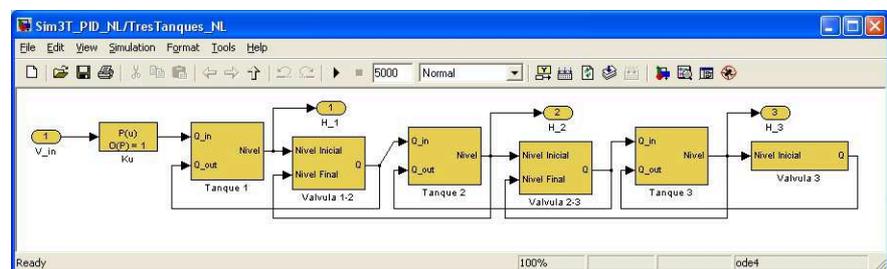


Figura 3.117. Bloque TresTanques_NL [40]

El bloque TresTanques_NL está compuesto por los siguientes elementos:

- 1 puerto de entrada
- 3 puertos de salida
- 1 bloque de polinomio (K_U)
- 1 bloque Tanque 1 (representativo del modelo no lineal del primer tanque)

40 Ereignisdiskrete und hybride Modellbildung am Dreitanke­system: ABEL, D.; BOLLIG, A., Rapid Control Prototyping: Methoden und Anwendungen, Erste Auflage, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2006, p. 335

- 1 bloque Valvula 1-2 (representativo del modelo no lineal de la válvula entre el primer y segundo tanque)
- 1 bloque Tanque 2 (representativo del modelo no lineal del segundo tanque)
- 1 bloque Valvula 2-3 (representativo del modelo no lineal de la válvula entre el segundo y tercer tanque)
- 1 bloque Tanque 3 (representativo del modelo no lineal del tercer tanque)
- 1 bloque Valvula 3 (representativo del modelo no lineal de la válvula de salida del tercer tanque)

El puerto de entrada V_{in} recibe el valor del voltaje DC, producto de la operación del bloque controlador PID presente en el modelo.

Los puertos de salida de este bloque son:

- H1
- H2
- H3

El puerto H1 entrega al modelo el valor en centímetros, de la señal correspondiente a la altura de la columna de agua del primer tanque. El puerto H2 entrega al modelo el valor en centímetros, de la señal correspondiente a la altura de la columna de agua del segundo tanque.

El puerto H3 entrega al modelo el valor en centímetros, de la señal correspondiente a la altura de la columna de agua del tercer tanque.

La primera parte del bloque, corresponde al modelado no lineal de la altura de la columna de agua del primer tanque, que involucra a los bloques K_U , Tanque 1 y Valvula 1-2. Su ecuación es la siguiente:

$$H_1 = \frac{1}{L^2} \int \left[(K_U \cdot U) - (A_{12} \cdot \psi_{12} \sqrt{2g(H_1 - H_2)}) \right] dt$$

Ecuación 3.12. Función No Lineal Reducida de la Altura de la Columna de Agua del Primer Tanque [41]

Donde $U = V_{in}$.

41 Kontinuierliche Modellbildung für ein Dreitanke-system: ABEL, D.; BOLLIG, A., Rapid Control Prototyping: Methoden und Anwendungen, Erste Auflage, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2006, p. 327

El bloque de polinomio (K_U) presente en este modelo, contiene la expresión no lineal para calcular el caudal de entrada de agua al primer tanque, según el valor del voltaje DC que ingresa al bloque TresTanques_NL, cuyo cálculo se lo detalla en el Anexo G.

Su ecuación es la siguiente:

$$Q_{in} = (500.502 \cdot U - 1410.41) [cm^3/sec]$$

Ecuación 3.13. Función No Lineal del Caudal de Entrada por Voltaje

A continuación se muestra la interfaz de parámetros del bloque K_U :

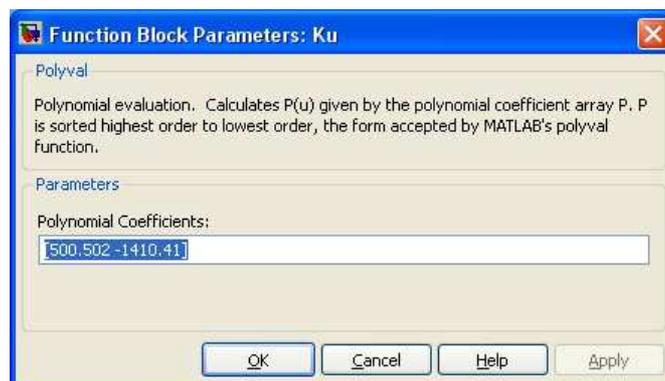


Figura 3.118. Interfaz de Parámetros del Bloque K_U

Se puede observar que:

A partir de la Ecuación 3.15., se deduce que $m = a_1 = 500.502$ y $b = a_0 = -1410.41$, valores que se han ingresado como coeficientes del respectivo polinomio.

El bloque Tanque 1 presente en este modelo, contiene la representación no lineal de la ecuación de la altura de la columna de agua del primer tanque.

Su ecuación es la siguiente:

$$H_1 = \frac{1}{L^2} \int (Q_{in} - Q_{out}) dt$$

Ecuación 3.14. Función No Lineal Reducida de la Altura de la Columna de Agua del Primer Tanque [42]

Por lo tanto, la estructura interna del bloque Tanque 1 es la siguiente:

42 Kontinuierliche Modellbildung für ein Dreitanke-system: ABEL, D.; BOLLIG, A., Rapid Control Prototyping: Methoden und Anwendungen, Erste Auflage, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2006, p. 327

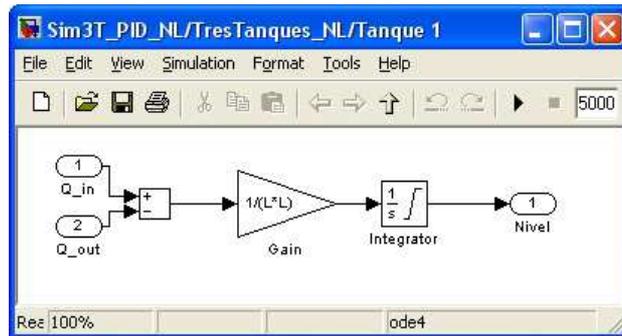


Figura 3.119. Estructura Interna del Bloque Tanque 1 No Lineal [43]

Esta estructura interna es la misma para los bloques Tanque 2 y Tanque 3 de este modelo.

A continuación se muestra la interfaz de parámetros del bloque Tanque 1 de este modelo:

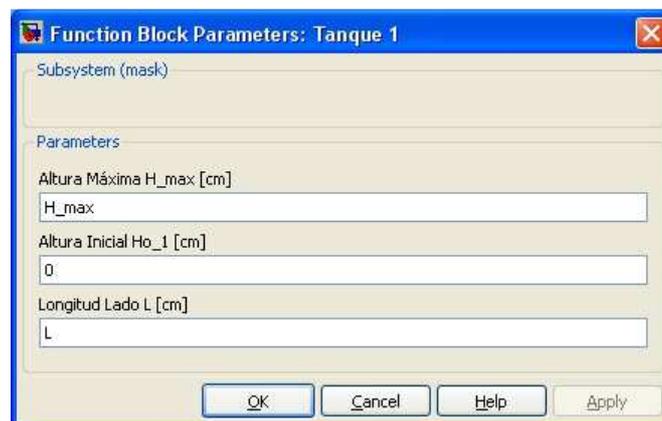


Figura 3.120. Interfaz de Parámetros del Bloque Tanque 1

43 Ereignisdiskrete und hybride Modellbildung am Dreitankeensystem: ABEL, D.; BOLLIG, A., Rapid Control Prototyping: Methoden und Anwendungen, Erste Auflage, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2006, p. 338

Se puede observar que:

El parámetro Altura Máxima H_{max} , es " H_{max} " (55[cm]), definido en el bloque de inicialización de este modelo. El parámetro Altura Inicial H_{o_1} , es 0[cm]. El parámetro Longitud Lado L , es " L " (15[cm]), también definido en el bloque de inicialización de este modelo.

Esta interfaz de parámetros es la misma para todos los bloques Tanque 1, Tanque 2 y Tanque 3 de los modelos en esta sección.

El bloque Valvula 1-2 presente en este modelo, contiene la representación no lineal del caudal a través de la válvula entre el primer y segundo tanque.

Su ecuación es la siguiente:

$$Q_{12} = A_{12} \cdot \psi_{12} \sqrt{2g(H_1 - H_2)}$$

Ecuación 3.15. Función No Lineal del Caudal entre el Primer y Segundo Tanque [44]

Por lo tanto, la estructura interna del bloque Valvula 1-2 es la siguiente:

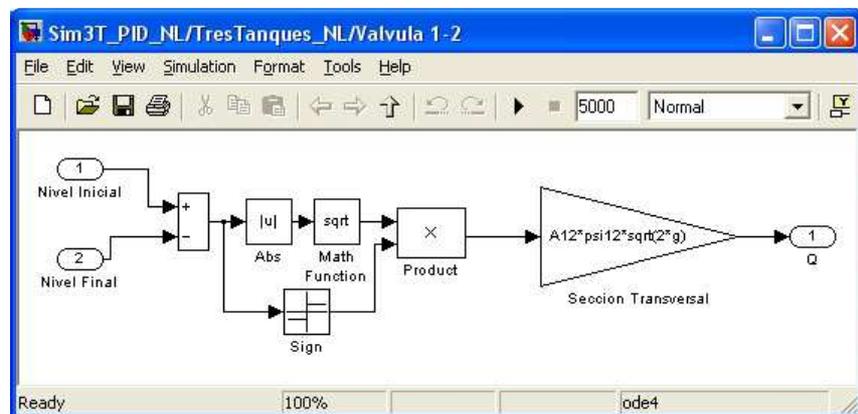


Figura 3.121. Estructura Interna del Bloque Valvula 1-2 [45]

Esta estructura interna es la misma para el bloque Valvula 2-3 de este modelo, pero con sus correspondientes parámetros.

44 Kontinuierliche Modellbildung für ein Dreitanksystem: ABEL, D.; BOLLIG, A., Rapid Control Prototyping: Methoden und Anwendungen, Erste Auflage, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2006, p. 327

45 Erweiterung des Dreitanksystems um eine Ablaufsteuerung: ABEL, D.; BOLLIG, A., Rapid Control Prototyping: Methoden und Anwendungen, Erste Auflage, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2006, p. 357

A continuación se muestra la interfaz de parámetros del bloque Valvula 1-2 de este modelo:

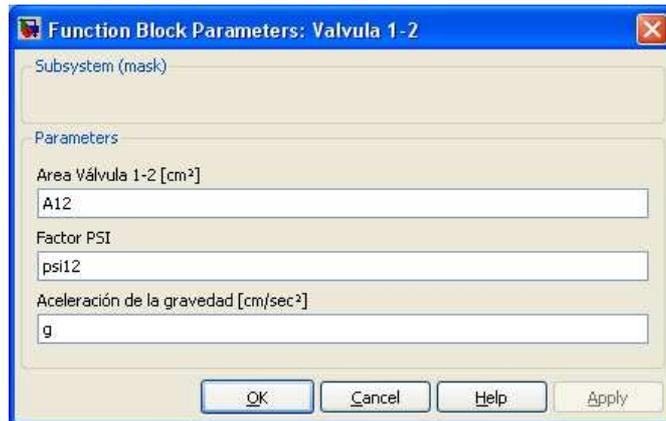


Figura 3.122. Interfaz de Parámetros del Bloque Valvula 1-2

Se puede observar que:

El parámetro Área Válvula 1-2, es “A12” (2.85023[cm²]), definido en el bloque de inicialización de este modelo. El parámetro Factor PSI, es “psi12” (0.60305779), también definido en el bloque de inicialización de este modelo. El parámetro Aceleración de la gravedad, es “g” (981[cm/sec²]), también definido en el bloque de inicialización de este modelo. Esta interfaz de parámetros es la misma para el bloque Valvula 2-3, pero con sus correspondientes parámetros.

La segunda parte del bloque, corresponde al modelado no lineal de la altura de la columna de agua del segundo tanque, que involucra a los bloques Tanque 2 y Valvula 2-3.

Su ecuación es la siguiente:

$$H_2 = \frac{1}{L^2} \int \left[\left(A_{12} \cdot \psi_{12} \sqrt{2g(H_1 - H_2)} \right) - \left(A_{23} \cdot \psi_{23} \sqrt{2g(H_2 - H_3)} \right) \right] dt$$

Ecuación 3.16. Función No Lineal de la Altura de la Columna de Agua del Segundo Tanque [46]

El parámetro Área Válvula 2-3, es “A23” (2.25943[cm²]), definido en el bloque de inicialización de este modelo. El parámetro Factor PSI, es “psi23” (0.74244814), también definido en el bloque de inicialización de este modelo. La tercera parte del bloque, corresponde al modelado no lineal de la altura de la columna de agua del tercer tanque, que involucra a los bloques Tanque 3 y Valvula 3.

Su ecuación es la siguiente:

46 Kontinuierliche Modellbildung für ein Dreitanke-system: ABEL, D.; BOLLIG, A., Rapid Control Prototyping: Methoden und Anwendungen, Erste Auflage, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2006, p. 327

$$H_3 = \frac{1}{L^2} \int \left[\left(A_{23} \cdot \psi_{23} \sqrt{2g(H_2 - H_3)} \right) - \left(K_V \cdot A_3 \sqrt{2g \cdot H_3} \right) \right] dt$$

Ecuación 3.17. Función No Lineal de la Altura de la Columna de Agua del Tercer Tanque [47]

El bloque Valvula 3 presente en este modelo, contiene la representación no lineal del caudal a través de la válvula de salida del tercer tanque.

Su ecuación es la siguiente:

$$Q_{out} = K_V \cdot A_3 \sqrt{2g \cdot H_3}$$

Ecuación 3.18. Función No Lineal del Caudal de salida del Tercer Tanque [48]

Por lo tanto, la estructura interna del bloque Valvula 3 es la siguiente:

47 Kontinuierliche Modellbildung für ein Dreitanke System: ABEL, D.; BOLLIG, A., Rapid Control Prototyping: Methoden und Anwendungen, Erste Auflage, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2006, p. 327

48 Kontinuierliche Modellbildung für ein Dreitanke System: ABEL, D.; BOLLIG, A., Rapid Control Prototyping: Methoden und Anwendungen, Erste Auflage, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2006, p. 327

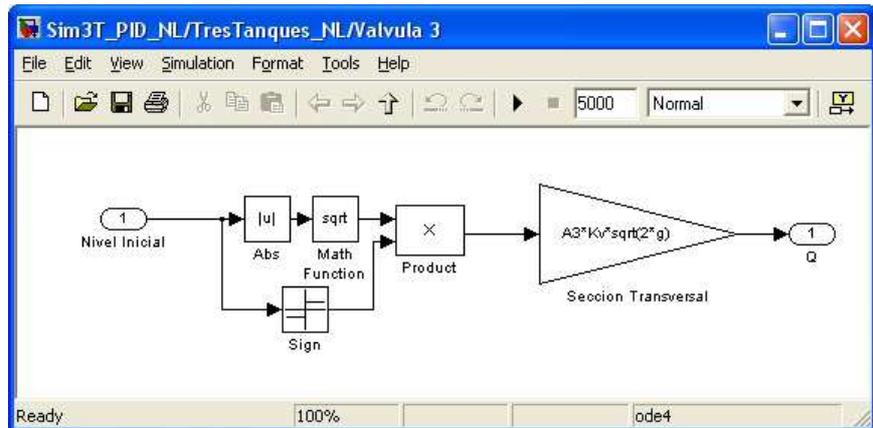


Figura 3.123. Estructura Interna del Bloque Valvula 3 [49]

A continuación se muestra la interfaz de parámetros del bloque Valvula 3 de este modelo:

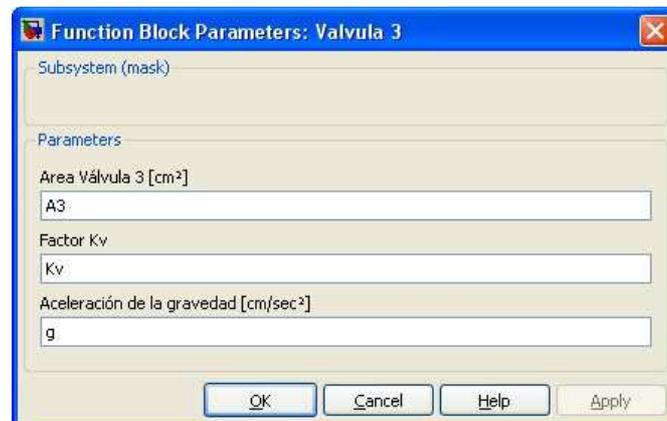


Figura 3.124. Interfaz de Parámetros del Bloque Valvula 3

Se puede observar que:

49 Erweiterung des Dreitanke systems um eine Ablaufsteuerung: ABEL, D.; BOLLIG, A., Rapid Control Prototyping: Methoden und Anwendungen, Erste Auflage, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2006, p. 357

El parámetro Área Válvula 3, es “A3” (1.425115[cm²]), definido en el bloque de inicialización de este modelo. El parámetro Factor Kv, es “Kv” (0.51790917), también definido en el bloque de inicialización de este modelo.

El bloque de exportación de datos al ambiente de trabajo presente en este modelo, que lleva por nombre EntradaSalida3, se encarga de almacenar dentro del espacio de trabajo de MATLAB, en una variable con dicho nombre, los valores de las señales de referencia y de salida del bloque TresTanques_NL, representativo del modelo matemático no lineal de la planta, agrupadas por el bloque multiplexor presente en el modelo.

A continuación se muestra el despliegue visual de las señales recibidas por el bloque de osciloscopio, que han sido generadas durante la ejecución de la simulación de este modelo:

Los resultados de la simulación almacenados en EntradaSalida3, son los siguientes:

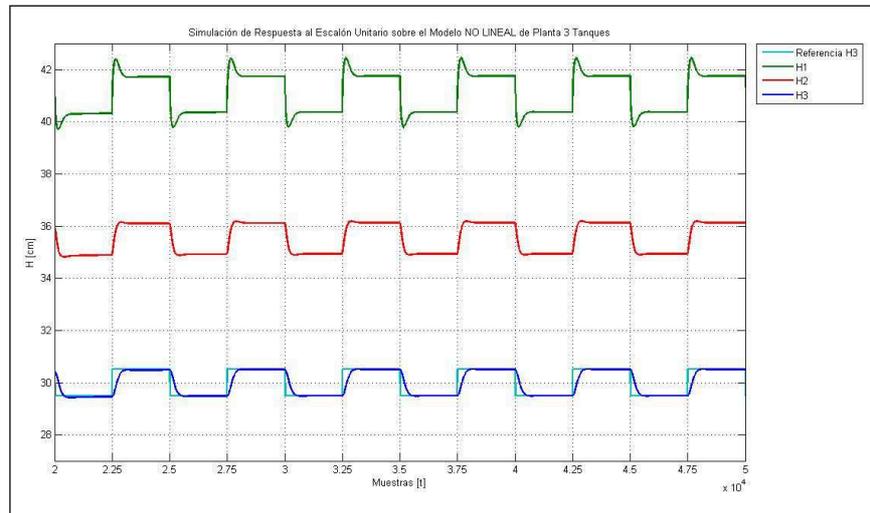


Figura 3.127. Resultados de la Simulación sobre el Modelo Matemático No Lineal de la Planta

Con el fin de analizar mejor los resultados de la simulación, la zona crítica es ampliada.

El resultado se muestra a continuación:

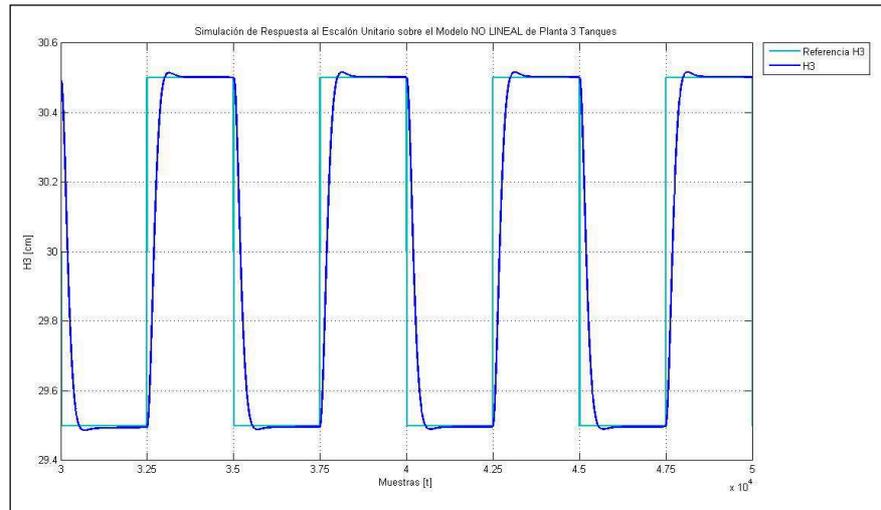


Figura 3.128. Vista Ampliada de los Resultados de la Simulación sobre el Modelo Matemático No Lineal de la Planta

Se puede observar que:

Se muestra de color azul la gráfica correspondiente a la señal de respuesta de la simulación sobre el modelo matemático no lineal del tercer tanque, a una señal de entrada de prueba de escalón unitario, y tal como se lo esperaba, también tiene características muy similares a la respuesta de un sistema de segundo orden con un controlador PID, descrita en la Sección 3.2.1.

Además, se muestra de color celeste la gráfica correspondiente a la señal de referencia, que representa a la señal de entrada de prueba ya mencionada.

El valor pico (máximo) que alcanza la señal de respuesta es de 30.515076[cm], por lo que el sobrenivel porcentual es del 1.5076%. El tiempo de estabilización es de 45.78[sec]. El valor final es 30.501586[cm], por lo que el error en estado estacionario es de 0.001586[cm] (también menor a una décima de milímetro), es decir, un error del 0.1586%.

Recordando las especificaciones de diseño del controlador, se construye la siguiente tabla para efectos de comparación:

| Valor | Sobrenivel porcentual | Tiempo de estabilización | Error en estado estacionario |
|---------------------|-----------------------|---------------------------|------------------------------|
| Deseado | $S.P. \leq 10\%$ | $T_s \leq 90[\text{sec}]$ | $e_{ss} = 0$ |
| Obtenido | $S.P. = 1.5076\%$ | $T_s = 45.78[\text{sec}]$ | $e_{ss} \approx 0$ |
| Cumplimiento | SÍ | SÍ | SÍ |

Tabla 3.6. Comparación de los Resultados de la Simulación sobre el Modelo Matemático No Lineal de la Planta

Después de comprobar que el nivel de cumplimiento de las especificaciones de diseño del controlador es del 100%, se

concluye que la simulación del controlador PID desarrollado sobre el modelo matemático no lineal de la planta ha sido exitosa.

El tercer y último modelo creado es el siguiente:

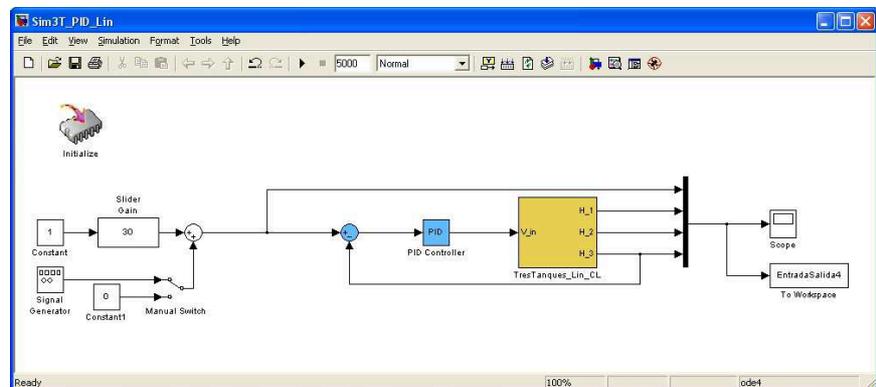


Figura 3.129. Modelo para la Simulación sobre el Modelado Matemático Linealizado de la Planta

Se pueden apreciar los siguientes elementos presentes:

- 1 bloque de inicialización (Initialize)
- 2 bloques de constantes
- 1 bloque conmutador de señal (Manual Switch)
- 2 bloques de suma
- 1 bloque multiplexor
- 1 bloque de ganancia variable (Slider Gain)

- 1 bloque generador de señales (Signal Generator)
- 1 bloque controlador PID (PID Controller)
- 1 bloque de osciloscopio (Scope)
- 1 bloque de exportación de datos al espacio de trabajo (To Workspace)
- 1 bloque TresTanques_Lin_CL (representativo del modelo matemático linealizado de la planta)

El bloque TresTanques_Lin_CL fue creado íntegramente, y es la fiel representación del modelo matemático linealizado de la planta. Por lo tanto, el bloque creado es el siguiente:

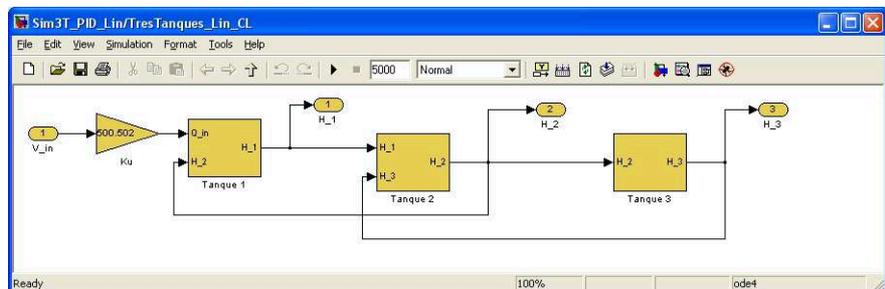


Figura 3.130. Bloque TresTanques_Lin_CL

El bloque TresTanques_Lin_CL está compuesto por los siguientes elementos:

- 1 puerto de entrada
- 3 puertos de salida
- 1 bloque de ganancia (K_U)
- 1 bloque Tanque 1 (representativo del modelo linealizado del primer tanque)
- 1 bloque Tanque 2 (representativo del modelo linealizado del segundo tanque)
- 1 bloque Tanque 3 (representativo del modelo linealizado del tercer tanque)

El puerto de entrada V_{in} recibe el valor del voltaje DC, producto de la operación del bloque controlador PID presente en el modelo.

Los puertos de salida de este bloque son:

- H1
- H2
- H3

El puerto H1 entrega al modelo el valor en centímetros, de la señal correspondiente a la altura de la columna de agua del

primer tanque. El puerto H2 entrega al modelo el valor en centímetros, de la señal correspondiente a la altura de la columna de agua del segundo tanque. El puerto H3 entrega al modelo el valor en centímetros, de la señal correspondiente a la altura de la columna de agua del tercer tanque.

Un bloque de ganancia, es un elemento que multiplica numéricamente una señal por un valor constante (ganancia).

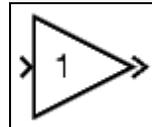


Figura 3.131. Bloque de Ganancia

El bloque de ganancia (K_U) presente en este modelo, contiene asignado el valor $500.502 [cm^3/(V \cdot sec)]$ para calcular el caudal de entrada de agua al primer tanque, según el valor del voltaje DC que ingresa al bloque TresTanques_Lin_CL, cuyo cálculo se lo detalla en el Anexo G.

El cálculo de los valores de las constantes c_1 , c_2 y c_3 , que se irán presentando a continuación, se lo detalla en el Anexo H.

El bloque Tanque 1 presente en este modelo, contiene la representación linealizada de la ecuación de la altura de la columna de agua del primer tanque.

Su ecuación es la siguiente:

$$h_1 = \frac{1}{L^2} \int [(K_U \cdot U) - (c_1 \cdot h_1) + (c_1 \cdot h_2)] dt$$

Ecuación 3.19. Función Linealizada de la Altura de la Columna de Agua del Primer Tanque [50]

Por lo tanto, la estructura interna del bloque Tanque 1 es la siguiente:

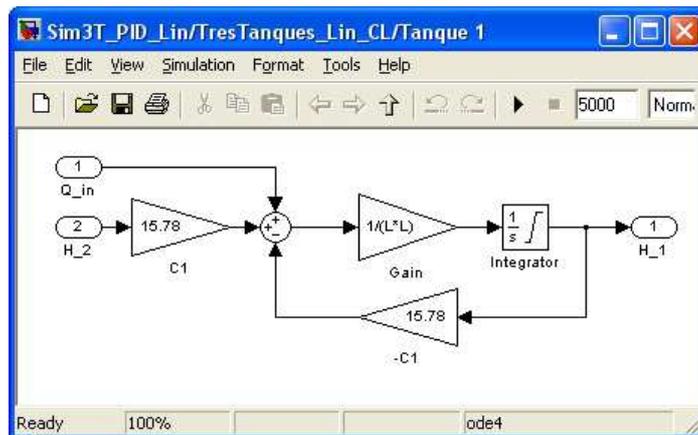


Figura 3.132. Estructura Interna del Bloque Tanque 1 Linealizado

El bloque Tanque 2 presente en este modelo, contiene la representación linealizada de la ecuación de la altura de la columna de agua del segundo tanque.

Su ecuación es la siguiente:

$$h_2 = \frac{1}{L^2} \int [(c_1 \cdot h_1) - (c_1 + c_2)h_2 + (c_2 \cdot h_3)] dt$$

Ecuación 3.20. Función Linealizada de la Altura de la Columna de Agua del Segundo Tanque [51]

Por lo tanto, la estructura interna del bloque Tanque 2 es la siguiente:

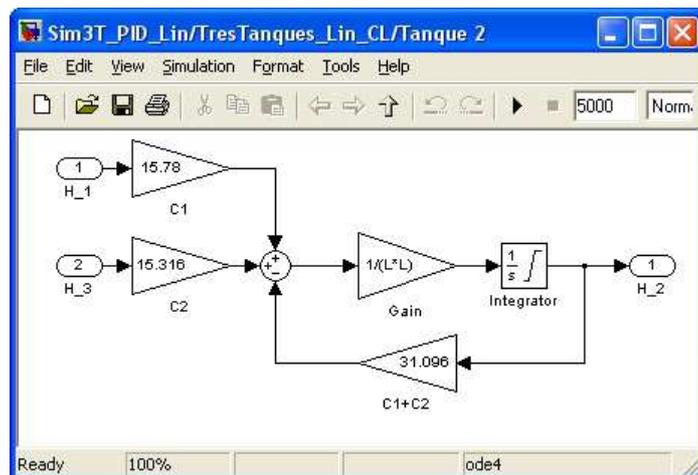


Figura 3.133. Estructura Interna del Bloque Tanque 2 Linealizado

El bloque Tanque 3 presente en este modelo, contiene la representación linealizada de la ecuación de la altura de la columna de agua del tercer tanque.

Su ecuación es la siguiente:

$$h_3 = \frac{1}{L^2} \int [(c_2 \cdot h_2) - (c_2 + c_3) h_3] dt$$

Ecuación 3.21. Función Linealizada de la Altura de la Columna de Agua del Tercer Tanque [52]

Por lo tanto, la estructura interna del bloque Tanque 3 es la siguiente:

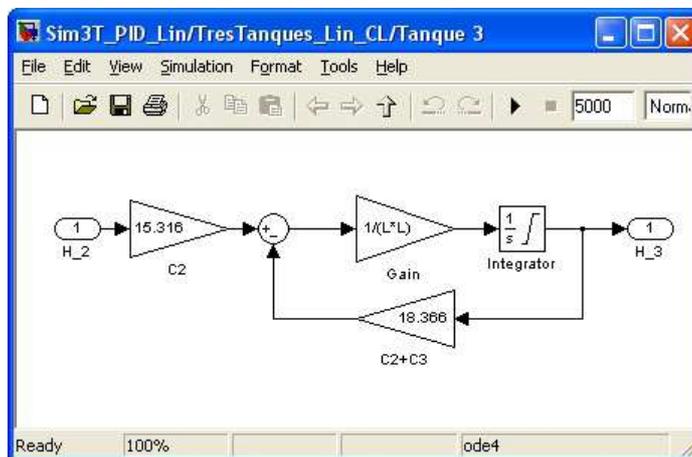


Figura 3.134. Estructura Interna del Bloque Tanque 3 Linealizado

El bloque de exportación de datos al ambiente de trabajo presente en este modelo, que lleva por nombre EntradaSalida4, se encarga de almacenar dentro del espacio de trabajo de MATLAB, en una variable con dicho nombre,

52 Kontinuierliche Modellbildung für ein DreitankeSystem: ABEL, D.; BOLLIG, A., Rapid Control Prototyping: Methoden und Anwendungen, Erste Auflage, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2006, p. 328

los valores de las señales de referencia y de salida del bloque TresTanques_Lin_CL, representativo del modelo matemático linealizado de la planta, agrupadas por el bloque multiplexor presente en el modelo.

A continuación se muestra el despliegue visual de las señales recibidas por el bloque de osciloscopio, que han sido generadas durante la ejecución de la simulación de este modelo:

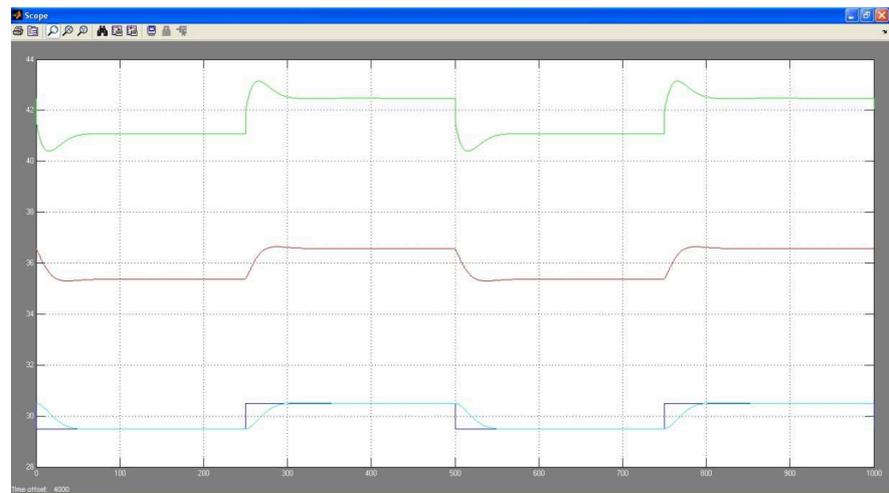


Figura 3.135. Vista de la Simulación sobre el Modelo Matemático Linealizado de la Planta

A continuación se muestra el ambiente de trabajo de MATLAB, posterior a la ejecución de la simulación de este modelo:

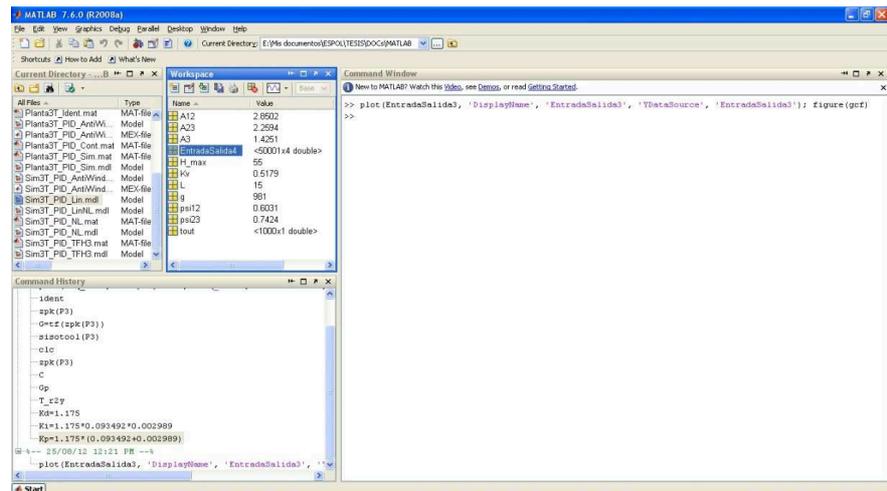


Figura 3.136. Ambiente de Trabajo de MATLAB posterior a la Simulación sobre el Modelo Matemático Linealizado de la Planta

Los resultados de la simulación almacenados en EntradaSalida4, son los siguientes:

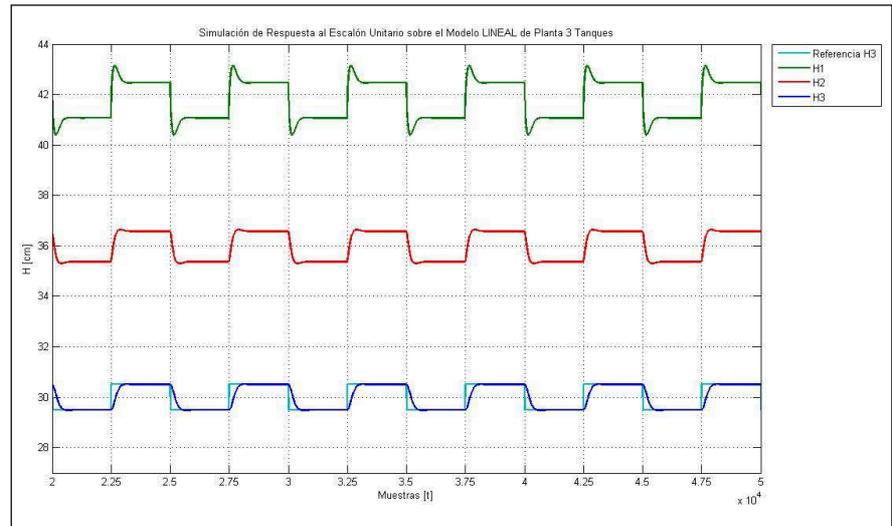


Figura 3.137. Resultados de la Simulación sobre el Modelo Matemático Linealizado de la Planta

Con el fin de analizar mejor los resultados de la simulación, la zona crítica es ampliada.

El resultado se muestra a continuación:

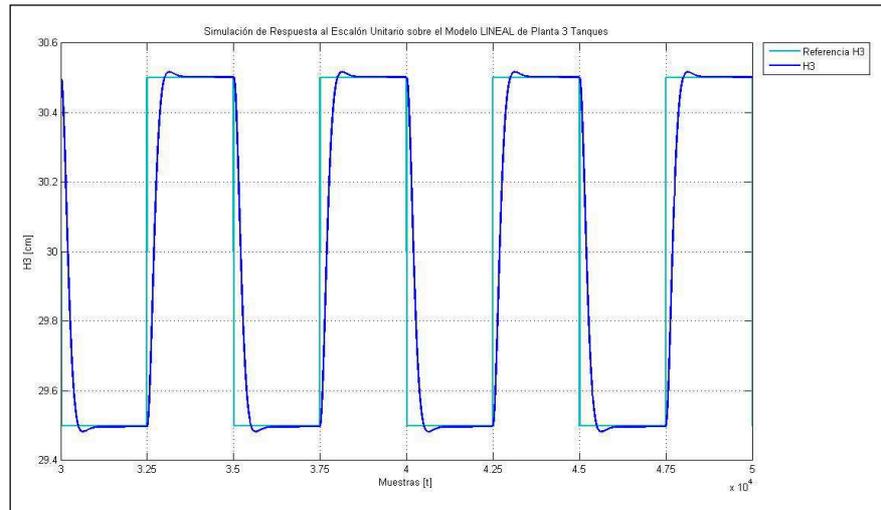


Figura 3.138. Vista Ampliada de los Resultados de la Simulación sobre el Modelo Matemático Linealizado de la Planta

Se puede observar que:

Se muestra de color azul la gráfica correspondiente a la señal de respuesta de la simulación sobre el modelo matemático linealizado del tercer tanque, a una señal de entrada de prueba de escalón unitario, y tal como se lo esperaba, también tiene características muy similares a la respuesta de un sistema de segundo orden con un controlador PID, descrita en la Sección 3.2.1.

Además, se muestra de color celeste la gráfica correspondiente a la señal de referencia, que representa a la señal de entrada de prueba ya mencionada.

El valor pico (máximo) que alcanza la señal de respuesta es de 30.517177[cm], por lo que el sobrenivel porcentual es del 1.7177%. El tiempo de estabilización es de 45.91[sec]. El valor final es 30.502317[cm], por lo que el error en estado estacionario es de 0.002317[cm] (también menor a una décima de milímetro), es decir, un error del 0.2317%.

Recordando las especificaciones de diseño del controlador, se construye la siguiente tabla para efectos de comparación:

| Valor | Sobrenivel porcentual | Tiempo de estabilización | Error en estado estacionario |
|---------------------|-----------------------|---------------------------|------------------------------|
| Deseado | $S.P. \leq 10\%$ | $T_s \leq 90[\text{sec}]$ | $e_{ss} = 0$ |
| Obtenido | $S.P. = 1.7177\%$ | $T_s = 45.91[\text{sec}]$ | $e_{ss} \approx 0$ |
| Cumplimiento | SÍ | SÍ | SÍ |

Tabla 3.7. Comparación de los Resultados de la Simulación sobre el Modelo Matemático Linealizado de la Planta

Después de comprobar que el nivel de cumplimiento de las especificaciones de diseño del controlador es del 100%, se

concluye que la simulación del controlador PID desarrollado sobre el modelo matemático linealizado de la planta ha sido exitosa.

Si bien el grado de confianza que brindan los resultados de dos o más simulaciones es usualmente suficiente para determinar que un controlador estaría trabajando sobre una planta real de acuerdo a lo esperado, en el caso particular del sistema Planta 3 Tanques, la exactitud de la respuesta se ve algo mermada, pudiendo llegar a comprometer ligeramente los resultados deseados, por los siguientes motivos:

El controlador fue desarrollado en un ambiente en el cual, el mayor grado de fidelidad de respuesta se da sobre sistemas de primer y segundo orden. El sistema Planta 3 Tanques es de tercer orden, por lo que la curva de respuesta simulada para un sistema de orden superior, es una aproximación.

El modelo matemático del sistema Planta 3 Tanques, se obtiene a partir de su modelo físico, en el que están involucradas constantes obtenidas experimentalmente, en

donde se introduce el error humano, aun cuando se tenga el mayor cuidado posible con todo lo relacionado a la realización del procedimiento.

La linealización de un modelo matemático, es un mecanismo para aproximar linealmente una función que representa a un sistema no lineal, alrededor de un punto dado. Aunque el resultado no se vea afectado de manera significativa, éste no es exacto, ya que durante este proceso se puede perder información, al tratarse de un método de aproximación.

En este punto, es preciso y altamente conveniente que se realice un análisis conjunto de los resultados obtenidos en las simulaciones, que permita decidir si es necesario ajustar alguno de los parámetros del controlador PID desarrollado, ya que teniendo en cuenta los motivos expuestos, la implementación del mismo sobre la planta se vuelve crítica, por los resultados reales que podrían obtenerse.

Con este fin, se realiza un conciso análisis estadístico de los resultados de las simulaciones, para lo cual se construye la siguiente tabla:

| Parámetro | Simulaciones | | | Análisis Estadístico | |
|-----------------|--------------------------|------------------|--------------------|----------------------|---------------------|
| | Función de Transferencia | Modelo No Lineal | Modelo Linealizado | Promedio | Desviación Estándar |
| Valor pico [cm] | 30.517222 | 30.515076 | 30.517177 | 30.516492 | 0.0010012 |
| S.P. | 1.7222% | 1.5076% | 1.7177% | 1.6492% | 0.10012% |
| T_s [sec] | 45.9 | 45.78 | 45.91 | 45.863333 | 0.0590668 |
| e_{ss} [cm] | 0.002324 | 0.001586 | 0.002317 | 0.002076 | 0.0003463 |
| Error | 0.2324% | 0.1586% | 0.2317% | 0.2076% | 0.03463% |

Tabla 3.8. Análisis Estadístico de los Resultados de las Simulaciones de Prueba

En Estadística y Teoría de la Probabilidad, la desviación estándar es una medida descriptiva del grado de dispersión de datos, que muestra cuánta variabilidad existe entre los valores de un conjunto de datos con respecto a su valor promedio.

Una desviación estándar baja, indica que los datos tienden a estar muy cerca del valor promedio, es decir que los datos estarán menos esparcidos. Una desviación estándar alta, indica que los datos se extienden sobre un gran rango de valores, es decir que los datos estarán más esparcidos.

La desviación estándar también puede ser interpretada como una medida de incertidumbre, que muestra la precisión de los

valores de un conjunto de datos, siendo este criterio el que más se ajusta al propósito del presente análisis [53] [54].

En la Tabla 3.8., se puede observar que:

La desviación estándar de los valores pico (máximos) de las simulaciones es de 0.0010012[cm], es decir que la variabilidad entre los tres valores es de prácticamente una milésima de centímetro.

La desviación estándar del tiempo de estabilización de las simulaciones es de 0.0590668[sec], es decir que la variabilidad entre los tres valores es de aproximadamente 59.1 milésimas de segundo. La variabilidad entre los tres valores del sobrenivel porcentual de las simulaciones es del 0.10012%. La desviación estándar del error en estado estacionario de las simulaciones es de 0.0003463[cm], es decir que la variabilidad entre los tres valores es menor a una

53 Desviación estándar: http://es.wikipedia.org/wiki/Desviaci3n_est3ndar, Fecha de consulta: Noviembre 2012

54 Standard deviation: http://en.wikipedia.org/wiki/Standard_deviation, Fecha de consulta: Noviembre 2012

milésima de centímetro. La variabilidad entre los tres valores del porcentaje de error de las simulaciones es del 0.03463%.

Al ser las variabilidades de los distintos parámetros tan pequeñas como se ha mostrado, significa que los datos casi no están esparcidos y que se encuentran muy cerca alrededor del promedio, por lo que la precisión de los mismos es muy alta ya que el grado de dispersión es mínimo, teniendo en cuenta que son resultados de tres simulaciones diferentes. Esto quiere decir que:

Los modelos creados en SIMULINK para realizar las simulaciones de prueba, son representaciones muy sólidas del sistema Planta 3 Tanques, por la calidad de respuesta obtenida. Los resultados de las simulaciones son altamente confiables, por ser tan similares entre los tres modelos probados.

Este análisis permite concluir que no es necesario realizar ajuste alguno en ningún parámetro del controlador PID desarrollado, y que puede ser implementado sobre el sistema Planta 3 Tanques con toda seguridad.

Pero uno de los problemas indeseables más comunes, y que a menudo son descuidados en el control por retroalimentación, son los efectos de la saturación (Wind-Up).

La saturación se define como la situación en la que un controlador por realimentación, supera los límites máximos del actuador del sistema, y no es capaz de responder instantáneamente a los cambios en el error de control. Y el tipo de saturación más común que tiene lugar en los controladores PID, es la saturación del término integral (Integral Wind-Up) [55].

La saturación del término integral en un controlador PID, se relaciona con la situación en la que se produce un cambio en el valor de la referencia, y el término integral acumula un error significativamente grande mientras el sistema responde.

Si la tasa de integración es mayor que la velocidad real del sistema, la salida del término integral puede exceder el límite de saturación del actuador, por lo que éste funcionaría en su límite, sin importar lo que ocurra a la salida del sistema,

55 Integrator Windup: <http://controls.engin.umich.edu/wiki/index.php/PIDDownsides>,
Fecha de consulta: Enero 2013

pudiendo producir un sobrenivel porcentual mayor al deseado y que demora más de lo esperado en corregirse, un error en estado estacionario diferente de cero, o un retraso en la acción de control.

El error se seguirá integrando, haciendo que su acumulación continúe, y el término integral crecerá en tamaño hasta saturarse, en la medida que el error no sea liberado, lo cual ocurre cuando la salida del sistema finalmente alcanza el valor deseado y el signo del error se invierte, haciendo que el término integral se compense hasta que la situación vuelva a la normalidad.

Mientras la compensación del término integral ocurre, la señal de control todavía es máxima durante un periodo de tiempo, retrasando su respuesta, por lo que el término integral demora en recuperarse completamente hasta llegar a su rango normal de funcionamiento.

Esta situación también podría darse por una respuesta excesivamente oscilatoria, por un sobrenivel porcentual originalmente muy elevado, o por una ineficiente corrección

del error en estado estacionario: son escenarios que fácilmente contribuirían con la acumulación del error y el consiguiente aumento del término integral, que finalmente derivaría en su saturación.

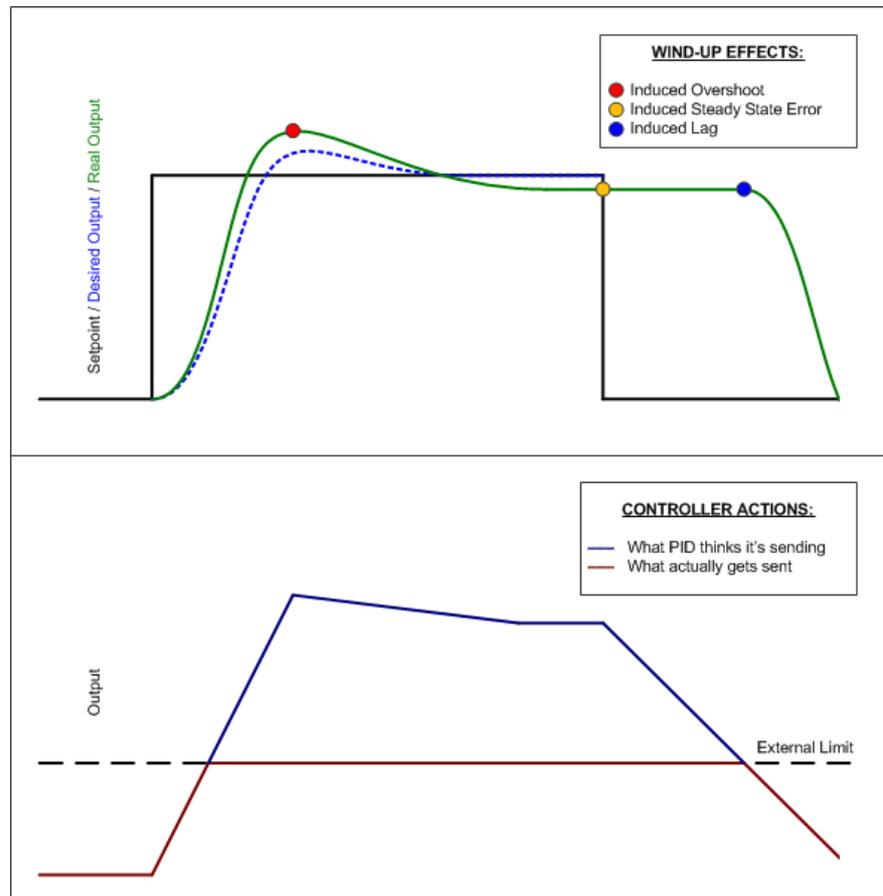


Figura 3.139. Ilustración de los Efectos de la Saturación y las Acciones del Controlador [56]

56 <http://brettbeauregard.com/blog/2011/04/improving-the-beginners-pid-introduction/improving-the-beginner's-pid-reset-windup>, Fecha de consulta: Enero 2013

Este problema se puede abordar por:

- Inicialización del término integral con un valor deseado.
- Incremento progresivo manual o automático del valor de referencia con una adecuada especie de señal rampa.
- Desactivación de la función integral hasta que la variable del proceso a ser controlado haya entrado en la región controlable.
- Prevención de que el término integral acumule por encima o por debajo de límites preestablecidos [57].

Teniendo presentes todas estas consideraciones, el modelo que se creará para la implementación del controlador PID desarrollado sobre el sistema Planta 3 Tanques, incluirá la modificación de la sección correspondiente al controlador, como un significativo ajuste del mismo, en el que se añadirá una etapa “Anti Wind-Up” para evitar que se presente el problema de la saturación del término integral.

El enfoque a utilizar será el de prevenir que el término integral acumule por encima o por debajo de ciertos límites

57 Integral windup: http://en.wikipedia.org/wiki/Integral_windup, Fecha de consulta: Enero 2013

que se preestablecerán para desactivar la función integral hasta que la variable del proceso que es controlada (H3), haya entrado en una región considerada como controlable. Su detalle será descrito más adelante en esta sección.

Una vez que se ha demostrado que la implementación del controlador PID desarrollado sobre el sistema Planta 3 Tanques puede ser realizada de manera segura, el siguiente paso es crear un modelo para llevar a cabo este procedimiento. El modelo creado es el siguiente:

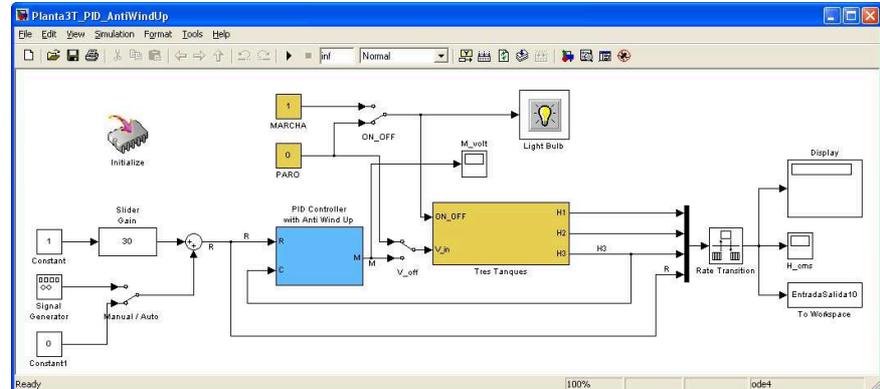


Figura 3.140. Modelo para la Implementación del Controlador PID Desarrollado sobre la Planta

Se pueden apreciar los siguientes elementos presentes:

- 1 bloque de inicialización (Initialize)
- 4 bloques de constantes
- 1 bloque de suma
- 1 bloque indicador visual (Light Bulb)
- 1 bloque multiplexor
- 1 bloque de transición de tasa de muestreo (Rate Transition)
- 1 bloque de ganancia variable (Slider Gain)
- 1 bloque generador de señales (Signal Generator)
- 1 bloque controlador PID con Anti Wind-Up (PID Controller with Anti Wind Up)
- 3 bloques conmutadores de señal
- 1 bloque de visualización (Display)
- 2 bloques de osciloscopio (M_volt; H_cms)
- 1 bloque de exportación de datos al espacio de trabajo (To Workspace)
- 1 bloque Tres Tanques (representativo de la planta)

El bloque de inicialización presente en este modelo, asigna los valores de las constantes involucradas en el bloque controlador PID con Anti Wind-Up.

A continuación se muestra la interfaz de parámetros del bloque de inicialización de este modelo:

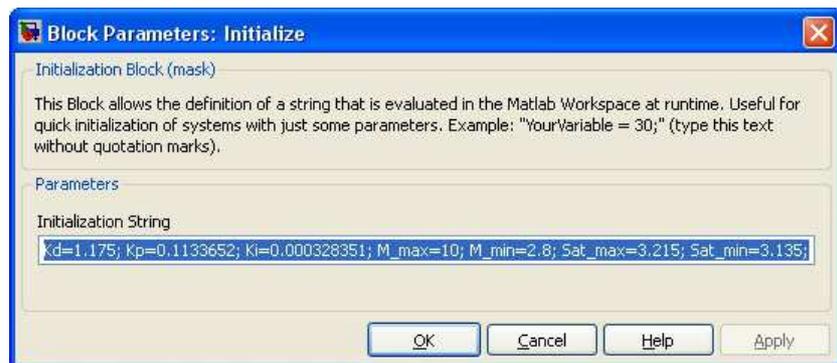


Figura 3.141. Interfaz de Parámetros del Bloque de Inicialización del Modelo para la Implementación del Controlador PID Desarrollado sobre la Planta

Se puede observar que los valores a asignar, corresponden a las siguientes constantes:

- $K_D=1.175$ (K_d)
- $K_P=0.1133652$ (K_p)
- $K_I=0.000328351$ (K_i)
- $M_{\max}=10[V]_{DC}$ (M_{\max})
- $M_{\min}=2.8[V]_{DC}$ (M_{\min})
- $Sat_{\max}=3.215[V]_{DC}$ (Sat_{\max})
- $Sat_{\min}=3.135[V]_{DC}$ (Sat_{\min})

El bloque controlador PID con Anti Wind-Up fue creado íntegramente, y es la fiel representación del controlador PID desarrollado, compuesto prácticamente de la misma manera que la estructura interna del bloque controlador PID mostrado previamente en esta sección, pero a la que se ha añadido una etapa “Anti Wind-Up” para evitar que se presente el problema de la saturación del término integral.

El bloque creado es el siguiente:

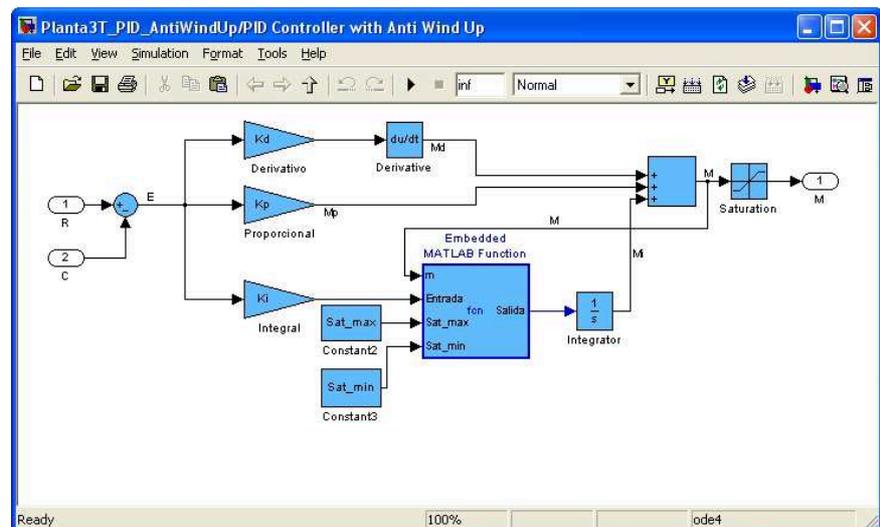


Figura 3.142. Bloque Controlador PID con Anti Wind-Up [58]

58 Proportional-Integral Regelung: HÖFER, THOMAS, “Vergleich höherer Regelungsverfahren am Beispiel einer Mehrgrößenregelung” (Diplomarbeit, Institut für Mensch-Maschine-Interaktion, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2009), p. 11

Se pueden apreciar los siguientes elementos presentes:

- 2 puertos de entrada
- 1 puerto de salida
- 2 bloques de suma
- 3 bloques de ganancia (Derivativo; Proporcional; Integral)
- 2 bloques de constantes
- 1 bloque de función embebida de MATLAB (Embedded MATLAB Function)
- 1 bloque derivativo (Derivative)
- 1 bloque integrador (Integrator)
- 1 bloque de saturación (Saturation)

Los puertos de entrada de este bloque son:

- R
- C

El puerto R recibe el valor en centímetros, de la señal de referencia fija o variable del modelo, según la posición en que se encuentre el selector Manual/Auto en el mismo.

El puerto C recibe el valor en centímetros, de la señal correspondiente a la altura de la columna de agua del tercer tanque (H3). El puerto de salida M entrega al modelo la magnitud del voltaje DC que se aplica al variador de frecuencia por medio del bloque Tres Tanques, como resultado de la acción operativa del controlador PID desarrollado con Anti Wind-Up.

Los bloques de ganancia presentes en este modelo son:

- Derivativo
- Proporcional
- Integral

El bloque de ganancia Derivativo, contiene asignado el valor “Kd” (1.175), definido en el bloque de inicialización de este modelo.

El bloque de ganancia Proporcional, contiene asignado el valor “Kp” (0.1133652), también definido en el bloque de inicialización de este modelo. El bloque de ganancia Integral,

contiene asignado el valor “Ki” (0.000328351), también definido en el bloque de inicialización de este modelo.

Las constantes presentes en este modelo son:

- Constant2
- Constant3

La constante Constant2, contiene asignado el valor “Sat_max” (3.215[V]_{DC}), definido en el bloque de inicialización de este modelo. La constante Constant3, contiene asignado el valor “Sat_min” (3.135[V]_{DC}), también definido en el bloque de inicialización de este modelo. Ambas constantes son parte funcional de la etapa “Anti Wind-Up” del controlador PID desarrollado.

Un bloque de función embebida de MATLAB, es un elemento que permite crear una función de MATLAB dentro de un modelo de SIMULINK.

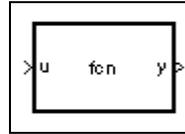


Figura 3.143. Bloque de Función Embebida de MATLAB

El bloque de función embebida de MATLAB presente en este modelo, contiene el código que se constituye en la etapa “Anti Wind-Up” del controlador PID desarrollado.

Tal como se lo anticipó previamente en esta sección, su trabajo consistirá en prevenir que el término integral acumule por encima o por debajo de ciertos límites preestablecidos, desactivando la función integral hasta que la variable del proceso que es controlada (C), haya entrado en la región controlable.

A continuación se muestra el código de la función embebida de MATLAB, para la implementación de la etapa “Anti Wind-Up” del controlador PID desarrollado:

```

function Salida = fcn ( m , Entrada , Sat_max , Sat_min )
% La señal del controlador se encuentra fuera del rango
if m >= Sat_max || m <= Sat_min
Salida = 0;
else
Salida = Entrada ;
end

```

Figura 3.144. Código para la Etapa “Anti Wind-Up” del Controlador PID Desarrollado [59]

La acción “Anti Wind-Up” compara la señal de salida M del controlador PID desarrollado, representada en la función por “m”, contra los valores prestablecidos de “Sat_max” y “Sat_min”, que establecen la región controlable.

Si la señal del controlador PID desarrollado se encuentra fuera del rango, la señal de salida del bloque de la función embebida “Salida”, toma el valor de 0 (cero), desactivando la función integral.

De lo contrario, la salida M del controlador PID desarrollado y la variable del proceso que es controlada (C), se encuentran dentro del rango controlable, y la señal de salida del bloque de la función embebida “Salida”, toma el valor de la señal

59 Proportional-Integral Regelung: HÖFER, THOMAS, “Vergleich höherer Regelungsverfahren am Beispiel einer Mehrgrößenregelung” (Diplomarbeit, Institut für Mensch-Maschine-Interaktion, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2009), p. 11

proveniente del término integral del controlador PID desarrollado, representada en la función por “Entrada”, activando la función integral.

Para determinar los valores que establecen la región controlable, se realizó un estudio del voltaje DC que se aplica al variador de frecuencia para propósitos de funcionamiento de la bomba de agua, durante algunos ciclos de trabajo de las pruebas realizadas con el controlador PID desarrollado con Anti Wind-Up e implementado sobre el sistema Planta 3 Tanques. Para esto, se capturaron 4233 datos que se encuentran dentro de un rango de $2.975[V]_{DC}$ a $3.385[V]_{DC}$ (410 milivotos), y fueron tabulados para obtener un histograma. El resultado se muestra a continuación:

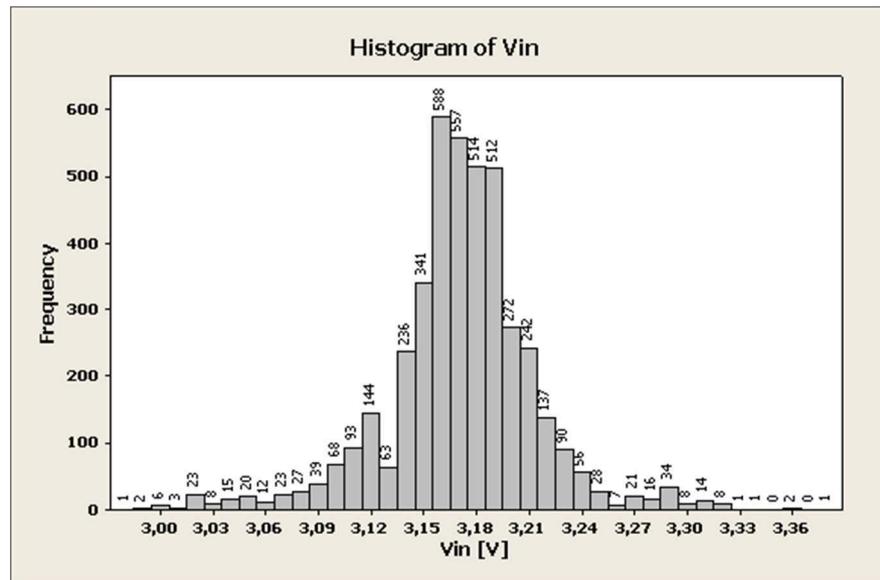


Figura 3.145. Histograma del Voltaje DC que se aplica al Variador de Frecuencia

Se puede observar que:

Los datos capturados se agrupan predominantemente alrededor del punto de operación de la planta (3.175[V]_{DC}).

La cantidad de datos capturados es mucho menor con respecto al punto de operación de la planta, conforme se alejan del centro del histograma, ya sea positivamente (hacia la derecha) o negativamente (hacia la izquierda).

Estas conclusiones, además de la evidencia visual que proporciona el histograma, muestran una clara tendencia hacia lo que sería la región controlable del sistema Planta 3 Tanques.

Con el fin de confirmar esta tendencia y establecer definitivamente la región controlable, se analizará la zona central del histograma, que aparentemente agrupa la mayor cantidad de los datos capturados.

Para esto, se construye la siguiente distribución de frecuencias, a partir del histograma obtenido:

| Rango Vin [V]_{DC} | Frecuencia (# de muestras) | Frecuencia acumulada |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| 3.135 – 3.145 | 236 | 5.58% |
| 3.145 – 3.155 | 341 | 13.63% |
| 3.155 – 3.165 | 588 | 27.52% |
| 3.165 – 3.175 | 557 | 40.68% |
| 3.175 – 3.185 | 514 | 52.82% |
| 3.185 – 3.195 | 512 | 64.92% |
| 3.195 – 3.205 | 272 | 71.34% |
| 3.205 – 3.215 | 242 | 77.06% |

Tabla 3.9. Distribución de Frecuencias del Voltaje DC aplicado al Variador de Frecuencia

Se puede observar que:

Más del 75% de los datos capturados (77.06%), se encuentran agrupados en un rango de $\pm 0.040[V]_{DC}$, es decir, 40 milivoltios alrededor del punto de operación de la planta (19.51% del histograma, es decir, casi el 20% del mismo).

Menos del 25% de los datos capturados (apenas un 22.94%), se encuentran agrupados en el rango restante del histograma, que abarca 330 milivoltios (80.49% del histograma, es decir, ligeramente más del 80% del mismo).

Esto es consistente con el Principio o Ley de Pareto, también conocida como la regla del 80-20, que establece que, para muchos eventos, aproximadamente el 80% de los efectos provienen del 20% de las causas.

Con estos resultados, se establece contundentemente que la región controlable dentro de la cual se activará la función integral del controlador PID desarrollado con Anti Wind-Up, es el rango del voltaje comprendido entre $3.135[V]_{DC}$ (Sat_max) y $3.215[V]_{DC}$ (Sat_min).

Un bloque derivativo, es un elemento que calcula la derivada con respecto al tiempo de la señal que recibe.

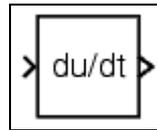


Figura 3.146. Bloque Derivativo

El bloque derivativo presente en este modelo, calcula la derivada con respecto al tiempo de la multiplicación del error actuante del sistema por la constante derivativa del controlador PID desarrollado, para obtener el valor del término derivativo del mismo, y con él, su correspondiente colaboración en la acción de control sobre el sistema Planta 3 Tanques.

Un bloque integrador, es un elemento que calcula la integral o el área bajo la curva de la función de la señal que recibe.

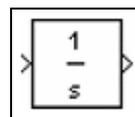


Figura 3.147. Bloque Integrador

El bloque integrador presente en este modelo, calcula la integral con respecto al tiempo de la multiplicación del error actuante del sistema por la constante integral del controlador PID desarrollado, para obtener el valor del término integral del mismo, y con él, su correspondiente colaboración en la acción de control sobre el sistema Planta 3 Tanques.

En este punto, es necesario tener presente que el funcionamiento de este bloque depende del estado de la acción "Anti Wind-Up", descrita previamente en esta sección.

Un bloque de saturación, es un elemento que impone límites (superior e inferior) a una señal. Cuando la señal de entrada se encuentra dentro del intervalo especificado por los parámetros de los límites superior e inferior, ésta pasa a través del bloque sin sufrir cambios.

Cuando la señal de entrada se encuentra fuera de los límites especificados, ésta se recorta en el valor de los límites superior o inferior, según sea el caso.

Cuando los parámetros de los límites superior e inferior se establecen en el mismo valor, el bloque fija la salida de la señal en dicho valor [60].

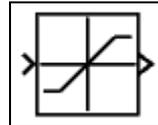


Figura 3.148. Bloque de Saturación

El bloque de saturación presente en este modelo, se encarga de definir un rango de valores de voltaje DC a ser aplicado al variador de frecuencia, para impedir que la bomba de agua caiga en zonas de trabajo críticas. Se determinó experimentalmente que al aplicar un voltaje menor a $2.79[V]_{DC}$ al variador del frecuencia, la bomba de agua no tiene la potencia suficiente para impulsar el agua desde el tanque reservorio, por lo que no tiene sentido trabajar con valores inferiores a este voltaje. A continuación se muestra la interfaz de parámetros del bloque de saturación de este modelo:

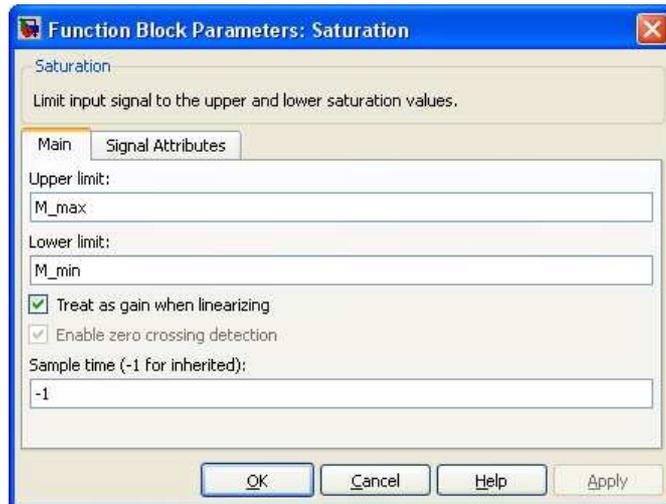


Figura 3.149. Interfaz de Parámetros del Bloque de Saturación

Para este caso, se asume que las unidades están en Voltios DC.

Se puede observar que:

El límite superior, se ha establecido en “M_max” (10[V]_{DC}), definido en el bloque de inicialización de este modelo. El límite inferior, se ha establecido en “M_min” (2.8[V]_{DC}), también definido en el bloque de inicialización de este modelo.

Con estos valores, se evita que la bomba de agua entre en una zona de trabajo donde su potencia es insuficiente por debajo del límite inferior, y también que se intente enviar un voltaje por encima del límite superior, que es el valor máximo del rango de voltaje a ser aplicado al variador de frecuencia desde el cFP, tal como se lo configuró en el Capítulo 1.

Los demás campos contienen los valores por defecto del bloque, y no son de gran relevancia para este modelo.

El conmutador V_{off} , permite el cambio entre la señal de salida M del controlador PID desarrollado con Anti Wind-Up, y la constante PARO, equivalente en este caso a una señal de $0[V]_{\text{DC}}$, con el fin de permitir que durante el procedimiento para detener el funcionamiento de la planta, el valor del voltaje DC a ser escrito en el canal del cFP que se envía y aplica al variador de frecuencia, sea de $0[V]_{\text{DC}}$, y así evitar que quede registrado el valor de $2.8[V]_{\text{DC}}$ en el cFP, debido al límite inferior del bloque de saturación presente en este modelo.

Un bloque de visualización, es un elemento que muestra en su ícono, el valor instantáneo de la señal que recibe.

Dado que este bloque posee sólo un puerto de entrada, es necesaria la inclusión de un bloque multiplexor para la agrupación de varias señales, que permita la correcta visualización de las mismas, en el caso que así lo requiera.

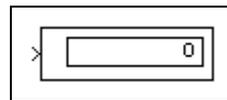


Figura 3.150. Bloque de Visualización

El bloque de visualización presente en este modelo, muestra los valores instantáneos de cuatro señales: la señal de referencia, y las tres señales de la altura de la columna de agua de cada tanque, provenientes del bloque Tres Tanques, agrupadas por el bloque multiplexor presente en el modelo.

Los demás bloques de este modelo, son exactamente iguales y cumplen las mismas funciones que los bloques descritos en la Sección 3.1. De igual manera, los parámetros

de simulación son exactamente iguales a los descritos en dicha sección.

En estas condiciones, cuando la planta se estabiliza al trabajar en el nivel de referencia elegido (30[cm]), y con el arreglo de las aperturas de las válvulas descrito en el Capítulo 1, la altura de la columna de agua del primer tanque, que tiene la entrada desde la bomba de agua, y que siempre tiene la columna de agua más alta, es de 39.27[cm].

La altura de la columna de agua del tercer tanque, que siempre tiene la columna de agua más baja, es de 29.96[cm].

La altura de la columna de agua del tanque intermedio, que tiene alrededor del promedio de la altura de las columnas de agua de los dos tanques ya citados, es de 34.73[cm].

Esto hace que la diferencia de alturas de las columnas de agua entre el primer y segundo tanque sea de 4.54[cm], y entre el segundo y tercer tanque de 4.77[cm], que se alcanzan cuando la planta entra en estado estable.

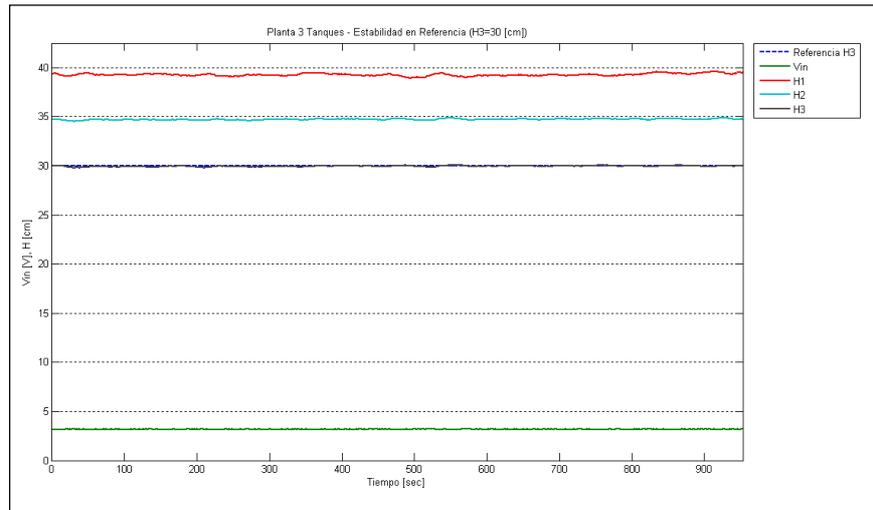


Figura 3.151. Estado Estable de la Altura de las Columnas de Agua en el Nivel de Referencia

Si se comparan estos resultados contra los obtenidos durante la adquisición de datos, se obtiene la siguiente tabla:

| Etapas/Cálculo | H1 | H2 | H3 |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Adquisición de Datos | 39.6[cm] | 34.8[cm] | 30[cm] |
| Implementación del Controlador | 39.27[cm] | 34.73[cm] | 29.96[cm] |
| Promedio | 39.44[cm] | 34.77[cm] | 29.98[cm] |
| Diferencia | 0.33[cm] | 0.07[cm] | 0.04[cm] |
| Error | 0.8326% | 0.2115% | 0.1529% |

Tabla 3.10. Comparación de la Operación de la Planta en Estado Estable

Se puede observar que:

Los resultados obtenidos son muy similares, con errores menores al 1%, especialmente en el segundo y tercer tanque, donde la diferencia es menor a un milímetro para ambos casos.

El primer tanque, que tiene la entrada desde la bomba de agua, es el que refleja mayor diferencia por la acción del controlador PID desarrollado con Anti Wind-Up e implementado sobre el sistema Planta 3 Tanques, que opera para mantener la altura de la columna de agua del tercer tanque el nivel de referencia elegido.

El tercer tanque es el que refleja menor diferencia al ser el que está más alejado de la entrada desde la bomba de agua, por lo que los cambios se reflejan con menor impacto y más lentamente que los otros tanques.

Dados los valores promedio de las alturas de la columna de agua en los tanques, éstas ocupan un volumen de 23450[cm³] de agua, equivalente al 6.25% de la capacidad

del reservorio. Esto significa una variación de 4.69[cm] del nivel de agua del mismo, lo cual es consistente con lo planteado en el Capítulo 1: que el régimen de trabajo de la bomba sea prácticamente constante, y con ello, que la función de transferencia de la planta no cambie dentro del rango de trabajo establecido.

Con esto se procede a realizar pruebas del controlador PID desarrollado con Anti Wind-Up e implementado sobre el sistema Planta 3 Tanques, utilizando el modelo creado para este propósito.

CAPÍTULO 4

4. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL CONTROLADOR IMPLEMENTADO SOBRE LA PLANTA

4.1. Pruebas y Ajustes del Controlador sobre la Planta

Una vez que se ejecuta la simulación del modelo creado para la implementación del controlador PID desarrollado sobre el sistema Planta 3 Tanques, los datos adquiridos se almacenan en una variable dentro del espacio de trabajo de MATLAB, provenientes desde el bloque de osciloscopio presente en el modelo. A esta variable se la ha denominado Salida_ContReal.

En la Figura 4.1 se muestra el ambiente de trabajo de MATLAB, posterior a la ejecución de la simulación de dicho modelo.

Los resultados de la implementación del controlador PID desarrollado sobre el sistema Planta 3 Tanques, almacenados en la variable Salida_ContReal, son los mostrados en la Figura 4.2.

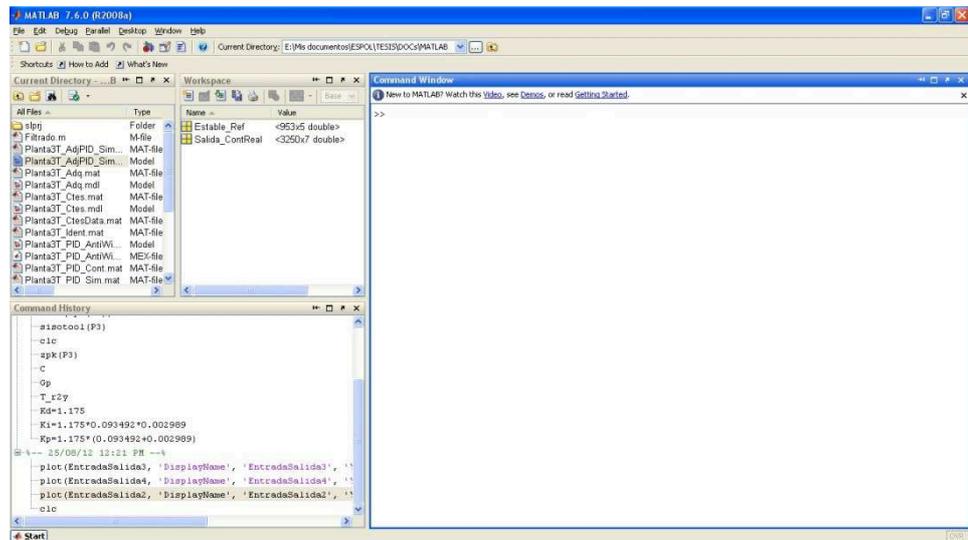


Figura 4.1. Ambiente de Trabajo de MATLAB posterior a la Implementación del Controlador PID Desarrollado sobre la Planta

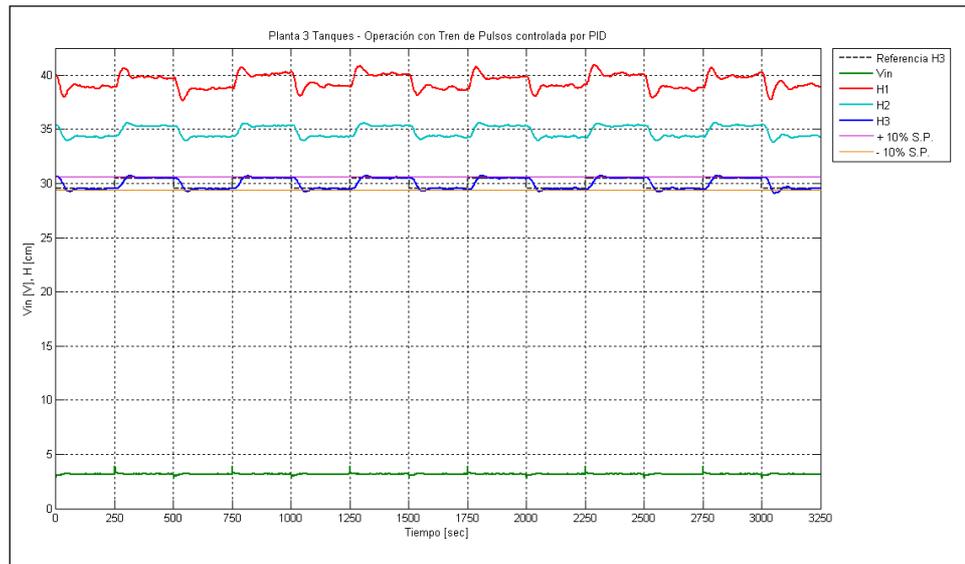


Figura 4.2. Resultados de la Implementación del Controlador PID Desarrollado sobre la Planta

Se puede observar que:

Los resultados obtenidos son muy similares a aquellos de las simulaciones de prueba sobre los modelos matemáticos no lineal y linealizado de la planta, realizadas en el Capítulo 3.2.2., ya que las formas de onda de las señales de la altura de las columnas de agua, siguen exactamente el mismo patrón observado en dichas simulaciones.

Para su consiguiente estudio, en la gráfica se han añadido los límites del sobrenivel porcentual de la señal de respuesta. Éste se desea menor o igual al 10%, según las especificaciones de diseño del controlador PID definidas en el Capítulo 3.2.

Dado que la señal de referencia tiene una variación equivalente a una señal de tipo escalón unitario, entonces los límites del sobrenivel porcentual son:

$$\text{LímiteSuperiorSP} = [30.5 + (1 \times 10\%)] [cm]$$

$$\text{LímiteSuperiorSP} = (30.5 + 0.1) [cm]$$

$$\text{LímiteSuperiorSP} = 30.6 [cm]$$

$$\text{LímiteInferiorSP} = [29.5 - (1 \times 10\%)] [cm]$$

$$\text{LímiteInferiorSP} = (29.5 - 0.1) [cm]$$

$$\text{LímiteInferiorSP} = 29.4 [cm]$$

Con el fin de analizar mejor los resultados de la implementación del controlador PID desarrollado sobre el sistema Planta 3 Tanques, la zona crítica es ampliada.

El resultado se muestra a continuación:

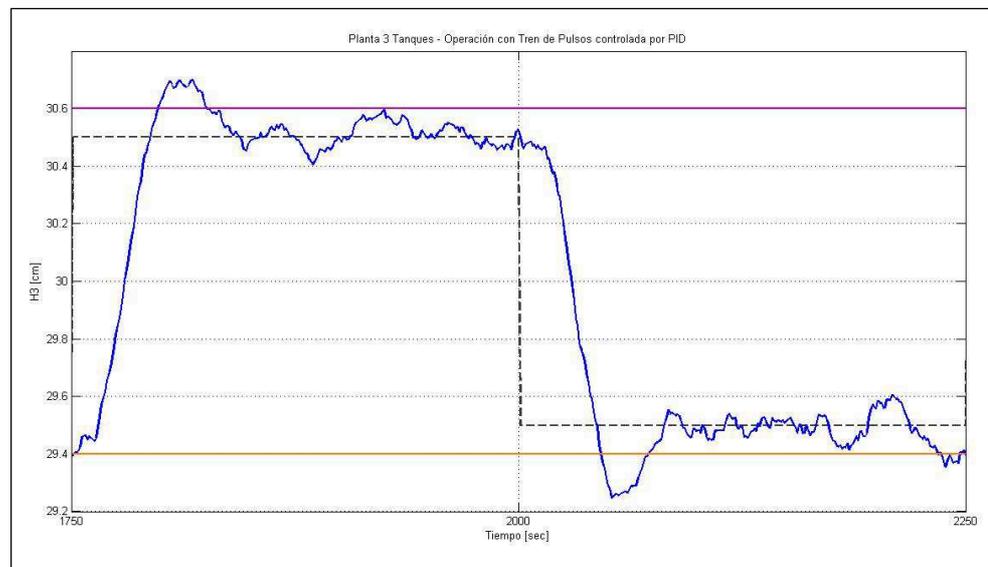


Figura 4.3. Vista Ampliada de los Resultados de la Implementación del Controlador PID Desarrollado sobre la Planta

Se puede observar que:

Se muestra de color azul la gráfica correspondiente a la señal de respuesta de la altura de la columna de agua del tercer tanque, a una señal de referencia de tipo escalón unitario, producto de la acción de control debido a la implementación del controlador PID desarrollado sobre el sistema Planta 3 Tanques, y tal como se lo esperaba, tiene características muy similares a la respuesta de un sistema de segundo orden con un controlador PID, descrita en el Capítulo 3.2.

También se muestran: de color morado, la recta del límite superior del 10% de sobrenivel porcentual (30.6[cm]); y de color anaranjado, la recta del límite inferior del 10% de sobrenivel porcentual (29.4[cm]).

Además, se muestra de color negro la línea punteada correspondiente a la señal de referencia mencionada.

El valor pico (máximo) que alcanza la señal de respuesta es de 30.698125[cm], por lo que el sobrenivel porcentual es del 19.8125%. El tiempo de estabilización es de 94[sec]. El valor final es 30.504787[cm], por lo que el error en estado estacionario es de

0.004787[cm] (menor a una décima de milímetro), es decir, un error del 0.4787%.

Recordando las especificaciones de diseño del controlador, se construye la siguiente tabla para efectos de comparación:

| Valor | Sobrenivel porcentual | Tiempo de estabilización | Error en estado estacionario |
|---------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| Deseado | $S.P. \leq 10\%$ | $T_s \leq 90[\text{sec}]$ | $e_{ss} = 0$ |
| Obtenido | $S.P. = 19.8125\%$ | $T_s = 94[\text{sec}]$ | $e_{ss} \approx 0$ |
| Cumplimiento | NO | NO | SÍ |

Tabla 4.1. Comparación de los Resultados de la Implementación del Controlador PID Desarrollado sobre la Planta

Después de comprobar que el nivel de cumplimiento de las especificaciones de diseño del controlador no es del 100%, se concluye que es necesario el ajuste de uno o algunos parámetros del controlador PID desarrollado e implementado sobre el sistema Planta 3 Tanques.

Existen numerosos métodos para el ajuste de controladores PID, como por ejemplo, entre otros, los siguientes:

- Método Manual de Prueba y Error
- Métodos de Zieger-Nichols
- Método de Cohen-Coon
- Método de Tyreus-Luyben
- Método de Control por Modelo Interno (IMC)
- Método de los Márgenes de Ganancia y Fase
- Método de los Índices de Comportamiento
- Método de Åström/Schei
- Métodos por Computadora (Herramientas de Ajuste por Software)

Todos los métodos citados, tienen naturalmente: ventajas y desventajas, facilidad de comprensión de los criterios utilizados para su desarrollo, condiciones óptimas de aplicación, grado de dificultad de la matemática involucrada, nivel de complejidad de implementación, calidad de respuesta, entre otras características.

Y aunque se puede apreciar que la gama de métodos para el ajuste de controladores PID es muy amplia, en este Proyecto de Graduación se eligió el Método Manual de Prueba y Error para ajustar el controlador PID desarrollado e implementado sobre el

sistema Planta 3 Tanques, y lograr el cumplimiento de todas las especificaciones de diseño establecidas.

El Método Manual de Prueba y Error, consiste en variar los valores de los parámetros K_p , K_I y K_D de un controlador PID, y observar la señal de respuesta de un sistema después de cada variación realizada, para comprobar su efectividad. Este procedimiento se repite tantas veces como sean necesarias, hasta obtener la señal de respuesta deseada, según las especificaciones de diseño del controlador.

Para lograr que en cada iteración, la señal de respuesta muestre cambios significativos, que representen una mejora y no un resultado totalmente indeseado, es muy recomendado que la variación de los valores sea gradual y apropiada, es decir, que esté de acuerdo al valor original del parámetro: variaciones muy pequeñas para valores pequeños, casi no van a causar efecto sobre valores grandes; y variaciones grandes para valores muy grandes, van a causar un efecto exagerado sobre valores pequeños.

La guía para determinar cuáles parámetros deben ser ajustados, la proporciona la siguiente tabla, que muestra los efectos de

incrementar de manera independiente cada uno de los parámetros de un controlador PID:

| Parámetro | Respuesta de Lazo Cerrado | | | | |
|-----------|---------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------------|-------------|
| | Tiempo de subida | Sobrenivel porcentual | Tiempo de estabilización | Error en estado estacionario | Estabilidad |
| K_p | Disminuye | Aumenta | Aumenta ligeramente | Disminuye | Degrada |
| K_I | Disminuye ligeramente | Aumenta | Aumenta | Disminuye considerablemente | Degrada |
| K_D | Disminuye ligeramente | Disminuye | Disminuye | Cambio no significativo | Mejora |

Tabla 4.2. Efectos del Incremento Independiente de los Parámetros de un Controlador PID [61]

En la Tabla 4.1., se puede observar que:

El sobrenivel porcentual es la especificación más crítica a ser corregida, ya que prácticamente, es el doble del valor deseado.

El tiempo de estabilización excede en 4 segundos al valor deseado, y si bien se trata de un valor pequeño, también es una especificación a corregir, aunque su condición sea mucho menos crítica que la del sobrenivel porcentual.

Con base en lo expuesto, y según la información que provee la Tabla 4.2., se puede inferir que:

El parámetro K_p no debería ser ajustado.

El parámetro K_I tampoco debería ser ajustado.

El parámetro K_D debe ser ajustado significativamente para disminuir el sobrenivel porcentual y el tiempo de estabilización, con el fin de obtener la señal de respuesta deseada, según las especificaciones de diseño del controlador PID.

Con esto se procedió a realizar el ajuste del controlador PID desarrollado, usando el método elegido para este propósito.

Los resultados son los siguientes:

- $K_p = 0.12$

- $K_I = 0.000341$

- $K_D = 1.935$

Los valores mostrados, son los mejores que se obtuvieron después de realizar varias pruebas, propias del método, con el fin de lograr su calidad de definitivos.

Recordando los valores originales de los parámetros del controlador PID desarrollado, se construye la siguiente tabla para efectos de comparación:

| Controlador/Cálculo | K_P | K_I | K_D |
|----------------------------|-----------|-------------|--------|
| PID Original | 0.1133652 | 0.000328351 | 1.175 |
| PID Ajustado | 0.12 | 0.000341 | 1.935 |
| Cambio | 5.85% | 3.85% | 64.68% |

Tabla 4.3. Comparación del Ajuste de los Parámetros del Controlador PID Desarrollado

Esto es consistente con la inferencia hecha previamente acerca de los ajustes a realizarse:

El parámetro K_P no debería haber sido ajustado, y sólo tuvo un ajuste fino, con un porcentaje de cambio del 5.85%.

El parámetro K_I tampoco debería haber sido ajustado, y tuvo un ajuste muy fino, con un porcentaje de cambio del 3.85%.

El parámetro K_D debe haber sido ajustado significativamente, y tuvo un ajuste grueso, con un porcentaje de cambio del 64.68%.

A continuación se modifica el bloque de inicialización del modelo creado para la implementación del controlador PID desarrollado sobre el sistema Planta 3 Tanques, con los valores obtenidos:

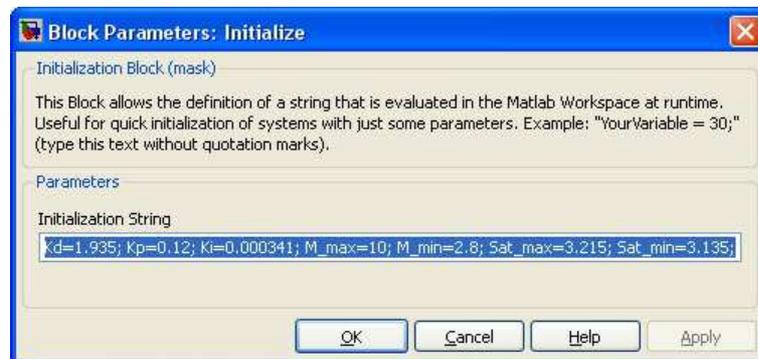


Figura 4.4. Interfaz de Parámetros del Bloque de Inicialización del Modelo para la Implementación del Controlador PID Ajustado sobre la Planta

Se puede observar que los nuevos valores a asignar, corresponden a las siguientes constantes:

- $K_D=1.935$ (K_d)
- $K_P=0.12$ (K_p)
- $K_I=0.000341$ (K_i)

Con esto se procede a realizar pruebas del controlador PID ajustado con Anti Wind-Up e implementado sobre el sistema Planta 3 Tanques, usando el modelo creado en el Capítulo 3.2.2.

4.2. Resultados de la Aplicación del Controlador sobre la Planta

Una vez que se ejecuta la simulación del modelo usado para la implementación del controlador PID ajustado sobre el sistema Planta 3 Tanques, los datos adquiridos se almacenan en una variable dentro del espacio de trabajo de MATLAB, provenientes desde el bloque de osciloscopio presente en el modelo. A esta variable se la ha denominado Salida_ContAdj.

A continuación se muestra el ambiente de trabajo de MATLAB, posterior a la ejecución de la simulación de dicho modelo:

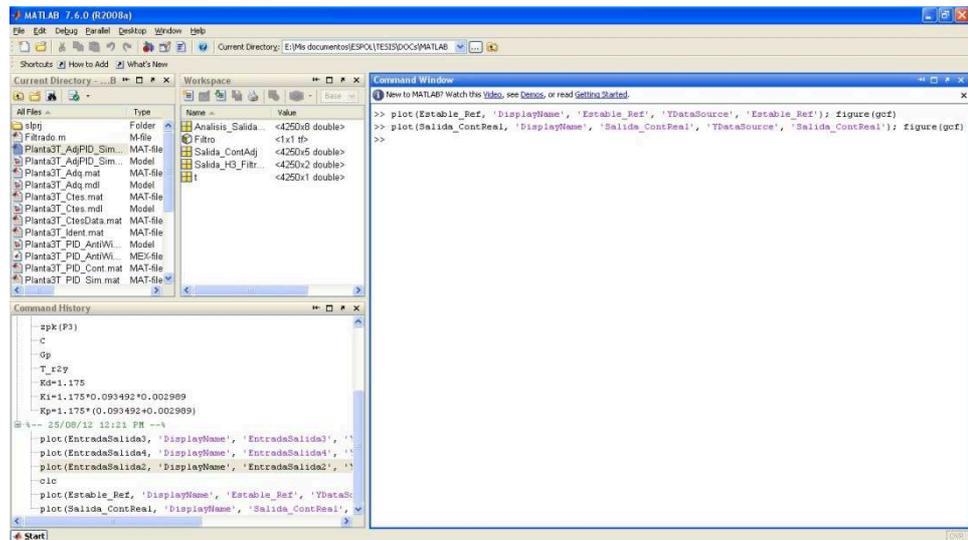


Figura 4.5. Ambiente de Trabajo de MATLAB posterior a la Implementación del Controlador PID Ajustado sobre la Planta

Los resultados de la implementación del controlador PID desarrollado sobre el sistema Planta 3 Tanques, almacenados en la variable Salida_ContAdj, son los siguientes:

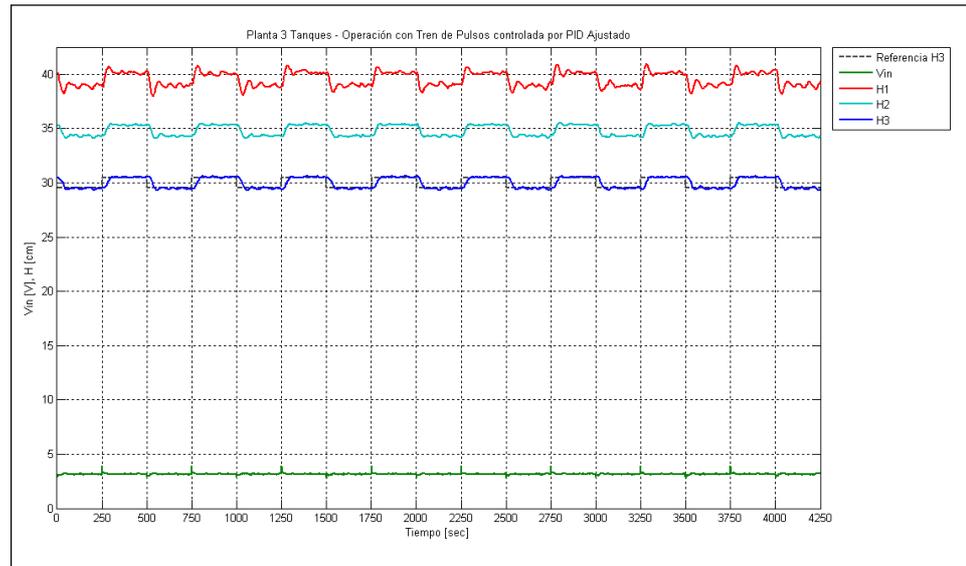


Figura 4.6. Resultados de la Implementación del Controlador PID Ajustado sobre la Planta

Se puede observar que:

Los resultados obtenidos son muy similares a aquellos de la implementación del controlador PID desarrollado sobre el sistema Planta 3 Tanques, realizada en la Sección 4.1., ya que las formas de onda de las señales de la altura de las columnas de agua, siguen exactamente el mismo patrón observado en dicha implementación.

En este punto, se procede a aplicar un filtro sobre los datos adquiridos de la altura de la columna de agua del tercer tanque, para minimizar el efecto del ruido sobre la señal proveniente desde

el sensor de presión, según se puede apreciar en la Figura 4.3., y así obtener una gráfica suavizada, sin que su magnitud se vea afectada por la acción del filtrado.

Su función de transferencia es la siguiente:

$$\frac{1}{(4s+1)^2}$$

Ecuación 4.1. Función de Transferencia del Filtro para la Minimización del Ruido

Este filtro fue determinado experimentalmente, después de comprobar que produce un muy buen efecto en la minimización del ruido de la gráfica, sin comprometer en absoluto su magnitud.

El resultado de la aplicación del filtro se muestra a continuación:

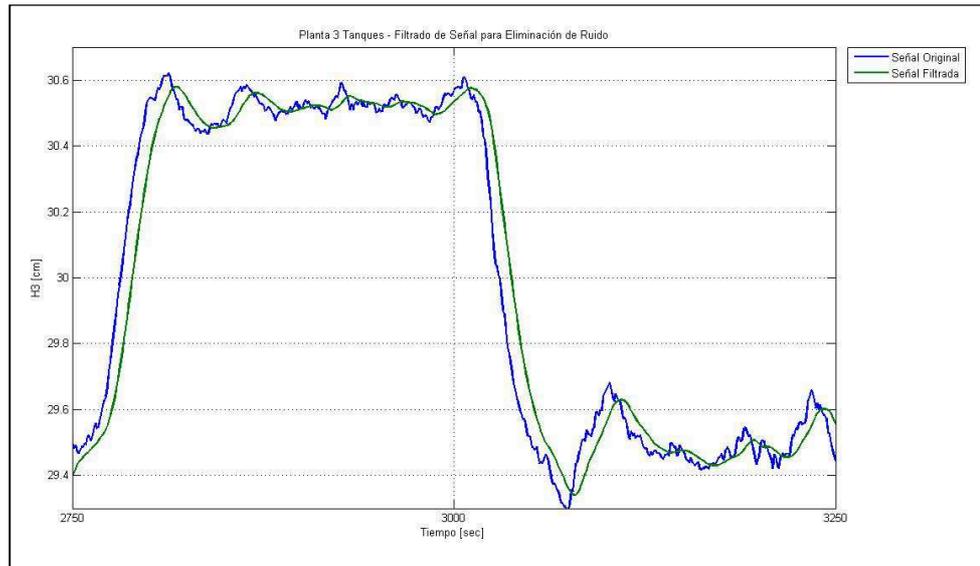


Figura 4.7. Filtrado de los Datos Adquiridos de la altura de la columna de agua del Tercer Tanque para la Minimización del Ruido

Una vez que se ha aplicado el filtro sobre los datos adquiridos de la altura de la columna de agua del tercer tanque, se procede con el análisis de los resultados de la implementación del controlador PID ajustado sobre el sistema Planta 3 Tanques.

Para su consiguiente estudio, en la gráfica se añadirán los límites de las bandas de tolerancia del error en estado estacionario de la señal de respuesta. Ésta es del 2%, según el criterio especificado en el Capítulo 3.2.

Dado que la señal de referencia tiene una variación equivalente a una señal de tipo escalón unitario, entonces los límites de las bandas de tolerancia son:

$$\text{LímiteSuperiorPositivoEss} = [30.5 + (1 \times 2\%)] [cm]$$

$$\text{LímiteSuperiorPositivoEss} = (30.5 + 0.02) [cm]$$

$$\text{LímiteSuperiorPositivoEss} = 30.52 [cm]$$

$$\text{LímiteSuperiorNegativoEss} = [30.5 - (1 \times 2\%)] [cm]$$

$$\text{LímiteSuperiorNegativoEss} = (30.5 - 0.02) [cm]$$

$$\text{LímiteSuperiorNegativoEss} = 30.48 [cm]$$

$$\text{LímiteInferiorPositivoEss} = [29.5 + (1 \times 2\%)] [cm]$$

$$\text{LímiteInferiorPositivoEss} = (29.5 + 0.02) [cm]$$

$$\text{LímiteInferiorPositivoEss} = 29.52 [cm]$$

$$\text{LímiteInferiorNegativoEss} = [29.5 - (1 \times 2\%)] [cm]$$

$$\text{LímiteInferiorNegativoEss} = (29.5 - 0.02) [cm]$$

$$\text{LímiteInferiorNegativoEss} = 29.48 [cm]$$

Los resultados finales obtenidos son los siguientes:

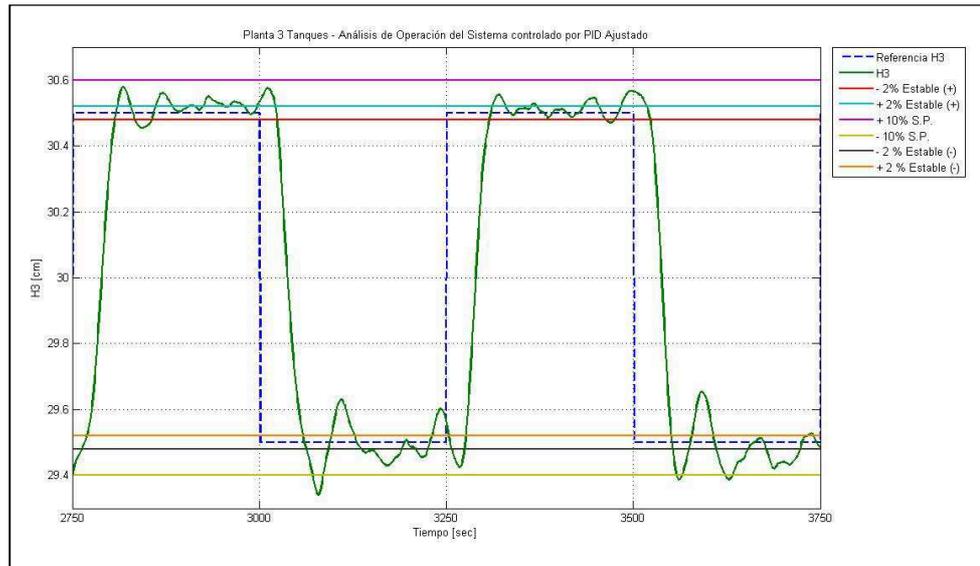


Figura 4.8. Análisis de los Resultados de la Implementación del Controlador PID Ajustado sobre la Planta

Se puede observar que:

Se muestra de color verde la gráfica correspondiente a la señal filtrada de respuesta de la altura de la columna de agua del tercer tanque, a una señal de referencia de tipo escalón unitario, producto de la acción de control debido a la implementación del controlador PID ajustado sobre el sistema Planta 3 Tanques.

También se muestran: de color morado, la recta del límite superior del 10% de sobrenivel porcentual (30.6[cm]); de color amarillo, la recta del límite inferior del 10% de sobrenivel porcentual (29.4[cm]);

de color turquesa, la recta del límite superior positivo de la banda de tolerancia del 2% (30.52[cm]); de color rojo, la recta del límite superior negativo de la banda de tolerancia del 2% (30.48[cm]); de color anaranjado, la recta del límite inferior positivo de la banda de tolerancia del 2% (29.52[cm]); y de color negro, la recta del límite inferior negativo de la banda de tolerancia del 2% (29.48[cm]).

Además, se muestra de color azul la línea punteada correspondiente a la señal de referencia mencionada.

El valor pico (máximo) que alcanza la señal de respuesta es de 30.5797[cm], por lo que el sobrenivel porcentual es del 7.97%. El tiempo de estabilización es de 80[sec]. El valor final es 30.514331[cm], por lo que el error en estado estacionario es de 0.014331[cm] (menor a dos décimas de milímetro), es decir, un error del 1.4331%.

Los resultados mostrados, son los mejores que se obtuvieron después de realizar varias pruebas, con el fin de lograr su calidad de definitivos.

Recordando las especificaciones de diseño del controlador, se construye la siguiente tabla para efectos de comparación:

| Valor | Sobrenivel porcentual | Tiempo de estabilización | Error en estado estacionario |
|---------------------|-----------------------|---------------------------|------------------------------|
| Deseado | $S.P. \leq 10\%$ | $T_s \leq 90[\text{sec}]$ | $e_{ss} = 0$ |
| Obtenido | $S.P. = 7.97\%$ | $T_s = 80[\text{sec}]$ | $e_{ss} \approx 0$ |
| Cumplimiento | SÍ | SÍ | SÍ |

Tabla 4.4. Comparación de los Resultados de la Implementación del Controlador PID Ajustado sobre la Planta

Después de comprobar que el nivel de cumplimiento de las especificaciones de diseño del controlador es del 100%, se concluye que el ajuste del controlador PID desarrollado e implementado sobre el sistema Planta 3 Tanques ha sido exitoso.

4.3. Cálculo de Índices de Rendimiento del Controlador

El diseño de un sistema de control es un intento de cumplir una serie de especificaciones que definen el rendimiento global del sistema en términos de ciertas cantidades medibles. Una serie de medidas de rendimiento se han introducido hasta ahora en relación con la respuesta dinámica a la entrada de escalón (coeficiente de amortiguamiento, valor pico, tiempo de subida, tiempo de estabilización, entre otros) y el error en estado estacionario, tanto a

las entradas de escalón y de orden superior. Estas medidas tienen que ser satisfechas simultáneamente en el diseño y por lo tanto, el diseño se convierte necesariamente en un procedimiento de prueba y error.

La teoría moderna de control presupone que los ingenieros de control pueden especificar cuantitativamente el comportamiento requerido de un sistema. Se necesita una medida cuantitativa del comportamiento de un sistema para la operación de sistemas de control adaptativo moderno, para la optimización de parámetros automáticos en un sistema de control y para el diseño de sistemas óptimos.

Si el propósito es mejorar el diseño de un sistema o diseñar un sistema de control, se debe elegir y medir un índice de comportamiento. Entonces se puede calcular un índice de comportamiento y utilizarlo para evaluar el rendimiento de un sistema o controlador.

Un índice de comportamiento es una medida cuantitativa del comportamiento de un sistema, y se elige de forma que resalte las especificaciones importantes del sistema.

Un sistema de control se considera óptimo cuando sus parámetros se ajustan de forma que el índice alcanza un valor extremo, comúnmente un valor mínimo. Para que un índice de comportamiento resulte útil, siempre debe ser un número positivo o cero. Entonces el mejor sistema se define como aquel que minimiza este índice, que indica qué tan bueno es el comportamiento del sistema [62].

Los índices de comportamiento que generalmente se utilizan son los siguientes:

- ISE
- IAE
- ITSE
- ITAE

Un índice de comportamiento útil es el criterio ISE, la integral del cuadrado del error, definido como:

62 Introducción al Comportamiento de los Sistemas de Control con Retroalimentación: DORF, RICHARD C.; BISHOP, ROBERT H., Sistemas de control moderno, Décima edición, Pearson Educación, S.A., Madrid, 2005, p. 267

$$ISE = \int_0^T e^2(t) dt$$

Ecuación 4.2. Criterio ISE [63]

Este es el estándar de ponderación lineal cuadrática de errores de seguimiento de la señal de referencia, movimientos de variables manipuladas y desviaciones de variables manipuladas de los objetivos, si las hubiera [64].

El límite superior T es un tiempo finito elegido un tanto arbitrariamente, de forma que la integral tienda a un valor en estado estacionario. Por lo general, es conveniente elegir T como el tiempo de estabilización, T_s [65].

63 Introducción al Comportamiento de los Sistemas de Control con Retroalimentación: DORF, RICHARD C.; BISHOP, ROBERT H., Sistemas de control moderno, Décima edición, Pearson Educación, S.A., Madrid, 2005, p. 267

64 Defining the Performance Metric: <http://www.mathworks.com/help/mpc/ug/sensitivity-analysis-using-thetuning-advisor.html>, Fecha de consulta: Enero 2013

65 Introducción al Comportamiento de los Sistemas de Control con Retroalimentación: DORF, RICHARD C.; BISHOP, ROBERT H., Sistemas de control moderno, Décima edición, Pearson Educación, S.A., Madrid, 2005, p. 268

Aparte de su facilidad de implementación, este índice tiene la ventaja de ser matemáticamente conveniente para su análisis y su cálculo [66].

Al enfocarse en el cuadrado de la función del error, penaliza valores tanto positivos como negativos del error [67], favoreciendo parámetros que previenen desviaciones grandes de la señal de referencia.

Se lo utiliza para sistemas en que los errores grandes son los problemáticos [68].

Otro índice de comportamiento bastante útil es el criterio IAE, la integral del valor absoluto del error, definido como:

66 Performance Indices: TRIPATHI, SAURABH MANI, A course in modern control system, First edition, Laxmi Publications Pvt. Ltd., New Delhi, 2007, p. 129

67 Performance Indices: SHINNERS, STANLEY M., Modern control system theory and design, Second edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998, p. 291

68 Error weighting for performance assessment:
http://wikis.lib.ncsu.edu/index.php/Controller_Tuning, Fecha de consulta: Enero 2013

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt$$

Ecuación 4.3. Criterio IAE [69]

Este índice es similar al criterio ISE, pero con los términos cuadráticos remplazados por valores absolutos.

Al enfocarse en la magnitud del error, penaliza valores tanto positivos como negativos del error [70].

Este índice da menos énfasis a cualquier desviación grande [71].

Se lo utiliza para sistemas que necesitan suprimir uniformemente todos los errores [72].

69 Introducción al Comportamiento de los Sistemas de Control con Retroalimentación: DORF, RICHARD C.; BISHOP, ROBERT H., Sistemas de control moderno, Décima edición, Pearson Educación, S.A., Madrid, 2005, p. 268

70 Performance Indices: TRIPATHI, SAURABH MANI, A course in modern control system, First edition, Laxmi Publications Pvt. Ltd., New Delhi, 2007, p. 129

71 Defining the Performance Metric: <http://www.mathworks.com/help/mpc/ug/sensitivity-analysis-using-thetuning-advisor.html>, Fecha de consulta: Enero 2013

72 Error weighting for performance assessment: http://wikis.lib.ncsu.edu/index.php/Controller_Tuning, Fecha de consulta: Enero 2013

Aunque no se ha aplicado de forma importante en la práctica debido a la mayor complejidad en su manejo, otro índice de comportamiento es el criterio ITSE, la integral del tiempo multiplicado por el cuadrado del error, definido como:

$$ITSE = \int_0^T t e^2(t) dt$$

Ecuación 4.4. Criterio ITSE [73]

Este índice penaliza desviaciones en tiempos largos con más peso que el criterio ISE, favoreciendo controladores que eliminan rápidamente el error en estado estacionario [74].

Se lo utiliza para sistemas en que los errores persistentes y grandes son los problemáticos [75].

73 Introducción al Comportamiento de los Sistemas de Control con Retroalimentación: DORF, RICHARD C.; BISHOP, ROBERT H., Sistemas de control moderno, Décima edición, Pearson Educación, S.A., Madrid, 2005, p. 269

74 Defining the Performance Metric: <http://www.mathworks.com/help/mpc/ug/sensitivity-analysis-using-thetuning-advisor.html>, Fecha de consulta: Enero 2013

75 Error weighting for performance assessment: http://wikis.lib.ncsu.edu/index.php/Controller_Tuning, Fecha de consulta: Enero 2013

Un criterio muy útil que penaliza transientes de larga duración es el ITAE [76], la integral del tiempo multiplicado por el valor absoluto del error, definido como:

$$ITAE = \int_0^T t |e(t)| dt$$

Ecuación 4.5. Criterio ITAE [77]

Este criterio es similar al ITSE, pero con menor énfasis en desviaciones grandes [78].

Es un índice de comportamiento más selectivo que el ISE o el IAE. El valor mínimo de su integral es mucho más definible a medida que los parámetros del sistema son variados [79].

76 Performance Indices: SHINNERS, STANLEY M., Modern control system theory and design, Second edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998, p. 291

77 Introducción al Comportamiento de los Sistemas de Control con Retroalimentación: DORF, RICHARD C.; BISHOP, ROBERT H., Sistemas de control moderno, Décima edición, Pearson Educación, S.A., Madrid, 2005, p. 269

78 Defining the Performance Metric: <http://www.mathworks.com/help/mpc/ug/sensitivity-analysis-using-thetuning-advisor.html>, Fecha de consulta: Enero 2013

79 Performance Indices: SHINNERS, STANLEY M., Modern control system theory and design, Second edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998, p. 291

Al multiplicar las desviaciones por el tiempo en el cual ocurren, éste método favorece parámetros que fuerzan la respuesta a la señal de referencia rápidamente, de manera similar que el ITSE.

Se utiliza para sistemas en que los errores persistentes son los problemáticos [80].

Una comparación de este arreglo de índices de comportamiento es muy interesante. El criterio ISE no es muy sensible a variaciones de parámetros, porque el mínimo es usualmente amplio. El criterio IAE da una sensibilidad ligeramente mayor que el criterio ISE. El criterio ITAE generalmente produce menores sobreniveles porcentuales y oscilaciones que los criterios ISE e IAE. Adicionalmente, es el más sensible de estos tres criterios comparados, pudiendo ser hasta demasiado sensible (muy pequeñas variaciones de parámetros pueden degradar el comportamiento del sistema) [81].

Como se puede apreciar, los índices de comportamiento utilizan criterios basados en el cálculo de la integral de diferentes funciones,

80 Error weighting for performance assessment:
http://wikis.lib.ncsu.edu/index.php/Controller_Tuning, Fecha de consulta: Enero 2013

81 Performance Indices: SHINNERS, STANLEY M., Modern control system theory and design, Second edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998, p. 292

es decir, del área bajo o sobre la curva de dichas funciones alrededor del eje del tiempo. Por lo tanto, un índice de comportamiento es un número cuyas unidades son cuadráticas.

Pero al ser un número, significa que si no se tiene, por lo menos, otro índice de comportamiento del mismo controlador, o un índice de comportamiento de otro controlador, contra los cuales el índice de comportamiento original pueda ser comparado, esta cantidad y el valor que representa, carecen totalmente de sentido.

Por este motivo, se van a calcular controladores PID adicionales para la función de transferencia identificada del sistema Planta 3 Tanques, usando precisamente el Método de los Índices de Comportamiento para el ajuste de controladores PID.

Esto es posible gracias a la función optimPID para MATLAB, desarrollada por el Dr. Yi Cao. El código de la misma se encuentra en el Anexo I, y su correspondiente licenciamiento en el Anexo J.

El Dr. Yi Cao, es profesor titular y Director de Cursos de la Maestría en Ingeniería de Sistemas de Procesos, del Departamento de

Ingeniería Marítima, de Procesos y Energética (OPEE) de la Universidad de Cranfield, en Cranfield, Inglaterra.

Para más información acerca del Dr. Yi Cao, y de sus trabajos en MATLAB, visítense las siguientes direcciones de Internet:

- http://www.cranfield.ac.uk/soe/profiles/y_cao.html
- <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/authors/22524>

La función optimPID calcula controladores PID a la vez que realiza un ajuste óptimo de los mismos de manera iterativa, basándose en los criterios de los cuatro índices de comportamiento más comunes, descritos previamente en esta sección.

Esta función inicia realizando un análisis de los márgenes de ganancia y fase de la función de transferencia para la cual se van a calcular los diferentes controladores.

El margen de ganancia es la cantidad de ganancia en decibeles que puede ser añadida al lazo antes de que el sistema en lazo cerrado se vuelva inestable [82].

El margen de fase es la cantidad de fase (retardo) pura que puede ser añadida al sistema antes de que el sistema en lazo cerrado se vuelva inestable [83].

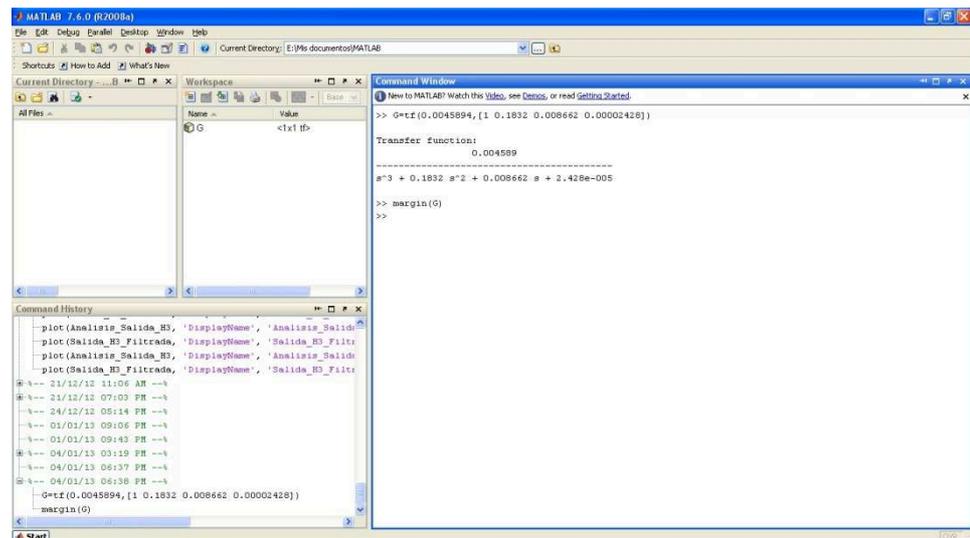
La función optimPID fue diseñada de esta manera, ya que MATLAB aborta algunos procedimientos cuando detecta que el sistema en lazo cerrado de la función de transferencia sobre la cual se está trabajando, es inestable. Esto usualmente ocurre cuando la función de transferencia tiene intrínsecamente una ganancia muy alta.

Para prevenir esto, la función de transferencia identificada del sistema Planta 3 Tanques representada en la Ecuación 3.7., se almacena en una variable dentro del espacio de trabajo de MATLAB. A esta variable se la ha denominado G.

82 Margen de Ganancia: KUO, BENJAMIN C., Sistemas de control automático, Séptima edición, Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A., Naucalpan de Juárez, 1996, p. 610

83 Margen de Fase: KUO, BENJAMIN C., Sistemas de control automático, Séptima edición, Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A., Naucalpan de Juárez, 1996, p. 611

Para el análisis de los márgenes de ganancia y fase, se aplica sobre G la función margin desde la ventana de comandos de MATLAB:



```

MATLAB 7.6.0 (R2008a)
File Edit Debug Parallel Desktop Window Help
Current Directory: E:\Ms documentos\MATLAB

Workspace
Name Value
G <1x1 tf>

Command Window
New to MATLAB? Watch this video, see Demos, or read Getting Started.
>> G=tf(0.0045894,[1 0.1832 0.008662 0.00002426])

Transfer function:
0.004589
-----
s^3 + 0.1832 s^2 + 0.008662 s + 2.428e-005

>> margin(G)
>>

Command History
plot(Analisis_Salida_B3,'DisplayName','Analisis_Salida_B3')
plot(Salida_B3_Filtrada,'DisplayName','Salida_B3_Filtrada')
plot(Analisis_Salida_B3,'DisplayName','Analisis_Salida_B3')
plot(Salida_B3_Filtrada,'DisplayName','Salida_B3_Filtrada')
21/12/12 11:06 AM -->
21/12/12 07:03 PM -->
24/12/12 05:14 PM -->
01/01/13 09:06 PM -->
01/01/13 09:43 PM -->
04/01/13 03:19 PM -->
04/01/13 04:37 PM -->
04/01/13 04:38 PM -->
G=tf(0.0045894,[1 0.1832 0.008662 0.00002426])
margin(G)

```

Figura 4.9. Función margin aplicada a la Variable G

Los resultados del análisis de los márgenes de ganancia y fase de G, son los siguientes:

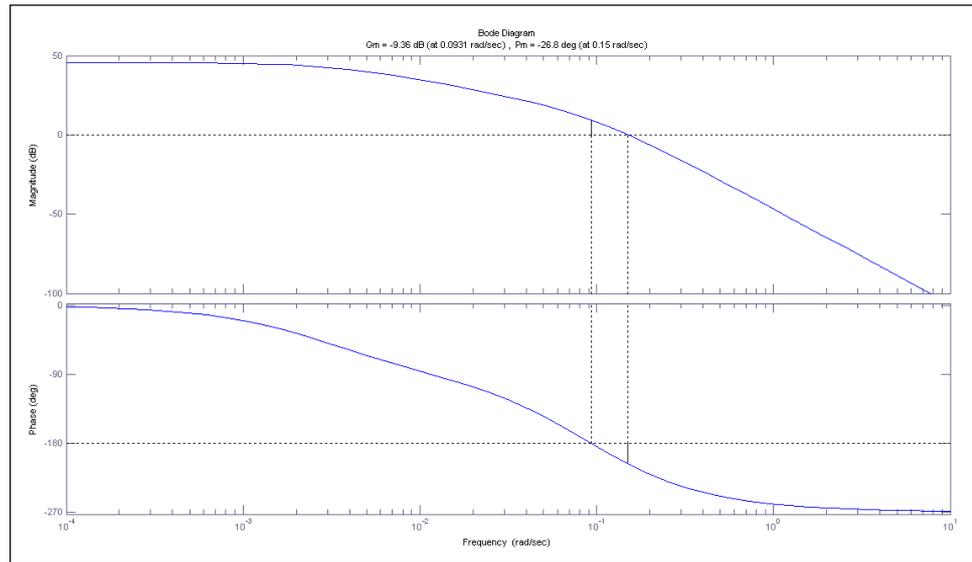


Figura 4.10. Márgenes de Ganancia y Fase de la Función de Transferencia Identificada de la Planta

Se puede observar que:

Tanto el margen de ganancia como el margen de fase de G , son negativos. De aquí se concluye que la función de transferencia del sistema Planta 3 Tanques en lazo cerrado, es intrínsecamente inestable.

Para corregir esto y asegurar que la función optimPID se ejecute en su totalidad, se procede a estabilizar la función de transferencia almacenada en G , multiplicándola por una constante para disminuir su ganancia intrínseca.

La constante para estabilizar G se almacena en una variable dentro del espacio de trabajo de MATLAB. A esta variable se la ha denominado K_estable. El valor de la constante de estabilización, se ha establecido en 0.02179. Este valor fue determinado experimentalmente, después de comprobar que disminuye la ganancia de G hasta un punto en que la función optimPID se ejecuta completamente.

Una vez que se ha determinado la constante de estabilización, ésta se multiplica por G, y la función de transferencia estabilizada se almacena en una variable dentro del espacio de trabajo de MATLAB. A esta variable se la ha denominado G_estable.

El resultado de la estabilización de G, es el siguiente:

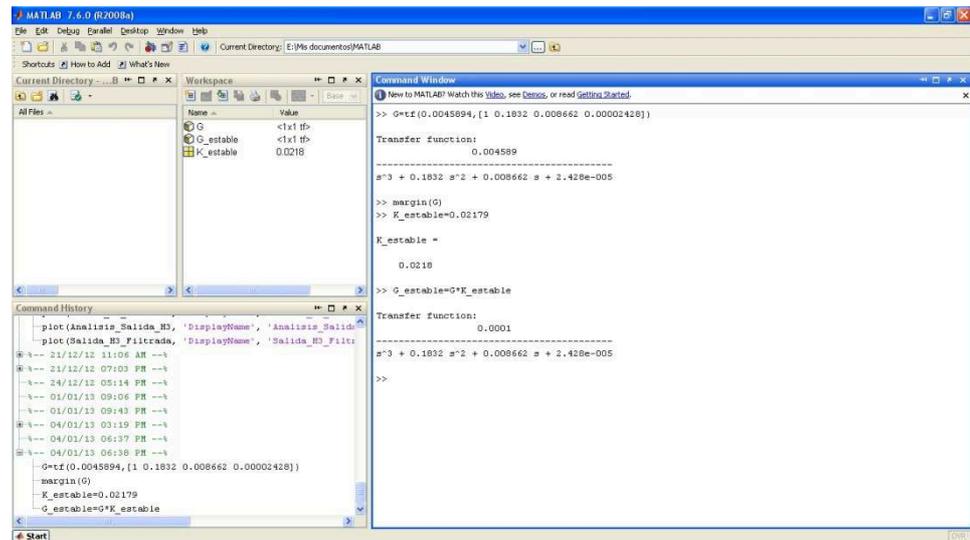


Figura 4.11. Estabilización de la Función de Transferencia Identificada de la Planta

Se puede observar que la función de transferencia estabilizada del sistema Planta 3 Tanques es:

$$G_{estable} = \frac{0.0001}{s^3 + 0.1832s^2 + 0.008661s + 0.00002428}$$

Ecuación 4.6. Función de Transferencia Identificada Estable de la Planta

Esta acción no afecta en absoluto los resultados que se obtendrán más adelante, ya que se compensan automáticamente sobre las ganancias de los controladores calculados; pero en todo caso, hay que tener presente que para obtener las funciones de transferencia reales de los mismos, éstas deberán ser divididas para la constante

usada en el proceso de estabilización, para restablecer la ganancia intrínseca de G.

Para el análisis de los nuevos márgenes de ganancia y fase, se aplica sobre G_estable la función margin desde la ventana de comandos de MATLAB:

The screenshot shows the MATLAB 7.6.0 (R2008a) environment. The Command Window contains the following code and output:

```

>> G=tf(0.0045894,[1 0.1832 0.008662 0.00002426])
Transfer function:
          0.004589
-----
s^3 + 0.1832 s^2 + 0.008662 s + 2.428e-005

>> margin(G)
>> K_estable=0.02179
K_estable =
    0.0218

>> G_estable=G*K_estable
Transfer function:
          0.0001
-----
s^3 + 0.1832 s^2 + 0.008662 s + 2.428e-005

>> margin(G_estable)
>>

```

The Workspace window shows the following variables:

| Name | Value |
|-----------|----------|
| G | <1x1 tf> |
| G_estable | <1x1 tf> |
| K_estable | 0.0218 |

The Command History window shows the following commands:

```

>> G=tf(0.0045894,[1 0.1832 0.008662 0.00002426])
margin(G)
K_estable=0.02179
G_estable=G*K_estable
margin(G_estable)

```

Figura 4.12. Función margin aplicada a la Variable G_estable

Los resultados del análisis de los márgenes de ganancia y fase de G_estable, son los siguientes:

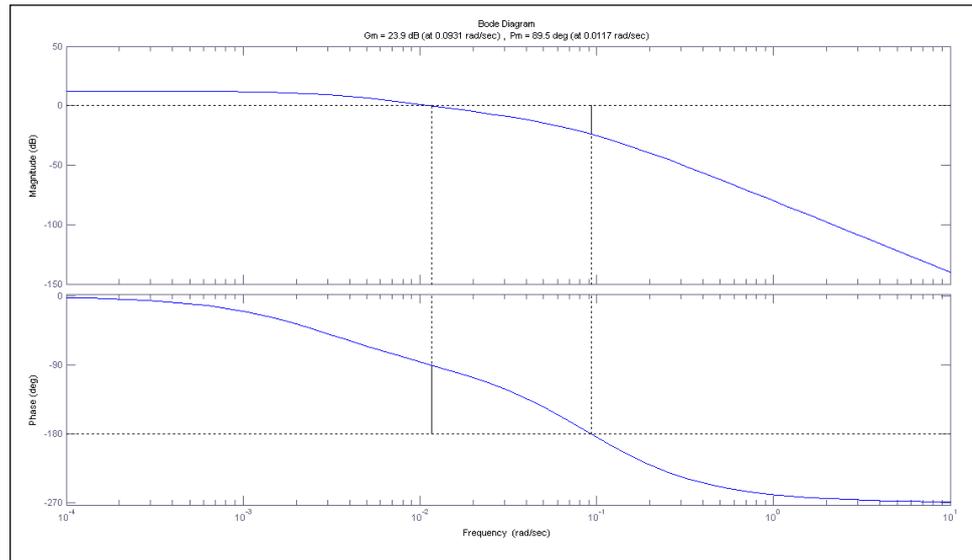


Figura 4.13. Márgenes de Ganancia y Fase de la Función de Transferencia Identificada Estable de la Planta

Se puede observar que:

Tanto el margen de ganancia como el margen de fase de G , ahora son positivos. De aquí se concluye que la función de transferencia del sistema Planta 3 Tanques en lazo cerrado, se ha vuelto estable. Una vez que se ha estabilizado la función de transferencia del sistema Planta 3 Tanques, se procede a calcular los controladores PID adicionales, ajustados por el Método de los Índices de Comportamiento, utilizando la función `optimPID`.

A continuación se muestra el código en MATLAB, desarrollado para este propósito:

```
G=tf(0.0045894,[1 0.1832 0.008662 0.00002428]); % Planta 3 Tanques
K_estable=0.02179; % Constante para estabilizar lazo cerrado de Planta 3 Tanques
G_estable=G*K_estable; % Estabilizacion del lazo cerrado de Planta 3 Tanques
Gc=zpk([-0.002989, -0.05896],[0],1.935); % PID-Control, SISOTOOL
C1=optimPID(G_estable,3,1); % PID-Control, ISE index
C2=optimPID(G_estable,3,2); % PID-Control, IAE index
C3=optimPID(G_estable,3,3); % PID-Control, ITSE index
C4=optimPID(G_estable,3,4); % PID-Control, ITAE index
t=0:0.1:250;
y=step(feedback(Gc*G,1),t); % Closed-loop step response of Gc
y1=step(feedback(C1*G_estable,1),t); % Closed-loop step response of C1
y2=step(feedback(C2*G_estable,1),t); % Closed-loop step response of C2
y3=step(feedback(C3*G_estable,1),t); % Closed-loop step response of C3
y4=step(feedback(C4*G_estable,1),t); % Closed-loop step response of C4
figure;
plot(t,y,t,y1,t,y2,t,y3,t,y4,'Linewidth',2)
legend('SISOTOOL','ISE','IAE','ITSE','ITAE','Location','NorthEastOutside')
title('Respuesta al Escalón Unitario de los Controladores PID desarrollados bajo diferentes métodos y criterios')
xlabel('Tiempo [sec]')
ylabel('Amplitud [u]')
grid
```

Figura 4.14. Código para Calcular Controladores PID según Índices de Comportamiento y Simular su Respuesta al Escalón Unitario

Este programa se compone de 4 partes:

La primera parte, comprende la estabilización de la función de transferencia del sistema Planta 3 Tanques. La segunda parte, comprende el cálculo de los controladores PID por medio de la función optimPID. La tercera parte, comprende la simulación de 250[sec], de la respuesta de los controladores PID calculados, a una señal de entrada de tipo escalón unitario. Este tiempo de simulación se constituirá en el límite superior de integración T para el cálculo de los índices de comportamiento, que será realizado más adelante

en esta sección. La cuarta parte, comprende la construcción de la gráfica de las simulaciones de respuesta realizadas.

Los resultados de la ejecución de este programa, son los siguientes:

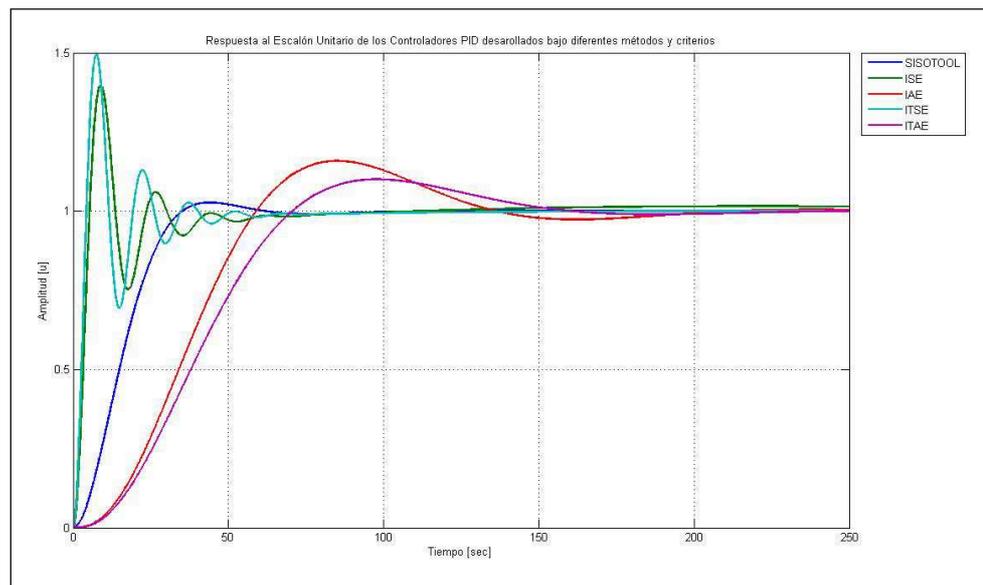


Figura 4.15. Simulación de Respuesta al Escalón Unitario de los Controladores PID Calculados y del Controlador PID Ajustado

Se puede observar que:

Se muestra de color azul la gráfica correspondiente a la señal de respuesta del controlador PID ajustado que se desarrolló con la herramienta SISOTOOL de MATLAB. Esta gráfica fue incluida para efectos del análisis conjunto con los controladores PID calculados.

Se muestra de color verde la gráfica correspondiente a la señal de respuesta del controlador PID calculado según el criterio ISE. Se muestra de color rojo la gráfica correspondiente a la señal de respuesta del controlador PID calculado según el criterio IAE. Se muestra de color turquesa la gráfica correspondiente a la señal de respuesta del controlador PID calculado según el criterio ITSE. Se muestra de color morado la gráfica correspondiente a la señal de respuesta del controlador PID calculado según el criterio ITAE.

Este código de colores será el mismo para todas las gráficas que involucren las señales de respuesta de los controladores mencionados. Con el fin de mostrar y comparar los resultados obtenidos en estas simulaciones de respuesta, se construye la siguiente tabla:

| Parámetro | Controladores PID | | | | |
|-----------------|-------------------|----------|----------|----------|----------|
| | SISOTOOL | ISE | IAE | ITSE | ITAE |
| Valor pico [cm] | 1.02684 | 1.39758 | 1.15822 | 1.49421 | 1.10009 |
| S.P. | 2.684% | 39.758% | 15.822% | 49.421% | 10.009% |
| T_s [sec] | 50.6 | 58.6 | 180.2 | 48.3 | 144.7 |
| e_{ss} [cm] | 0 | 0.014423 | 0.004092 | 0.000708 | 0.000023 |
| Error | 0% | 1.4423% | 0.4092% | 0.0708% | 0.0023% |

Tabla 4.5. Valores de los Parámetros Característicos de la Curva de Respuesta Simulada de los Controladores PID

Una vez calculados los controladores PID adicionales para la función de transferencia del sistema Planta 3 Tanques, obtener un índice de comportamiento para cada uno de ellos, ahora sí tiene sentido, ya que se puede establecer una comparación cuantitativa de la señal de respuesta de los controladores.

Para elegir cuál de los criterios se va a utilizar para obtener los índices de comportamiento, se tendrán presentes las siguientes consideraciones:

- El concepto de la integral de una función
- El tratamiento que se le dé a la amplitud de una función

Para esto, la siguiente figura servirá de apoyo:

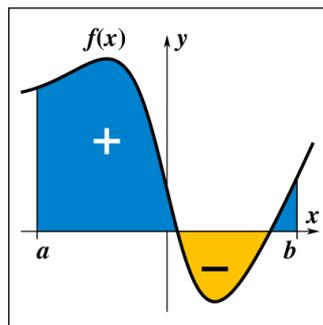


Figura 4.16. Interpretación Gráfica de la Integral de una Función

Como bien se sabe, la integral de una función representa el área bajo o sobre la curva de la función, alrededor del eje de integración. El área es positiva cuando la función toma valores positivos, y negativa cuando la función toma valores negativos. De acuerdo a la naturaleza de la función, puede haber porciones de área positiva y porciones de área negativa que se compensen o cancelen, derivando en un área resultante que no represente numéricamente el área total o real en cuestión, que puede tomar hasta un valor negativo o inclusive cero, para el caso de funciones simétricas al eje de integración.

Para evitar esto y obtener un área resultante positiva, producto de porciones de área solamente positivas, se puede dar un tratamiento a la amplitud de la función, para volver positivas las secciones negativas de la curva. Este tratamiento puede ser:

- Sacar el valor absoluto de la función a integrar.
- Elevar al cuadrado la función a integrar.

Al sacar el valor absoluto de la función, todas las secciones negativas de la curva se vuelven positivas, manteniendo el valor de su amplitud.

Al elevar al cuadrado la función, todas las secciones negativas de la curva también se vuelven positivas, pero el valor de la amplitud de toda la función no se mantiene, sino que se eleva al cuadrado. Esto podría alterar el valor del área resultante, ya que para valores de amplitud entre cero y uno, su cuadrado es menor, y el área de dicha porción se reduciría; y para valores de amplitud mayores que uno, su cuadrado es mayor, y el área de dicha porción aumentaría, pudiendo dispararse si se trata de un valor originalmente grande.

Basándose en este argumento, se puede decir que sacar el valor absoluto de la función a integrar, es la mejor opción para obtener un área resultante positiva, ya que ésta sería más fiel, más aproximada a la realidad, que si se elevara al cuadrado la función a integrar.

Por lo tanto, se concluye que para obtener los índices de comportamiento, se estaría utilizando el criterio IAE: la integral del valor absoluto del error actuante. A continuación se muestra el código en MATLAB, desarrollado para este propósito:

```

load analisis.mat;
e_y=ref(:,2)-y;
e_y1=ref(:,2)-y1;
e_y2=ref(:,2)-y2;
e_y3=ref(:,2)-y3;
e_y4=ref(:,2)-y4;
ae_y=abs(e_y);
ae_y1=abs(e_y1);
ae_y2=abs(e_y2);
ae_y3=abs(e_y3);
ae_y4=abs(e_y4);
figure;
plot(t,ae_y,t,ae_y1,t,ae_y2,t,ae_y3,t,ae_y4,'Linewidth',2)
legend('SISOTOOL','ISE','IAE','ITSE','ITAE','Location','NorthEastOutside')
title('Valor Absoluto del Error en la Respuesta al Escalón Unitario de los Controladores PID desarrollados bajo diferentes métodos y criterios')
xlabel('Tiempo [sec]')
ylabel('Amplitud [u]')
grid
iae_y=cumtrapz(ae_y);
iae_y1=cumtrapz(ae_y1);
iae_y2=cumtrapz(ae_y2);
iae_y3=cumtrapz(ae_y3);
iae_y4=cumtrapz(ae_y4);
figure;
plot(t,iae_y,t,iae_y1,t,iae_y2,t,iae_y3,t,iae_y4,'Linewidth',2)
legend('SISOTOOL','ISE','IAE','ITSE','ITAE','Location','NorthEastOutside')
title('Criterio IAE aplicado a la Respuesta al Escalón Unitario de los Controladores PID desarrollados bajo diferentes métodos y criterios')
xlabel('Tiempo [sec]')
ylabel('Área bajo la curva [u^2]')
grid
IAE_SISOTOOL=trapz(ae_y)
IAE_ISE=trapz(ae_y1)
IAE_IAE=trapz(ae_y2)
IAE_ITSE=trapz(ae_y3)
IAE_ITAE=trapz(ae_y4)

```

Figura 4.17. Código para Calcular y Graficar el Criterio IAE de los Controladores PID

Este programa se compone de 4 partes:

La primera parte, comprende la obtención de la función del error actuante de los controladores PID. La segunda parte, comprende el cálculo del valor absoluto de las funciones del error actuante obtenidas, y la construcción de su gráfica. La tercera parte, comprende la integración del valor absoluto de las funciones del error actuante obtenidas, y la construcción de su gráfica. La cuarta parte, comprende el cálculo de los índices de comportamiento de los controladores PID, según el criterio IAE.

Los resultados de la ejecución de este programa, son los siguientes:

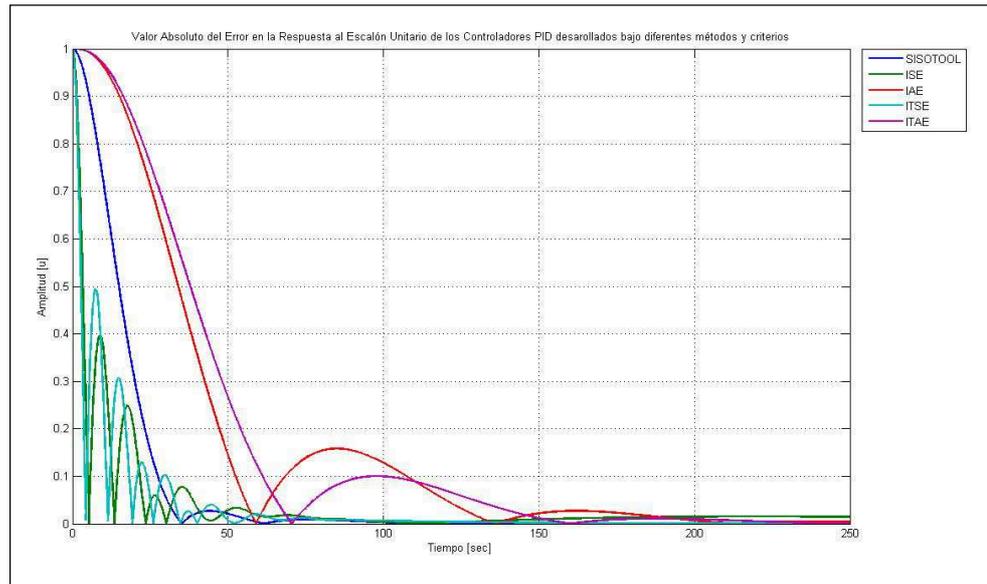


Figura 4.18. Gráfica del Valor Absoluto del Error Actuante de los Controladores PID

En la Figura 4.19., se muestra la gráfica de la integral acumulativa de la función del error actuante de los controladores PID, es decir, cómo van aumentando las áreas bajo la curva del error actuante para cada caso. Se puede observar que:

La integral acumulativa del valor absoluto de la función del error actuante del controlador PID ajustado que se desarrolló con la herramienta SISOTOOL de MATLAB, se ubica justo en medio de la integral acumulativa del valor absoluto de la función del error actuante los controladores PID calculados: dos de ellos (según los criterios IAE e ITAE), con un error actuante muy grande, un tiempo

de estabilización muy largo y con un sobrenivel porcentual algo mayor al deseado; y los dos restantes (según los criterios ISE e ITSE), con un error actuante pequeño, con un tiempo de estabilización similar al deseado, pero con un sobrenivel porcentual demasiado alto, tal como lo muestra la Tabla 4.5.

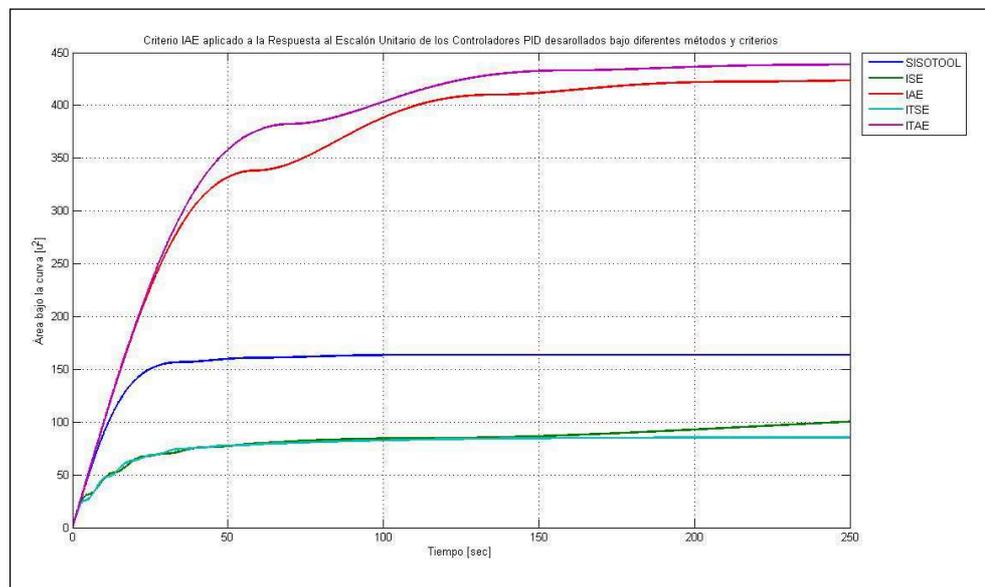


Figura 4.19. Gráfica del Criterio IAE de los Controladores PID

También se ve que todas las integrales acumulativas tienden a un valor en estado estacionario, consistente con la elección del límite superior T de la integral de 250[sec], establecido previamente según la simulación de respuesta de los controladores PID.

A continuación se muestra el ambiente de trabajo de MATLAB, posterior a la ejecución de este programa:

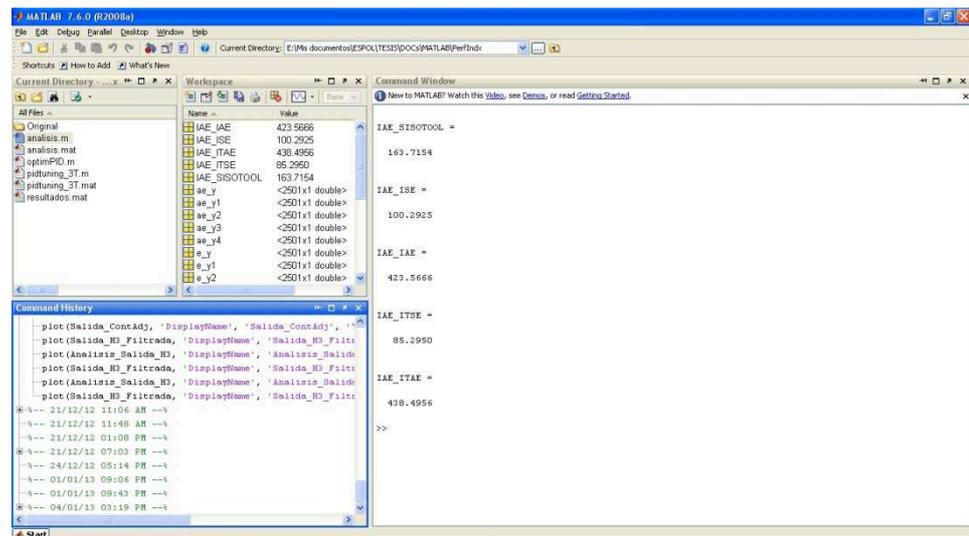


Figura 4.20. Cálculo del Criterio IAE de los Controladores PID

Se puede observar que:

Se muestran los valores de la integral del valor absoluto de las funciones del error actuante obtenidas, es decir, las áreas bajo la curva del error actuante de los controladores PID, que coinciden con los valores en estado estacionario de la integral acumulativa del valor absoluto de la función del error actuante para cada caso.

A continuación se muestra una tabla con los resultados de los índices de comportamiento de los controladores PID, obtenidos según el criterio IAE, y un porcentaje de rendimiento de los controladores PID, calculado en base a estos resultados, para efectos de comparación:

| Método/Criterio | Criterio IAE | Rendimiento |
|------------------------|---------------------|--------------------|
| SISOTOOL | 163.7154 | 77.97% |
| ISE | 100.2925 | 95.754% |
| IAE | 423.5666 | 4.227% |
| ITSE | 85.295 | 100% |
| ITAE | 438.4956 | 0% |

Tabla 4.6. Criterio IAE y Porcentaje de Rendimiento de los Controladores PID

El porcentaje de rendimiento que se muestra en esta tabla, fue desarrollado de manera que el controlador PID con el mejor índice de comportamiento, es decir, con el menor valor de criterio IAE, represente un porcentaje de rendimiento del 100%; y el controlador PID con el peor índice de comportamiento, es decir, con el mayor valor de criterio IAE, represente un porcentaje de rendimiento del 0%. Los porcentajes de rendimiento de los controladores PID restantes, se calculan en base a una simple relación lineal, a partir del planteamiento establecido previamente.

Todos estos resultados, permiten concluir que, de acuerdo a la respuesta de la planta y a sus condiciones particulares de funcionamiento, definidas según las especificaciones de diseño de un controlador, se puede decidir qué se sacrifica para elegir el controlador óptimo en cada escenario: tiempo de respuesta, error de respuesta, o esfuerzo, que se traduce en sobrenivel porcentual.

Hasta el momento, el controlador PID ajustado que se desarrolló con la herramienta SISOTOOL de MATLAB, se perfila como el mejor para el sistema Planta 3 Tanques, pues aunque la integral del valor absoluto de la función del error actuante es mayor que dos de los controladores PID calculados (según los criterios ISE e ITSE), son justamente los dos que tienen un sobrenivel porcentual de casi 50%, que sería muy peligroso para el correcto funcionamiento de la planta, al representar con dicho valor, un alto riesgo de desbordamiento del primer tanque.

Además, el error de respuesta, cuantificado en este caso por el criterio IAE, representa un porcentaje de rendimiento cercano al 80% (77.97%), que si bien no es el mejor de todos, es un valor muy bueno, si se considera que los controladores PID adicionales fueron calculados utilizando la función optimPID, la cual realiza

adicionalmente un ajuste óptimo de los mismos. Finalmente, entre todos los controladores PID, es el único que cumple con todas las especificaciones de diseño establecidas, según los resultados mostrados en la Tabla 4.5.

Con el fin de confirmar si el controlador PID ajustado que se desarrolló con la herramienta SISOTOOL de MATLAB, es realmente el mejor para el sistema Planta 3 Tanques, se construye la siguiente tabla para efectos de comparación:

| Parámetro | Controladores PID | | | | |
|----------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|---------------|---------------|
| | SISOTOOL | ISE | IAE | ITSE | ITAE |
| Valor pico [cm] | 1.02684 | 1.39758 | 1.15822 | 1.49421 | 1.10009 |
| S.P. | 2.684% | 39.758% | 15.822% | 49.421% | 10.009% |
| T _s [sec] | 50.6 | 58.6 | 180.2 | 48.3 | 144.7 |
| e _{ss} [cm] | 0 | 0.014423 | 0.004092 | 0.000708 | 0.000023 |
| Error | 0% | 1.4423% | 0.4092% | 0.0708% | 0.0023% |
| Cumplimiento | SÍ | NO | NO | NO | NO |
| Criterio IAE (Rendimiento) | 163.7154 (77.97%) | 100.2925 (95.754%) | 423.5666 (4.227%) | 85.295 (100%) | 438.4956 (0%) |

Tabla 4.7. Análisis Comparativo de los Parámetros Característicos de la Curva de Respuesta y del Criterio IAE de los Controladores PID

Con base en las consideraciones que se han tenido presentes, en los análisis realizados, y en los resultados obtenidos en toda esta sección, se concluye que el controlador PID ajustado que se desarrolló con la herramienta SISOTOOL de MATLAB, es el mejor para el sistema Planta 3 Tanques.

CONCLUSIONES

1. El diseño de los tanques y reservorio, cumplió con las expectativas de dimensionamiento, permitiendo una operación uniforme, estable y confiable de la bomba.
2. El diseño de la parte eléctrica de la planta, cumplió con las expectativas de dimensionamiento y selección de equipos, ofreciendo una protección sólida para la operación de la planta, sin que se haya presentado algún problema de naturaleza eléctrica en los equipos o sus dispositivos constitutivos propiamente dichos, a más de un año de su instalación, desde la etapa de pruebas hasta su uso frecuente en las Prácticas de Laboratorio de la asignatura “CONTROL AUTOMÁTICO” de la FIEC.
3. La construcción de los tanques y reservorio, y la bomba instalada, todos de acero inoxidable, cumplieron con las expectativas del material, evitando la corrosión y la proliferación de algas, al contener agua de manera continua para la operación de la planta, sin que se haya contaminado a más de un año de su instalación.
4. La tapa del reservorio y los protectores de los visores de nivel de agua de los tanques, hechos de acrílico, superaron las expectativas del material, en cuanto a su transparencia, resistencia al impacto y al rayado,

conservando su aspecto estético y cumpliendo perfectamente con su función protectora para la que fueron diseñados.

5. La estructura de soporte cumplió con las expectativas de construcción, y su pintado y lacado acrílicos, han cumplido con las expectativas del material, manteniéndose sin daños y conservando su aspecto estético sin aparente deterioro, respectivamente.
6. Gracias al diseño y al ajuste de las configuraciones del modelo de SIMULINK para la adquisición de datos de la planta, ésta se identificó usando la herramienta IDENT de MATLAB, obteniendo un 95,56% de precisión.
7. Gracias a la técnica empleada para el diseño del controlador PID usando la herramienta SISOTOOL de MATLAB, se obtuvo un controlador que necesitó sólo un pequeño ajuste para cumplir con las especificaciones de diseño definidas para la operación de la planta.
8. El análisis de los resultados de las simulaciones de prueba del controlador PID desarrollado, demostró que los modelos de SIMULINK creados para tal efecto son correctos, que la función de transferencia teórica linealizada del tercer tanque está bien calculada, y que los modelos matemáticos representados están correctamente desarrollados.

9. El filtrado de la señal para la minimización del ruido, facilitó el análisis final del comportamiento de la planta durante su operación bajo el gobierno del controlador PID ajustado.
10. El resultado de la implementación del controlador PID ajustado sobre la planta fue exitoso, cumpliendo, según las expectativas, con todas las especificaciones de diseño definidas para el comportamiento de la planta durante su operación.
11. Los índices de comportamiento son una herramienta importante para comparar el rendimiento de diferentes controladores aplicados sobre una misma planta, estudiando su respuesta y acción de control; así como también para el desarrollo de nuevos controladores, al tratarse de un método de ajuste como el enfoque utilizado en la Función optimPID para MATLAB.
12. El análisis de los resultados de los índices de comportamiento de los controladores PID, demostró que el controlador desarrollado usando la herramienta SISOTOOL de MATLAB es mejor que los controladores calculados usando la Función optimPID para MATLAB.
13. El análisis de los resultados de los índices de comportamiento de los controladores PID, permite concluir que la herramienta SISOTOOL de MATLAB es muy poderosa y extremadamente útil para el desarrollo de controladores; y que el Método Manual de Prueba y Error utilizado para

ajustar el controlador, fue suficiente y efectivo para conseguir los resultados deseados que finalmente fueron obtenidos.

14. Las mejores demostraciones de las aplicaciones didácticas que ya se tienen de esta planta, son: su inclusión dentro del Programa de Prácticas de Laboratorio de la asignatura "CONTROL AUTOMÁTICO" de la FIEC, y su uso para la realización de experimentos en asignaturas de la Maestría en Automatización y Control Industrial (MACI) de la FIEC, como "SISTEMAS DISCRETOS DE CONTROL".

RECOMENDACIONES

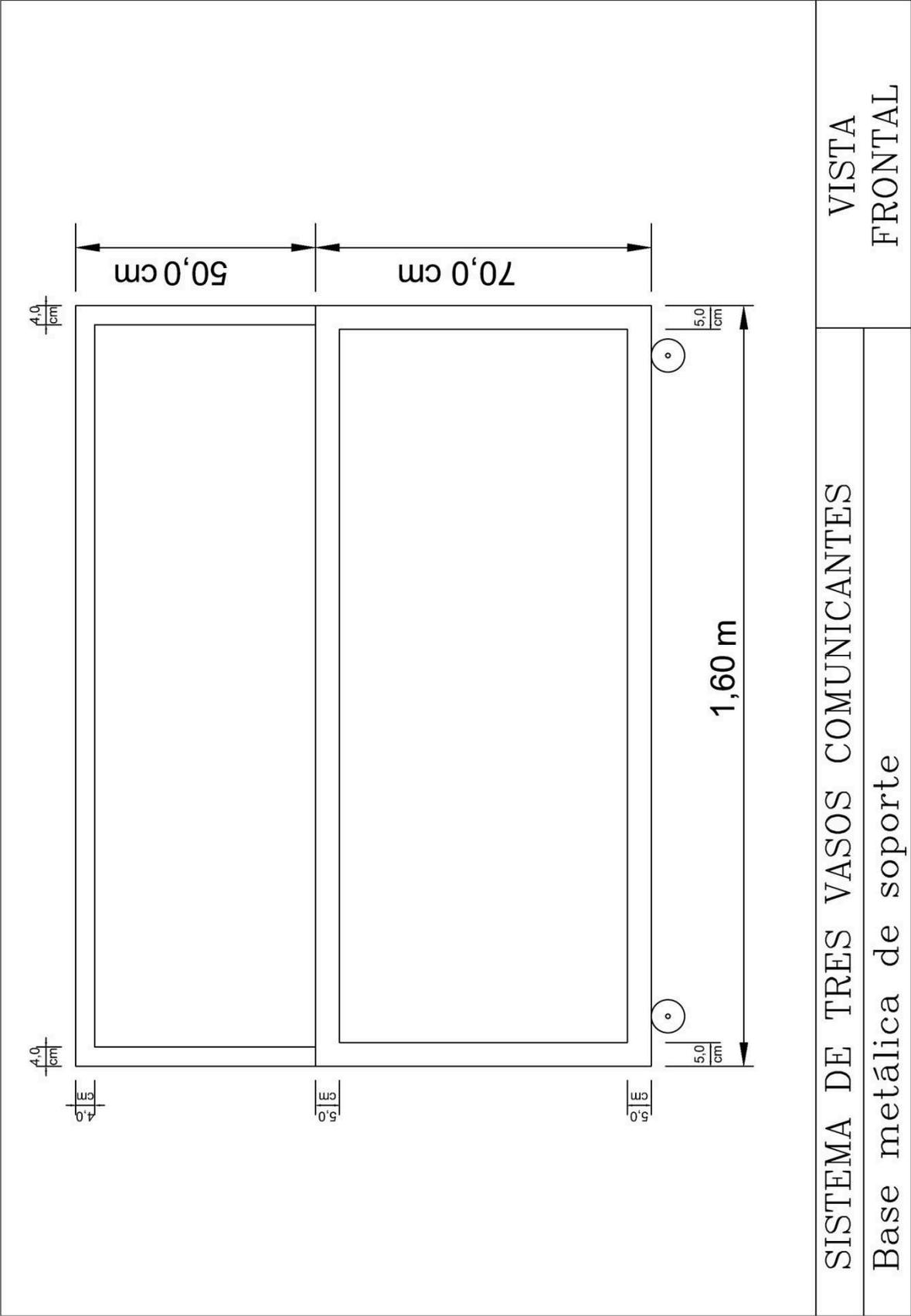
1. Si bien se ha podido comprobar que la construcción de la planta es robusta, siempre será bueno manejarla con cuidado y darle mantenimiento periódico, para alargar su vida útil y prolongar su aprovechamiento en el Laboratorio de Control Automático de la FIEC.
2. Cada vez que se vaya a utilizar la planta: verificar que el nivel de agua en el tanque reservorio esté en la referencia marcada, para no alterar el régimen de trabajo de la bomba; chequear que las válvulas de desfogue estén cerradas, que la válvula de la derivación a la salida de la bomba esté abierta, y que las válvulas de las interconexiones de los tanques estén en las posiciones especificadas en este Proyecto de Graduación; y revisar que las llaves de los visores de nivel de cada tanque estén totalmente abiertas.
3. Desarrollar controladores PID por diferentes métodos para el ajuste de controladores, u otro tipo de controladores, y compararlos contra el controlador PID desarrollado y ajustado en este Proyecto de Graduación, por medio de los Índices de Comportamiento, para obtener conclusiones a partir de los resultados que se obtengan.

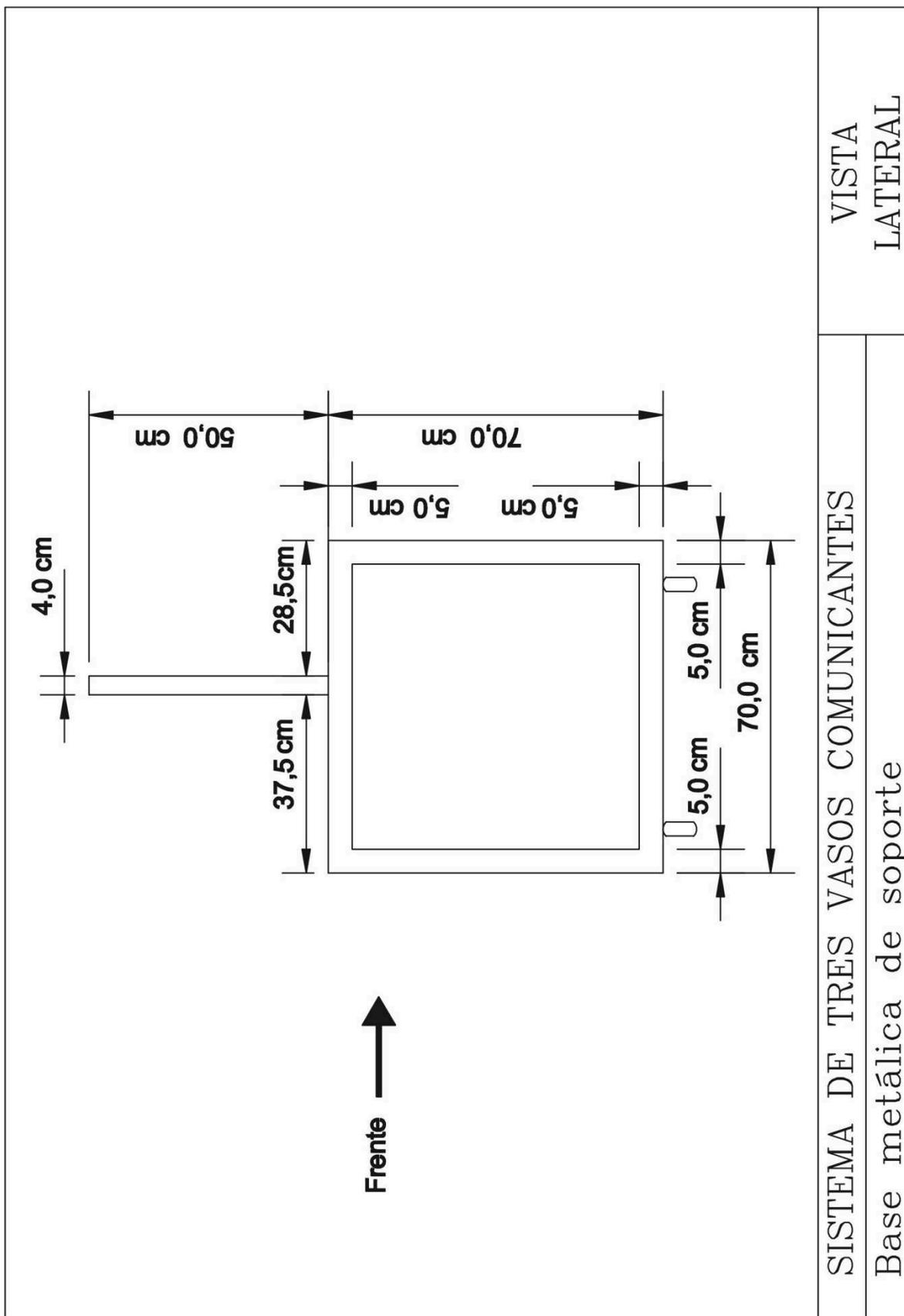
4. Sería importante comparar el controlador PID desarrollado y ajustado en este Proyecto de Graduación, contra los controladores calculados para esta misma planta en el Proyecto de Graduación “Análisis Comparativo del Funcionamiento de Dos Sistemas de Control Automático de Nivel de Agua en una Planta de Tres Vasos Comunicantes, diseñados aplicando los Métodos de Control de Reubicación de Polos del Modelo Interno y de Lógica Difusa, diseñados e implementados usando MATLAB/SIMULINK” realizado por Franklin Illich Kuonquí Gaínza, por medio de los Índices de Comportamiento, para obtener conclusiones a partir de los resultados que se obtengan.
5. Al comprobar su utilidad en este Proyecto de Graduación, se propone considerar el tema “Índices de Comportamiento” para ser incluido dentro del programa de la asignatura “CONTROL AUTOMÁTICO” de la FIEC.
6. Como un futuro proyecto a nivel de pregrado, se propone habilitar el modo de funcionamiento local de la planta, de manera que pueda trabajar independientemente del cFP y ser manejada directamente a través del panel eléctrico, por medio de sus botoneras y de la operación manual del variador de frecuencia.
7. Como un futuro proyecto a nivel de postgrado, se propone reemplazar las válvulas de bola de las interconexiones de los tanques por electroválvulas, e incorporar un medidor de flujo entre la bomba y el

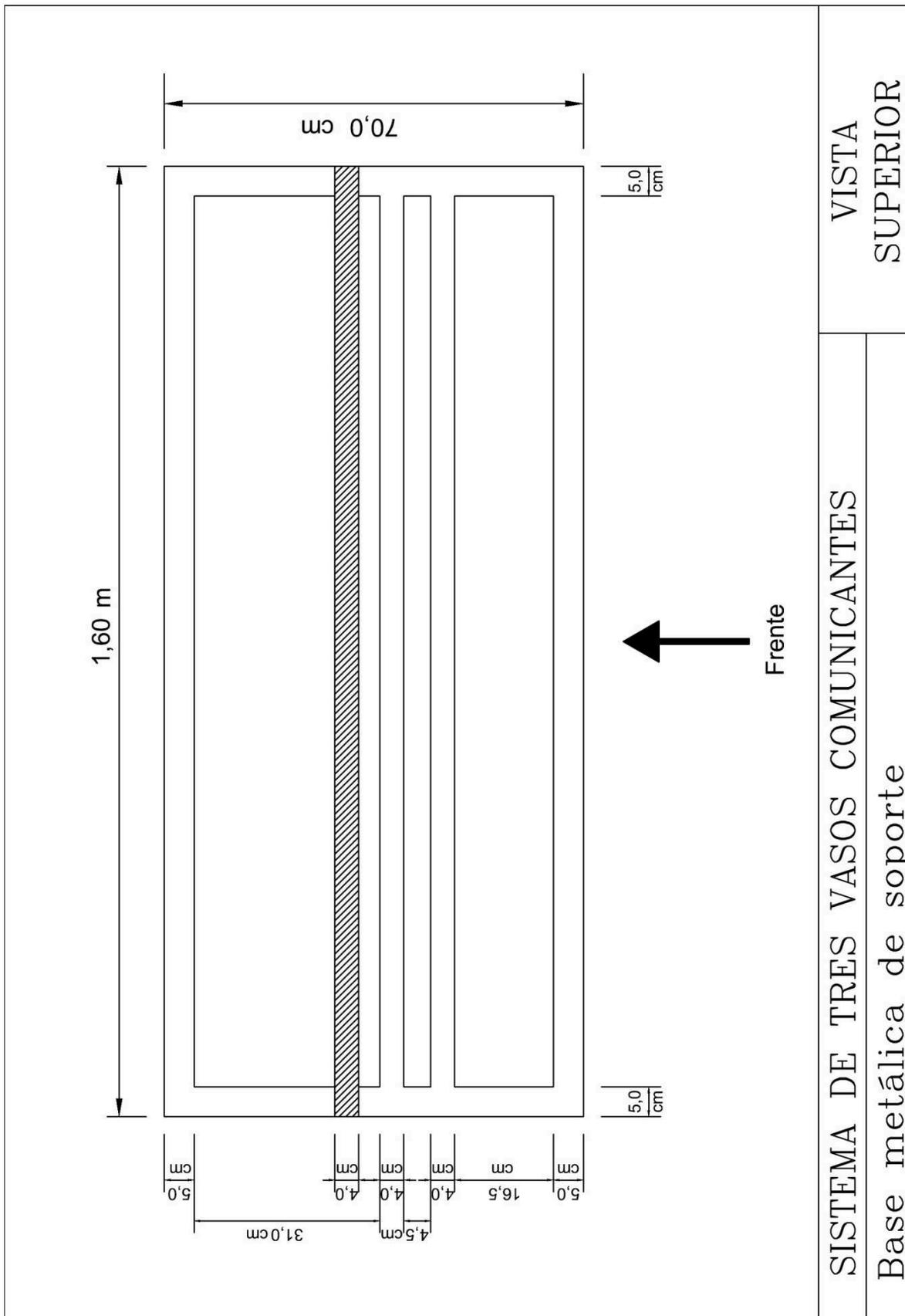
primer tanque, para introducir nuevos elementos de control, que permitan aumentar y diversificar las aplicaciones didácticas que se pueden obtener de esta planta.

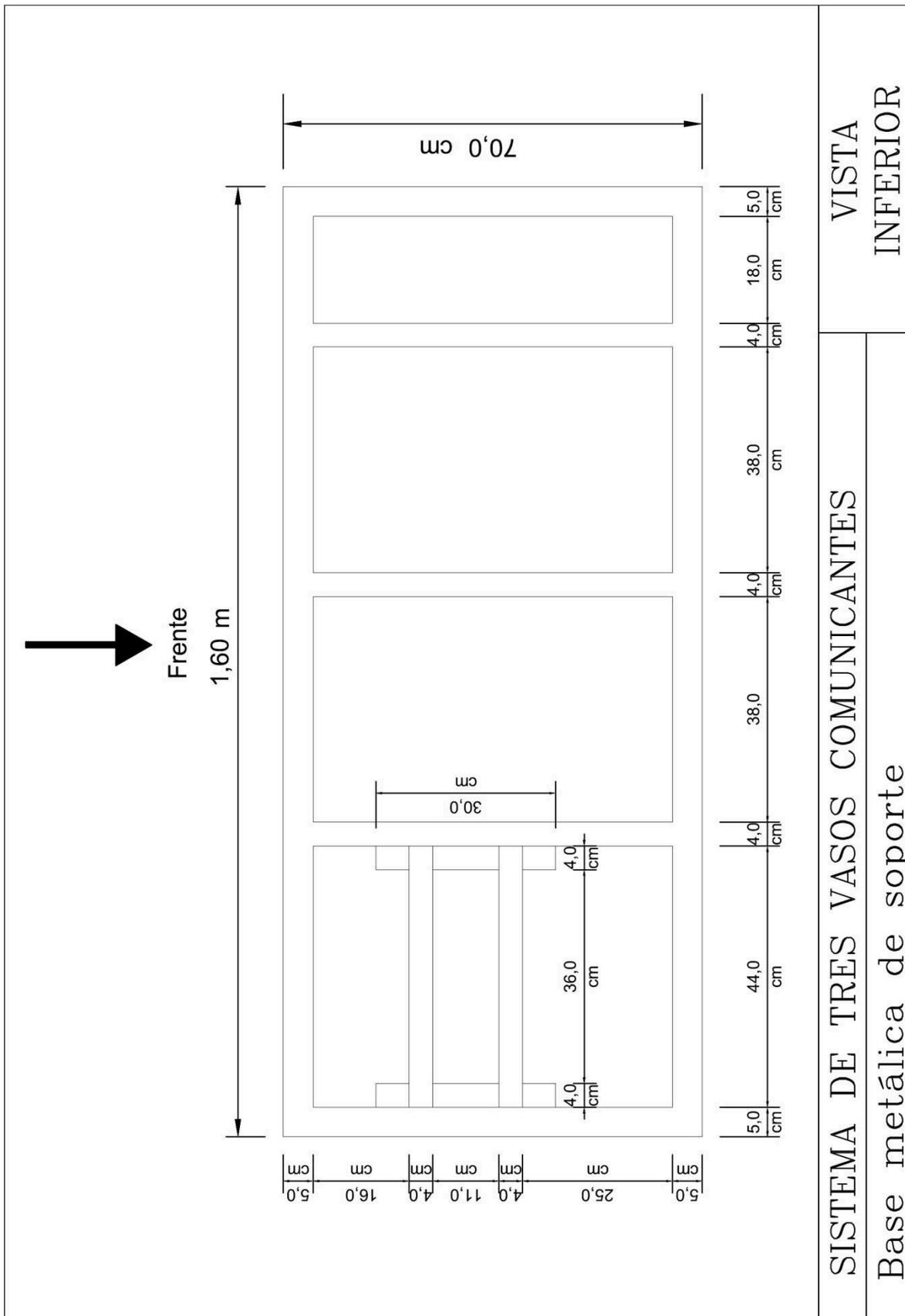
ANEXOS

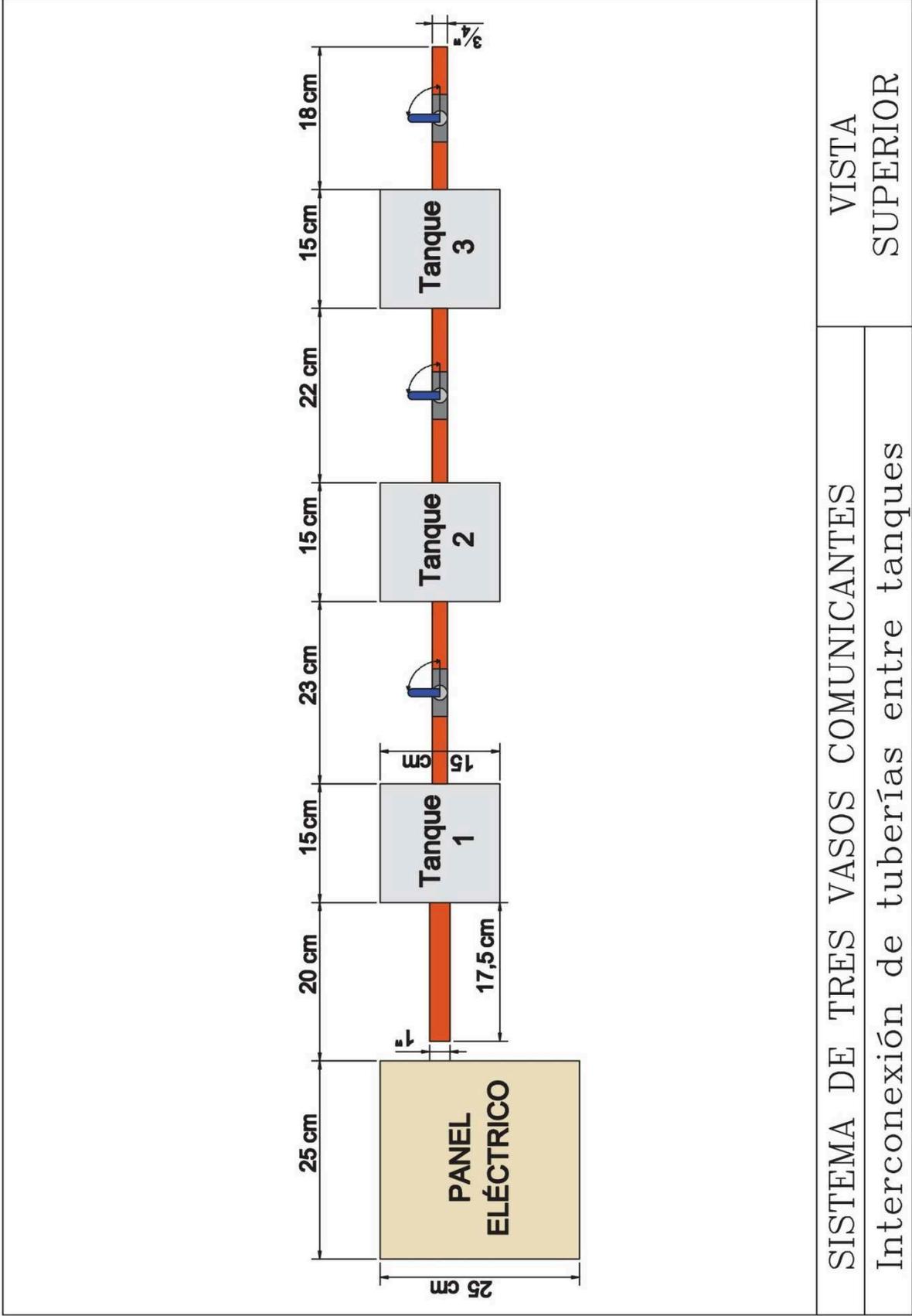
ANEXO A. Vistas del Diseño de la Planta







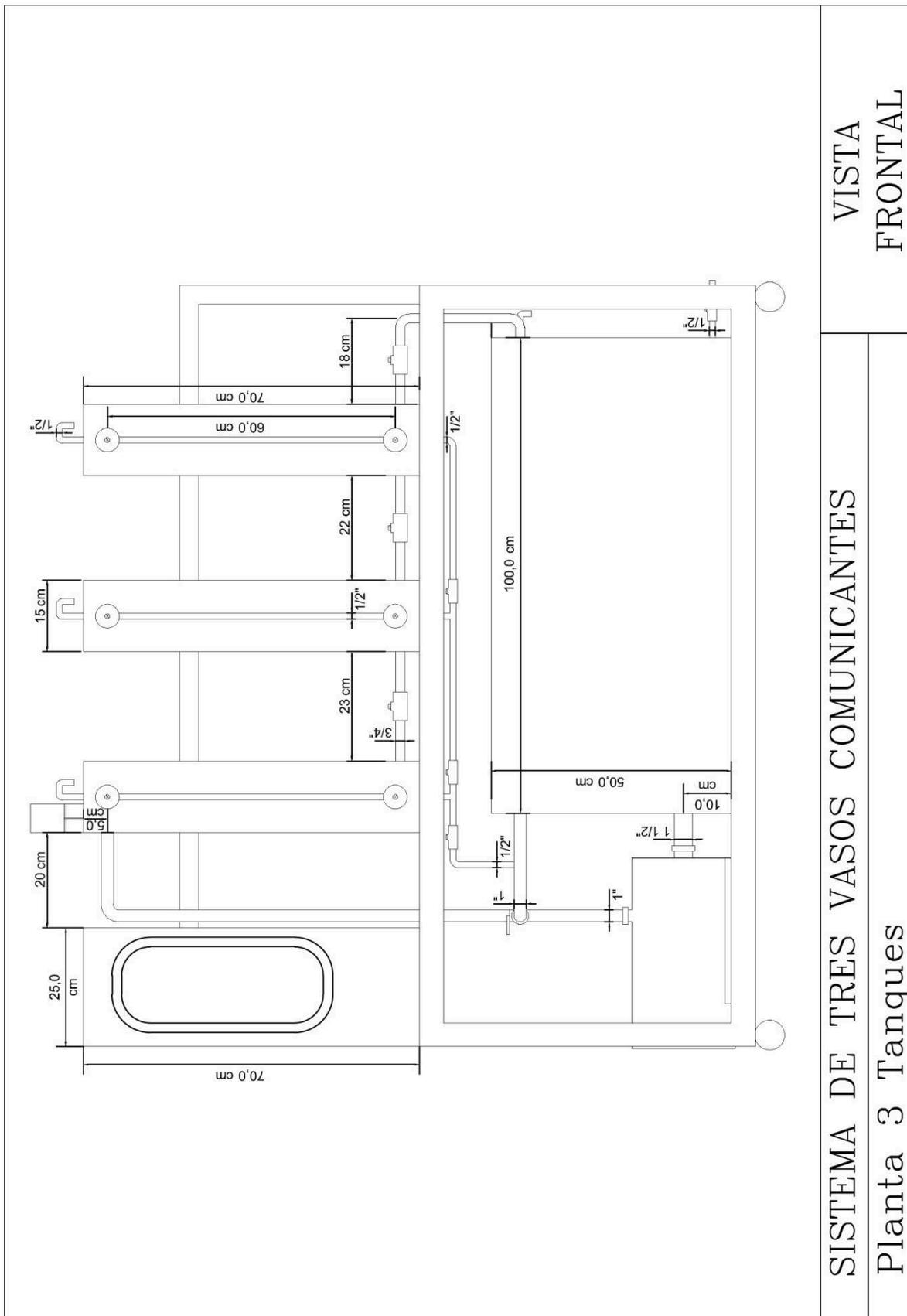




SISTEMA DE TRES VASOS COMUNICANTES

Interconexión de tuberías entre tanques

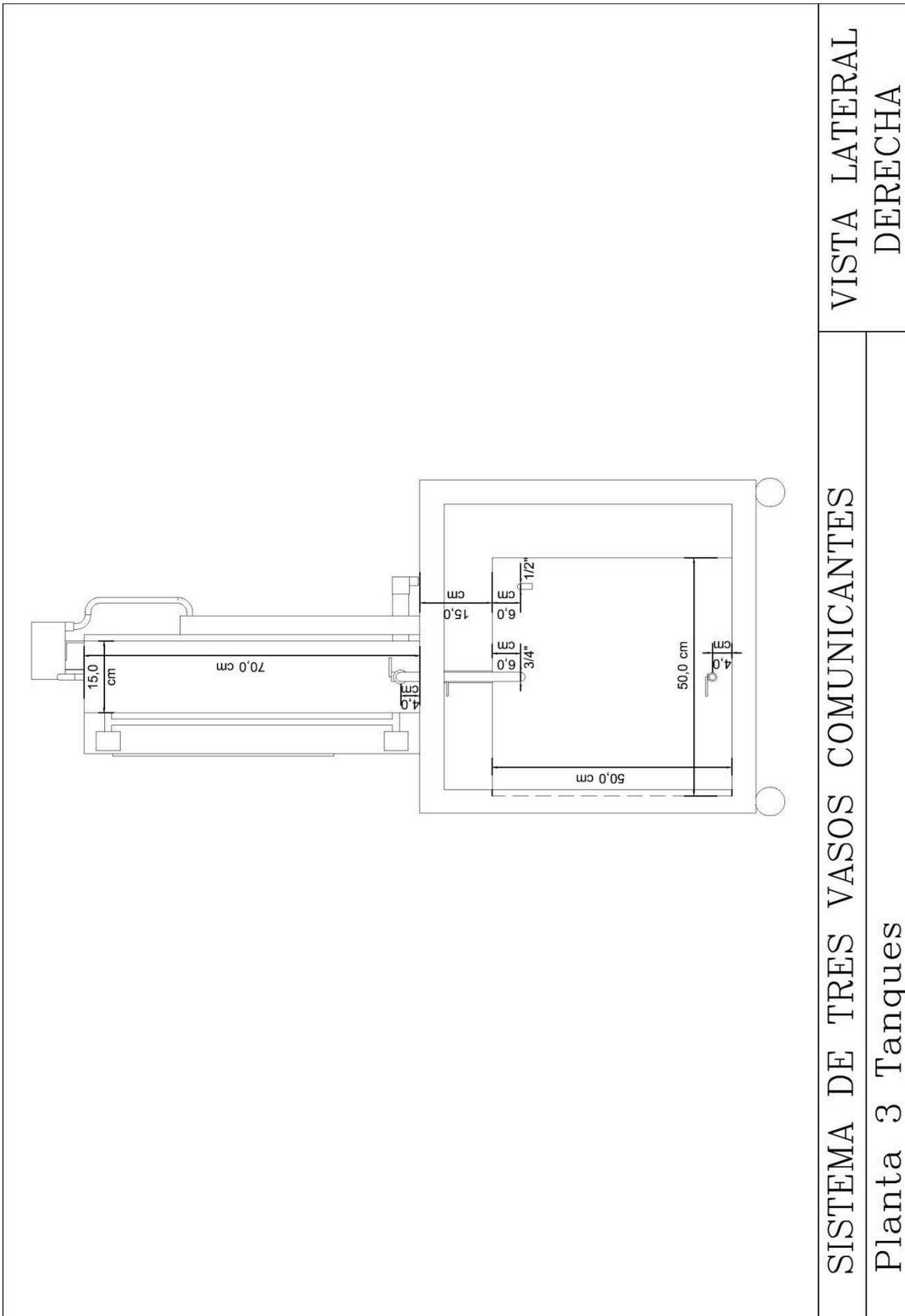
VISTA SUPERIOR



SISTEMA DE TRES VASOS COMUNICANTES

Planta 3 Tanques

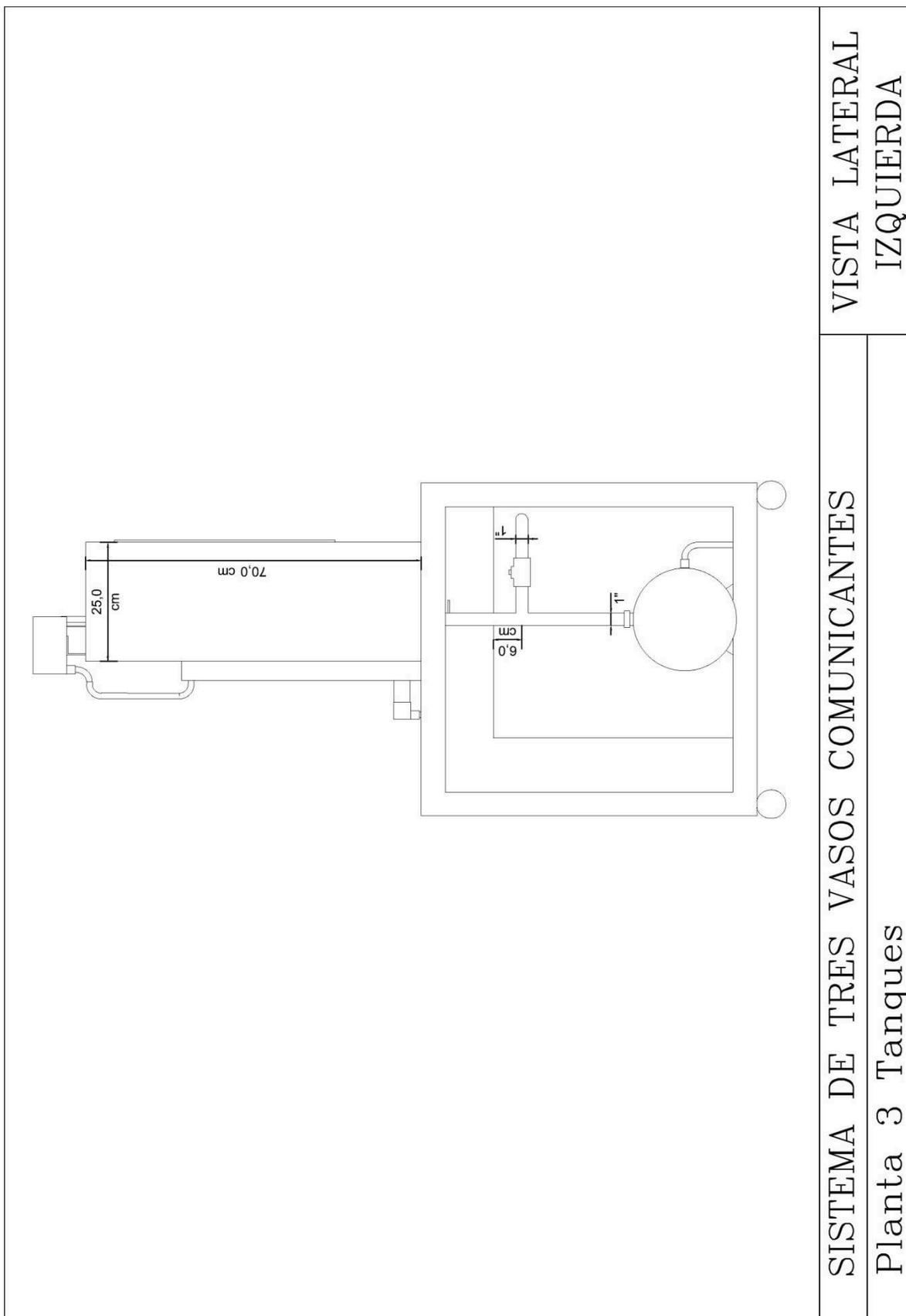
VISTA
FRONTAL

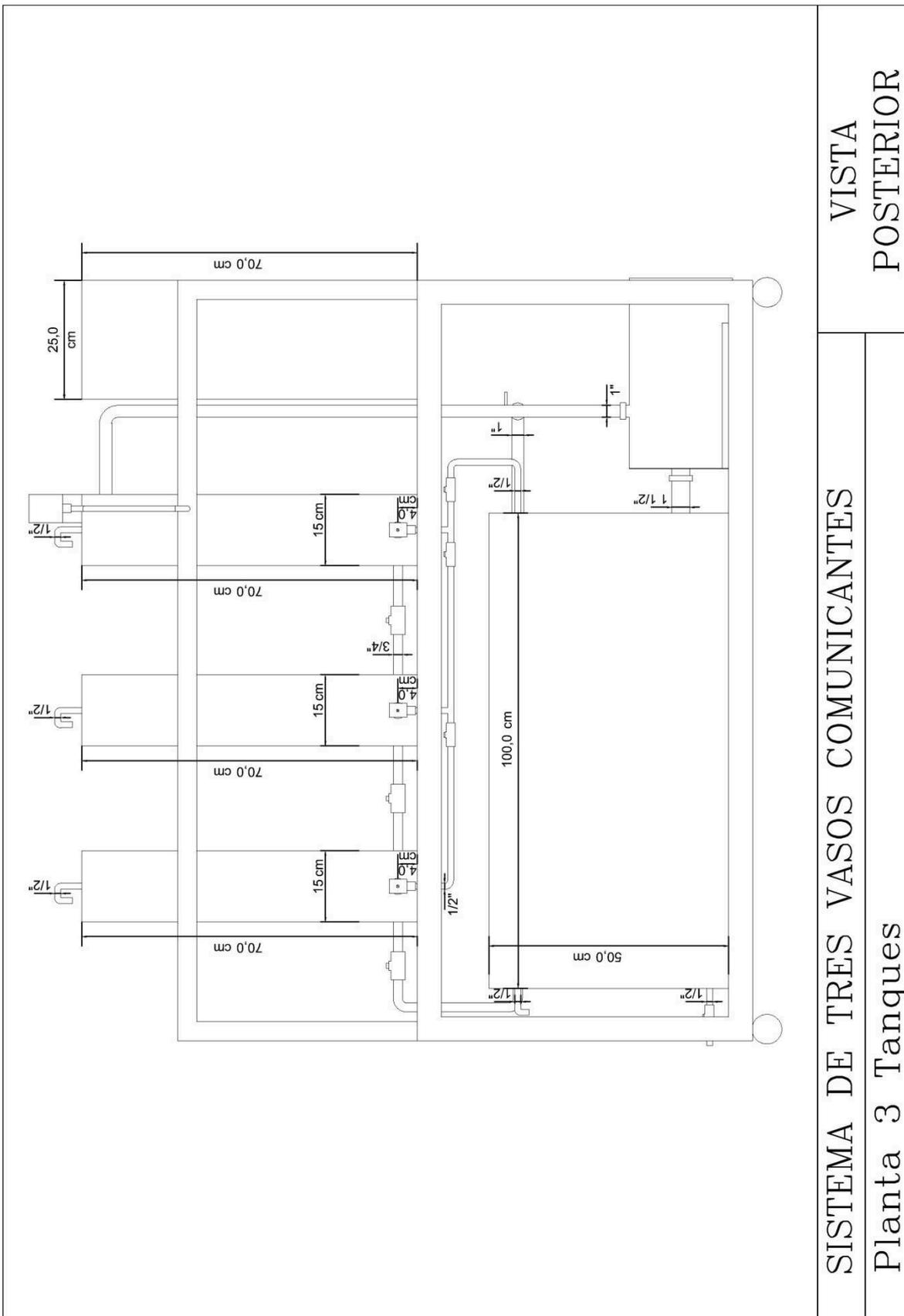


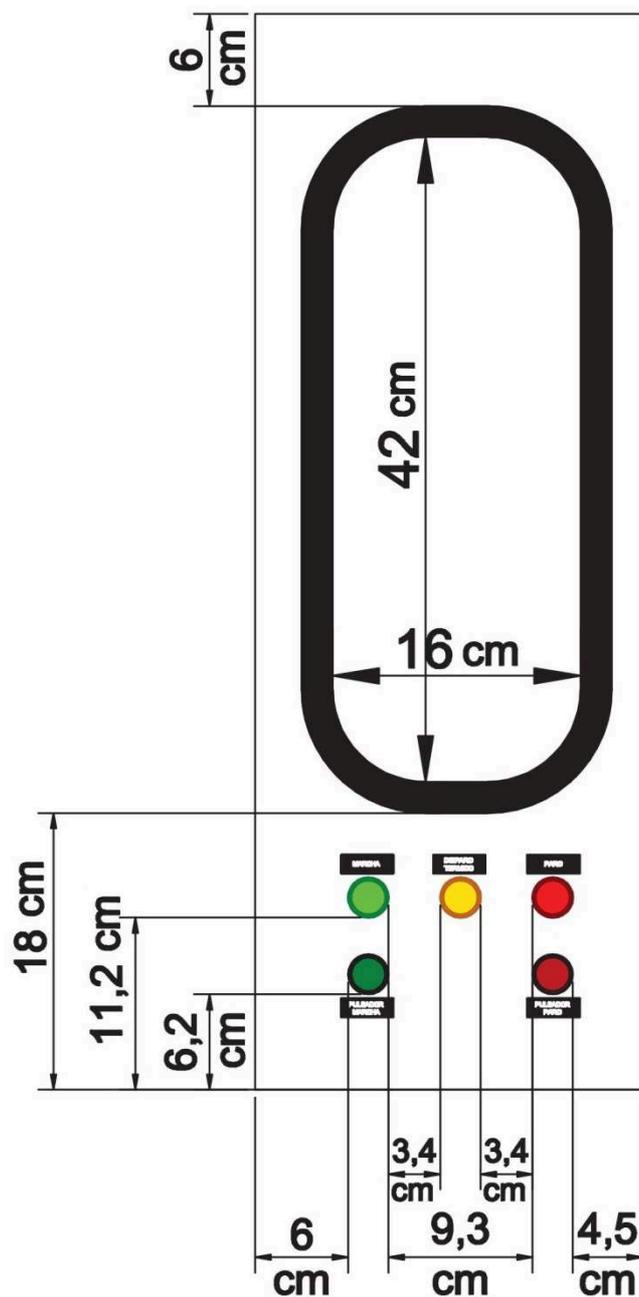
SISTEMA DE TRES VASOS COMUNICANTES

Planta 3 Tanques

VISTA LATERAL
DERECHA



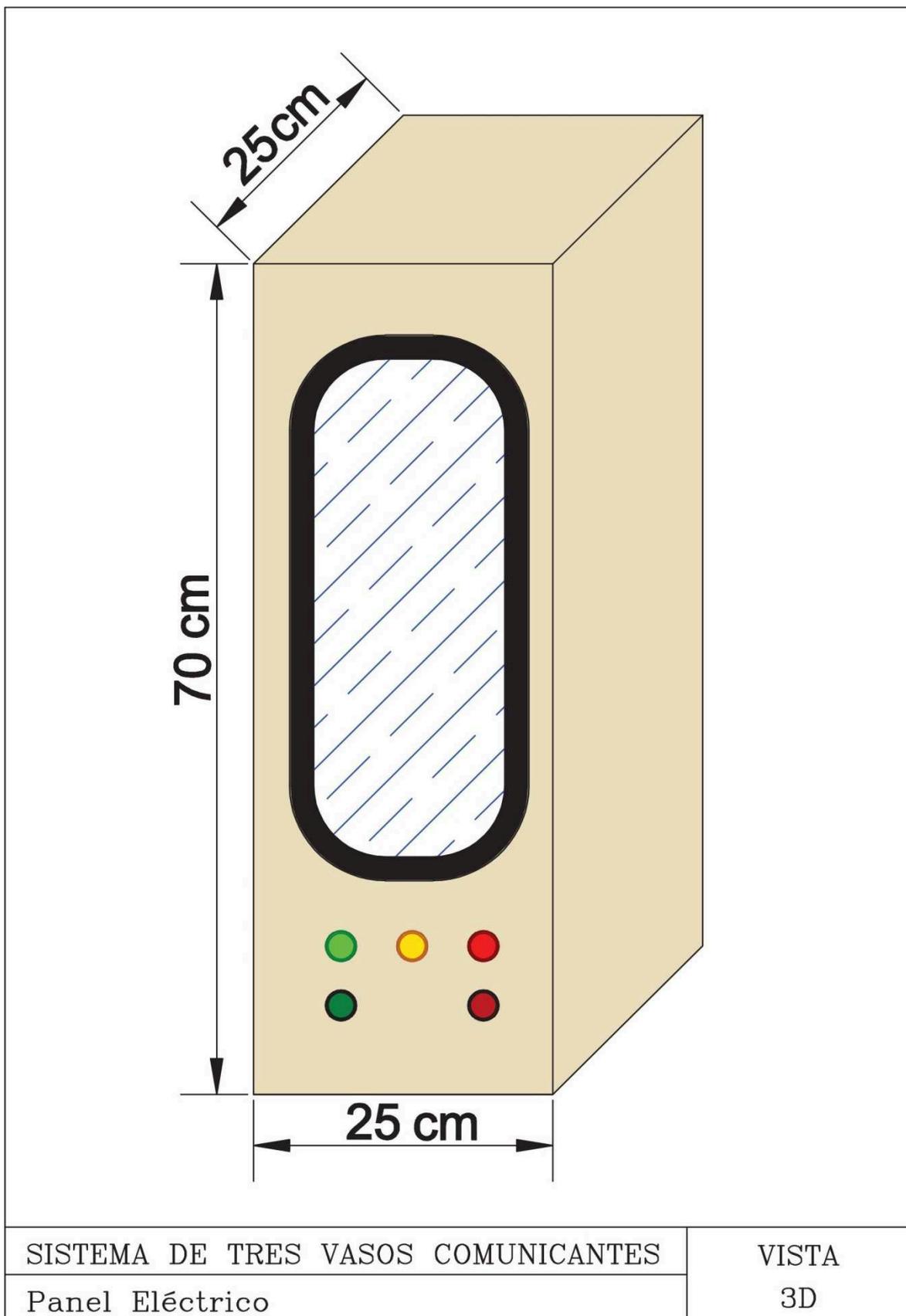


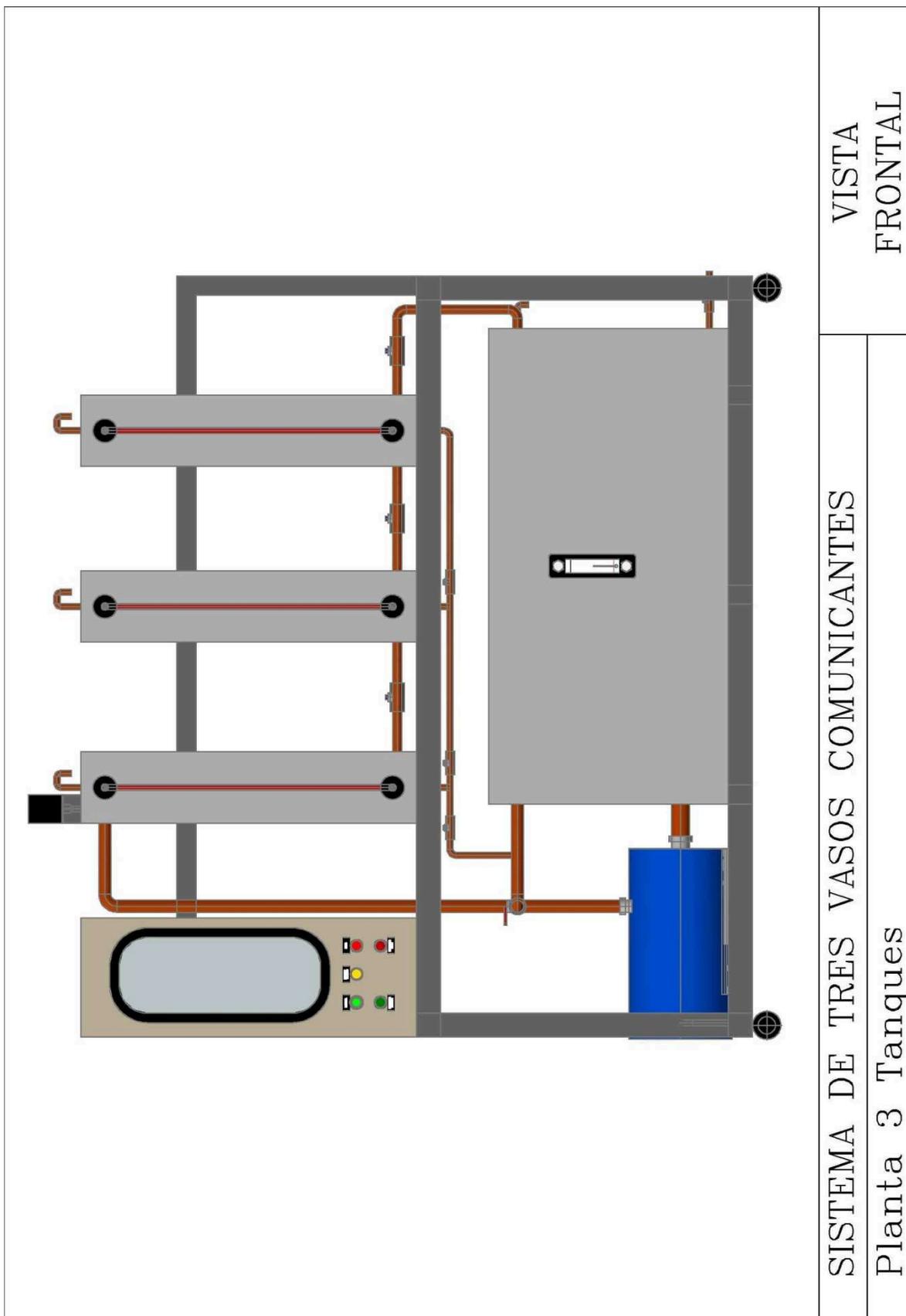


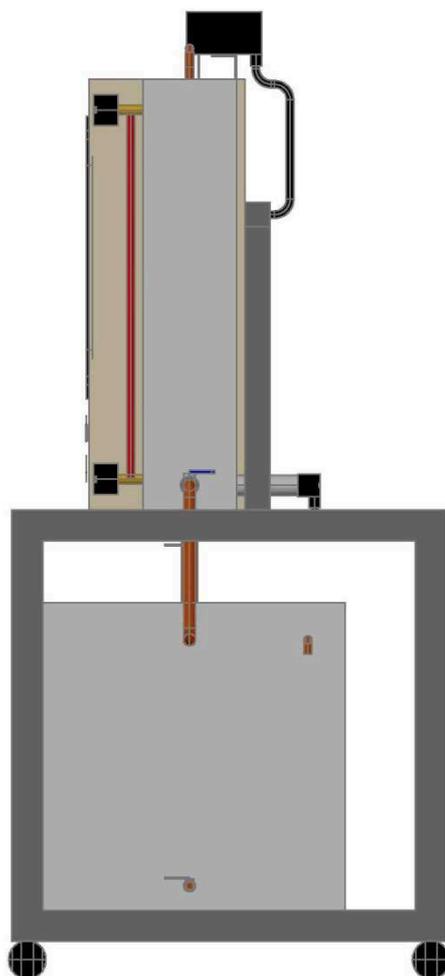
SISTEMA DE TRES VASOS COMUNICANTES

Panel Eléctrico

VISTA
FRONTAL



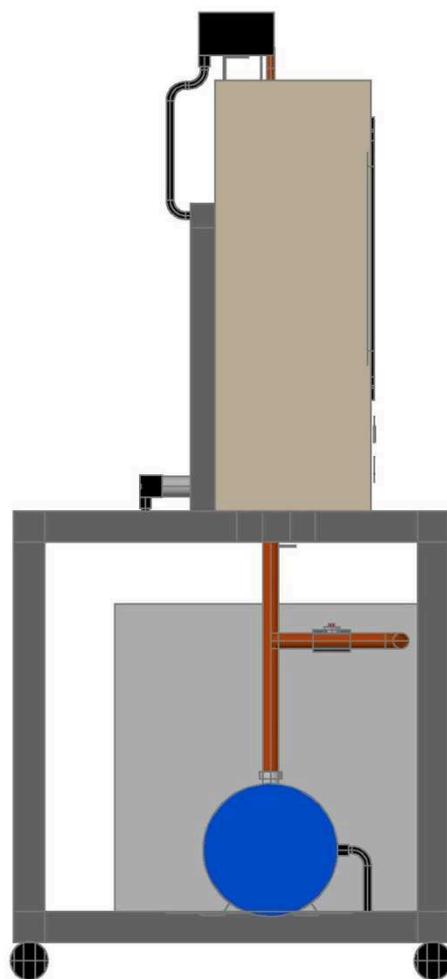




SISTEMA DE TRES VASOS COMUNICANTES

Planta 3 Tanques

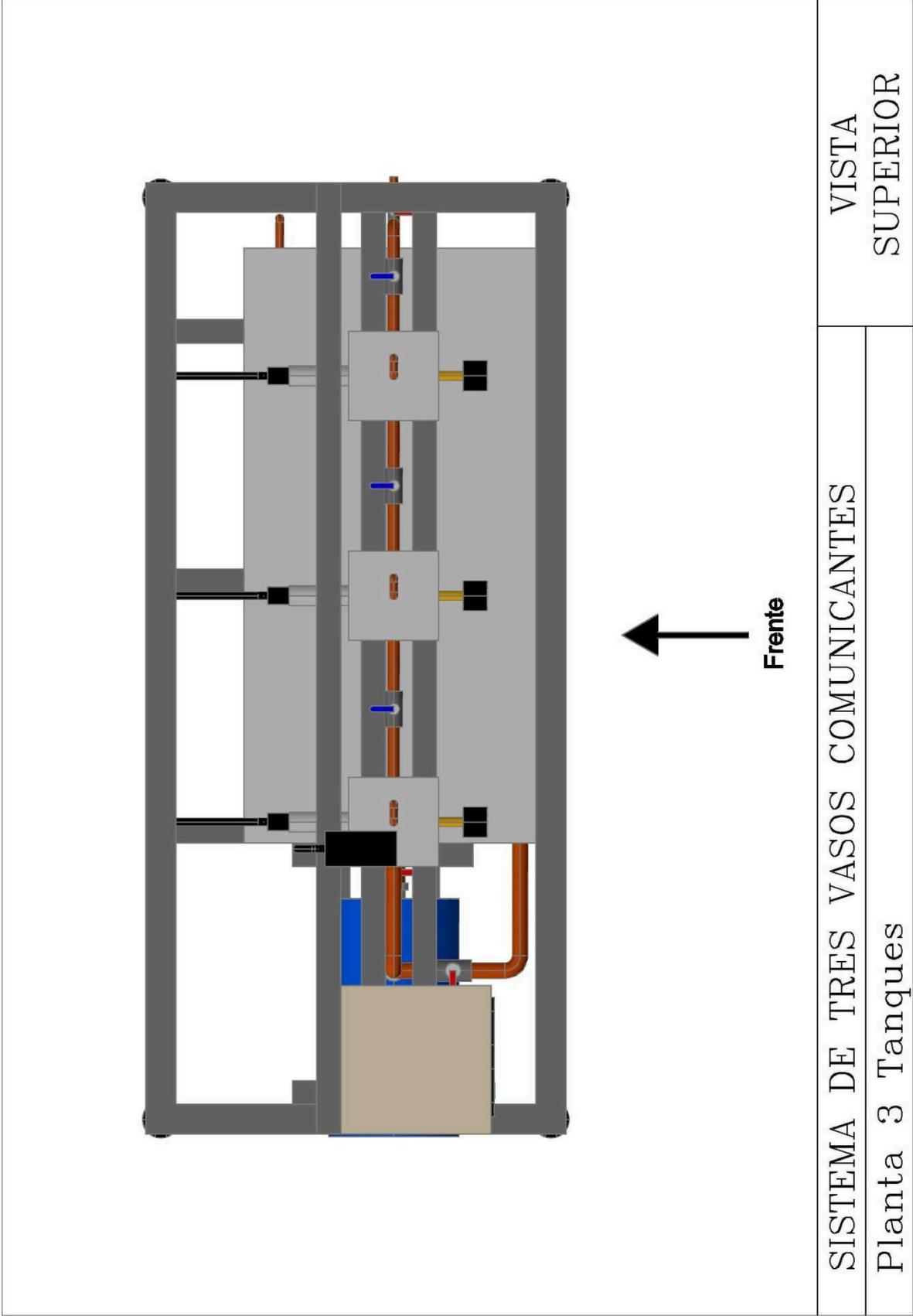
VISTA
LATERAL
DERECHA

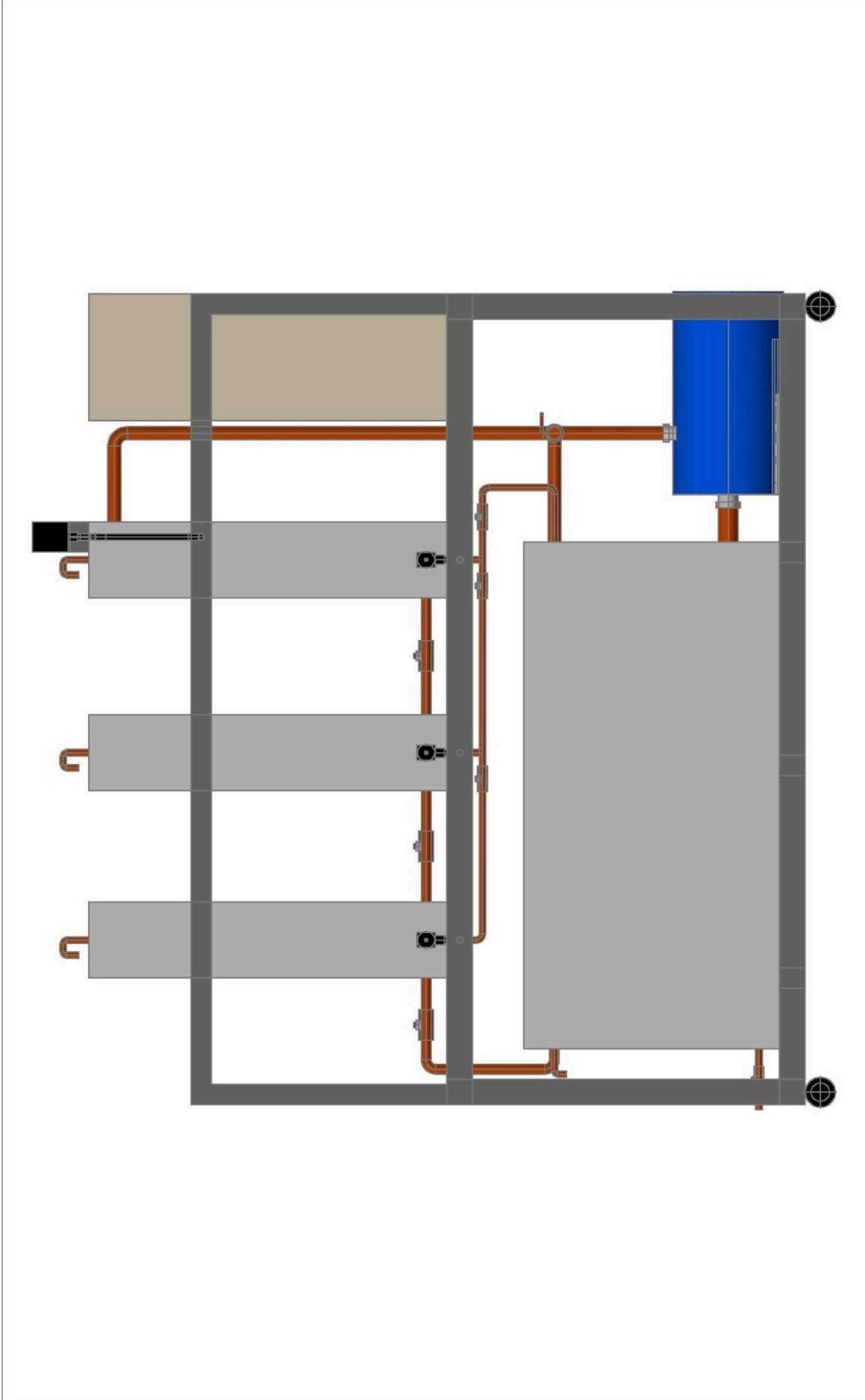


SISTEMA DE TRES VASOS COMUNICANTES

Planta 3 Tanques

VISTA
LATERAL
IZQUIERDA



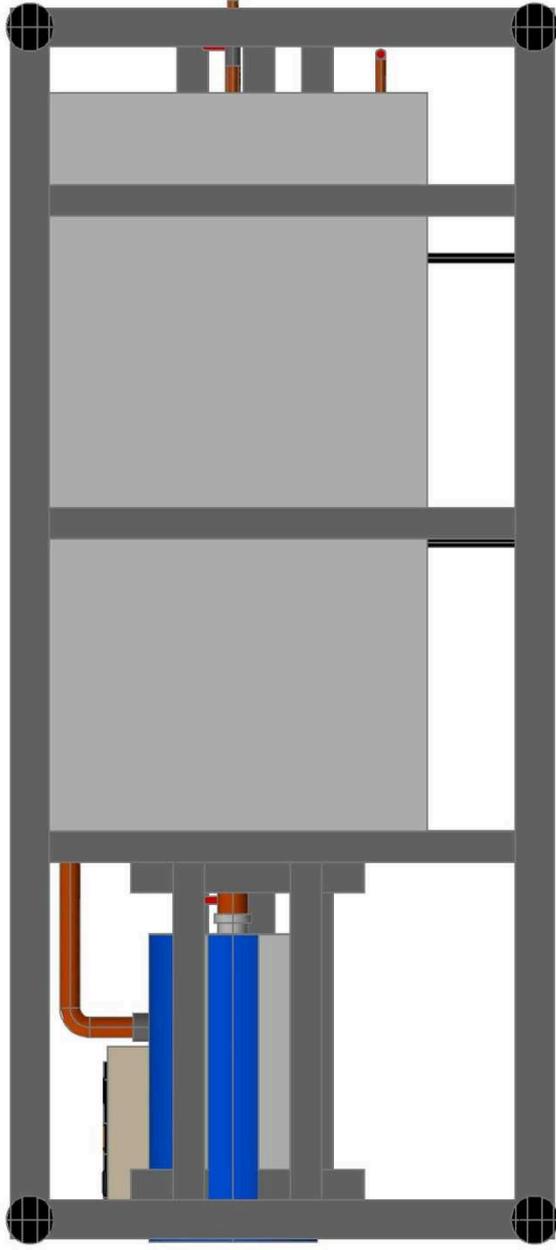


SISTEMA DE TRES VASOS COMUNICANTES

Planta 3 tanques

VISTA
POSTERIOR

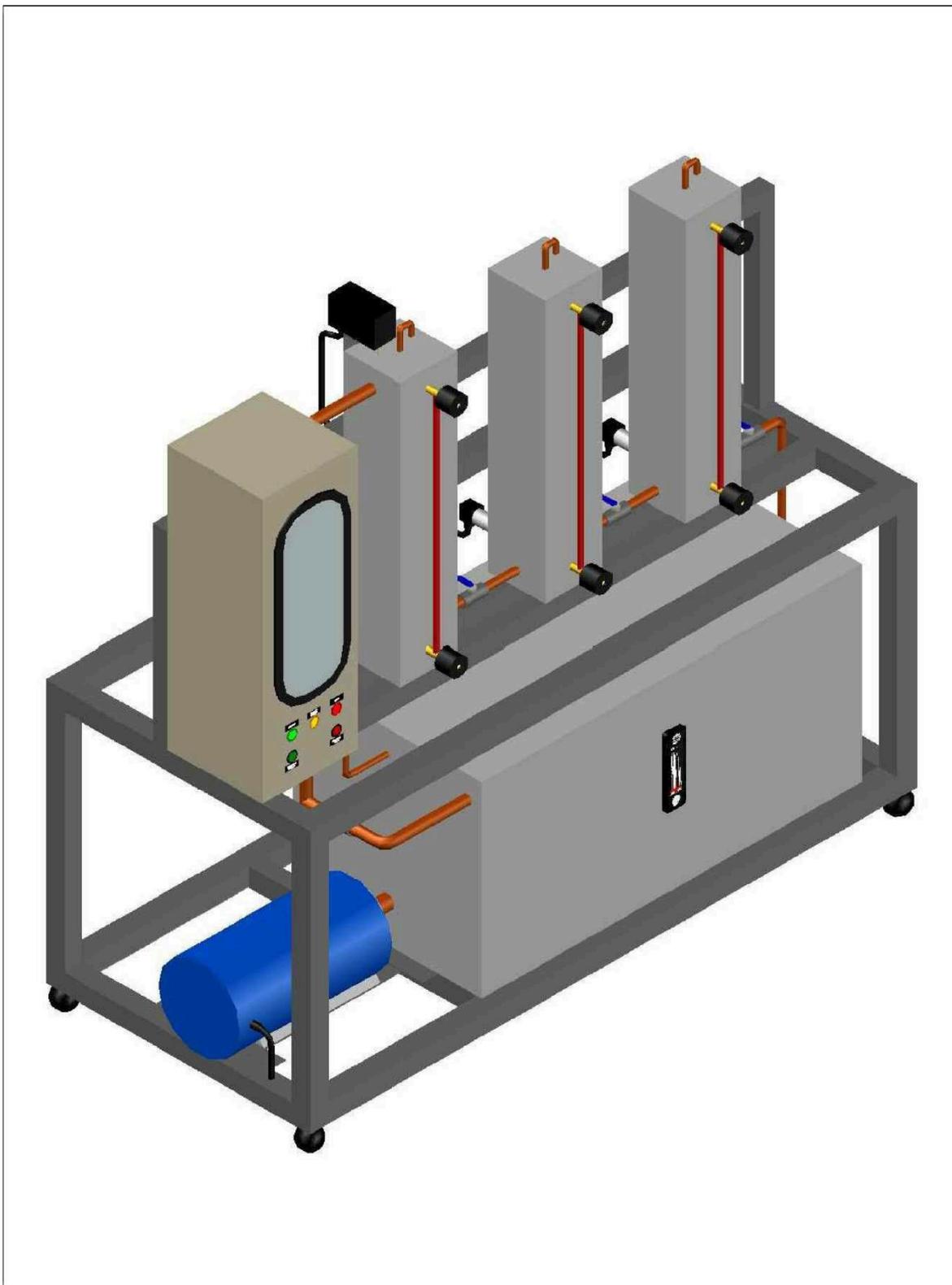
Frente
→



SISTEMA DE TRES VASOS COMUNICANTES

Planta 3 Tanques

VISTA
INFERIOR

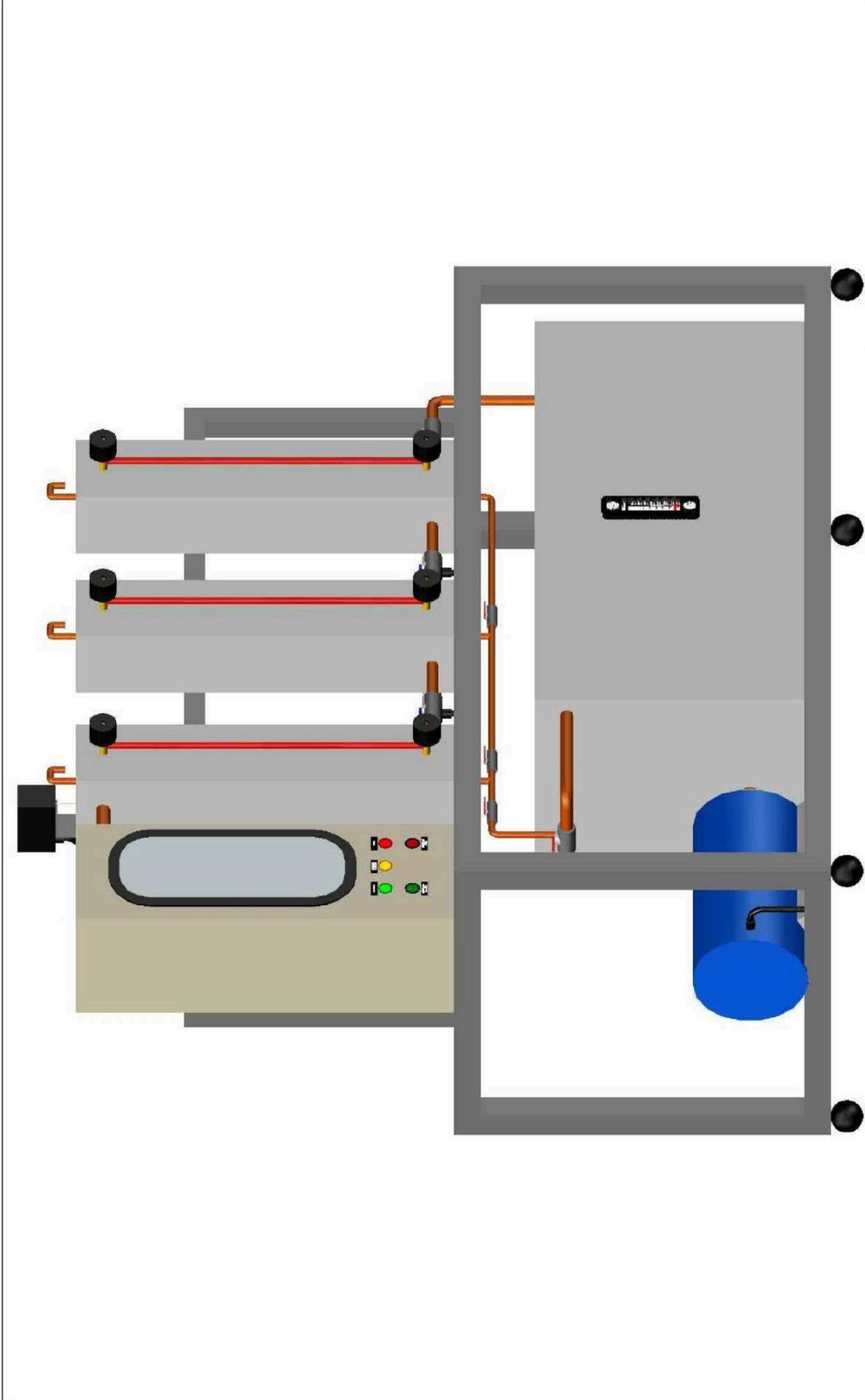


SISTEMA DE TRES VASOS COMUNICANTES

PERSPECTIVA

Planta 3 Tanques – 3D

1

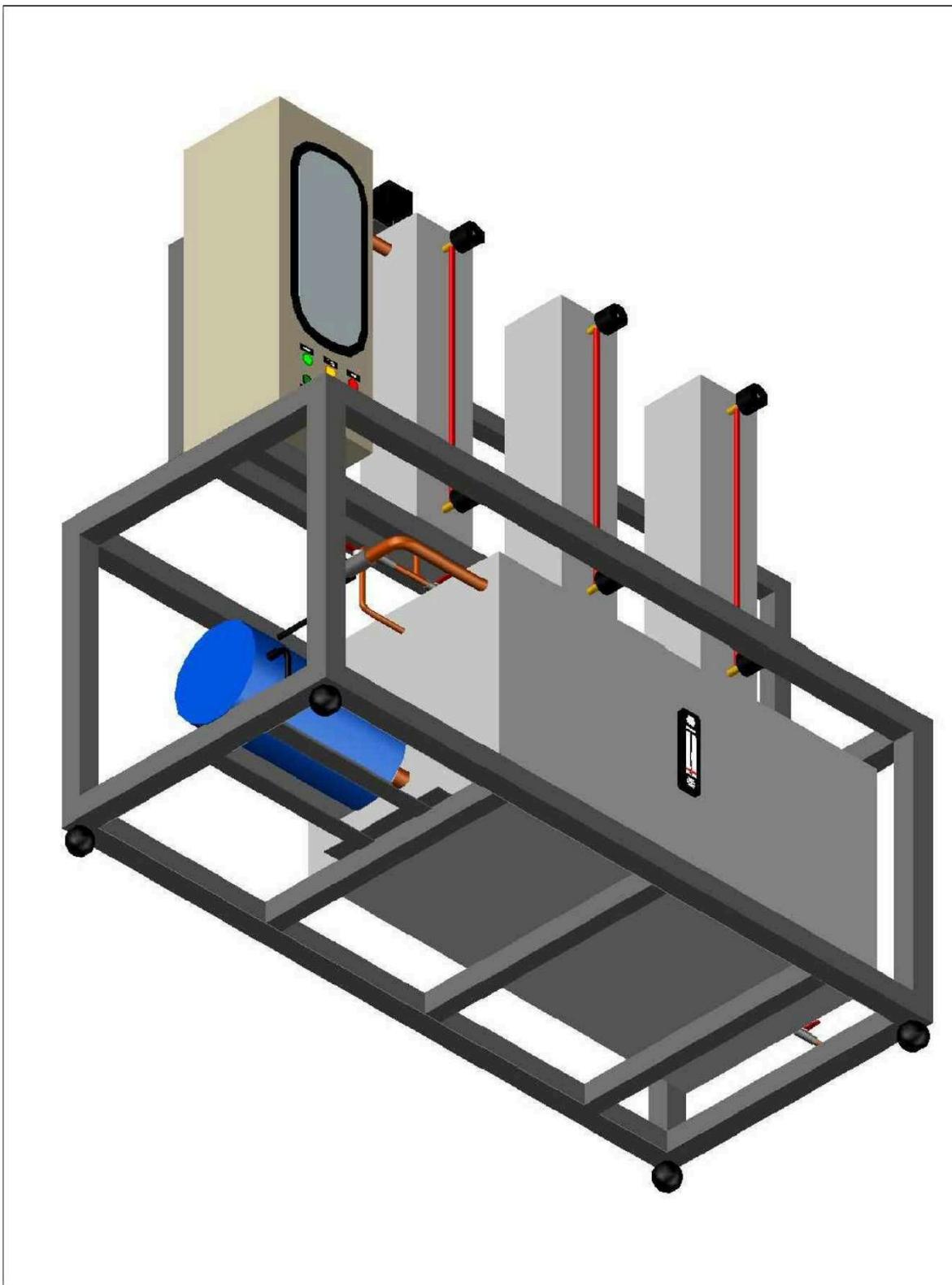


SISTEMA DE TRES VASOS COMUNICANTES

Planta 3 Tanques – 3D

PERSPECTIVA

2

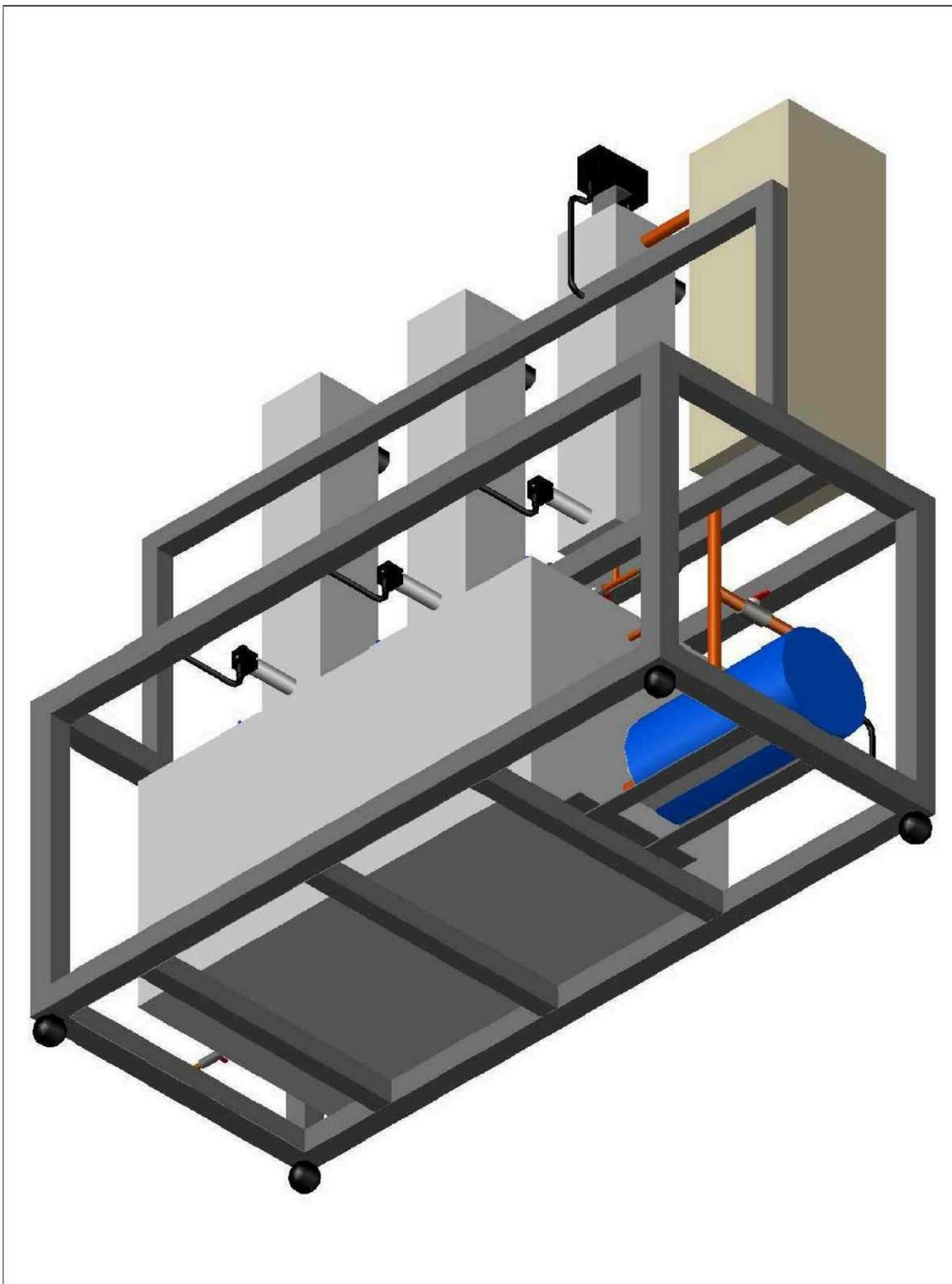


SISTEMA DE TRES VASOS COMUNICANTES

PERSPECTIVA

Planta 3 Tanques - 3D

3

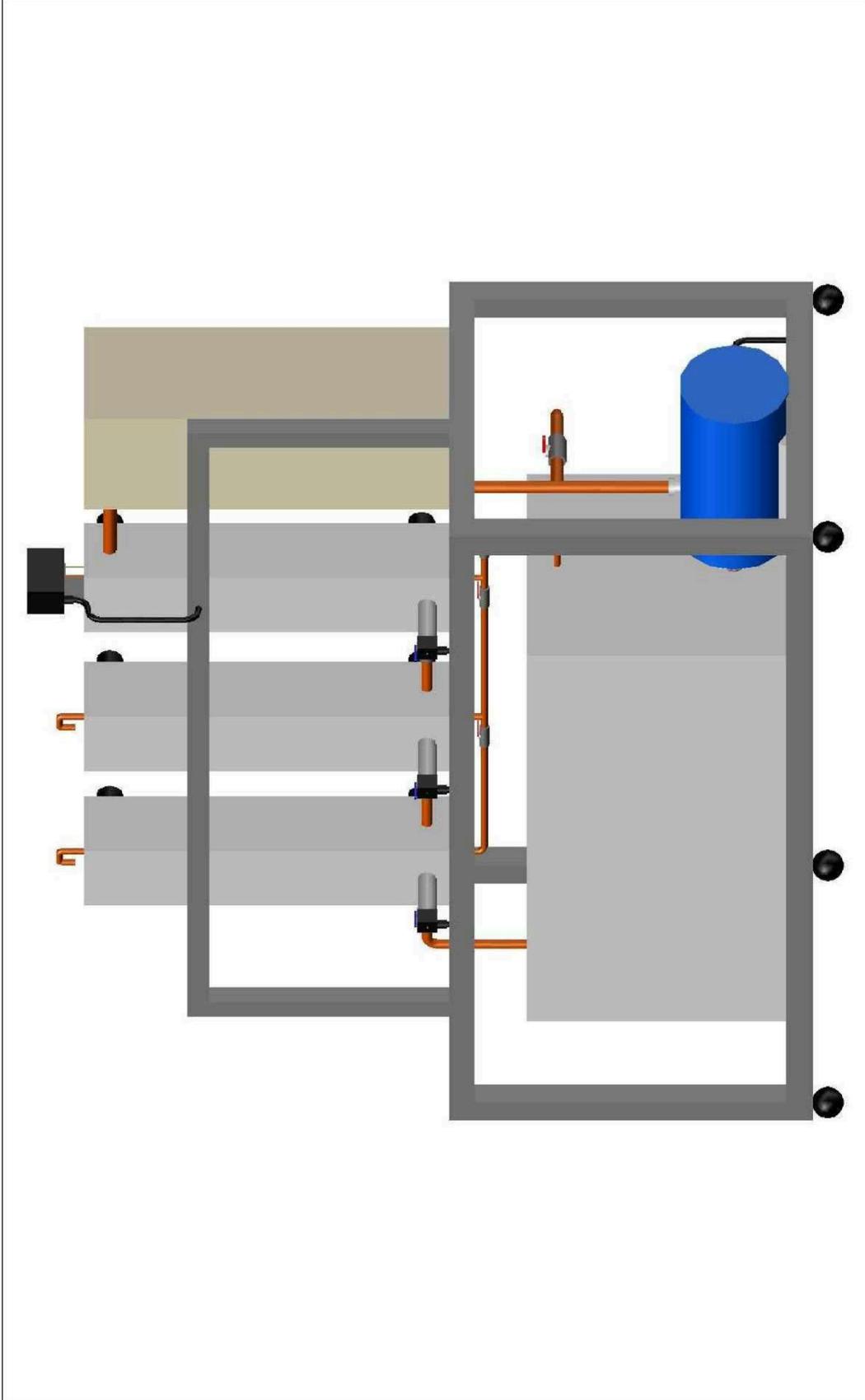


SISTEMA DE TRES VASOS COMUNICANTES

PERSPECTIVA

Planta 3 Tanques - 3D

4

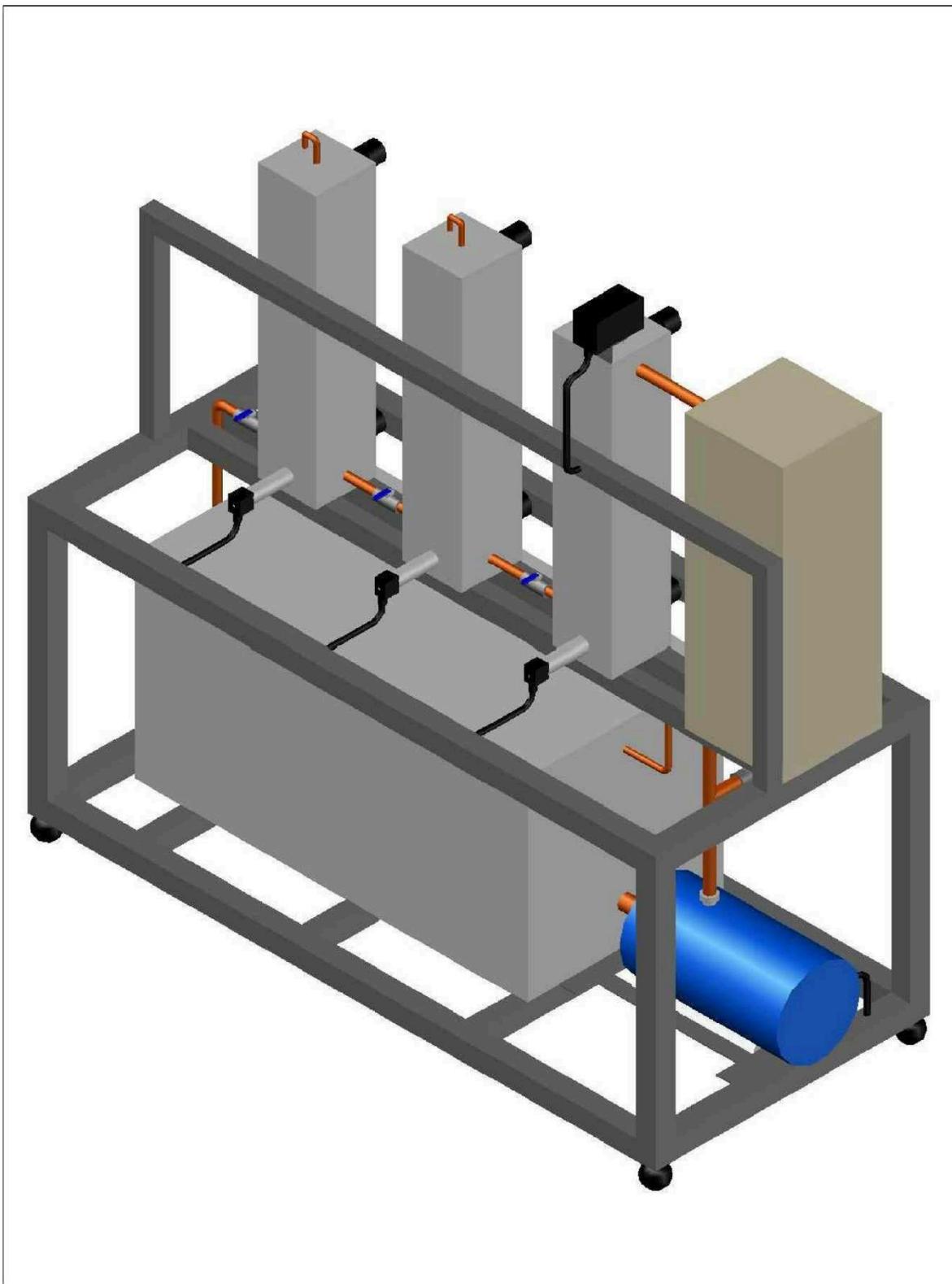


SISTEMA DE TRES VASOS COMUNICANTES

Planta 3 Tanques – 3D

PERSPECTIVA

5

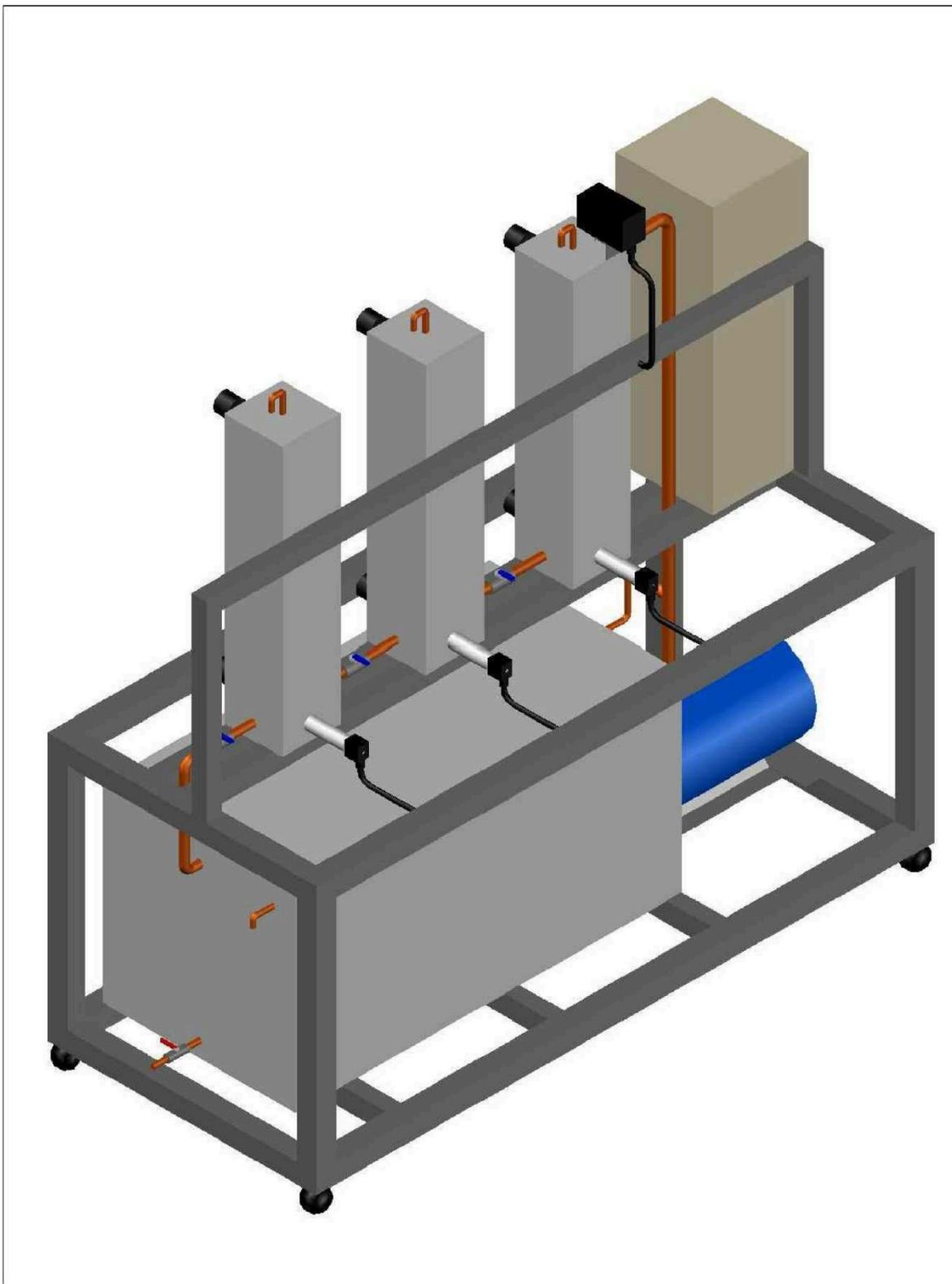


SISTEMA DE TRES VASOS COMUNICANTES

PERSPECTIVA

Planta 3 Tanques - 3D

6

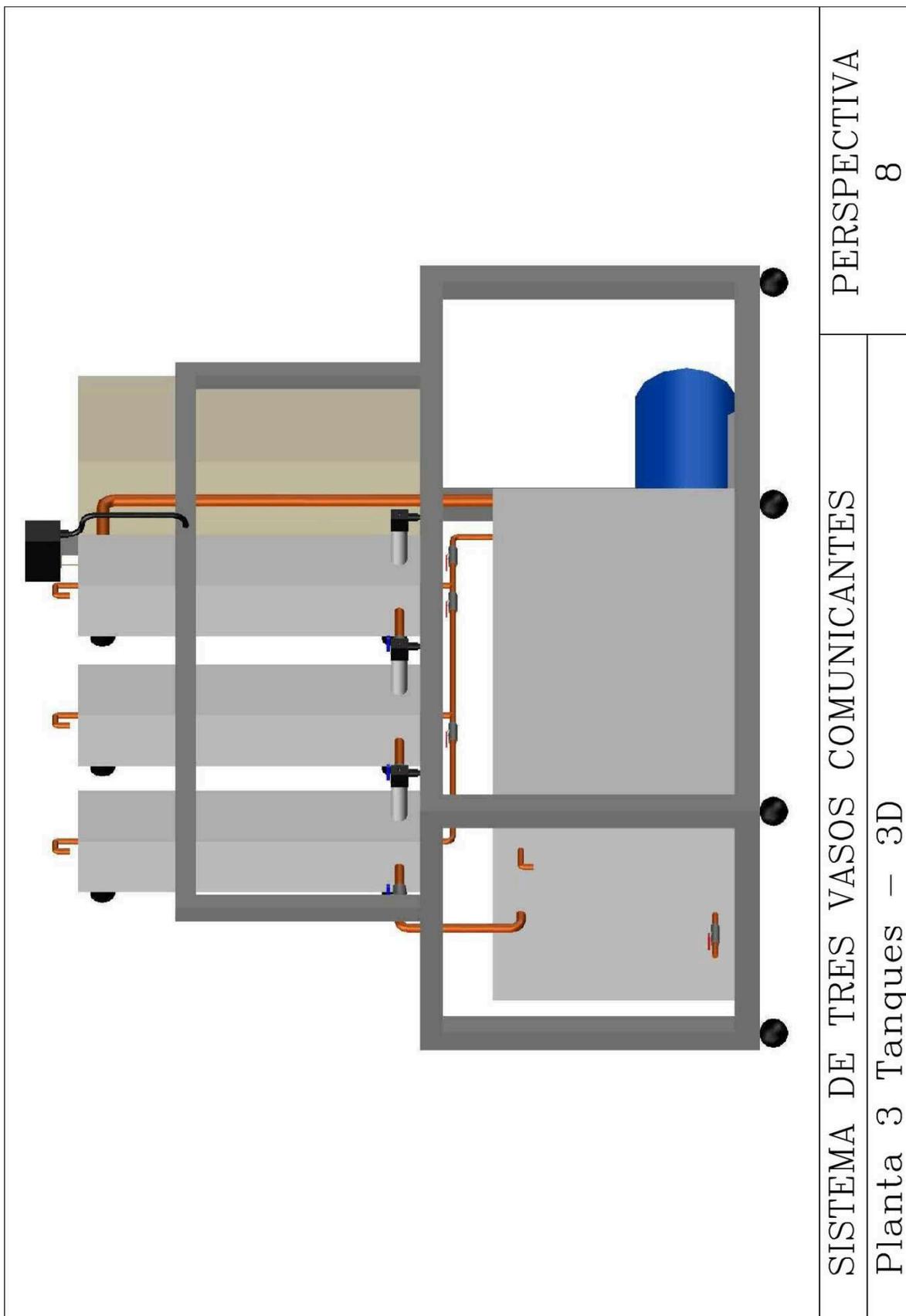


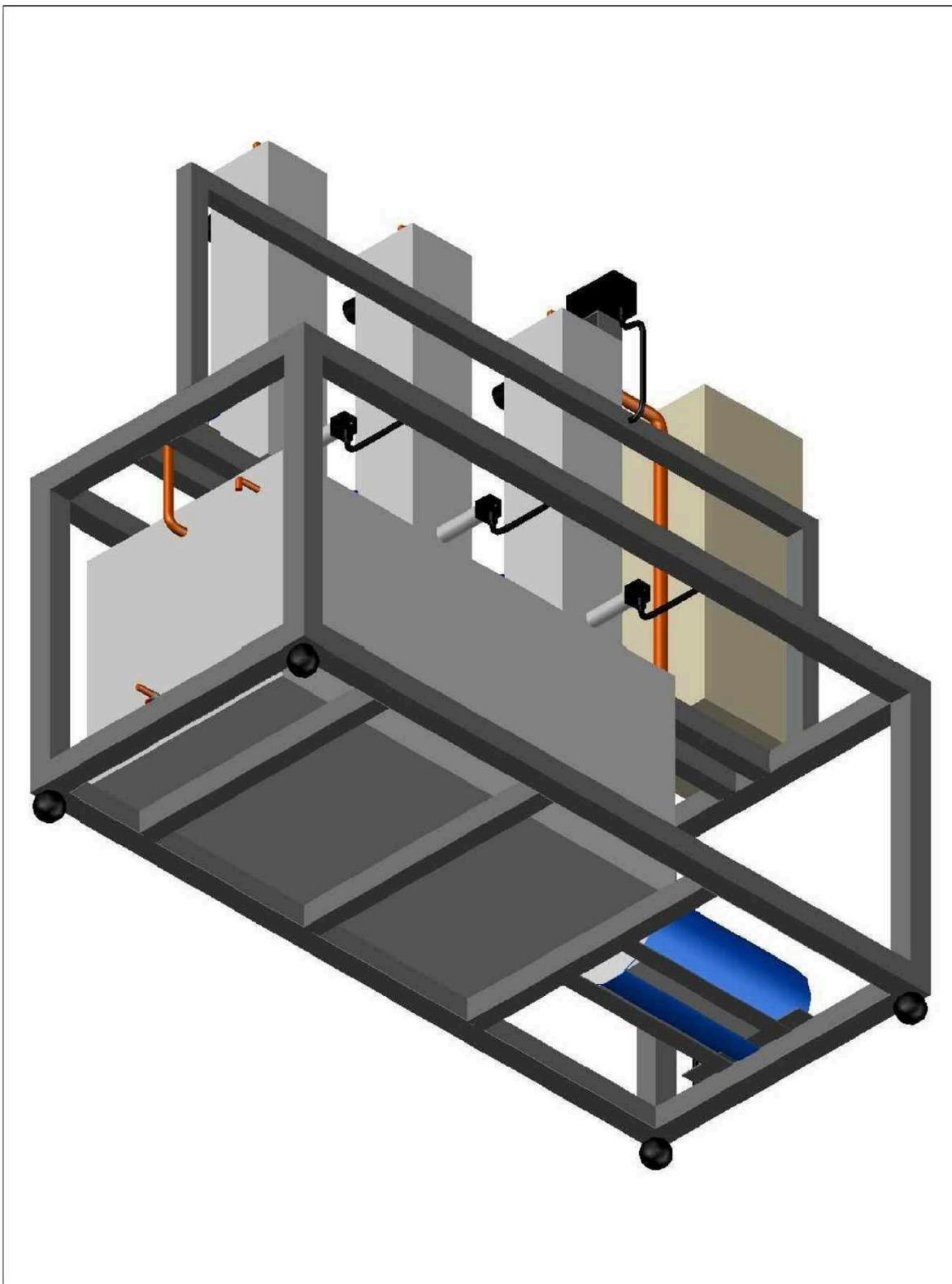
SISTEMA DE TRES VASOS COMUNICANTES

PERSPECTIVA

Planta 3 Tanques - 3D

7



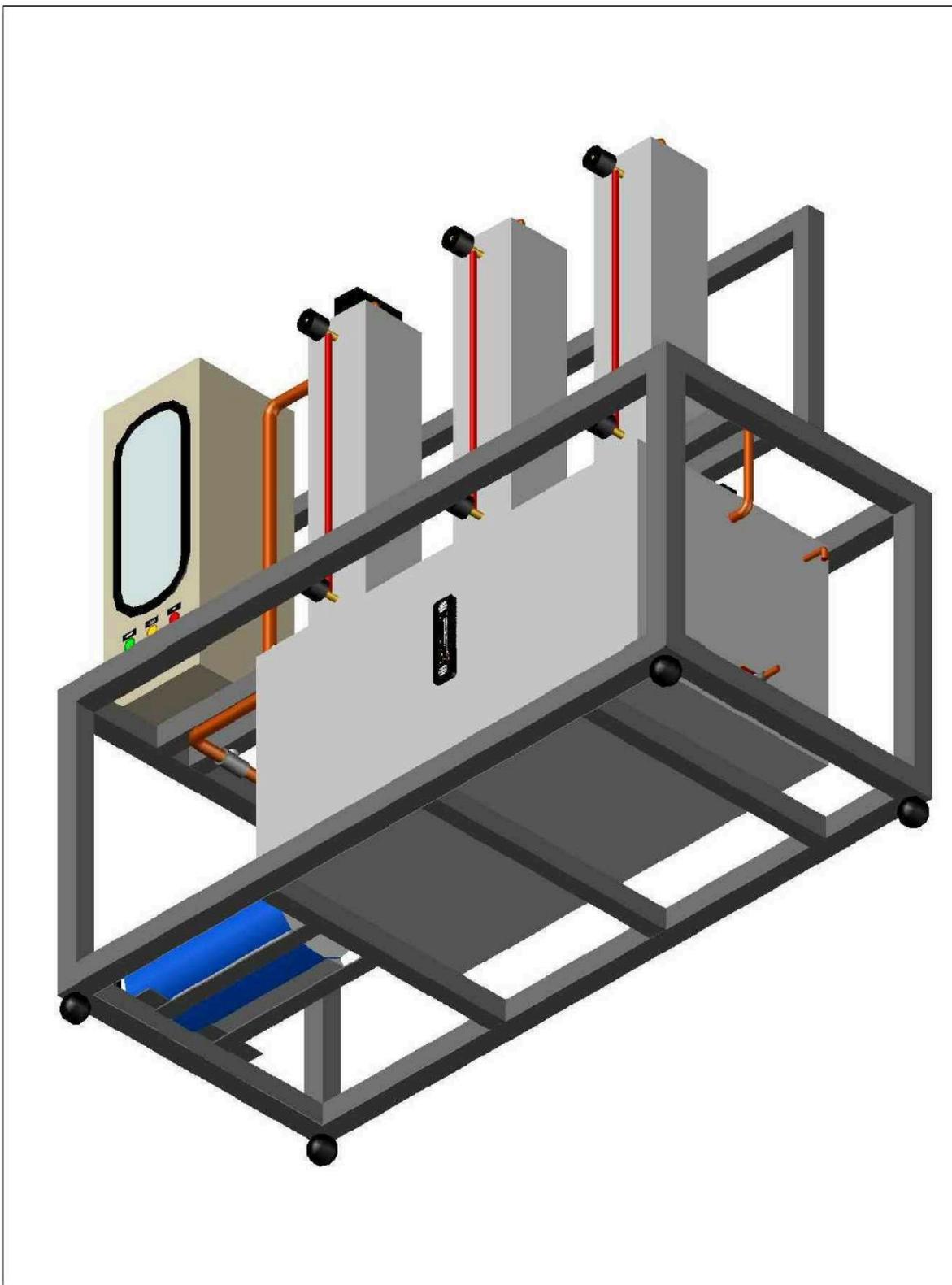


SISTEMA DE TRES VASOS COMUNICANTES

PERSPECTIVA

Planta 3 Tanques - 3D

9

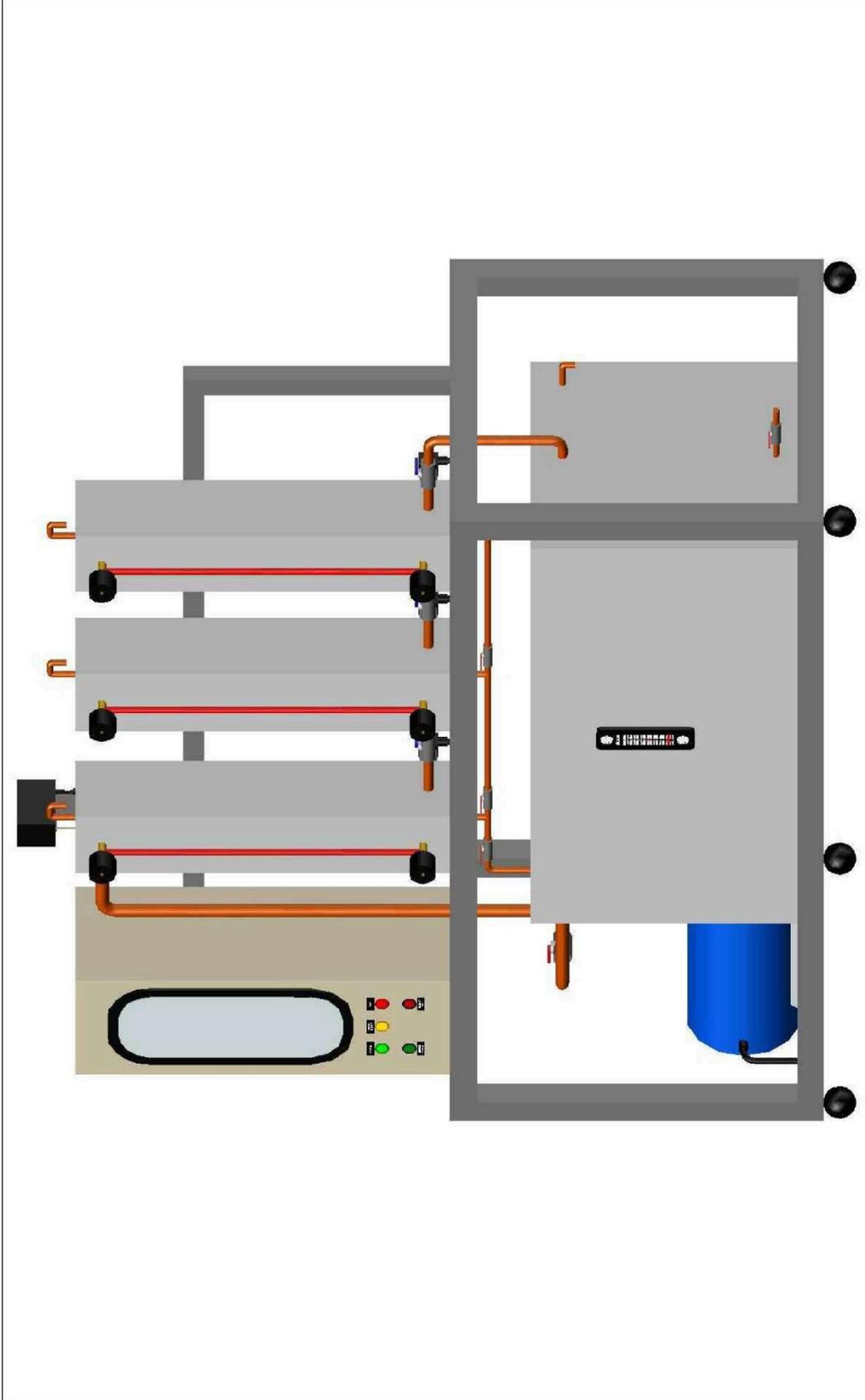


SISTEMA DE TRES VASOS COMUNICANTES

PERSPECTIVA

Planta 3 Tanques - 3D

10

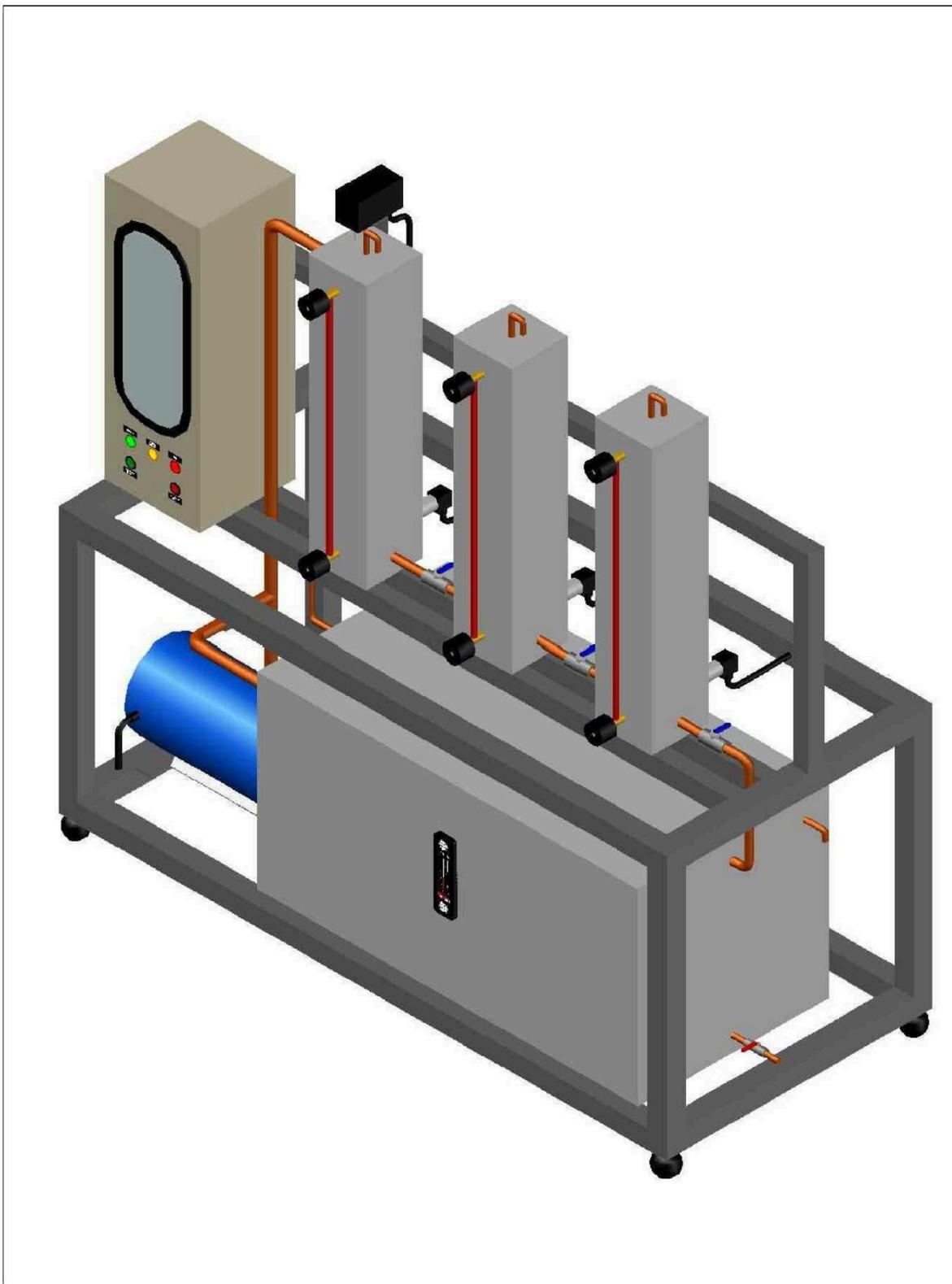


SISTEMA DE TRES VASOS COMUNICANTES

Planta 3 Tanques – 3D

PERSPECTIVA

11



SISTEMA DE TRES VASOS COMUNICANTES

PERSPECTIVA

Planta 3 Tanques - 3D

12

ANEXO B. Fotografías Adicionales de la Planta



Vista de la Bomba y Manómetro



Vista del Panel Eléctrico



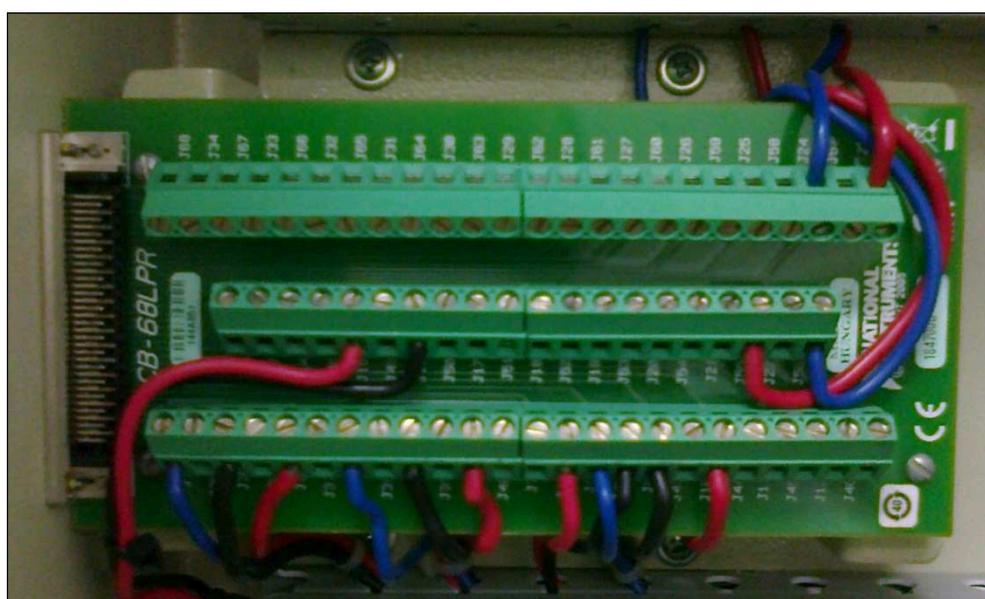
Vista Lateral del Panel Eléctrico



Vista de Fusibles, Contactor y Relay Térmico



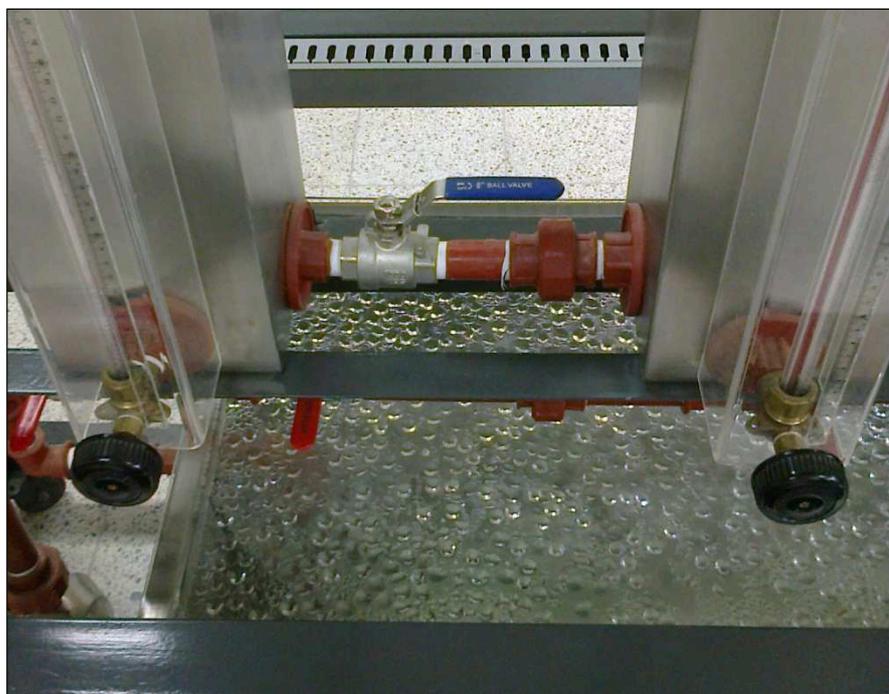
Vista del Variador de Frecuencia



Vista de las Conexiones de la Tarjeta CB-68LPR



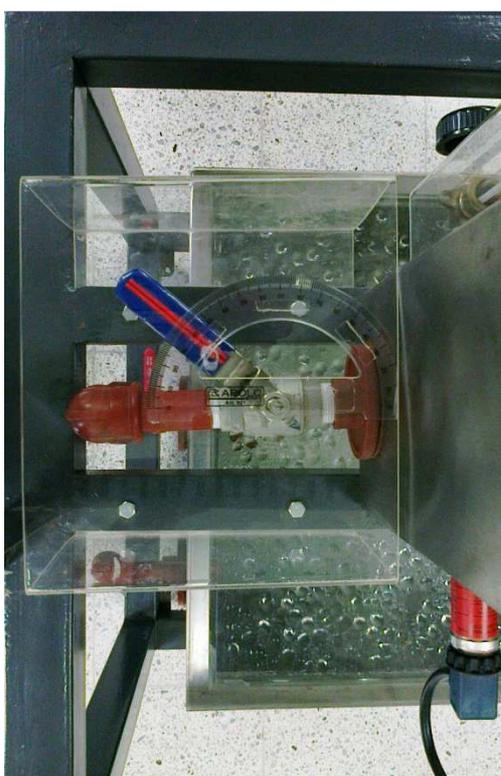
Vista de los Sensores de Presión



Vista de la 1^{era} Válvula de Interconexión (0°)



Vista de la 2^{da} Válvula de Interconexión (17°)



Vista de la 3^{era} Válvula de Interconexión (39°)

ANEXO C. Diagrama de Fuerza y Control del Panel Eléctrico

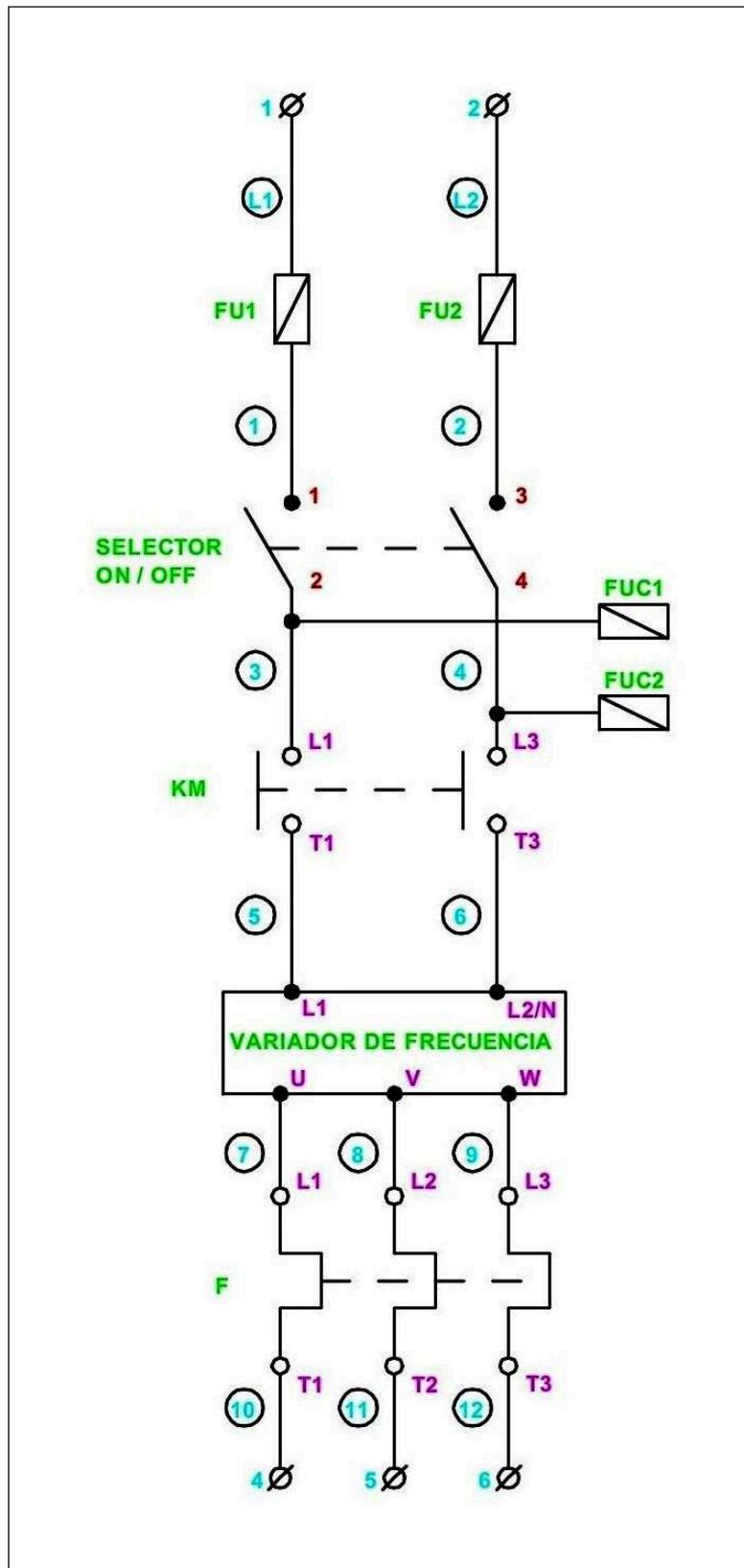


Diagrama de Fuerza

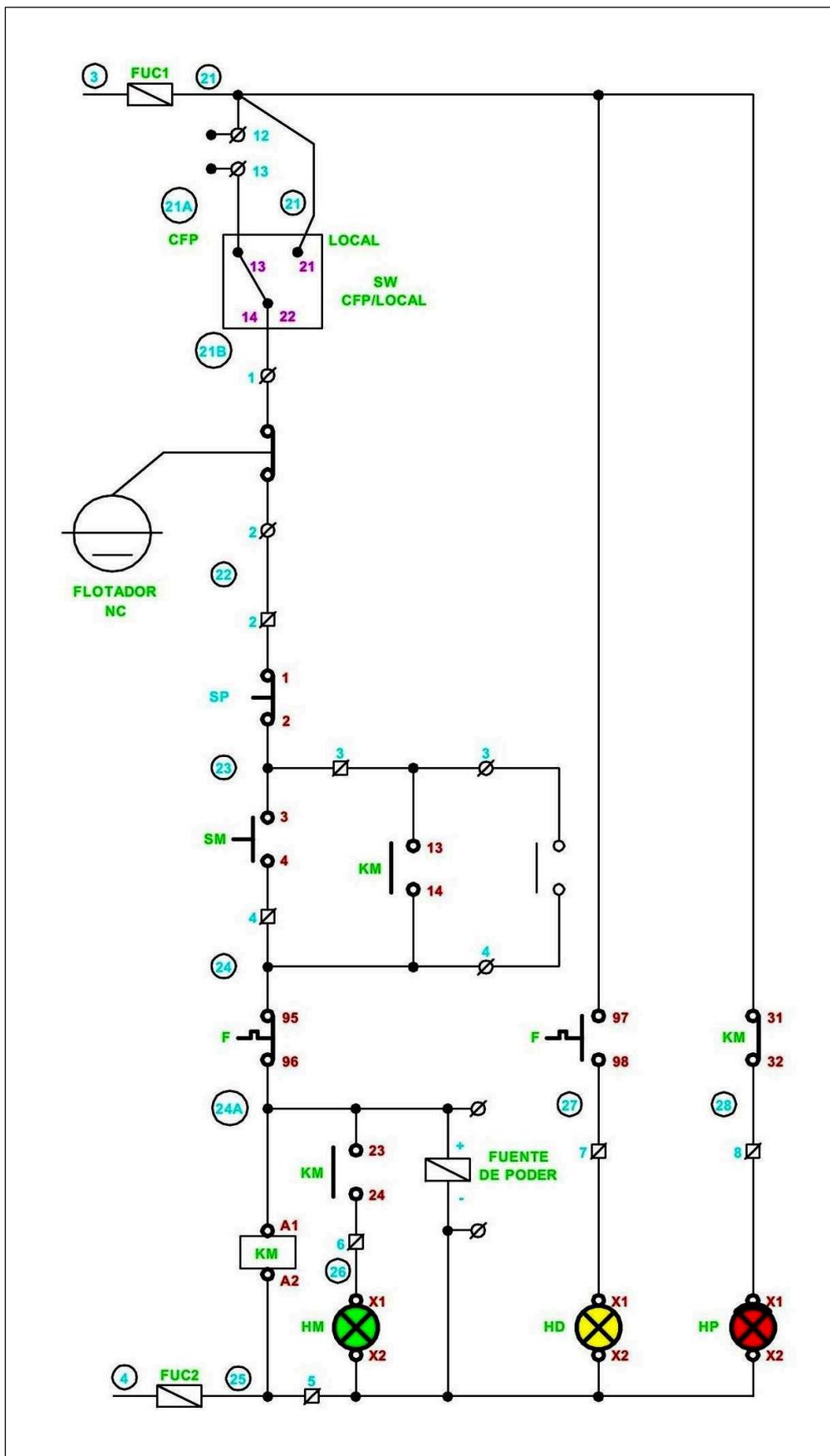


Diagrama de Control

ANEXO D. Especificaciones Técnicas de los Equipos

TECHNICAL BROCHURE
BNPE



NPE

316L SS

NPE SERIES END SUCTION CENTRIFUGAL PUMPS

BOMBAS CENTRÍFUGAS DE SUCCIÓN FINAL SERIE NPE

 **GOULDS**
WATER TECHNOLOGY
a xylem brand

Goolds Water Technology

Commercial Water

A FULL RANGE OF PRODUCT FEATURES UNA GAMA TOTAL DE CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO

Superior Materials of Construction: Complete AISI 316L stainless steel liquid handling components and mounting bracket for corrosion resistance, quality appearance, and improved strength and ductility.

High Efficiency Impeller: Enclosed impeller with unique floating seal ring design maintains maximum efficiencies over the life of the pump without adjustment.

Casing and Adapter Features: Stainless steel construction with NPT threaded, centerline connections, easily accessible vent, prime and drain connections with stainless steel plugs. Optional seal face vent/flush available.

Mechanical Seal: Standard John Crane Type 21 with carbon versus silicon-carbide faces, Viton elastomers, and 316 stainless metal parts. Optional high temperature and chemical duty seals available.

Motors: NEMA standard open drip-proof, totally enclosed fan cooled or explosion proof enclosures. Rugged ball bearing design for continuous duty under all operating conditions.

The various versions of the NPE are identified by a product code number on the pump label. This number is also the catalog number for the pump. The meaning of each digit in the product code number is shown at left.

Materiales Superiores de Construcción: Componentes completos para manejo de líquidos en acero inoxidable AISI 316L y consola para el montaje para resistencia a la corrosión, apariencia de calidad, y fuerza y ductilidad mejoradas.

Impulsor de Eficiencia Superior: El impulsor encerrado con un diseño único de anillo del sello flotante, mantiene sin ajustes, la eficiencia máxima sobre la vida de la bomba.

Características de la Carcasa y del Adaptador: Construcción en acero inoxidable con NPT roscado, conexiones centrales, válvulas de fácil acceso, conexiones de cebado y drenaje con enchufes de acero inoxidable. Cara del sello válvula/chorro opcional disponible.

Sello Mecánico: Estándar John Crane Tipo 21 con carbón en contraste con caras de silicón-carbide, elastómeros de Viton, y partes metálicas de acero inoxidable 316. Sellos de alta temperatura y productos químicos están disponibles.

Motores: Estándar NEMA a prueba de goteo, ventilador totalmente encerrado o recintos a prueba de explosión. Diseño robusto de balineras de bolas para trabajo continuo en todas las condiciones de funcionamiento.

Las diferentes versiones de la NPE se identifican con un número de código del producto en la etiqueta de la bomba. Este número es también el número del catálogo para la bomba. El significado de cada dígito en el número de código del producto se muestra a la izquierda.

NPE PRODUCT LINE NUMBERING SYSTEM LÍNEA DE PRODUCTO NPE SISTEMA DE NUMERACIÓN

**Example Product Code,
Ejemplo Código del Producto**

1 ST 2 C 1 A 4 F

**Seal Vent/Flush Option,
Opción de Sello Válvula/Chorro Seal Ven**

Mechanical Seal and O-ring

4 = Pre-engineered standard
For optional mechanical seal modify catalog order no. with seal code listed below.

Sello Mecánico y Anillo 'O'
4 = Estándar aprobado

Para sello mecánico opcional modificar el número de orden del catálogo con el código del sello anotado abajo.

| John Crane Type 21 Mechanical Seal (¾" seal), Sello Mecánico John Crane Tipo 21 (sello de ¾") | | | | | |
|--|---------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------------|---------------------|
| Seal Code, Código del Sello | Rotary, Rotativo | Stationary, Estacionario | Elastomers, Elastómeros | Metal Parts, Partes Metálicas | Part No., Número |
| 2 | | | EPR | | 10K18 |
| 4 | Carbon | Silicon Carbide | Viton | 316 SS | 10K55 |
| 5 | Silicon Carbide | | EPR | | 10K81 |
| 6 | | | Viton | | 10K62 |

Impeller Option . . . No Adder Required

For optional impeller diameters modify catalog order no. with impeller code listed. Select optional impeller diameter from pump performance curve.

Código del Impulsor Opcional

Para impulsores con diámetros opcionales modificar el número de orden del catálogo con el código del impulsor anotado. Escoger el ímpul con diámetro opcional de la curva de funcionamiento de la bomba.

| Impeller Code, Código del Impulsor | Pump Size, Tamaño de la Bomba | | |
|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|------------------------|
| | 1 x 1¼ - 6 Diameter | 1¼ x 1½ - 6 Diameter | 1½ x 2 - 6 Diameter |
| K | - | 6½ | - |
| G | - | 5½ | 5 |
| H | - | 5½ | 5 |
| A | 6½ | 5¼ | 4¾ |
| B | 5¾ | 5½ | 4¾ |
| C | 5¾ | 4¾ | 4¾ |
| D | 4¾ | 4¾ | 4¾ |
| E | 4¾ | 4¾ | 3¾ |
| F | 4¾ | 3¾ | - |

Driver, Conductor

1 = 1 PH, ODP 7 = 3 PH, XP
2 = 3 PH, ODP 8 = 575 V, XP
3 = 575 V, ODP 9 = 3 PH, TEFC
4 = 1 PH, TEFC Premium Eff.
5 = 3 PH, TEFC 0 = 1 PH, XP
6 = 575 V, TEFC

HP Rating, HP Potencia

C = ½ HP E = 1 HP G = 2 HP J = 5 HP
D = ¾ HP F = 1½ HP H = 3 HP

**Driver: Hertz/Pole/RPM,
Conductor: Hercios/Polos/RPM**

1 = 60 Hz, 2 pole, 3500 RPM
2 = 60 Hz, 4 pole, 1750 RPM
3 = 60 Hz, 6 pole, 1150 RPM
4 = 50 Hz, 2 pole, 2900 RPM
5 = 50 Hz, 4 pole, 1450 RPM

Material

ST = Stainless steel, Acero inoxidable

Pump Size, Tamaño de la Bomba

1 = 1 x 1¼ - 6 2 = 1¼ x 1½ - 6 3 = 1½ x 2 - 6

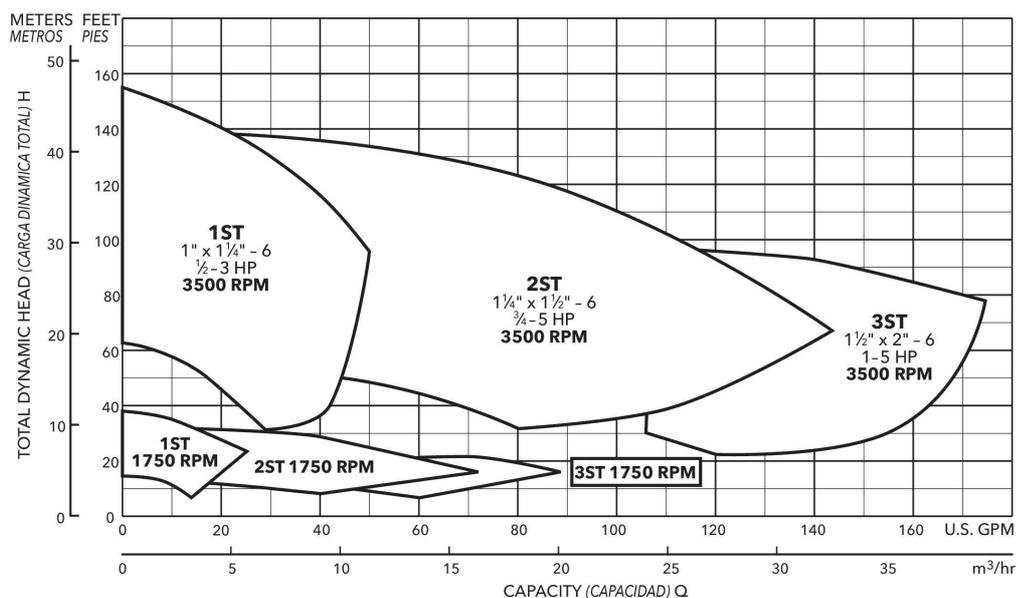
For frame mounted version, substitute the letters "FRM" in these positions.

Para la versión con el armazón montado, sustituya las letras "FRM" en estas posiciones.

Goulds Water Technology

Commercial Water

PERFORMANCE COVERAGE (60 HZ) ALCANCE DE FUNCIONAMIENTO (60 HZ)



NOTES:

Not recommended for operation beyond printed H-Q curve.

For critical application conditions consult factory.

Not all combinations of motor, impeller and seal options are available for every pump model. Please check with G&L on non-cataloged numbers.

All standard 3500 RPM ODP and TEFC motors supplied by Goulds Pumps, have minimum of 1.15 service factor. Standard catalog units may utilize available service factor. Any motors supplied other than Goulds Pumps check available service factor.

NOTAS:

No se recomienda para funcionamiento superior al impreso en la curva H-Q.

Para condiciones de aplicaciones críticas consultar con la fábrica.

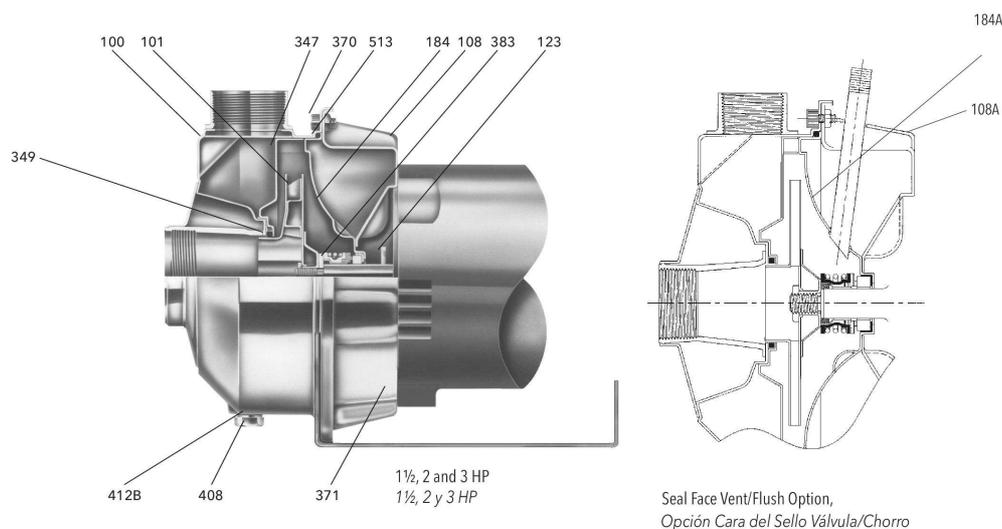
No todas las combinaciones de las opciones de motor, impulsor y sello están disponibles para cada modelo de bombas. Por favor verifique con G&L en los números no catalogados.

Todos los motores estándar de 3500 RPM, ODP (abiertos resguardados) y TEFC (totalmente encerrados con enfriamiento forzado) provistos por Goulds Pumps tienen un factor mínimo de servicio de 1,15. Las unidades estándar de catálogo pueden utilizar el factor de servicio disponible. Verificar el factor de servicio disponible de todo motor no provisto por Goulds Pumps.

Goulds Water Technology

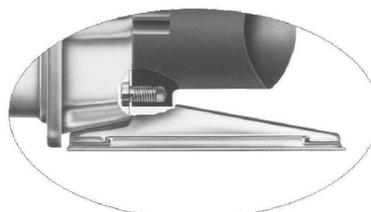
Commercial Water

NPE CLOSE COUPLED PUMP MAJOR COMPONENTS: MATERIALS OF CONSTRUCTION BOMBA CERRADA ACOPLADA NPE COMPONENTES PRINCIPALES: MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



Seal Face Vent/Flush Option,
Opción Cara del Sello Válvula/Chorro

| Item No., Parte No. | Description, Descripción | Materials, Materiales |
|------------------------|---|--|
| 100 | Casing; Carcasa | |
| 101 | Impeller; Impulsor | |
| 108 | Motor adapter; Adaptador del motor | AISI 316LSS; AISI 316L Acero inoxidable |
| 108A | Motor adapter seal vent/flush; Sello válvula/chorro del adaptador del motor | |
| 123 | Deflector; Deflector | BUNA-N |
| 184 | Seal housing; Alojamiento del sello | |
| 184 A | Seal housing seal vent/flush; Sello válvula/chorro del alojamiento del sello | AISI 316LSS; AISI 316L Acero inoxidable |
| 347 | Guidevane; Difusor | |
| 349 | Seal ring, guidevane; Anillo del sello, difusor | Viton |
| 370 | Socket head screws, casing; Encajes cabezas de tornillos, carcasa | AISI 410 SS; AISI 410 Acero inoxidable |
| 371 | Bolts, motor; Tornillos, motor | Plated steel; Acero chapeado |
| 383 | Mechanical seal; Sello mecánico | **see chart, ver tabla |
| 408 | Drain and vent plug, casing; Enchufes de drenaje y válvula, carcasa | AISI 316LSS; AISI 316L Acero inoxidable |
| 412B | O-ring, drain and vent plug; Anillo 'O', enchufe de drenaje y válvula | Viton (Standard, estándar) EPR (Optional, Opcional) |
| 513 | O-ring, casing; Anillo 'O', carcasa | |
| Motor | NEMA standard, 56J flange; NEMA estándar, brida 56J | |



1/2, 3/4 and 1 HP
1/2, 3/4 y 1 HP

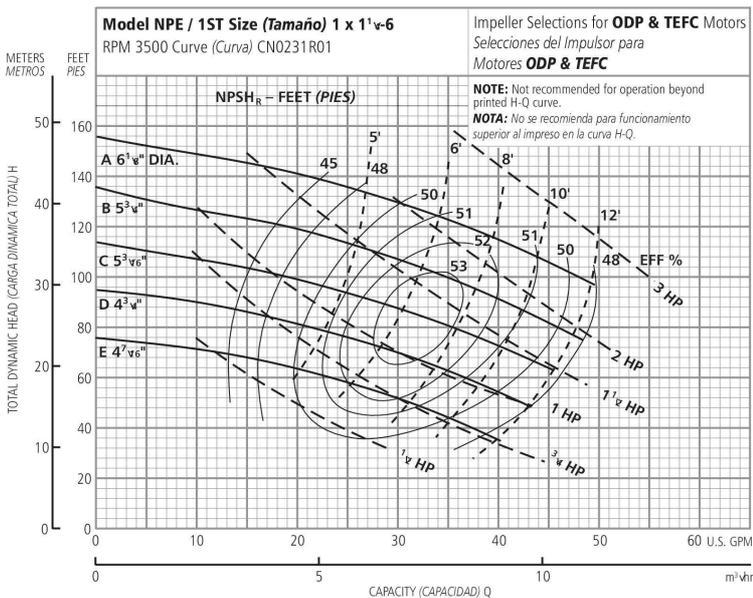
Footed motor for 5 HP ODP and TEFC, all explosion proof motors, see page 13.

Motor con pie para 5 HP ODP y TEFC, a prueba de explosiones motores, en la página 13.

Goolds Water Technology

Commercial Water

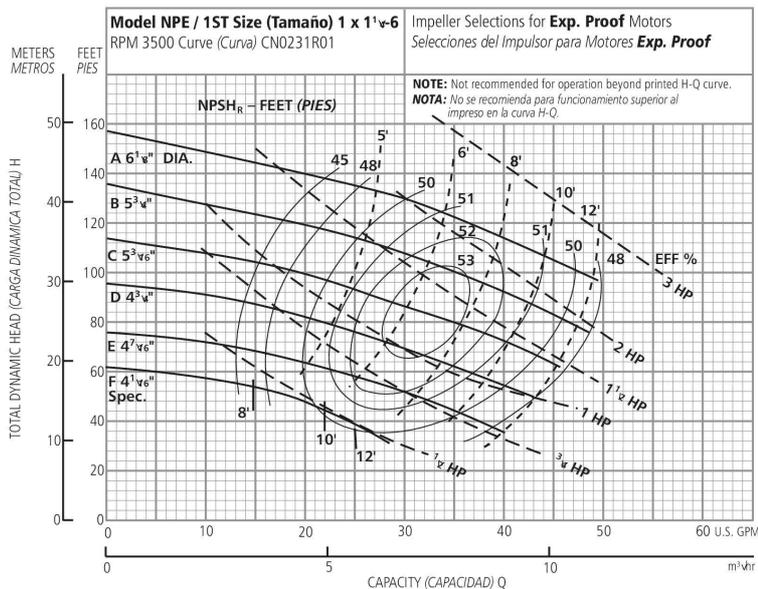
PERFORMANCE CURVES - 60 HZ, 3500 RPM CURVAS DE FUNCIONAMIENTO - 60 HZ, 3500 RPM



| Ordering Code, Código de Pedido | Standard HP Rating, Estándar HP Potencia | Imp. Dia. |
|---------------------------------|--|-----------|
| E | 1/2 | 4 1/8" |
| D | 3/4 | 4 3/4" |
| C | 1 | 5 3/8" |
| B | 1 1/2 | 5 3/4" |
| A | 2 | 6 1/8" |

NOTE: Although not recommended, the pump may pass a 1/16" sphere.

NOTA: Si bien no se recomienda, la bomba puede pasar una esfera de 1/16".



| Ordering Code, Código de Pedido | Standard HP Rating, Estándar HP Potencia | Imp. Dia. |
|---------------------------------|--|---------------|
| F | 1/2 | 4 1/16" spec. |
| E | 3/4 | 4 7/16" |
| D | 1 | 4 3/4" |
| C | 1 1/2 | 5 3/8" |
| B | 2 | 5 3/4" |
| A | 3 | 6 1/8" |

NOTE: Although not recommended, the pump may pass a 1/16" sphere.

NOTA: Si bien no se recomienda, la bomba puede pasar una esfera de 1/16".

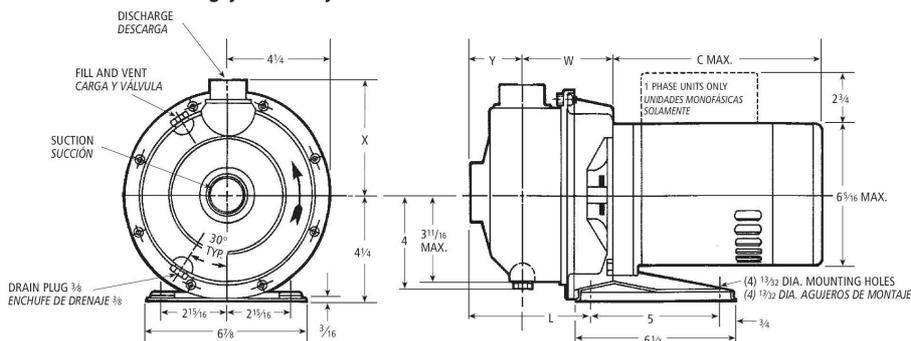
Goolds Water Technology

Commercial Water

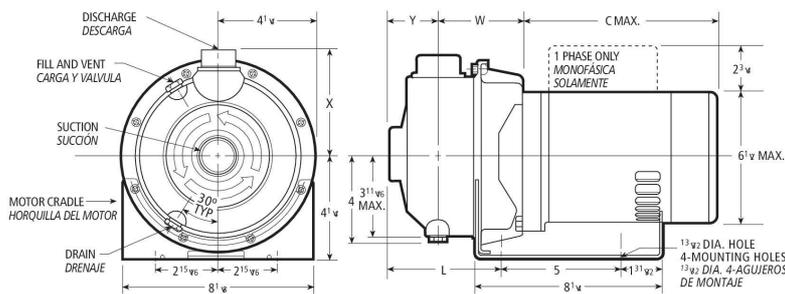
NPE CLOSE COUPLED - DIMENSIONS, WEIGHTS AND SPECIFICATIONS NPE ACOPLE CERRADO - DIMENSIONES, PESOS Y ESPECIFICACIONES

Clockwise Rotation Viewed from Drive End

Rotación en Dirección de las Agujas del Reloj Visto desde el Extremo del Motor



ODP and TEFC 1/2, 3/4 and 1 HP (standard), ODP y TEFC 1/2, 3/4 y 1 HP (estándar)



ODP and TEFC 1 1/2, 2 and 3 HP (standard), ODP y TEFC 1 1/2, 2 y 3 HP (estándar)

SPECIFICATIONS - ESPECIFICACIONES

Capacities to:

85 GPM (322L/min) at
1750 RPM
170 GPM (643L/min) at
3500 RPM

Heads to:

39 feet (12 m) at 1750 RPM
150 feet (46 m) at
3500 RPM

Working pressures to:

125 PSIG (9 bars)

Maximum temperatures to:

250° F (121° C)

Direction of rotation:

Clockwise when viewed
from motor end.

Motor specifications:

NEMA 56J frame, 1750
RPM, 1/2 HP. 3500 RPM 1/2
through 5 HP. Open drip-
proof, totally enclosed fan-
cooled or explosion proof
enclosures. Stainless steel
shaft with ball bearings.

Single phase: Voltage
115/230 ODP and TEFC.
(3 and 5 HP model - 230 V
only) Built-in overload with
auto-reset provided.

Three phase: Voltage
208-230/460 ODP, TEFC
and EX PROOF.

NOTE: For three phase
motors, overload
protection must be
provided in starter unit.
Starter and heaters must
be ordered separately.

Capacidades:

85 GPM (322L/min) a
1750 RPM
170 GPM (643L/min) a
3500 RPM

Cargas:

39 pies (12 m) a 1750 RPM
150 pies (46 m) a
3500 RPM

Presión de trabajo:

125 PSIG (9 baras)

Temperatura máxima:

250° F (121° C)

Dirección de rotación:

En dirección de las agujas
del reloj visto desde el
extremo final del motor.

Motores:

Armazón 56J NEMA, 1750 RPM
1/2 HP. 3500 RPM 1/2 a 5 HP.

Cubiertas abiertas
resguardadas, totalmente
encerradas enfriadas por
ventilador o a prueba de
explosiones. Eje de acero
inoxidable con balineras de
bolas.

Monofásicos: Voltaje 115/230
ODP y TEFC. (modelo 3 y 5
HP - 230 voltios solamente) Se
proporciona protección térmica
contra sobrecarga construida
con reseteo automático.

Trifásicos: Voltaje 208-230/460
ODP, TEFC y EX PROOF.

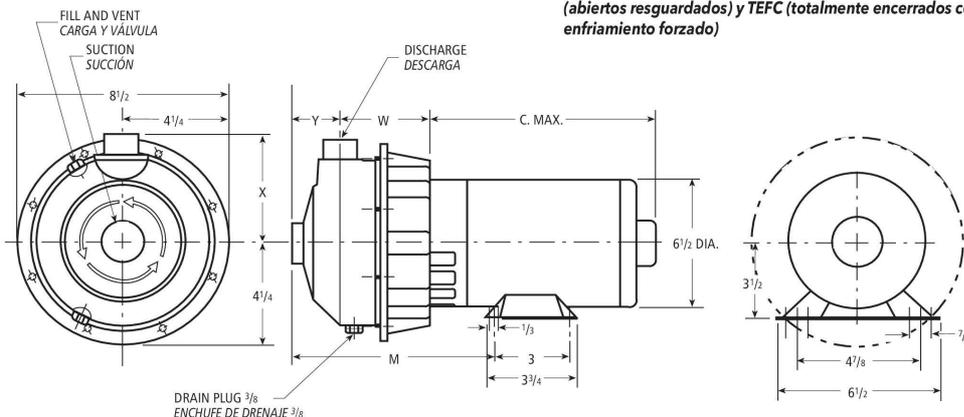
NOTA: Para motores trifásicos se
debe de proporcionar la
protección térmica contra
sobrecarga en la
unidad de arranque. El
arrancador y los calentadores
se deben pedir por
separado.

Goulds Water Technology

Commercial Water

NPE CLOSE COUPLED WITH FOOTED MOTOR, EXPLOSION-PROOF AND 5 HP MOTORS NPE ACOPLA CERRADO CON MOTOR CON PATAS, MOTORES A PRUEBA DE EXPLOSIÓN Y 5 HP

All Explosion Proof Motors and 5 HP ODP and TEFC
Todos los motores son a prueba de explosiones, 5 HP, ODP (abiertos resguardados) y TEFC (totalmente encerrados con enfriamiento forzado)



Dimensions - Determined by Pump,
Dimensiones - Determinadas por la Bomba

| Pump, Bomba | Suction, Succión | Discharge, Descarga | HP | W | X | Y | L | M |
|-------------|------------------|---------------------|---------|--------|-------|-------|--------|--------|
| 1ST | 1 1/4 | 1 | 1/2 - 3 | 3 9/16 | 4 3/8 | 2 | 4 7/16 | 7 7/16 |
| 2ST | 1 1/2 | 1 1/4 | 3/4 - 5 | 3 3/4 | 4 1/2 | 2 1/8 | 5 1/8 | 7 7/8 |
| 3ST | 2 | 1 1/2 | 1 - 5 | 3 3/4 | 4 5/8 | 2 1/8 | 5 1/8 | 7 7/8 |

Available Motor Weights and Dimensions
Pesos y Dimensiones Disponibles del Motor

| HP | Motor Weights, Pesos del Motor | | | | | | C Max. Length, (Longitud) |
|-------|--------------------------------|------|-----|---------------------|------|-----|---------------------------|
| | 1 Phase, Monofásicos | | | 3 Phase, Trifásicos | | | |
| | ODP | TEFC | EXP | ODP | TEFC | EXP | |
| 1/2 | 16 | 21 | 47 | 19 | 18 | 27 | 10 3/16 |
| 3/4 | 19 | 24 | 41 | 21 | 21 | 30 | 10 7/16 |
| 1 | 22 | 26 | 49 | 23 | 21 | 30 | 11 1/16 |
| 1 1/2 | 28 | 35 | 56 | 27 | 27 | 37 | 11 15/16 |
| 2 | 33 | 39 | 60 | 32 | 33 | 44 | 12 1/16 |
| 3 | 40 | 43 | - | 41 | 37 | - | 13 3/16 |
| 5 | 42 | - | - | 42 | 45 | - | 13 3/16 |

Dimensions in inches, weights in pounds.
Dimensiones en pulgadas, pesos en libras.

NOTES:

1. Pump will be shipped with top vertical discharge position as standard. For other orientations, remove casing bolts, rotate discharge to desired position, replace and tighten 6mm bolts to 5 - 6 lbs.-ft.
2. Motor dimensions may vary with motor manufacturers.
3. Dimensions in inches, weights in pounds.
4. For explosion proof motor dimensions consult factory for information.
5. Not to be used for construction purposes unless certified.

NOTAS:

1. Las bombas se transportarán con la descarga vertical superior como estándar. Para otras orientaciones, retirar los tornillos de la carcasa, rotar la descarga a la posición deseada, y reemplazar y apretar los tornillos de 6mm a 5 - 6 libras-pies.
2. Las dimensiones del motor puede que varíen con los fabricantes.
3. Dimensiones en pulgadas, pesos en libras.
4. Para las dimensiones de los motores a prueba de explosión consultar con la fábrica para información.
5. No usar para propósitos de construcción sin certificar.

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL MOTOR DE LA BOMBA

| | | |
|------------------------------------|--------------------|------------|
| Marca | EMERSON | |
| Modelo | P63FZW-4416 | |
| Voltaje [V] _{AC} | 208-230 | 460 |
| Factor de Servicio | 1.5 | 1.0 |
| Corriente [A] | 2.7-2.8 | 1.4 |
| Corriente a Factor de Servicio [A] | 3.7-3.6 | 1.8 |
| Frecuencia [Hz] | 50/60 | |
| Potencia [HP] | 3/4 | |
| Velocidad [RPM] | 3450 | |
| Ciclo de Trabajo | CONTÍNUO | |
| Clase de Aislamiento | B | |
| Temperatura Ambiente | 40 °C | |
| Letra de Código | N | |
| Número de Fases | 3 | |
| Grado de Protección | IP22 | |

Datos de Placa

The Danfoss logo is written in a red, cursive script font.

**Transmisores de presión para
aplicaciones industriales,
tipo MBS 4510**

Folleto técnico



Folleto técnico

Transmisores de presión para aplicaciones industriales, MBS 4510

Características



- Diseñados para ser utilizados en ambientes industriales severos
- Carcasa y partes en contacto con el medio de acero inoxidable resistente al ácido (AISI 316L)
- Rangos de presión relativa (manométrica) o absoluta hasta 25 bar
- Señal de salida: 4 - 20 mA
- Temperatura compensada y calibrada por láser
- Precisión 0,5% FS
- Ajuste de cero y de span
- Relleno de aceite homologado según USDA-H1

Descripción

El transmisor de presión de alta precisión con diafragma rasante MBS 4510 está destinado a aplicaciones industriales con medios heterogéneos, de alta viscosidad o cristalizantes, y proporciona una medida fiable de presión incluso en ambientes agresivos.

Este flexible programa de transmisores de presión proporciona una señal de salida de 4-20 mA, versiones absolutas y manométricas

(relativas), rangos de medición de 0-0,25 a 0-25 bar, ajuste de cero y de span. Un conector de clavija giratoria y una conexión de presión cónica G1A con diafragma rasante.

El transmisor de presión cuenta con una excelente estabilidad frente a vibraciones, una construcción robusta y un alto grado de protección CEM/EM, cumpliendo así con los requisitos industriales más exigentes.

Pedidos
versiones estándar

Conector: Pg 9 (EN 175301-803-A)
Salida: 4-20 mA
Conexión de presión: G 1 A cónica

| Rango de medición Pe ¹⁾ [bar] | Presión máxima de funcionamiento [bar] | Presión mínima de rotura [bar] | Nº código |
|---|---|-----------------------------------|-----------|
| 0 - 0.25 | 2 | 50 | 060G2418 |
| 0 - 0.4 | 2 | 50 | 060G2419 |
| 0 - 0.6 | 2 | 50 | 060G2420 |
| 0 - 1 | 2 | 50 | 060G2421 |
| 0 - 1.6 | 8 | 50 | 060G2422 |
| 0 - 2.5 | 8 | 50 | 060G2423 |
| 0 - 4 | 8 | 50 | 060G2424 |
| 0 - 6 | 20 | 50 | 060G2425 |
| 0 - 10 | 20 | 50 | 060G2426 |
| 0 - 16 | 50 | 100 | 060G2427 |
| 0 - 25 | 50 | 100 | 060G2428 |

1) Relativa/manométrica

Folleto técnico

Transmisores de presión para aplicaciones industriales, MBS 4510

Datos técnicos

Funcionamiento (EN 60770)

| | | |
|---|--|------------------------------------|
| Precisión (incl. no linealidad, histéresis y repetitividad) | | ±0,2% FS (tip.) ±0,5% FS (máx.) |
| Sin linealidad BFSL (conformidad) | | ≤ ±0,2% FS |
| Histéresis y repetitividad | | ≤ ±0,1% FS |
| Desviación del punto cero térmico | Rango de medición: 0-250 mbar | ≤ ±0,4% FS/10K |
| | Rango de medición: 0-400 mbar | ≤ ±0,3% FS/10K |
| | Rango de medición: ≥0-600 mbar | ≤ ±0,2% FS/10K |
| Desviación de la sensibilidad térmica (intervalo) | Rango de medición: 0-250 mbar | ≤ ±0,4% FS/10K |
| | Rango de medición: 0-400 mbar | ≤ ±0,35% FS/10K |
| | Rango de medición: ≥0-600 mbar | ≤ ±0,2% FS/10K |
| Tiempo de respuesta | | < 4 ms |
| Presión máxima de funcionamiento | | Ver pag. 2 |
| Presión de rotura | Versiones P _e | Ver pag. 2 |
| | Versiones P _{abs} | Min. 300 bar |
| Durabilidad, P: 10-90% FS | | >10×10 ⁶ ciclos |
| Ajuste del punto cero | Rango de medición de 0-0,25 a 0-10 bar | de -5 a +20 % FS |
| | Rango de medición de 0-16 a 0-25 bar | de -5 a +10% FS |
| Ajuste del intervalo | Rango de medición de 0-0,25 a 0-25 bar | de -5 a +5% FS |

Especificaciones eléctricas

| | |
|---|--|
| Señal de salida nominal (protección contra cortocircuitos) | 4-20 mA |
| Tensión de alimentación, U _a (protección de la polaridad) | 10 a 30 V c.c. |
| Dependencia de la tensión de alimentación | ≤ ±0,05% FS/10 V |
| Limitación de la corriente (señal de salida lineal hasta el rango nominal de 1,5 ×) | 28 mA (tip.) |
| Carga [R _L] (carga conectada a 0 V) | $R_L \leq \frac{U_B - 10 V}{0,02 A}$ [Ω] |

Condiciones de trabajo

| | | |
|---|------------------------|--------------------|
| Rango de temperatura del medio | -10 → +85 °C | |
| Rango de temperatura ambiente | -10 → +85 °C | |
| Rango de temperatura compensada | 0 → +80°C | |
| Rango de temperatura de transporte | -25 → +85°C | |
| Emisión CEM | EN 61000-6-3 | |
| Inmunidad CEM | EN 61000-6-2 | |
| Resistencia de aislamiento | > 100 MΩ a 100 V | |
| Prueba de frecuencia de red | SEN 361503 | |
| Estabilidad de vibración Sinusoidal | 15,9 mm-pp, 5 Hz-25 Hz | IEC 60068-2-6 |
| | 20 g, 25 Hz - 2 kHz | |
| Aleatoria | 7,5 g, 5 Hz - 1 kHz | IEC 60068-2-64 |
| | | |
| Resistencia a impactos | Impacto 500 g / 1 ms | IEC 60068 - 2 - 27 |
| | Caída libre | IEC 60068 - 2 - 32 |
| Carcasa (Cumplimiento del grado de protección IP cuando se instala con el conector) | IP65 | |

Características mecánicas

| | | |
|--|---------------------------------|---------------------------------------|
| Materiales | Partes en contacto con el medio | EN 10088-1; 1.4404 (AISI 316 L) |
| | Carcasa | EN 10088-1; 1.4404 (AISI 316 L) |
| | Conexiones eléctricas | Poliamida con fibra de vidrio, PA 6.6 |
| Junta de estanqueidad (sobre la rosca) | | DIN 3869-33-NBR |
| Peso | | 0,4 kg |

Conexiones eléctricas

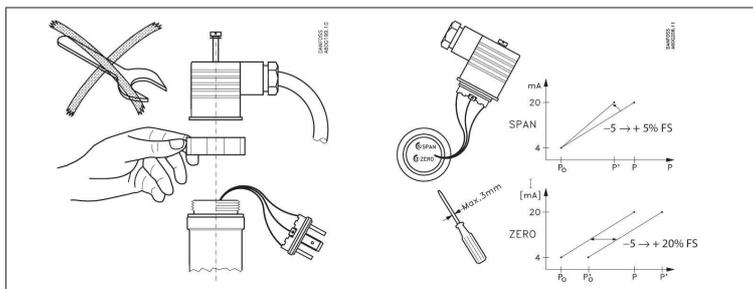
| | |
|---------------------|---|
| Código | |
| 1 | |
| EN 175301-803, Pg 9 | |
| | <p>Conexión eléctrica, salida 4 - 20 mA (2 hilos)</p> <p>Pin 1: + alimentación Pin 2: ÷ alimentación Pin 3: No se utiliza</p> <p>Tierra: Conectado a la carcasa MBS</p> |



Folleto técnico

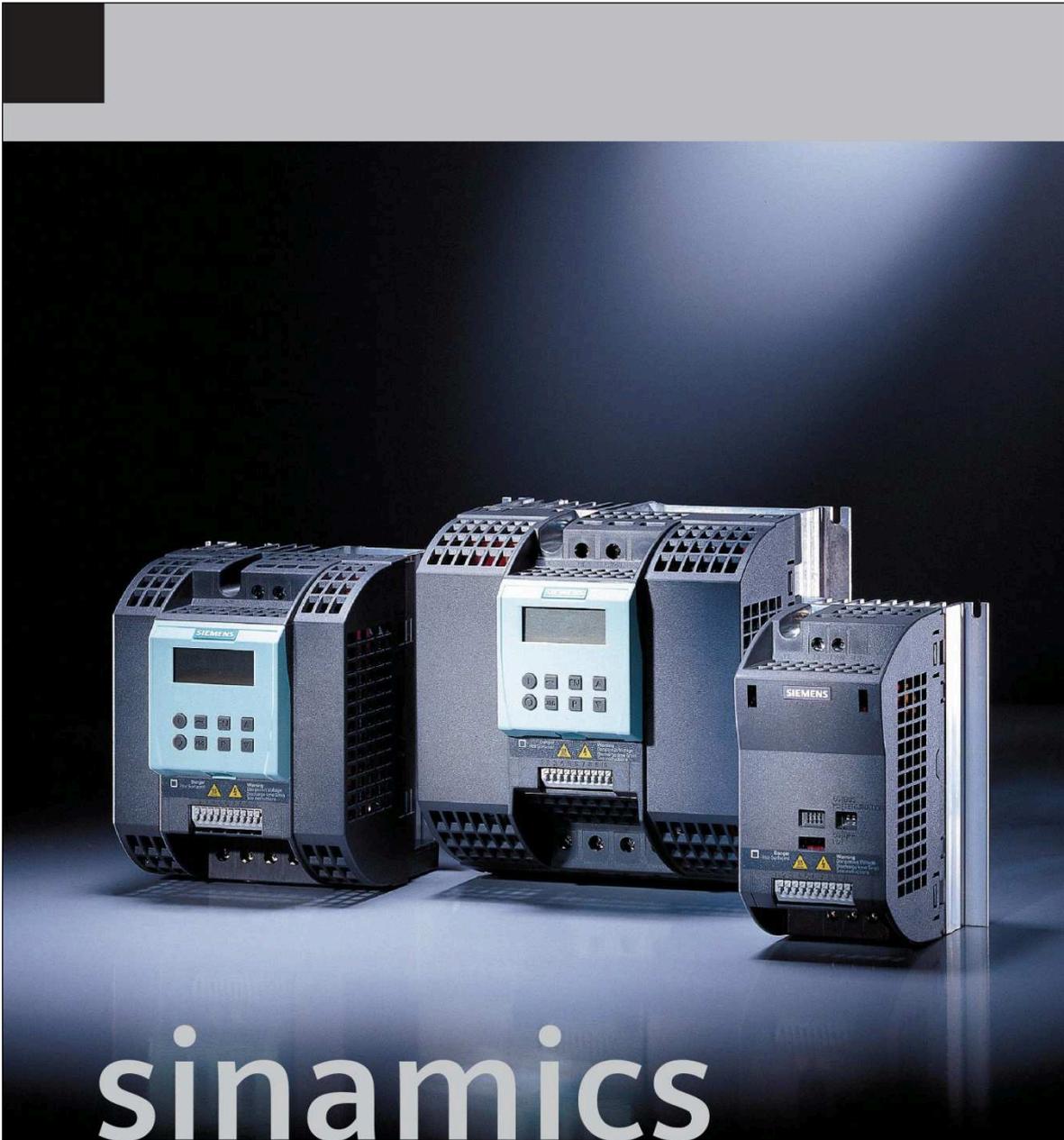
Transmisores de presión para aplicaciones industriales, MBS 4510

Ajuste



Accesorios

| | |
|--|--|
| <p>Unión soldada para sellado cónico metal/metal Código n°: 060G2501</p> | <p>DIN 11851 (conexión industria láctea), DN40 Código n°: 060G2505</p> |
| <p>DIN 11851 (conexión industria láctea), DN50 Código n°: 060G2506</p> | <p>Abrazadera, ISO 2852, 1½ pulg. Código n°: 060G2502</p> |
| <p>Abrazadera, ISO 2852, 2 pulg. Código n°: 060G2510</p> | <p>Conexión SMS 1145, 1½ pulg. Código n°: 060G2503</p> |



sinamics

G110

SINAMICS G110

SIEMENS

04/2005

Datos técnicos del SINAMICS G110

7 Datos técnicos del SINAMICS G110

Tabla 7-1 Datos de potencia del SINAMICS G110

| Características | Datos técnicos | | | | | |
|---|--|-----------------------------------|--|-----------|----------------------|------------|
| Tensión de red y márgenes de frecuencia | 200 V a 240 V ($\pm 10\%$) 1AC | | 120 W a 3.0 kW | | | |
| Frecuencia de red | 47 a 63 Hz | | | | | |
| Frecuencia de salida | 0 Hz a 650 Hz | | | | | |
| Cos phi | $\geq 0,95$ | | | | | |
| Grado de rendimiento del convertidor | 90% a 94% $\geq 95\%$ | | para equipos < 750 W para equipos $\geq 750W$ | | | |
| Capacidad de sobrecarga | Sobrecorriente = 1,5 x corriente de salida nominal (o sea 150 % sobrecarga) durante 60 s, después 0,85 x corriente de salida nominal durante 240 s, tiempo de ciclo 300 segundos | | | | | |
| Tensiones de salida para el usuario | 24 V en bornes 6 y 7 (50 mA sin regular); 10 V en bornes 8 y 10 (5 mA) | | | | | |
| Corriente de precarga | Menor que la corriente de entrada nominal | | | | | |
| Métodos de control | Características: Lineal V/f; cuadrática V/f; multipunto V/f (parametrizable) | | | | | |
| Frecuencia de pulsación | 8 kHz (estándar); 2 kHz a 16 kHz (en pasos de 2 kHz) | | | | | |
| Frecuencias fijas | 3, parametrizable | | | | | |
| Inhibición de frecuencia | 1, parametrizable | | | | | |
| Resolución de consigna | 0,01 Hz digital, 0,01 Hz en serie, 10 bit analógica (potenciómetro motorizado 0,1 Hz) | | | | | |
| Entradas digitales | 3, parametrizable, sin separación galvánica; PNP, compatible con SIMATIC, low < 5, high > 10 V, tensión de entrada máxima 30 V | | | | | |
| Entrada analógica (variante analógica) | 1, para consigna (0 V a 10 V, escalable o usable como cuarta entrada digital) | | | | | |
| Salida digital | 1, salida de optoacoplador con separación galvánica (DC 24 V, 50 mA carga óhmica), tipo de transistor NPN | | | | | |
| Interface en serie (variante USS) | RS485, para operación con protocolo USS | | | | | |
| Longitud cables motor | Máx. 25 m (apantallado) | | máx. 50 m (no apantallado) | | | |
| Compatibilidad electromagnética | Todos los equipos con filtro EMC integrado para sistemas de accionamientos en instalaciones de la categoría C2 (distribución restringida). Valor límite según EN55011, clase A, grupo 1. Además todos los equipos con filtro integrado y cables apantallados, con una longitud máxima de 5 m cumplen con el valor límite EN55011, clase B. | | | | | |
| Frenado | Frenado combinado (solo en versión de firmware 1.1), frenado por DC. | | | | | |
| Grado de protección | IP20 | | | | | |
| Temperatura en servicio | -10 °C a +40 °C (hasta +50 °C con reducción de potencia) | | | | | |
| Temper. almacenamien. | -40 °C a +70 °C | | | | | |
| Humedad | 95 % (no se permiten condensaciones) | | | | | |
| Altitud | Hasta 1000 m sobre el nivel del mar sin reducir la potencia | | | | | |
| Funciones de protección del convertidor | <ul style="list-style-type: none"> <li style="width: 25%;">• Subtensión <li style="width: 25%;">• Sobretensión <li style="width: 25%;">• Protección térmica I2t <li style="width: 25%;">• Conexión a tierra <li style="width: 25%;">• Cortocircuito <li style="width: 25%;">• Prot.bascul. motor <li style="width: 25%;">• Sobretemperatura convertidor <li style="width: 25%;">• Sobretemperatura motor | | | | | |
| Conformidad de normas | UL, cUL, CE, c-tick | | | | | |
| Marcados CE | Según normas de baja tensión CE 73/23/EWG | | | | | |
| Dimensiones y pesos (sin opciones) | Tamaño constructivo (FS) | | Altura x anchura x profundidad mm (pulgadas) | | Peso aprox. kg (lbs) | |
| | | | | | Sin filtro | Con filtro |
| | A | hasta 370W | 150 x 90 x 116 (5,9 x 3,5 x 4,6) | | 0,7 (1,5) | 0,8 (1,7) |
| | A | 550 & 750W | 150 x 90 x 131 (5,9 x 3,5 x 5,2) | | 0,8 (1,8) | 0,9 (2,0) |
| | A Flat Plate | hasta 370W | 150 x 90 x 101 (5,9 x 3,5 x 3,9) | | 0,6 (1,3) | 0,7 (1,5) |
| | A Flat Plate | 550 W & 750 W | 150 x 90 x 101 (5,9 x 3,5 x 3,9) | | 0,7 (1,5) | 0,8 (1,8) |
| | B | 1,1 kW & 1,5 kW | 160 x 140 x 142 (6,3 x 5,5 x 5,6) | | 1,4 (3,1) | 1,5 (3,3) |
| C | 2,2 kW | 181 x 184 x 152 (7,1 x 7,2 x 6,0) | | 1,9 (4,2) | 2,1 (4,6) | |
| C | 3,0 kW | 181 x 184 x 152 (7,1 x 7,2 x 6,0) | | 2,0 (4,4) | 2,2 (4,9) | |

Tabla 7-2 Sección de cable para los bornes de control (sin tornillos)

| | | |
|--------------------------|--------------------|-----|
| Sección del cable mínima | [mm ²] | 1 |
| | [AWG] | 18 |
| Sección del cable máxima | [mm ²] | 1,5 |
| | [AWG] | 16 |

Tabla 7-3 Pares de apriete para conexiones de potencia

| Tamaño constructivo | Tornillo | Conexiones de potencia y PE | |
|---------------------|----------|-----------------------------|--------|
| | | Nm | lbf.in |
| A | M3,5 | 0,96 | 8,50 |
| B | M4 | 1,50 | 13,30 |
| C | M5 | 2,25 | 19,91 |

Tabla 7-4 Datos técnicos SINAMICS G110, tamaño constructivo A

| | | | | | |
|--|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Tensión de entrada | 1 AC 200 V – 240 V, ± 10 % | | | | |
| Gamas de potencia | 120 W - 750 W | | | | |
| Tamaño constructivo | A | A | A | A | A |
| Potencia nominal del motor | [kW] 0,12 [hp] 0,16 | 0,25 0,33 | 0,37 0,5 | 0,55 0,75 | 0,75 1,0 |
| Referencia | 6SL3211- | | | | |
| Sin filtro | Analógica | 0AB11-2UA0* | 0AB12-5UA0* | 0AB13-7UA0* | 0AB15-5UA0* |
| | USS | 0AB11-2UB0* | 0AB12-5UB0* | 0AB13-7UB0* | 0AB15-5UB0* |
| | Flat Plate, analógica | 0KB11-2UA0* | 0KB12-5UA0* | 0KB13-7UA0* | 0KB15-5UA0* |
| | Flat Plate, USS | 0KB11-2UB0* | 0KB12-5UB0* | 0KB13-7UB0* | 0KB15-5UB0* |
| Con filtro EMC integrado | Analógica | 0AB11-2BA0* | 0AB12-5BA0* | 0AB13-7BA0* | 0AB15-5BA0* |
| | USS | 0AB11-2BB0* | 0AB12-5BB0* | 0AB13-7BB0* | 0AB15-5BB0* |
| | Flat Plate, analógica | 0KB11-2BA0* | 0KB12-5BA0* | 0KB13-7BA0* | 0KB15-5BA0* |
| | Flat Plate, USS | 0KB11-2BB0* | 0KB12-5BB0* | 0KB13-7BB0* | 0KB15-5BB0* |
| Corriente de salida ² | [A] | 0,9 | 1,7 | 2,3 | 3,2 |
| Corriente de entrada ³ | [A] | 2,3 | 4,5 | 6,2 | 7,7 |
| Fusibles recomendados | [A] | 10,0 3NA3803 | 10,0 3NA3803 | 10,0 3NA3803 | 10,0 3NA3803 |
| Secciones para cables de entrada (red) | [mm ²] [AWG] | 1,0 – 2,5 16 – 12 |
| Secciones para cables de salida (motor) | [mm ²] [AWG] | 1,0 – 2,5 16 – 12 |

¹ Los datos de potencia hp son válidos para los motores 1LA7 de Siemens y no para motores con datos de potencia según NEMA/UL.

² Mientras no se indique lo contrario los valores de corriente son válidos para temperaturas ambientales de 50 °C.

³ Los valores se basan en una tensión nominal de red de 230 V.

* La última cifra de la referencia puede ser distinta de acuerdo a cambios de hardware o software del producto.

04/2005

Datos técnicos del SINAMICS G110

Tabla 7-5 Datos técnicos SINAMICS G110, tamaños constructivos B y C

| | | | | | |
|--|-----------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| Tensión de entrada | 1 AC 200 V – 240 V, ± 10 % | | | | |
| Gamas de potencia | 1.1 kW - 3.0 kW | | | | |
| Tamaño constructivo | B | B | C | C | |
| Potencia nominal del motor | [kW] [hp] ¹ | 1,1 1,5 | 1,5 2,0 | 2,2 3,0 | 3,0 4,0 |
| Referencia | 6SL3211- | | | | |
| Sin filtro | Análogica | 0AB21-1UA0* | 0AB21-5UA0* | 0AB22-2UA0* | 0AB23-0UA0* |
| | USS | 0AB21-1UB0* | 0AB21-5UB0* | 0AB22-2UB0* | 0AB23-0UB0* |
| Con filtro EMC integrado | Análogica | 0AB21-1AA0* | 0AB21-5AA0* | 0AB22-2AA0* | 0AB23-0AA0* |
| | USS | 0AB21-1AB0* | 0AB21-5AB0* | 0AB22-2AB0* | 0AB23-0AB0* |
| Corriente de salida ² | [A] | 6,0 | 7,8 (40°C) | 11,0 | 13,6 (40°C) |
| Corriente de entrada ³ | [A] | 14,7 | 19,7 | 27,2 | 32,0 |
| Fusibles recomendados | [A] | 20,0 3NA3807 | 25,0 3NA3810 | 35,0 3NA3814 | 50,0 3NA3820 |
| Secciones para cables de entrada (red) | [mm ²] [AWG] | 2,5 – 6,0 12 – 10 | 2,5 – 6,0 12 – 10 | 4,0 – 10 11 – 8 | 6,0 – 10 10 – 8 |
| Secciones para cables de salida (motor) | [mm ²] [AWG] | 1,5 – 6,0 14 – 10 | 1,5 – 6,0 14 – 10 | 2,5 – 10 12 – 8 | 2,5 – 10 12 – 8 |

¹ Los datos de potencia hp son válidos para los motores 1LA7 de Siemens y no para motores con datos de potencia según NEMA/UL.

² Mientras no se indique lo contrario los valores de corriente son válidos para temperaturas ambientales de 50 °C.

³ Los valores se basan en una tensión nominal de red de 230 V.

* La última cifra de la referencia puede ser distinta de acuerdo a cambios de hardware o software del producto.

Tabla 7-6 Disipación de potencia del convertidor SINAMICS G110 (230 V) *)

| Tamaño constructivo | Potencia de salida (kW) | Pérdidas (W) |
|---------------------|-------------------------|--------------|
| A | 0,12 | 22 |
| A | 0,25 | 28 |
| A | 0,37 | 36 |
| A | 0,55 | 43 |
| A | 0,75 | 54 |
| B | 1,1 | 86 |
| B | 1,5 | 118 |
| C | 2,2 | 174 |
| C | 3 | 210 |

*) Las pérdidas de la Tabla 7-6 son aplicables a equipos con cables de conexión apantallados de hasta 25 m.

Tabla 7-7 Corrientes armónicas, conexión 1AC 230 V

| Potencia de salida kW | Oscilación fundamental A | Armónicas | | | | | |
|--------------------------|--------------------------------|-----------|---------|---------|---------|----------|----------|
| | | 3. A | 5. A | 7. A | 9. A | 11. A | 13. A |
| 0,12 | 1,18 | 1,05 | 0,9 | 0,76 | 0,58 | 0,568 | 0,508 |
| 0,25 | 2,26 | 2,06 | 1,77 | 1,50 | 1,32 | 1,20 | 1,02 |
| 0,37 | 3,19 | 2,26 | 2,26 | 2,12 | 1,83 | 1,56 | 1,22 |
| 0,55 | 4,28 | 3,86 | 3,18 | 2,44 | 1,82 | 1,42 | 1,12 |
| 0,75 | 4,52 | 4,51 | 3,98 | 2,98 | 2,42 | 1,90 | 1,44 |
| 1,1 | 8,12 | 7,80 | 5,92 | 4,12 | 2,96 | 2,20 | 1,52 |
| 1,5 | 11,0 | 9,04 | 6,4 | 4,08 | 2,92 | 2,16 | 1,48 |
| 2,2 | 15,7 | 12,6 | 8,56 | 4,56 | 3,00 | 2,44 | 1,28 |
| 3,0 | 19,1 | 14,4 | 7,8 | 3,6 | 3,28 | 2,36 | 0,88 |

Tabla 7-8 Reducción de potencia en función de la frecuencia de pulsación

| Potencia de salida [kW] | Corriente de salida nominal* [A] para una frecuencia de pulsación de: | | | | | | | |
|----------------------------|---|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | 2 kHz | 4 kHz | 6 kHz | 8 kHz | 10 kHz | 12 kHz | 14 kHz | 16 kHz |
| 0,12 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| 0,25 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 |
| 0,37 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 |
| 0,55 | 3,2 | 3,2 | 3,2 | 3,2 | 3,0 | 2,7 | 2,5 | 2,2 |
| 0,75 (40°C) | 3,9 | 3,9 | 3,9 | 3,9 | 3,6 | 3,3 | 3,0 | 2,7 |
| 0,75 | 3,2 | 3,2 | 3,2 | 3,2 | 3,0 | 2,7 | 2,5 | 2,2 |
| 1,1 | 6,0 | 6,0 | 6,0 | 6,0 | 5,9 | 5,7 | 5,6 | 5,4 |
| 1,5 (40°C) | 7,8 | 7,8 | 7,8 | 7,8 | 7,6 | 7,4 | 7,2 | 7,0 |
| 1,5 | 6,0 | 6,0 | 6,0 | 6,0 | 5,9 | 5,7 | 5,6 | 5,4 |
| 2,2 | 11,0 | 11,0 | 11,0 | 11,0 | 10,8 | 10,5 | 10,2 | 9,9 |
| 3,0 (40°C) | 13,6 | 13,6 | 13,6 | 13,6 | 13,3 | 12,9 | 12,6 | 12,3 |
| 3,0 | 11,0 | 11,0 | 11,0 | 11,0 | 10,8 | 10,5 | 10,2 | 9,9 |

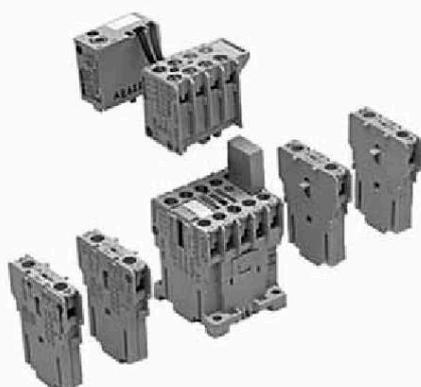
* Mientras no se indique lo contrario los valores de corriente son válidos para temperaturas de servicio de 50 °C.

GE Energy
Industrial Solutions



Automatismos y Control

Contactores 3P-4P y Relés térmicos



GE imagination at work

Modelo CL

Contadores



Contadores tripolares y tetrapolares 9 hasta 105A (AC3) 25 hasta 140A (AC1)

- Circuito de mando: Corriente alterna hasta 690V
Corriente continua hasta 440V
- Numeración bornes según EN 50005 y EN 50012
- Sistema de fijación para montaje rápido y simple por engatillado sobre perfil normalizado EN 50022-35 o por tornillos
- Bornes protegidos contra contactos accidentales según VDE 0106 T.100, VBG4.
- Versión para terminales circulares
- Bobina con tres terminales
- Posibilidad de montaje de bloques de contactos auxiliares instantáneos frontales y/o laterales, temporizados, retención mecánica, bloque antiparasitario y módulos interface.
- Grado de protección: IP20 para CL00 ... CL02
IP10 para CL25 ... CL10
- Número máximo de contactos auxiliares: 4 para CL00 ... CL02
6 para CL03 ... CL45
8 para CL06 ... CL10

Conformidad a normas

| | |
|------------------|----------------|
| IEC/EN 60947-1 | CSA 22.2/14 |
| IEC/EN 60947-4-1 | NFC 63-110 |
| IEC/EN 60947-5-1 | ASE 1025 |
| EN 50005 | VDE 0660/102 |
| UL 508 | CENELEC HD 419 |
| NEMA ICS 1 | |
| BS 5424 & 775 | |

Tensiones normalizadas

Para completar el TIPO, sustituir el símbolo ♦ por el código correspondiente a la tensión y frecuencia del circuito de mando

Corriente alterna (V). Bobinas bifrecuencia

| ♦ | 1 | 2 | 9 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 13 | 8 | 15 |
|---------|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| AC | 24 | 42 | 48 | 110 | 120 | 220 | 230 | 240 | 400 | 440 | 480 |
| 50/60Hz | 115 | | | | | | | | | | |

Corriente alterna (V).

| ♦ | E | K | L | N | T | U | W | Y | Z | |
|------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|---|--|
| AC | 32 | 127 | 220 | 380 | 415 | 500 | 660 | | | |
| 50Hz | 230 | | 400 | | 690 | | | | | |
| AC | 208 277 380 480 460 600 | | | | | | | | | |
| 60Hz | | | | | | | | | | |

Corriente continua (V)

Para contactores tipo CL...D / Límites de funcionamiento: 0.80 ... 1.10 x Us

| ♦ | B | D | E | F | G | H | I | J | K | N | P | R | T | X |
|---------|-----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Voltage | 12 | 24 | 36 | 42 | 48 | 60 | 72 | 110 | 120 | 220 | 230 | 240 | 250 | 440 |
| | 125 | | | | | | | | | | | | | |

Bobina con módulo electrónico para tipos CL...E (también con alimentación en c. alterna)

| ♦ | D | F | H | J | N | Y |
|---------|----|----|----|-----|-----|-----|
| Tensión | 24 | 42 | 60 | 110 | 220 | 440 |
| | 28 | 48 | 72 | 125 | 250 | |

Corriente continua (V). Bobinas con amplio límite de funcionamiento (0.70 ... 1.30 x Us)

Para contactores tipo CL...D

| ♦ | WB | WD | WE | WF | WG | WH | WI | WJ | WK | WN | WP | WR | WT | WX |
|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| DC | 12 | 24 | 33 | 42 | 48 | 60 | 72 | 110 | 125 | 220 | 230 | 240 | 250 | 440 |

Número máximo de contactos auxiliares adicionales:

CL00D...CL02D: 2NA 6 1NC
CL03D...CL45D: 1NA y 1NC
CL05D...CL10D: 4NA 6 2NC
CL05E...CL10E: 4 cont. aux.

Bobina con módulo electrónico para tipos CL...E

| ♦ | WD | WE | WF | WH | WJ | WN |
|---------|----|----|----|----|-----|-----|
| Tensión | 24 | 33 | 48 | 72 | 110 | 220 |

Para otras configuraciones de contactos auxiliares, consultar.

Homologaciones



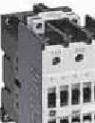
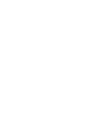
- Tipos ● pág. C.11
- Bloques de contactos auxiliares ● pág. C.15
- Accesorios ● pág. C.16
- Características técnicas ● pág. C.31
- Combinación de los bornes ● pág. C.38
- Dimensiones ● pág. C.52
- Listado de productos ● Cap. X

C.10



Modelo CL

Contactos tripolares. Borne: tornillo - mordaza

| Int. máx. empleo Cargas resistivas AC1 A | Motores <440V, 3 - 50/60Hz AC3 A | Potencias admisibles AC3 | | | | Endur. eléctrica | Contacto auxiliar | Circuito de mando: Corriente alterna | | Circuito de mando: Corriente continua | | Circuito de mando: Bobina con módulo electrón. (AC/DC) | |
|--|----------------------------------|--------------------------|-----------|-----------|-------|--------------------|---------------------|---|----------|---------------------------------------|-------------|--|--|
| | | 220V 230V | 380V 400V | 415V 440V | 500V | | | TIPO (1) | TIPO (1) | TIPO (1) | TIPO (1) | | |
| | | kW HP | kW HP | kW HP | kW HP | Cat. AC3 Maniobras | 1 0 | 0 1 | TIPO (1) | TIPO (1) | TIPO (1) | TIPO (1) | |
|  | 25 | 9 | 2.2 | 4 | 4 | 5.5 | 2x10 ⁶ | 1 | 0 | CL00A310T ◆ | CL00D310T ◆ | | |
| | | | 3 | 5.5 | 5.5 | 7.5 | | 0 | 1 | CL00A301T ◆ | CL00D301T ◆ | | |
|  | 25 | 12 | 3 | 5.5 | 5.5 | 7.5 | 2x10 ⁶ | 1 | 0 | CL01A310T ◆ | CL01D310T ◆ | | |
| | | | 4 | 7.5 | 7.5 | 10 | | 0 | 1 | CL01A301T ◆ | CL01D301T ◆ | | |
|  | 32 | 18 | 4 | 7.5 | 7.5 | 10 | 1.7x10 ⁶ | 1 | 0 | CL02A310T ◆ | CL02D310T ◆ | | |
| | | | 5.5 | 10 | 10 | 13.5 | | 0 | 1 | CL02A301T ◆ | CL02D301T ◆ | | |
|  | 45 | 25 | 7.5 | 11 | 11 | 15 | 1.2x10 ⁶ | 0 | 0 | CL25A300T ◆ | CL25D300T ◆ | | |
| | | | 10 | 15 | 15 | 20 | | | | | | | |
|  | 45 | 25 | 7.5 | 12 | 12 | 15 | 2x10 ⁶ | 1 | 0 | CL03A310M ◆ | CL03D310M ◆ | | |
| | | | 10 | 16 | 16 | 20 | | 0 | 1 | CL03A301M ◆ | CL03D301M ◆ | | |
|  | 60 | 32 | 9 | 16 | 16 | 18.5 | 2x10 ⁶ | 1 | 0 | CL04A310M ◆ | CL04D310M ◆ | | |
| | | | 12 | 22 | 22 | 25 | | 0 | 1 | CL04A301M ◆ | CL04D301M ◆ | | |
|  | 60 | 40 | 11 | 18.5 | 22 | 25 | 2x10 ⁶ | 0 | 0 | CL45A300M ◆ | CL45D300M ◆ | | |
| | | | 15 | 25 | 30 | 34 | | | | | | | |
| | 90 | 50 | 15 | 22 | 25 | 30 | 1.8x10 ⁶ | 0 | 0 | CL06A300M ◆ | CL06D300M ◆ | CL06E300M ◆ | |
| | | | 20 | 30 | 34 | 40 | | | | | | | |
| | 110 | 65 | 18.5 | 30 | 37 | 40 | 1.7x10 ⁶ | 0 | 0 | CL07A300M ◆ | CL07D300M ◆ | CL07E300M ◆ | |
| | | | 25 | 40 | 50 | 55 | | | | | | | |
| | 110 | 80 | 22 | 37 | 45 | 45 | 1.5x10 ⁶ | 0 | 0 | CL08A300M ◆ | CL08D300M ◆ | CL08E300M ◆ | |
| | | | 30 | 50 | 60 | 60 | | | | | | | |
| | 140 | 95 | 25 | 45 | 50 | 55 | 1.7x10 ⁶ | 0 | 0 | CL09A300M ◆ | CL09D300M ◆ | CL09E300M ◆ | |
| | | | 34 | 60 | 68 | 75 | | | | | | | |
| | 140 | 105 | 30 | 55 | 55 | 65 | 1.5x10 ⁶ | 0 | 0 | CL10A300M ◆ | CL10D300M ◆ | CL10E300M ◆ | |
| | | | 40 | 75 | 75 | 88 | | | | | | | |
| Bobina de recambio  | | | | | | | | CL00 - CL25 | LB1A ◆ | LB1D ◆ | | | |
| | | | | | | | | CL03 - CL45 | LB3A ◆ | LB3D ◆ | | | |
| | | | | | | | | CL06 - CL10 | LB4A ◆ | LB4D ◆ | | | |
| | | | | | | | | Bobina+Módulo electrónico CL06E - CL10E | | | LB4E ◆ | | |

(1) Para completar el TIPO, sustituir el símbolo ◆ por el código correspondiente a la tensión y frecuencia del circuito de mando (ver página C.10)
 (3) Con dos bloques de contactos auxiliares tipo BCLF

Para códigos y suministro, ver Cap. X



Contadores 3P y 4P

A

B

C

D

E

F

G

H

I

X

Modelo CL

Conformidad a normas

| | | |
|------------------|---------------|---------------|
| IEC/EN 60947-1 | EN 50005 | UNE 20109 |
| IEC/EN 60947-4-1 | CENELEC HD419 | BS 5424 & 775 |
| IEC/EN 60947-5-1 | NF C63-110 | NEMA ICS 1 |
| UL 508 | ASE 1025 | VDE 0660/102 |
| CSA 22.2/14 | | |

Homologaciones

| | | |
|------------------|---------------------|----|
| cULus | RINA | CE |
| SETI | IMQ (up to Ith:32A) | |
| Lloyd's Register | Bureau Veritas | |

Condiciones ambientales

| | | |
|-------------------------------|------------------|-------------------|
| Temperatura de almacenamiento | -55°C to +80°C | |
| Temperatura de funcionamiento | -40°C to +60°C | |
| Altitud | hasta 3000m | Valores nominales |
| | 3000 hasta 4000m | 90%le 80%Ue |
| | 4000 hasta 5000m | 80%le 75%Ue |

Resistencia climática (IEC 68-2)

| Ensayos continuos 40 / 125 / 56 | | Ensayos (6 ciclos) | |
|---------------------------------|--------|-------------------------|-------|
| Frio (72h) | | Calor húmedo | |
| Temperatura | -40°C | Primer semiciclo (12h) | |
| Calor seco (96h) | | Temperatura baja | +25°C |
| Temperatura | +125°C | Humedad relativa | 93% |
| Humedad relativa | < 50% | Segundo semiciclo (12h) | |
| Calor húmedo (56 días) | | Temperatura baja | +55°C |
| Temperatura | +40°C | Humedad relativa | 95% |
| Humedad relativa | 95% | | |

Posiciones de montaje



Capacidad de los bornes y Par de apriete

| | | CL00 ... CL02 | CL25 | CL03 ... CL04 | CL45 | CL05 ... CL08 | CL09 ... CL10 |
|--------------------------------|---|-----------------|-----------------|---------------|-------------|----------------|----------------|
| | Monofilar, multilar y flexible sin vaina terminal (mm²) | 2 x 0.5 ... 2.5 | 2 x 0.5 ... 2.5 | - | - | - | - |
| | Flexible con vaina terminal ó sin vaina terminal (mm²) | 2 x 1 ... 2.5 | 2 x 2.5 ... 10 | - | - | - | - |
| | Cables AWG mono y multifilares | 2 x 20 ... 12 | 2 x 20 ... 8 | - | - | - | - |
| | Par de apriete (Nm / Lb x in.) | 1.6 / 15 | 2.2 / 20 | - | - | - | - |
| | Monofilar, multilar y flexible sin vaina terminal (mm²) | - | - | 0.75 ... 16 | 0.75 ... 16 | 1 ... 50 | 1.5 ... 50 |
| | Flexible con vaina terminal (mm²) | - | - | 0.75 ... 16 | 0.75 ... 16 | 1 ... 50 | 1.5 ... 50 |
| | Flexible sin vaina terminal (mm²) | - | - | 1 ... 16 | 1 ... 16 | 1 ... 50 | 1.5 ... 50 |
| | Cables AWG mono y multifilares | - | - | 18 ... 6 | 18 ... 6 | 16 ... 2 | 16 ... 2 |
| Par de apriete (Nm / Lb x in.) | - | - | 1.4 / 12 | 1.8 / 16 | 4 / 35 | 5.6 / 50 | |
| | Monofilar | - | - | 0.75 ... 16 | 0.75 ... 16 | 1 ... 25 | 4 ... 35 |
| | Multifilar | - | - | 0.75 ... 16 | 0.75 ... 16 | 1 ... 25 | 4 ... 35 |
| | Flexible sin vaina terminal (mm²) | - | - | 0.75 ... 16 | 0.75 ... 16 | 1 ... 25 | 4 ... 35 |
| | Flexible con vaina terminal (mm²) | - | - | 1 ... 16 | 1 ... 16 | 1 ... 25 | 4 ... 35 |
| Par de apriete (Nm / Lb x in.) | - | - | 1.4 / 12 | 1.8 / 16 | 4 / 35 | 5.6 / 50 | |
| | Monofilar, multilar y flexible sin vaina terminal (mm²) | - | - | Max. 16 | Max. 16 | Max. 50 ... 4 | Max. 50 ... 35 |
| | Flexible sin vaina terminal (mm²) | - | - | - | - | Max. 25 ... 16 | - |
| | Flexible con vaina terminal (mm²) | - | - | - | - | Max. 25 ... 16 | - |
| | Cables AWG mono y multifilares | - | - | Max. 6 | Max. 6 | Max. 2 ... 12 | Max. 1 |
| Par de apriete (Nm / Lb x in.) | - | - | 1.4 / 12 | 1.8 / 16 | 4 / 35 | 5.6 / 50 | |
| | Terminales circulares (según IEC/EN 60947-1) | Ø i / A | 3,6 / 8 | 4,2 / 10 | 4,2 / 10 | 6,2 / 12,5 | 6,2 / 12,5 |
| | Par de apriete (Nm) | | 1,6 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 3 |
| | Par de apriete (Lb x in.) | | 15 | 12 | 12 | 12 | 26 |

Contactores 3P y 4P

A

B

C

D

E

F

G

H

I

X



Modelo CL

Contactores

A

B

C

D

E

F

G

H

I

X

Circuito de potencia

| | | CL00 | CL01 | CL02 | CL25 | CL03 | CL04 | CL45 | CL05 | CL06 | CL07 | CL08 | CL09 | CL10 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Contactores tripolares | | | | | | | | | | | | | | |
| Int. nominal térmica I _{th} a $\theta \leq 55^\circ\text{C}$ | (A) | 25 | 25 | 32 | 45 | 45 | 60 | 60 | | 90 | 110 | 110 | 140 | 140 |
| Int. nominal de empleo I _e AC-3 | (A) | 9 | 12 | 18 | 25 | 25 | 32 | 40 | | 50 | 65 | 80 | 95 | 105 |
| Tensión nominal de empleo U _e | (V) | 690 | 690 | 690 | 690 | 690 | 690 | 690 | | 690 | 690 | 690 | 690 | 690 |
| Contactores tetrapolares (4NA y 2NA+2NC) | | | | | | | | | | | | | | |
| Int. nominal térmica I _{th} a $\theta \leq 55^\circ\text{C}$ | (A) | | 25 | 32 | | 45 | 60 | | 90 | | 110 | 110 | 140 | |
| Tensión nominal de empleo U _e | (V) | | 690 | 690 | | 690 | 690 | | 690 | | 690 | 690 | 690 | |
| Contactores tripolares y tetrapolares | | | | | | | | | | | | | | |
| Tensión nominal de aislamiento U _i | (V) | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| Intensidad máxima permanente AC-1(A) | (A) | 25 | 25 | 32 | 45 | 45 | 60 | 60 | 90 | 90 | 110 | 110 | 140 | 140 |
| Límites de frecuencia | (Hz) | 25.400 | 25.400 | 25.400 | 25.400 | 25.400 | 25.400 | 25.400 | 25.400 | 25.400 | 25.400 | 25.400 | 25.400 | 25.400 |
| Poder de cierre (RMS) (IEC 947) | (A) | 450 | 450 | 450 | 450 | 550 | 550 | 550 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1280 | 1280 |
| Poder de corte (RMS) (IEC 947) | | | | | | | | | | | | | | |
| U _e ≤ 400V | (A) | 250 | 250 | 250 | 350 | 450 | 450 | 450 | 920 | 920 | 920 | 920 | 1050 | 1050 |
| U _e = 500V | (A) | 250 | 250 | 250 | 320 | 450 | 450 | 450 | 920 | 920 | 920 | 920 | 1050 | 1050 |
| U _e = 690V | (A) | 130 | 130 | 130 | 170 | 205 | 205 | 205 | 780 | 780 | 780 | 780 | 950 | 950 |
| Intensidad de corta duración | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 seg. | (A) | 455 | 455 | 570 | 630 | 1010 | 1010 | 1265 | 1580 | 1580 | 2530 | 2530 | 3300 | 3300 |
| 5 seg. | (A) | 205 | 205 | 254 | 280 | 450 | 450 | 450 | 565 | 710 | 1130 | 1130 | 1485 | 1485 |
| 10 seg. | (A) | 144 | 144 | 180 | 200 | 320 | 320 | 400 | 500 | 500 | 800 | 800 | 1050 | 1050 |
| 30 seg. | (A) | 85 | 85 | 104 | 115 | 185 | 185 | 230 | 290 | 290 | 460 | 460 | 600 | 600 |
| 1 min. | (A) | 60 | 60 | 74 | 80 | 130 | 130 | 165 | 205 | 205 | 325 | 325 | 430 | 430 |
| 3 min. | (A) | 35 | 35 | 46 | 50 | 90 | 90 | 100 | 120 | 120 | 185 | 185 | 250 | 250 |
| Tiempo de recuperación (min.) | (min.) | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Protec. contra cortocircuitos con fusibles | | | | | | | | | | | | | | |
| Sin térmico | | | | | | | | | | | | | | |
| Coordinación tipo "1" | | | | | | | | | | | | | | |
| gL-gG | (A) | 50 | 50 | 63 | 63 | 100 | 100 | 125 | 200 | 200 | 200 | 200 | 250 | 250 |
| Coordinación tipo "2" | | | | | | | | | | | | | | |
| gL-gG | (A) | 25 | 35 | 35 | 50 | 63 | 63 | 80 | 100 | 100 | 125 | 125 | 160 | 200 |
| Sin soldadura | | | | | | | | | | | | | | |
| gL-gG | (A) | 10 | 10 | 25 | 35 | 35 | 35 | 50 | 80 | 80 | 100 | 100 | 140 | 160 |
| Impedancia por polo | (mΩ) | 2.35 | 2.35 | 2.41 | 1.65 | 1.28 | 1.28 | 0.95 | 0.85 | 0.85 | 0.86 | 0.86 | 0.76 | 0.76 |
| Potencia disipada por polo | | | | | | | | | | | | | | |
| AC-1 | (W) | 1.47 | 1.47 | 2.46 | 3.34 | 2.59 | 4.6 | 3.42 | 6.89 | 6.86 | 10.40 | 10.40 | 14.89 | 14.89 |
| AC-3 | (W) | 0.19 | 0.34 | 0.78 | 1.03 | 0.80 | 1.31 | 1.52 | 1.36 | 2.12 | 3.63 | 5.5 | 6.86 | 8.37 |
| Resistencia de aislamiento | | | | | | | | | | | | | | |
| Entre polos contiguos | (MΩ) | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 |
| Entre polos y masas | (MΩ) | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 |
| Entre entrada y salida | (MΩ) | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 | >10 |



Modelo CL

Contadores 3P y 4P

A

B

C

D

E

F

G

H

I

X

Circuito de mando (control)

| | | CL00 ... CL25 | CL03 ... CL45 | CL05 ... CL08 | CL09 ... CL10 |
|--|----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Corriente alterna | | | | | |
| Tensión nominal de aislamiento Ui | (V) | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| Tensiones normalizadas Us 50 Hz | (V) | 24..690 | 24..690 | 24..690 | 24..690 |
| Tensiones normalizadas Us 60 Hz | (V) | 24..600 | 24..600 | 24..600 | 24..600 |
| Límites de la tensión bobinas monofrecuencia | | | | | |
| Funcionamiento | xUs | 0.8..1.1 | 0.8..1.1 | 0.8..1.1 | 0.8..1.1 |
| Conexión | xUs | 0.6..0.8 | 0.65..0.8 | 0.65..0.8 | 0.65..0.8 |
| Desconexión | xUs | 0.35..0.55 | 0.4..0.6 | 0.4..0.6 | 0.4..0.6 |
| Límites de tensión bobina 50/60 Hz coils | | | | | |
| Funcionamiento 50 Hz | xUs | 0.8..1.1 | 0.8..1.1 | 0.8..1.1 | 0.8..1.1 |
| Funcionamiento 60 Hz | xUs | 0.85..1.1 | 0.85..1.1 | 0.85..1.1 | 0.85..1.1 |
| Conexión 50 Hz | xUs | 0.5..0.8 | 0.6..0.8 | 0.6..0.8 | 0.6..0.8 |
| Conexión 60 Hz | xUs | 0.65..0.85 | 0.7..0.85 | 0.7..0.85 | 0.7..0.85 |
| Desconexión 50 Hz | xUs | 0.3..0.55 | 0.35..0.60 | 0.35..0.60 | 0.35..0.60 |
| Desconexión 60 Hz | xUs | 0.35..0.65 | 0.4..0.6 | 0.4..0.6 | 0.4..0.6 |
| Consumo bobinas monofrecuencia | | | | | |
| Circuito magnético cerrado | (VA) | 6 | 9 | 15.5 | 15.5 |
| Circuito magnético abierto | (VA) | 48 | 88 | 190 | 190 |
| Consumo bobinas bifrecuencia | | | | | |
| Circuito magnético cerrado (50 Hz/60 Hz) | (VA) | 6.8 / 5.6 | 11.4 / 9.5 | 20 / 16.6 | 20 / 16.6 |
| Circuito magnético abierto (50 Hz/60 Hz) | (VA) | 53 / 44 | 120 / 100 | 245 / 204 | 245 / 204 |
| Potencia térmica disipada (50 Hz/60 Hz) | (W) | 2.2 / 1.8 | 3.2 / 2.6 | 5.2 / 4.3 | 5.2 / 4.3 |
| Factor de potencia | | | | | |
| Circuito magnético cerrado | cos φ | 0.33 | 0.28 | 0.26 | 0.26 |
| Circuito magnético abierto | cos φ | 0.84 | 0.73 | 0.54 | 0.54 |
| Tiempos de conexión y desconexión | | | | | |
| Valores entre + 10 % Us y - 20 % Us | | | | | |
| Tiempo de cierre a la excitación (NA) | (ms) | 6..20 | 7..25 | 9..35 | 9..35 |
| Tiempo de apertura a la desexcitación (NA) | (ms) | 6..13 | 5..25 | 9..15 | 9..15 |
| Valores a Us | | | | | |
| Tiempo de cierre a la excitación (NA) | (ms) | 8..20 | 10..19 | 15..30 | 15..30 |
| Tiempo de apertura a la desexcitación (NA) | (ms) | 6..13 | 5..25 | 9..15 | 9..15 |
| Endurancia mecánica | | | | | |
| Bobinas monofrecuencia | 10 ⁶ ops. | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Bobinas bifrecuencia (at 50 Hz) | 10 ⁶ ops. | 10 | 10 | 8 | 8 |
| Cadencia máxima | | | | | |
| Bobinas monofrecuencia. Sin carga | ops./h | 9000 | 9000 | 9000 | 5000 |
| AC-1 con potencia nominal | ops./h | 1200 | 1200 | 1200 | 1200 |
| AC-2 con potencia nominal | ops./h | 1000 | 1000 | 1000 | 750 |
| AC-3 con potencia nominal | ops./h | 1200 | 1200 | 1200 | 600 |
| AC-4 con potencia nominal | ops./h | 360 | 360 | 200 | 200 |
| Bobinas bifrecuencia. Sin carga | ops./h | 3600 | 3600 | 3600 | 3600 |

| | | CL00D ... CL25D | | Bobinas con módulo electrónico | | Bobinas con amplio límite de funcionamiento | | |
|--|----------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|-----------------------|---|-----------------------|------------|
| | | CL03D ... CL45D | CL05E ... CL08E | CL09E ... CL10E | CL00D..W ... CL25D..W | CL03D..W ... CL45D..W | CL05D..W ... CL10D..W | |
| Corriente continua | | | | | | | | |
| Tensión nominal de aislamiento Ui | (V) | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| Tensiones normalizadas Us | (V) | 12..440 | 12..440 | 24..440 | 24..440 | 12..440 | 12..440 | 12..440 |
| Límites de la tensión | | | | | | | | |
| De funcionamiento | xUs | 0.8..1.1 | 0.8..1.1 | 0.8..1.1 | 0.8..1.1 | 0.7..1.3 | 0.7..1.3 | 0.7..1.3 |
| De conexión | xUs | 0.45..0.65 | 0.45..0.65 | 0.70..0.80 | 0.70..0.80 | 0.45..0.55 | 0.45..0.55 | 0.45..0.55 |
| De desconexión | xUs | 0.15..0.3 | 0.15..0.3 | 0.4..0.6 | 0.4..0.6 | 0.15..0.3 | 0.15..0.3 | 0.15..0.3 |
| Consumo | | | | | | | | |
| Circuito magnético cerrado | (W) | 5.5 | 8 | 10 | 10 | 6.5 | 10.4 | 20 |
| Circuito magnético abierto | (W) | 5.5 | 8 | 170 | 170 | 6.5 | 10.4 | 20 |
| Tiempos de conexión y desconexión | | | | | | | | |
| Valores entre + 10 % Us y - 20 % Us | | | | | | | | |
| Tiempo de cierre a la excitación (NA) | (ms) | 35..65 | 35..70 | 60..80 | 60..80 | 26..55 | 30..65 | 64..133 |
| Tiempo de apertura a la desexcitación (NA) | (ms) | 6..15 | 40..65 | 40..50 | 40..50 | 6..15 | 5..10 | 20..23 |
| Valores a Us | | | | | | | | |
| Tiempo de cierre a la excitación (NA) | (ms) | 35..45 | 40..55 | 50..60 | 50..60 | 35..45 | 40..55 | 75..95 |
| Tiempo de apertura a la desexcitación (NA) | (ms) | 7..12 | 30..65 | 55..60 | 55..60 | 7..12 | 6..8 | 20..22 |
| Endurancia mecánica | | | | | | | | |
| | 10 ⁶ ops. | 15 | 15 | 12 | 12 | 15 | 15 | 12 |
| Cadencia máxima | | | | | | | | |
| Sin carga | ops./h | 3600 | 3600 | 2500 | 2500 | 3600 | 3600 | 3600 |
| AC1 y AC3 con potencia nominal | ops./h | 1200 | 1200 | 1200 | 600 | 1200 | 1200 | 1200 |
| AC4 con potencia nominal | ops./h | 360 | 360 | 200 | 200 | 360 | 360 | 200 |



Modelo CL

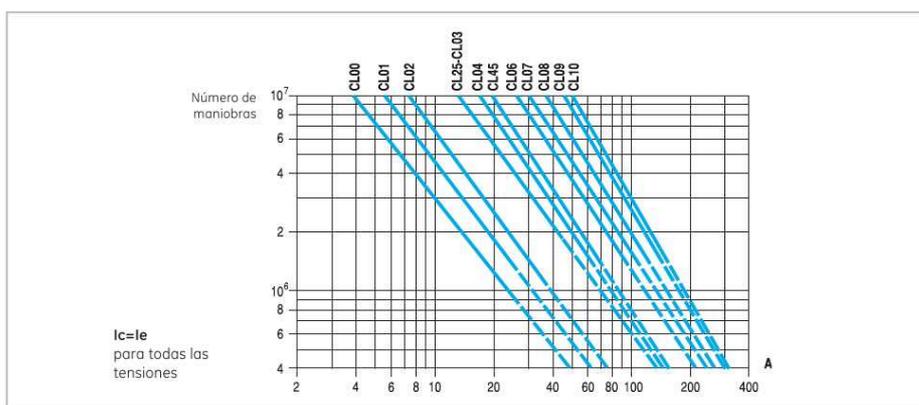
Endurancia eléctrica

Categoría mixta AC4 / AC3

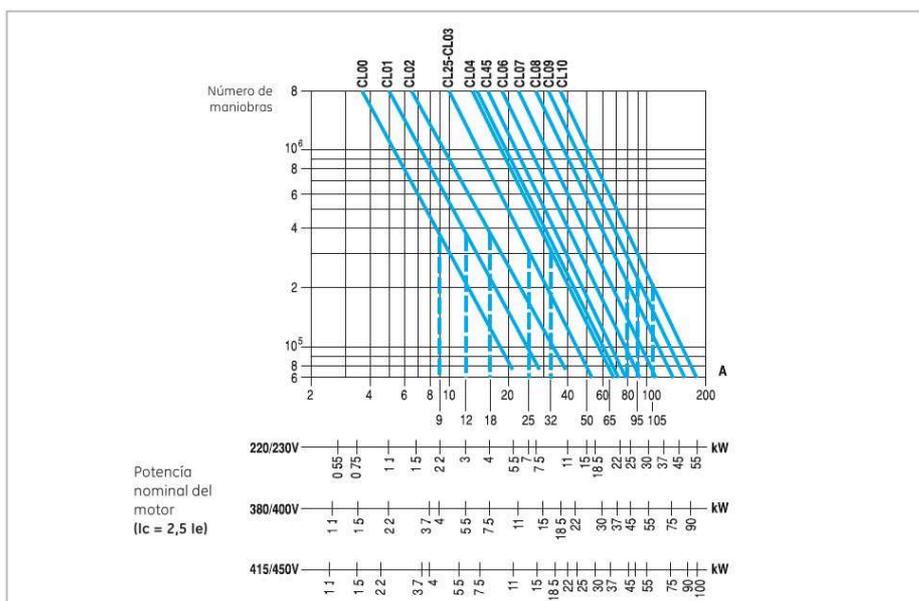
La endurancia eléctrica para Categoría mixta(AC-3/AC-4) se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Endurancia eléctrica (AC-3/AC-4)} = \frac{\text{Endurancia eléctrica (AC-3)}}{1 + \frac{\% \text{ maniobras AC-4}}{100} \times \left(\frac{\text{Endur. elec. (AC-3)}}{\text{Endur. elec. (AC-4)}} - 1 \right)}$$

Categoría AC1



Categoría AC2



Contactores

A

B

C

D

E

F

G

H

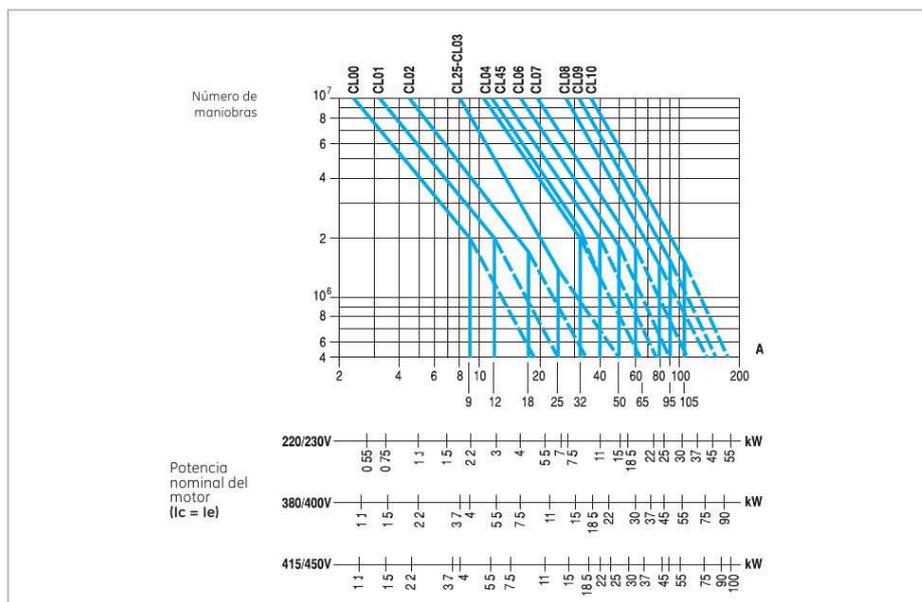
I

X

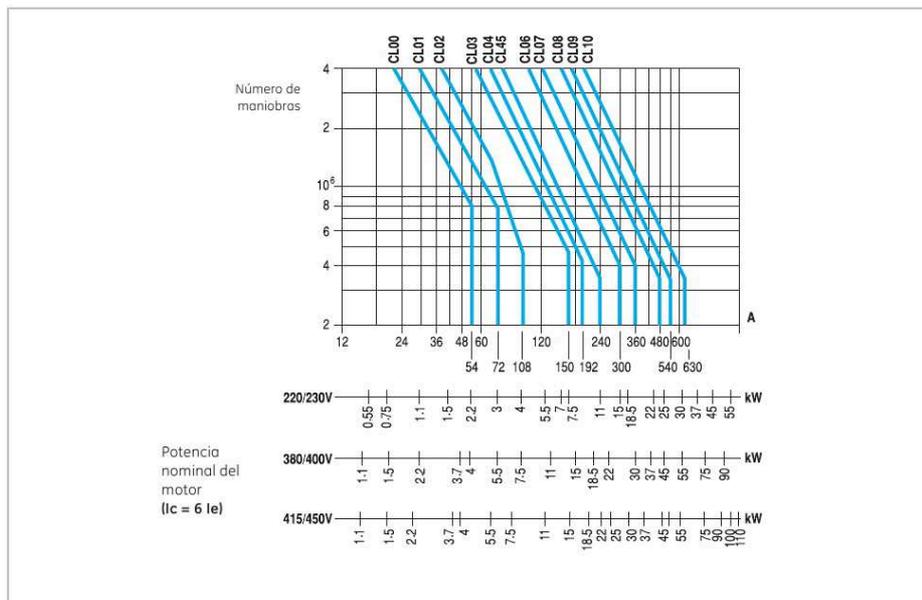


Modelo CL

Categoría AC3



Categoría AC4



Contadores 3P y 4P

A

B

C

D

E

F

G

H

I

X



C.35

Modelo CL

Contactores

A

B

C

D

E

F

G

H

I

X

Contactos auxiliares del contactor auxiliar

| | | CL00 ... CL02 | CL03 ... CL04 |
|--|---|---------------|--|
| Tensión nominal de aislamiento U_i según IEC 60947 | (V) | 1000 | 1000 |
| Intensidad nominal térmica I_{th} a $\theta \leq 55^\circ\text{C}$ | (A) | 20 | 20 |
| Poder de cierre (r.m.s.) según IEC 60947 | | | |
| AC-15 | $U_e \leq 400\text{V}, 50/60\text{ Hz}$ | (A) | 250 |
| DC-13 | $U_e \leq 220\text{V DC}$ | (A) | 250 |
| Poder de corte (r.m.s.) acc. según IEC 60947 | | | |
| AC-15 | $U_e \leq 400\text{V}, 50/60\text{ Hz}$ | (A) | 250 |
| DC-13 | $U_e \leq 220\text{V DC}$ | (A) | 2 |
| AC-15 | Tensión e intensidad nominal U_e -le | según IEC | 110/120V-10A 400/380V-6A 500V-4A |
| | | | 220/230V-10A 415/450V-5A 690/660V-2A |
| | | | 110/120V-10A 400/380V-6A 500V-4A |
| | | | 230/220V-10A 415/450V-5A 690/660V-2A |
| | | | A600 |
| DC-13 | Tensión e intensidad nominal U_e -le | según IEC | 24V-6A 110V-2A 440V-0.35A |
| | | | 48V-4A 220V-0.7A |
| | | | 24V-6A 110V-2A 440V-0.35A |
| | | | 48V-4A 220V-0.7A |
| | | | A600 |
| según UL, CSA | | | |
| Endurancia eléctrica | ops. | 10^6 | 10^6 |
| Valores mínimos de maniobra (seguridad de funcionamiento) | | | |
| Prot. cortocircuitos | Fusible máx. clase gl-gG sin soldadura | (A) | 17V - 5mA |
| Resistencia de aislamiento | Entre contactos | (M Ω) | > 10 |
| | Entre contactos y masas | (M Ω) | > 10 |
| | Entre entrada y salida | (M Ω) | > 10 |
| Garantía de no solapado entre NA y NC | | | |
| | Espacio | (mm) | 1.3 |
| | Tiempo | (ms) | 1.5 |
| Impedancia de los contactos | (M Ω) | 1.28 | 1.28 |

Bloques de contactos auxiliares

| | | Instantáneos BCLF..., BCRF..., BCLL..., BRLL... | Temporizados BTLF..., BTRF... |
|---|--|--|---|
| Tensión nominal de aislamiento U_i según IEC 60947 | (V) | 1000 | 1000 |
| Intensidad nominal térmica I_{th} a $\theta \leq 55^\circ\text{C}$ | (A) | 10 | 10 |
| Poder de cierre (Ieff) según IEC 60947 | | | |
| AC-15 | $U_e \leq 400\text{V}, 50/60\text{ Hz}$ | (A) | 90 |
| DC-13 | $U_e \leq 220\text{V DC}$ | (A) | 90 |
| Poder de corte (Ieff) según IEC 60947 | | | |
| AC-15 | $U_e \leq 400\text{V}, 50/60\text{ Hz}$ | (A) | 60 |
| DC-13 | $U_e \leq 220\text{V DC}$ | (A) | 0.95 |
| AC-15 | Tensión e intensidad nominal U_e -le | según IEC | 120/110V-6A 400/380V-4A 500V-2.5A |
| | | | 230/220V-6A 440/415V-3.5A 690/660V-1.5A |
| | | | 120/110V-6A 400/380V-4A 500V-2.5A |
| | | | 230/220V-6A 440/415V-3.5A 690/660V-1.5A |
| | | | A600 |
| DC-13 | Tensión e intensidad nominal U_e -le | según IEC | 24V-4A 110V-0.7A 440V-0.15A |
| | | | 48V-2A 220V-0.3A |
| | | | 24V-4A 110V-0.7A 440V-0.15A |
| | | | 48V-2A 220V-0.3A |
| | | | A600 |
| según UL, CSA | | | |
| Endurancia eléctrica | 10^6 ops. | 1 | 1 |
| Endurancia mecánica | 10^6 ops. | 10 | 5 |
| Valores mínimos de maniobra (seguridad de funcionamiento) | | | |
| Protec. cortocircuitos | Fusible máx. clase gl-gG sin soldadura | (A) | 17V - 5mA |
| Resistencia de aislamiento | Entre contactos | (M Ω) | > 10 |
| | Entre contactos y masas | (M Ω) | > 10 |
| | Entre entrada y salida | (M Ω) | > 10 |
| Garantía de no solapado entre NA y NC | | | |
| | Espacio | (mm) | 1.3 |
| | Tiempo | (ms) | 5 |
| Impedancia de los contactos | (M Ω) | 1.28 | 1.28 |
| Temporización (Temperatura ambiente entre -25°C y $+55^\circ\text{C}$) | | | |
| | Fidelidad | - | $\pm 5\%$ |
| | Deriva a 0.5×10^6 ops. | - | + 20% |
| | Deriva por $^\circ\text{C}$ incremento (0 - 55°C) | - | + 0.75% por $^\circ\text{C}$ |



Modelo CL

Contactores 3P y 4P

A

B

C

D

E

F

G

H

I

X

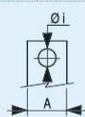
Bloque retención mecánica

| | RMLF... | |
|--|---|-------------------------------|
| Tensión nominal de aislamiento Ui | 1000 V | |
| Tensiones normalizadas Us: 50 a 60 Hz y DC | 24...690 V | |
| Límites de la tensión | 0.75...1.1 xUs | |
| Consumo (autocortado) de desconexión | | |
| 24 a 72 V | 210 W / VA | |
| 110 a 440 V | 130 W / VA | |
| Mando de apertura eléctrico ⁽¹⁾ | | |
| Impulso mínimo | 10 ms | |
| Mantenido | autocortado por contacto integral | |
| Mando de apertura manual | por pulsador incorporado | |
| Mando de cierre eléctrico | | |
| Impulso mínimo | 40 ms autocortado por contacto integral | |
| Mando de cierre manual | por pulsador incorporado | |
| Contacto auxiliar NC | | |
| Utilización AC-15 según IEC | 120V - 6A 230V/220V - 4A 400V/380V - 2.5A | 500V - 1.5A 690V/660V - 1A |
| según UL/CSA | A600 | |
| Utilización DC-13 según IEC | 24V - 3A 48V - 1.5A 110V - 0.6A | 220V - 0.3A 400V - 0.15A |
| según UL/CSA | Q600 | |
| Endurancia mecánica | | |
| CL00...CL45 | 3 millones (1200 Man./h) | |
| CL05...CL10 | 0.1 millones (300 Man./h) | |
| Esquema de conexión | c.alterna | |
| | | |
| | c.alterna / c. continua | |
| | | |

(1) No puede permanecer con tensión simultáneamente la bobina del contador y el RMLF.

Capacidad de los bornes

| | Borne: tornillo BCLF, BCLL, BTLF y RMLF | Borne: para terminal circular BCRF, BTRF |
|--|--|---|
| Monofilar | 2 x 0.5 to 2.5 or 1 x 4 | |
| Multifilar y flexible sin vaina terminal | 2 x 0.5 to 2.5 or 1 x 4 | |
| Flexible con vaina terminal | 2 x 0.5 to 2.5 or 1 x 4 | |
| Cables AWG mono y multifilares | 12 - 22 AWG 75°C | |
| Par de apriete | 1.1 Nm / 10 Lb x in. | |
| Terminal circular | $\varnothing i$ A | 3.6 min. 6.5 máx. |
| Par de apriete | | 0.8 Nm / 7 Lb x in. |



Modelo CL

Secuencia de contactos

| | Contactor de base | Bloques contactos auxiliares Montaje frontal | | Bloques contactos auxiliares Montaje lateral | | | |
|---|--------------------------------------|---|--------------------|---|--------------------|-----------|-----------|
| | | BCLF 10 BCRF 10 | BCLF 01 BCRF 01 | BCLL 20 BRLL 20 | BCLL 11 BRLL 11 | | |
| | | | | | | | |
| Contactores tripolares 3 NA | CL00... CL01... CL02... | 0 3.3 4.7 | 0 3.2 4.7 | 0 1.4 4.7 | 0 3.2 4.7 | 0 3.2 4.7 | |
| | CL25... | 0 3 5.1 | 0 3.7 5.1 | 0 1.6 5.1 | 0 3.7 5.1 | 0 3.7 5.1 | |
| | CL03... CL04... | 0 4 5.6 | 0 3.7 5.6 | 0 1.6 5.6 | 0 3.7 5.6 | 0 3.7 5.6 | |
| | CL45... | 0 4.3 6.5 | 0 3.7 6.5 | 0 1.6 6.5 | 0 3.7 6.5 | 0 3.7 6.5 | |
| | CL06... | 0 5.4 8 | 0 3.7 8 | 0 1.6 8 | 0 3.7 8 | 0 3.7 8 | |
| | CL07... CL08... | 0 4.8 8 | 0 3.7 8 | 0 1.6 8 | 0 3.7 8 | 0 3.7 8 | |
| | CL09... | 0 5.6 8 | 0 3.7 8 | 0 1.6 8 | 0 3.7 8 | 0 3.7 8 | |
| | CL10... | 0 5.6 8 | 0 3.7 8 | 0 1.6 8 | 0 3.7 8 | 0 3.7 8 | |
| | Contactores tetrapolares 4 NA | CL01... CL02... | 0 3.3 4.7 | 0 3.2 4.7 | 0 1.4 4.7 | 0 3.2 4.7 | 0 3.2 4.7 |
| | | CL03... CL04... | 0 4 5.6 | 0 3.7 5.6 | 0 1.6 5.6 | 0 3.7 5.6 | 0 3.7 5.6 |
| CL05... | | 0 5.4 8 | 0 3.7 8 | 0 1.6 8 | 0 3.7 8 | 0 3.7 8 | |
| CL07... | | 0 4.8 8 | 0 3.7 8 | 0 1.6 8 | 0 3.7 8 | 0 3.7 8 | |
| CL09... | | 0 5.6 8 | 0 3.7 8 | 0 1.6 8 | 0 3.7 8 | 0 3.7 8 | |
| Contactores tetrapolares 2 NA + 2 NC | | CL01... CL02... | 0 3.3 4.7 | 0 3.2 4.7 | 0 1.4 4.7 | 0 3.2 4.7 | 0 3.2 4.7 |
| | | CL03... CL04... | 0 4 5.6 | 0 3.7 5.6 | 0 1.6 5.6 | 0 3.7 5.6 | 0 3.7 5.6 |
| | CL05... | 0 5.4 8 | 0 3.7 8 | 0 1.6 8 | 0 3.7 8 | 0 3.7 8 | |
| | CL07... CL08... | 0 4.8 8 | 0 3.7 8 | 0 1.6 8 | 0 3.7 8 | 0 3.7 8 | |

Contadores

A

B

C

D

E

F

G

H

I

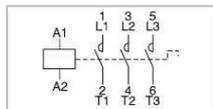
X



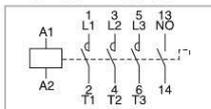
Numeración de los bornes

Contadores tripolares y tetrapolares

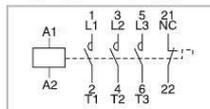
CL00A300... CL10A300...
CL25D300... CL45D300...
CL06E300... CL10E300...



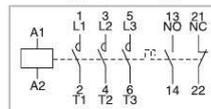
CL00_310... CL02_310...
CL03_310... CL04_310...



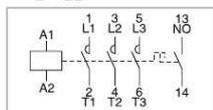
CL00_301... CL02_301...
CL03_301... CL04_301...



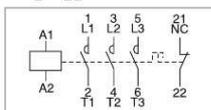
CL45A311... CL10A311...



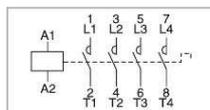
CL25_310...



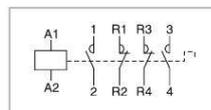
CL25_301...



CL00A400... CL08A400...
CL01D400... CL04D400...
CL05E400... CL09E400...

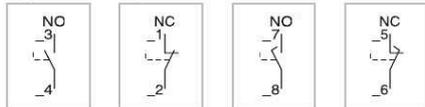


CL01AB00... CL08AB00...
CL01DB00... CL04DB00...
CL05EB00... CL08EB00...



Bloque de contactos auxiliares. Montaje frontal

BC_F10 BC_F01 BCLF10G BCLF01G



Bloque de contactos auxiliares Montaje lateral

BCLL20 BCLL11

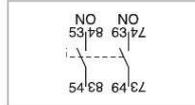


Bloque temporizador neumático

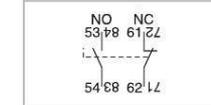
BT_F_C BT_F_D



BRLL20



BRLL11



Enclavamiento mecánico y mecánico/eléctrico

BELA BELA02



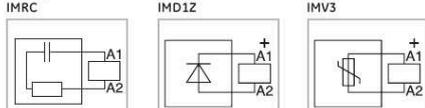
Bloque temporizador electrónico

BETL_C BETL_D



Bloques antiparasitarios

BSLR2, BSLR3 BSLDZ



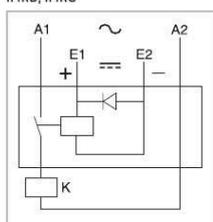
Bloque retención mecánica

RMLF

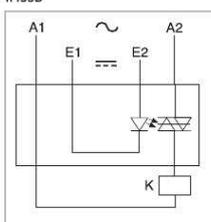


Módulos interface

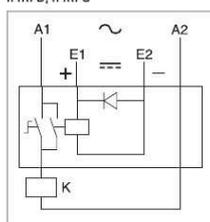
IMRD, IMRG



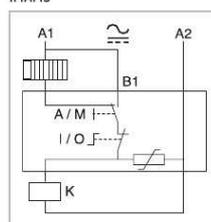
IMSSD



IMRFD, IMRFG

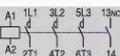
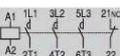
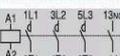
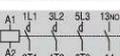
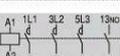
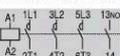
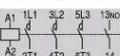
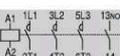
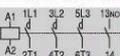
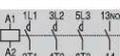
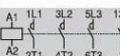
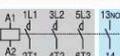
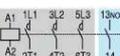
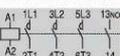


IMAMS



Modelo CL

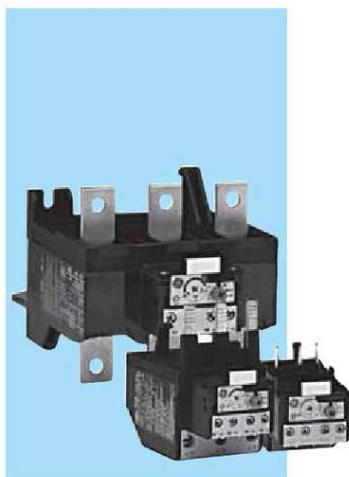
Combinación de bornes según EN 50012

| | Contactos auxiliares | | Posible contactor base + Bloques de contactos auxiliares a añadir |
|---|----------------------|---|---|
| | Combinación |   | |
| | Descripción | | |
| Sin bloques de contactos auxiliares | | | |
|  | 10E | 1 0 |  CL00_310... - CL04_310... |
|  | 01E | 0 1 |  CL00_301... - CL04_301... |
| Con bloques de contactos auxiliares de montaje frontal, con 1 contacto | | | |
|  | 11E | 1 1 |  CL00_310... - CL04_310... + BC_F01 |
|  | 21E | 2 1 |  CL00_310... - CL04_310... + BC_F01 + BC_F10 |
|  | 12E | 1 2 |  CL00_310... - CL04_310... + BC_F01 + BC_F01 |
|  | 31E | 3 1 |  CL00_310... - CL04_310... + BC_F01 + BC_F10 + BC_F10 |
|  | 41E | 4 1 |  CL00_310... - CL04_310... + BC_F01 + BC_F10 + BC_F10 + BC_F10 |
|  | 22E | 2 2 |  CL00_310... - CL04_310... + BC_F01 + BC_F01 + BC_F10 |
|  | 32E | 3 2 |  CL00_310... - CL04_310... + BC_F01 + BC_F01 + BC_F10 + BC_F10 |
|  | 13E | 1 3 |  CL00_310... - CL04_310... + BC_F01 + BC_F01 + BC_F01 |
|  | 23E | 2 3 |  CL00_310... - CL04_310... + BC_F01 + BC_F01 + BC_F01 + BC_F10 |
| Con bloques de contactos auxiliares de montaje lateral, con 2 contactos | | | |
|  | 11E | 1 1 |  CL00_300... - CL45_300... + BCLL11 |
|  | 31E | 3 1 |  CL00_300... - CL45_300... + BCLL11 + BCLL20 |
|  | 22E | 2 2 |  CL00_300... - CL45_300... + BCLL11 + BCLL11 |

El número máximo de contactos auxiliares es de 4 para CL00 hasta CL25, 6 para CL03 -CL04 y de 8 para CL45, CL06 hasta CL10. Cuando se use el bloque temporizador neumático BTLF, el número máximo de contactos auxiliares anteriormente descrito, se reduce en 2 (2 para CL00 hasta CL25, 4 para CL03 y CL04, etc.)



Modelo RT



Relés térmicos para contactores

0.16 hasta 850A

- Circuito de mando hasta 690V AC
- Circuito de potencia:
 - RT1, RT12: hasta 690V
 - RT2, RT22, RT3, RT32, RT4/4L, RT5/5L & RT6/6L: hasta 1000V
- Protección térmica contra sobrecargas simétricas.
- Protección diferencial contra sobrecargas asimétricas.
- Protección contra tiempos de arranque largos.
- Compensación automática de la temperatura ambiente entre -25°C y +60°C.
- Pulsador frontal "test de disparo".
- Indicador de disparo.
- Contactos auxiliares de disparo, de doble ruptura e independientes (1NA + 1NC).
- Selección multifunción:
 - Rearme Manual
 - Rearme Manual con Paro
 - Rearme Automático con Paro
 - Rearme Automático sin Paro

Conformidad a normas

| | |
|------------------|-------------|
| IEC/EN 60947-4-1 | CSA 22.2/14 |
| IEC/EN 60947-5-1 | NI C 63-650 |
| UNE 115 | VDE 0660 |
| NFC 63-650 | UL 508 |
| CEI 17-50 | |

Homologaciones



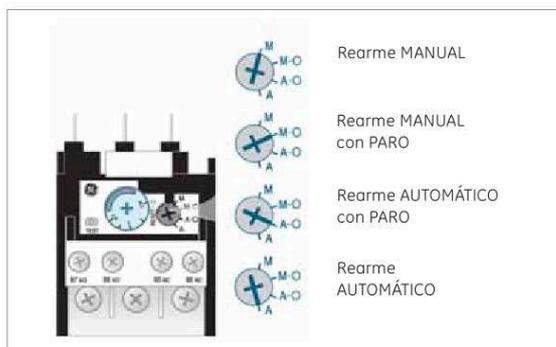
cULus



CE

Lloyd's
RegisterBureau
Veritas

RINA



Tipos ● pg. C.63
 Características técnicas ● pg. C.68
 Dimensiones ● pg. C.72
 Listado de productos ● Cap. X

Modelo RT

Relés térmicos para contactores

| | Utilización | Intensidad de empleo (regulación) | | Fusible ⁽¹⁾ | | Borne: tornillo | | Borne: para terminal circular | | |
|--|-------------|-----------------------------------|----------|------------------------|---------|-----------------|-----------|-------------------------------|-----------|--------|
| | | | | aM | gL - gG | TIPO | Nº Código | TIPO | Nº Código | |
| | | | | min. A | max. A | A | A | | | |
|  | Clase 10A | CL00 | 0.16 | 0.26 | 2 | 2 | RT1B | 113700 | RT1RB | 114087 |
| | | CL01 | 0.25 | 0.41 | 2 | 2 | RT1C | 113701 | RT1RC | 114088 |
| | | CL02 | 0.4 | 0.65 | 2 | 2 | RT1D | 113702 | RT1RD | 114089 |
| | | CL25 | 0.65 | 1.1 | 2 | 4 | RT1F | 113703 | RT1RF | 114090 |
| | | CL03 | 1.0 | 1.5 | 4 | 6 | RT1G | 113704 | RT1RG | 114091 |
| | | CL04 | 1.3 | 1.9 | 4 | 6 | RT1H | 113705 | RT1RH | 114092 |
| | | CL45 | 1.8 | 2.7 | 6 | 10 | RT1J | 113706 | RT1RJ | 114093 |
| | | | 2.5 | 4.0 | 8 | 16 | RT1K | 113707 | RT1RK | 114094 |
| | | 4.0 | 6.3 | 12 | 20 | RT1L | 113708 | RT1RL | 114095 | |
| | | 5.5 | 8.5 | 16 | 20 | RT1M | 113709 | RT1RM | 114096 | |
| | | 8.0 | 12.0 | 20 | 25 | RT1N | 113710 | RT1RN | 114097 | |
| | | 10.0 | 16.0 | 25 | 35 | RT1P | 113711 | RT1RP | 114098 | |
| | | 14.5 | 18.0 | 32 | 50 | RT1S | 113712 | RT1RS | 114099 | |
| | | 17.5 | 22.0 | 40 | 50 | RT1T | 113713 | RT1RT | 114100 | |
| | | 21.0 | 26.0 | 40 | 63 | RT1U | 113714 | RT1RU | 114101 | |
| | | 25.0 | 32.0 | 50 | 80 | RT1V | 113715 | RT1RV | 114102 | |
| | | 30.0 | 40.0 | 63 | 100 | RT1W | 113716 | RT1RW | 114103 | |
|  | Clase 10 | CL05 | 11.5 | 15.0 | 32 | 35 | RT2A | 113717 | RT2RA | 114104 |
| | | CL06 | 14.5 | 19.0 | 40 | 50 | RT2B | 113718 | RT2RB | 114105 |
| | | CL07 | 18.5 | 25.0 | 50 | 63 | RT2C | 113719 | RT2RC | 114106 |
| | | CL08 | 24.0 | 32.0 | 63 | 100 | RT2D | 113720 | RT2RD | 114107 |
| | | CL09 | 30.0 | 43.0 | 80 | 125 | RT2E | 113721 | RT2RE | 114108 |
| | | CL10 | 42.0 | 55.0 | 100 | 160 | RT2G | 113722 | RT2RG | 114109 |
| | | | 54.0 | 65.0 | 125 | 160 | RT2H | 113723 | RT2RH | 114110 |
| | | 64.0 | 82.0 | 125 | 200 | RT2J | 113724 | RT2RJ | 114111 | |
| | | 78.0 | 97.0 | 125 | 200 | RT2L | 113725 | RT2RL | 114112 | |
| | | 90.0 | 110 | 160 | 250 | RT2M | 113726 | RT2RM | 114113 | |
| | | CL00 | Clase 20 | 0.4 | 0.65 | 2 | 2 | RT12D | 139138 | RT12RD |
| 0.65 | 1.1 | | | 2 | 4 | RT12F | 139139 | RT12RF | 114061 | |
| 1 | 1.5 | | | 4 | 6 | RT12G | 139140 | RT12RG | 114062 | |
| 1.3 | 1.9 | | | 4 | 6 | RT12H | 139141 | RT12RH | 114063 | |
| 1.8 | 2.7 | | | 8 | 10 | RT12J | 139142 | RT12RJ | 114159 | |
| 2.5 | 4.1 | | | 8 | 16 | RT12K | 113640 | RT12RK | 114114 | |
| 4 | 6.3 | | | 12 | 20 | RT12L | 113641 | RT12RL | 114115 | |
| CL45 | 5.5 | | | 8.5 | 16 | 20 | RT12M | 113642 | RT12RM | 114116 |
| | 8 | | | 12 | 20 | 35 | RT12N | 113643 | RT12RN | 114117 |
| 10 | 16 | | | 25 | 35 | RT12P | 113644 | RT12RP | 114118 | |
| 14.5 | 18 | | | 32 | 50 | RT12S | 113645 | RT12RS | 114119 | |
| 17.5 | 22 | | | 40 | 50 | RT12T | 113646 | RT12RT | 114120 | |
| 21 | 26 | | | 40 | 63 | RT12U | 113647 | RT12RU | 114121 | |
| 25 | 32 | | | 50 | 80 | RT12V | 113648 | RT12RV | 114122 | |
| 30 | 40 | | | 63 | 100 | RT12W | 113649 | RT12RW | 114123 | |
| 24 | 32 | | | 63 | 80 | RT22D | 113650 | RT22RD | 114124 | |
| CL05 | 30 | | | 43 | 80 | 100 | RT22E | 113651 | RT22RE | 114125 |
| CL06 | 42 | | | 55 | 100 | 160 | RT22G | 113652 | RT22RG | 114126 |
| CL07 | 54 | | | 65 | 125 | 160 | RT22H | 113653 | RT22RH | 114127 |
| CL08 | 64 | | | 82 | 125 | 200 | RT22J | 113654 | RT22RJ | 114128 |
| CL09 | 78 | | | 97 | 125 | 200 | RT22L | 113655 | RT22RL | 114129 |
| CL10 | 90 | | | 110 | 160 | 250 | RT22M | 113656 | RT22RM | 114130 |

[1] Fusible recomendado según norma IEC 60947-4-1.

Para códigos y suministro, ver Cap. X

Modelo RT

A

B

C

D

E

F

G

H

I

X



Modelo RT

Relés térmicos

A

B

C

D

E

F

G

H

I

X

Características técnicas

| | RT1... | RT2... | RT3... | RT4.../ 4L... | RT5.../ 5L... | RT6.../ 6L... |
|---------------------------------|-----------------|--------------|-------------|---------------|---------------|---------------|
| Generales | | | | | | |
| Close de disparo | 10A / 20 | 10 / 20 | 10 / 20 | 10 / 30 | 10 / 30 | 10 / 30 |
| Gamas de regulación | (A) 0.16 ... 40 | 11.5 ... 110 | 55 ... 190 | 2.5 ... 310 | 120 ... 700 | 500 ... 850 |
| Aplicación en contactores tipos | CL00...CL45 | CL05...CL10 | CK75...CK08 | CL,CK | CK10...CK12 | CK13 |

Circuito principal

| | | | | | | |
|--|--------------------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Tensión nominal de aislamiento (IEC947-4) Ui | (V) | 690 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| Límites de frecuencia | (Hz) | 0..400 | 0..400 | 0..400 | 50..60 | 50..60 |
| Capacidad de los bornes | | | | | | |
| Mordaza - Hilo | (mm ²) | 16 | 50 | 120 | - | - |
| Mordaza - Cable | (mm ²) | 10 | 50 | 120 | - | - |
| Barne plano | (mm) | - | - | 25 x 5 | - | 80 x 10 |
| Pasante (cable) | (mm ²) | - | - | - | 400 | - |
| Pasante (pletina) | (mm) | - | - | 30 x 10 | 30 x 10 | - |
| Par de apriete | (Nm) | 2.5 | 4.5 | 6.5 | 23 | 31.5 |

Circuito de mando

| | | | | | | |
|--|--------------------|---|--|--|--|--|
| Tensión nominal de aislamiento (IEC60947-4) Ui | (V) | 690 | | | | |
| Intensidad nominal térmica Ith | (A) | 10 | | | | |
| Utilización | | | | | | |
| AC-15 - Ue-Ie | (V - A) | 110/120 - 3 ; 220/240 - 2 ; 380/415 - 1 ; 480/500 - 0.8 ; 660/690 - 0.3 | | | | |
| DC-13 - Ue-Ie | (V - A) | 24 - 2 ; 48 - 1.4 ; 110 - 0.6 ; 250 - 0.3 ; 440 - 0.1 | | | | |
| Utilización según UL y CSA | B600 - Q600 | | | | | |
| Fusible de protección gL | (A) | 10 | | | | |
| Capacidad de los bornes | (mm ²) | 2.5 | | | | |
| Par de apriete | (Nm) | 0.8 | | | | |

Conformidad a normas

| | | |
|------------------|-------------|-------------|
| IEC/EN 60947-4-1 | NFC 63-650 | NI C 63-650 |
| IEC/EN 60947-5-1 | CEI 17-50 | VDE 0660 |
| UNE 115 | CSA 22.2/14 | UL 508 |

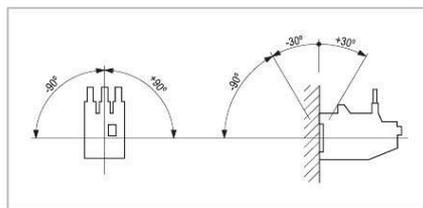
Homologaciones

| | | |
|------------------|----------------|----|
| cULus | RINA | CE |
| Lloyd's Register | Bureau Veritas | |

Condiciones ambientales

| | |
|--|--|
| Temperatura de almacenamiento | -40°C a +70°C |
| Temperatura de funcionamiento (compensado) | -25°C a +60°C |
| Altitud | hasta 3000m sin cambios de características |
| Humedad relativa | 98% |
| Tratamiento de protección | Tropicalizado |

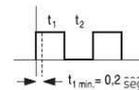
Posiciones de montaje



Rearme eléctrico remoto

| Consumo | AC | (VA) | 100 |
|---------|----|------|-----|
| | DC | (W) | 100 |

Bobinas no aptas para servicio continuo



| | |
|-------------------------|--------------------------|
| $t_1 = 1 \text{ seg.}$ | $t_2 = 30 \text{ seg.}$ |
| $t_1 = 5 \text{ seg.}$ | $t_2 = 90 \text{ seg.}$ |
| $t_1 = 10 \text{ seg.}$ | $t_2 = 180 \text{ seg.}$ |

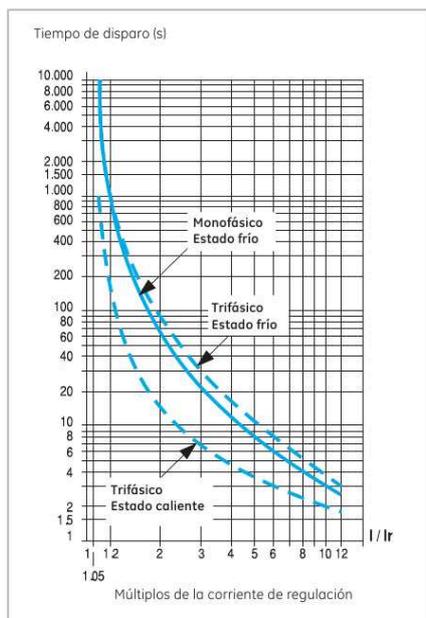
($t_1 = T.$ conexión $t_2 = T.$ desconexión)

C.70

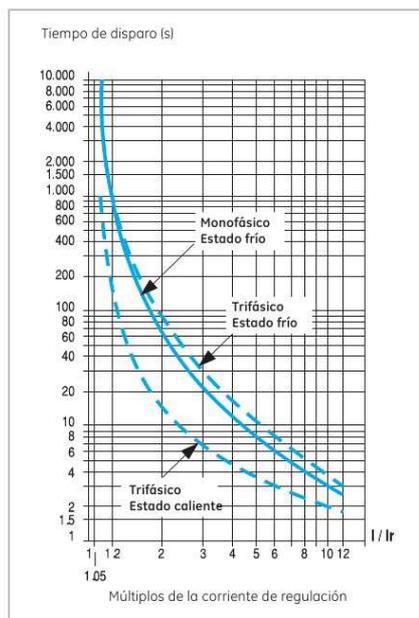


Curvas de disparo

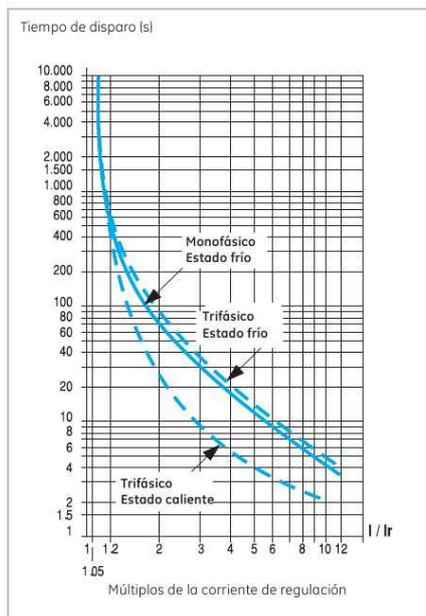
RT1 Clase 10A



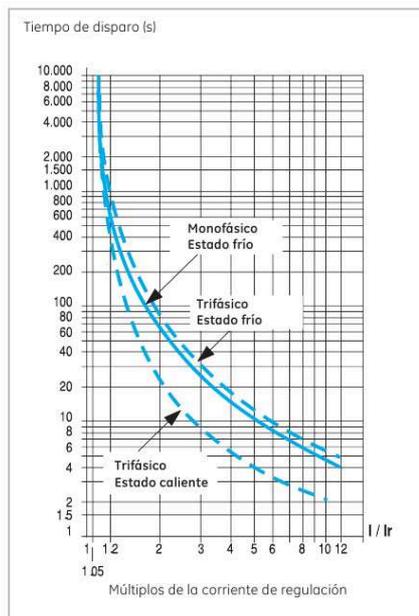
RT2 Clase 10



RT12 Clase 20



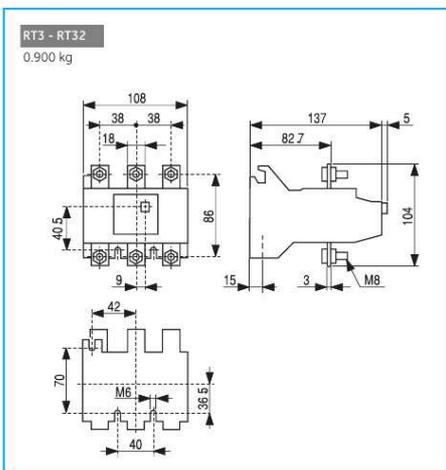
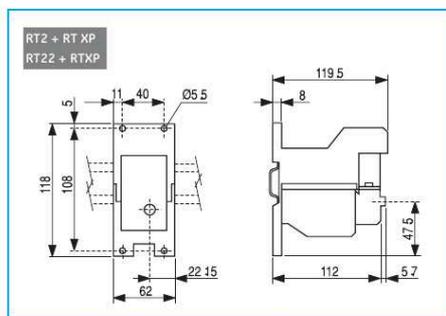
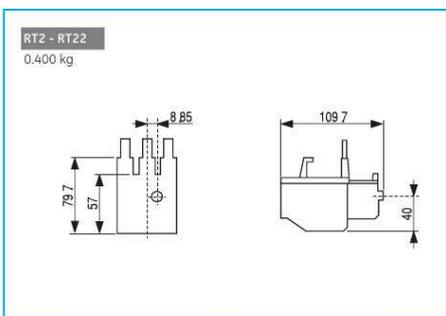
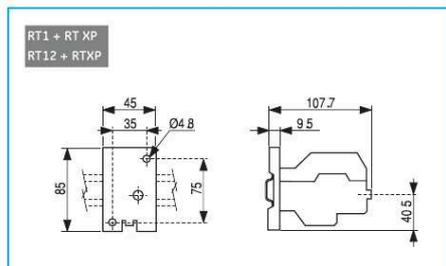
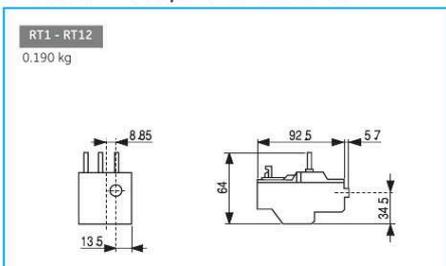
RT22 Clase 20



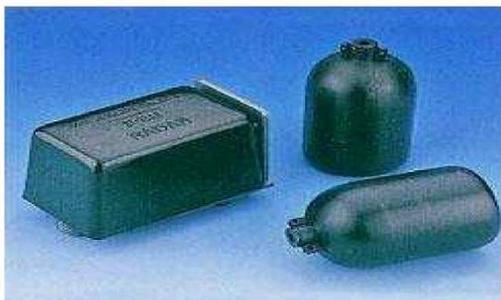
Modelo RT

Dimensiones

Relés térmicos para contactores



RADAR DE CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDO ST-65AB



Controles de Nivel Radar ST-65AB

CONTROLES DE NIVEL

Sencillo y económico para controlar motobombas para el vaciado o llenado de estanques con líquidos y sólidos. También para proteger y detener las motobombas cuando ha bajado el nivel del agua en pozos evitando que la bomba trabaje en seco.

CARACTERISTICAS

Longitud del Cable : 3 mts
Material Flotador : Polipropileno

CONTROL DE NIVEL RADAR

Este control activa por el cambio de peso de 2 flotadores al estar en contacto con el agua en un estanque, la distancia entre los 2 flotadores determina la desactivación de la bomba al llegar el nivel del agua al flotador superior o bien la conexión de esta al llegar el nivel a la posición del flotador inferior.

CARACTERISTICAS ST-65AB

Capacidad : 3amp 220 VAC / 15amp 110 VAC Máximo 1hp
Switch : SPDT 1C 1NA y 1NC
Vida Mecánica : 1 Millón de Operaciones
Altura de Aplicación : 0,18 a 3mts
Presión Máx. Estanque : 1 bar.
Montaje : Vertical
Fijación : Placa lateral incluida o Rosca de 3/4" o 1"
Incluye : 2 Flotadores

ANEXO E. Configuración del Variador de Frecuencia

Este anexo contiene la información necesaria para la configuración y revisión de los valores de los parámetros ingresados en el variador de frecuencia Siemens SINAMICS G110, de acuerdo a las conexiones realizadas para su funcionamiento y control, y a las características eléctricas del motor de la bomba, estas últimas, detalladas en el Anexo D.

Los convertidores SINAMICS G110 son convertidores de frecuencia para regular la velocidad en motores trifásicos. Los diferentes modelos que se suministran cubren un margen de potencia de 120[W] a 3.0[kW] en redes monofásicas.

Los convertidores están controlados por microprocesador y utilizan tecnología IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) de última generación. Esto los hace fiables y versátiles. Un método especial de modulación por ancho de impulsos con frecuencia de pulsación seleccionable permite un funcionamiento silencioso del motor. Extensas funciones de seguridad ofrecen una protección excelente tanto del convertidor como del motor.

Con sus ajustes por defecto realizados en fábrica, el SINAMICS G110 es ideal para una gran gama de aplicaciones sencillas de control de motores V/F.

Haciendo uso del gran número de parámetros de ajuste de que dispone, también puede utilizarse el SINAMICS G110 en aplicaciones más avanzadas para control de accionamientos.

Los valores de parámetros para el SINAMICS G110 se pueden modificar con el panel BOP (Basic Operator Panel) o bien mediante la interfaz USS.

El SINAMICS G110 puede utilizarse tanto en aplicaciones donde se encuentre aislado como integrado en sistemas de automatización.

La configuración del variador de frecuencia se la ha realizado por medio del panel BOP (Basic Operator Panel, Panel Básico del Operador).

El BOP es el panel de operaciones opcional del variador de frecuencia, que se acopla al mismo y actúa como interfaz entre el equipo y el usuario.

Este dispositivo permite modificar las señales de control y consignas de velocidad, simplemente accionando el botón pertinente. Con él, también se tiene acceso a los parámetros del variador de frecuencia fácilmente.



BOP

A continuación se muestran los botones del BOP con la descripción de sus respectivas funciones en el panel:

| Panel/ Botón | Función | Efectos |
|-----------------|----------------------|--|
| | Indicación de estado | La pantalla de cristal líquido muestra los ajustes actuales del convertidor. |
| | Marcha | Al pulsar este botón se arranca el convertidor. Por defecto está bloqueado. Para activarlo: P0700 = 1 o P0719 = 10 ... 15 |
| | Parada | OFF1 Pulsando este botón se para el motor siguiendo la rampa de deceleración seleccionada. Para activarlo: P0700 = 1 o P0719 = 10 ... 15 OFF2 Pulsando el botón dos veces (o una vez prolongada) el motor se para de forma natural (inercia hasta parada). Esta función está constantemente activada. |
| | Invertir sentido | Pulsar este botón para cambiar el sentido de giro del motor. El inverso se indica mediante un signo negativo (-) o un punto decimal intermitente. Por defecto está bloqueado. Para activarlo: P0700 = 1 o P0719 = 10 ... 15. |
| | Jog motor | Pulsando este botón en estado "listo" el motor arranca y gira a la frecuencia Jog preseleccionada. Pulsando este botón mientras el convertidor no tiene salida hace que el motor arranque y gire a la frecuencia Jog preseleccionada. El motor se detiene cuando se suelta el botón. Pulsar este botón cuando el motor está funcionando carece de efecto. |
| | Función | Este botón sirve para visualizar información adicional. Funciona pulsándolo y manteniéndolo apretado. Muestra lo siguiente comenzando por cualquier parámetro durante la operación: 1. Tensión en circuito intermedio (indicado mediante d - unidades en V). 2. Frecuencia de salida (Hz) 3. Tensión de salida (o - unidades en V). 4. El valor seleccionado en P0005. (Si P0005 se ha configurado de tal forma que se muestra uno de los datos indicados arriba (1 - 3), no aparece el valor correspondiente de nuevo). Cualquier pulsación adicional hace que vuelva a visualizarse la sucesión indicada anteriormente. Función de salto Pulsando brevemente el botón Fn es posible saltar desde cualquier parámetro (rxxx o Pxxx) a r0000, lo que permite, si se desea, modificar otro parámetro. Una vez retornado a r0000, si pulsa el botón Fn irá de nuevo a su punto inicial. Acusar Cuando aparecen mensajes de alarma y error, se pueden acusar, pulsando el botón Fn. |
| | Acceder a parámetros | Pulsando este botón es posible acceder a los parámetros. |
| | Subir valor | Pulsando este botón se sube el valor visualizado. |
| | Bajar valor | Pulsando este botón se baja el valor visualizado. |

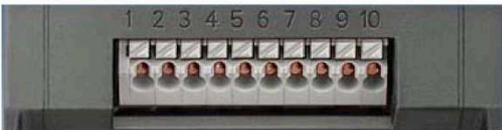
Descripción de Funciones del BOP

El variador de frecuencia de este Proyecto de Graduación trabaja con la variante analógica, que está indicada para aplicaciones con un único convertidor. Las órdenes y consignas se imparten externamente, utilizando las entradas digitales y la entrada analógica del SINAMICS G110.

Los bornes de estas entradas se encuentran en la parte frontal inferior del variador de frecuencia.

A continuación se muestran los bornes del variador de frecuencia con la descripción de sus respectivas funciones:

| Borne | Significado | Funciones | |
|-------|-------------|---------------------------|------------|
| 1 | DOUT- | Salida digital (-) | |
| 2 | DOUT+ | Salida digital (+) | |
| 3 | DIN0 | Entrada digital 0 | |
| 4 | DIN1 | Entrada digital 1 | |
| 5 | DIN2 | Entrada digital 2 | |
| 6 | - | Salida +24 V / máx. 50 mA | |
| 7 | - | Salida 0 V | |
| | Variante | Analógica | USS |
| 8 | - | Salida +10 V | RS485 P+ |
| 9 | ADC1 | Entrada analógica | RS485 N- |
| 10 | - | Salida 0 V | |



Bornes del Variador de Frecuencia

El convertidor SINAMICS G110 sale de fábrica ajustado para poder funcionar sin necesidad de parametrizaciones adicionales. Los parámetros (P0304, P0305, P0307, P0310) se han ajustado para un motor Siemens de 4 polos 1LA7 y hay que cotejarlos con los datos asignados del motor a conectar (véase el Anexo D).

| | |
|-------------------------|---|
| Fuente de órdenes | P0700 |
| Fuente de consignas | P1000 |
| Refrigeración del motor | P0335 = 0 (Autoventilado) |
| Factor sobrecarga motor | P0640 = 150% |
| Frecuencia mínima | P1080 = 0 Hz |
| Frecuencia máx. | P1082 = 50 Hz |
| Tiempo de aceleración | P1120 = 10 s |
| Tiempo de deceleración | P1121 = 10 s |
| Modo de control | P1300 = 0 (V/f con característ. Lineal) |

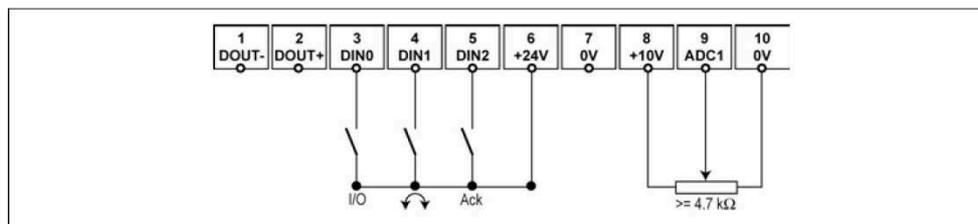
Ajustes de Fábrica del Variador de Frecuencia

Los ajustes de fábrica específicos para la variante analógica del SINAMICS G110 son los siguientes:

| Entrada / Salida | Bornes | Parámetro | Ajuste por defecto | Activo |
|---------------------|---------|------------|----------------------|--------|
| Fuente de órdenes | 3, 4, 5 | P0700 = 2 | Entrada digital | Sí |
| Fuente de consignas | 9 | P1000 = 2 | Entrada analógica | Sí |
| Entrada digital 0 | 3 | P0701 = 1 | ON / OFF1 (I/O) | Sí |
| Entrada digital 1 | 4 | P0702 = 12 | Inversión (↕) | Sí |
| Entrada digital 2 | 5 | P0703 = 9 | Acuse de fallo (Ack) | Sí |

Ajustes de Fábrica para la Variante Analógica

A continuación se muestran las conexiones de la variante analógica del variador de frecuencia, según sus ajustes de fábrica:



Conexiones de la Variante Analógica

Es necesario tomar en cuenta estas consideraciones, ya que el variador de frecuencia se ha configurado para que su funcionamiento se active mediante la Entrada Digital 0 (borne #3) y para que la variación de la frecuencia se realice mediante la Entrada Analógica (borne #9), con señales externas que llegan desde el cFP: +24[V]_{DC} para la activación del equipo a través del borne #3 y una señal variable de 0 a +10[V]_{DC} para la variación de frecuencia a través del borne #9.

Como introducción a los parámetros del sistema del SINAMICS G110, se tiene el esquema de la descripción de parámetros, que es como se indica a continuación:

| | | | | | |
|---------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------|----------|
| 1 Número Par. [índice] | 2 Nombre del Parám. | 5 Tipo de dato | 7 Unidad: | 9 Mpin: | 12 Nivel |
| | 3 EstC: | 6 activo: | 8 Puesta serv. | 10 Def.: | 2 |
| | 4 Grupo-P: | | | 11 Máx: | |
| 13 | Descripción: | | | | |

Esquema de la Descripción de Parámetros

1. Número de parámetro

Indica el número de parámetro pertinente. Los números usados son números de 4 dígitos en el margen de 0000 a 9999. Los números con el prefijo "r" indican que el parámetro es de "lectura", que visualiza un valor determinado pero que no puede ser cambiado directamente especificando un valor distinto a través de este número de parámetro (en estos casos, las comillas "-" aparecen en los lugares "Unit", "Min", "Def" y "Max" en la cabecera de la descripción de los parámetros). Todos los demás parámetros van precedidos de la letra "P". Los valores de estos parámetros se pueden cambiar directamente en el margen indicado por "Min" y "Max" ajustados en la cabecera.

[índice] indica que el parámetro es un parámetro indexado y especifica el número de índices posibles.

2. Nombre del parámetro

Indica el nombre del parámetro pertinente.

Algunos nombres de parámetros incluyen los siguientes prefijos abreviados: BI, BO, CI, y CO seguidos de dos puntos.

El SINAMICS G110 no dispone de función de interconexión Bico.

Las designaciones paramétricas permanecen inalterables para que se mantenga la congruencia terminológica con respecto a los otros convertidores SINAMICS G110.

3. EstC

Estado de servicio de los parámetros. Son posibles tres estados:

- Servicio C
- En marcha U
- Listo para la marcha T

Esto indica cuándo se pueden cambiar los parámetros. Deben especificarse uno, dos o los tres estados. Si se especifican los tres estados, significa que es posible cambiar el ajuste de los parámetros en los tres estados.

4. Grupo P

Indica el grupo funcional de un parámetro en particular.

Nota

El parámetro P0004 (Filtro de parámetros) actúa como un filtro y enfoca el acceso a los parámetros de acuerdo con el grupo funcional escogido.

5. Tipo datos

Los tipos de datos disponibles se muestran en la siguiente tabla:

| Notación | Significado |
|----------|------------------|
| U16 | 16-bit sin signo |
| U32 | 32-bit sin signo |
| I16 | 16-bit entero |
| I32 | 32-bit entero |
| Flotante | Coma flotante |

6. Activo:

Inmediat. Los cambios en los valores de los parámetros tienen efecto inmediatamente después de que han sido introducidos, o
 Tras Conf. El botón "P" en el panel de operador (BOP o AOP) debe ser presionado para que los cambios tengan efecto.

7. Unidad

Indica las unidades de medida aplicables a los valores de los parámetros.

8. P.serv.rap. (Puesta en servicio)

Indica si es o no (Si o No) posible cambiar un parámetro durante la puesta en servicio, es decir cuando el P0010 (grupo de parámetros para el servicio) está ajustado a 1 (puesta en servicio).

9. Mín

Indica el valor mínimo al que se puede ajustar el parámetro.

10. Def

Indica el valor por defecto, es decir el valor ajustado si el usuario no especifica un valor determinado para el parámetro.

11. Máx

Indica el valor máximo al que se puede ajustar el parámetro.

12. Nivel

Indica el nivel de acceso de usuario. Hay cuatro niveles de acceso: Estándar, Ampliado, Experto y Servicio. El número de los parámetros que aparece en cada grupo funcional depende del nivel de acceso ajustado en el P0003 (nivel de acceso de usuario).

13. Descripción

La descripción de los parámetros consta de las secciones y contenidos listados a continuación. Algunas de estas secciones y contenidos son opcionales y se omitirán en una base caso-a-caso si no es aplicable.

| | |
|---|--|
| Descripción: | Explicación breve de las funciones de los parámetros. |
| Diagrama: | Aplicaciones, diagramas para ilustrar los efectos de los parámetros en una curva característica, por ejemplo. |
| Ajustes: | Lista de los ajustes aplicados. Esto incluye: Ajustes posibles, Ajustes más comunes, Índices y Campos de bits. |
| Ejemplo: | Ejemplo opcional de los efectos de un ajuste particular del parámetro. |
| Dependencia: | Cualquier condición debe ser satisfecha en conexión con este parámetro. También cualquier efecto particular, que este parámetro tiene en otro(s) parámetro(s) o que otro(s) parámetro(s) tiene(n) en éste. |
| Peligro / Advertencia / Precaución / Nota: | Información muy importante que debe seguirse para prevenir daños personales o materiales / información específica que debe seguirse para evitar problemas / información que debe ser útil para el usuario. |
| Más detalles: | Ninguna fuente de más detalles de información concierne a los parámetros particulares. |

A continuación se muestra un ejemplo para el ingreso o modificación de los parámetros del variador de frecuencia, concretamente el caso del parámetro P0003, que define el nivel de acceso de los usuarios a los parámetros del equipo:

| Paso | Resultado en pantalla |
|--|-----------------------|
| 1 Pulsar P para acceder a parámetros | r 0000 |
| 2 Pulsar ▲ hasta que se visualice P0003 | P 0003 |
| 3 Pulsar P para acceder al nivel de valor del parámetro | 1 |
| 4 Pulsar ▲ o ▼ hasta el valor requerido | 3 |
| 5 Pulsar P para confirmar y guardar el valor | P 0003 |
| 6 El nivel de acceso 3 está ajustado. Se pueden seleccionar todos los parámetros de los niveles 1 a 3. | |

Ejemplo de Modificación de Parámetros

A continuación se mostrarán todos aquellos parámetros cuyo(s) valor(es) ha(n) sido asignado(s), es decir, que no coincide(n) con el(los) valor(es) por defecto o de fábrica que viene(n) configurado(s) en el variador de frecuencia.

| | | | | | | |
|--------------|-----------------------------------|--------------------|-----------------|--------|--------|-------------------|
| P0003 | Nivel de acceso de usuario | | | | Min: 1 | Nivel 1 |
| | EstC: CUT | Tipo datos: U16 | Unidad: - | Def: 1 | | |
| | Grupo P: ALWAYS | Activo: Tras Conf. | P.serv.rap.: No | Máx: 4 | | |

Define el nivel de acceso a los juegos de parámetros. Para las aplicaciones más simples es suficiente con el ajuste por defecto.

Posibles ajustes:

| | |
|---|-----------|
| 1 | Estándar |
| 2 | Extendido |
| 3 | Experto |
| 4 | Reservado |

Parámetro 0003 – Nivel de acceso de usuario

Valor asignado: 3

| | | | | | | |
|--------------|--|--------------------|-----------------|---------|--------|-------------------|
| P0010 | Filtro paráms para puesta serv. | | | | Min: 0 | Nivel 1 |
| | EstC: CT | Tipo datos: U16 | Unidad: - | Def: 0 | | |
| | Grupo P: ALWAYS | Activo: Tras Conf. | P.serv.rap.: No | Máx: 30 | | |

Filtros de parámetros para que sólo puedan seleccionarse los parámetros relacionados con un grupo funcional .

Posibles ajustes:

| | |
|----|--------------------|
| 0 | Preparado |
| 1 | Guía básica |
| 2 | Convertidor |
| 29 | Descarga |
| 30 | Ajustes de fábrica |

Dependencia:
Poner a 0 para que el convertidor arranque.

P0003 (Nivel de acceso de usuario) determina también el nivel de acceso a parámetros.

Nota:

P0010 = 1

El convertidor se puede configurar muy rápida y fácilmente ajustando P0010 = 1. Después de que sólo son visibles los parámetros importantes (p.ej.: P0304, P0305, etc.). El valor de estos parámetros debe introducirse consecutivamente. El final de la configuración rápida y el inicio del cálculo interno se realizarán ajustando P3900 = 1 - 3. Después, el parámetro P0010 el P3900 se reinicializará a cero automáticamente.

P0010 = 2

Sólo para tareas de revisión.

P0010 = 29

Para transferir un archivo de parámetros por medio de una herramienta de PC (p.ej.: STARTER), se ajustará a 29 el parámetro P0010 por parte de la herramienta de PC. Una vez finalizada la descarga, la herramienta de PC reinicializará a cero el parámetro P0010.

P0010 = 30

Al reinicializar los parámetros del convertidor, hay que ajustar a 30 el parámetro P0010. La reinicialización de los parámetros se comenzará ajustando el parámetro P0970 = 1. El convertidor reinicializará automáticamente todos sus parámetros a sus configuraciones por defecto. Esto se puede demostrar beneficioso si percibe usted problemas al establecer los parámetros y desea volver a arrancar.

Parámetro 0010 – Filtro de parámetros para la puesta en servicio

Para modificar los valores de los parámetros del variador de frecuencia, este parámetro debe tomar el valor de 1. Para guardar los valores y dejar listo al variador de frecuencia para operar, este parámetro debe tomar el valor de 0.

| | | | |
|-----------------------|-----------------------------------|------------------------|--------------|
| P0100 | Europa / America del Norte | Min: 0 | Nivel |
| EstC: C | Tipo datos: U16 | Def: 0 | 1 |
| Grupo P: QUICK | Activo: Tras Conf. | P.serv.rap.: Sí | |
| | Unidad: - | Máx: 2 | |

Determina si los ajustes de potencia se expresan en [kW] o [hp] (p.e. Potencia nominal del motor P0307).

Los ajustes por defecto para la frecuencia nominal del motor P0310 y la frecuencia máxima P1082 se ajustan aquí automáticamente, además de la consigna de frecuencia P2000.

Posibles ajustes:

- 0 Europa [kW], 50 Hz
- 1 Norte América [hp], 60 Hz
- 2 Norte América [kW], 60 Hz

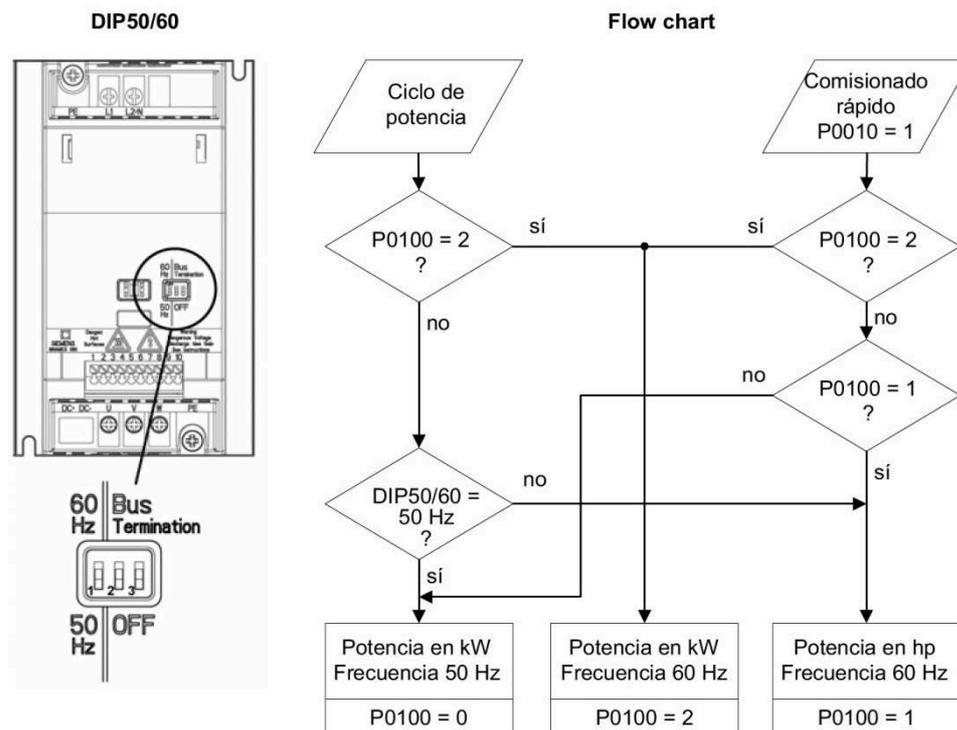
Dependencia:

Donde:

- Primera parada del convertidor (p.e. deshabilitación de todos los pulsos) antes del cambio de este parámetro.
- P010 = 1 (modo puesta en servicio) habilita que los cambios sean hechos.
- Cambiando P0100 se borran todos los parámetros nominales del motor así como otros parámetros que dependen de los parámetros nominales del motor (consultar P0340 - calculo de los parámetros del motor).

El ajuste de los interruptores DIP50/60 determina la validez de los ajustes 0 y 1 para P0100 de acuerdo a la tabla siguiente:

1. El parámetro P0100 tiene mayor prioridad que la posición del interruptor DIP50/60.
2. Si se desconecta y reconecta la tensión de red del convertidor y P0100 < 2, la posición del interruptor DIP50/60 se registra en el parámetro P0100.
3. La posición del interruptor DIP50/60 no actúa si P0100 = 2.



Indicación:

P0100 ajustado a 2 (==> [kW], frecuencia por defecto 60 [Hz]) no es sobrescrito por los ajustes de los interruptores DIP50/60

Parámetro 0100 – Europa / América del Norte

Valor asignado: 2

| | | | | | | |
|--------------|------------------------------------|--------------------|-----------|-----------------|--|-------------------|
| P0305 | Corriente nominal del motor | | | | Min: 0.01 Def: (x) Máx: 10000.00 | Nivel 1 |
| | EstC: C | Tipo datos: Float | Unidad: A | P.serv.rap.: Sí | | |
| | Grupo P: MOTOR | Activo: Tras Conf. | | | | |

Intensidad nominal del motor [A] de la placa de características

Dependencia:

Modificable sólo cuando P0010 = 1 (puesta en servicio rápida).

Nota:

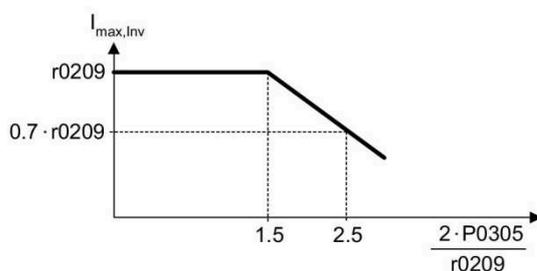
El valor máximo se define como la intensidad máxima del convertidor (r0209).

Motor asíncrono: $P0305_{max, asyn} = 2 \cdot r0209$

Para el valor mínimo se recomienda, que la relación entre P0305 (corriente nominal del motor) y r0207 (corriente nominal del convertidor) no sea menor de:

$$V/f: \frac{1}{8} \leq \frac{P0305}{r0207}$$

Si la relación entre P0305 y la mitad de r0209 sobrepasa el 1,5, actúa el siguiente Derating. Esto es necesario para proteger al convertidor de sobreoscilaciones.



(x): El ajuste de fábrica o por defecto (Def: Default) depende del tipo de convertidor, de sus datos nominales y del motor estándar de Siemens de 4 polos.

Parámetro 0305 – Corriente nominal del motor

Valor asignado: **2.7[A]**

| | | | | | | |
|--------------|-----------------------------------|--------------------|-----------|-----------------|---------------------------------------|-------------------|
| P0307 | Potencia nominal del motor | | | | Min: 0.01 Def: (x) Máx: 2000.00 | Nivel 1 |
| | EstC: C | Tipo datos: Float | Unidad: - | P.serv.rap.: Sí | | |
| | Grupo P: MOTOR | Activo: Tras Conf. | | | | |

Potencia nominal del motor [kW/hp] de la placa de características.

Dependencia:

Si P0100 = 1, valor estará en [hp]

Modificable sólo cuando P0010 = 1 (puesta en servicio rápida).

Nota:

(x): El ajuste de fábrica o por defecto (Def: Default) depende del tipo de convertidor, de sus datos nominales y del motor estándar de Siemens de 4 polos.

Parámetro 0307 – Potencia nominal del motor

Valor asignado: **0.56[kW]**

| | | | | | |
|--------------|---------------------------------|---------------------------|------------------------|--|-------------------|
| P0308 | cosPhi nominal del motor | | | | Nivel 3 |
| | EstC: C | Tipo datos: Float | Unidad: - | Min: 0.000 | |
| | Grupo P: MOTOR | Activo: Tras Conf. | P.serv.rap.: Sí | Def: 0.000 Máx: 1.000 | |

Factor de potencia nominal del motor (cosPhi) de la placa de características

Dependencia:

- Modificable sólo cuando P0010 = 1 (puesta en servicio rápida).
- Visible solo si P0003 = 3.
- Se usa solo si la potencia del motor se da en [kW] (o sea P0100= 0 ó 2)
- En este caso P0309 carece de importancia.
- El ajuste a 0 motiva el cálculo interno del valor.

Parámetro 0308 – cos Φ (factor de potencia) nominal del motor

Valor asignado: **0.75**

| | | | | | |
|--------------|-------------------------------------|---------------------------|------------------------|---|-------------------|
| P0310 | Frecuencia nominal del motor | | | | Nivel 1 |
| | EstC: C | Tipo datos: Float | Unidad: Hz | Min: 12.00 | |
| | Grupo P: MOTOR | Activo: Tras Conf. | P.serv.rap.: Sí | Def: 50.00 Máx: 650.00 | |

Frecuencia nominal motor [Hz] de la placa de características.

Dependencia:

Modificable sólo cuando P0010 = 1 (puesta en servicio rápida).

Se vuelve a calcular el número de pares de polos si se cambia el parámetro.

Parámetro 0310 – Frecuencia nominal del motor

Valor asignado: **60[Hz]**

| | | | | | |
|--------------|------------------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------------------------|-------------------|
| P0311 | Velocidad nominal del motor | | | | Nivel 1 |
| | EstC: C | Tipo datos: U16 | Unidad: 1/min | Min: 0 | |
| | Grupo P: MOTOR | Activo: Tras Conf. | P.serv.rap.: Sí | Def: (x) Máx: 40000 | |

Velocidad nominal motor [rpm] de la placa de características.

Dependencia:

- Modificable sólo cuando P0010 = 1 (puesta en servicio rápida).
 - El ajuste a 0 motiva el cálculo interno del valor.
 - La compensación del deslizamiento en control V/f necesita la velocidad nominal del motor para trabajar correctamente.
 - Se vuelve a calcular el número de pares de polos si se cambia el parámetro.
- (x): El ajuste de fábrica (Def: Default) depende del tipo de convertidor, de sus datos nominales y del motor estándar de Siemens de 4 polos correspondiente.

Nota:

El ajuste de fábrica (Def: Default) depende del tipo de convertidor y de sus datos nominales.

Parámetro 0311 – Velocidad nominal del motor

Valor asignado: **3450[RPM]**

| | | | |
|--------------------------|--|------------------------|--------------|
| P0719[2] | Selección de comandos&frec.cna. | Min: 0 | Nivel |
| EstC: CT | Tipo datos: U16 | Def: 0 | 3 |
| Grupo P: COMMANDS | Activo: Tras Conf. | P.serv.rap.: No | |
| | | Máx: 55 | |

Interruptor central para seleccionar la fuente para la orden de control del convertidor.

Las fuentes de ordenes y consignas pueden ser cambiadas independientemente.

Los diez dígitos seleccionan la fuente de ordenes y los digitos de unidades seleccionan la fuente de consigna.

Los dos índices de este parámetro se utilizan para conmutar local/remoto. La señal local/remoto conmuta entres estos ajustes.

El ajuste por defecto es 0 para el primer índice (p.e. se activa la parametrización normal). El segundo índice es para el control via BOP (p.e. activando la señal local/remoto conmutará a BOP).

Posibles ajustes:

| | | |
|----|-------------|-------------------|
| 0 | Cmd = P0700 | Cna = P1000 |
| 1 | Cmd = P0700 | Cna = MOP cna. |
| 2 | Cmd = P0700 | Cna = Cna analóg. |
| 3 | Cmd = P0700 | Cna = Frec. fijas |
| 5 | Cmd = P0700 | Cna = USS |
| 10 | Cmd = BOP | Cna = P1000 |
| 11 | Cmd = BOP | Cna = MOP cna. |
| 12 | Cmd = BOP | Cna = Cna analóg. |
| 13 | Cmd = BOP | Cna = Frec. fijas |
| 15 | Cmd = BOP | Cna = USS |
| 50 | Cmd = USS | Cna = P1000 |
| 51 | Cmd = USS | Cna = MOP cna. |
| 52 | Cmd = USS | Cna = Cna analóg. |
| 53 | Cmd = USS | Cna = Frec. fijas |
| 55 | Cmd = USS | Cna = USS |

Indice:

P0719[0] : 1ra. Fuente de control (Remoto)

P0719[1] : 2da. Fuente de control (Local)

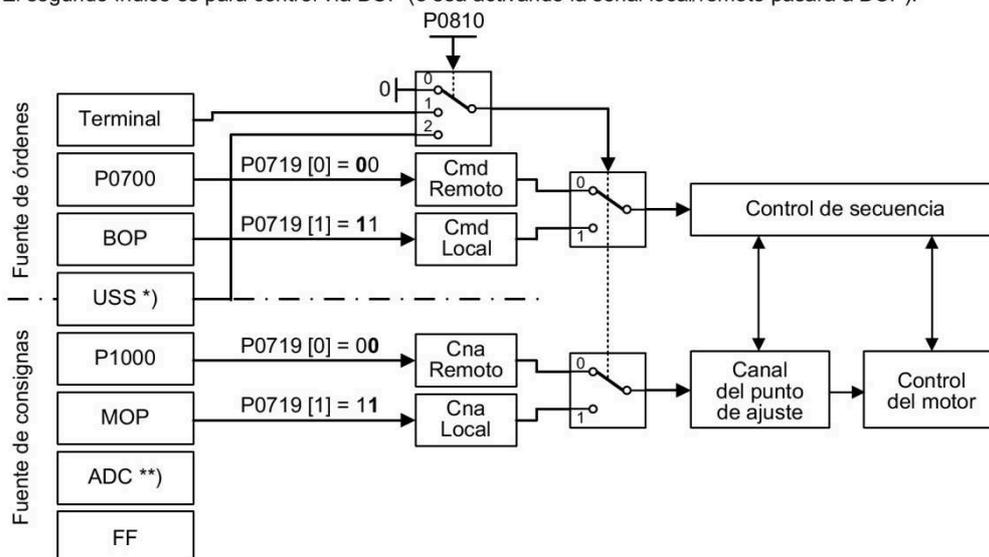
Dependencia:

El parámetro P0719 tiene mayor prioridad que P0700 y P1000.

Nota:

Los dos índices de este parámetro sirven para conmutar entre local y remoto. La señal local/remoto conmuta entre estos ajustes.

El segundo índice es para control vía BOP (o sea activando la señal local/remoto pasará a BOP).



*) solo para SINAMICS G110 CPM110 USS

**) solo para SINAMICS G110 CPM110 AIN

Parámetro 0719 – Selección de comandos y consigna de frecuencia

Valor asignado [0]: 2 (Comandos y frecuencia asignados vía bornes #3 y #9)

Valor asignado [1]: **12** (Comandos asignados vía BOP y frecuencia asignada vía borne #9)

El parámetro 0719 es el que permite que la variación de la frecuencia se realice desde el cFP mediante la Entrada Analógica (borne #9).

| | | | |
|--------------------------|--|------------------------|--------------|
| P0727 | Método de control 2-hilos / 3-hilos | Min: 0 | Nivel |
| EstC: CT | Tipo datos: U16 | Def: 3 | 2 |
| Grupo P: COMMANDS | Activo: Tras Conf. | P.serv.rap.: No | |
| | | Máx: 3 | |

Determina el método de control vía bornes

Posibles ajustes:

| | |
|---|--|
| 0 | Siemens estándar (marcha / sentido giro) |
| 1 | 2-hilos (FWD / REV) |
| 2 | 3-hilos (FWD P / REV P) |
| 3 | 3-hilos (marcha P / sentido giro) |

"P" significa "Pulsar"; "FWD" significa "Sentido horario" ("FORWARD");

"REV" significa "Sentido antihorario" ("REVERSE")

Si se selecciona uno de los modos de control por medio de P0727, se redefine el significado de las entradas digitales (P0701 a P0704) como se muestra en la siguiente tabla:

Redefinición de las entradas digitales

| Ajustes en P0701 - P0704 | P0727=0 (control Siemens Estándar) | P0727=1 (control 2-hilos) | P0727=2 (control 3-hilos) | P0727=3 (control 3-hilos) |
|--------------------------|---------------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1 | ON/OFF1 | ON_FWD | STOP | ON_PULSE |
| 2 | ON REV/OFF1 | ON_REV | FWDP | OFF1/HOLD |
| 12 | REV | REV | REVP | REV |

Parámetro 0727 – Método de control 2-hilos / 3-hilos

Valor asignado: **0**

El parámetro 0727 es el que permite que el funcionamiento del variador de frecuencia se active desde el cFP mediante la Entrada Digital 0 (borne #3).

| | | | |
|--------------------------|-------------------------------------|------------------------|--------------|
| P0753 | Tiempo de filtrado de la ADC | Min: 0 | Nivel |
| EstC: CUT | Tipo datos: U16 | Def: 3 | 3 |
| Grupo P: TERMINAL | Activo: Tras Conf. | P.serv.rap.: No | |
| | | Máx: 10000 | |

Define el tiempo de filtrado (filtro PT1) en [ms] para la entrada analógica.

Nota:

Incrementando este tiempo (suavizado) se reduce la oscilación pero se ralentiza la respuesta de la entrada analógica.

Solo una vez transcurrido 5 veces el tiempo ajustado en P0753 se alcanza aproximadamente el 100% del valor de consigna.

P0753 = 0 : Sin filtrado

Parámetro 0753 – Tiempo de filtrado de la entrada ADC

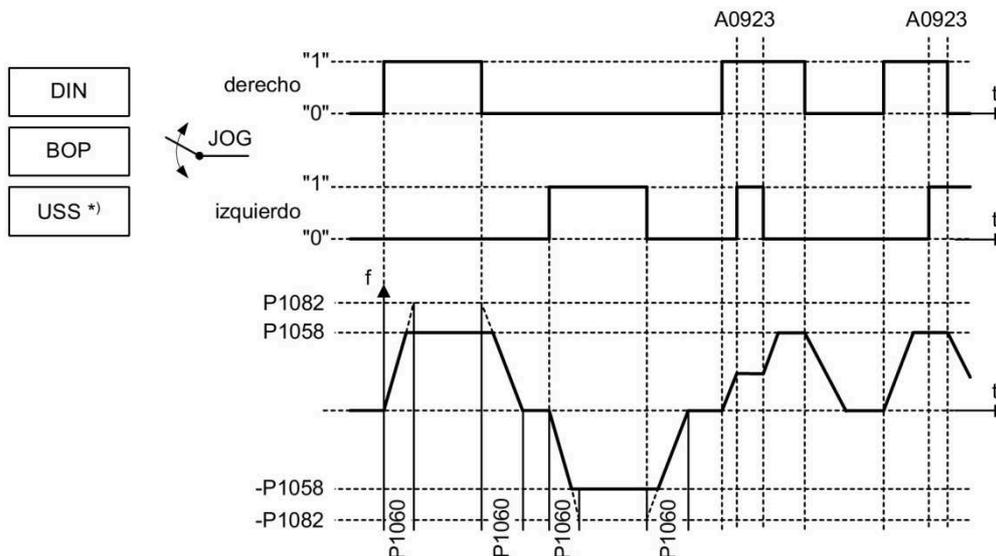
Valor asignado: **0**

| | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------|--------------------------|
| P1058 | Frecuencia JOG | Tipo datos: Float | Unidad: Hz | Min: 0.00 | Nivel 3 |
| | EstC: CUT | Activo: Inmediat. | P.serv.rap.: No | Def: 5.00 | |
| | Grupo P: SETPOINT | | | Máx: 650.00 | |

El Jog incrementa la velocidad del motor en pequeños intervalos. Las teclas JOG funcionan como un pulsador en una de las entradas digitales para controlar la velocidad del motor.

Este parámetro determina la frecuencia a la cual el convertidor funcionará, cuando se selecciona el JOG a derechas.

Ist JOG rechts (Tippen rechts) oder JOG links gewählt, wird die Drehzahl erhöht, bis der in P1058 eingestellte Wert erreicht ist.



Posibles ajustes de parámetro para el JOG:

| | Selección | JOG derecho | JOG izquierdo |
|---------------|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
| DIN | P0719 = 0, P0700 = 2 | P0702 = 10 | P0703 = 11 |
| BOP | P0719 = 0, P0700 = 1 o P0719 = 10 ... 15 | Botón de inversión | Botón de inversión Botón JOG |
| USS *) | P0719 = 0, P0700 = 5 o P0719 = 50 ... 55 | Palabra mando USS r2036 Bit08 | Palabra mando USS r2036 Bit09 |

*) solo para SINAMICS G110 CPM110 USS

Dependencia:

P1060 aumenta o disminuye el tiempo de rampa para el servicio pulsatorio (JOG).

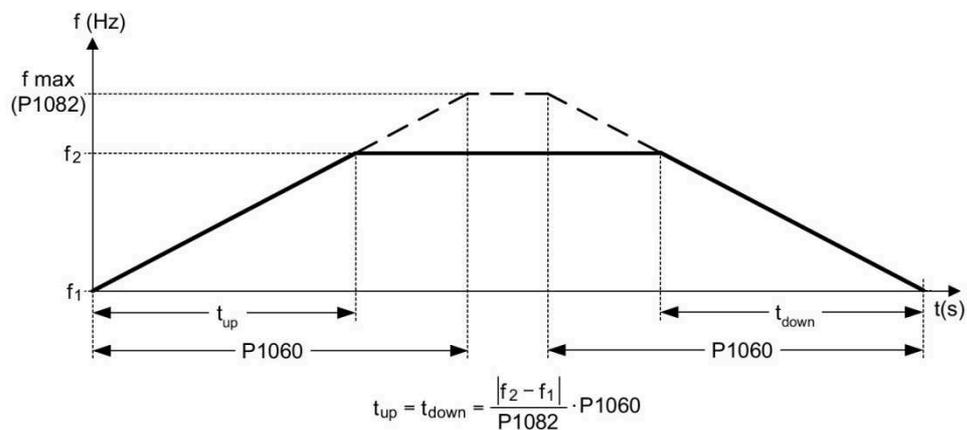
El tiempo de redondeo P1130, el tipo de redondeo P1134 y P2167 influyen también en el servicio pulsatorio (JOG).

Parámetro 1058 – Frecuencia JOG

Valor asignado: **60[Hz]**

| | | | | | |
|--------------|------------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------|--------------------------|
| P1060 | JOG ramp-up/down time | | | Min: 0.00 | Nivel 3 |
| | EstC: CUT | Tipo datos: Float | Unidad: s | Def: 10.00 | |
| | Grupo P: SETPOINT | Activo: Tras Conf. | P.serv.rap.: No | Máx: 650.00 | |

Ajusta el tiempo de aceleración y deceleración para la función JOG.



Indicación:

Los tiempos de aceleración se aplican de la siguiente manera:

P1060 : Modo JOG activo

P1120 / P1121 : Modo "normal" (ON/OFF) activo

El tiempo de redondeo P1130 también rige para la función JOG.

Parámetro 1060 – JOG ramp-up/down time

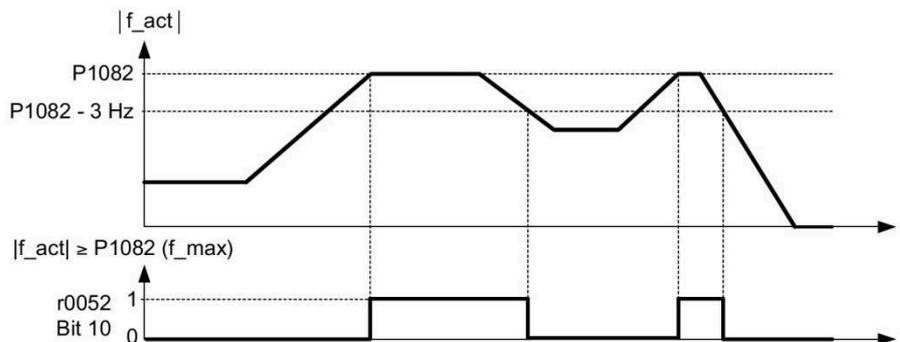
Valor asignado: **20[sec]**

| | | | | | |
|--------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------|--------------------------|
| P1082 | Frecuencia máx. | Tipo datos: Float | Unidad: Hz | Min: 0.00 | Nivel 1 |
| | EstC: CT | Activo: Tras Conf. | P.serv.rap.: Sí | Def: 50.00 | |
| | Grupo P: SETPOINT | | | Máx: 650.00 | |

Ajusta la frecuencia de motor máxima [Hz] a la cual el motor funcionará independientemente de la consigna de frecuencia. El ajuste de este valor es válido para ambos sentidos de rotación horaria y antihoraria.

Este parámetro influye en la función de aviso $|f_{act}| \geq P1082$ (r0052 Bit10, véase ejemplo).

Ejemplo:



Dependencia:

El valor máximo de la frecuencia del motor P1082 está limitado a la frecuencia de pulsación P1800. P1082 depende de la característica de desclasificación siguiente:

| f_{max} P1082 | P1800 | | | |
|-----------------|--------------|--------------|------------|------------|
| | 2 kHz | 4 kHz | 6 kHz | 8 - 16 kHz |
| | 0 - 133.3 Hz | 0 - 266.6 Hz | 0 - 400 Hz | 0 - 650 Hz |

La máxima frecuencia de salida del convertidor puede ser sobrepasada si se activa algo de lo siguiente:

- P1335 \neq 0 (Compensación deslizamiento activa):

$$f_{max}(P1335) = f_{max} + f_{slip,max} = P1082 + 2.5 \cdot \frac{r0330}{100} \cdot P0310$$

- P1200 \neq 0 (Reinicio en voladizo activo):

$$f_{max}(P1200) = f_{max} + 2 \cdot f_{slip,nom} = P1082 + 2 \cdot \frac{r0330}{100} \cdot P0310$$

Nota:

Si se utilizan las fuentes de consigna

- entrada analógica
- USS

se calcula la frecuencia de consigna (en [Hz]) ciclicamente, mediante el valor porcentual o hexadecimal (p. ej.: para la entrada analógica ==> r0754 o para USS ==> r2018[1]) y la frecuencia de referencia P2000. Si, por ejemplo, P1082 = 80 Hz, P2000 = 50 Hz, P1000 = 2 y para la entrada analógica P0757 = 0 V, P0758 = 0 %, P0759 = 10 V, P0760 = 100 %, entonces resulta, para un valor de entrada de 10 V, una frecuencia de consigna de 50 Hz.

Parámetro 1082 – Frecuencia máxima

Valor asignado: **60[Hz]**

| | | | | | |
|--------------|-------------------------------------|--------------------|-----------------|------------------|----------|
| P1110 | Inibición de las frecuencias | | | | Nivel |
| | EstC: CT | Tipo datos: U16 | Unidad: - | Min: 0 | 3 |
| | Grupo P: COMMANDS | Activo: Tras Conf. | P.serv.rap.: No | Def: 0 Máx: 1 | |

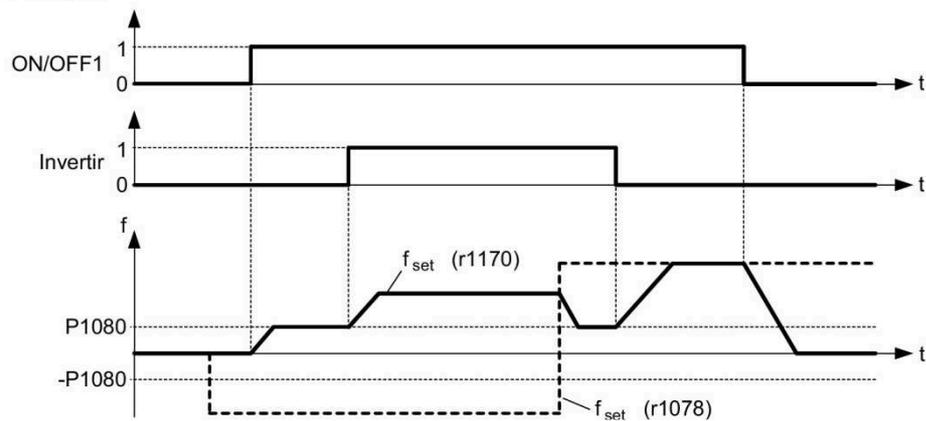
Inhibe consignas negativas en el canal de consignas y evita que el motor cambie de giro.

Si se prescribe una frecuencia mínima P1080 y una consigna negativa, y P1110 = 1, el motor acelera a la frecuencia mínima en sentido de giro positivo.

Posibles ajustes:

- 0 Inactivo
- 1 Activo

P1110 = 1

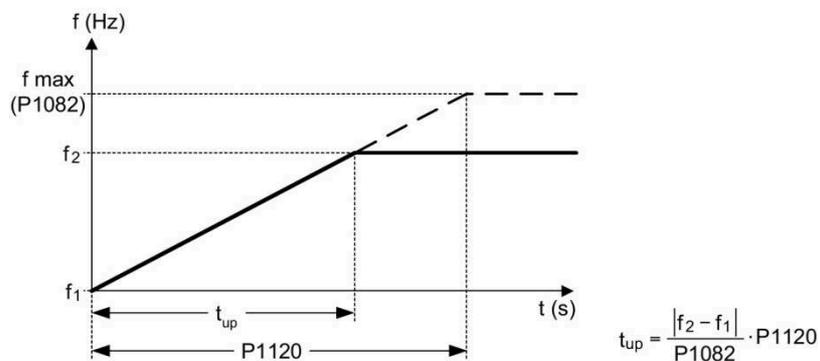


Parámetro 1110 – Inhibición de las frecuencias

Valor asignado: 1

| | | | | | |
|--------------|------------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------|--------------------------|
| P1120 | Tiempo de aceleración | | | Min: 0.00 | Nivel 1 |
| | EstC: CUT | Tipo datos: Float | Unidad: s | Def: 10.00 | |
| | Grupo P: SETPOINT | Activo: Tras Conf. | P.serv.rap.: Sí | Máx: 650.00 | |

Tiempo utilizado por el motor para acelerar desde el punto muerto hasta la frecuencia máxima del motor (P1082) cuando no se utiliza el redondeo.



El ajuste demasiado corto del tiempo de desaceleración puede ocasionar el fallo del convertidor (sobrecorriente F0001).

Nota:

Si se utiliza una consigna de frecuencia externa con ajuste de rampas (p.e. desde un PLC), la mejor forma para conseguir un funcionamiento óptimo del convertidor es ajustar los tiempos de rampa en P1120 y P1121 ligeramente más cortos que los del PLC.

Indicación:

Los tiempos de aceleración se aplican de la siguiente manera:

P1060 : Modo JOG activo

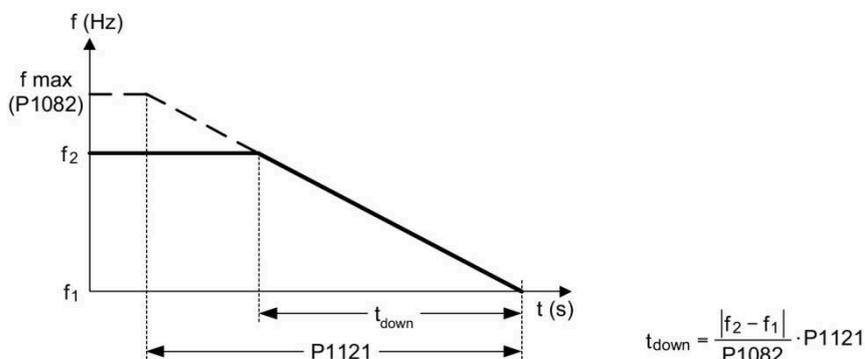
P1120 / P1121 : Modo "normal" (ON/OFF) activo

Parámetro 1120 – Tiempo de aceleración

Valor asignado: **20[sec]**

| | | | |
|--------------|---------------------------------|---------------------------|------------------------|
| P1121 | Tiempo de desaceleración | Min: 0.00 | Nivel |
| | EstC: CUT | Tipo datos: Float | Unidad: s |
| | Grupo P: SETPOINT | Activo: Tras Conf. | P.serv.rap.: Sí |
| | | Def: 10.00 | 1 |
| | | Máx: 650.00 | |

Tiempo utilizado por el motor para desacelerar desde la frecuencia máxima (P1082) hasta el punto muerto cuando no se utiliza el redondeo.



Indicación:

El ajuste del tiempo de desaceleración demasiado corto puede causar el fallo del convertidor (sobrecorriente F0001 / sobretensión F0002).

Los tiempos de aceleración se aplican de la siguiente manera:

P1060 : Modo JOG activo

P1120 / P1121 : Modo "normal" (ON/OFF) activo

Parámetro 1121 – Tiempo de desaceleración

Valor asignado: **20[sec]**

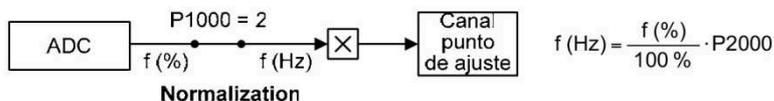
| | | | |
|--------------|---------------------------------|---------------------------|------------------------|
| P2000 | Frecuencia de referencia | Min: 1.00 | Nivel |
| | EstC: CT | Tipo datos: Float | Unidad: Hz |
| | Grupo P: COMM | Activo: Tras Conf. | P.serv.rap.: No |
| | | Def: 50.00 | 3 |
| | | Máx: 650.00 | |

El parámetro P2000 es la frecuencia de referencia para representar / transmitir valores porcentuales o hexadecimales:

- hexadecimal 4000 H ==> P2000 (p. ej.: USS-PZD)
- porcentual 100 % ==> P2000 (p. ej.: ADC)

Ejemplo:

La señal de la entrada analógica (ADC) se enlazar a la consigna de frecuencia (p. ej. : P1000 = 2). El valor de entrada porcentual actual se convierte cíclicamente en la consigna de frecuencia absoluta en [Hz], mediante la frecuencia de referencia P2000.



Parámetro 2000 – Frecuencia de referencia

Valor asignado: **60[Hz]**

Los demás parámetros contienen los valores por defecto o de fábrica que vienen configurados en el variador de frecuencia.

ANEXO F. Cálculo para la Conversión de Corriente a Altura de los Sensores de Presión

TABLA DE DATOS:

| H [cm] | I[mA] P_T1 | I[mA] P_T2 | I[mA] P_T3 |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 50 | 7.179 | 7.059 | 7.106 |
| 49.5 | 7.150 | 7.024 | 7.071 |
| 49 | 7.121 | 6.995 | 7.042 |
| 48.5 | 7.091 | 6.968 | 7.012 |
| 48 | 7.065 | 6.936 | 6.983 |
| 47.5 | 7.033 | 6.904 | 6.954 |
| 47 | 7.004 | 6.872 | 6.919 |
| 46.5 | 6.974 | 6.842 | 6.883 |
| 46 | 6.936 | 6.807 | 6.854 |
| 45.5 | 6.904 | 6.772 | 6.825 |
| 45 | 6.875 | 6.743 | 6.790 |
| 44.5 | 6.845 | 6.714 | 6.760 |

| H [cm] | I[mA] P_T1 | I[mA] P_T2 | I[mA] P_T3 |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 44 | 6.810 | 6.681 | 6.731 |
| 43.5 | 6.787 | 6.646 | 6.702 |
| 43 | 6.752 | 6.614 | 6.664 |
| 42.5 | 6.722 | 6.585 | 6.632 |
| 42 | 6.690 | 6.555 | 6.602 |
| 41.5 | 6.658 | 6.526 | 6.573 |
| 41 | 6.629 | 6.497 | 6.544 |
| 40.5 | 6.596 | 6.462 | 6.508 |
| 40 | 6.567 | 6.432 | 6.479 |
| 39.5 | 6.532 | 6.397 | 6.450 |
| 39 | 6.505 | 6.362 | 6.415 |
| 38.5 | 6.473 | 6.333 | 6.385 |
| 38 | 6.439 | 6.303 | 6.350 |
| 37.5 | 6.403 | 6.274 | 6.321 |

| H [cm] | I[mA] P_T1 | I[mA] P_T2 | I[mA] P_T3 |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 37 | 6.374 | 6.245 | 6.292 |
| 36.5 | 6.347 | 6.213 | 6.260 |
| 36 | 6.318 | 6.180 | 6.227 |
| 35.5 | 6.280 | 6.151 | 6.198 |
| 35 | 6.248 | 6.116 | 6.169 |
| 34.5 | 6.215 | 6.087 | 6.139 |
| 34 | 6.186 | 6.057 | 6.104 |
| 33.5 | 6.157 | 6.022 | 6.069 |
| 33 | 6.122 | 5.992 | 6.040 |
| 32.5 | 6.087 | 5.963 | 6.010 |
| 32 | 6.054 | 5.928 | 5.975 |
| 31.5 | 6.019 | 5.899 | 5.940 |
| 31 | 5.986 | 5.869 | 5.910 |
| 30.5 | 5.957 | 5.834 | 5.881 |

| H [cm] | I[mA] P_T1 | I[mA] P_T2 | I[mA] P_T3 |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 30 | 5.928 | 5.805 | 5.852 |
| 29.5 | 5.899 | 5.770 | 5.823 |
| 29 | 5.867 | 5.741 | 5.787 |
| 28.5 | 5.834 | 5.711 | 5.758 |
| 28 | 5.805 | 5.682 | 5.729 |
| 27.5 | 5.773 | 5.647 | 5.696 |
| 27 | 5.746 | 5.617 | 5.664 |
| 26.5 | 5.717 | 5.588 | 5.635 |
| 26 | 5.679 | 5.559 | 5.600 |
| 25.5 | 5.647 | 5.530 | 5.565 |
| 25 | 5.617 | 5.494 | 5.535 |
| 24.5 | 5.588 | 5.459 | 5.506 |
| 24 | 5.559 | 5.430 | 5.477 |
| 23.5 | 5.530 | 5.404 | 5.448 |

| H [cm] | I[mA] P_T1 | I[mA] P_T2 | I[mA] P_T3 |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 23 | 5.497 | 5.377 | 5.412 |
| 22.5 | 5.465 | 5.342 | 5.377 |
| 22 | 5.435 | 5.313 | 5.348 |
| 21.5 | 5.401 | 5.283 | 5.319 |
| 21 | 5.371 | 5.248 | 5.286 |
| 20.5 | 5.342 | 5.213 | 5.254 |
| 20 | 5.313 | 5.184 | 5.225 |
| 19.5 | 5.278 | 5.155 | 5.196 |
| 19 | 5.248 | 5.125 | 5.160 |
| 18.5 | 5.219 | 5.090 | 5.131 |
| 18 | 5.190 | 5.055 | 5.102 |
| 17.5 | 5.155 | 5.026 | 5.067 |
| 17 | 5.125 | 4.996 | 5.037 |
| 16.5 | 5.096 | 4.967 | 5.008 |

| H [cm] | I[mA] P_T1 | I[mA] P_T2 | I[mA] P_T3 |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 16 | 5.067 | 4.938 | 4.976 |
| 15.5 | 5.037 | 4.903 | 4.944 |
| 15 | 5.001 | 4.873 | 4.914 |
| 14.5 | 4.973 | 4.844 | 4.879 |
| 14 | 4.941 | 4.809 | 4.844 |
| 13.5 | 4.903 | 4.774 | 4.815 |
| 13 | 4.873 | 4.744 | 4.785 |
| 12.5 | 4.844 | 4.715 | 4.756 |
| 12 | 4.809 | 4.686 | 4.727 |
| 11.5 | 4.780 | 4.651 | 4.692 |
| 11 | 4.747 | 4.621 | 4.662 |
| 10.5 | 4.715 | 4.592 | 4.633 |
| 10 | 4.686 | 4.563 | 4.604 |
| 9.5 | 4.657 | 4.531 | 4.569 |

| H [cm] | I[mA] P_T1 | I[mA] P_T2 | I[mA] P_T3 |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 9 | 4.627 | 4.495 | 4.533 |
| 8.5 | 4.598 | 4.469 | 4.504 |
| 8 | 4.563 | 4.433 | 4.475 |
| 7.5 | 4.533 | 4.401 | 4.439 |
| 7 | 4.501 | 4.369 | 4.404 |
| 6.5 | 4.469 | 4.343 | 4.375 |
| 6 | 4.433 | 4.310 | 4.346 |
| 5.5 | 4.404 | 4.281 | 4.316 |
| 5 | 4.375 | 4.249 | 4.284 |
| 4.5 | 4.346 | 4.217 | 4.252 |
| 4 | 4.313 | 4.187 | 4.223 |
| 3.5 | 4.281 | 4.158 | 4.193 |

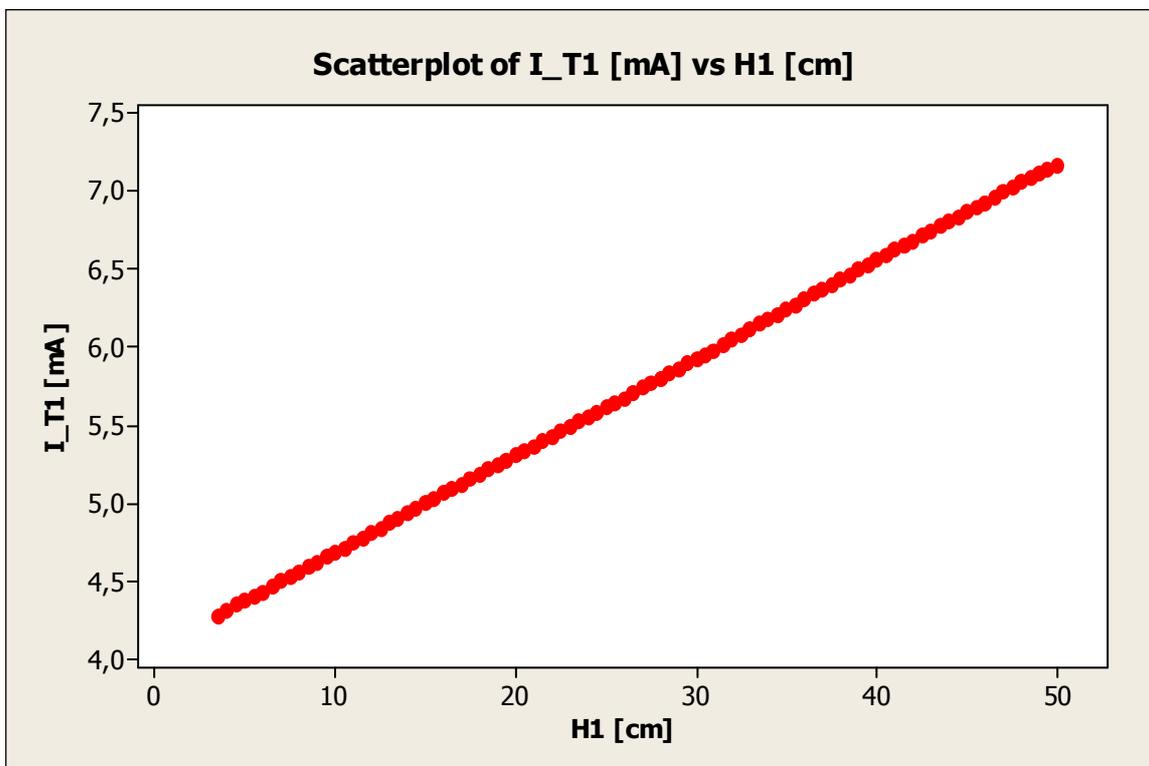
DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN:

Diagrama de dispersión del sensor de presión del primer tanque

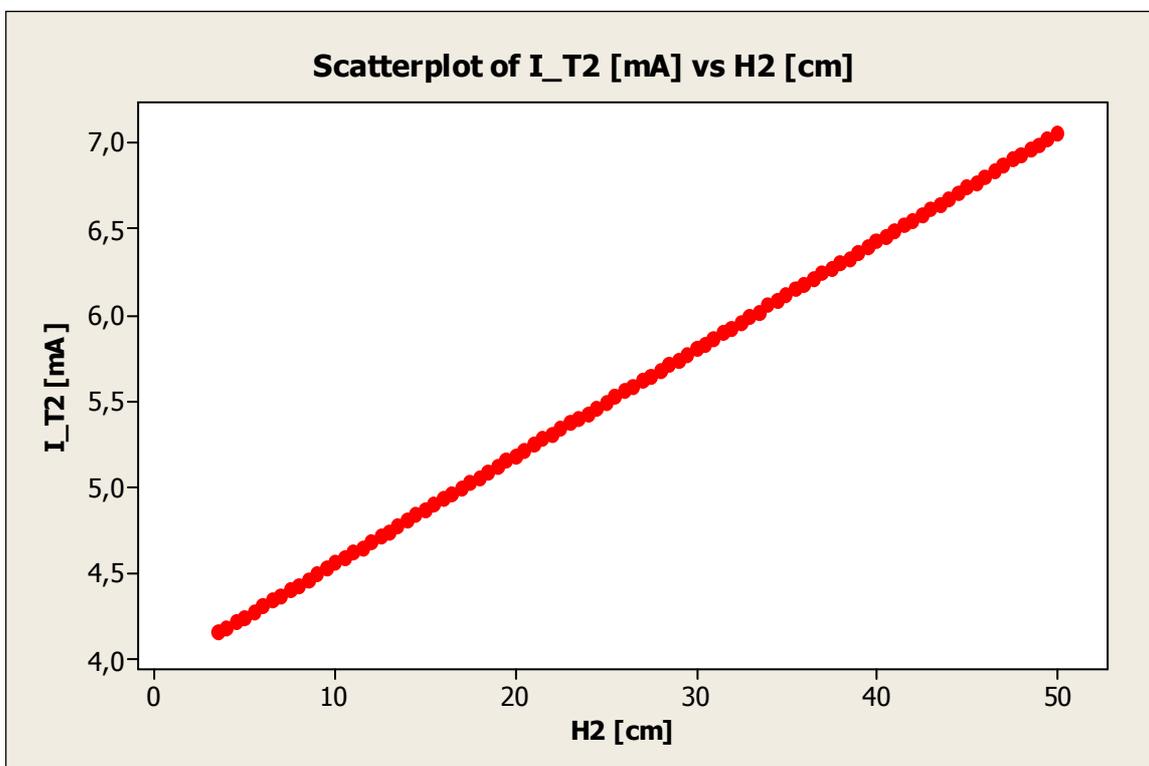


Diagrama de dispersión del sensor de presión del segundo tanque

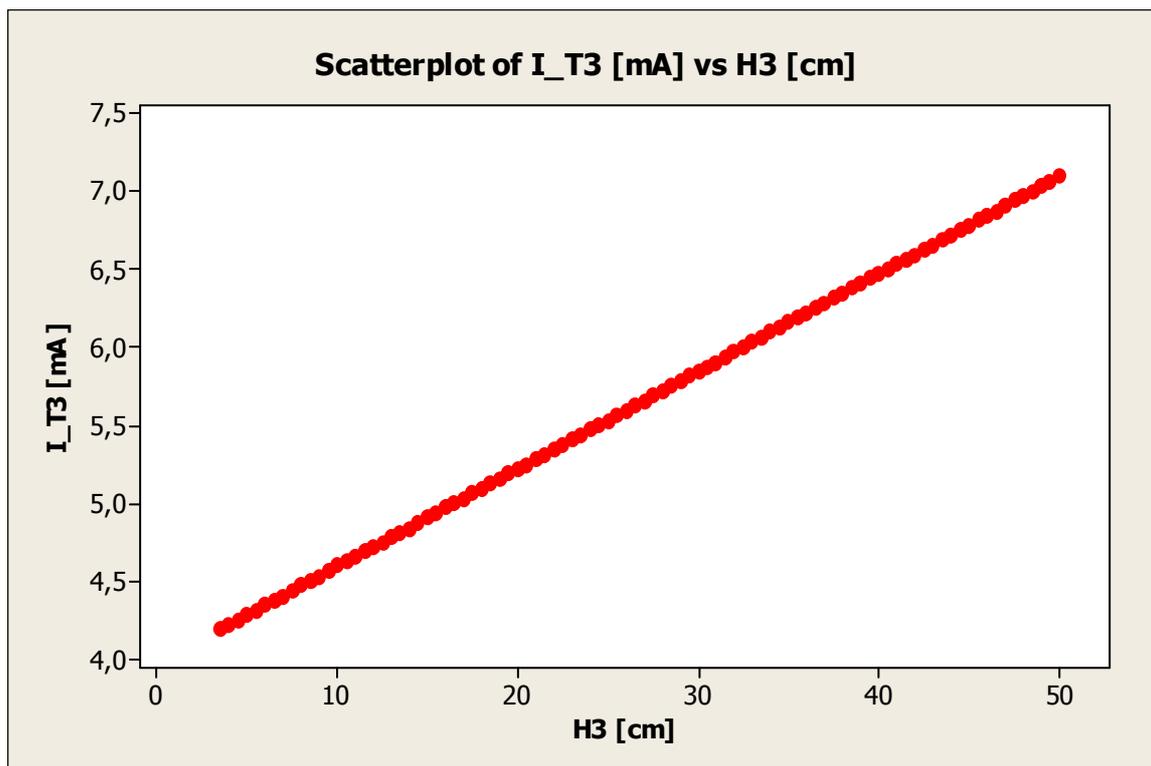


Diagrama de dispersión del sensor de presión del tercer tanque

REGRESIONES LINEALES:

Regression Analysis: H1 [cm] versus I_T1 [mA]

The regression equation is
 $H1 [cm] = -65,0 + 16,0 I_{T1} [mA]$

| Predictor | Coef | SE Coef | T | P |
|-----------|----------|---------|----------|-------|
| Constant | -64,9792 | 0,0504 | -1290,24 | 0,000 |
| I_T1 [mA] | 16,0006 | 0,0087 | 1841,21 | 0,000 |

S = 0,0714394 R-Sq = 100,0% R-Sq(adj) = 100,0%

Analysis of Variance

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|----------------|----|-------|-------|------------|-------|
| Regression | 1 | 17301 | 17301 | 3390047,58 | 0,000 |
| Residual Error | 92 | 0 | 0 | | |
| Total | 93 | 17302 | | | |

Regression Analysis: H2 [cm] versus I_T2 [mA]

The regression equation is
 $H_2 \text{ [cm]} = -63,1 + 16,0 I_{T2} \text{ [mA]}$

| Predictor | Coef | SE Coef | T | P |
|-----------|----------|---------|----------|-------|
| Constant | -63,0932 | 0,0337 | -1874,46 | 0,000 |
| I_T2 [mA] | 16,0304 | 0,0059 | 2699,45 | 0,000 |

S = 0,0487270 R-Sq = 100,0% R-Sq(adj) = 100,0%

Analysis of Variance

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|----------------|----|-------|-------|------------|-------|
| Regression | 1 | 17302 | 17302 | 7287004,87 | 0,000 |
| Residual Error | 92 | 0 | 0 | | |
| Total | 93 | 17302 | | | |

Regression Analysis: H3 [cm] versus I_T3 [mA]

The regression equation is
 $H_3 \text{ [cm]} = -63,3 + 16,0 I_{T3} \text{ [mA]}$

| Predictor | Coef | SE Coef | T | P |
|-----------|----------|---------|----------|-------|
| Constant | -63,3431 | 0,0278 | -2281,76 | 0,000 |
| I_T3 [mA] | 15,9514 | 0,0049 | 3281,94 | 0,000 |

S = 0,0400787 R-Sq = 100,0% R-Sq(adj) = 100,0%

Analysis of Variance

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|----------------|----|-------|-------|-------------|-------|
| Regression | 1 | 17302 | 17302 | 10771138,81 | 0,000 |
| Residual Error | 92 | 0 | 0 | | |
| Total | 93 | 17302 | | | |

RESULTADOS OBTENIDOS:

$$H_1 = (16000.6I_1 - 64.9792)[cm]$$

$$H_2 = (16030.4I_2 - 63.0932)[cm]$$

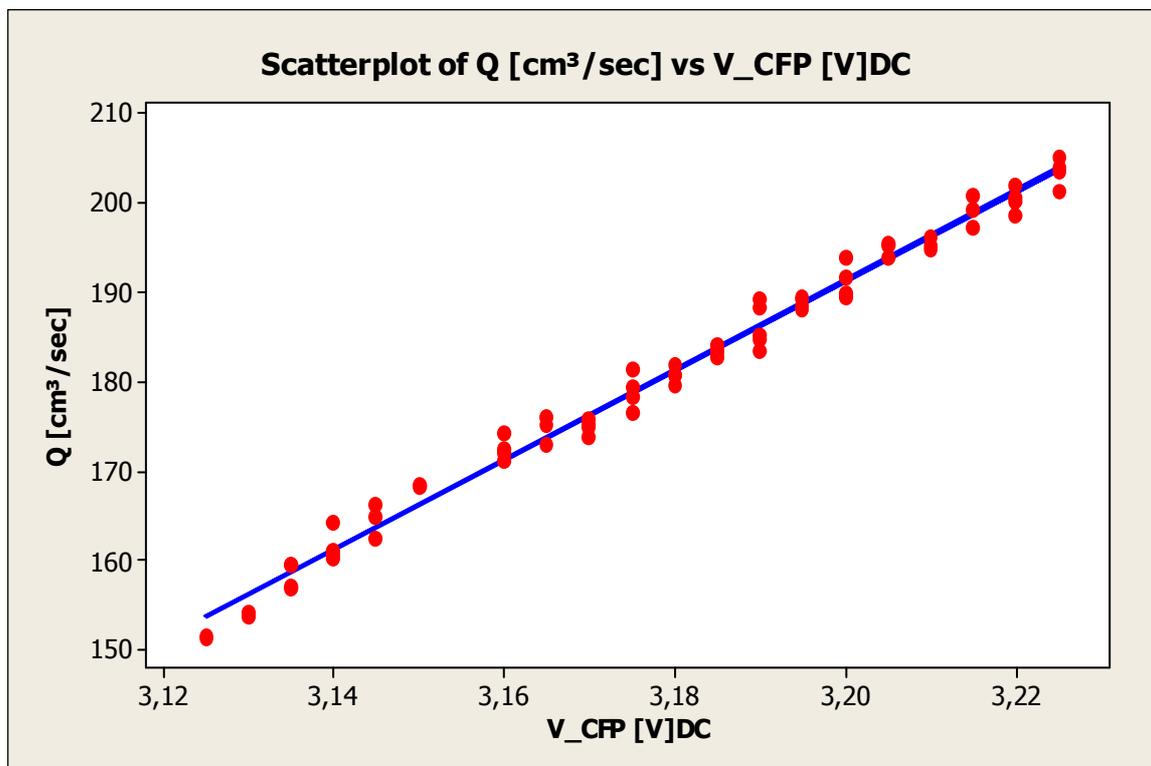
$$H_3 = (15951.4I_3 - 63.3431)[cm]$$

ANEXO G. Cálculo de la Constante K_U del Caudal de Entrada por Voltaje

TABLA DE DATOS:

| V_{cFP} [V] _{DC} | Q [cm ³ /sec] |
|--------------------------------|-----------------------------|
| 3.125 | 151.491 |
| 3.125 | 151.184 |
| 3.130 | 153.680 |
| 3.130 | 154.138 |
| 3.135 | 159.603 |
| 3.135 | 159.566 |
| 3.135 | 156.848 |
| 3.135 | 157.029 |
| 3.140 | 160.562 |
| 3.140 | 164.186 |
| 3.140 | 161.167 |
| 3.140 | 160.191 |
| 3.145 | 166.269 |
| 3.145 | 162.547 |
| 3.145 | 164.886 |
| 3.150 | 168.444 |
| 3.150 | 168.150 |
| 3.160 | 174.316 |
| 3.160 | 171.233 |
| 3.160 | 172.547 |
| 3.160 | 172.146 |
| 3.165 | 173.034 |
| 3.165 | 176.012 |
| 3.165 | 175.094 |
| 3.165 | 176.121 |
| 3.170 | 174.893 |
| 3.170 | 175.740 |
| 3.170 | 173.929 |
| 3.170 | 175.076 |
| 3.175 | 181.375 |
| 3.175 | 179.347 |
| 3.175 | 176.544 |
| 3.175 | 178.286 |
| 3.180 | 179.649 |
| 3.180 | 181.851 |

| V_{cFP} [V] _{DC} | Q [cm ³ /sec] |
|--------------------------------|-----------------------------|
| 3.180 | 180.746 |
| 3.180 | 180.807 |
| 3.185 | 183.416 |
| 3.185 | 184.030 |
| 3.185 | 182.844 |
| 3.185 | 183.447 |
| 3.190 | 188.287 |
| 3.190 | 189.157 |
| 3.190 | 185.198 |
| 3.190 | 183.520 |
| 3.190 | 184.822 |
| 3.195 | 189.346 |
| 3.195 | 188.515 |
| 3.195 | 189.290 |
| 3.195 | 188.055 |
| 3.200 | 189.526 |
| 3.200 | 193.919 |
| 3.200 | 189.994 |
| 3.200 | 191.769 |
| 3.205 | 195.425 |
| 3.205 | 195.150 |
| 3.205 | 193.843 |
| 3.210 | 196.103 |
| 3.210 | 195.232 |
| 3.210 | 194.764 |
| 3.215 | 200.879 |
| 3.215 | 199.299 |
| 3.215 | 197.229 |
| 3.220 | 198.678 |
| 3.220 | 200.525 |
| 3.220 | 201.943 |
| 3.220 | 200.106 |
| 3.225 | 201.263 |
| 3.225 | 203.934 |
| 3.225 | 205.122 |
| 3.225 | 203.477 |

DIAGRAMA DE DISPERSIÓN:**REGRESIÓN LINEAL:****Regression Analysis: Q [cm³/sec] versus V_CFP [V]DC**

The regression equation is
 $Q \text{ [cm}^3\text{/sec]} = -1410 + 501 \text{ V_CFP [V]DC}$

| Predictor | Coef | SE Coef | T | P |
|-------------|----------|---------|--------|-------|
| Constant | -1410,41 | 20,85 | -67,64 | 0,000 |
| V_CFP [V]DC | 500,502 | 6,560 | 76,30 | 0,000 |

S = 1,60344 R-Sq = 98,8% R-Sq(adj) = 98,8%

Analysis of Variance

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|----------------|----|-------|-------|---------|-------|
| Regression | 1 | 14967 | 14967 | 5821,41 | 0,000 |
| Residual Error | 69 | 177 | 3 | | |
| Total | 70 | 15144 | | | |

RESULTADOS OBTENIDOS:

$$Q_{NoLineal} = (500.502 \cdot U - 1410.41) [cm^3/sec]$$

$$Q_{Lineal} = (500.502 \cdot U) [cm^3/sec]$$

$$K_U = 500.502 [cm^3/(V \cdot sec)]$$

ANEXO H. Obtención de la Función de Transferencia del Tercer Tanque con Respecto al Voltaje de Entrada de la Planta

Para obtener la función de transferencia del tercer tanque con respecto al voltaje de entrada de la planta, se parte de las ecuaciones diferenciales teóricas linealizadas de la misma. Éstas son:

$$\dot{h}_1 = \frac{1}{L^2} [(K_U \cdot U) - (c_1 \cdot h_1) + (c_1 \cdot h_2)]$$

$$\dot{h}_2 = \frac{1}{L^2} [(c_1 \cdot h_1) - (c_1 \cdot h_2) - (c_2 \cdot h_2) + (c_2 \cdot h_3)]$$

$$\dot{h}_3 = \frac{1}{L^2} [(c_2 \cdot h_2) - (c_2 \cdot h_3) - (c_3 \cdot h_3)]$$

En donde:

\dot{h}_1 = Derivada de la altura de la columna de agua del primer tanque

\dot{h}_2 = Derivada de la altura de la columna de agua del segundo tanque

\dot{h}_3 = Derivada de la altura de la columna de agua del tercer tanque

h_1 = Incremental de la altura de la columna de agua del primer tanque

h_2 = Incremental de la altura de la columna de agua del segundo tanque

h_3 = Incremental de la altura de la columna de agua del tercer tanque

c_1 = Constante de linealización del caudal entre el primer y segundo tanque

c_2 = Constante de linealización del caudal entre el segundo y tercer tanque

c_3 = Constante de linealización del caudal de salida del tercer tanque

K_U = Constante del caudal de entrada por unidad de voltaje

U = Voltaje de entrada

L = Longitud del lado de la base de los tanques

Como se desea obtener una función de transferencia, se recurre a la Transformada de Laplace para transformar expresiones del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

Para todos los casos, se asumirá que las condiciones iniciales son cero.

Se inicia aplicando la transformada de Laplace de la expresión correspondiente al tercer tanque:

$$s \cdot h_3(s) = \frac{1}{L^2} [c_2 \cdot h_2(s) - c_2 \cdot h_3(s) - c_3 \cdot h_3(s)]$$

Sacando factor común $h_3(s)$, se obtiene:

$$s \cdot h_3(s) + \frac{c_2 \cdot h_3(s) + c_3 \cdot h_3(s)}{L^2} = \frac{c_2 \cdot h_2(s)}{L^2}$$

$$h_3(s) \cdot \left(s + \frac{c_2 + c_3}{L^2} \right) = \frac{c_2}{L^2} \cdot h_2(s)$$

Despejando $h_3(s)$ y $h_2(s)$, y simplificando la expresión resultante, se obtiene:

$$\frac{h_3(s)}{h_2(s)} = \frac{\frac{c_2}{L^2}}{s + \frac{c_2 + c_3}{L^2}}$$

$$\frac{h_3(s)}{h_2(s)} = \frac{c_2}{L^2 s + c_2 + c_3}$$

Ahora se procede a aplicar la transformada de Laplace de la expresión correspondiente al segundo tanque:

$$s \cdot h_2(s) = \frac{1}{L^2} [c_1 \cdot h_1(s) - c_1 \cdot h_2(s) - c_2 \cdot h_2(s) + c_2 \cdot h_3(s)]$$

Reemplazando $h_3(s)$ en la expresión anterior, y sacando factor común $h_2(s)$, se obtiene:

$$h_3(s) = \frac{c_2 \cdot h_2(s)}{L^2 s + c_2 + c_3}$$

$$s \cdot h_2(s) = \frac{1}{L^2} \left[c_1 \cdot h_1(s) - c_1 \cdot h_2(s) - c_2 \cdot h_2(s) + \frac{c_2^2 \cdot h_2(s)}{L^2 s + c_2 + c_3} \right]$$

$$s \cdot h_2(s) + \frac{c_1 \cdot h_2(s) + c_2 \cdot h_2(s)}{L^2} - \frac{c_2^2 \cdot h_2(s)}{L^2 (L^2 s + c_2 + c_3)} = \frac{c_1 \cdot h_1(s)}{L^2}$$

$$h_2(s) \cdot \left[s + \frac{(c_1 + c_2)}{L^2} - \frac{c_2^2}{L^2 (L^2 s + c_2 + c_3)} \right] = \frac{c_1}{L^2} \cdot h_1(s)$$

Despejando $h_2(s)$ y $h_1(s)$, y simplificando la expresión resultante, se obtiene:

$$\frac{h_2(s)}{h_1(s)} = \frac{\frac{c_1}{L^2}}{s + \frac{(c_1+c_2)}{L^2} - \frac{c_2^2}{L^2(L^2s+c_2+c_3)}}$$

$$\frac{h_2(s)}{h_1(s)} = \frac{c_1(L^2s+c_2+c_3)}{\left[L^2s(L^2s+c_2+c_3) \right] + \left[(c_1+c_2)(L^2s+c_2+c_3) \right] - c_2^2}$$

Ahora se procede a aplicar la transformada de Laplace de la expresión correspondiente al primer tanque:

$$s \cdot h_1(s) = \frac{1}{L^2} \left[K_U \cdot U(s) - c_1 \cdot h_1(s) + c_1 \cdot h_2(s) \right]$$

Reemplazando $h_2(s)$ en la expresión anterior, y sacando factor común $h_1(s)$, se obtiene:

$$h_2(s) = \frac{c_1(L^2s+c_2+c_3) \cdot h_1(s)}{\left[L^2s(L^2s+c_2+c_3) \right] + \left[(c_1+c_2)(L^2s+c_2+c_3) \right] - c_2^2}$$

$$s \cdot h_1(s) = \frac{1}{L^2} \left[K_U \cdot U(s) - c_1 \cdot h_1(s) + \frac{c_1^2(L^2s+c_2+c_3) \cdot h_1(s)}{\left[L^2s(L^2s+c_2+c_3) \right] + \left[(c_1+c_2)(L^2s+c_2+c_3) \right] - c_2^2} \right]$$

$$s \cdot h_1(s) + \frac{c_1 \cdot h_1(s)}{L^2} - \frac{c_1^2(L^2s+c_2+c_3) \cdot h_1(s)}{L^2 \left\{ \left[L^2s(L^2s+c_2+c_3) \right] + \left[(c_1+c_2)(L^2s+c_2+c_3) \right] - c_2^2 \right\}} = \frac{K_U \cdot U(s)}{L^2}$$

$$h_1(s) \cdot \left[s + \frac{c_1}{L^2} - \frac{c_1^2(L^2s+c_2+c_3)}{L^2 \left\{ \left[L^2s(L^2s+c_2+c_3) \right] + \left[(c_1+c_2)(L^2s+c_2+c_3) \right] - c_2^2 \right\}} \right] = \frac{K_U \cdot U(s)}{L^2}$$

Despejando $h_1(s)$ y $U(s)$, se obtiene:

$$\frac{h_1(s)}{U(s)} = \frac{K_U}{L^2 \cdot \left[s + \frac{c_1}{L^2} - \frac{c_1^2(L^2s+c_2+c_3)}{L^2 \left\{ \underbrace{\left[L^2s(L^2s+c_2+c_3) \right]}_A + \underbrace{\left[(c_1+c_2)(L^2s+c_2+c_3) \right]}_B - c_2^2 \right\}} \right]}$$

Para facilitar su simplificación, se ha agrupado la expresión del denominador de la función de transferencia en dos partes, A, B:

$$A = L^2 s(L^2 s + c_2 + c_3) \Rightarrow L^4 s^2 + L^2 s c_2 + L^2 s c_3$$

$$B = (c_1 + c_2)(L^2 s + c_2 + c_3) \Rightarrow L^2 s c_1 + c_1 c_2 + c_1 c_3 + L^2 s c_2 + c_2^2 + c_2 c_3$$

Simplificando la expresión resultante, se obtiene:

$$\frac{h_1(s)}{U(s)} = \frac{K_U \cdot L^2 \{A + B - c_2^2\}}{L^2 \left[(L^2 s \{A + B - c_2^2\}) + (c_1 \{A + B - c_2^2\}) - \underbrace{(c_1^2 \{L^2 s + c_2 + c_3\})}_C \right]}$$

Nuevamente, para facilitar su simplificación, se ha agrupado una expresión del denominador de la función de transferencia, C:

$$C = c_1^2 (L^2 s + c_2 + c_3) \Rightarrow L^2 s c_1^2 + c_1^2 c_2 + c_1^2 c_3$$

Simplificando la expresión resultante, se obtiene:

$$\frac{h_1(s)}{U(s)} = \frac{K_U \cdot \{A + B - c_2^2\}}{\underbrace{(L^2 s \{A + B - c_2^2\})}_D + \underbrace{(c_1 \{A + B - c_2^2\})}_E - C}$$

Nuevamente, para facilitar su simplificación, se ha agrupado la expresión del denominador de la función de transferencia en dos partes: D, E.

$$D = L^2 s(A + B - c_2^2) \Rightarrow L^6 s^3 + L^4 s^2 c_2 + L^4 s^2 c_3 + L^4 s^2 c_2 + L^4 s^2 c_1 + L^2 s c_1 c_2 + L^2 s c_1 c_3 + L^2 s c_2 c_3$$

$$E = c_1(A + B - c_2^2) \Rightarrow L^4 s^2 c_1 + L^2 s c_1 c_2 + L^2 s c_1 c_3 + L^2 s c_1 c_2 + L^2 s c_1^2 + c_1^2 c_2 + c_1^2 c_3 + c_1 c_2 c_3$$

Simplificando la expresión resultante, se obtiene:

$$\frac{h_1(s)}{U(s)} = \frac{K_U \cdot \{A + B - c_2^2\}}{D + E - C}$$

Una vez que se han obtenido todas las funciones de transferencia $\frac{h_3(s)}{h_2(s)}$, $\frac{h_2(s)}{h_1(s)}$ y $\frac{h_1(s)}{U(s)}$, la función de transferencia del tercer tanque con respecto al voltaje de entrada de la planta se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\frac{h_3(s)}{U(s)} = \frac{h_3(s)}{h_2(s)} \cdot \frac{h_2(s)}{h_1(s)} \cdot \frac{h_1(s)}{U(s)}$$

Esto es igual a:

$$\frac{h_3(s)}{U(s)} = \frac{K_U \cdot c_1 \cdot c_2}{D + E - C}$$

Para obtener la expresión resultante del denominador, se resuelven las operaciones matemáticas de las tres partes en que éste fue agrupado:

$$D + E - C = L^6 s^3 + L^4 s^2 c_2 + L^4 s^2 c_3 + L^4 s^2 c_1 + L^2 s c_1 c_2 + L^2 s c_1 c_3 + L^2 s c_2 c_3 + L^4 s^2 c_1 + L^2 s c_1 c_2 + L^2 s c_1 c_3 + L^2 s c_1 c_2 + c_1 c_2 c_3$$

Agrupando esta expresión según las potencias de s para su ordenamiento, se tiene:

$$\begin{aligned} & s^3 (L^6) \\ & s^2 (2L^4 c_2 + L^4 c_3 + 2L^4 c_1) \\ & s^1 (3L^2 c_1 c_2 + 2L^2 c_1 c_3 + L^2 c_2 c_3) \\ & s^0 (c_1 c_2 c_3) \end{aligned}$$

Reemplazando esto en la función de transferencia, se obtiene:

$$\frac{h_3(s)}{U(s)} = \frac{K_U \cdot c_1 \cdot c_2}{s^3 (L^6) + s^2 (2L^4 c_2 + L^4 c_3 + 2L^4 c_1) + s (3L^2 c_1 c_2 + 2L^2 c_1 c_3 + L^2 c_2 c_3) + c_1 c_2 c_3}$$

Sacando factor común L^6 , se obtiene:

$$\frac{h_3(s)}{U(s)} = \frac{K_U \cdot c_1 \cdot c_2}{L^6} \cdot \frac{1}{\left[s^3 + \frac{s^2 (2L^4 c_2 + L^4 c_3 + 2L^4 c_1)}{(L^6)} + \frac{s (3L^2 c_1 c_2 + 2L^2 c_1 c_3 + L^2 c_2 c_3)}{(L^6)} + \frac{c_1 c_2 c_3}{(L^6)} \right]}$$

Las fórmulas de las constantes de linealización de los caudales entre los tanques son:

$$c_1 = \frac{A_{12} \cdot \psi_{12} \cdot g}{\sqrt{2g(H_{10} - H_{20})}}$$

$$c_2 = \frac{A_{23} \cdot \psi_{23} \cdot g}{\sqrt{2g(H_{20} - H_{30})}}$$

$$c_3 = \frac{K_V \cdot A_3 \cdot g}{\sqrt{2g(H_{30} - 0)}}$$

En donde:

c_1 = Constante de linealización del caudal entre el primer y segundo tanque

c_2 = Constante de linealización del caudal entre el segundo y tercer tanque

c_3 = Constante de linealización del caudal de salida del tercer tanque

A_{12} = Área de la sección transversal de la válvula entre el primer y segundo tanque

A_{23} = Área de la sección transversal de la válvula entre el segundo y tercer tanque

A_3 = Área de la sección transversal de la válvula de salida del tercer tanque

ψ_{12} = Factor de fricción de la válvula entre el primer y segundo tanque

ψ_{23} = Factor de fricción de la válvula entre el segundo y tercer tanque

K_V = Factor de fricción de la válvula de salida del tercer tanque

g = Aceleración de la gravedad

H_{10} = Altura de la columna de agua del primer tanque en el punto de operación

H_{20} = Altura de la columna de agua del segundo tanque en el punto de operación

H_{30} = Altura de la columna de agua del tercer tanque en el punto de operación

Para obtener los valores de las constantes de linealización, se necesitan los valores de los coeficientes de fricción de las válvulas entre los tanques:

$$\psi_{12} = \frac{Q_{12}}{A_{12} \cdot \sqrt{2g(H_{10} - H_{20})}}$$

$$\psi_{23} = \frac{Q_{23}}{A_{23} \cdot \sqrt{2g(H_{20} - H_{30})}}$$

$$K_V = \frac{Q_3}{A_3 \cdot \sqrt{2g(H_{30} - 0)}}$$

En donde:

Q_{12} = Caudal entre el primer y segundo tanque

Q_{23} = Caudal entre el segundo y tercer tanque

Q_3 = Caudal de salida del tercer tanque

Entonces se realizó el siguiente procedimiento:

Se hizo trabajar a la planta en 6 diferentes puntos de operación: 3.165[V]_{DC}, 3.175[V]_{DC}, 3.18[V]_{DC}, 3.185[V]_{DC}, 3.2[V]_{DC} y 3.215[V]_{DC}, y se tomaron datos para establecer la altura de la columna de agua de cada tanque en cada uno de dichos puntos de operación.

Se calculó los valores de los caudales para cada uno de dichos puntos de operación por medio de la fórmula obtenida para este propósito en el Anexo G:

$$Q = (500.502 \cdot U - 1410.41) [cm^3/sec]$$

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

| V_{CFP} [V] _{DC} | Q [cm ³ /sec] |
|--------------------------------|-----------------------------|
| 3.165 | 173.67883 |
| 3.175 | 178.68385 |
| 3.18 | 181.18636 |
| 3.185 | 183.68887 |
| 3.2 | 191.1964 |
| 3.215 | 198.70393 |

Los valores de caudal y de las alturas de las columnas de agua de cada tanque obtenidos en los puntos de operación escogidos, junto con los demás valores conocidos, fueron reemplazados en las fórmulas de los coeficientes de fricción de las válvulas entre los tanques para ser calculados:

| | V_{CFP} [V] _{DC} | | | | | | |
|----------------------|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------------|
| Coeficiente | 3.165 | 3.175 | 3.18 | 3.185 | 3.2 | 3.215 | PROMEDIO |
| PHI-1_2 | 0.58466 | 0.59111 | 0.59768 | 0.60001 | 0.61539 | 0.62949 | 0.60306 |
| PHI-2_3 | 0.71325 | 0.73214 | 0.7321 | 0.73781 | 0.76325 | 0.77615 | 0.74245 |
| K_v | 0.51614 | 0.51590 | 0.51634 | 0.51829 | 0.51881 | 0.52198 | 0.51791 |

Con esto, se obtuvo que:

$$\psi_{12} = 0.60306$$

$$\psi_{23} = 0.74245$$

$$K_v = 0.51791$$

Una vez que se han obtenido los coeficientes de fricción de las válvulas entre los tanques, se pueden calcular los valores de las constantes de linealización.

Recordando la fórmula de c_1 :

$$c_1 = \frac{A_{12} \cdot \psi_{12} \cdot g}{\sqrt{2g(H_{10} - H_{20})}}$$

Reemplazando todos sus valores, se obtiene:

$$c_1 = \frac{2.85023 \cdot 0.60306 \cdot 981}{\sqrt{1962(39.6 - 34.8)}}$$

$$c_1 = \frac{1686.2014}{\sqrt{1962(4.8)}}$$

$$c_1 = 15.78$$

Recordando la fórmula de c_2 :

$$c_2 = \frac{A_{23} \cdot \psi_{23} \cdot g}{\sqrt{2g(H_{20} - H_{30})}}$$

Reemplazando todos sus valores, se obtiene:

$$c_2 = \frac{2.25943 \cdot 0.74245 \cdot 981}{\sqrt{1962(34.8 - 30)}}$$

$$c_2 = \frac{1645.641}{\sqrt{1962(4.8)}}$$

$$c_2 = 15.316$$

Recordando la fórmula de c_3 :

$$c_3 = \frac{K_V \cdot A_3 \cdot g}{\sqrt{2g(H_{30} - 0)}}$$

Reemplazando todos sus valores, se obtiene:

$$c_3 = \frac{0.51791 \cdot 1.425115 \cdot 981}{\sqrt{1962(30 - 0)}}$$

$$c_3 = \frac{724.0578}{242.6108}$$

$$c_3 = 3.05$$

Una vez que se han obtenido las constantes de linealización, se puede calcular la función de transferencia del tercer tanque con respecto al voltaje de entrada de la planta.

Reemplazando los valores obtenidos de las constantes de linealización en el numerador de la función de transferencia, se obtiene:

$$\frac{h_3(s)}{U(s)} = \frac{500.502 \cdot 15.78 \cdot 15.316}{(15)^6} \cdot \frac{1}{\left[s^3 + \frac{s^2(2L^4c_2 + L^4c_3 + 2L^4c_1)}{(L^6)} + \frac{s(3L^2c_1c_2 + 2L^2c_1c_3 + L^2c_2c_3)}{(L^6)} + \frac{c_1c_2c_3}{(L^6)} \right]}$$

$$\frac{h_3(s)}{U(s)} = \frac{0.01061665}{\left[s^3 + \frac{s^2(2L^4c_2 + L^4c_3 + 2L^4c_1)}{(L^6)} + \frac{s(3L^2c_1c_2 + 2L^2c_1c_3 + L^2c_2c_3)}{(L^6)} + \frac{c_1c_2c_3}{(L^6)} \right]}$$

Reemplazando los valores obtenidos de las constantes de linealización en el denominador de la función de transferencia y resolviendo las operaciones matemáticas del mismo, se obtiene:

$$\frac{h_3(s)}{U(s)} = \frac{0.01061665}{\left[s^3 + 0.28992s^2 + 0.01714s + 0.000064655 \right]}$$

Esta es la función de transferencia del tercer tanque con respecto al voltaje de entrada de la planta.

Factorizando el denominador de la misma, ésta queda:

$$\frac{h_3(s)}{U(s)} = \frac{0.01061665}{(s + 0.2096)(s + 0.07625)(s + 0.004045)}$$

Para más información acerca de ecuaciones, fórmulas o valores de constantes cuyo cálculo no se encuentre detallado en este Anexo, refiérase al Proyecto de Graduación "Análisis Comparativo del Funcionamiento de Dos Sistemas de Control Automático de Nivel de Agua en una Planta de Tres Vasos Comunicantes, diseñados aplicando los Métodos de Control de Reubicación de Polos del Modelo Interno y de Lógica Difusa, diseñados e implementados usando MATLAB/SIMULINK", desarrollado por Franklin Illich Kuonquí Gaínza.

ANEXO I. Código de la Función optimPID para MATLAB

```
function [C,fval]=optimPID(G,ctype,idx)
% OPTIMPID Optimal PID tuning based on integral performance criteria
%
% [C,fval]=optimPID(G,ctype,idx) returns the optimal PID parameters based
% on specified controller type and performance criterion.
%
% Inputs:
%
%         G: The plant model as an LTI object
%         ctype: Controller type (1 = P, 2* = PI, 3 = PID)
%         idx: Performance criterion
%             1 - ISE
%             2 - IAE
%             3 - ITSE
%             4* - ITAE
%
% Outputs:
%
%         C: Controller transfer function as an LTI object
%         fval: optimal performance criterion
%
% Example:
%{
G=tf(1,[1 6 11 6 0]);
C1=optimPID(G,3,1); % PID-Control, ISE index
C2=optimPID(G,3,2); % PID-Control, IAE index
C3=optimPID(G,3,3); % PID-Control, ITSE index
C4=optimPID(G,3,4); % PID-Control, ITAE index
K=znpidtuning(G,3); % Ziegler-Nichols stability margin tuning
t=0:0.1:30;
y1=step(feedback(C1*G,1),t);
y2=step(feedback(C2*G,1),t);
y3=step(feedback(C3*G,1),t);
y4=step(feedback(C4*G,1),t);
y=step(feedback(G*(K.kc*(1+tf(1,[K.ti 0])+tf([K.td 0],1))),1),t);
plot(t,y1,t,y2,t,y3,t,y4,t,y,'--','Linewidth',2)
legend('ISE','IAE','ITSE','ITAE','Z-N')
grid
%}
% By Yi Cao at Cranfield University on 8th Feb 2008
%

% Check inputs and outputs
error(nargchk(1,3,nargin));
error(nargoutchk(0,3,nargout));
assert(isa(G,'lti'),'G must be an LTI object.');
```

```
% default setting
if nargin<3
    idx=4;
end
if nargin<2
    ctype=2;
end
% Initial parameters using stability based tuning
[Gm,Pm,Wcg]=margin(G);
pu=2*pi/Wcg;
ku=Gm;
x=ku/2;
```

```

den=1;
if ctype==2
    x=ku/2.2*[1 1.2/pu];
    den=[1 0];
elseif ctype==3
    x=ku*2/pu/1.7*[pu/8 1 2/pu];
    den=[1 0];
end
% closed-loop response of initial tuning to find dt and tend
[y,t]=step(feedback(tf(x,den)*G,1));
% reduce dt by half for possible improvement in response speed
dt=(t(2)-t(1))/2;
% extpnd tend twice to ensure closed-loop stability
t=0:dt:t(end)*2;
% redefine cost function to facilitate optimization
cost = @(x) iecost(x,G,den,t,dt,idx);
opt=optimset('display','off','TolX',1e-9,'TolFun',1e-9,'LargeScale','off');
flag=0;
while ~flag % if flag=0 restart optimization from current solution
    [x,fval,flag]=fminunc(cost,x,opt);
end
% the transfer function of optimal PID controller
C=tf(x,den);

function J=iecost(x,G,den,t,dt,idx)
% control error of step response
e=1-step(feedback(G*tf(x,den),1),t);
% performance calculation
switch idx
case 1 % ISE
    J=e'*e*dt;
case 2 % IAE
    J=sum(abs(e)*dt);
case 3 % ITSE
    J=(t.*e'*dt)*e;
case 4 % ITAE
    J=sum(t'.*abs(e)*dt);
end
end

```

ANEXO J. Licencia de Uso de la Función optimPID para MATLAB

Copyright (c) 2009, Yi Cao
All rights reserved.

Redistribution and use in source and binary forms, with or without modification, are permitted provided that the following conditions are met:

- * Redistributions of source code must retain the above copyright notice, this list of conditions and the following disclaimer.
- * Redistributions in binary form must reproduce the above copyright notice, this list of conditions and the following disclaimer in the documentation and/or other materials provided with the distribution

THIS SOFTWARE IS PROVIDED BY THE COPYRIGHT HOLDERS AND CONTRIBUTORS "AS IS" AND ANY EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE DISCLAIMED. IN NO EVENT SHALL THE COPYRIGHT OWNER OR CONTRIBUTORS BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, INCIDENTAL, SPECIAL, EXEMPLARY, OR CONSEQUENTIAL DAMAGES (INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, PROCUREMENT OF SUBSTITUTE GOODS OR SERVICES; LOSS OF USE, DATA, OR PROFITS; OR BUSINESS INTERRUPTION) HOWEVER CAUSED AND ON ANY THEORY OF LIABILITY, WHETHER IN CONTRACT, STRICT LIABILITY, OR TORT (INCLUDING NEGLIGENCE OR OTHERWISE) ARISING IN ANY WAY OUT OF THE USE OF THIS SOFTWARE, EVEN IF ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGE.

GLOSARIO

Basal

Situado en la base de una formación orgánica o de una construcción.

cFP

Equipo de campo Compact FieldPoint, Controlador Programable de Automatización Industrial de la marca National Instruments.

Ciclo de trabajo (Duty cycle)

Fracción de tiempo durante la cual una señal es positiva o se encuentra en estado activo.

Distribución de Frecuencias

Tabla en la que un conjunto de datos se divide en un número adecuado de clases (categorías), al tiempo que se muestra también el número de unidades pertenecientes a cada clase.

Dominio de la Frecuencia

Descripción del análisis de funciones matemáticas o señales con respecto a la frecuencia.

Dominio del Tiempo

Descripción del análisis de funciones matemáticas o señales con respecto al tiempo.

Histograma

Representación gráfica de una variable en forma de barras, donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados.

Interfaz Gráfica del Usuario

Tipo de medio en el que un usuario puede interactuar con dispositivos electrónicos usando imágenes en lugar de comandos de texto.

Iteración

Acto de repetir un proceso con el fin de alcanzar una meta, objetivo o resultado deseados.

LAN

Red de computadoras que interconecta equipos en un área limitada, utilizando medios de red.

Latencia

Tiempo de retardo entre una entrada inicial y una salida claramente discernible.

localhost

Nombre estándar utilizado para describir al equipo en el cual se está trabajando, y es como un equipo se refiere a sí mismo.

Modelo

Diagrama gráfico de bloques de un sistema.

Offset DC

Voltaje DC que produce el desplazamiento de una señal AC, por lo cual su valor promedio no está centrado alrededor del eje de referencia.

Sección Transversal

Intersección entre un cuerpo y un plano paralelo a la base del cuerpo.

Planta

Equipo, conjunto de partes de una máquina que trabajan juntas, u objeto físico que forma parte de un sistema, que requiera ser controlado y cuyo propósito es realizar una operación particular.

Transductor

Dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra diferente de salida.

Temporizador físico a la conexión

Tipo de relevador cuyos contactos de salida se cierran después de cierto tiempo ajustable, a partir de su energización.

Tiempo de puesta en marcha - Tiempo de servicio

Tiempo que a un dispositivo, al momento de ser energizado, le toma en probar y verificar el estado de sus elementos, para garantizar que trabaje de acuerdo a sus objetivos o especificaciones de diseño.

VPN

Tecnología de red que permite la extensión segura de una red local sobre una red pública o no controlada (como Internet), haciendo posible que una computadora en una red, envíe y reciba datos sobre redes compartidas o públicas, como si fueran redes privadas con todas las funcionalidades, seguridades y políticas de gestión de las mismas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABEL, D.; BOLLIG, A., Rapid Control Prototyping: Methoden und Anwendungen, Erste Auflage, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2006
2. CREUS SOLÉ, ANTONIO, Instrumentación industrial, Quinta edición, Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México, 1995
3. DORF, RICHARD C.; BISHOP, ROBERT H., Sistemas de control moderno, Décima edición, Pearson Educación, S.A., Madrid, 2005
4. NAGRATH, I. J.; GOPAL, M., Control systems engineering, Fourth edition, New Age International (P) Ltd. Publishers, New Delhi, 2006
5. HÖFER, THOMAS, "Vergleich höherer Regelungsverfahren am Beispiel einer Mehrgrößenregelung" (Diplomarbeit, Institut für Mensch-Maschine-Interaktion, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2009)
6. KUONQUÍ, FRANKLIN, "Análisis Comparativo del Funcionamiento de Dos Sistemas de Control Automático de Nivel de Agua en una Planta de Tres Vasos Comunicantes, diseñados aplicando los Métodos de Control de Reubicación de Polos del Modelo Interno y de Lógica Difusa, diseñados e implementados usando MATLAB/SIMULINK" (Informe de Proyecto de Graduación, Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2012)

7. RAZA, VERÓNICA, “Adaptación de la Tecnología de Control Abierto de Procesos (OPC) al Laboratorio de Control Automático de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación (FIEC) para la Administración Remota de sus Plantas de Trabajo” (Informe de Proyecto de Graduación, Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2012)

8. AMÉSTEGUI MORENO, MAURICIO, Apuntes de Control PID, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, 2001
http://jvr33.free.fr/pdf_laser/03_electronique/Control_Pid.pdf
Fecha de consulta: Septiembre 2012

9. PID controller
http://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller
Fecha de consulta: Septiembre 2012

10. Proporcional integral derivativo
http://es.wikipedia.org/wiki/Proporcional_integral_derivativo
Fecha de consulta: Septiembre 2012

11. Sensor
<http://es.wikipedia.org/wiki/Sensor>
Fecha de consulta: Enero 2013

12. Siemens Industry IA/DT/BT Service&Support - Automation Service, Automation Support, Simatic Service, Simatic Support, Technical Support, Technical Consulting

<http://support.automation.siemens.com>

Fecha de consulta: Septiembre 2012

13. Instrucciones de Uso, SINAMICS G110, Documentación de Usuario, Siemens, Edición Abril 2005

14. Instrucciones de Servicio Resumidas, SINAMICS G110, Documentación de Usuario, Siemens, Edición Abril 2004

15. Lista de Parámetros, SINAMICS G110, Documentación de Usuario, Siemens, Edición Noviembre 2004

16. Material de Estudio de la Asignatura "CONTROLES INDUSTRIALES ELÉCTRICOS" (FIEC00273), ESPOL

Autor: MSc. Otto Ismael Alvarado Moreno