

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

DEPARTAMENTO DE ELECTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERIA EN ELECTRONICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN
DEL TITULO EN INGENIERÍA

“ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE CONTROL EN EL ESPACIO
DE ESTADO E IMPLEMENTACION DE SENSORES
VIRTUALES PARA LA ESTACIÓN DE CONTROL DE
PROCESOS DEL CIM 2000 ESPE”

Autora:
MARÍA BELÉN ALDÁS CHIRIBOGA

SANGOLQUI – ECUADOR
2007

CERTIFICACION

Certificamos que el siguiente proyecto de grado titulado “Análisis de técnicas de control en el Espacio de Estado e implementación de Sensores Virtuales para la Estación de Control de Procesos del CIM 2000 ESPE” fue realizado en su totalidad por la Srta. María Belén Aldás Chiriboga, como requerimiento parcial a la obtención del título de INGENIERA ELECTRONICA, bajo la dirección de:

ING. RODOLFO GORDILLO
DIRECTOR

ING. HUGO ORTIZ
CODIRECTOR

RESUMEN

El presente proyecto analiza la técnica de control en el espacio de estado y la simulación de sensores virtuales en el lazo de control de nivel que posee la estación de Control de Procesos del Laboratorio CIM 2000.

Esta técnica de control es poco convencional, pero es muy útil para resolver sistemas que tengan múltiples variables como es el caso de los sistemas SIMO. La simulación de sensores virtuales se realiza a través de la estimación y la realimentación de estados. La estimación se basa en el cálculo de los estados del sistema mediante la entrada y la secuencia de salida del modelo, la salida del estimador se realimenta para obtener los beneficios de un sistema en lazo cerrado.

Para cumplir con este objetivo se realizó el modelamiento del sistema partiendo de su dinámica. Se obtuvo el modelo de la interconexión de dos tanques tomando en cuenta que las variables estimadas debían tener un significado físico. Una vez obtenido el modelo matemático se estableció el diseño de polos en lazo cerrado con el objetivo de mantener un sobreimpulso adecuado y corregir el error en estado estacionario.

En la identificación del sistema se relacionó los valores experimentales medidos y el modelo identificado en espacio de estados. Con todos los datos obtenidos se realizó la simulación del proceso y se desarrolló el algoritmo para los estimadores que reproduce la dinámica discreta del proceso.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la virgen por darme la dicha de cumplir un sueño cuando todo parecía perdido y por ser la guía espiritual que me dio fuerzas cada día.

En segundo lugar pero no menos importante a mis padres por ser los pilares en mi educación, por darme una carrera para mi futuro y por acompañarme en este sueño de ser ingeniera.

A mi madre por sus tantas horas de preocupación y entrega, por tantas madrugadas y desvelos que le provoqué durante todos estos años, a mi padre por su incansable apoyo, les agradezco a los dos por creer en mi.

A mis amigos y compañeros por provocar tantas sonrisas y alegrías y por permitirme formar parte de su mundo, por tantas desveladas que poco a poco van dando frutos.

A mis profesores por brindarme un poco de la sabiduría que ellos poseen, especialmente al Ing. Rodolfo Gordillo quien estuvo presente en el proceso de mi formación académica y no dudo en apoyarme para sacar este proyecto adelante.

Y por último a la persona que me brindó todo su apoyo físico y emocional antes y durante la realización de este proyecto y me tuvo tendida siempre una mano para no dejarme desfallecer, a ti amor Alex, gracias por aguantar todas mis locuras y arranques de stress, gracias por la paciencia y por mantenerte junto a mi.

DEDICATORIA

Dedico mi tesis a mis padres, los quiero con todo mi corazón, este trabajo es por y para ellos, aquí está todo lo que ustedes me brindaron, yo solo les estoy retribuyendo de alguna manera lo que me dieron en un principio.

A ti Mamá, te lo entrego, esta es tu obra, por tu tenacidad, por tu lucha constante junto a mí, por no dejarme caer ni derrotar, por tus preguntas aunque no haya contestado la mayoría, tú más que nadie te lo mereces.

A ti Papa, por guiarme, por conformarte con mirarme a lo lejos, por soportar mis desplantes, por amarme en silencio. Te lo dedico por siempre haber sido mi soporte, porque de ti tome el ejemplo de lo que es ser profesional y por apoyarme desde siempre, solo quiero que sepas que no te defraudé, que aquí estoy y no me arrepiento de lo que escogí, soy feliz siendo ingeniera, la gran persona que soy te lo debo a ti.

Y por último se lo dedico a la vida, a los sueños, a la lucha del día a día, a la fuerza de voluntad y a mí misma.

Solo quiero decirles que poco a poco lo logré.

PRÓLOGO

El objetivo de este proyecto es analizar la técnica de Control en el Espacio de Estado mediante el método de diseño basado en el modelamiento de la dinámica del sistema, así como la realimentación y la estimación de estados.

Todo sistema de control necesita de la presencia de sensores y actuadores para obtener el valor de las variables que lo controlan y tomar decisiones a partir de estas señales, pero muchos sensores pueden ser inaccesibles ya sea por sus elevados costos o por su limitada existencia, razón por la cual se desarrolla la estimación de estados a la que se relaciona con sensores virtuales debido a que permite calcular los estados del sistema directamente con entradas y salidas pasadas.

Los lazos de control de nivel suelen ser los más comunes y simples de estudiar, es por esto que se ha seleccionado la estación de control de procesos del CIM para realizar el este análisis debido a que esta estación posee tres lazos de control como son: flujo, temperatura y nivel. El control de nivel que posee la estación permite realizar la estimación de un sensor de nivel en uno de los reservorios que lo componen y que carece de este dispositivo.

El control en el espacio de estado se desarrolla bajo el estudio de matrices, las cuales guardan dentro de si todas las características del sistema. Adicionalmente no se requiere tener un conocimiento de los estados iniciales generando de esta manera un estudio mucho más sencillo pero muy confiable.

La estimación de estados parte del conocimiento de que es irreal asumir que todos los estados de un sistema pueden ser medidos, por tal motivo, es muy beneficioso determinar dichos estados con la disponibilidad de una medida y de su modelo. Se debe tomar en cuenta que la realimentación de estados obtenidos del estimador se rige por el diseño de la ubicación de polos del sistema.

Este trabajo pretende dar criterios básicos de diseño de control en el espacio de estado y estimación para un lazo de control de nivel, cuyo objetivo general es el de analizar una técnica de control que permita el estudio de sistemas que han sido relegados por la complejidad de sus características. Además se espera que este proyecto sirva de guía para futuros trabajos que realicen la implementación de esta técnica en una planta real.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACION.....	II
RESUMEN.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
DEDICATORIA.....	V
PROLOGO.....	VI
CAPITULO 1.....	1
SENSORES VIRTUALES Y CONTROL EN EL ESPACIO DE ESTADOS.....	1
1.1 Descripción general.....	1
1.2 Control en el espacio de estados.....	2
1.2.1 Introducción.....	2
1.2.2 Ecuaciones del modelo de estado.....	3
1.2.3 Métodos de obtención del modelo de estado.....	5
1.2.4 Controlabilidad.....	8
1.2.5 Observabilidad.....	9
1.2.6 Realimentación de estados.....	9
1.2.7 Estimación de estados.....	11
1.2.8 Diseño de estimadores.....	14
1.2.9 Sistemas con entradas.....	15
1.3 Control en el espacio de estados discreto.....	16
1.3.1 Aproximaciones basadas en el modelo de estados.....	19
1.4 Sensores virtuales.....	19
1.4.1 Introducción.....	19
1.4.2 Relación con sensores existentes en la estación PS-2800.....	20
CAPITULO 2.....	26

ESTACIÓN DE PROCESOS ORIENTADA A LA MANUFACTURA DE FABRICACION POR COMPUTADORA.....	26
2.1 Introducción.....	26
2.2 Estación de control de procesos PS-2800.....	28
2.2.1 Características generales.....	28
2.2.2 Conocimiento del sistema y configuración de la estación.....	29
2.2.2.1 Mecanización.....	29
2.2.2.2 Flujo de materiales.....	32
2.2.2.3 Flujo de información.....	37
 CAPITULO 3.....	 40
MODELAMIENTO DEL SISTEMA Y CONTROLADOR DE ESTADOS.....	40
3.1 Descripción general.....	40
3.2 Criterios de diseño.....	40
3.3 Modelamiento del sistema.....	41
3.3.1 Modelo del sistema.....	42
3.3.2 Matriz de controlabilidad y observabilidad.....	45
3.3.3 Realimentación de estados.....	46
3.3.4 Diseño de estimadores de estado continuo.....	47
3.3.5 Modelo en el espacio de estados discreto.....	48
3.3.6 Aproximaciones del controlador continuo.....	50
 CAPITULO 4.....	 52
IDENTIFICACION DEL SISTEMA.....	52
4.1 Descripción general.....	52
4.2 Conexión total de los sistemas.....	52
4.2.1 Obtención del modelo de la planta.....	53
4.2.2 Obtención de las matrices en Espacio de Estados para el sistema.....	56
4.3 Descripción de funcionalidad del sistema total.....	59
4.3.1 Obtención de las matrices continuas y discretas.....	59

4.3.1.1 Criterios de Diseño.....	59
4.3.2 Implementación del sistema en Simulink.....	63
4.3.3 Implementación del sistema en Labview.....	67
CAPITULO 5.....	72
PRUEBAS Y RESULTADOS DE SIMULACION.....	72
5.1 Ejemplo de un sistema de control en el espacio de estados.....	72
5.2 Implementación en un PLC.....	74
5.3 Prueba de la técnica de control establecida.....	82
5.3.1 Resultados.....	82
5.4 Pruebas de sensores virtuales.....	84
5.4.1 Resultados.....	84
5.5 Prueba de sensores virtuales y control en el espacio de estados en la estación PS-2800.....	86
5.5.1 Resultados.....	86
CAPITULO 6.....	89
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	89
6.1 Conclusiones.....	89
6.2 Recomendaciones.....	91
ANEXO I.....	93
DIAGRAMAS DE LA ESTACION PS-2800.....	93
ANEXO II.....	125
PROGRAMAS EN MATLAB.....	125
ANEXO III.....	128
PROGRAMA DE LABVIEW.....	128
GLOSARIO.....	133
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	142

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO 1

Figura. 1.1. Representación del sistema.....	3
Figura. 1.2. Representación gráfica vectorial del modelo de estado.....	5
Figura. 1.3. Sistema con realimentación de estado.....	10
Figura. 1.4. Diagrama de bloques de la estimación del proceso.....	12
Figura. 1.5. Sistema continuo multivariable.....	17

CAPITULO 2

Figura. 2.1. Distribución de las Estaciones del CIM.....	26
Figura. 2.2. Estación de Control de Procesos.....	28
Figura. 2.3. Diagrama de Conexiones.....	30
Figura. 2.4. Diagrama de distribución del proceso.....	32

CAPITULO 3

Figura. 3.1. Lazo de control de nivel.....	41
Figura. 3.2. Representación física del baño B1.....	42
Figura. 3.3. Sistema con observadores y realimentación.....	47

CAPITULO 4

Figura. 4.1. Diagrama de conexión de los equipos y programas a utilizar.....	52
--	----

Figura. 4.2. Diagrama de Obtención de la Planta.....	53
Figura. 4.3 HMI en Lookout para obtener la planta del sistema.....	54
Figura. 4.4. HMI para la obtención de la función de transferencia de la planta.....	57
Figura. 4.5. HMI en Simulink.....	63
Figura. 4.6. Estimador.....	64
Figura. 4.7. Estimador con función.....	66
Figura. 4.8. HMI en Labview.....	67
Figura. 4.9. Pantalla de Modelo de la Planta.....	68
Figura. 4.10. Pantalla de Sistema Continuo.....	69
Figura. 4.11. Pantalla de Sistema Discreto.....	70
Figura. 4.12. Pantalla de Sensores Virtuales.....	70
Figura. 4.13. Pantalla de Gráficos.....	71

CAPITULO 5

Figura. 5.1. Respuesta al escalón del sistema en lazo cerrado.....	74
Figura. 5.2. Reloj y Secuencia.....	77
Figura. 5.3. Obtención de $U(k)$ y $X_2(k+1)$ para la primera ecuación.....	78
Figura. 5.4. Obtención de $X_1(k+1)$ de la primera ecuación.....	78
Figura. 5.5. Actualización de valores de $X_1(k)$ y $Y(k)$	79
Figura. 5.6. Obtención de $X_1(k+1)$ y $X_2(k+1)$	79
Figura. 5.7. Obtención de $U(k)$ para la cuarta, quinta y sexta ecuación.....	80
Figura. 5.8. Obtención de los valores de $X_1(k+1)$ y $X_2(k+1)$ para la cuarta ecuación.....	80
Figura. 5.9. Obtención de $X_1(k+1)$ y $X_2(k+1)$ en la quinta y sexta ecuación.....	81
Figura. 5.10. Obtención de $X_2(k)$	81
Figura. 5.11. Inicialización.....	82
Figura. 5.12. Respuesta del sistema controlado en Matlab.....	83
Figura. 5.13. Respuestas de la pantalla “Sistema Continuo”.....	84
Figura. 5.14. Respuestas de la pantalla “Sistema Discreto”.....	85
Figura. 5.15. Respuesta del estimador en Matlab.....	86
Figura. 5.16. Respuestas de la pantalla “Sensores Virtuales”.....	87
Figura. 5.17. Respuestas de la pantalla “Gráficos”.....	88

INDICE DE TABLAS

CAPITULO 2

Tabla. 2.1 Definición de Datos.....	38
Tabla. 2.2. Atributos y Relaciones.....	38
Tabla. 2.3. Entradas del PLC.....	39
Tabla. 2.4. Salidas del PLC.....	39

CAPITULO 4

Tabla. 4.1. Registros del modelo.....	54
Tabla. 4.2. Valores para identificar la planta del sistema.....	55

CAPITULO 5

Tabla. 5.1. Tabla de verdad comportamiento del sistema.....	74
Tabla. 5.2. Salidas lógicas.....	76
Tabla. 5.3. Registros del Programa.....	76

CAPITULO 1

SENSORES VIRTUALES Y CONTROL EN EL ESPACIO DE ESTADOS

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

Todo sistema de control requiere de elementos para identificar el estado de las variables y tomar decisiones. Estos elementos son los sensores, los mismos que se encargan de observar el comportamiento de una planta o de un sistema.

Por la gran diversidad de plantas, existen muchos tipos de sensores los cuales se eligen según la aplicación que van a realizar. Pero en muchas ocasiones el sensor adecuado no existe o es excesivamente caro, por lo que es necesario realizar una estimación de la variable a medir. Para superar estos inconvenientes se utilizan sensores virtuales, los mismos que se basan en la utilización de sensores existentes para obtener el valor de otras variables que no pueden ser medidas.

El control en el espacio de estados se aplica a sistemas multivariables, donde se requiere que exista una buena relación entre las variables de entrada y salida del sistema. Los sistemas con relaciones no lineales son ideales para la utilización de este tipo de control debido a que ofrece una solución a comportamientos que no pueden ser aproximados por modelos lineales, además se aplica a sistemas en los que sus parámetros varían en el tiempo a velocidades comparables con la evolución de sus variables. Otra ventaja de este tipo de control se basa en que es aplicable a sistemas de control más complejos, en los que existe un mayor número de variables internas que condicionan las salidas del sistema.

1.2 CONTROL EN EL ESPACIO DE ESTADOS

1.2.1 Introducción

El control en el espacio de estados, también conocido como control moderno, se basa en el estudio de sistemas con mayor complejidad y que requieren una mayor precisión. Se llaman sistemas complejos a aquellos que presentan múltiples entradas y salidas, además que son variantes en el tiempo y pueden ser sistemas lineales o no lineales. Esta teoría de control se basa en el concepto de estado que fue desarrollado en los años 60`s.

Para obtener una idea general de lo que representa el espacio de estados se realizará un breve análisis de sus partes constitutivas.

Estado.- es el conjunto de variables más pequeñas en un sistema dinámico.

Variables de Estado.- son las variables que constituyen el menor conjunto de variables que determinan el estado de un sistema dinámico.

Vector de Estado.- es aquel que determina el estado del sistema, se constituye por el mismo número de variables de estado, las mismas que conforman las componentes del vector de estado.

Espacio de Estados.- está compuesto por el número de variables de estado generando un espacio n dimensional.

Análisis del Espacio de Estados.- está compuesto por tres variables: entradas, salidas y variables de estado. El número de variables de estado que se necesitan para definir la dinámica de un sistema es igual al número de integradores que aparecen en el mismo.

1.2.2 Ecuaciones del modelo de estado

Las ecuaciones del modelo de estado se basan en tres tipos de variables: entrada, salida y de estado.

Las variables de entrada como las variables de estado se encuentran relacionadas, por lo tanto, en un determinado instante, el estado puede recoger toda la información de un sistema. De esta forma se tendrá una relación que involucre la salida, con los estados y la respectiva entrada como se observa en la figura 1.1.

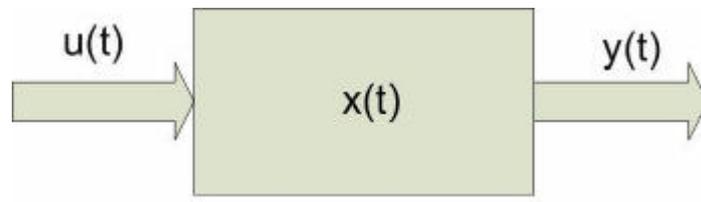


Figura. 1.1. Representación del sistema

$$y(t) = \mathbf{h}(t, x(t), u(t)) \quad (1-1)$$

Donde:

$y(t)$: variable de salida

$u(t)$: variable de entrada

$x(t)$: variables del proceso

(t) : tiempo

Los sistemas dinámicos diferenciales se pueden representar en una ecuación que reúne toda la información del estado

$$\dot{x}(t) = f(t, x(t), u(t)) \quad (1-2)$$

$$y(t) = \mathbf{h}(t, x(t), u(t)) \quad (1-3)$$

Donde a la ecuación (1-2) se la conoce como *ecuación de estado* y a (1-3) como *ecuación de salida*.

En estas ecuaciones se debe tomar en cuenta que la dimensión del vector de estado sea igual al número de condiciones iniciales que se necesitan para resolver la ecuación de estado y que las salidas coincidan con las variables de estado.

Si se linealizan las ecuaciones (1-2) y (1-3) alrededor del estado de operación, se obtiene la siguiente ecuación de estado y salida

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \quad (1-4)$$

$$y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t) \quad (1-5)$$

Donde:

$x(t)$: vector de estado, de dimensión n

$u(t)$: vector de entradas, de dimensión m

$y(t)$: vector de salida, de dimensión p

$A(t)$: matriz de estado, $n \times n$

$B(t)$: matriz de entrada, $n \times m$

$C(t)$: matriz de salida, $p \times n$

$D(t)$: matriz de transición directa, $p \times m$

Los sistemas invariantes en el tiempo se representan de la siguiente forma

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (1-5)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (1-6)$$

En la figura 1.2 se encuentra la representación gráfica del modelo de estado.

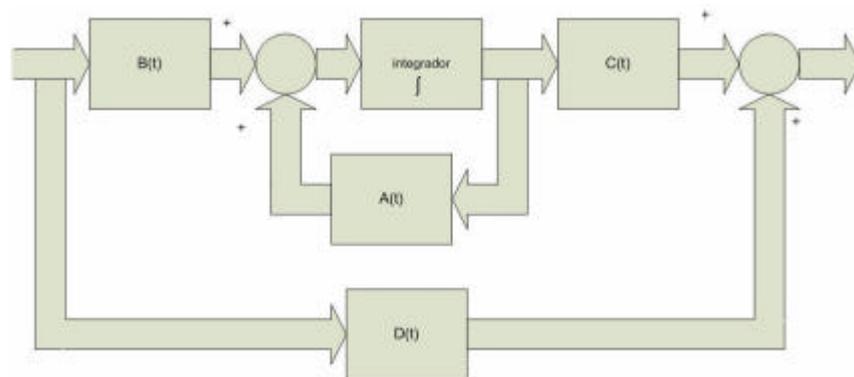


Figura. 1.2. Representación gráfica vectorial del modelo de estado

1.2.3 Métodos de obtención del modelo de estado

Para obtener el modelo de estado de un sistema se utilizan varias técnicas y se obtienen diferentes ecuaciones de estado con cada una de ellas pero con la característica de que todas son equivalentes entre si. [1]

En el presente apartado se estudiarán cuatro métodos que sirven para elegir las variables de estado de un sistema:

- Variables de estado como magnitudes físicas del sistema
- Variables de estado como salida de los integradores del sistema
- Variables de estado de fase
- Variables de estado de Jordan

La primera y la segunda metodología son más genéricas debido a que se utilizan tanto en sistemas lineales como no lineales, mientras que las dos últimas se aplican exclusivamente a sistemas lineales.

VARIABLES DE ESTADO COMO MAGNITUDES FÍSICAS DEL SISTEMA. Como su nombre lo dice, utiliza elementos que acumulan energía de esta forma se asegura que las variables de estado no van a presentar discontinuidades.

Estos elementos pueden acumular energía cinética como es el caso de una bobina, el desplazamiento de una masa, la frecuencia a la que gira un objeto. También se acumula energía potencial como la generada por un condensador, el agua dentro de un depósito hasta una cierta altura o una masa suspendida a una cierta cota.

Para elegir las variables de estado en este tipo de sistemas se debe considerar a aquellas que no presenten variaciones bruscas al momento de darse la transmisión de energía entre el objeto y el medio como puede ser el caso de un condensador, la intensidad de una bobina, el desplazamiento de una masa sometida a inercia y la altura del agua en un depósito.

VARIABLES DE ESTADO COMO SALIDA DE LOS INTEGRADORES DEL SISTEMA. Esta metodología toma ecuaciones diferenciales en forma de integraciones sucesivas para que de esta manera se elijan las variables de estado de salida partiendo de cada una de estas integraciones, logrando así evitar las discontinuidades que podrían presentarse por las entradas.

Para obtener las variables de estado como salida de integradores en sistema monovariantes partimos de la siguiente ecuación genérica

$$(s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0)y = (b_ns^n + \dots + b_1s + b_0)u \quad (1-7)$$

Según este método podemos obtener las siguientes ecuaciones de estado

$$\dot{x}_n = x_{n-1} + b_{n-1}u - a_{n-1}y \quad (1-8)$$

$$x_n = y - b_nu \quad (1-9)$$

Donde (1-9) representa la ecuación de salida del sistema y puede reemplazarse en las ecuaciones de salida de los integradores obteniendo finalmente

$$\dot{x}_j = x_{j-1} + a_{j-1}x_n + (b_{i-1} - a_{i-1}b_n)u \quad (1-10)$$

Variables de estado de fase. A la ecuación genérica (1-7) se la puede reescribir como cociente de dos polinomios

$$y = \frac{b_n s^n + \dots + b_1 s + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} u \quad (1-11)$$

Para obtener la variable de estado se toma la solución de la ecuación diferencial del primer término igualada a u

$$x_1 = \frac{1}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} u \quad (1-12)$$

Y el resto de variables se obtienen por derivación sucesiva

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= x_1 \\ \dot{x}_3 &= x_2 \\ &\dots \\ \dot{x}_n &= x_{n-1} \end{aligned} \quad (1-13)$$

La ecuación de salida se expresa de la siguiente manera

$$y = (b_n s^n + \dots + b_1 s + b_0)x_1 \quad (1-14)$$

Variables de estado de Jordan. Partiendo de (1-11), el método por variables de Jordan se puede realizar de dos maneras:

1. Se supone que todos los polos son simples y se procede a descomponer en fracciones simples

$$y = \left(b_n + \frac{\mathbf{r}_1}{s - \mathbf{I}_1} + \frac{\mathbf{r}_2}{s - \mathbf{I}_2} + \dots + \frac{\mathbf{r}_n}{s - \mathbf{I}_n} \right) u \quad (1-15)$$

La ecuación de salida es

$$y = [\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \dots \quad \mathbf{r}_n]x + b_n u \quad (1-16)$$

2. Si uno de los polos tiene una multiplicidad r , la descomposición se expresa de la siguiente manera

$$y = \left(b_n + \frac{\mathbf{r}_1}{(s - \mathbf{I}_1)^r} + \dots + \frac{\mathbf{r}_{r-1}}{(s - \mathbf{I}_1)^2} + \frac{\mathbf{r}_r}{s - \mathbf{I}_1} + \frac{\mathbf{r}_{r+1}}{s - \mathbf{I}_{r+1}} + \dots + \frac{\mathbf{r}_n}{s - \mathbf{I}_n} \right) u \quad (1-17)$$

La ecuación de salida se representa por

$$y = [\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \dots \quad \mathbf{r}_{r-1} \quad \mathbf{r}_r \quad \mathbf{r}_{r+1} \quad \dots \quad \mathbf{r}_n]x + b_n u \quad (1-18)$$

1.2.4 Controlabilidad

“Un sistema es controlable en el tiempo to si se puede transferir desde cualquier estado inicial $x(to)$ a cualquier otro estado, mediante un vector de control sin restricciones en un intervalo de tiempo finito.” [3]

En sistemas lineales invariantes en el tiempo, la controlabilidad se expresa según el siguiente teorema, partiendo de (1-5) y (1-6):

“Dado el sistema de dimensión n con ecuación de estado:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

Es controlable si y solo si la matriz de controlabilidad Q , definida de la siguiente forma:

$$Q = [B|AB|A^2B|\dots|A^{n-1}B]$$

Es de rango máximo, es decir n .”

La salida queda definida de la siguiente manera

$$Q_c = [CB|CAB|CA^2B|\dots|CA^{n-1}B]$$

1.2.5 Observabilidad

“Se dice que un sistema es observable en el tiempo t_0 si, con el sistema en el estado $x(t_0)$, es posible determinar este estado a partir de la observación de la salida durante un intervalo de tiempo finito.” [3]

Para sistemas lineales e invariantes en el tiempo, partiendo de (1-5) y (1-6), la observabilidad queda definida de la siguiente manera

$$P = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \dots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}$$

1.2.6 Realimentación de estados

En la Figura 1.3 se representa un sistema controlable con realimentación de estado.

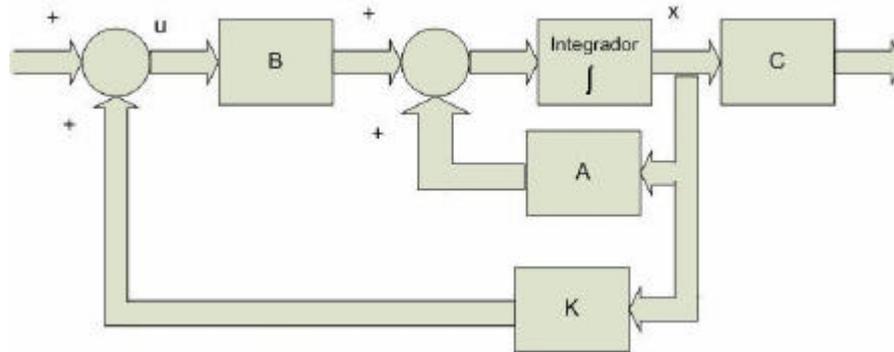


Figura. 1.3. Sistema con realimentación de estado

Partiendo de las ecuaciones (1-5) (1-6) que cumplen con un sistema lineal invariante se va a realizar la realimentación a través de una matriz constante K , por lo que se obtiene las siguientes relaciones

$$u(t) = v(t) + Kx(t) \quad (1-19)$$

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bv(t) + BKx(t) = [A + BK]x(t) + Bv(t) \quad (1-20)$$

Así, la dinámica del sistema se expresa mediante la matriz

$$A_r = A + BK \quad (1-21)$$

Para obtener la realimentación de sistemas multivariables partimos de n variables de estado, m entradas y p salidas. Las entradas del sistema se pueden dividir en dos grupos que son: variables para la realimentación de estado u_r y perturbaciones externas u_p . Por lo tanto la matriz B se descompone para incluir estos dos tipos de variables nuevos.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_r u_r(t) + B_p u_p(t) \quad (1-22)$$

La realimentación del estado se expresa

$$u_r(t) = v(t) + Kx(t) \quad (1-23)$$

La ecuación de realimentación del sistema sería

$$\dot{x}(t) = (A + B_r K)x(t) + B_r v(t) + B_p u_p(t) \quad (1-24)$$

1.2.7 Estimación de estados

La estimación de estados se rige de la siguiente ley de control para lo cual se requiere que todos los estados de la planta sean medidos. [2]

$$u(t) = -Kx(t) \quad (1-25)$$

La realimentación completa de estados no se aplica a todos los sistemas, por ejemplo, para implementar el diseño de asignación de polos, debido a que los estados no pueden ser medidos y en este caso deberían ser estimados utilizando la ecuación (1-25).

Supongamos que se tiene un sistema análogo de una sola entrada, una sola salida, descrito de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (1-26)$$

Se desea hacer una estimación del estado $x(t)$ de este sistema utilizando el estimador $\hat{x}(t)$.

Para esto, se utiliza toda la información disponible sobre procesos de estimación, tomando en cuenta que todos los parámetros que intervienen en el sistema como son las medidas de la función de entrada $u(t)$, $y(t)$ y los sistemas de matrices A , B y C . Hay que tener presente, que no se conoce $x(t)$ en ningún instante de tiempo y particularmente no se conoce la condición inicial $x(0)$.

En la figura 1.4 se muestra el diagrama de bloques de la estimación del proceso. La estimación de estados también llamado observador se rige por la dinámica de este sistema.

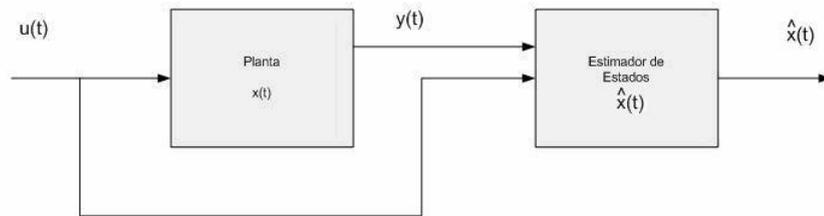


Figura. 1.4 Diagrama de Bloques de la estimación del proceso

La ecuación del estimador puede ser entonces expresada por:

$$\dot{\hat{x}}(t) = F \hat{x}(t) + Hu(t) + Gy(t) \quad (1-27)$$

Se desean cambiar las matrices F , H y G tal que $\hat{x}(t)$ sea el estimador preciso de $x(t)$.

Entonces, en el sistema de control, el estimador de estados $\hat{x}(t)$ se usa para generar las señales de realimentación, teniendo en cuenta que esta que la señal de realimentación es $u(t) = -K \hat{x}(t)$.

La especificación que se utilizara para la estimación de estados surge de un criterio razonable donde la función de transferencia de la entrada $u(t)$ para la estimación de estados $\hat{x}_i(t)$ debe ser igual a la función de transferencia de $u(t)$ del estado $x_i(t)$ de cada estado, esto es:

$$\frac{\hat{x}_i(s)}{U(s)} = \frac{x_i(s)}{U(s)} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1-28)$$

Ahora se desarrolla las ecuaciones para F , H y G que satisfagan la ecuación (1-28).

Las matrices del estimador de estados están dadas por

$$\begin{aligned} F &= A - GC \\ H &= B \end{aligned} \tag{1-29}$$

G usualmente se cambia para conseguir una respuesta aceptable al transiente o una respuesta aceptable de frecuencia para el estimador de estados.

Se tiene la derivada de las ecuaciones del estimador de estados de (1-27) y (1-29) donde G esta determinado

$$\dot{\hat{x}} = (A - GC)\hat{x}(t) + Bu(t) + Gy(t) \tag{1-30}$$

Este es un valor a considerar en los errores que se producen en el proceso de estimación.

Definimos el vector error $e(t)$ como

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \tag{1-31}$$

o

$$\begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \\ \vdots \\ e_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \\ \vdots \\ \hat{x}_n(t) \end{bmatrix} \tag{1-32}$$

Los errores en la estimación de estados tienen la misma dinámica que la ecuación de estimación de estados, lo cual es

$$|sI - A + GC| = 0 \tag{1-33}$$

La ganancia del vector G normalmente se cambia para conseguir la dinámica del estimador más rápidamente en los sistemas, por regla general, a menudo los estados hacen las estimador dos o cuatro veces rápidos que los sistemas.

El proceso de derivación es matemáticamente correcto pero tiene algunos defectos con respecto a la aplicación de los sistemas físicos. De acuerdo a la derivación, si se cambia el estimador para ser estable, los errores en estimación decrecerán a cero con la dinámica dada en (1-33). Entonces se tendrá una estimación perfecta.

Cuando se usan las salidas de sensores para la realimentación de señales, éstas señales tienen una precisión razonable excepto en el caso que el sensor falle. Si usamos el estimador para generar la realimentación de señal, se debe tener cuidado para asegurar que el efecto del estimador sea bien entendido para todas las condiciones posibles de la operación del sistema.

1.2.8 Diseño de estimadores

Se considera el diseño de un estimador de estados. La ecuación del estimador esta dada por: [2]

$$\dot{\hat{x}} = (A - GC)\hat{x}(t) + Bu(t) + Gy(t)$$

La ecuación característica del estimador es entonces

$$(1-33) \quad |sI - A + GC| = 0$$

Un método para el diseño de estimadores de estados es para hacer el estimador dos o cuatro veces más rápidamente que el sistema de lazo cerrado. De ahí se cambia la ecuación característica del estimador, denotado por $\mathbf{a}_c(s)$, que refleja la velocidad deseada de respuesta

$$\mathbf{a}_c(s) = s^n + \mathbf{a}_{n-1}s^{n-1} + \dots + \mathbf{a}_1s + \mathbf{a}_0 = 0 \quad (1-34)$$

Entonces la matriz de ganancia G es calculado para satisfacer

$$|sI - A + GC| = \mathbf{a}_c(s) \quad (1-35)$$

Las ecuaciones del controlador de estimador de estados son

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} &= (A - GC - BK)\hat{x}(t) + Gy(t) \\ u(t) &= -K\hat{x}(t)\end{aligned}\tag{1-36}$$

Donde $y(t)$ es la entrada y $u(t)$ es la salida. Estas ecuaciones son la forma estándar, se puede calcular la función de transferencia, $-G_{ec}(s)$, para el controlador del estimador

$$-G_{ec}(s) = -K[sI - A + GC + BK]^{-1}G\tag{1-37}$$

El desarrollo precedente muestra que el estimador del controlador puede ser considerado como una simple función de transferencia de $-G_{ec}(s)$, donde

$$G_{ec}(s) = -K[sI - A + GC + BK]^{-1}G\tag{1-38}$$

La ecuación característica del sistema de lazo cerrado se expresa como

$$1 + G_{ec}(s)G_p(s) = 0\tag{1-39}$$

1.2.9 Sistemas con entradas

Un sistema regulador no tiene ninguna entrada y el propósito del sistema es devolver todas las variables del estado a los valores de cero cuando los estados han sido perturbados.

Sin embargo, muchos sistemas requieren que la salida del sistema sea una nueva entrada. Para estos casos, deben modificarse las ecuaciones de los sistemas del regulador. Con este propósito se produce a realizar una realimentación.

Para lograr esta realimentación a (1-25) se le agrega la función $r(t)$, de donde se obtiene

$$u(t) = -Kx(t) + K_r r(t) \quad (1-40)$$

Donde K se encuentra ligado directamente con la entrada del sistema $r(t)$, de esta manera se puede establecer que K es el resultado de las diferentes ganancias que posee el sistema, expresado como

$$K = K_a C + K_b \quad (1-41)$$

Una especificación importante para muchos sistemas de control es que la salida puede ser una constante de la entrada con error en estado estacionario igual a cero. En el diseño clásico se logra esto agregando a un compensador PI. Se puede usar el mismo en el diseño de ubicación de polos. Donde, la suma del compensador de PI aumentará el orden del sistema por uno, si la planta era de orden n , en el diseño de este sistema será de orden $n+1$.

1.3 CONTROL EN EL ESPACIO DE ESTADOS DISCRETO

El control en el espacio de estados discreto mantiene las mismas condiciones que los sistemas continuos, pero su estudio se basa en la resolución de los sistemas mediante un diseño analítico por computador.

Un sistema dinámico discreto posee una relación entre las secuencias de entrada y salida, pero tomando en cuenta que para toda secuencia de entrada existe una única secuencia de salida, adicionalmente, que las salidas no dependen de las entradas.

Las ecuaciones de estado para un sistema discreto quedan determinadas por

$$x(k+1) = A(k)x(k) + B(k)u(k) \quad (1-43)$$

$$y(k) = C(k)x(k) + D(k)u(k) \quad (1-44)$$

Para muestrear un sistema discreto se utiliza la relación entre entradas, salidas y variables de estado como se muestra en la figura 1.5.

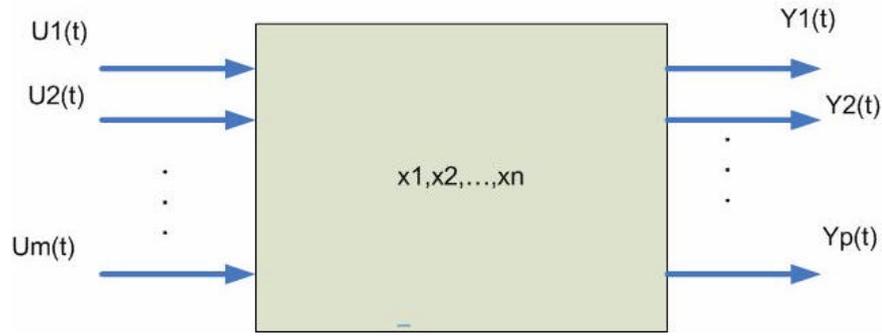


Figura. 1.5. Sistema continuo multivariable

La ecuación de estado se determina por

$$x(t) = \Phi(t - t_0)x(t_0) + \int_{t_0}^t \Phi(t - \tau)Bu(\tau)d\tau \quad (1-45)$$

Donde $\Phi(t)$ es la matriz de transición.

Tomamos a $t_0 = kT$

$$x(t) = \Phi(t - kT)x(kT) + \left[\int_{kT}^t \Phi(t - \tau)Bd\tau \right] u(k) \quad (1-46)$$

Haciendo

$$\Theta(t - kT) = \int_{kT}^t \Phi(t - \tau)Bd\tau \quad (1-47)$$

Por lo que (1-46) se puede escribir

$$x(t) = \Phi(t - kT)x(kT) + \Theta(t - kT)u(k) \quad (1-48)$$

Para un instante de muestreo $t = (k+1)T$

$$x[(k+1)T] = \Phi(T)x(kT) + \Theta(T)u(k) \quad (1-49)$$

Donde la matriz del sistema equivalente discreto es

$$A_{eq} = \Phi(T) = e^{AT} = \sum_{i=0}^{\infty} A^i \frac{T^i}{i!} \quad (1-50)$$

La matriz de entrada es

$$B_{eq} = \Theta(T) = \int_{kT}^{(k+1)T} \Phi[(k+1)T - t] B dt = \int_0^T \Phi(T - I) B dI \quad (1-51)$$

La ecuación de salida para un sistema discreto se determina por

$$y(kT) = Cx(kT) + Du(k) \quad (1-52)$$

Diseño de la ley de control. Consideremos el sistema de espacio de estados:

$$x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma u(k) \quad (1-53)$$

$$y(k) = Hx(k)$$

Los polos en lazo abierto son

$$\det(zI - \Phi) = 0 \quad (1-54)$$

Definimos las ecuaciones características con la localización deseada de polos

$$\mathbf{a}_c(z) = z^n + \mathbf{a}_1 z^{n-1} + \dots + \mathbf{a}_{n-1} z + \mathbf{a}_n = 0 \quad (1-55)$$

Resolviendo, el determinante se expresa de la siguiente manera

$$\det(zI - (\Phi - \Gamma K)) = \mathbf{a}_c(z) \quad (1-56)$$

Donde

$$C = [\Phi \quad \Phi\Gamma \quad \dots \quad \Phi^{n-1}\Gamma] \quad (1-57)$$

$$\det(C) \neq 0 \quad (1-58)$$

1.3.1 Aproximaciones basadas en el modelo de estados

Partiendo de (1-40) se puede colocar los polos del sistema de lazo cerrado arbitrariamente si el sistema es controlable. Este puede ser implementado en forma digital muestreando los estados y llevando las señales de control constantes sobre los intervalos de muestreo. Si el periodo de muestreo se incrementa, entonces el comportamiento del sistema de lazo cerrado empieza a deteriorarse. Esto es posible si se modifica el controlador para mejorar el desarrollo del sistema de lazo cerrado.

Para esto se utilizan las siguientes ecuaciones: [4]

$$\tilde{K}_r = (I - KBh/2)K_r \quad (1-59)$$

$$\tilde{L} = L(I + (A - BL)h/2) \quad (1-60)$$

$$\tilde{M} = (I - LBh/2)M \quad (1-61)$$

1.4 SENSORES VIRTUALES

1.4.1 Introducción

Los sensores virtuales (SV) proveen un respaldo realizado por medio de software para el caso en que los sensores reales no estén disponibles, con lo cual se puede llegar a reducir considerablemente las pérdidas causadas por la carencia momentánea de los sensores reales. Los SV pueden usarse también para estimar variables que no son medidas por diversas causas.

Se propone la estimación de una variable de proceso, (virtual), partiendo de la información en tiempo real (o histórica) de variables relacionadas con el proceso, susceptible de influir sobre la variable virtual.

Conocida la dependencia entre variables de un proceso, su relación puede expresarse como:

$$V_1 = f(V_2, V_3, \dots, V_n) \quad (1-62)$$

Donde V_1 es el consecuente, (variable de salida a determinar o variable virtual) y V_2, V_3, \dots, V_n , son los antecedentes o variables de entrada susceptibles de medición o acceso. La utilización de SV se basa en el modelo de estimación de estados, logrando relacionarnos con el diseño de control moderno.

1.4.2 Relación con sensores existentes en la estación PS-2800

Dentro de los baños que conforman la Estación de Control de Procesos encontramos principalmente los siguientes sensores para realizar sus respectivos lazos de control:

- Sensores de nivel
- Sensores de temperatura
- Sensores de caudal
- Sensores de flujo
- Sensores de presión

Los mismos que serán el eje fundamental de nuestro estudio, debido a que tomando como entrada a cualquiera de éstos se puede obtener el resto de variables antes mencionadas.

Medida de Presión en un tanque. La presión se define como la fuerza sobre unidad de área o de superficie, se expresa en unidades como Pascales (Pa), bar, atmósferas, etc.

$$P = \frac{Fn}{S} \quad (1-60)$$

La fuerza que ejerce un fluido en equilibrio sobre un cuerpo sumergido en cualquier punto es perpendicular a la superficie del cuerpo. La presión es una magnitud escalar, puede medirse en valores absolutos o diferenciales.

Existen diversos tipos de presiones según la ubicación donde sean medidas como son:

- La presión absoluta de un fluido se mide en relación al cero absoluto de presión.
- La presión atmosférica es aquella que se ejerce por la atmósfera terrestre medida mediante un barómetro.
- La presión relativa se obtiene de la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica.
- El vacío esta determinado por la diferencia de presiones entre la presión atmosférica y la presión absoluta.

Medida del caudal de un fluido en un tanque. El caudal es la cantidad de fluido que pasa por determinado elemento en la unidad de tiempo. Se expresa en unidad de volumen para unidad de tiempo.

Se tiene una sección con un área A , la misma que se encuentra atravesada por un fluido que mantiene una velocidad uniforme v , si esta velocidad forma con la perpendicular a la superficie A un ángulo θ , entonces el flujo se calcula de la siguiente manera

$$f = A * v * \cos \theta \quad (1-63)$$

Si se produjera el caso en que el flujo es perpendicular al área A ($\theta = 0$ y $\cos \theta = 1$) entonces el flujo se obtendría:

$$f = A * v \quad (1-64)$$

Si la velocidad del fluido no es uniforme o si el área no es plana, el flujo debe calcularse por medio de una integral:

$$f = \iint_S v * dS \quad (1-65)$$

siendo dS es el vector superficie, que se definido por

$$dS = n dA \quad (1-66)$$

donde n es el vector unitario normal a la superficie y dA es un elemento diferencial de área.

Si se tiene una superficie S que encierra un volumen V , el teorema de la divergencia establece que el flujo a través de la superficie es la integral de la divergencia de la velocidad \mathbf{v} en ese volumen:

$$\iint_S \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S} = \iiint_V (\nabla \cdot \mathbf{v}) dV \quad (1-67)$$

Medida de nivel de un fluido en un tanque. Una de los procedimientos más utilizados para realizar la medida del nivel de un depósito, es medir la presión hidrostática en la parte inferior del mismo, pero también se puede obtener este valor midiendo la altura de un líquido sobre una línea de referencia o mediante el desplazamiento producido por un flotador que se encuentre sumergido en el fluido.

Para obtener una medida de nivel a través de la presión hidrostática utilizamos la siguiente ecuación

$$\frac{dP}{dy} = -\mathbf{r}g \quad (1-68)$$

Donde dP es la variación de presión, dy es la variación de altura, \mathbf{r} es la densidad del fluido y g es la gravedad.

Si se toma como conocidos la densidad del fluido y la aceleración de la gravedad nuestra ecuación se puede expresar de la siguiente manera para obtener la altura

$$h = \frac{P}{\mathbf{r} * g} \quad (1-69)$$

Los instrumentos de flotador se basan en flotadores ubicados en contacto con el líquido y conectados hacia el exterior del tanque, este tipo de conexión se puede presentar de forma magnética, directa o hidráulica.

Un flotador conectado magnéticamente se caracteriza porque desliza su medida exteriormente a través de un tubo guía sellado, el mismo que se encuentra ubicado verticalmente dentro del tanque. En la parte interna del tubo se encuentra una pieza

magnética que sigue al flotador en su movimiento y que por medio de un cable y un juego de poleas emite la señal hacia el índice del instrumento que se encuentra en la parte superior del tanque.

Un flotador conectado directamente se encuentra unido por un cable que se desliza por un juego de poleas hacia un índice exterior que se desplaza a través de una escala graduada.

Un flotador acoplado hidráulicamente actúa sobre un fuelle, de esta manera se varía la presión del circuito hidráulico y señala la medida en receptor de nivel correspondiente.

Medida de temperatura de un fluido. La temperatura es la medida de la cantidad de energía de un objeto. Debido a que la temperatura es una medida relativa, sus escalas se basan en puntos de referencia que deben ser usados para medir la temperatura con precisión. Hay tres escalas utilizadas principalmente para medir la temperatura: escala Fahrenheit (°F), la escala Celsius (°C), y la escala Kelvin (K).

Para obtener el valor de la temperatura se pueden utilizar un resistor sensible a los cambios de temperatura conocido como RTD (Resistance Temperatura Detector). Los RTD son resistores de metal con un coeficiente de resistencia a la temperatura relativamente alto. Al presentarse un cambio de temperatura la resistencia del resistor varía, estos cambios de resistencia son los que indican la temperatura.

La relación entre la resistencia y el tipo y dimensiones del resistor se obtiene según la siguiente ecuación

$$R = r \frac{1}{A} \quad (2-70)$$

Donde:

R - Resistencia en ohmios $[\Omega]$

r - Coeficiente de resistencia $[\Omega mm^2 / m]$

- 1- Largo del resistor [m]
- A- Sección de cables [mm²]

Los RTD requieren de una resistencia relativamente alta a cambios de temperatura, punto de fusión superior a la escala de medición, linealidad en la medición, estabilidad en la medición y fortaleza mecánica.

Medida de la densidad de un fluido. La densidad de un cuerpo se define como la relación entre su masa y la unidad de volumen, expresado frecuentemente en g/cm³.

$$r = \frac{m}{Vol} \quad (1-71)$$

Para realizar la medida de la densidad de un fluido contenido en un tanque donde el nivel de dicho fluido es variable, se puede recurrir a la medida de la presión diferencial. Es evidente que el nivel dentro del depósito siempre debe estar por encima de la toma superior para que la medida de densidad sea fiable.

Medida de la masa y volumen de un fluido contenido en un recipiente. Para obtener la masa y volumen de un fluido partimos de la ecuación (1-71). Donde el volumen del fluido dentro de un depósito y conociendo el nivel de dicho fluido, simplemente es función de la geometría del depósito. Por lo tanto, para obtener el volumen de fluido habrá que implementar la función volumen nivel.

En cuanto a la masa de fluido contenida en el tanque, una vez conocido el volumen de fluido y su densidad, se obtiene fácilmente la masa de fluido:

$$m = r * Vol \quad (1-72)$$

Referencias Bibliográficas:

- [1] DOMINGUEZ S., CAMPOY P., SEBASTIAN J.M., JIMENEZ A., *Control en el Espacio de Estado*
- [2] PHILLIPS, Charles L., *Feedback Control Systems*, pág. 418-459
- [3] OGATA, Katsuhiko, *Ingeniería de Control Moderna*, pág. 752-911
- [4] ASTROM K., WITTENMARK B., *Computer-Controlled systems Theory and design*, pág. 301-305

CAPITULO 2

ESTACIÓN DE PROCESOS ORIENTADA A LA MANUFACTURA DE FABRICACIÓN POR COMPUTADORA

2.1 INTRODUCCIÓN

La palabra CIM tiene origen en las siglas del inglés de Manufactura Integrada por Computadora. Tiene como objetivo liberar al hombre del trabajo repetitivo, tedioso y peligroso. Posee diversas estaciones, las mismas que se basan en funcionamientos neumáticos, hidráulicos y eléctricos, todos ellos controlados por una computadora central.

Se encarga de cubrir varios aspectos de la industria, que van desde el diseño, la ingeniería, la manufactura hasta la logística, el almacenamiento y la distribución de los productos.



Figura 2.1. Distribución de las Estaciones del CIM

De donde:

1. CIM, Control Station
2. ST-2000, Automated Storage AS/RS Station
3. FMS-2101, FMS Station
4. FMS-2200, FMS Station
5. PS-2800, Process Control Station
6. VI-2000, Vision Station
7. HYD-2800, Hydraulics Station
8. PN-2800, Pneumatics Station
9. Conveyor

Para establecer un conocimiento claro de lo que el CIM significa se definirá cada una de las palabras que la conforman:

Manufactura.- Es el proceso manual o mecánico de transformar las materias primas con el objetivo de obtener productos terminados que serán entregados a los clientes finales. La manufactura integra todos los sistemas de información conocidos, debido a que abarca todos los pasos que van desde la entrega, el diseño, las especificaciones y las actividades de venta del producto.

Integración.- Este termino se relaciona con la recolección de toda la información, la misma que debe estar disponible oportunamente para todos los que la necesiten, en este punto se incluyen todas las áreas de la empresa, quienes deben emitir la información directamente.

Computadora.- Son las encargadas de toda las actividades de automatización y procesamiento de datos.

Por lo tanto, CIM se define como el uso de la tecnología por medio de computadoras para integrar las actividades de la empresa.

2.2 ESTACIÓN DE CONTROL DE PROCESOS PS-2800

2.2.1 Características generales

El objetivo de la Estación es proporcionar un revestimiento de las piezas metálicas que han sido procesadas en el resto de estaciones del CIM, además se encarga de controlar el flujo, el nivel y la temperatura de los líquidos utilizados en el proceso.



Figura 2.2. Estación de Control de Procesos

Está constituida por un controlador lógico programable, siete baños y un manipulador cartesiano.

El Controlador Lógico Programable, almacena los lazos de control que debe cumplir la estación, realizando la correcta secuencia de cada uno de ellos para el revestimiento de la pieza.

Los siete baños, cada uno de ellos tiene una función específica, que van desde la limpieza, el lavado, inmersión en varios ácidos y por último el secado para obtener la pieza que saldrá lista de esta estación.

Manipulador Cartesiano, tiene la posibilidad de moverse en los tres ejes (X,Y,Z), con la finalidad de tomar y dejar la pieza que se encuentra en el conveyor, además, mueve desde el primero hasta el último baño.

2.2.2 Conocimiento del sistema y configuración de la estación

Para realizar un estudio más profundo de la estación PS-2800 se va a dividir en tres niveles básicos que son:

- Mecanización
- Flujo de Materiales
- Flujo de Información

Cada uno de estos niveles nos proporcionará una mayor familiarización con la estación, su composición, su funcionamiento y sus lazos de control.

2.2.2.1 Mecanización

La mecanización comprende todo el estudio de la constitución física de la estación, en esta etapa vamos a familiarizarnos con el controlador del sistema, los sensores y los planos para conocer su estructura.

En la figura.2.3., se ilustra el diagrama de conexiones general de la estación.

Interruptores y transmisores de los baños. Entre los elementos más importantes que tienen cada uno de los baños son interruptores, transmisores, controladores de nivel y transmisores de temperatura.

El interruptor de nivel que se utiliza de es tipo flotador magnético, debido a que se adapta a diversos montajes, se compone de una parte fija la cual se encuentra sobre la pared del reservorio y una parte móvil que es el flotador en si.

El detector de temperatura es básicamente un resistor RTD, éste posee un coeficiente de resistencia a la temperatura relativamente alto. Este tipo de detector funciona al variar el valor de la resistencia calculando de esta manera la temperatura a la que se encuentra el sistema.

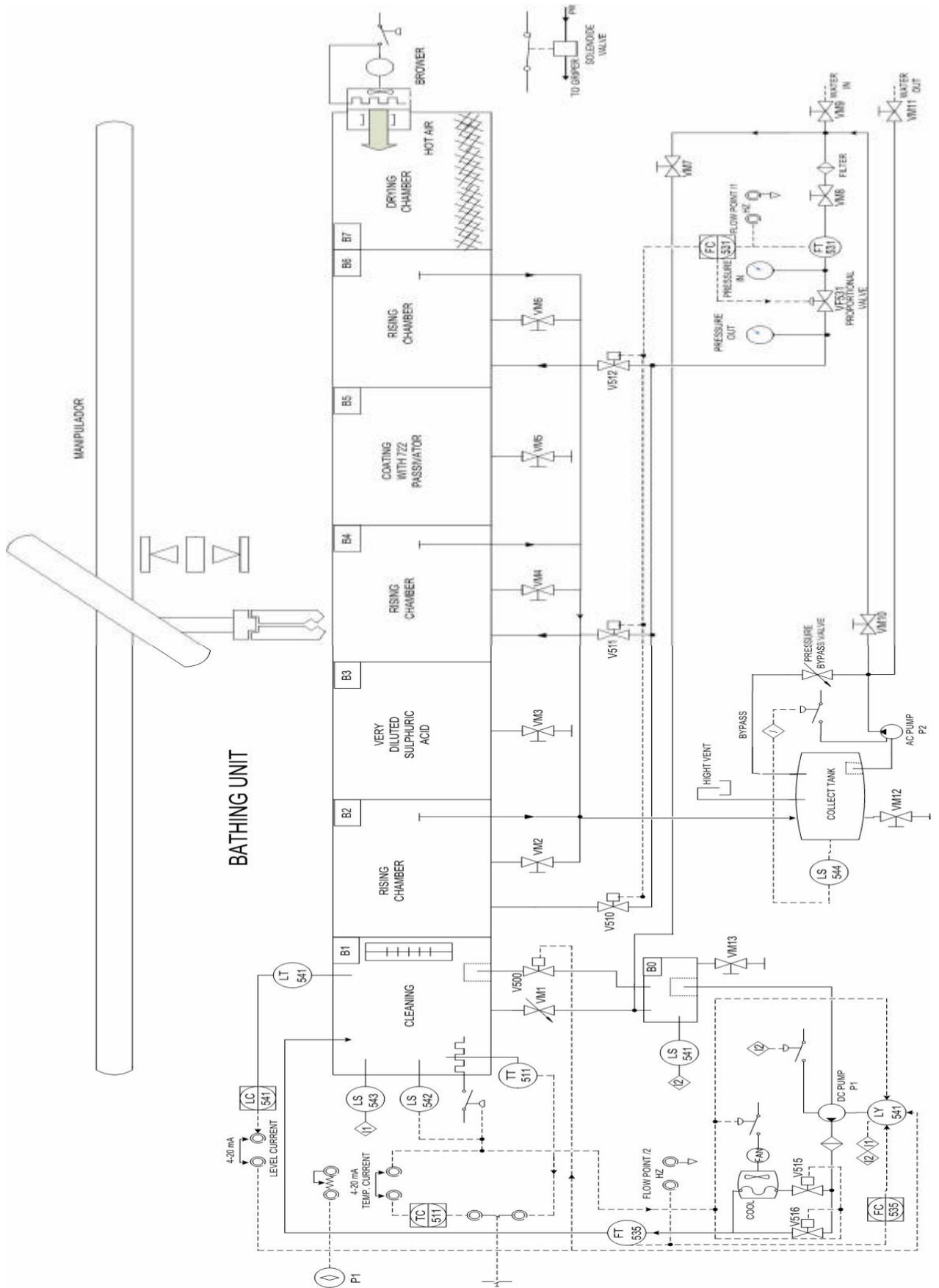


Figura. 2.3. Diagrama de Conexiones

La bomba centrífuga se utiliza para el bombeo de agua entre los reservorios, se opera mediante un motor de corriente continua con un imán permanente el que hace girar al rotor permitiendo que la bomba desagüe la cantidad requerida.

El transmisor de nivel se encarga de la conversión del nivel del líquido a una señal de voltaje que el controlador pueda manejar.

El flujómetro de rueda de paletas se encarga de la medición del caudal, su operación consiste en que el líquido se dirige hacia la turbina donde se conoce que la velocidad de rotación es directamente proporcional al caudal y el número de revoluciones que tenga la turbina es proporcional al total del líquido. La medida se obtiene por pulsos detectados electrónicamente al momento que la turbina corta un rayo de luz infrarroja.

Controlador PLC. El sistema es controlado mediante un PLC, cuya función principal es actuar sobre el sistema ejecutando funciones de control tales como PID, PI y PD. Además de controlar el movimiento del manipulador cartesiano.

Parte electro hidráulica. La parte hidráulica se encarga de proveer de agua a los diferentes baños, la cual esta gobernada por el PLC. La parte electro hidráulica esta constituida por las siguientes partes:

Reservorio B0: recoge el exceso de agua del baño B1, consta de un sensor de nivel, el cual indica la altura del agua del tanque. Este reservorio es el encargado de proveer el agua al baño B1, para lo cual utiliza una bomba de DC, si el agua esta muy caliente, un radiador combinado con un ventilador se encarga de enfriarla, este reservorio puede llenarse de agua a través de la activación manual de dos válvulas.

Reservorio CT: es el reservorio principal del agua corriente utilizada para el enjuague, el cual recibe el exceso de agua de los baños B2, B4 y B6, consta de un sensor de nivel el cual activa la bomba de AC que permite vaciar o llenar el tanque.

Los baños B2, B4 y B6 están conectados a la entrada de agua por medio de una válvula proporcional gobernada por un transmisor de flujo y un controlador de flujo. Para controlar el nivel de presión se ha colocado dos indicadores, uno antes y otro después de la válvula proporcional, además el controlador de flujo es el encargado de habilitar las válvulas solenoides que permiten la entrada del agua a los baños mencionados.

Esquemas de la estación. En la sección de Anexos parte 1 se encontrarán todos los diagramas que componen la estación PS-2800.

2.2.2.2 Flujo de materiales

El tratamiento de las piezas metálicas cumple con siete etapas, que comienza cuando los sensores inductivos montados en el riel detectan la presencia de un pallet, en este momento el manipulador cartesiano se encarga de trasladar la pieza metálica de fase en fase.

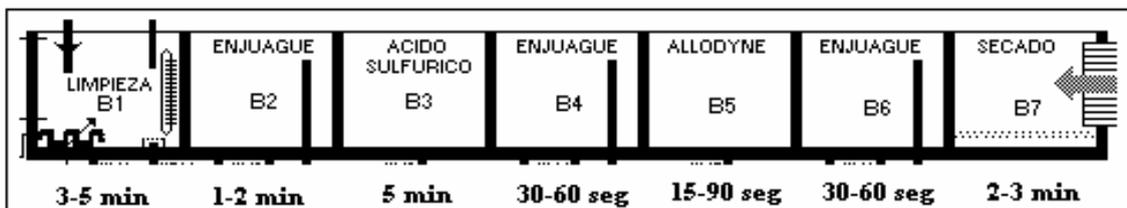


Figura 2.4. Diagrama de distribución del proceso

Explicación del funcionamiento de cada etapa:

1.- Etapa inicial (P1): Llega la pieza metálica sobre el pallet a la estación y es detectada por los sensores inductivos ubicados en el riel, los cuales envían una señal a la estación para que reconozca que hay materia prima, activando al manipulador cartesiano para que se encargue de trasladar la pieza.

2.- Primera etapa (B1): Limpieza de suciedad y pintura, mediante agua jabonosa alcalina a 50°C, 3 a 5 minutos.

El agua fría puede ser ingresada a través de una válvula manual, la cual esta conectada al tanque colector B0.

Se utiliza una electro válvula y una válvula manual para enviar el agua utilizada en el baño al tanque colector B0.

El detergente se lo coloca manualmente en la proporción requerida.

3.- Segunda etapa (B2): Lavado de residuos de suciedad, 1 a 2 minutos.

El agua para este baño pasa regulada por la válvula proporcional y llega hacia la electro válvula; consta de un desagüe que impide que se derrame el líquido y esta conectado al colector además para su desfogue se cuenta con la válvula manual la cual dirige el líquido al tanque colector.

Este baño sirve para eliminar los residuos de jabón del baño anterior.

4.- Tercera etapa (B3): Inmersión en Acido Fosfórico (Matrox 4) para quitar la corrosión de la pieza, 5 minutos.

Se ingresa el ácido manualmente y consta de una válvula manual, para su desfogue.

5.- Cuarta etapa (B4): Se realiza un nuevo lavado de residuos de suciedad, 30 a 60 segundos; consta de un desagüe que impide que se derrame el líquido y esta conectado al colector.

El agua para este baño pasa regulada por la válvula proporcional y llega hacia la electro válvula; consta de un desagüe que impide que se derrame el líquido y esta conectado al colector además para su desfogue se cuenta con la válvula manual la cual dirige el líquido al tanque colector.

Este baño sirve para eliminar los residuos de ácido del baño anterior.

6.- Quinta etapa (B5): Revestimiento de Aluminio con Allodyne la duración del revestimiento depende del tamaño de la pieza y el espesor de revestimiento requerido.

El espesor de revestimiento está indicado por el tinte que toma el aluminio comenzando por el tinte ligeramente dorado del revestimiento delgado, hasta un marrón oscuro, para el revestimiento grueso, 15 a 90 segundos.

Se ingresa el revestimiento de aluminio con allodyne manualmente y consta de una válvula manual, para su desfogue.

7.- Sexta etapa (B6): Lavado con agua corriente, 30 a 60 seg.

El agua para este baño pasa regulada por la válvula proporcional y llega hacia la electro válvula y consta de un desagüe que impide que se derrame el líquido y esta conectado al colector además para su desfogue se cuenta con la válvula manual la cual dirige el líquido al tanque colector.

Este baño sirve para eliminar los residuos de aluminio con allodyne del baño anterior.

8.- Séptima etapa (B7): Secado de la pieza revestida, 2 a 3 minutos.

Consta de un ventilador de aire caliente, trabaja a 230VAC con una frecuencia de 50-60Hz y tiene una potencia de 1400W.

La remoción de la pieza revestida y su traslado para los tratamientos posteriores es nuevamente efectuada por el manipulador el cual se encarga de llevar la pieza tratada nuevamente hacia el pallet.

Métodos de control:

En la estación PS-2800 se encuentran dos técnicas de control, ON/OFF para la temperatura y PID para controlar el nivel y el flujo en los distintos baños. Por este motivo se realizará un breve estudio de cada una de estas técnicas.

Lazo de control de Nivel.- Utilizado para mantener el nivel fijo de agua en el baño de agua jabonosa B1. El suministro de agua para el baño se realiza por medio de la bomba P1, que bombea el agua del reservorio B0. Un transmisor continuo de nivel en el baño envía una señal al controlador de nivel, el cual controla respectivamente el ritmo de rotación de la bomba a la temporización de cierre y abertura de la válvula eléctrica a la salida.

Lazo de control de flujo.- Utilizado para controlar el flujo y la circulación del agua en los baños de enjuague. La circulación se obtiene mediante la bomba de circulación P2, que bombea el agua desde el reservorio hacia el fondo de los reservorio de los enjuague.

La bomba opera en un voltaje constante. El exceso de agua es restituido al reservorio a través de la tubería de rebose. Un transmisor de flujo continuo mide el flujo de agua y envía una señal al controlador de flujo que controla la abertura proporcional y establece el flujo de agua.

Lazo de control de temperatura.- Utilizando para mantener una temperatura constante de 50°C en el baño de limpieza. El calentamiento del baño se realiza mediante un elemento calefactor con potencia de 2KW.

Un transmisor de temperatura envía constantemente una señal al controlador programable, que controla respectivamente el elemento calefactor (ON/OFF) o la activación de la unidad de enfriamiento (ON/OFF). La unidad de enfriamiento esta compuesta por un radiador y un ventilador.

Su activación, se realiza alternamente de acuerdo a la temperatura. El control de temperatura es de tipo ON/OFF, con dos situaciones de salida; CALOR Y FRIO.

Control ON / OFF.- Se utiliza para aquellas señales donde solo se requiere tener un controlador de alto y bajo. Básicamente agrupa a aquellos procesos lentos como es la temperatura. Es una de las primeras técnicas de control utilizadas pero que hasta la actualidad es la que prevalece en la industria.

Control Proporcional.- Se define al control proporcional de la siguiente manera

$$m(t) = m_o \pm k_p e(t) \quad (2-1)$$

Donde:

m_o = bías, valor inicial

$m(t)$ = señal de error

$e(t)$ = error

k_p = ganancia - constante

Este es un controlador inverso, porque al momento que el error aumenta $e(t)$, la señal de error disminuye $m(t)$.

Se debe tomar en cuenta que el error se obtiene de la diferencia del Set Point y el Valor Presente

$$e(t) = SP - PV \quad (2-2)$$

Por lo que si PV aumenta $e(t)$ se vuelve negativo y consecuentemente $m(t)$ disminuye. En el control proporcional el error en estado estacionario es diferente de cero y k_p tiene una respuesta energética al tener una mayor ganancia.

La Banda Proporcional se expresa de la siguiente manera

$$PB = \frac{100}{k_p} \quad (2-3)$$

Por lo que la ecuación (2.1) se cambia

$$m(t) = m_o \pm \frac{100}{PB} e(t) \quad (2-4)$$

Control PI.- Se define por la siguiente ecuación

$$m = m_o + k_p e + \frac{k_p}{Ti} \int e dt \quad (2-5)$$

Donde $\frac{k_p}{Ti} = cte$

Ti = Tiempo de integración, tiempo que se toma el controlador en repetir la acción proporcional.

El control integral consigue eliminar el error en estado estacionario.

Control PID.- Se expresa según la siguiente ecuación

$$m = m_o + k_p e + \frac{k_p}{T_i} \int e dt + k_p T_d \frac{de}{dt} \quad (2-6)$$

Donde $k_p T_d = cte$

La derivada indica la rapidez con la que cambia una señal en el tiempo. Se debe tomar en cuenta que al producirse cambios bruscos de SP se generan impulsos en la parte derivativa del sistema.

Un controlador PID no siempre va a presentar un mejor comportamiento que un controlador PI. Pero para ajustarlo y obtener un mejor sistema se debe disminuir PB para de esta manera aumentar la ganancia.

Se utiliza control PID para aquellos procesos con una constante de tiempo larga como ejemplo el control de nivel en tanques.

2.2.2.3 Flujo de información

Esta etapa hace referencia al tipo de comunicación con que se conecta al resto del sistema y principalmente a los datos que maneja la estación.

Definición de los Datos. Se encarga de hacer una descripción de cada uno de los datos requeridos en el control de la estación.

Tabla. 2.1. Definición de Datos

Presión de aire:	La correcta presión de aire permite que el griper del robot funcione
Presión del agua:	Permite comprobar cual es la presión del agua antes y después de pasar por la válvula proporcional
Nivel de reservorios B0 y B1:	Comprueba el nivel del líquido en los reservorios por medio de sensores de nivel
Nivel en tanque colector:	Comprueba el nivel del líquido presente en el tanque colector
Temperatura del liquido en reservorio B1:	Comprueba que la temperatura en el B1 sea de 50°C
Estado del ventilador del baño B7	Sirve para secar la pieza tratada
Temperatura del ventilador del baño B7:	Determina a que temperatura se encuentra el aire que emana el ventilador
Estado del calentador del baño B1:	Calienta el agua del baño B1
Estado del radiador del baño B1:	Enfría el agua del baño B1
Estado de la bomba de drenaje:	Sirve para eliminar el agua del tanque colector
Estado de la bomba de succión:	Sirve para trasladar el agua del reservorio B0 al baño B1.

Atributos y Relaciones. Se encarga de definir el tipo de dato y la relación que posee con otros elementos de la estación.

Tabla. 2.2. Atributos y Relaciones

ESTACION	ATRIBUTO	RELACION
Presión de aire	Tipo analógico de entrada	Estado de garra o griper
Presión del agua	Tipo analógico de entrada	Control de flujo en la entrada de agua
Nivel del tanque B0	Tipo lógico de lectura	Flujo de agua de B0 al radiador.
Nivel bajo en tanque colector	Tipo lógico de lectura	Flujo de agua de los tanques de enjuague y control de bomba P2
Nivel de baño B1	Tipo analógico de lectura	Control de bomba P1 y flujo de agua B0 al desagüe.
Temperatura del ventilador del baño B7	Tipo lógico de salida	Posición de cilindro dentro del baño B7
Estado del calentador del baño B1	Tipo analógico de salida	Control de temperatura del agua en baño B1
Flujo de agua de baño B1	Tipo analógico de salida	Nivel de agua en colector B0
Desfogue de B1	Tipo lógico de salida	Nivel de agua en B1
Flujo de agua de baño B2, B4 y B6	Tipo lógico de salida	Flujo de entrada de agua principal
Agua jabonosa fría B1 (1)	Tipo lógico de salida	Flujo a través del radiador
Agua jabonosa fría B1 (2)	Tipo lógico de salida	Flujo directo
Flujo de entrada de agua principal	Tipo frecuencia de entrada	Control de flujo en la entrada de agua
Control de flujo en la entrada de agua principal	Tipo analógico de salida, control PID	Flujo de entrada de agua principal

Entradas y Salidas del PLC. Para conocer las tareas que realiza el PLC es necesario familiarizarse con los tipos de datos que maneja en que direcciones se ubican cada uno de ellos y que función desempeña dentro del proceso. Para esto se describe en las tablas 2.3 y 2.4 las entradas y salidas respectivamente.

Tabla. 2.3. Entradas del PLC

ENTRADAS

DATO	DIRECCIÓN	DESCRIPCIÓN
LS2/X-ML	10002	Sensor inductivo, detección de posición del reservorio
PS 501	10023	Baja presión de aire.
LS 541 B0	10024	Transmisión de nivel, mínimo nivel de reservorio B0.
LS 542 B1	10025	Transmisión de nivel, mínimo nivel de reservorio B1.
LS 543 B1	10026	Transmisión de nivel, máximo nivel de reservorio B1.
LS 544 CT	10027	Nivel mínimo en el tanque colector.
C10/FB	10028	Realimentación ventilador.
C11/FB	10029	Calentador, realimentación.
C12/FB	10030	Radiador, realimentación.
C13/FB	10031	Bomba de drenaje, realimentación.
C14/FB	10032	Bomba de succión, realimentación.

Tabla. 2.4. Salidas del PLC

SALIDAS

DATO	DIRECCIÓN	DESCRIPCIÓN
C10	00013	Ventilador
C11	00014	Calentador
C12	00015	Radiador
C13	00016	Bomba de control de drenaje
SOV 500	00025	Reservorio 1, válvula solenoide de descarga
SOV 511	00026	Reservorio 2, válvula solenoide de llenado
SOV 512	00027	Reservorio 4, válvula solenoide de llenado
SOV 515	00029	Reservorio 6, válvula solenoide de control de llenado
C14	00032	Bomba de succión P1

CAPITULO 3

MODELAMIENTO DEL SISTEMA Y CONTROLADOR DE LA ESTACIÓN

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

Partiendo del estudio realizado en los capítulos anteriores se va establecer el modelo de control a utilizar así como la relación que se tendrá entre variables para el desarrollo de los sensores virtuales.

Partiendo de la teoría relacionada al Control en el Espacio de Estado y si se conoce la variable a controlar se podrá establecer la ley de control que se procederá a implementar. Adicionalmente, si se tiene controlada esta variable se obtendrán las estimaciones en el resto de parámetros que rigen al sistema.

3.2 CRITERIOS DE DISEÑO

El control moderno se basa en el estudio de los estados de un sistema. De esta manera no es necesario conocer todos los cambios que ha sufrido una variable, únicamente se necesita saber la entrada y salida de la misma para un instante de tiempo.

El objetivo planteado se basa en controlar el nivel de un líquido que ingresa en el primer baño B1 de la Estación de Control de Procesos del CIM, para ello se utilizaran las medidas generadas por el transmisor de nivel. Una vez obtenida la medida generada por el sensor, ésta ingresa hacia el sistema para ser controlada. A partir de la variable controlada se procederá a realizar el cálculo de los sensores virtuales que representen la sustitución de los sensores existentes en cada baño.

Como dato de entrada se tendrá el valor del nivel, una vez que se tenga controlado el sistema, es decir, que se asemeje al control PID que posee la estación de procesos, se podrá establecer que la ley de control sugerida tiene validez y solo en este caso podremos establecer la relación de sensores virtuales que se podrían instalar.

En el grupo de sensores virtuales que se podrían implementar se encuentran el nivel, presión, flujo, volumen; no todos estos sensores se encuentran físicamente en la estación, por lo que la estimación se realizará con el nivel del líquido en el reservorio B0.

La relación que existe entre el caudal de un líquido y el nivel del mismo proporciona todas las características que se desean controlar para este caso específico y al tener valores acertados y que se asemejen al control clásico nos da la pauta de que se puede sustituir o realizar una redundancia de los sistemas en toda la estación.

3.3 MODELAMIENTO DEL SISTEMA

Como ya se mencionó, el estudio se va a centrar en controlar el nivel de un líquido en el baño B1 y partiendo del nivel controlado se obtendrán los sensores virtuales del nivel del reservorio B0.

El lazo de control de nivel establecido en la Estación PS-2800 se rige mediante el siguiente esquema:

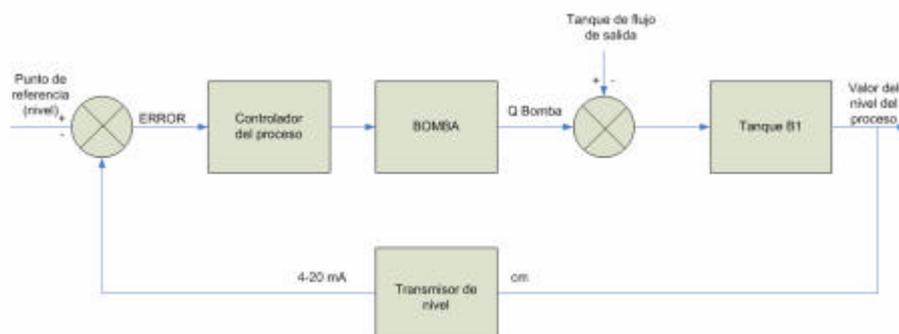


Figura. 3.1. Lazo de control de nivel

Para obtener las diferentes variables del proceso a implementar, se debe seguir varios pasos con los cuales de manera sistemática se irá obteniendo dichas variables.

En este sentido se puede dividir al estudio en cuatro partes:

- Modelo del sistema
- Matriz de controlabilidad y observabilidad
- Realimentación de estados
- Diseño de estimadores de estado continuo
- Modelo en el espacio de estados discreto
- Aproximaciones del controlador discreto

3.3.1 Modelo del sistema

Como se mencionó en el apartado anterior, se partirá del estudio del nivel de un líquido, según como se ilustra en la figura 3.2:

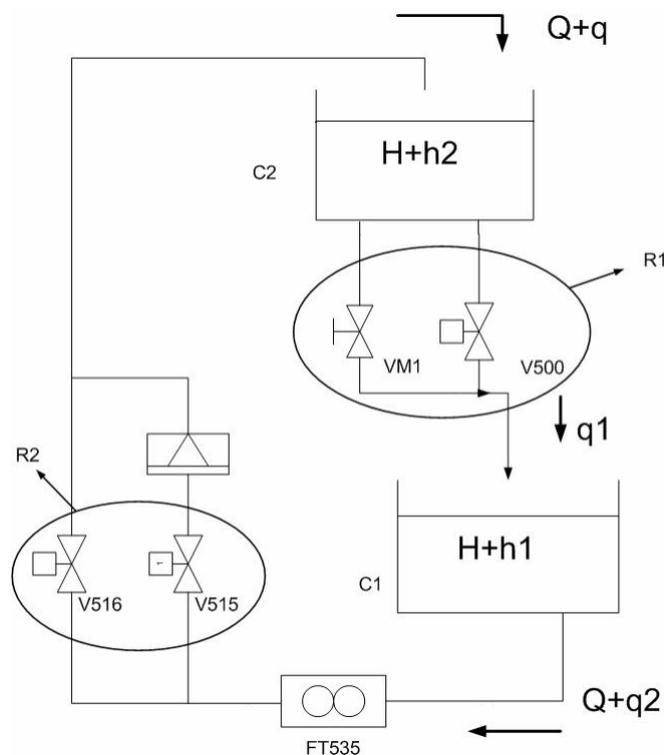


Figura 3.2. Representación física del baño B1

Donde:

- C_1 y C_2 Capacitancias
- R_1 Suma de pérdidas en válvulas (VM1+V500)
- R_2 Suma de pérdidas en válvulas (FT535+V515+V516)
- q_1, q_2 y q Caudales de entrada a los reservorios
- h_1 y h_2 Altura de líquido en reservorios

Las ecuaciones para este sistema de nivel se representan por:

$$C_1 dh_1 = (q_1 - q_2) dt \quad (3-1)$$

$$C_2 dh_2 = (q - q_1) dt$$

$$q_1 = \frac{h_2 - h_1}{R_1} \quad q_2 = \frac{h_1}{R_2}$$

Resolviendo los sistemas de ecuaciones se llega a la siguiente resolución

$$\dot{x}_1 = \left(\frac{1}{C_1 R_1} + \frac{1}{C_1 R_2} \right) x_1 + \frac{1}{C_1 R_1} x_2$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{C_2 R_1} x_1 - \frac{1}{C_2 R_1} x_2 + \frac{1}{C_2} u$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{C_1 R_1} + \frac{1}{C_1 R_2} \right) & \frac{1}{C_1 R_1} \\ \frac{1}{C_2 R_1} & -\frac{1}{C_2 R_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{C_2} \end{bmatrix} [u] \quad (3-2)$$

$$[y] = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Para obtener las ecuaciones en el espacio de estados de este sistema se procederá a encontrar las funciones de transferencia que rigen al sistema:

$$C_1 R_1 R_2 \frac{dh_1}{dt} + (R_1 + R_2)h_1 = R_2 h_2$$

$$C_2 R_1 \frac{dh_2}{dt} + h_2 = R_1 q + h_1$$

$$\frac{H_2(s)}{Q(s)} = \frac{(C_1 R_1^2 R_2) s + (R_1^2 + R_1 R_2)}{(C_1 C_2 R_1^2 R_2) s^2 + (C_2 R_1^2 + C_2 R_1 R_2 + C_1 R_1 R_2) s + R_1} \quad (3-3)$$

$$\frac{H_1(s)}{Q(s)} = \frac{R_1}{(C_1 C_2 R_1^2) s^2 + \left(\frac{C_2 R_1^2}{R_2} + C_2 R_1 + C_1 R_1\right) s + \frac{R_1}{R_2}} \quad (3-4)$$

Generalizando (3-3) y (3-4) se tiene:

$$\frac{H_2(s)}{Q(s)} = \frac{s + 1}{s^2 + s + 1} \quad (3-5)$$

$$\frac{H_1(s)}{Q(s)} = \frac{1}{s^2 + s + 1} \quad (3-6)$$

Las ecuaciones en el espacio de estados para (3-5) que corresponde el sistema en el baño B1 son:

$$A = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \quad 1]$$

$$D = [0] \quad (3-7)$$

3.3.2 Matriz de controlabilidad y observabilidad

En esta sección se analizará si el sistema a desarrollarse es controlable y observable, adicionalmente se obtendrán los valores propios correspondientes.

La matriz controlable se expresa por:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

La misma que nos indica que el sistema es controlable ya que es de dimensión n .

La matriz observable se expresa por:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

La misma que nos indica que el sistema es observable.

La matriz canónica controlable se obtiene a partir de la función de transferencia indicada en (3-5), por lo que se expresa de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) &= [0 \quad -1]x(t) \end{aligned} \quad (3-10)$$

La matriz canónica observable se define por

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) &= [0 \quad 1]x(t) \end{aligned} \quad (3-11)$$

Como siguiente paso se obtendrá los valores propios del sistema de la siguiente manera

$$|II - A| = 0$$

$$\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = 0$$

$$\begin{bmatrix} I + 1 & 1 \\ -1 & I \end{bmatrix} = 0$$

$$I^2 + I + 1 = 0$$

$$I_1 = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i$$

$$I_2 = -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}i \tag{3-12}$$

3.3.3 Realimentación de estados

En esta sección podemos se analizará los estimadores del sistema y la realimentación de estados.

Para el diseño de observadores de estado utilizaremos la fórmula de Ackermann.

$$ke = f(A) \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Como el sistema es controlable se puede tomar polos en cualquier punto del plano, para el caso se tomará en $[1 \ -1]$, por lo que la realimentación se regirá bajo los siguientes valores:

$$ke = [-1 \ -2] \tag{3-13}$$

Para obtener el calor de H tomamos como referencia a una matriz F que se cumple para todo el sistema:

$$F = \begin{bmatrix} 0 & -2 \\ 1 & -2 \end{bmatrix}$$

Por lo que:

$$F=A-HC$$

$$A - HC = \begin{bmatrix} -h_1 & -1-h_1 \\ 1-h_2 & -1+h_2 \end{bmatrix} \quad (3-15)$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

Las ecuaciones para el sistema son:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} r(t) + \begin{bmatrix} -1 & -2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tilde{x}(t) \quad (3-17)$$

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \begin{bmatrix} -3 & -4 \\ 2 & 1 \end{bmatrix} \tilde{x}(t) + \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} r(t) \quad (3-18)$$

3.3.5 Modelo en el espacio de estados discreto

En esta sección se llevara el sistema definido en un estado continuo a un estado discreto.

Las ecuaciones en el espacio de estados discreto para (3-7) con un tiempo de muestreo $T=0,1s$ son:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0,9 & -0,09 \\ 0,09 & 0,9 \end{bmatrix}$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0,09 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$H = [1 \quad 1]$$

$$D = [0] \quad (3-19)$$

Para la realimentación de estados se tomará como condiciones iniciales las indicadas a continuación, con el objetivo de determinar los polos en lazo cerrado:

$$z = 0.5$$

$$w_n = 2 \text{ rad} / s$$

Mediante la ecuación de obtención de polos en un sistema continuo, determinamos los mismos de la siguiente manera:

$$s_{cc} = -z w_n \pm j w_n \sqrt{1 - z^2}$$

$$s_{cc} = -1 \pm j1,73$$

Por lo que los polos para este sistema con un tiempo de muestreo $T=0,1s$ se encuentran en:

$$z_{cl} = e^{s_{cc}T}$$

$$z_{cl} = 0,89 \pm j0,16$$

Los valores de K los obtenemos resolviendo la siguiente igualdad

$$\det(zI - (\Phi - \Gamma K)) = a_c(z)$$

Para lo cual

$$a_c(z) = (z - 0,89)^2 + (0,16)^2$$

$$a_c(z) = z^2 - 1,78z + 0,82 \quad (3-20)$$

$$\begin{bmatrix} z - 0,9 + 0,09K_1 & 0,09 + 0,09K_2 \\ -0,09 & z - 0,9 \end{bmatrix} \quad (3-21)$$

Por lo tanto obtenemos

$$K = [-10,78 \quad 93,48] \quad (3-22)$$

El diseño del estimador discreto se rige por la siguiente ecuación:

$$\dot{\tilde{x}}(k+1) = \Phi \tilde{x}(k) + \Gamma u(k) + L(y(k) - H\tilde{x}(k))$$

Para obtener el valor de L realizamos el siguiente procedimiento

$$\det(zI - (\Phi - LH)) = \mathbf{a}_c(z)$$

$$\begin{bmatrix} z - 0,9 + L_1 & 0,09 + L_1 \\ -0,09 + L_2 & z - 0,9 + L_2 \end{bmatrix} \quad (3-23)$$

$$L = \begin{bmatrix} -0,28 \\ 0,3 \end{bmatrix} \quad (3-22)$$

Por lo tanto, la ecuación del estimador se expresa de la siguiente manera:

$$\dot{\tilde{x}}(k+1) = \begin{bmatrix} 0,62 & -0,37 \\ 0,21 & 0,6 \end{bmatrix} \tilde{x}(k) + \begin{bmatrix} 0,09 \\ 0 \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} -0,28 \\ 0,3 \end{bmatrix} y(k) \quad (3-24)$$

3.3.6 Aproximaciones del controlador continuo

En esta sección se utiliza la técnica de aproximaciones debido a que genera una respuesta mucho más cercana a la obtenida con el controlador.

Las ecuaciones para la obtención de la aproximación del controlador establecen utilizar un periodo de muestreo h , el mismo que será el valor de 0,5.

$$\tilde{L} = L(I + (A - BL)h/2)$$

$$L = K \text{ continuo}$$

$$L = [-1 \quad -2]$$

$$\tilde{L} = [-2 \quad -2,5h] \tag{3-25}$$

$$\tilde{L} = [-2 \quad -1,25]$$

$$\tilde{M} = (I - LBh/2)M$$

$$M=1$$

$$\tilde{M} = 1 + 0,5h \tag{3-26}$$

$$\tilde{M} = 1,25$$

CAPITULO 4

IDENTIFICACION DEL SISTEMA

4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

En este capítulo se realiza una descripción de todos los elementos que componen al sistema y el procedimiento llevado a cabo para obtener los valores experimentales que rigen a la estación.

4.2 CONEXIÓN TOTAL DE LOS SISTEMAS

Para el desarrollo de la técnica de control se utilizaron los elementos y programas mostrados en la figura 4.1.

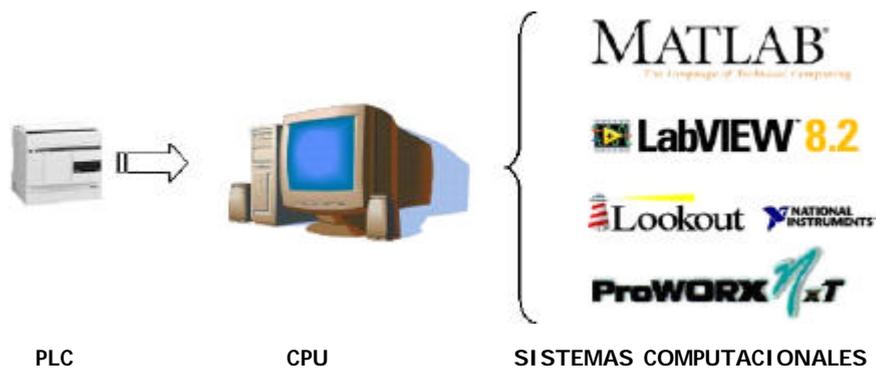


Figura. 4.1. Diagrama de conexión de los equipos y programas a utilizar

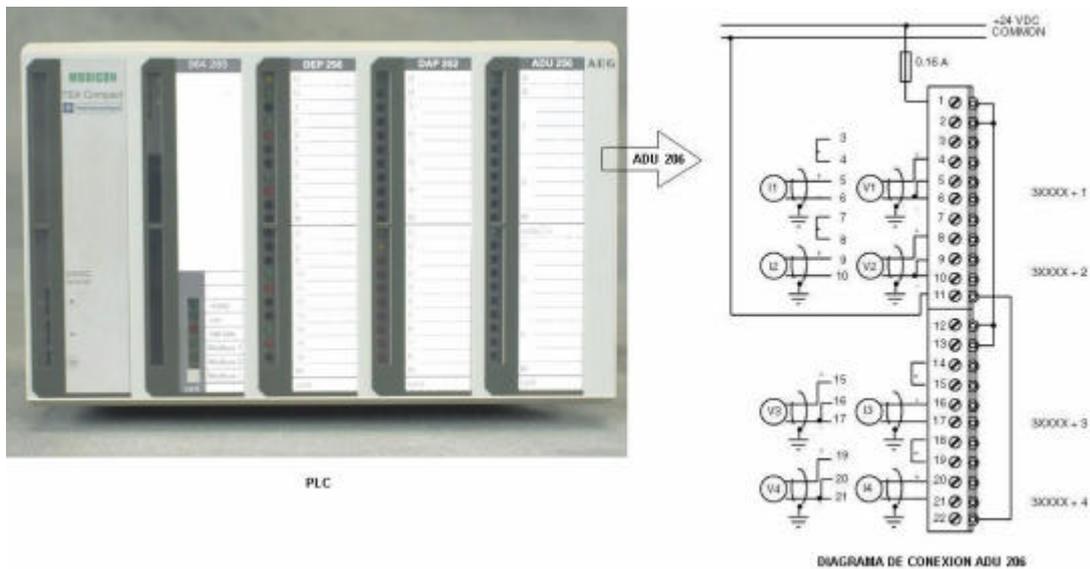
Las operaciones concernientes al sistema a implementar se realizaron en softwares de programación conocidos como son Simulink de Matlab, Lookout y Labview.

Para la implementación del sistema se debe conocer el modelo real de la planta y las matrices en espacio de estados.

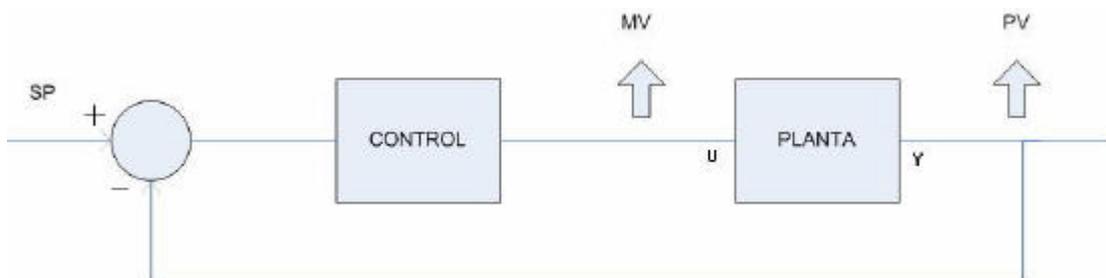
4.2.1 Obtención del modelo de la planta

Se procedió a encontrar la planta del sistema. Para esto se utilizó un programa hecho en Lookout donde se obtuvo los valores de SP, MV y PV que posteriormente se exportaron a Labview para obtener la función de transferencia de la planta.

El equipo utilizado para la identificación del sistema se ilustra en la figura 4.2.



(a)



(b)

Figura. 4.2. Diagrama de obtención de la Planta

A partir de la secuencia de programación establecida en el PLC de la estación PS-2800 y mediante la configuración indicada en la figura 4.2, se procedió a tomar los datos experimentales de la planta con el HMI generado en Lookout como se muestra en la figura 4.3.

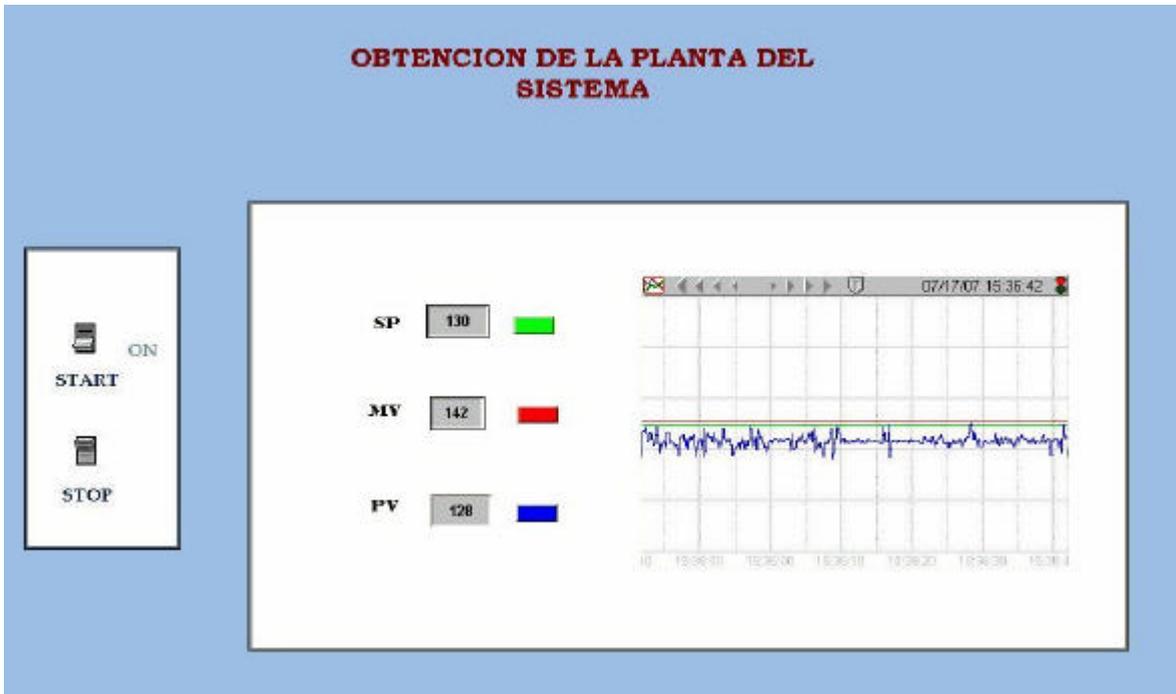


Figura. 4.3. HMI en Lookout para obtener la planta del sistema

Tabla. 4.1. Registros del Modelo

REGISTRO	DESCRIPCION
40600	Valor PV
40602	Valor MV
40601	Valor SP
00050	Prende PLC
00051	Apaga PLC

Los valores obtenidos mediante esta simulación se pueden observar en la Tabla 4.2 donde se expresa el tiempo, el MV y el PV que son los valores de entrada y salida que se requieren para identificar la planta. Adicionalmente se indica el valor de PV escalado; se debe realizar este escalamiento debido a que existe una relación de 0,8 entre los valores obtenidos experimentalmente y la medida del sensor.

Tabla. 4.2. Valores experimentales de la planta del sistema

TIEMPO	MV	PV	PV ESCALADO
161555	142	126	14.9
161558	142	129	15.2
161601	142	130	15.3
161604	142	128	15.1
161607	142	130	15.3
161610	142	130	15.3
161613	142	130	15.3
161616	142	129	15.2
161619	142	130	15.3
161622	142	129	15.2
161625	142	131	15.5
161628	142	127	15.0
161631	142	129	15.2
161634	142	128	15.1
161637	142	127	15.0
161640	142	129	15.2
161643	142	129	15.2
161646	142	129	15.2
161649	142	130	15.3
161652	142	130	15.3
161655	142	129	15.2
161658	142	131	15.5
161700	142	129	15.2
161703	142	130	15.3
161706	142	129	15.2
161709	142	131	15.5
161712	142	133	15.7
161715	142	129	15.2
161718	142	132	15.6
161801	142	128	15.1
161804	142	128	15.1
161807	142	127	15.0
161810	142	129	15.2
161813	142	125	14.8
161816	142	128	15.1
161819	142	127	15.0
161822	142	130	15.3
161825	142	131	15.5
161828	142	129	15.2
161831	142	131	15.5
161834	142	130	15.3
161837	142	129	15.2
161840	142	126	14.9
161843	142	129	15.2
161846	142	130	15.3
161849	142	133	15.7

TIEMPO	MV	PV	PV ESCALADO
161852	142	132	15.6
161855	142	131	15.5
161858	142	114	13.5
161901	142	116	13.7
161904	142	133	15.7
161907	142	129	15.2
161910	142	131	15.5
161913	142	140	16.5
161916	142	128	15.1
161919	142	136	16.0
161922	142	106	12.5
161925	142	137	16.2
161928	142	137	16.2
161931	142	129	15.2
161934	142	133	15.7
161937	142	131	15.5
161940	142	133	15.7
161943	142	135	15.9
161946	142	128	15.1
161949	142	131	15.5
161952	142	128	15.1
161955	142	131	15.5
161958	142	129	15.2
162001	142	129	15.2
161937	142	131	15.5
161940	142	133	15.7
161943	142	135	15.9
161946	142	128	15.1
161949	142	131	15.5
161952	142	128	15.1
161955	142	131	15.5
161958	142	129	15.2
162001	142	129	15.2

Una vez que los valores de la planta han sido obtenidos, son exportados a una nueva HMI la misma que se encarga de realizar su análisis y presenta la función de transferencia identificada de la planta como puede observarse en el figura.4.4.

4.2.2 Obtención de las matrices en Espacio de Estados para el sistema

Como se había establecido en el capítulo 3, las ecuaciones del sistema en espacio de estados están regidas por:

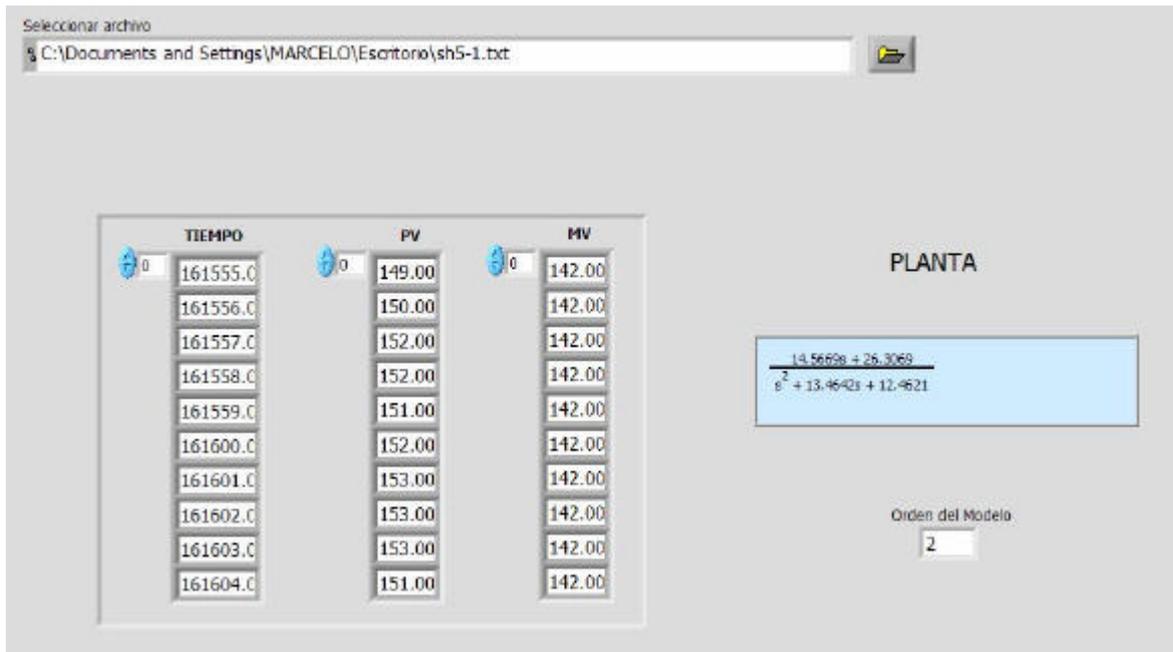


Figura. 4.4. HMI para la obtención de la función de transferencia de la planta

$$(3-2) \quad \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{C_1 R_1} + \frac{1}{C_1 R_2}\right) & \frac{1}{C_1 R_1} \\ \frac{1}{C_2 R_1} & -\frac{1}{C_2 R_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{C_2} \end{bmatrix} [u]$$

$$[y] = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Y la función de transferencia tiene la siguiente forma :

$$(3-3) \quad \frac{H_2(s)}{Q(s)} = \frac{(C_1 R_1^2 R_2) s + (R_1^2 + R_1 R_2)}{(C_1 C_2 R_1^2 R_2) s^2 + (C_2 R_1^2 + C_2 R_1 R_2 + C_1 R_1 R_2) s + R_1}$$

Que normalizando se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{H_2(s)}{Q(s)} = \frac{\left(\frac{1}{C_2}\right)s + \left(\frac{1}{C_1 C_2 R_2} + \frac{1}{C_1 C_2 R_1}\right)}{s^2 + \left(\frac{1}{C_1 R_2} + \frac{1}{C_1 R_1} + \frac{1}{C_2 R_1}\right)s + \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (4-1)$$

La función de transferencia experimental para esta planta obtenida mediante Labview como se indica en la figura 4.4 es:

$$Gp(s) = \frac{14.5669 s + 26.3069}{s^2 + 13.4642 s + 12.4621} \quad (4-2)$$

Al igualar los coeficientes entre (4-1) y (4-2) se obtuvieron los siguientes valores de C_1, C_2, R_1, R_2

$$C_1 = 1.0859$$

$$C_2 = 0.0686$$

$$R_1 = 1.2495$$

$$R_2 = 0.8615$$

Reemplazando en (3-2) se obtiene el modelo identificado en espacio de estados

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.806 & 0.7378 \\ 9.7507 & -9.7507 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 14.58 \end{bmatrix} [u] \quad (4-3)$$

$$[y] = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Donde

$$A = \begin{bmatrix} -1.806 & 0.7378 \\ 9.7507 & -9.7507 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 14.58 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \quad 0]$$

4.3 DESCRIPCIÓN DE FUNCIONALIDAD DEL SISTEMA TOTAL

4.3.1 Obtención de las matrices continuas y discretas

El sistema en su totalidad esta compuesto por el desarrollo de sus matrices en forma continua y en forma discreta. Dentro de cada una se debe estudiar su comportamiento ante la realimentación y la estimación de sus estados o la implementación de sensores virtuales.

Por lo tanto se procederá a encontrar todas las matrices necesarias para estudiar el lazo de control de nivel que rige entre el baño B1 y el reservorio B0 de la Estación de Procesos del CIM 2000.

4.3.1.1 Criterios de Diseño

El factor considerado para el diseño del sistema de control fue la Realimentación de la señal debido a que expresa la propiedad del sistema a responder a una señal de una forma específica.

El problema de control en términos generales se clasifica en Problemas de Regulación y Problemas de Servo. El problema de regulación se basa en el compromiso entre la reducción de los disturbios de la carga y las fluctuaciones creadas por la medición del ruido que se inyecta en el sistema debido a la realimentación

Para el diseño de parámetros se tomó en cuenta el periodo de muestreo $t = 0,1$ y el diseño de polos en lazo cerrado.

Para esto se consideró que el sistema es de segundo orden por lo tanto cumple con la siguiente expresión:

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (4-4)$$

Para este diseño se procura mantener el overshoot y eliminar el ess. La razón de amortiguamiento y la frecuencia natural del sistema establecidas son:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= 0,8 \\ \mathbf{w}_n &= 3 \quad \left[\text{rad/s} \right] \end{aligned} \quad (4-5)$$

Por lo tanto mediante las ecuaciones básicas se procede a encontrar los valores de frecuencia natural amortiguada del sistema \mathbf{w}_d , Tiempo de crecimiento T_r , tiempo pico T_p , tiempo de establecimiento T_s y el máximo sobreimpulso M_p .

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= \mathbf{x}\mathbf{w}_n \\ \mathbf{a} &= 0,8 * 3 \\ \mathbf{a} &= 2,4 \quad \left[\text{rad/s} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_d &= \mathbf{w}_n \sqrt{1 - \mathbf{x}^2} \\ \mathbf{w}_d &= 3 * \sqrt{1 - 0,8^2} \\ \mathbf{w}_d &= 1,8 \quad \left[\text{rad/s} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{b} &= \text{tg}^{-1} \left(\frac{\mathbf{w}_d}{\mathbf{a}} \right) \\ \mathbf{b} &= \text{tg}^{-1} \left(\frac{1,8}{2,4} \right) \\ \mathbf{b} &= 0,64 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_r &= \frac{\mathbf{p} - \mathbf{b}}{\mathbf{w}_d} \\ T_r &= \frac{\mathbf{p} - 0,64}{1,8} \\ T_r &= 1,38 \quad [s] \end{aligned} \quad (4-6)$$

$$\begin{aligned} T_p &= \frac{\mathbf{p}}{\mathbf{w}_d} \\ T_p &= \frac{\mathbf{p}}{1,8} \\ T_p &= 1,75 \quad [s] \\ T_s &= \frac{4}{\mathbf{x}\mathbf{w}_n} \\ T_s &= \frac{4}{0,8 * 3} \\ T_s &= 1,67 \quad [s] \end{aligned}$$

$$M_p = e^{-\left(\frac{a}{w_d}\right)p}$$

$$M_p = e^{-\left(\frac{2,4}{1,8}\right)p}$$

$$M_p = 0,015$$

Por lo tanto los polos del sistema se ubican en:

$$\begin{aligned} & -\mathbf{x}w_n \pm jw_n\sqrt{1-\mathbf{x}^2} \\ & -\mathbf{a} \pm jw_d \\ s_{cc} & = -2,4 \pm j1,8 \end{aligned} \tag{4-7}$$

$$\begin{aligned} z_{cl} & = e^{s_{cc}^*t} \\ z_{cl} & = e^{(-2,4 \pm j1,8)^*0,1} \\ z_{cl} & = 0,77 \pm j0,14 \end{aligned}$$

La realimentación del sistema continuo se rige por las matrices A y B definidas en (4-3), una vez realizados los cálculos respectivos se obtuvieron los siguientes valores:

$$K = [1,288 \quad -0,899] \tag{4-8}$$

Para la estimación de estados se obtuvo la matriz H definida en (3-16), se debe recordar que al momento de estimar un sistema, la salida de la planta pasa a ser la entrada del estimador y la salida del estimador se convierte en la entrada del sistema.

$$H = \begin{bmatrix} -1 \\ 34.3961 \end{bmatrix}$$

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) = \begin{bmatrix} -1.7586 & 0.6812 \\ -139.507 & -30.8477 \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}}(t) + \begin{bmatrix} -1 \\ 34.3961 \end{bmatrix} y(t) \tag{4-9}$$

$$u(t) = [-28.2392 \quad -6.5991]$$

El sistema discreto se expresa por las siguientes matrices:

$$\begin{matrix} & \Phi & & \Gamma \\ \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} 0.86 & 0.04 \\ 0.57 & 0.4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} & + & \begin{bmatrix} 0.04 \\ 0.94 \end{bmatrix} u(k) \end{matrix} \quad (4-10)$$

$$y(k) = [1 \quad 0]x(k)$$

La realimentación del sistema discreto se obtiene con Φ y Γ de (4-10).

$$K = [0.867 \quad -0.530] \quad (4-11)$$

Como es un sistema completamente controlable se establecieron los polos del estimador en cualquier lugar del plano Z, por lo tanto la estimación de estados discreto se expresa por la siguiente matriz

$$z_{cl} = 0,86 \pm j0,12$$

$$\tilde{x}(k+1) = \begin{bmatrix} -2.67 & 0.74 \\ 10.28 & -9.76 \end{bmatrix} \tilde{x}(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ 14.53 \end{bmatrix} y(k) \quad (4-12)$$

Utilizando la técnica de aproximaciones para el sistema se obtuvieron las siguientes ecuaciones las mismas que posteriormente se utilizarán para comparar la respuesta del sistema discreto y el sistema aproximado.

$$\tilde{L} = [1.329 + 0.88796h \quad -0.911 - 0,47597h] \quad (4-13)$$

$$\tilde{M} = 1 + 6,63996h$$

4.3.2 Implementación del sistema en Simulink

La implementación del sistema se realizó en Simulink debido a que la estación de Control de Procesos presenta un desperfecto en su fuente de DC lo que impide que esté operativa y que se pueda implementar las técnicas estudiadas. Por tal motivo se procedió a realizar una simulación del proceso.

En la figura. 4.5 se muestra el programa implementado en Simulink

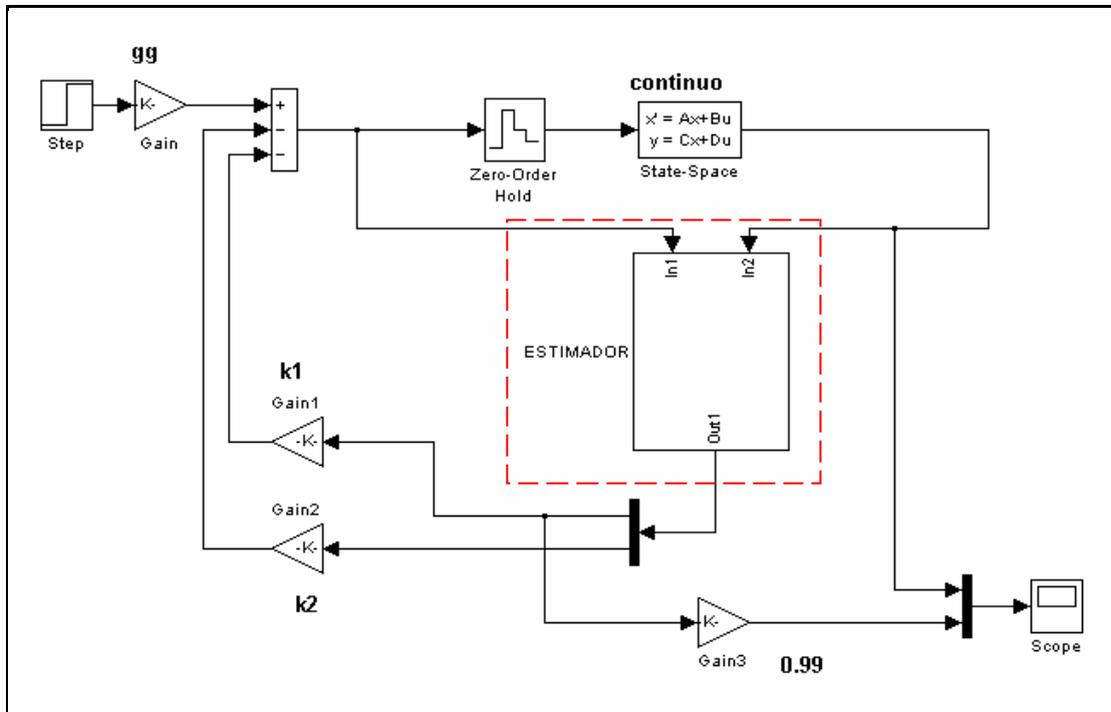


Figura. 4.5. Diagrama de Simulación

Se utiliza un bloque para simular el estimador, en el mismo se emplean sus dos entradas conocidas (In1, In2) y su salida (Out) que se multiplicaran por ganancias (k1, k2) para obtener el valor estimado. Se desglosa el bloque estimador en la figura 4.6.

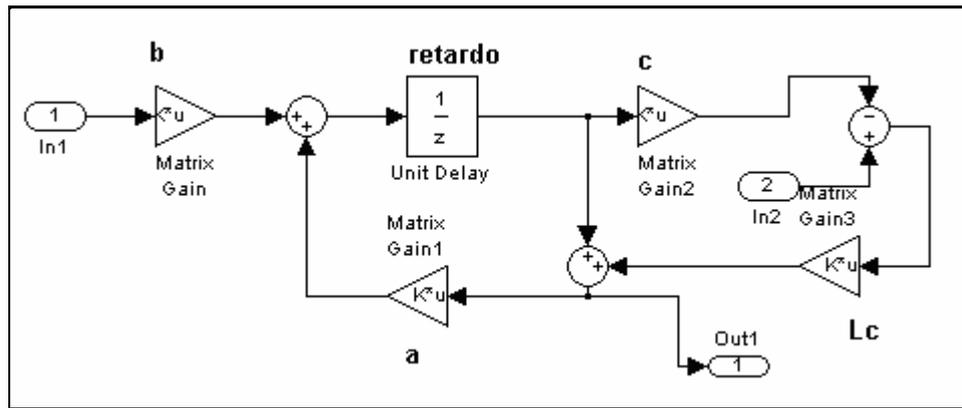


Figura. 4.6. Estimador

Para obtener los datos que hace referencia la implementación en Simulink se realizan los siguientes cálculos:

```

a=[0.86 0.04;0.57 0.4];
b=[0.04;0.94];
c=[1 0];
d=[0];
%Sistema discreto

P=[0.77+j*0.14;0.77-j*0.14];
k=acker(a,b,P)
%Polos discretos y realimentación

PL=[0.86+j*0.12;0.86-j*0.12];
Lp=acker(a',c',PL)
Lc=inv(a)*Lp'
%Polos estimador y realimentación

ma=[a-eye(2) b; c 0];
ma1=inv(ma)*[0;0;1]
nx=ma1(1:2)
gg=k*nx+ma1(3)
%Ganancia estimador
    
```

Los resultados obtenidos en Matlab para los diferentes valores que requiere el sistema para realizar los cálculos respectivos son:

```
To get started, select "MATLAB Help" from the Help menu.  
  
k =  
    1.0232 -0.34513  
  
Lp =  
    -0.46638  5.9253  
  
Lc =  
    -1.3948  
    16.995  
  
ma1 =  
    1.0000  
    2.4478  
    0.96893  
  
nx =  
    1.0000  
    2.4478  
  
gg =  
    1.1473
```

La figura 4.7 representa el sistema en el espacio de estados e incluye un bloque de función, el mismo que se encarga de calcular el valor del estimador.

Se desarrolló el bloque de función con el objetivo de generalizar el sistema de control y establecer el algoritmo que podrá ser implementado en el controlador que se desee utilizar para controlar a la estación. Adicionalmente, se debe destacar que el algoritmo no se limita a este sistema en particular sino que su lógica se puede utilizar para analizar todos los sistemas en SS que se deseen implementar.

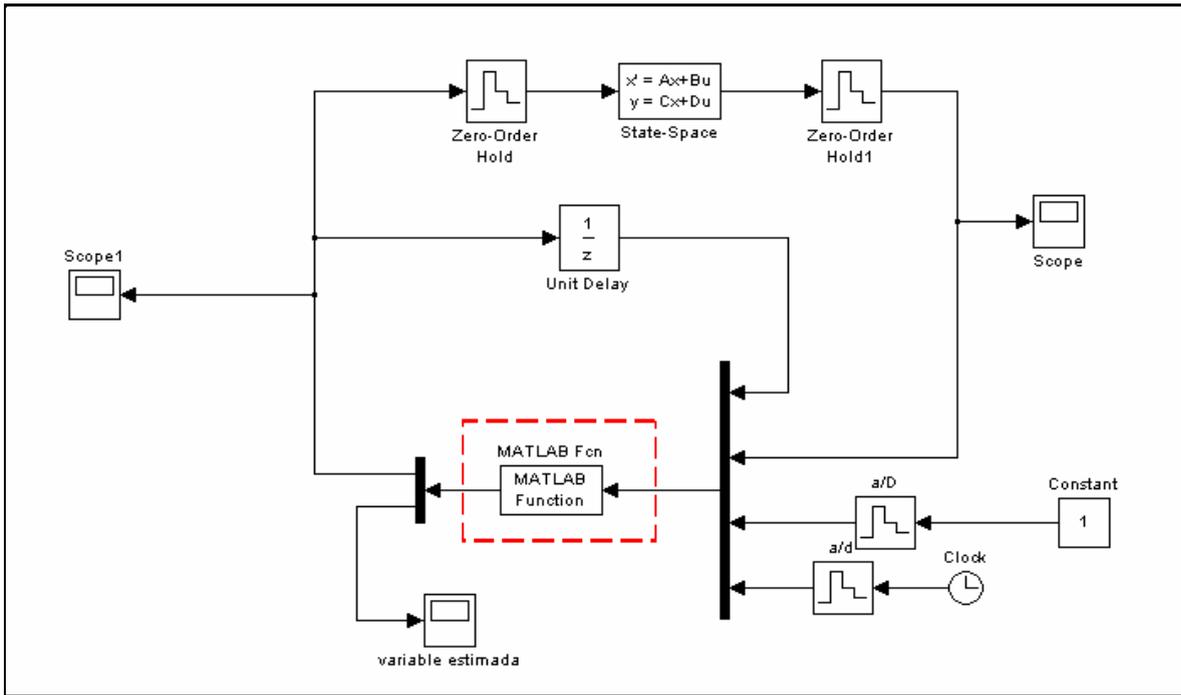


Figura. 4.7. Estimador con función

El algoritmo de control se expresa de la siguiente manera:

```

ek=yk-x1k;
uk=-k1*x1k-k2*x2k+gg*sp;
x1kp1=Φ11*x1k+Φ12*x2k+Γ1*uk+Lp1*ek;
x2kp1=Φ21*x1k+Φ22*x2k+Γ2*uk+Lp2*ek;
x1k=x1kp1;
x2k=x2kp1;
    
```

El programa que ejecuta el bloque de función es el siguiente:

```

Function [mm]=estado(w);

if t==0
    uk=gg*sp;
    ek=yk;
    x1kp1=0.0376*uk-0.46638*ek;
    x2kp1=0.9418*uk+5.9253*ek;
    x1k=x1kp1;
    x2k=x2kp1;
end
    
```

```

if t>0
    ek=yk-x1k;
    uk=-k1*x1k-k2*x2k+gg*sp;
    x1kp1=0.8583*x1k+0.043*x2k+0.0376*uk-0.46638*ek;
    x2kp1=0.5683*x1k+0.3953*x2k+0.9418*uk+5.9253*ek;
    x1k=x1kp1;
    x2k=x2kp1;
end

mm=[uk;x2k];
    
```

4.3.3 Implementación del sistema en Labview

Al momento que la estación se encuentre operativa se puede realizar la implementación total del sistema. Para lo cual se ha desarrollado un HMI en Labview, el mismo que permite el ingreso de cualquier tipo de planta y realiza el estudio completo de espacio de estados y estimación de variables.

En la figura. 4.8 se muestra el HMI implementado en Labview.



Figura. 4.8. HMI en Labview

Como se desprende de la figura 4.8 la interfaz gráfica consta de un menú principal por el cual se puede navegar e ingresar a las distintas pantallas según el análisis que se desee realizar, como puede ser, obtener el modelo de la planta, obtener el sistema continuo, el sistema discreto, los sensores virtuales del sistema y finalmente relacionar en forma gráfica cada uno de los sistemas detallados.

En la pantalla de “Modelo de la Planta” se puede ingresar cualquier documento de texto que contenga los valores de entrada (MV), salida (PV) y tiempo de un sistema y se obtiene automáticamente la función de transferencia mediante la cual esta regido y adicionalmente el orden del modelo como se observa en la figura. 4.9.

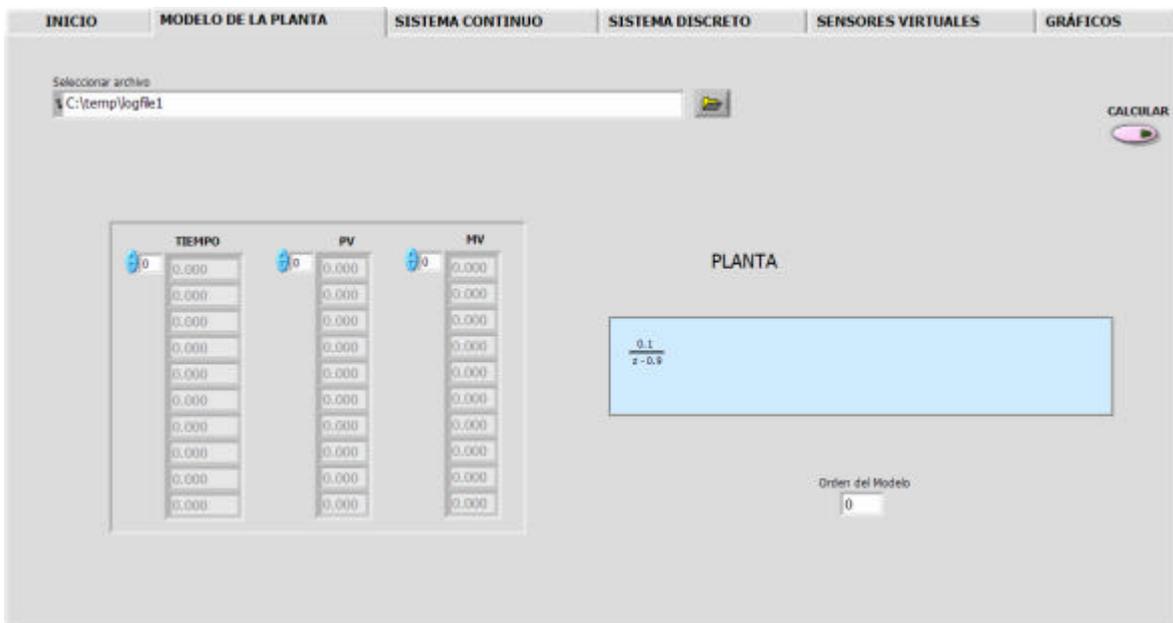


Figura. 4.9. Pantalla de Modelo de la Planta

La pantalla de “Sistema continuo” convierte la función de transferencia obtenida al modelo en espacios de estados continuo y se obtiene la ganancia para la realimentación ante los valores de los polos que sean ingresados como se observa en la figura. 4.10.

Esta herramienta informática permite calcular las matrices de controlabilidad y observabilidad y a partir de estos valores indica si el sistema es controlable, observable y

estabilizable. Si el sistema llegara a no ser controlable se genera una señal de error la cual indica que el sistema no se puede analizar y no permite continuar con el cálculo discreto.

Esta pantalla también muestra la diferencia entre el sistema controlable (Representación en SS de FT) y el sistema ingresado (Representación en SS). Se debe señalar que todo el análisis no se realiza con el sistema controlable debido a que el objetivo de este proyecto es implementar sensores virtuales para lo cual se utiliza la técnica de estimadores.

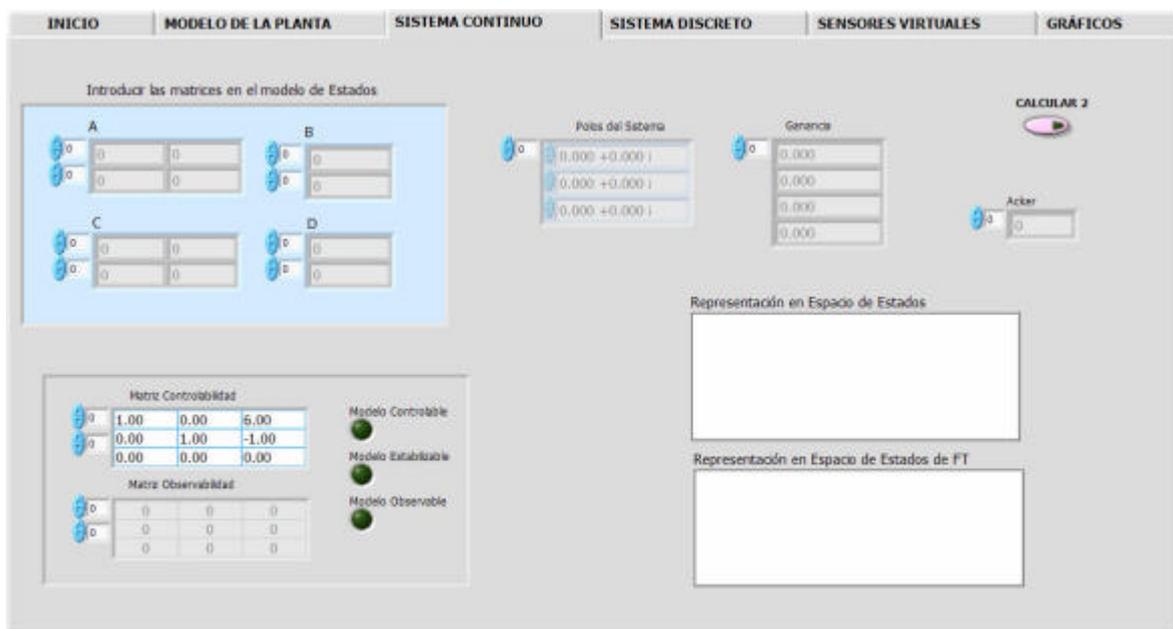


Figura. 4.10. Pantalla de Sistema Continuo

La pantalla de “Sistema Discreto” convierte el sistema ingresado al modelo en espacios de estados discreto y se obtiene las ganancias para la realimentación ante los valores de los polos que sean ingresados como se observa en la figura. 4.11.

Para obtener el sistema discreto con ganancia se utilizó el algoritmo de Matlab generado para obtener los datos del bloque estimador, por lo tanto, se representa el sistema en SS del estimador.

Adicionalmente, se implementó un algoritmo de aproximaciones con el objetivo de comparar el sistema discreto con el sistema aproximado.

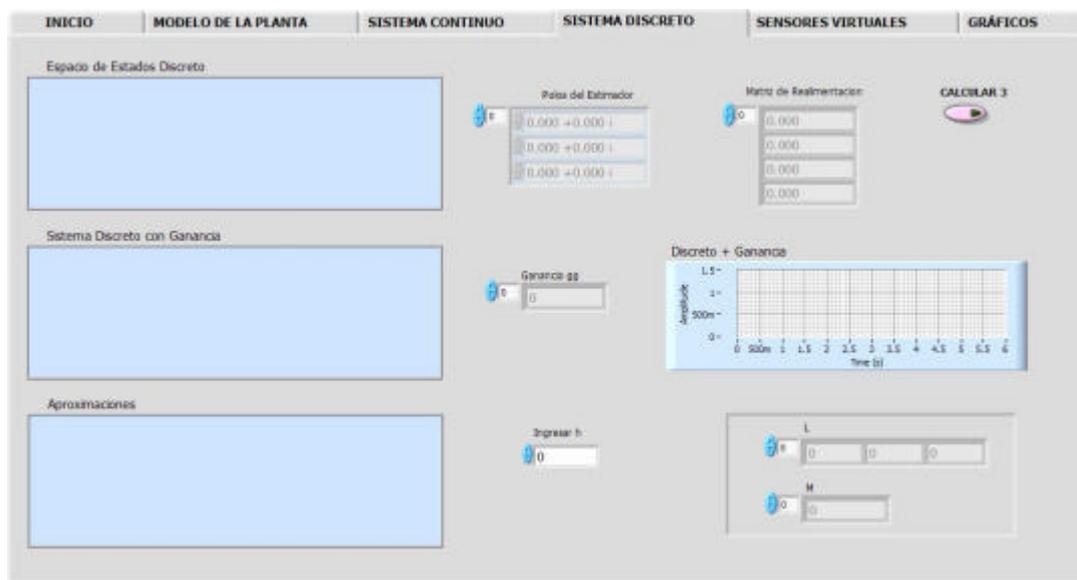


Figura. 4.11. Pantalla de Sistema Discreto

La pantalla de “Sensores Virtuales” desarrolla la técnica de estimadores como se observa en la figura. 4.12. Para relacionar los valores de entrada (u_k), salida (y_k) y variable estimada, se implementó un visor para cada uno de ellos.



Figura. 4.12. Pantalla de Sensores Virtuales

La pantalla de “Gráficos” muestra los resultados obtenidos en cada una de las fases antes estudiadas como se observa en la figura. 4.13.

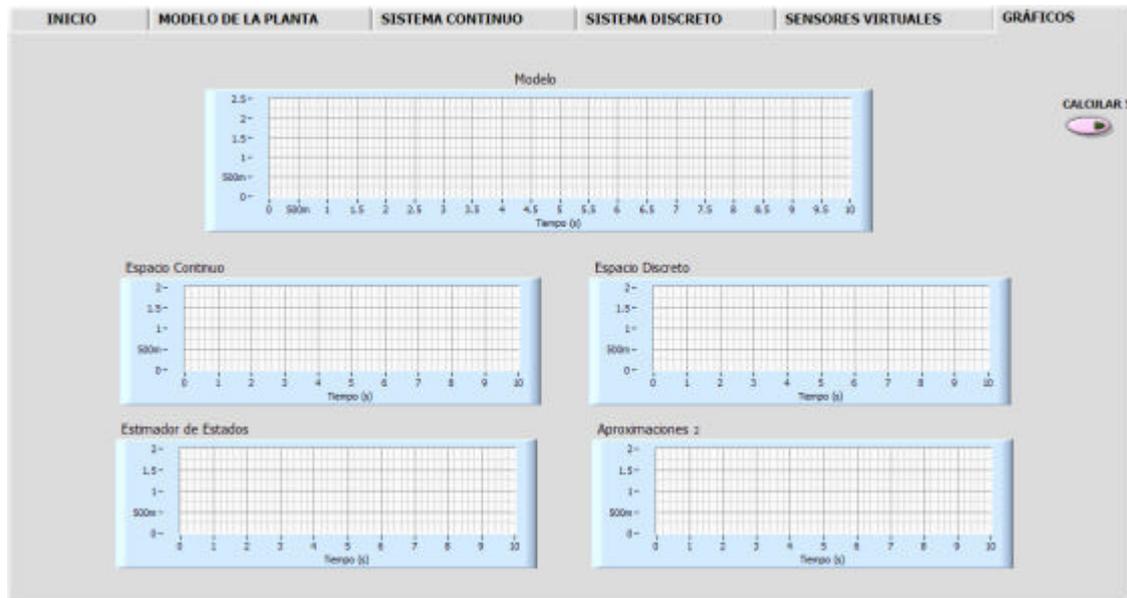


Figura. 4.13. Pantalla de Gráficos

CAPITULO 5

PRUEBAS Y RESULTADOS DE SIMULACION

5.1 EJEMPLO DE UN SISTEMA DE CONTROL EN EL ESPACIO DE ESTADOS

Para el estudio de la técnica de control en el Espacio de Estados se desarrolló el ejemplo que se describe a continuación: [12]

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) &= [1 \quad 0] u(t)\end{aligned}\tag{5-1}$$

Partiendo de la representación del sistema en el espacio de estados y por motivos de análisis utilizamos una herramienta conocida que es Matlab para observar su comportamiento, por lo tanto el sistema discreto se puede expresar mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}x_1(k+1) &= x_1(k) + 0,2 * x_2(k) + 0,02 * u(k) \\ x_2(k+1) &= x_2(k) + 0,2 * u(k) \\ y(k) &= x_1(k)\end{aligned}\tag{5-2}$$

En el algoritmo programado en Matlab se incluye una entrada escalón para visualizar su respuesta.

<pre>a=[0 1;0 0]; b=[0;1]; c=[1 0;0 1]; d=[0;0];</pre>	}	<p>Establecimiento de las matrices continuas para la representación en el espacio de estados</p>
<pre>sysc=ss(a,b,c,d); sysd=c2d(sysc,0.2);</pre>	}	<p>Obtención del sistema continuo y discreto del SS</p>
<pre>x1k=0; x2k=0;</pre>	}	<p>Inicialización de variables de entrada</p>
<pre>for k=1:200 uk=1-x1k-x2k; x1kp1=x1k+0.2*x2k+0.02*uk; x2kp1=x2k+0.2*uk; yk(k)=x1k; x1k=x1kp1; x2k=x2kp1; end</pre>	}	<p>Algoritmo</p>
<pre>plot(yk)</pre>	}	<p>Representación gráfica del sistema</p>

Los resultados para el sistema en lazo cerrado se muestran en la Figura 5.1, donde se observa que el sistema llega a estabilizarse y logra tener un comportamiento similar a un controlador PID.

Una vez conocido el comportamiento que va a tener el sistema se procedió a implementar esta técnica de control en el PLC de la estación de control de Procesos del CIM. Para lo cual se desarrollaron las ecuaciones y el algoritmo definidos con anterioridad.

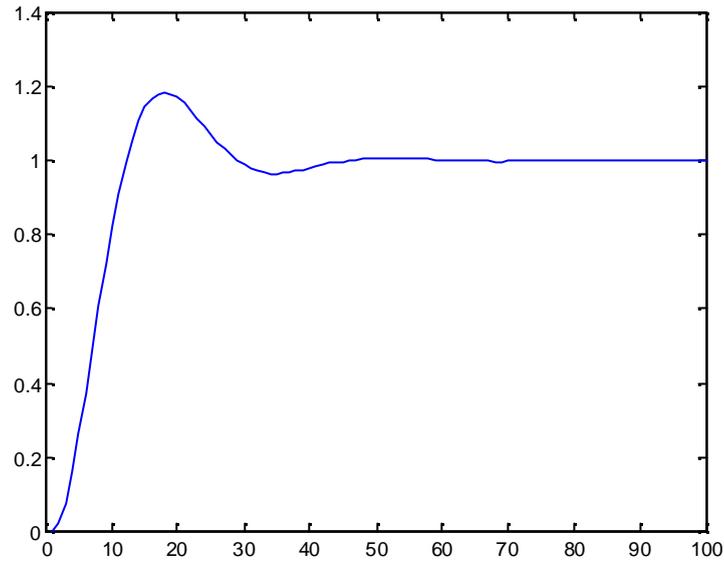


Figura. 5.1. Respuesta al escalón del sistema en lazo cerrado

5.2 IMPLEMENTACION EN UN PLC

Se debe tomar en cuenta que el PLC no trabaja con números negativos y la secuencia que sigue nuestro sistema se indica en la tabla de verdad 5.1.:

Tabla. 5.1. Tabla de verdad comportamiento del sistema

X1(k)	X2(k)	Uk	X1(k+1)	X2(k+1)	Y(k)
+	+	+	+	+	+
+	+	-	+	+	+
+	+	-	+	-	+
+	-	-	+	-	+
+	-	+	+	-	+
+	-	+	+	+	+

De donde se visualiza que para obtener la respuesta deseada se debe trabajar con números negativos generando a la vez 6 ecuaciones completamente diferentes las cuales son:

1) Si x_{1k} (+) x_{2k} (+)

$$u_k = 1 - x_{1k} - x_{2k}$$

$$x_{1kp1} = x_{1k} + 0.2 * x_{2k} + 0.02 * u_k$$

$$x_{2kp1} = x_{2k} + 0.2 * u_k$$

+	+	+	+	+
---	---	---	---	---

2) Si x_{1k} (+) x_{2k} (+)

$$u_k = 1 - x_{1k} - x_{2k}$$

$$x_{1kp1} = x_{1k} + 0.2 * x_{2k} - 0.02 * u_k$$

$$x_{2kp1} = x_{2k} - 0.2 * u_k$$

+	+	-	+	+
---	---	---	---	---

3) Si x_{1k} (+) x_{2k} (+)

$$u_k = 1 - x_{1k} - x_{2k}$$

$$x_{1kp1} = x_{1k} + 0.2 * x_{2k} - 0.02 * u_k$$

$$x_{2kp1} = x_{2k} - 0.2 * u_k$$

+	+	-	+	-
---	---	---	---	---

4) Si x_{1k} (+) x_{2k} (-)

$$u_k = 1 - x_{1k} + x_{2k}$$

$$x_{1kp1} = x_{1k} - 0.2 * x_{2k} - 0.02 * u_k$$

$$x_{2kp1} = -x_{2k} - 0.2 * u_k$$

+	-	-	+	-
---	---	---	---	---

5) Si x_{1k} (+) x_{2k} (-)

$$u_k = 1 - x_{1k} + x_{2k}$$

$$x_{1kp1} = x_{1k} - 0.2 * x_{2k} + 0.02 * u_k$$

$$x_{2kp1} = -x_{2k} + 0.2 * u_k$$

+	-	+	+	-
---	---	---	---	---

6) Si x_{1k} (+) x_{2k} (-)

$$u_k = 1 - x_{1k} + x_{2k}$$

$$x_{1kp1} = x_{1k} - 0.2 * x_{2k} + 0.02 * u_k$$

$$x_{2kp1} = -x_{2k} + 0.2 * u_k$$

+	-	+	+	+
---	---	---	---	---

Las variables de salida y registros utilizados son los mostrados en las tablas 5.2 y 5.3.

Tabla. 5.2. Salidas lógicas

Salidas		
Dato	Dirección	Descripción
Reloj	00030	Reloj del sistema
Secuencia	00040	Secuencias de ecuaciones
U(+)	00041	Salida positiva de U de la primera ecuación
U(-)	00042	Salida negativa de U de la primera ecuación
Bandera	00043	Señal X2(k+1) de la primera ecuación
Bandera	00044	Señal X1(k+1) de la segunda ecuación
X2(k+1) (+)	00045	Salida positiva de X2(k+1) de la segunda ecuación
X2(k+1) (-)	00046	Salida negativa de X2(k+1) de la segunda ecuación
U(+)	00050	Salida positiva de U de la cuarta ecuación
U(-)	00051	Salida negativa de U de la cuarta ecuación
Bandera	00052	Señal X1(k+1) de la cuarta ecuación
Bandera	00053	Señal X1(k+1) de la quinta y sexta ecuación
X2(k+1) (+)	00054	Salida positiva de X2(k+1) de la quinta y sexta ecuación
X2(k+1) (-)	00055	Salida negativa de X2(k+1) de la quinta y sexta ecuación
Bandera	00070	Señal de actualización de X1(k)
Bandera	00071	Señal de actualización de X2(k)
Bandera	00080	Señal de actualización de Y(k)
Retardo	00100	Retardo para que se produzca inicialización de variables
Bandera	00101	Inicialización de X1(k) y X2(k)

Tabla. 5.3. Registros del Programa

Registros		
Dato	Dirección	Descripción
X1(k+1)	40001	Almacena el valor de X1(k+1)
X2(k+1)	40100	Almacena el valor de X2(k+1)
X1(k)	40200	Almacena el valor de X1(k)
X2(k)	40300	Almacena el valor de X1()
U(k)	40400	Almacena el valor de U(k)
Y(k)	40500	Almacena el valor de Y(k)
Reloj	40900	Almacena la cuenta del reloj del sistema
Reloj	40920	Almacena la cuenta del reloj del sistema
Secuencia	40930	Almacena la secuencia de las ecuaciones
Secuencia	40960	Almacena la secuencia de las ecuaciones
0,2*X2(k)	41100	Almacena el producto de 0,2*X2(k)
0,02*U(k)	41200	Almacena el producto de 0,02*U(k)
0,2*U(k)	41300	Almacena el producto de 0,2*U(k)
1-X1(k)	41600	Almacena la resta del valor de referencia y X1(k)
0,2*X2(k)+0,02*U(k)	41700	Suma entre dos parametros de X1(k+1)

A continuación se presentan las instrucciones implementadas en el PLC.

En la figura 5.2 se muestra el reloj del sistema y la secuencia de ejecución de las ecuaciones. En el primer temporizador, se realizan las tres primeras ecuaciones y el segundo temporizador realiza la secuencia de las tres ecuaciones finales.

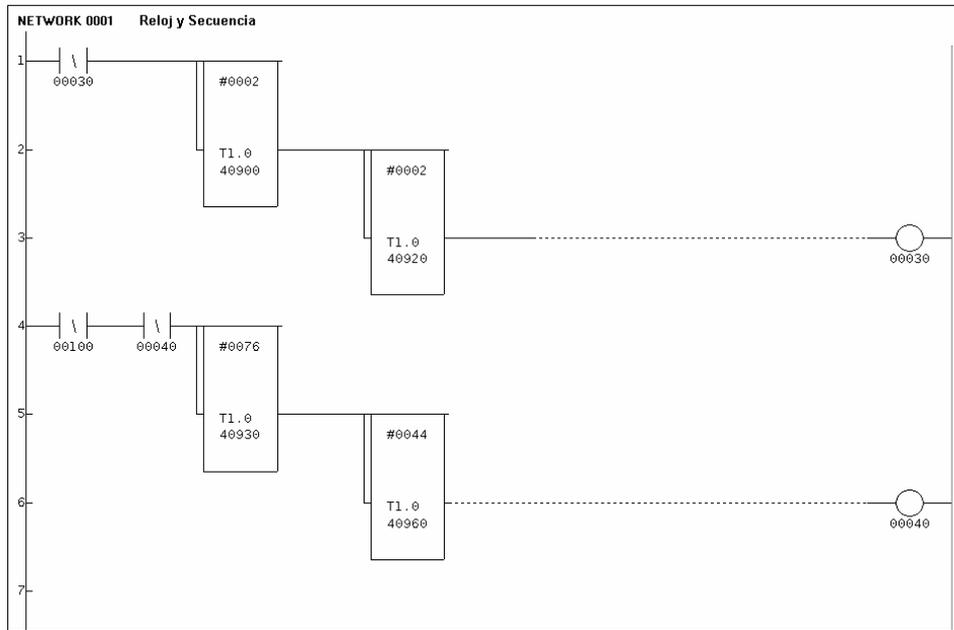


Figura. 5.2. Reloj y Secuencia

Para las primeras tres ecuaciones el valor de $U(k)$ se obtiene de manera similar, por lo tanto solo se debe tomar en cuenta su respuesta, es decir, si $U(k)$ es mayor que cero se encenderá la bobina lógica 00041 y pasará a realizar $X1(k+1)$ y $X2(k+1)$ de la primera ecuación, caso contrario, si $U(k)$ es menor que cero se enciende la bobina lógica 00042 y realizará $X1(k+1)$ y $X2(k+1)$ de la segunda y tercera ecuación como se muestra en la figura 5.3.

La figura 5.4, realiza el cálculo de $X1(k+1)$ para la primera ecuación.

En la figura 5.5 se utiliza un bloque de Registro a Tabla para lograr las actualizaciones de los valores de $X1(k)$ y $Y(k)$.

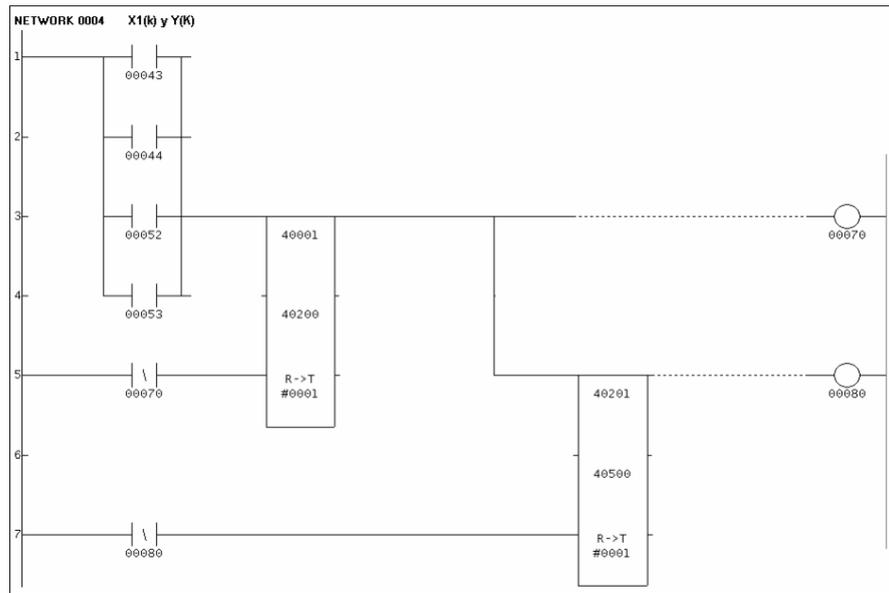


Figura. 5.5. Actualización de valores de $X1(k)$ y $Y(k)$

En la figura 5.6 se obtiene los valores de $X1(k+1)$ y $X2(k+1)$ de la segunda y tercera ecuación.

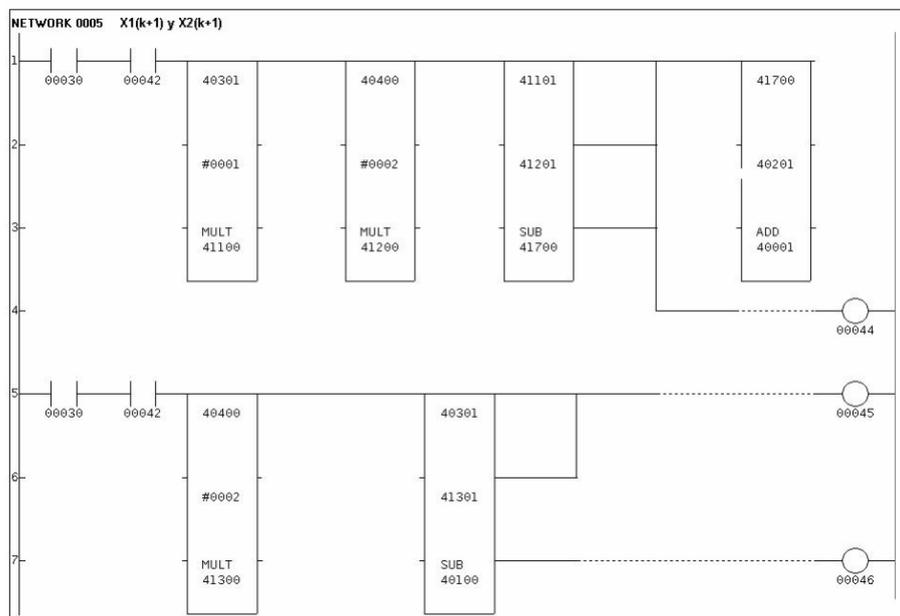


Figura. 5.6. Obtención de $X1(k+1)$ y $X2(k+1)$

En la figura 5.7 se obtiene $U(k)$ que servirá en las ecuaciones cuatro, cinco y seis. Si el valor de $U(k)$ es mayor que cero se activa la bobina lógica 00050 caso contrario si es menor que cero se activa la bobina 00051.

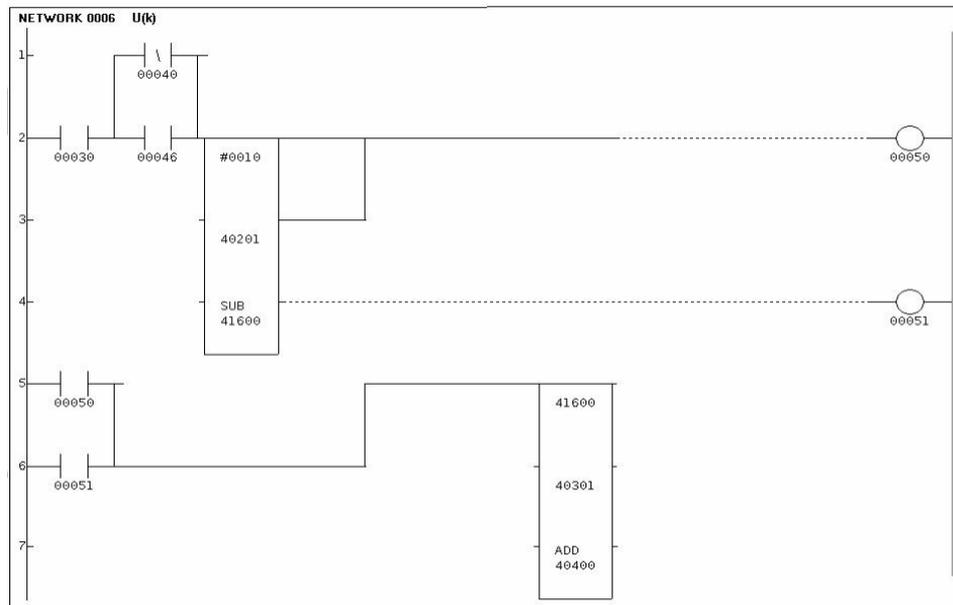


Figura 5.7. Obtención de $U(k)$ para la cuarta, quinta y sexta ecuación

En la figura 5.8 se obtiene los valores de $X1(k+1)$ y $X2(k+1)$ que regirán a la ecuación número cuatro.

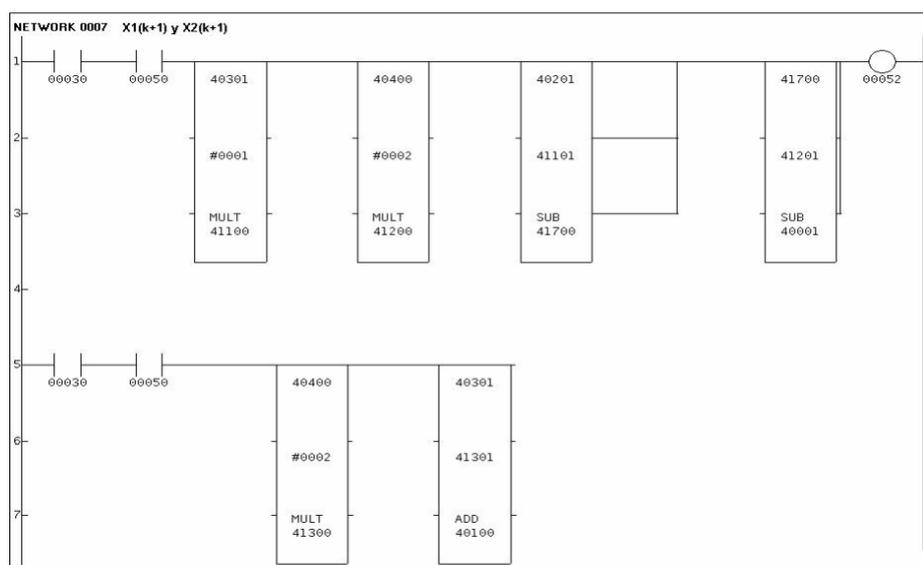


Figura 5.8. Obtención de los valores de $X1(k+1)$ y $X2(k+1)$ para la cuarta ecuación

A continuación se obtiene los valores de $X1(k+1)$ y $X2(k+1)$ para las ecuaciones número cinco y número seis como se muestra en la figura 5.9.

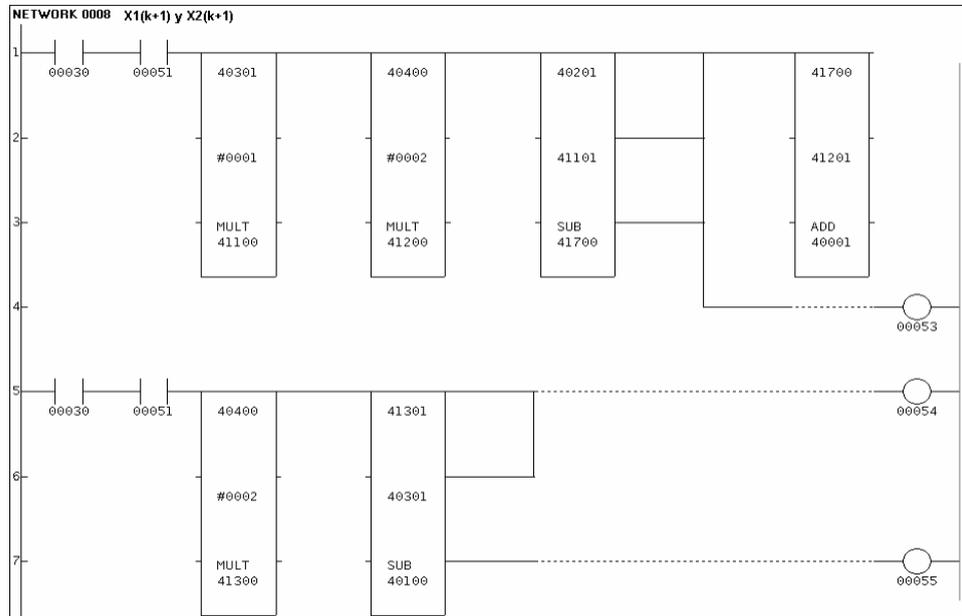


Figura. 5.9. Obtención de $X1(k+1)$ y $X2(k+1)$ en la quinta y sexta ecuación

En la figura 5.10 se utiliza un bloque de Registro a Tabla para actualizar el valor de $X2(k)$.

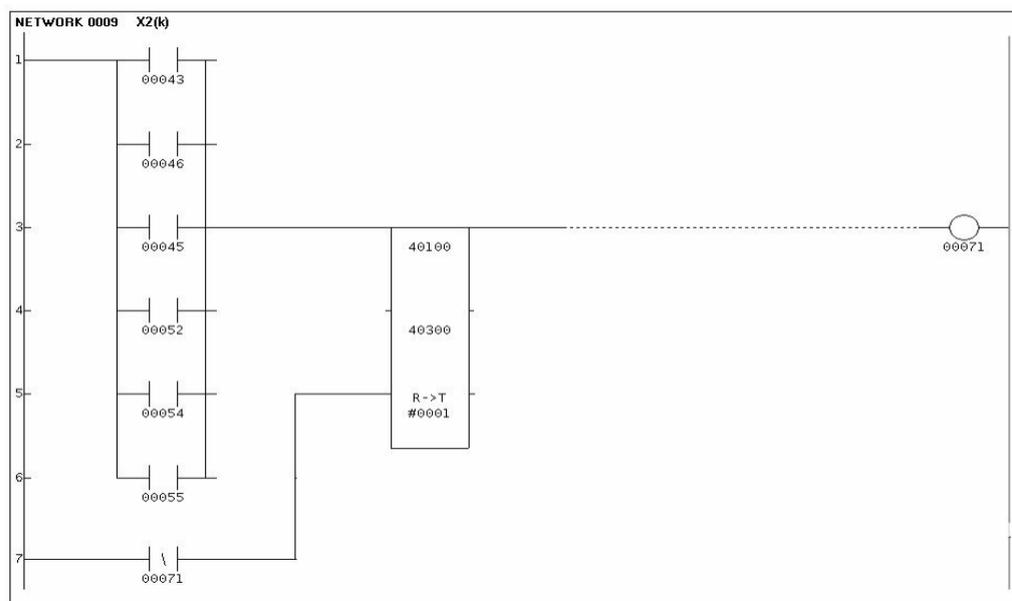


Figura. 5.10. Obtención de $X2(k)$

Finalmente en la figura 5.11 se realiza la inicialización de las variables X1(k) y X2(k).

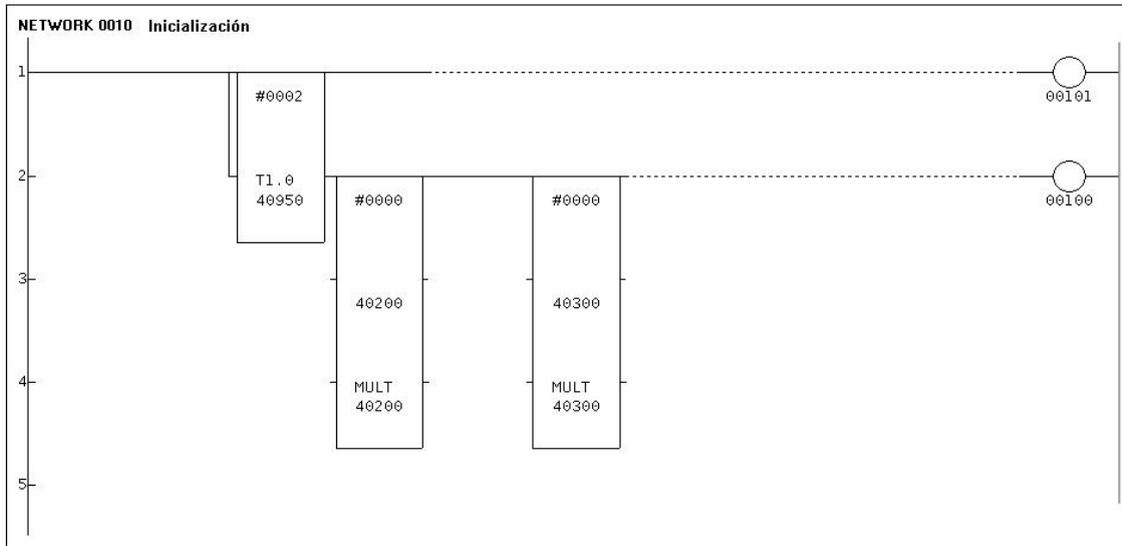


Figura. 5.11. Inicialización

Por el hecho de que el PLC no trabaja con números negativos, para la resolución del sistema se debería implementar una técnica de escalamiento que queda fuera de este estudio por lo tanto no se simulará el sistema utilizando este dispositivo.

5.3 PRUEBA DE LA TÉCNICA DE CONTROL ESTABLECIDA

5.3.1 Resultados

A partir de los datos obtenidos en los capítulos anteriores y los diferentes desarrollos de programación ya mencionados, se han llegado a los siguientes resultados.

El sistema de control se implementó tanto en Matlab y en Labview, por lo tanto a continuación se representan gráficamente el comportamiento que presentó el sistema al ser controlado mediante la técnica de Espacio de Estados.

En la figura 5.12, se indica la respuesta al escalón simulado en Matlab. Como se puede apreciar, llega a estabilizarse y no presenta sobreimpulsos ni sobrenlongaciones que perjudiquen su respuesta.

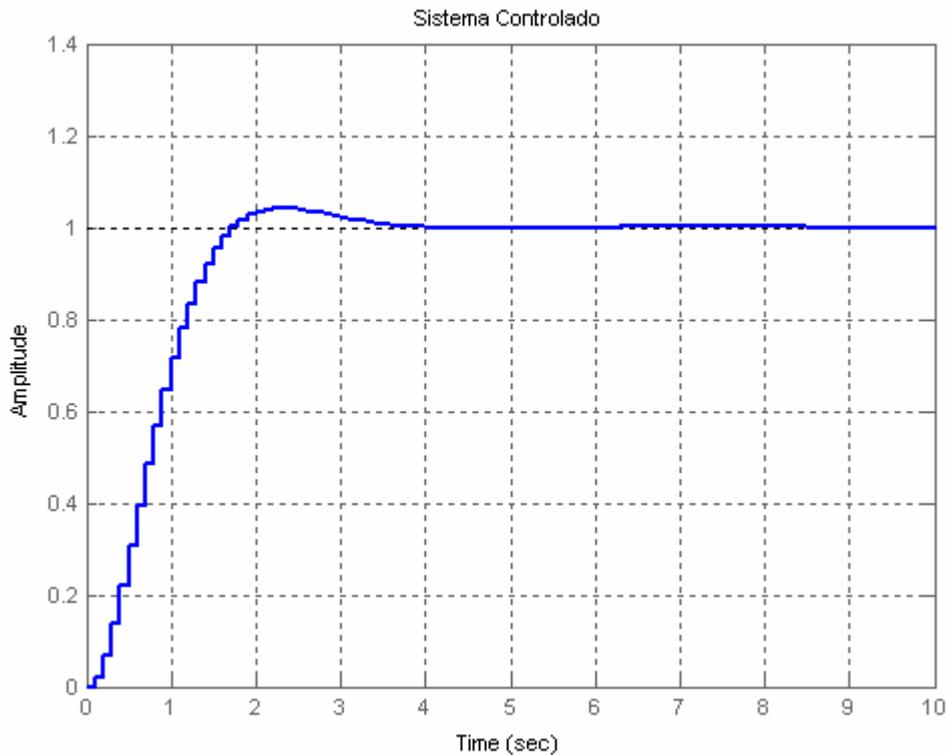


Figura. 5.12. Respuesta del sistema de controlado en Matlab

El HMI realizada en Labview indica los diversos resultados que se pueden desprender del sistema analizado. En la figura 5.13, se muestra los valores del Sistema Continuo y la factibilidad de continuar con los posteriores análisis debido a que cumple con las características de observabilidad y controlabilidad.

Permite visualizar como de un mismo sistema se pueden obtener varias representaciones en el Espacio de Estados y se obtuvieron los valores de ganancia con las que se trabajó, que en este caso van a ser dos valores debido a que es un sistema de segundo orden.

En la figura 5.14 se indica los resultados obtenidos en la pantalla Sistema Discreto de Labview. En esta pantalla resaltan los valores del sistema realimentado con la entrada de la ganancia obtenida, donde la respuesta obtenida no varía del comportamiento inicial del sistema y permite observar la acción que realiza el control establecido.

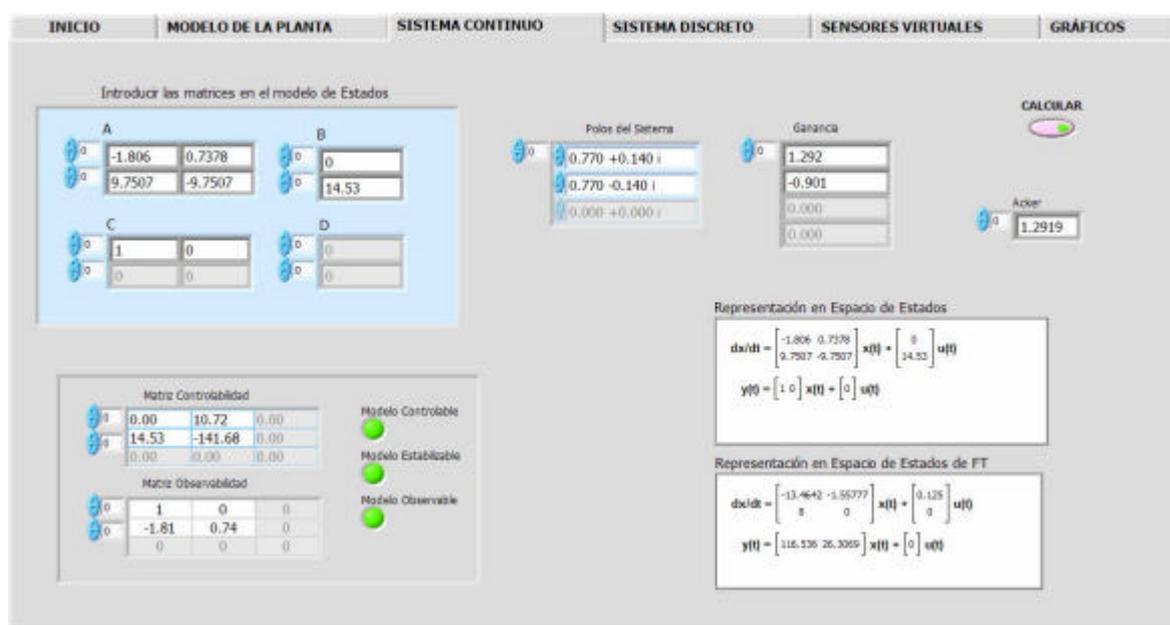


Figura. 5.13. Respuestas de la pantalla “Sistema Continuo”

Adicionalmente se realiza la simulación de la técnica de Aproximaciones para indicar posteriormente la respuesta que se obtiene utilizando esta herramienta. Para obtener los valores para este estudio se debe introducir el valor de h correspondiente al periodo de muestreo.

5.4 PRUEBAS DE SENSORES VIRTUALES

5.4.1 Resultados

Con los resultados obtenidos del análisis de sensores virtuales se prosiguió a su respectiva simulación tanto en Matlab como en el HMI generado en Labview.

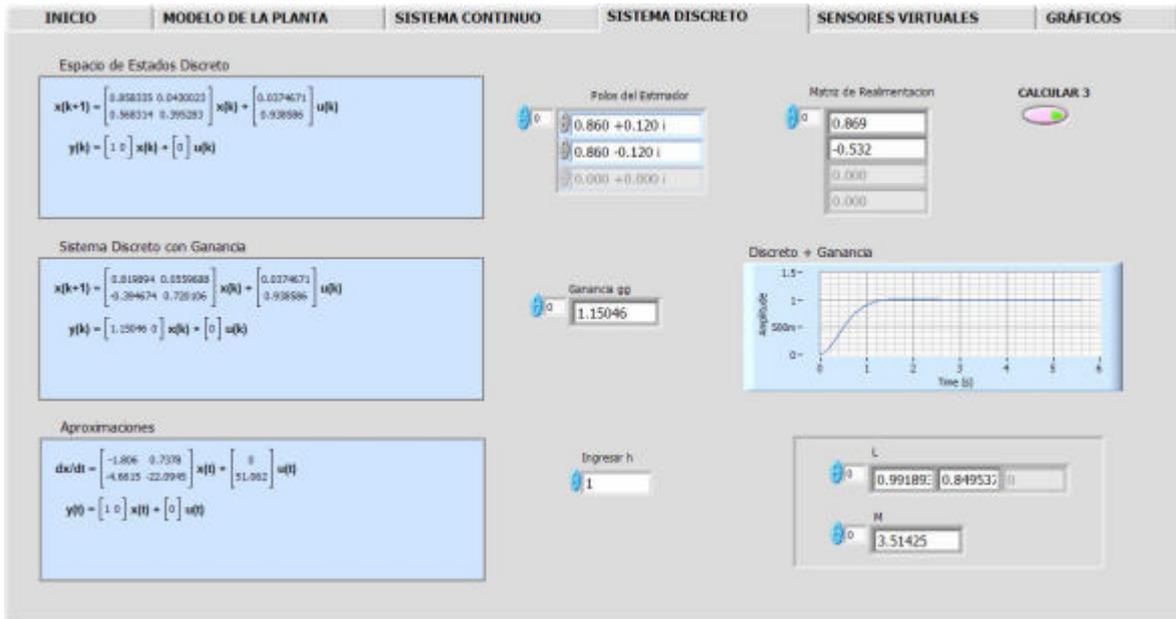


Figura. 5.14. Respuestas de la pantalla “Sistema Discreto”

La respuesta ante el escalón en Matlab se muestra en la figura 5.15, donde se puede apreciar que la relación entre el baño B1 y el reservorio B0 es de aproximadamente 1 a 4, lo cual se puede confirmar empíricamente simplemente mediante un análisis visual de los elementos en comparación.

Se debe destacar que la acción de control obtenida para el sistema implica a los subsistemas que se implementen, los cuales mantienen las particularidades de estabilidad pero según sus características propias, es decir, en este caso, el sistema es 1:4 por lo que se estabiliza en el valor aproximado de 4.

La implementación en Labview muestra para este caso las diversas estimaciones que puede generar el sistema. Adicionalmente, sustenta la respuesta obtenida en Matlab, debido que al cambiar los valores de entrada, ubicados ahora en 3, la respuesta del estimador se ubica en 7, manteniendo la diferencia de escalamiento de 4 puntos para el valor del estimador.

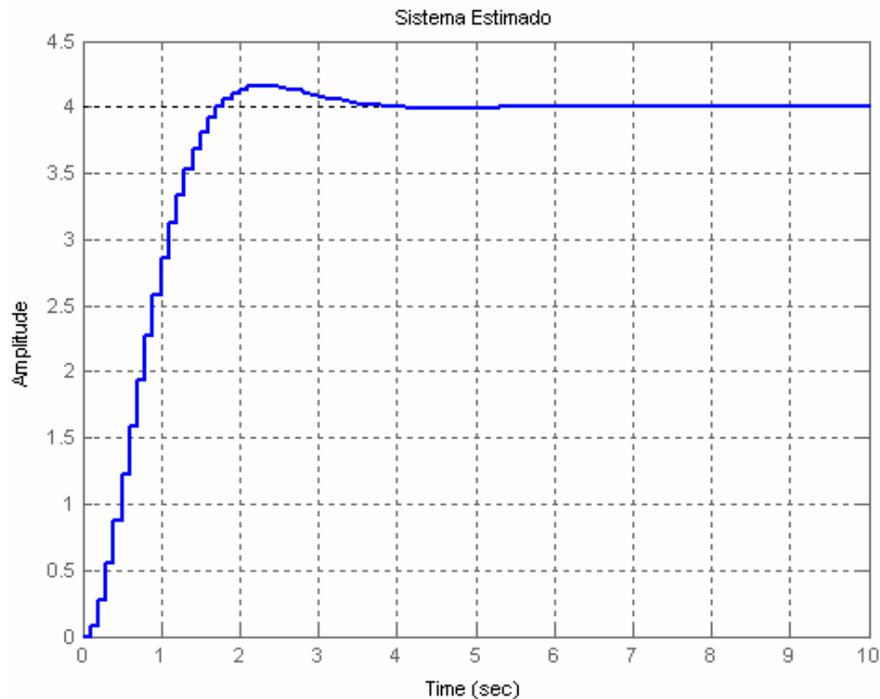


Figura. 5.15. Respuesta del estimador en Matlab

El gráfico de Trayectorias de Variables Estimadas de la figura 5.16, como su nombre lo dice, indica las diferentes trayectorias que se pueden desprender del sistema. Hay la posibilidad de obtener tres trayectorias que tengan un comportamiento similar a los valores de entrada y que según la variable que se vaya a estimar adoptaran características propias.

Por otra parte, el estimador tiene dos entradas que son u_k y y_k , las mismas que se representan de igual manera en la figura 5.16. La gráfica de trayectorias indica también el valor de u_k que se ubica en 2,7.

5.5 PRUEBA DE SENSORES VIRTUALES Y CONTROL EN EL ESPACIO DE ESTADOS EN LA ESTACIÓN PS-2800

5.5.1 Resultados

Finalmente, en la figura 5.17, se observa las diversas respuestas del sistema en estudio.

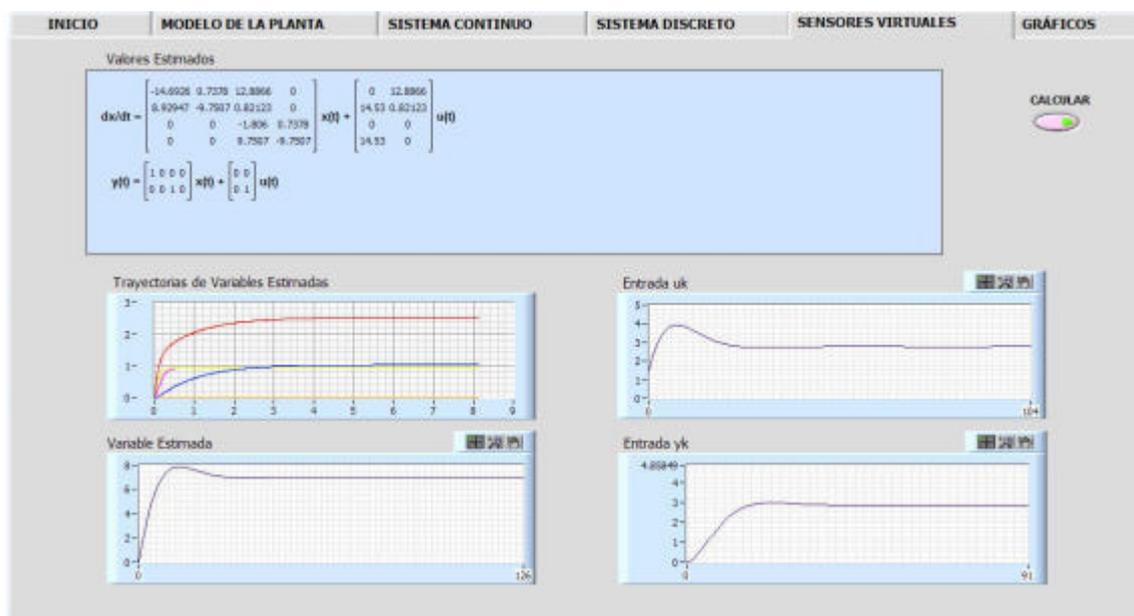


Figura. 5.16. Respuestas de la pantalla “Sensores Virtuales”

El modelo obtenido de la planta de Control de Procesos presenta un comportamiento que responde a un control PID establecido con anterioridad en la Estación, el mismo llega a su valor de SP establecido pero tras el paso de algún tiempo.

El control en el espacio de estados implementado posteriormente en la estación, permite eliminar esta deficiencia, logrando que la variable controlada llegue a estabilizarse con un menor tiempo y se observa una mejor acción de control.

La variable estimada que se indica en azul mantiene las mismas características de control del sistema pero se estabiliza en un valor de 4 como ya se había indicado con anterioridad.

También se debe destacar la respuesta obtenida mediante el análisis de aproximaciones, como se conoce solo requiere los valores continuos del sistema para determinar su respuesta discreta.

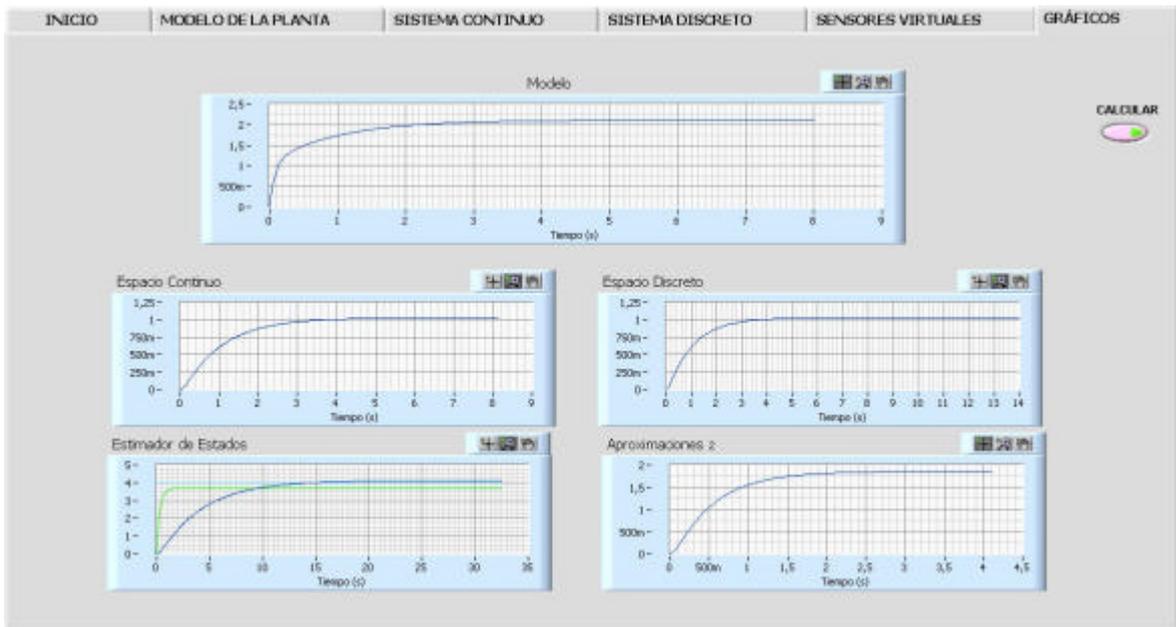


Figura. 5.17. Respuestas de la pantalla “Gráficos”

Referencias Bibliográficas:

- [12] PEDDLE, I.K., *Discrete Space State Control*, Abril 2006

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- El diseño de sensores virtuales requiere de una descripción en el espacio de estado de tal manera que sus variables tengan el significado físico de lo que se desea medir virtualmente.
- Las mediciones virtuales se consiguen a través de la estimación de estados mediante la reproducción de la dinámica de la planta teniendo como única información la salida que se desea controlar junto con la entrada del sistema.
- La estrategia de control utilizada fue la realimentación de estados estimados y el diseño a partir de la ubicación de polos.
- El modelo de función de transferencia permite hallar diferentes representaciones en variables de estado para un mismo sistema.
- Un sistema controlable encuentra una señal de control que hace variar el estado del sistema pasando de un estado inicial arbitrario a un estado final cualquiera.
- Un sistema observable reconstruye el vector de estado inicial a partir de las señales de entrada y de salida del sistema.

- Un sistema no es controlable o no es observable si hubo una cancelación de polos y ceros.
- El diseño por ubicación de polos permite ubicar los polos en cualquier lugar del plano complejo solo si el sistema es controlable.
- La realimentación de estados requiere conocer todas las componentes del vector de estado, razón por la cual para implementar un controlador basado en realimentación se desarrolla un estimador de estado para calcular de forma aproximada las variables de estado a partir de la entrada y salida de la planta.
- Un estimador de estado elemental se puede implementar mediante una simulación de la planta.
- Un estimador u observador rápido converge rápidamente, pero vuelve al sistema sensitivo ante los posibles errores de medida que pueden presentarse. La rapidez de la respuesta del estimador depende de la ubicación de los polos.
- Para que el error en estado estacionario tienda a cero exponencialmente la matriz de realimentación de estimador se calcula a partir del valor de polos estables.
- EL CIM es un laboratorio que abarca dentro de sus estaciones los lazos de control y sistemas que se encuentran a menudo en la industria.
- La estación de control de procesos PS-2800 es una buena fuente de pruebas debido a que maneja varios lazos de control muy útiles para realizar estudios y pruebas como es el lazo de control de nivel que por sus bondades permite ser desarrollado mediante varias técnicas de control.

- El estudio de interconexión de tanques es muy beneficioso para implementar sensores virtuales debido a que del valor que obtenemos del sensor ubicado en el un tanque podemos estimar la medida del sensor del otro tanque.
- El sistema en lazo cerrado tiene dos conjuntos de polos que son los polos del controlador y los del observador. Los polos del observador se calculan de tal manera que la parte real negativa sea menor que en los polos del controlador.
- La técnica de control en el Espacio de Estado no se puede aplicar directamente en un PLC utilizando las herramientas de programación conocidas. Para resolver este inconveniente se debe utilizar una técnica de escalamiento para que se puedan realizar los cálculos con valores negativos que requieren las ecuaciones del algoritmo del estimador definido para el sistema.
- El incluir un estimador a un sistema no modifica la dinámica de lazo cerrado, por lo tanto es posible diseñar por separado el controlador y el estimador tomando en cuenta que el sistema realimentado conserva por polos definidos por la ley de control con la adición de los polos del estimador.

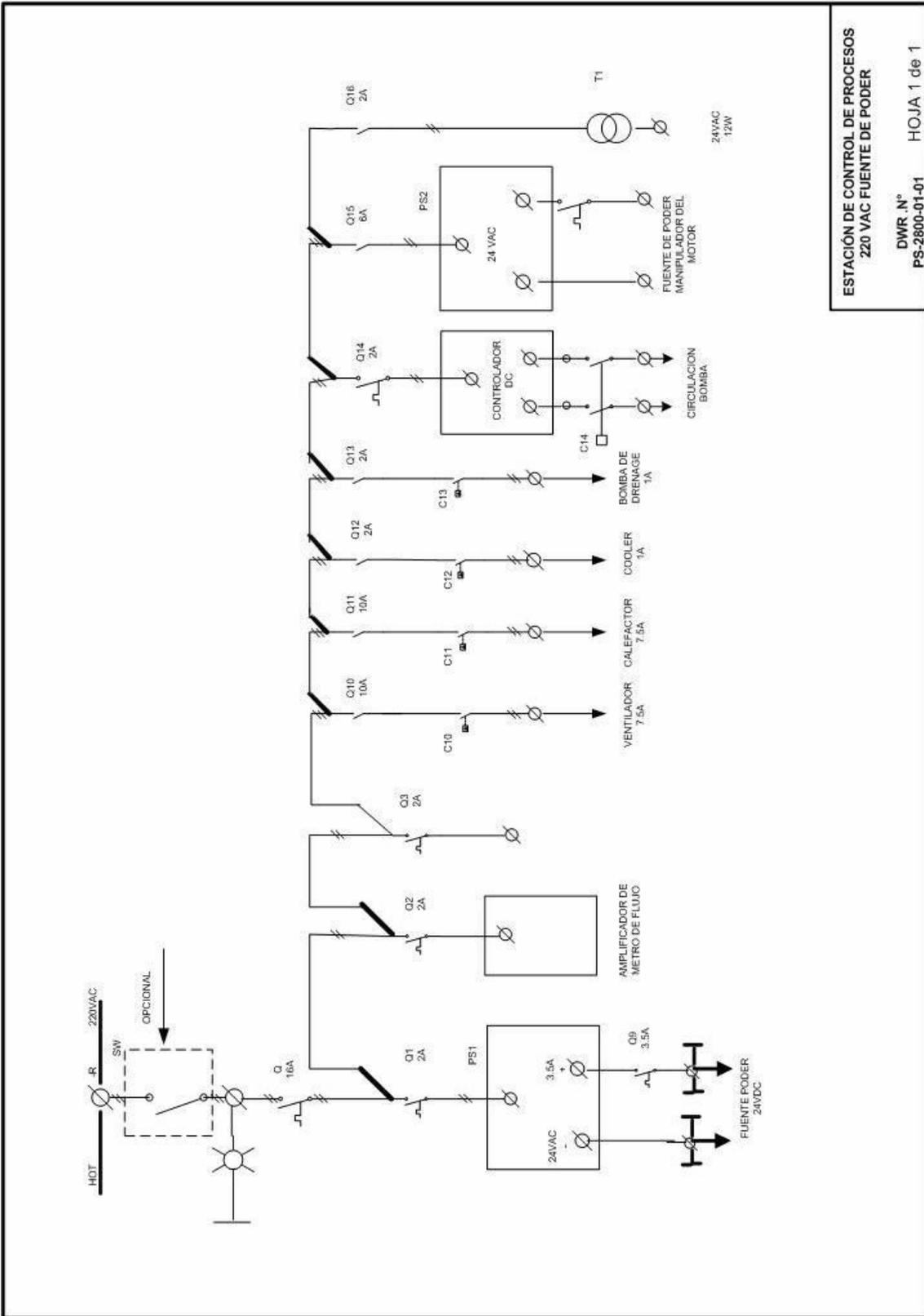
6.2 RECOMENDACIONES

- La mayor parte de procesos en una industria utilizan como controlador un PLC, razón por la cual, se recomienda que se analice la técnica de escalamiento, debido a que de esta manera se podrán implementar más rutinas de control que satisfagan las necesidades de un mayor número de plantas.
- La técnica estudiada debería ser implementada en una planta de nivel para de esta manera determinar que las simulaciones que se realizaron de la misma son correctas y para realizar la comparación con un control PID.

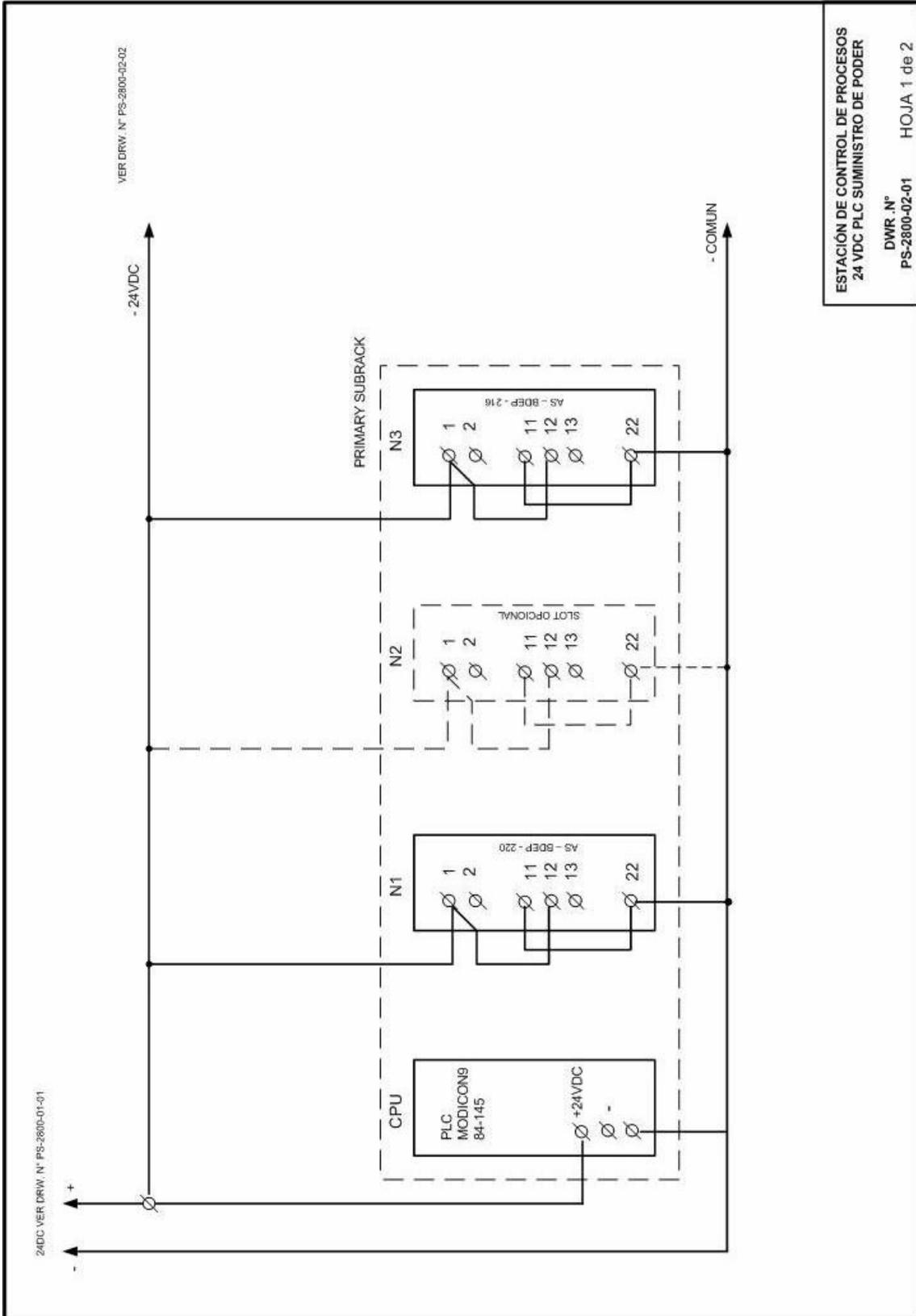
- Se recomienda que al utilizar el programa realizado en Labview se establezcan con anterioridad los polos del sistema debido a que este programa realiza un barrido continuo y requiere que se hayan establecidos todos los parámetros.
- Se recomienda realizar una implementación de sensores virtuales cuyo objetivo sea el establecer una comparación con valores de sensores reales para determinar su precisión y exactitud.

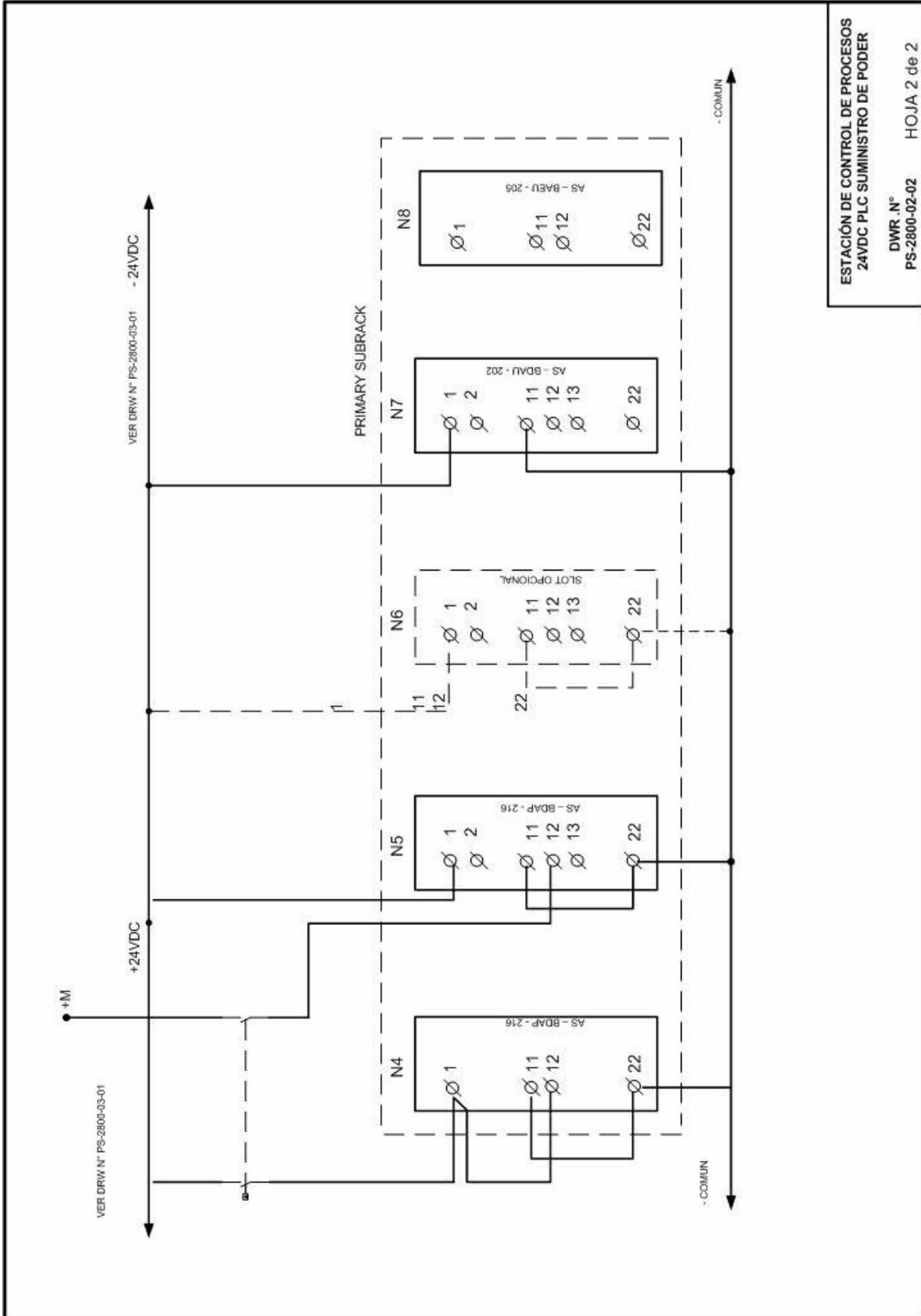
ANEXO I

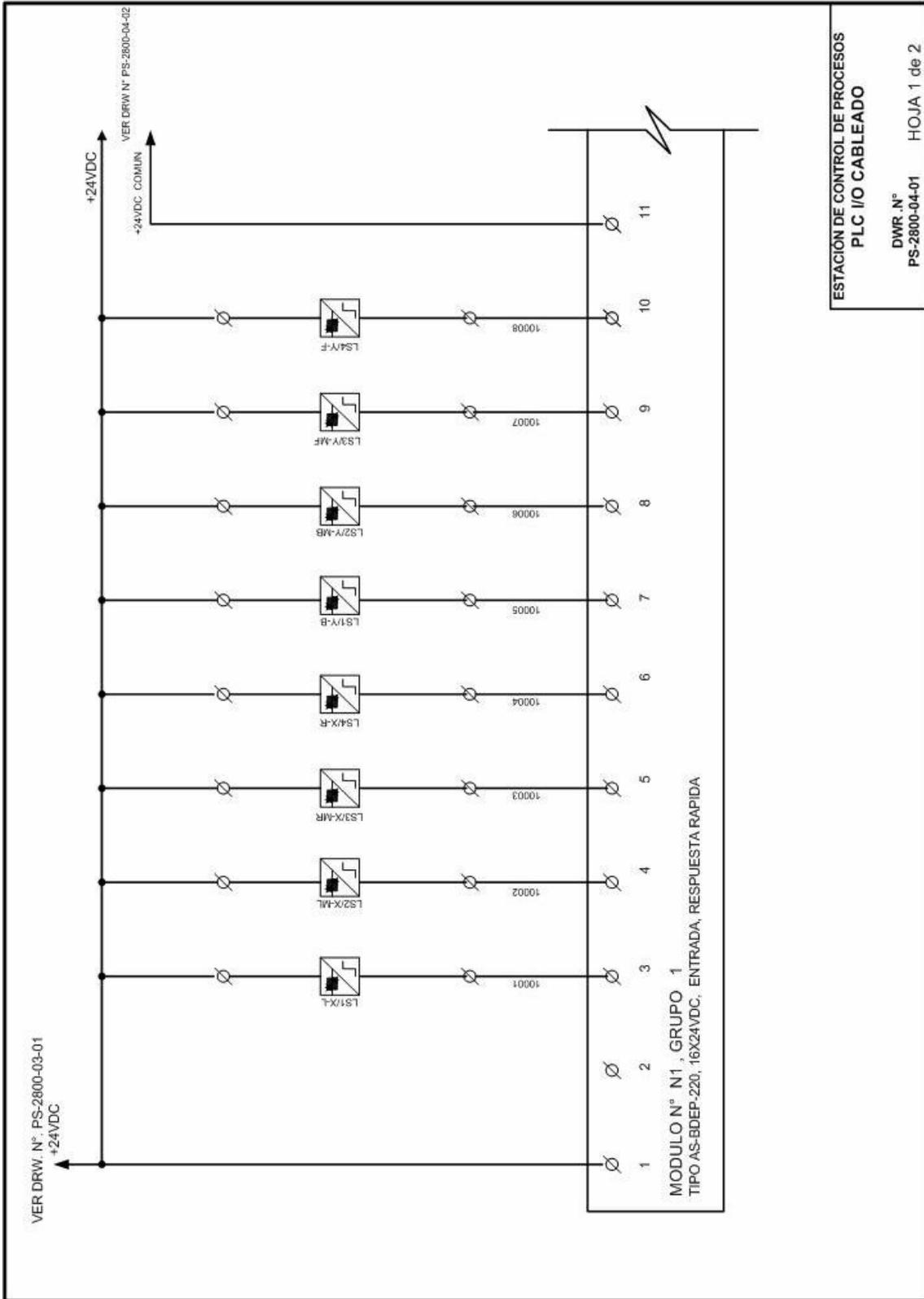
DIAGRAMAS DE LA ESTACION PS-2800

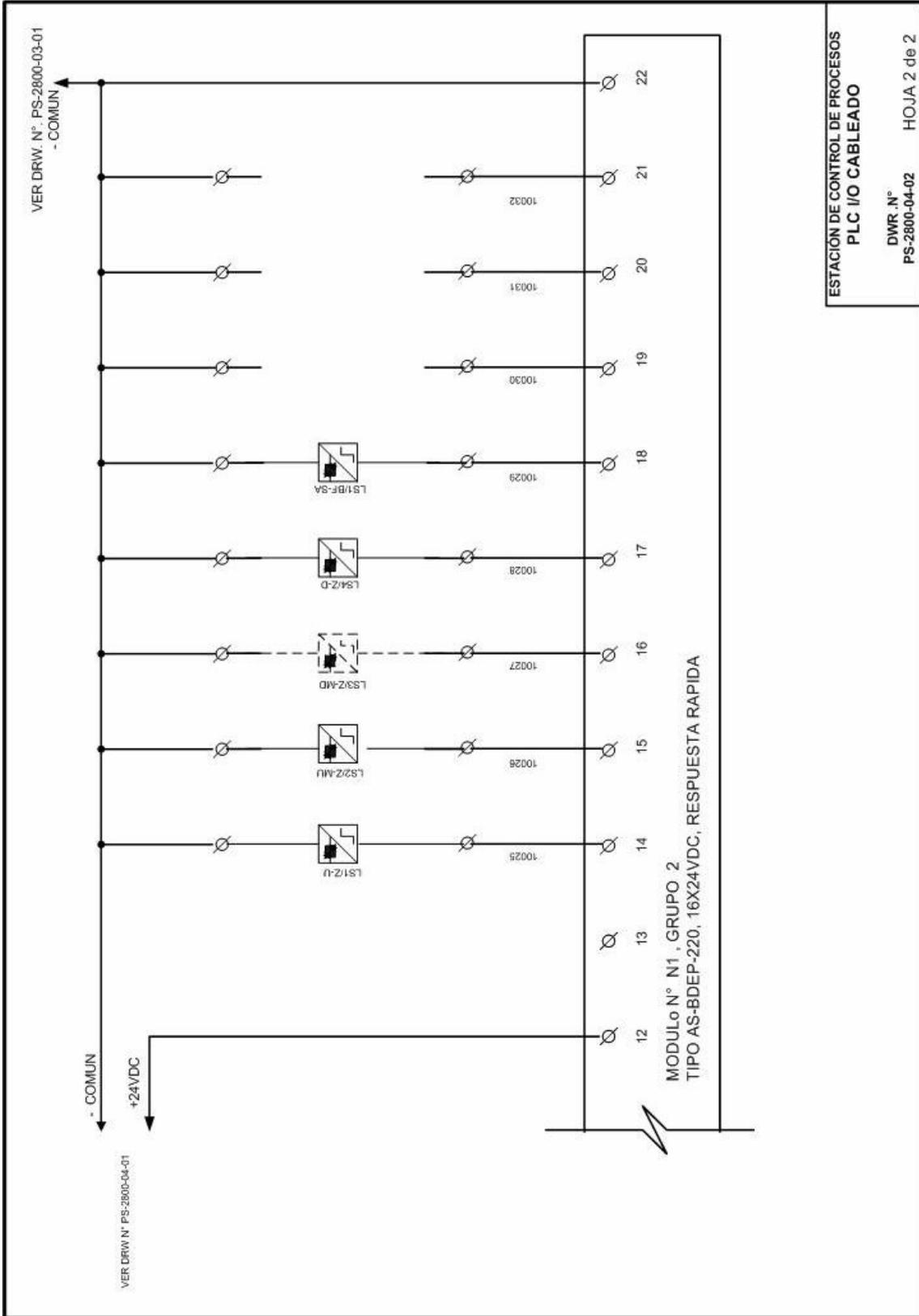


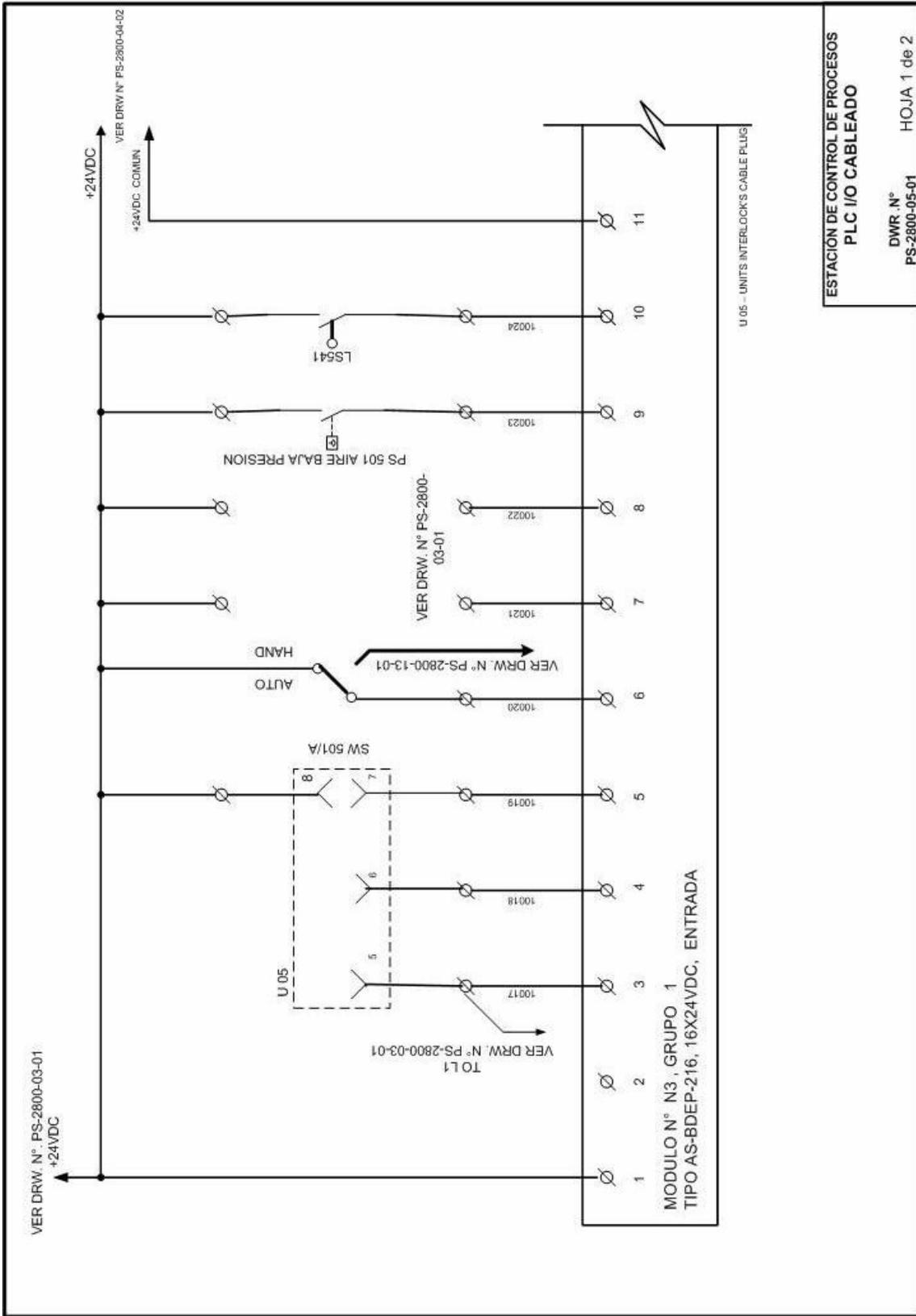
ESTACION DE CONTROL DE PROCESOS
220 VAC FUENTE DE PODER
DWR. N° PS-2800-01-01 HOJA 1 de 1

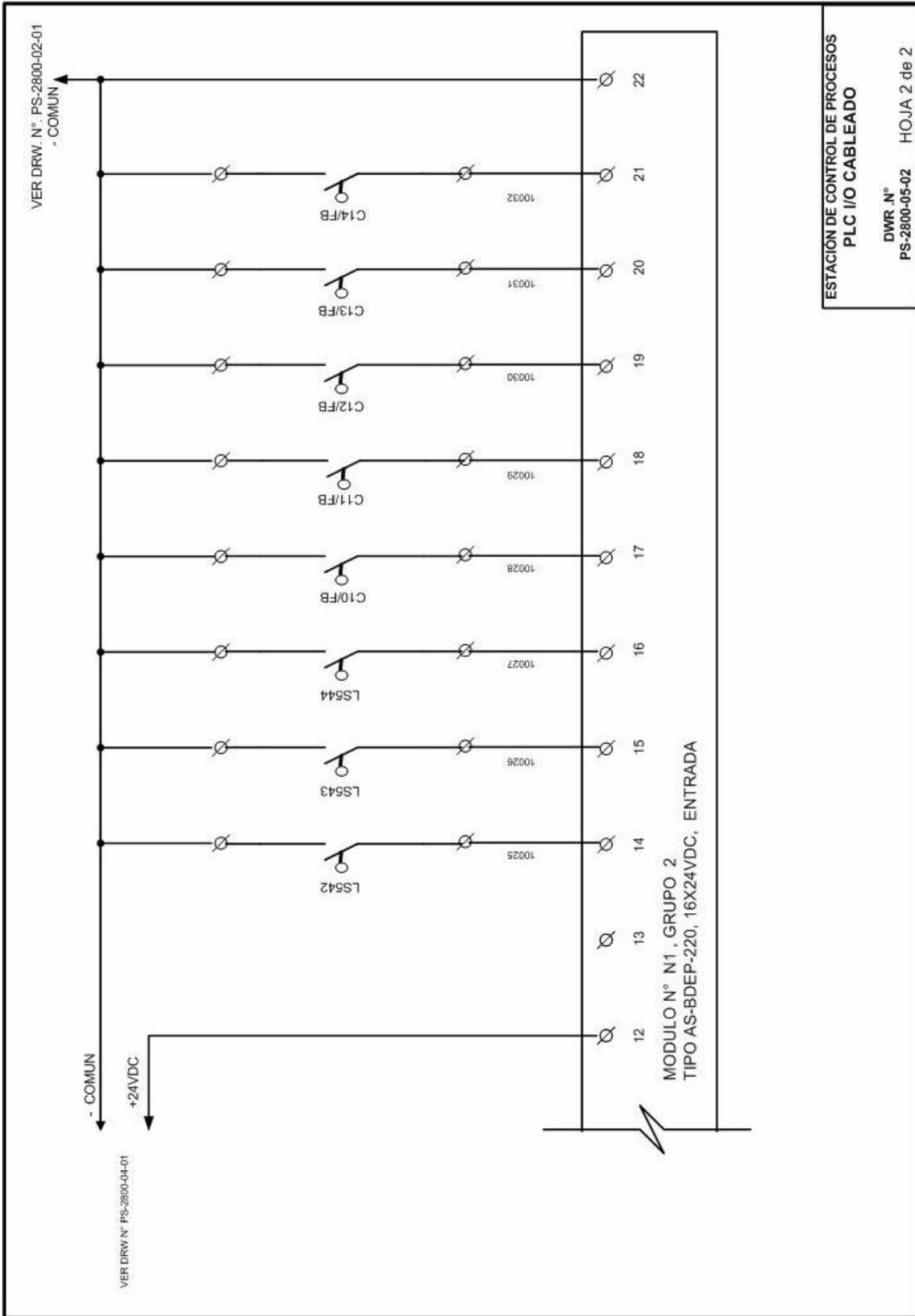


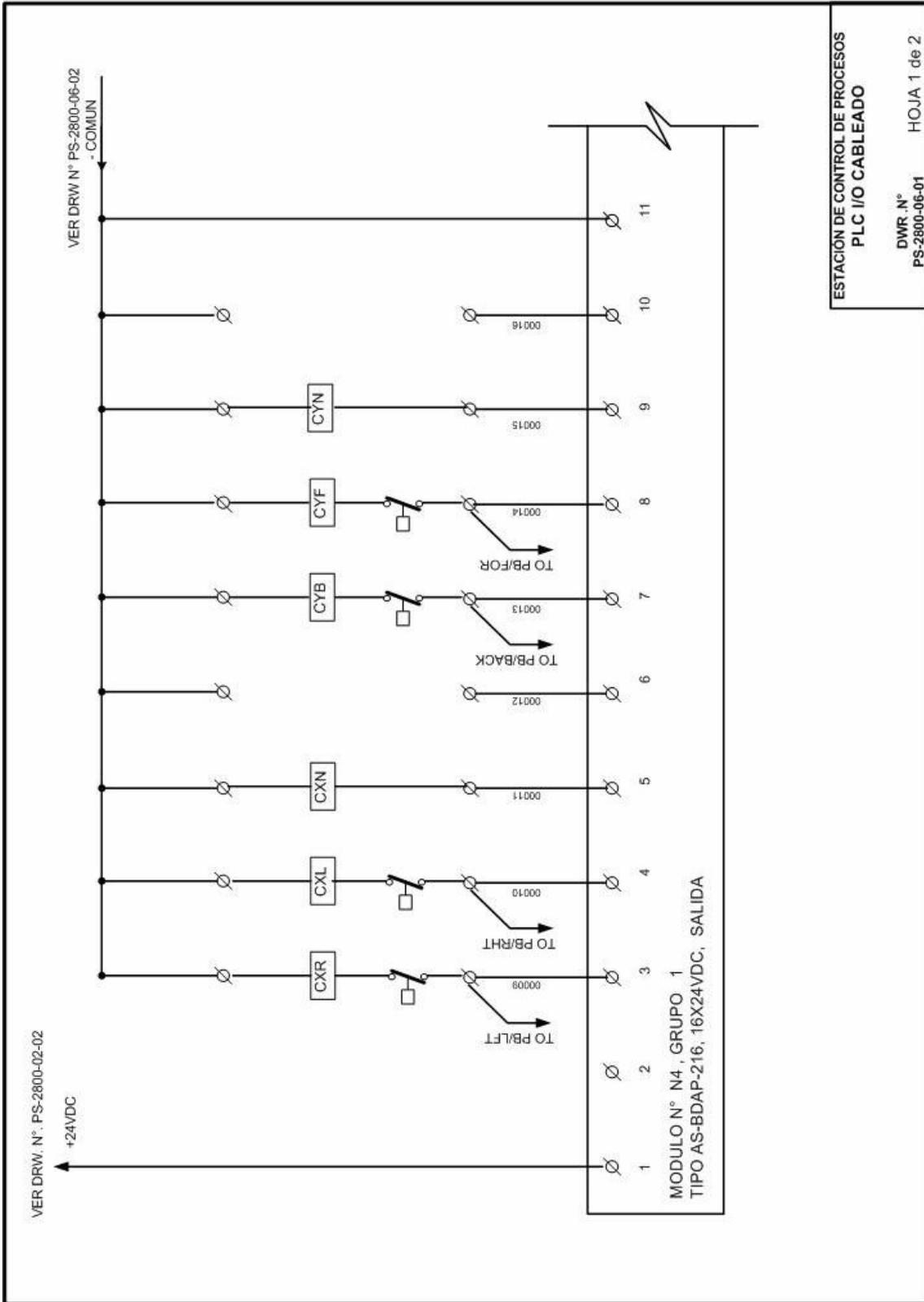


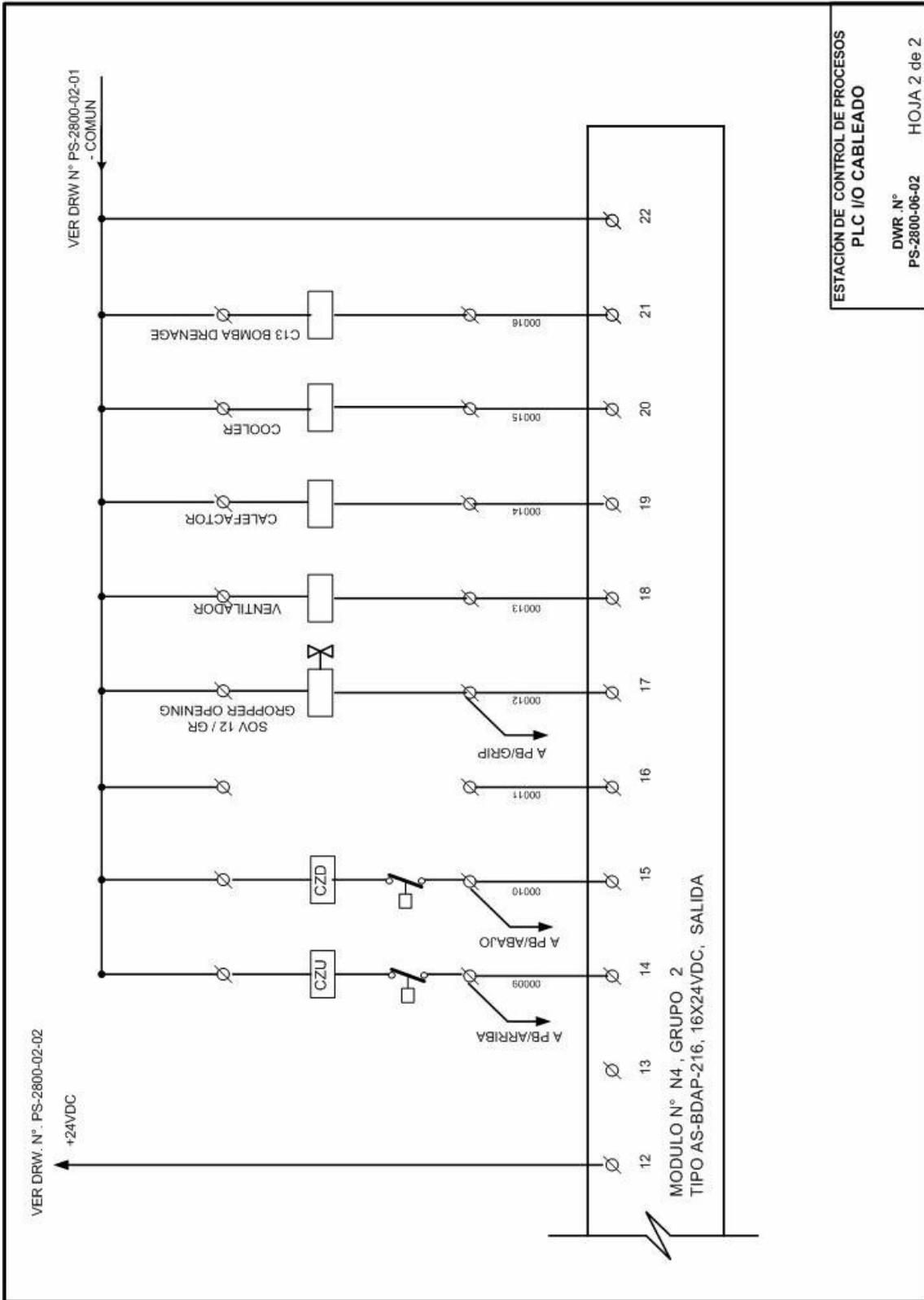


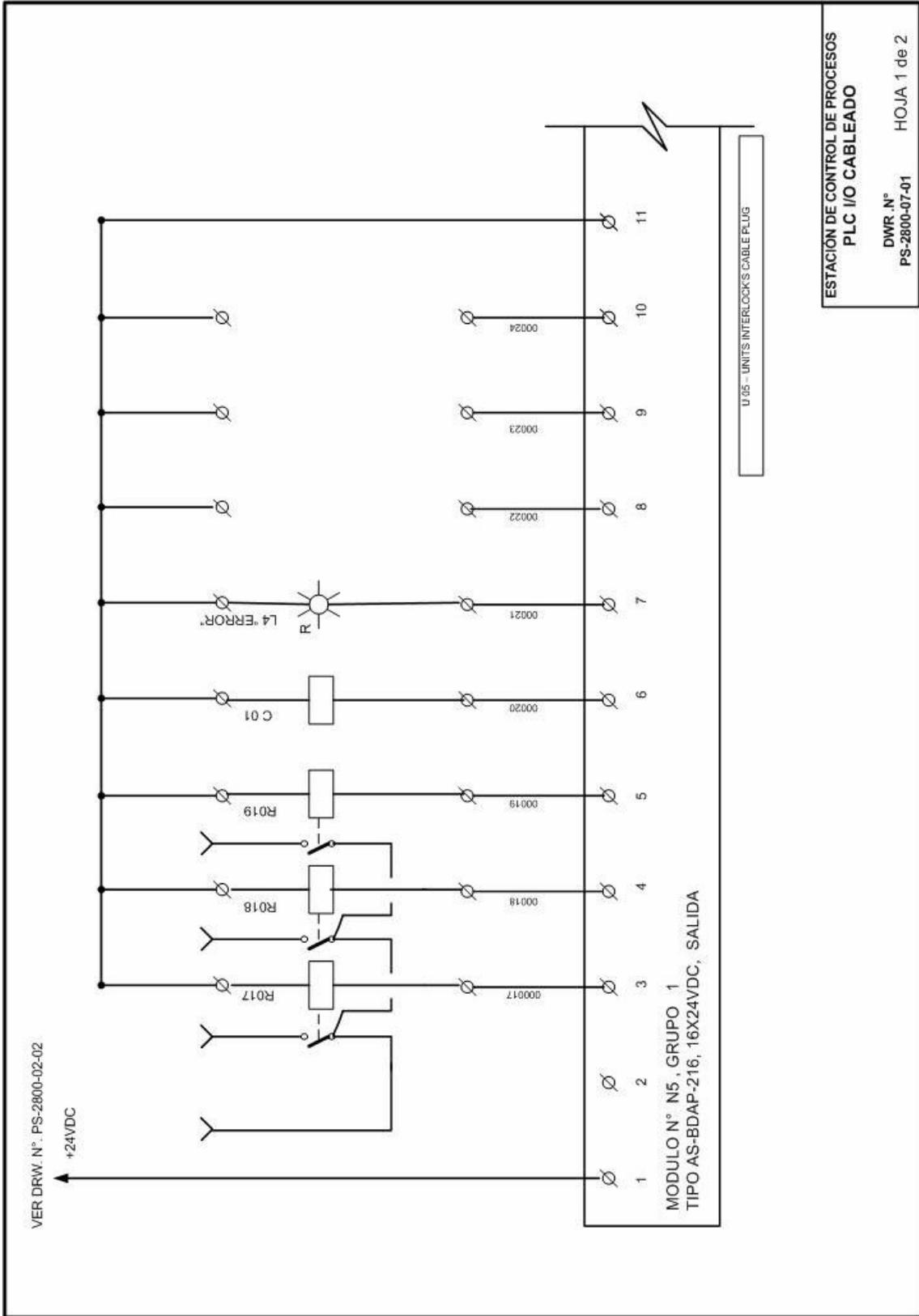


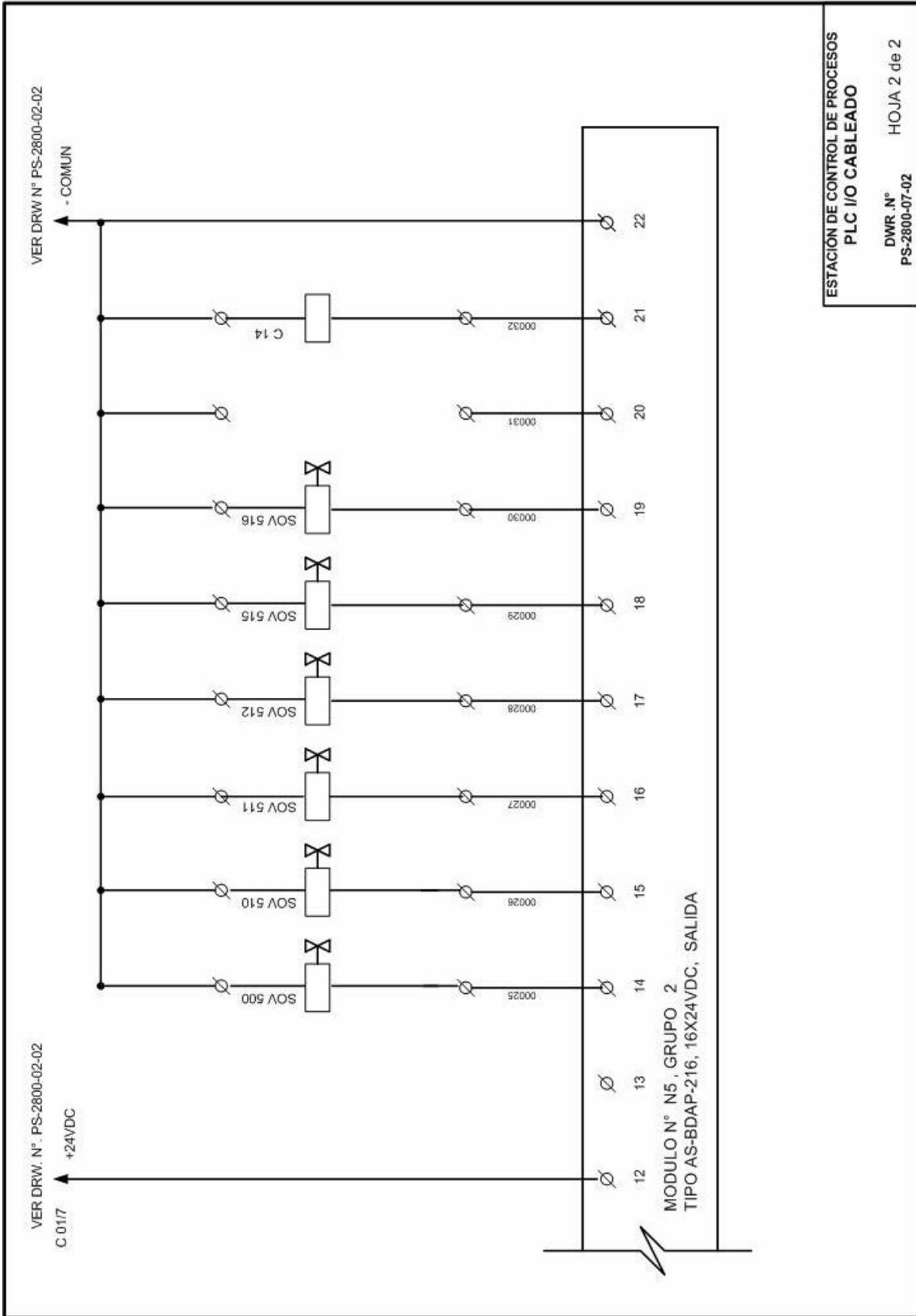


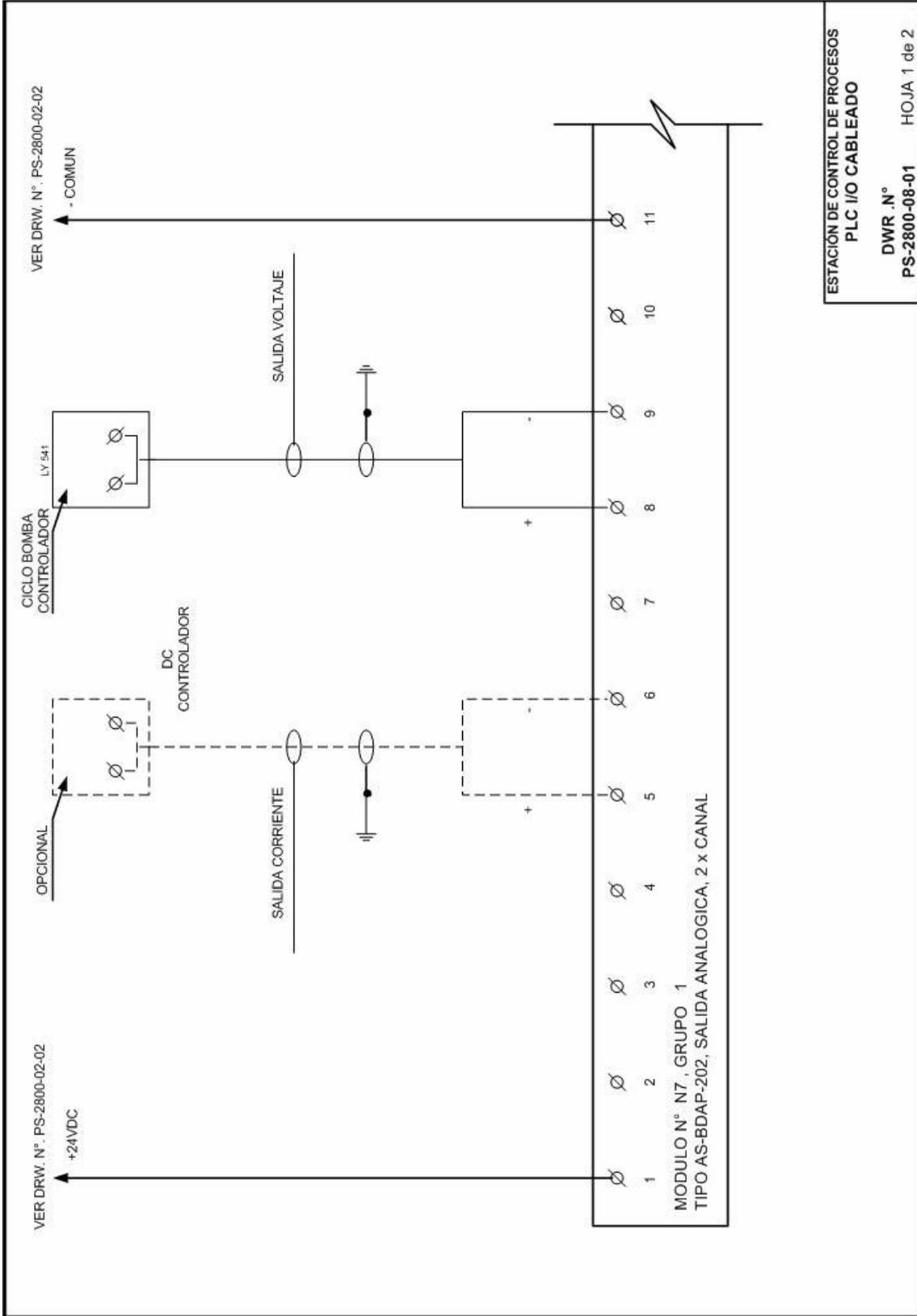


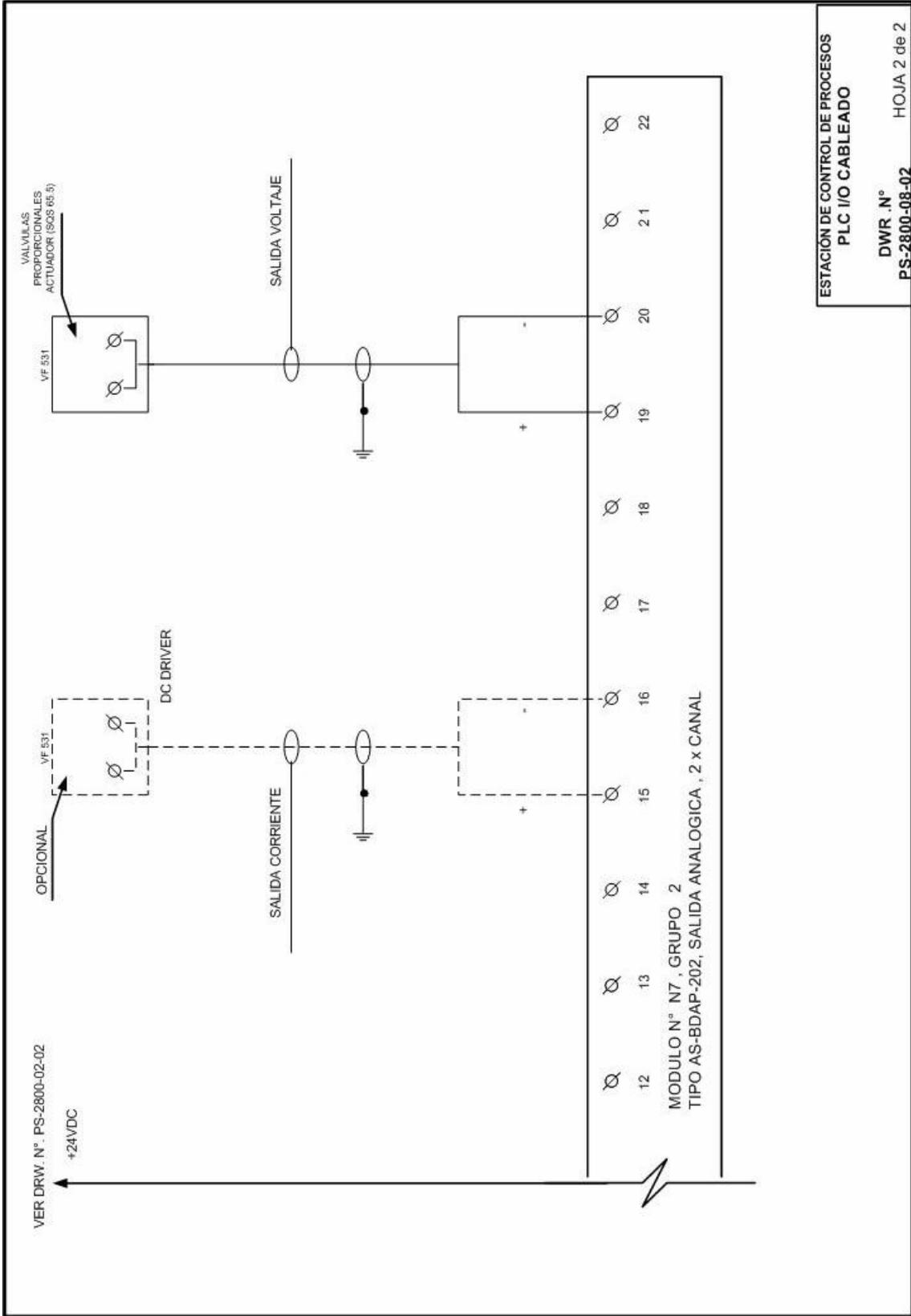


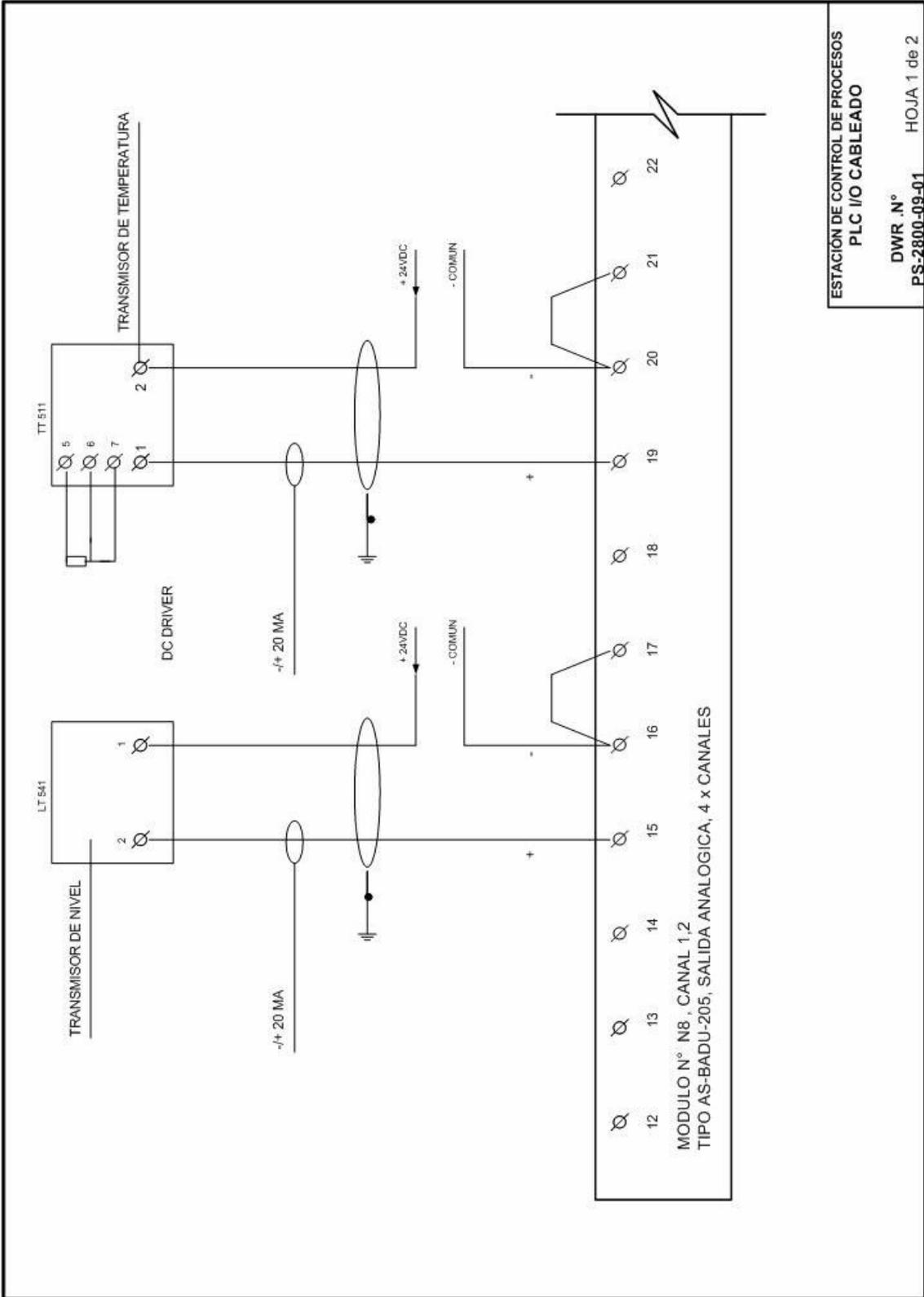


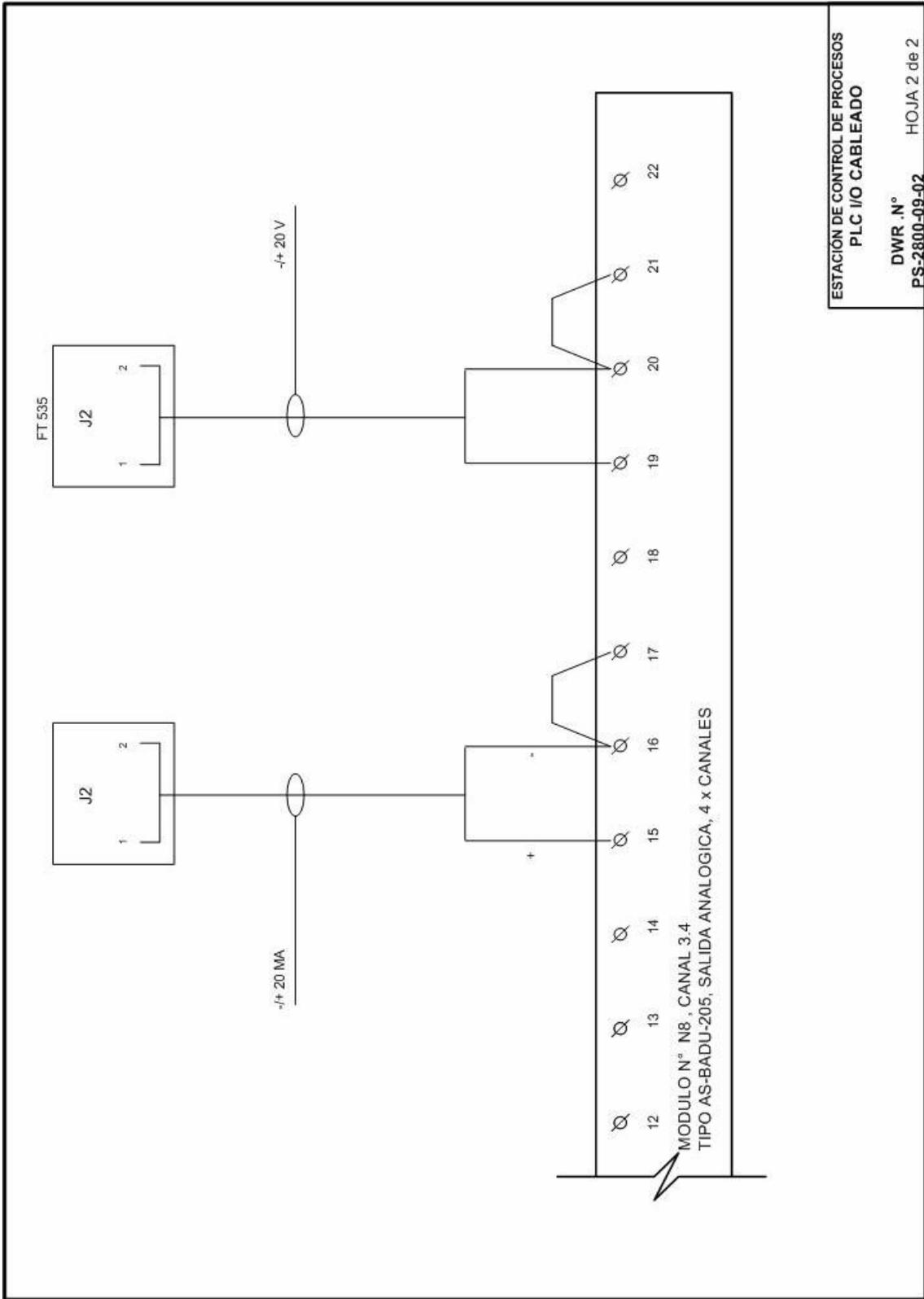


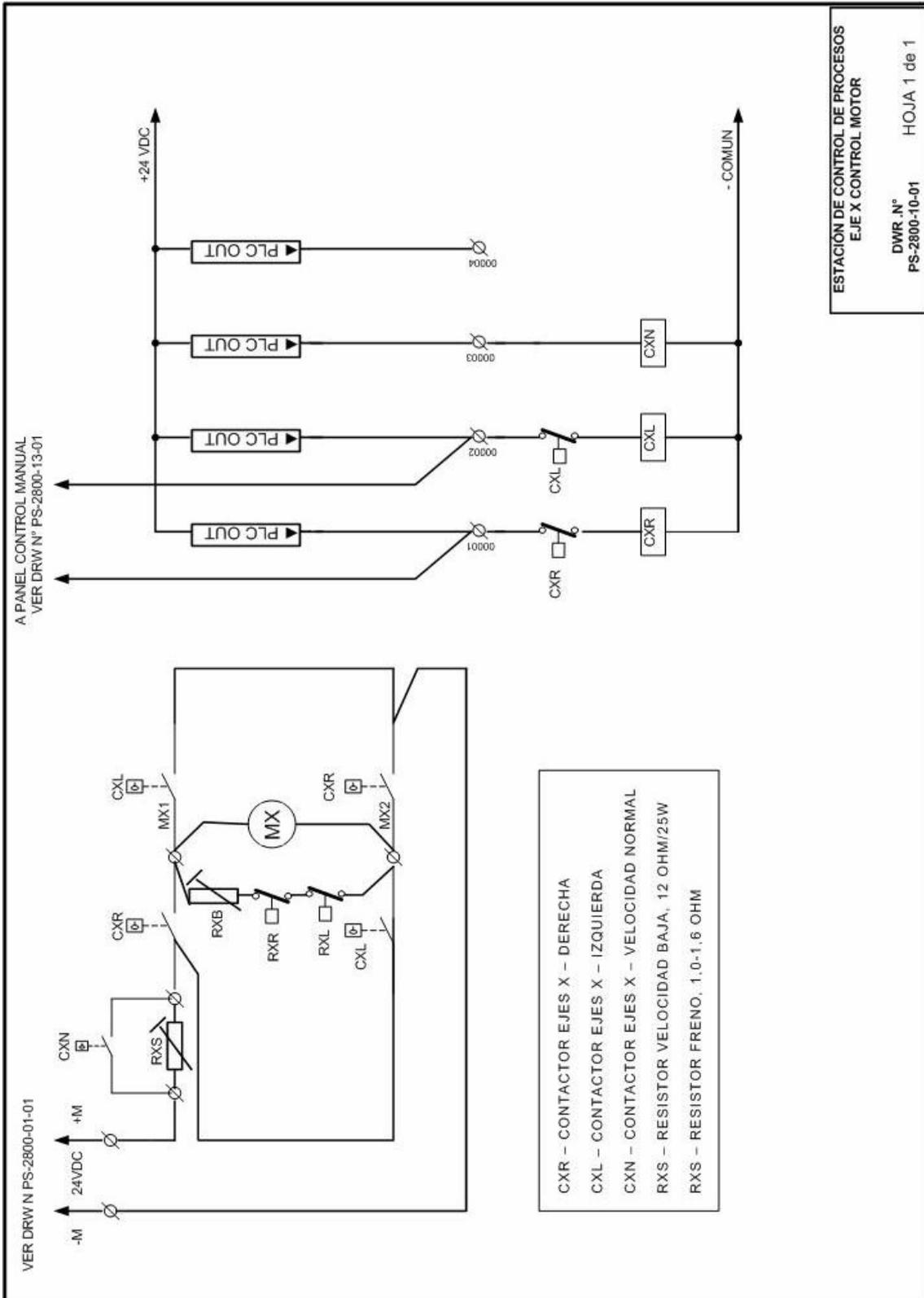


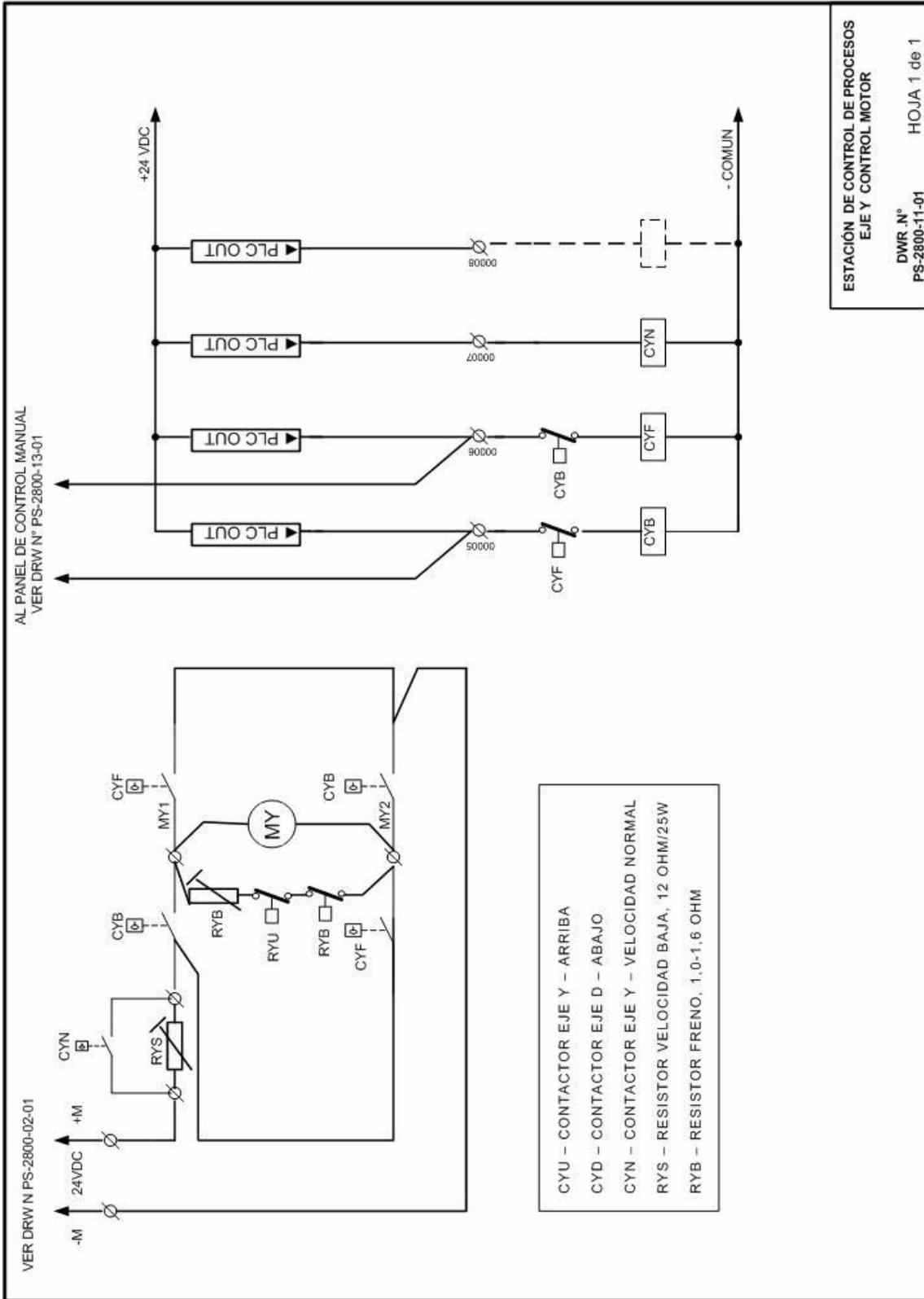


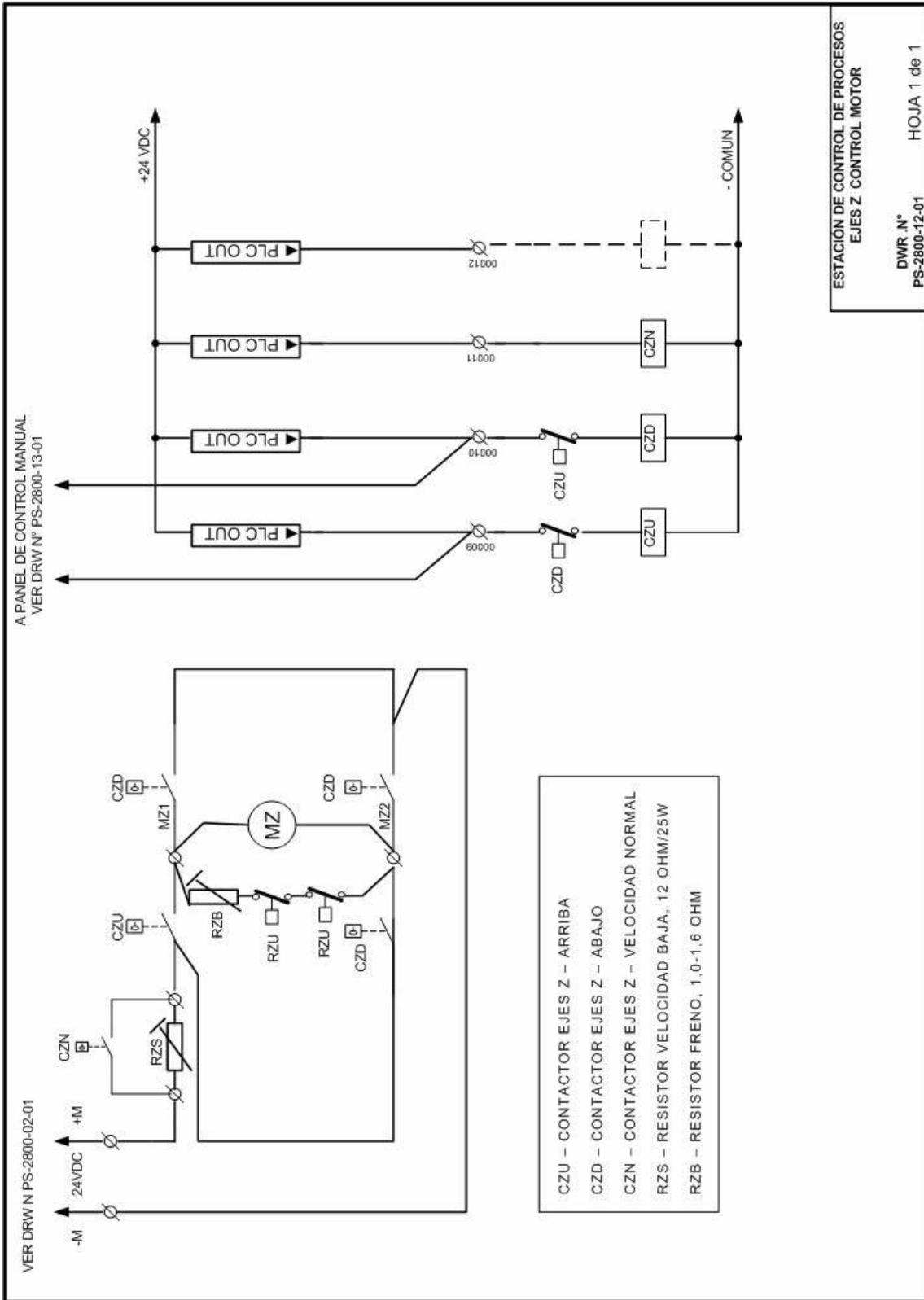


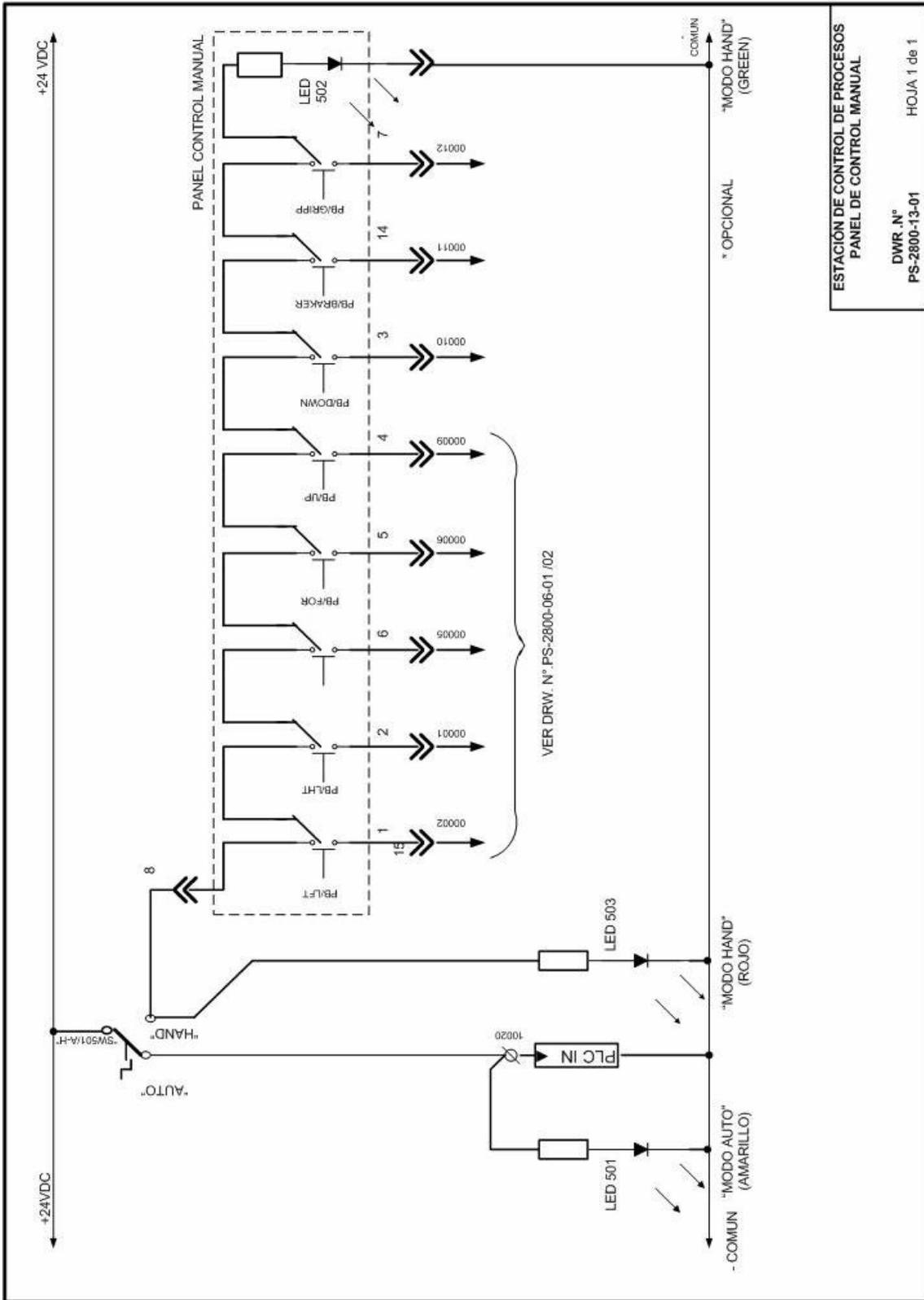


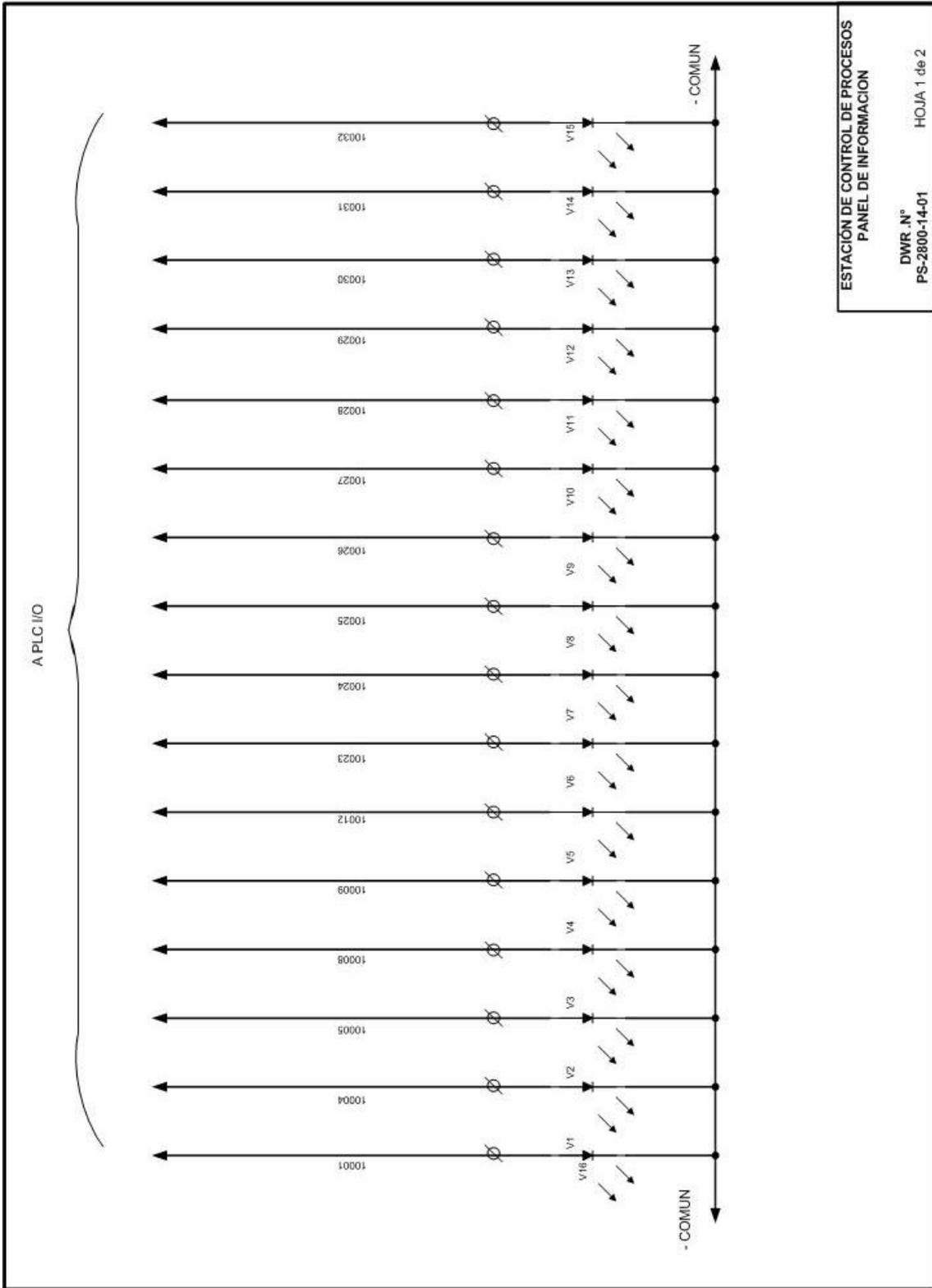


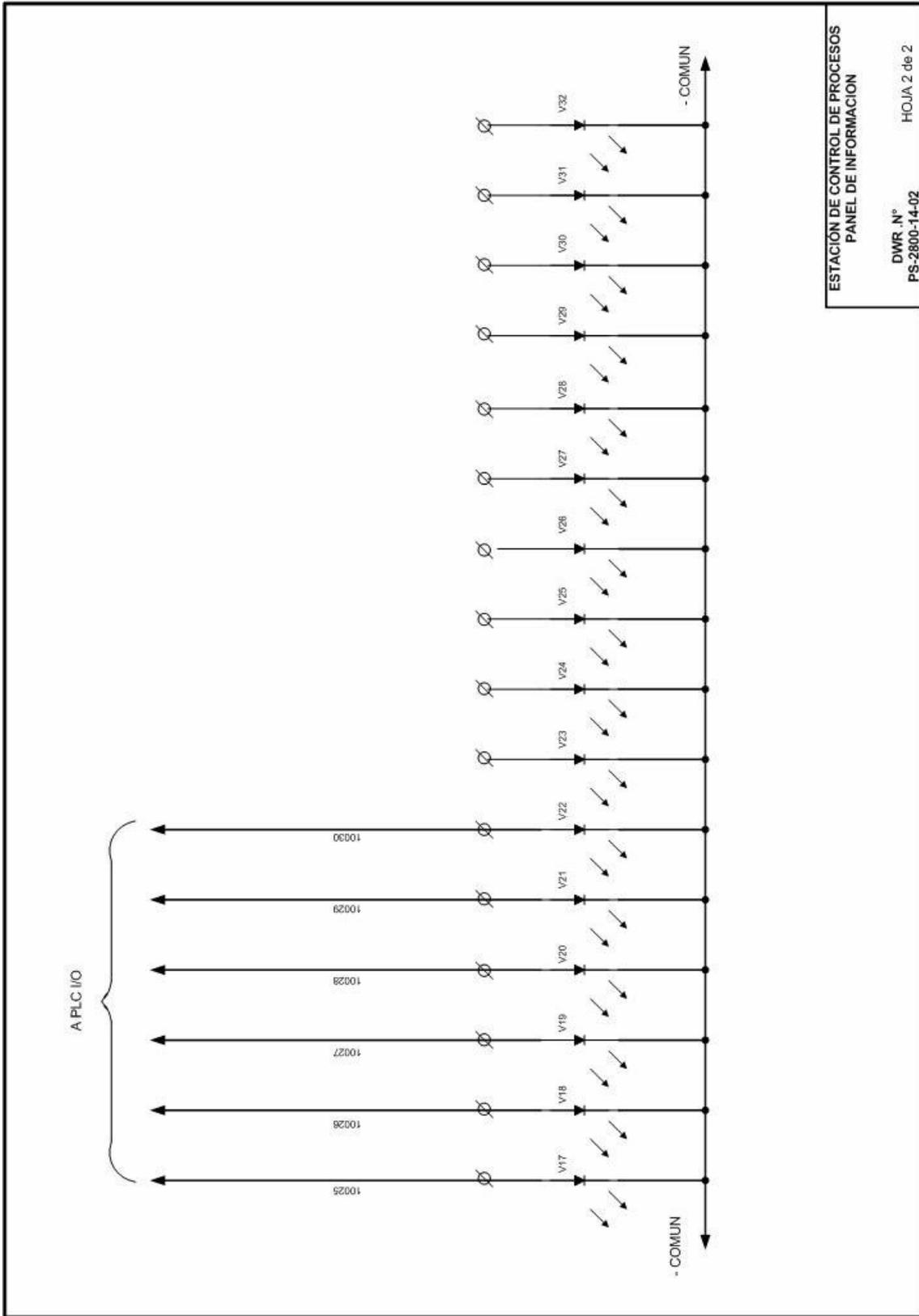




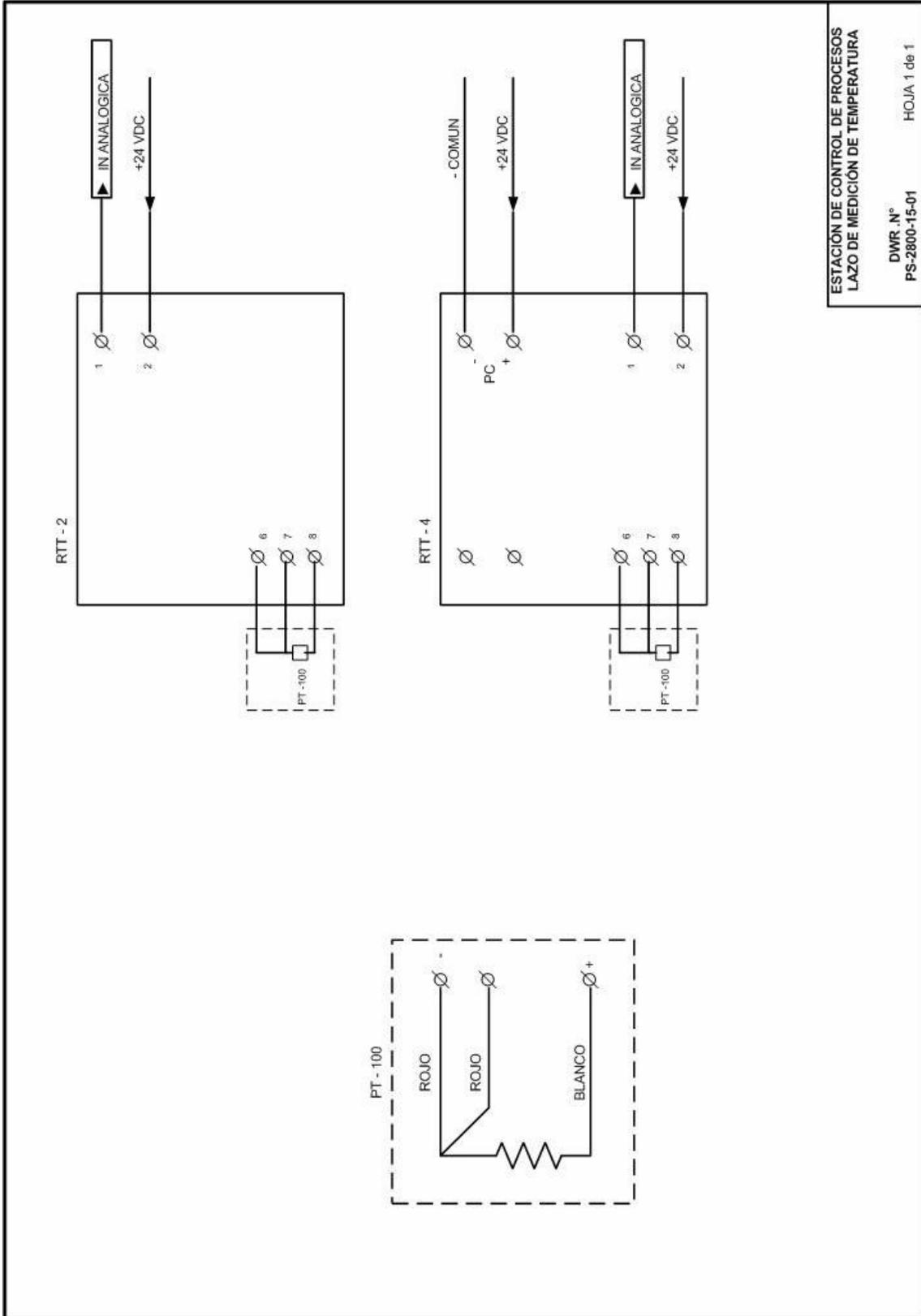


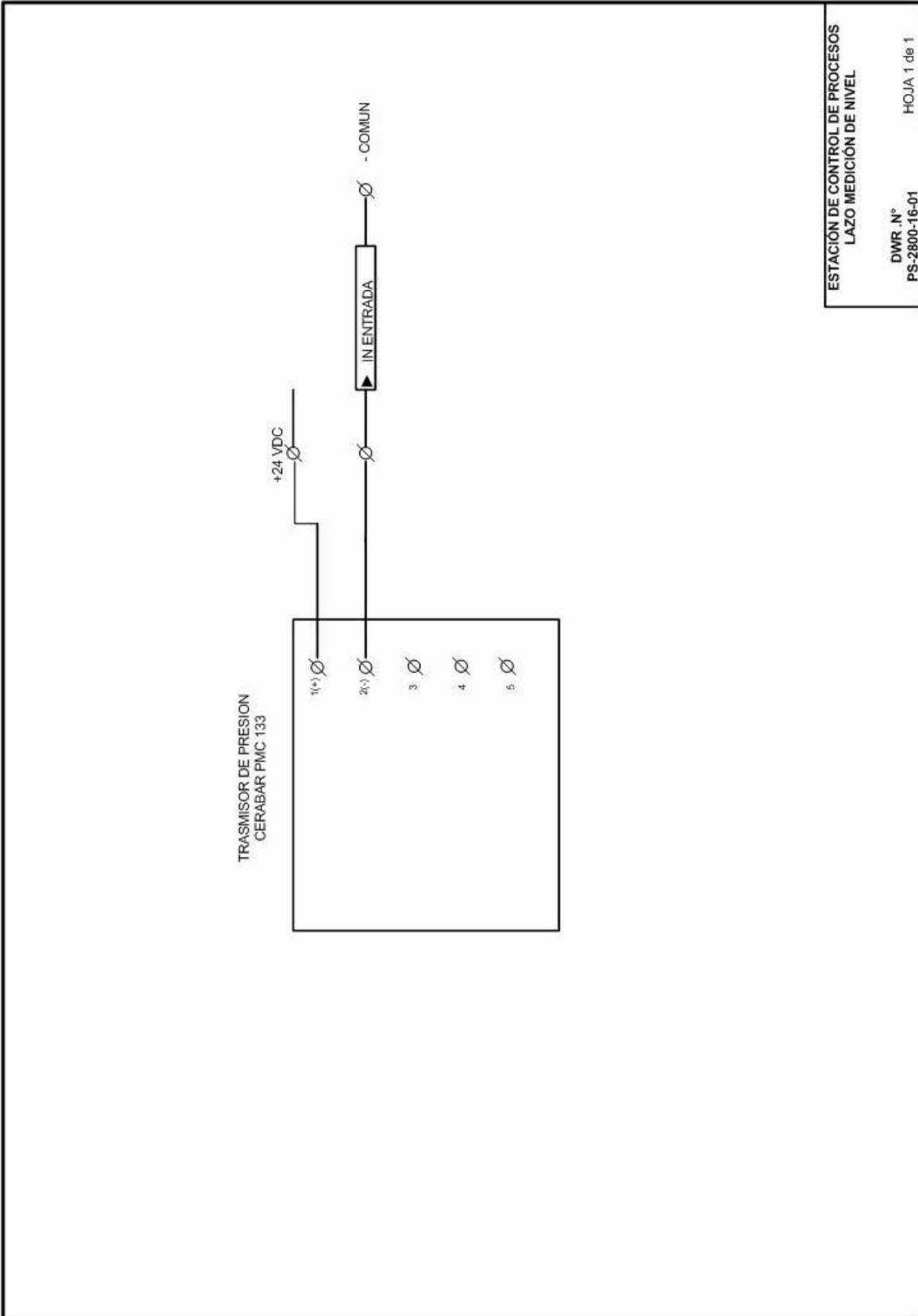


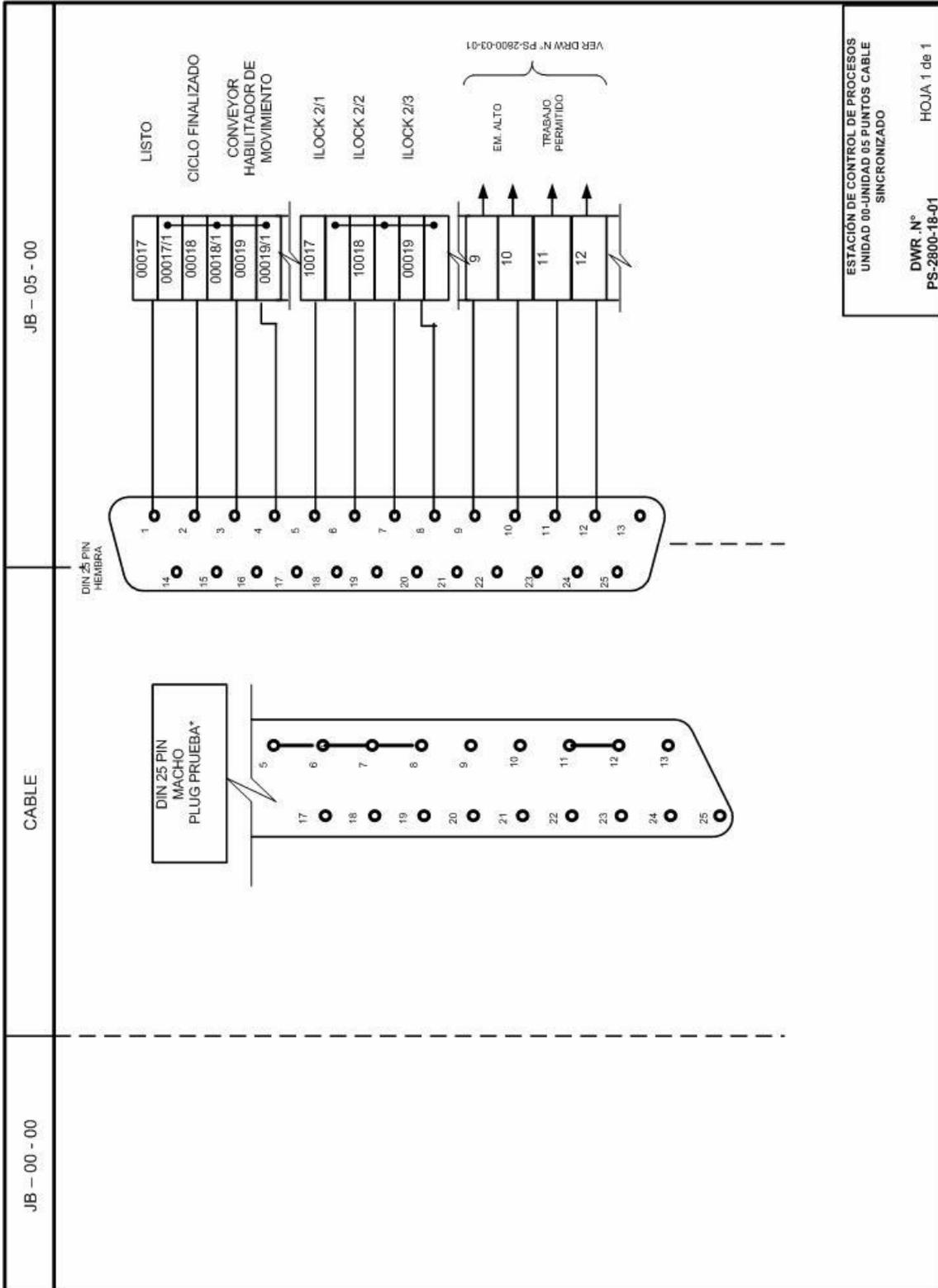


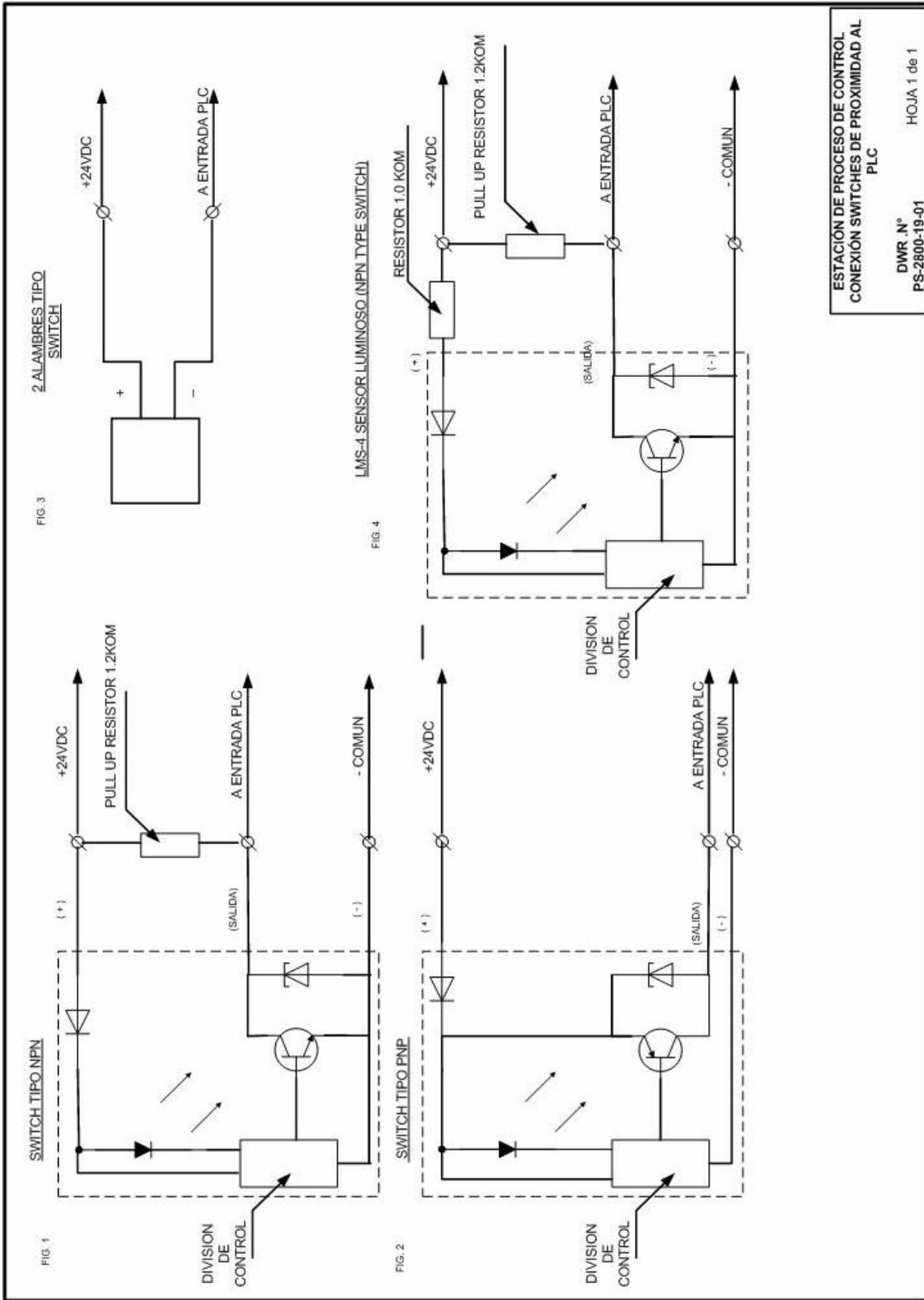


ESTACION DE CONTROL DE PROCESOS
PANEL DE INFORMACION
DWR N°
PS-2800-14-02 HOJA 2 de 2

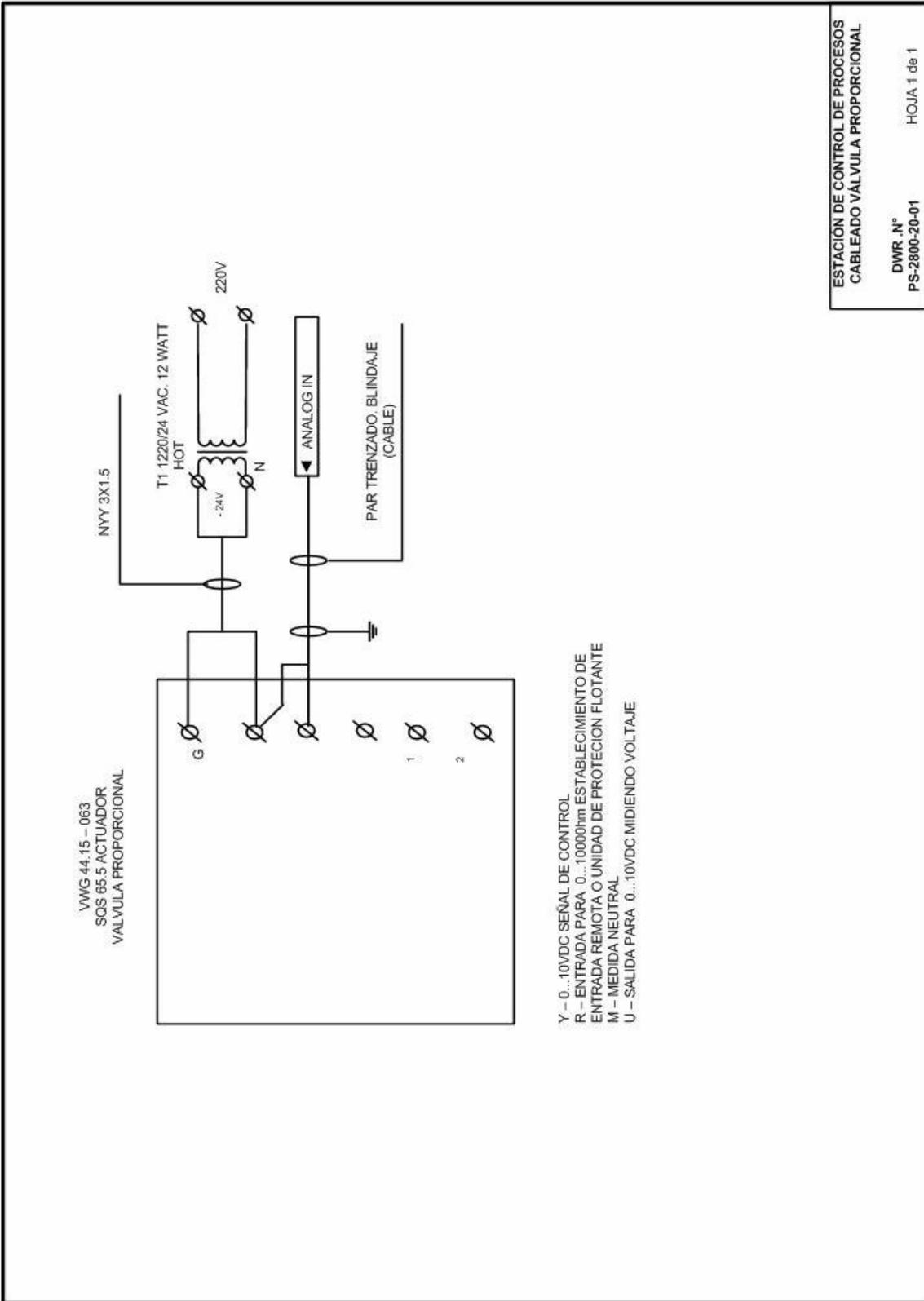


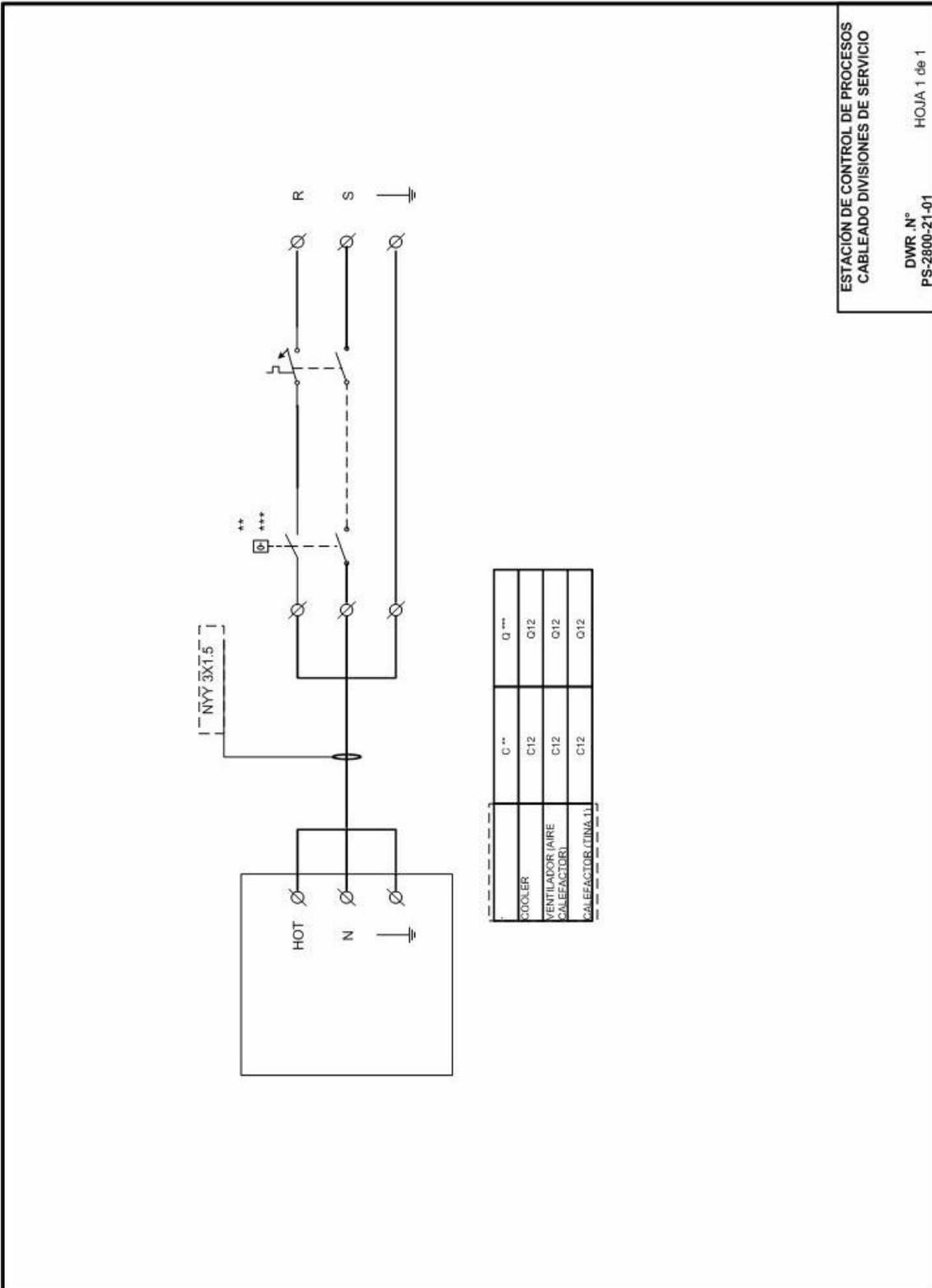






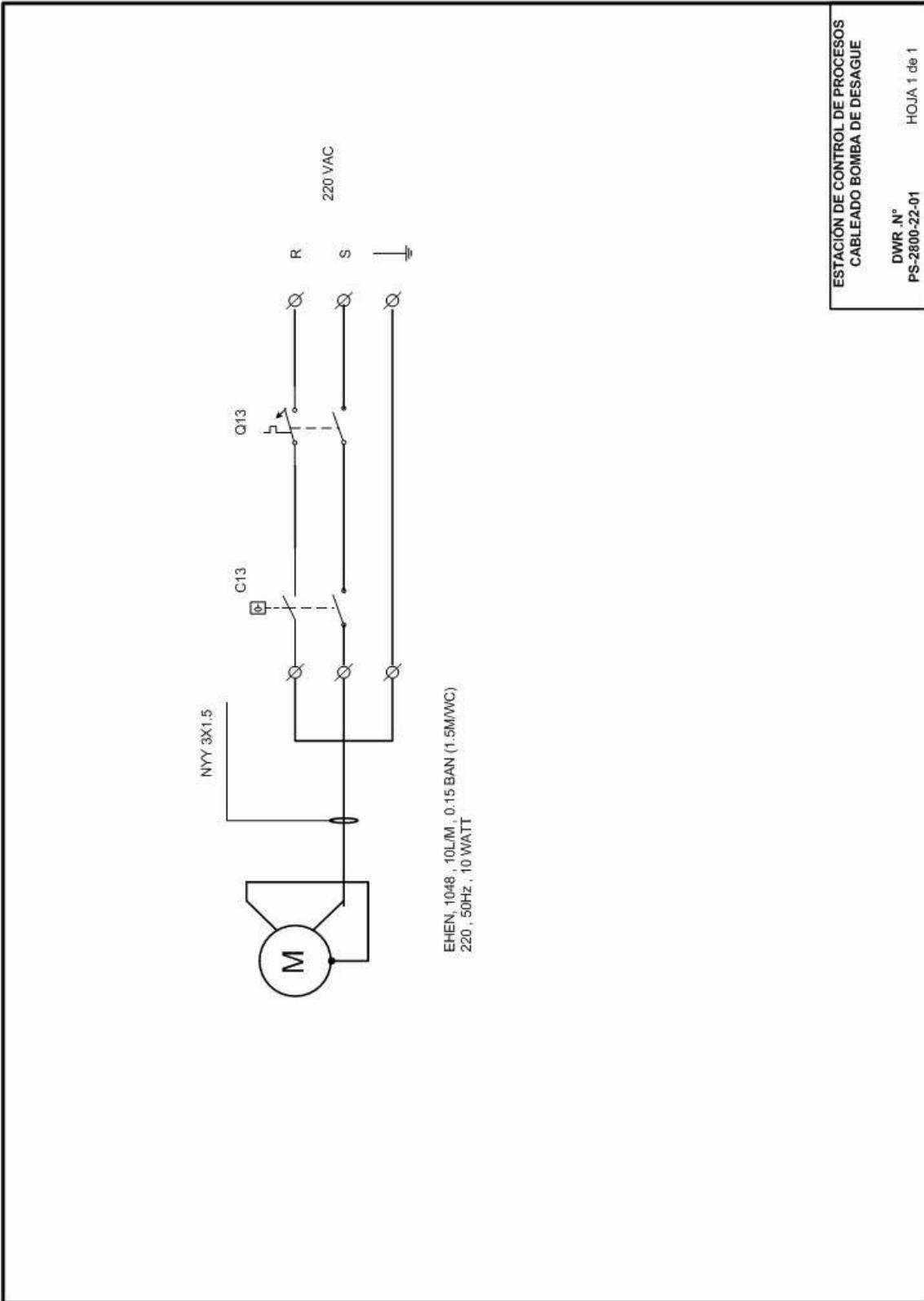
ESTACION DE PROCESO DE CONTROL
 CONEXION SWITCHES DE PROXIMIDAD AL
 PLC
 DWR. N°
 PS-2800-19-01
 HOJA 1 de 1

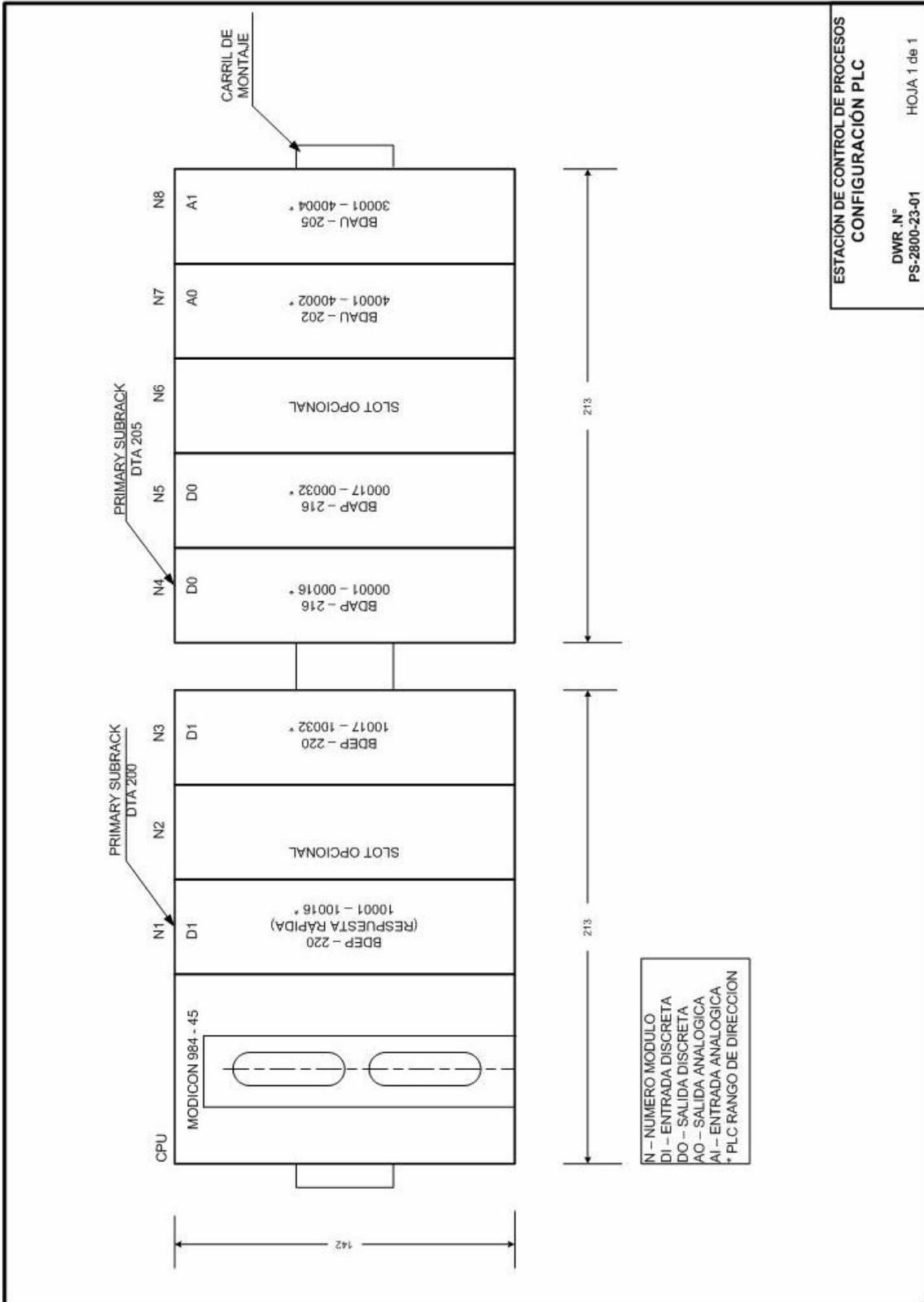




ESTACION DE CONTROL DE PROCESOS
 CABLEADO DIVISIONES DE SERVICIO

DWR, N° PS-2800-21-01 HOJA 1 de 1





ANEXO II

PROGRAMAS EN MATLAB

estado.m

```
function [mm]=estado(w);
global yk uk x1k x2k x1kp1 x2kp1 ek ye

uk=w(1);
yk=w(2);
t=w(4);
sp=w(3);
k1=1.0232;
k2=-0.34513;
gg=1.1473;

if t==0
    uk=gg*sp;
    ek=yk;
    x1kp1= 0.0376*uk-0.46638*ek;
    x2kp1=0.9418*uk+5.9253*ek;
    x1k=x1kp1;
    x2k=x2kp1;
end

if t>0
    ek=yk-x1k;
    %Ley de control
    uk=-k1*x1k-k2*x2k+gg*sp;
    %Ecuación del estimador
    x1kp1=0.8583*x1k+0.043*x2k+0.0376*uk-0.46638*ek;
    x2kp1=0.5683*x1k+0.3953*x2k+0.9418*uk+5.9253*ek;
    x1k=x1kp1;
    x2k=x2kp1;
end

mm=[uk;x2k];
```

p3.m

```
ac=[-1.806 0.7378;9.7507 -9.7507];
```

```
bc=[0;14.58];
```

```
cc=[1 0];
```

```
d=[0];
```

```
sysc=ss(ac,bc,cc,d);
```

```
sysd=c2d(sysc,0.1);
```

```
[a,b,c,d]=ssdata(sysd)
```

```
P=[0.77+j*0.14;0.77-j*0.14];
```

```
%Diseño del realimentador de estados
```

```
k=acker(a,b,P)
```

```
%Diseño del estimador
```

```
PL=[0.86+j*0.12;0.86-j*0.12];
```

```
Lp=acker(a',c',PL)
```

```
Lc=inv(a)*Lp'
```

```
%Cálculo de la ganancia
```

```
ma=[a-eye(2) b; c 0];
```

```
ma1=inv(ma)*[0;0;1]
```

```
nx=ma1(1:2)
```

```
gg=k*nx+ma1(3)
```

```
af=a-b*k;
```

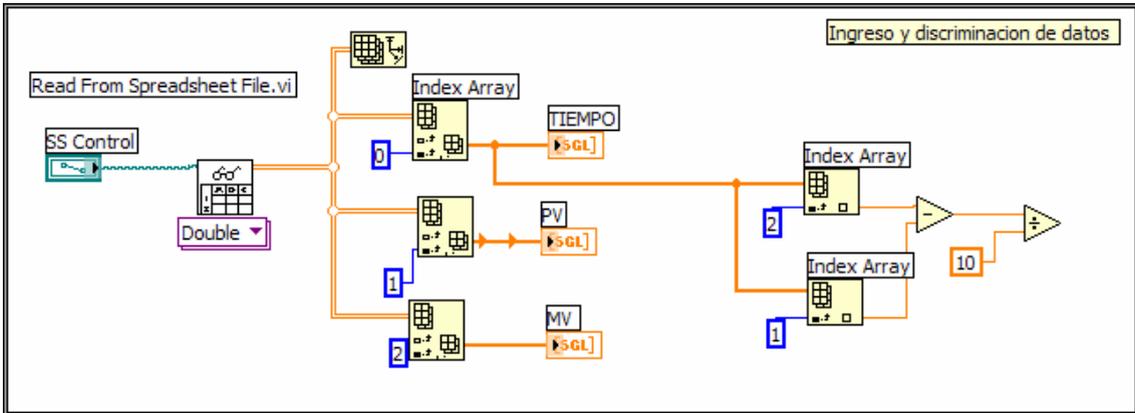
```
sys=ss(af,b,c,0,0.1);
```

```
step(gg*sys,10)
```

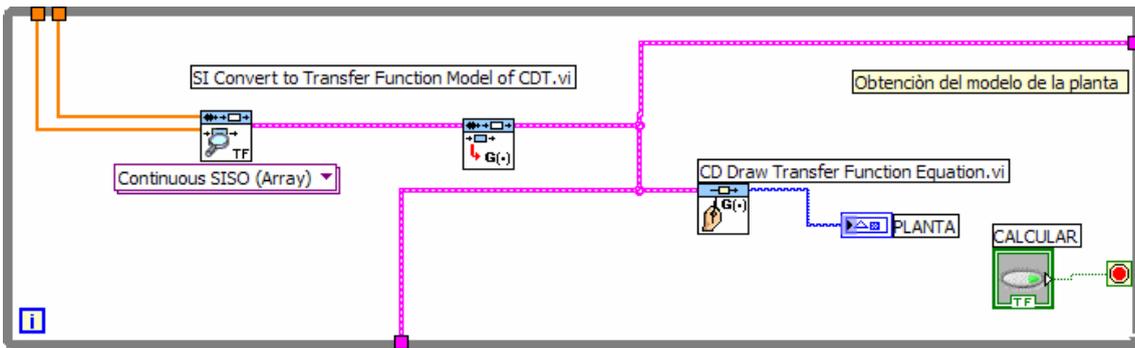
ANEXO III

PROGRAMA DE LABVIEW

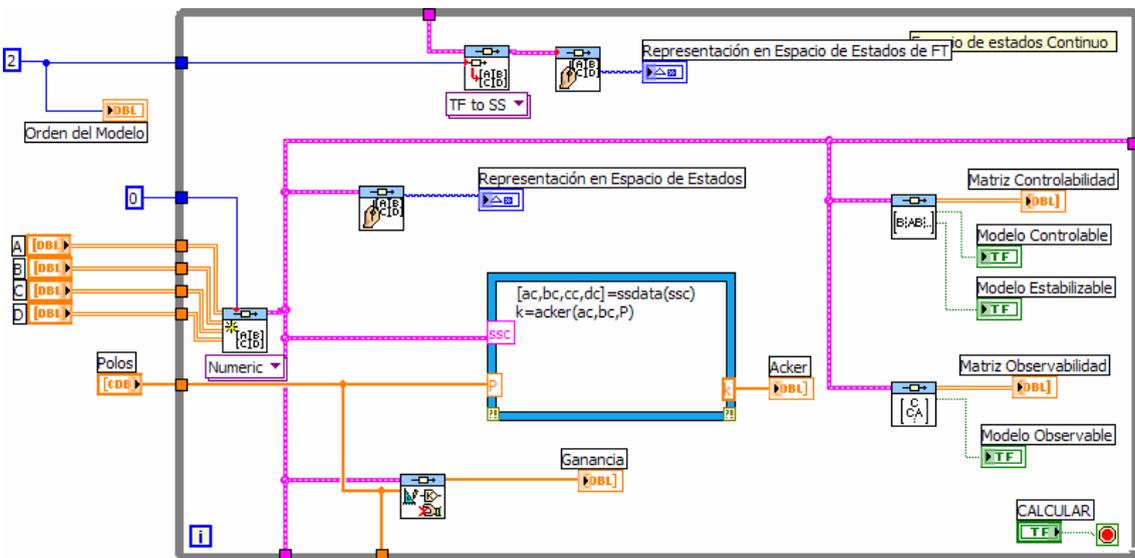
INGRESO DE DATOS PARA OBTENER LA PLANTA



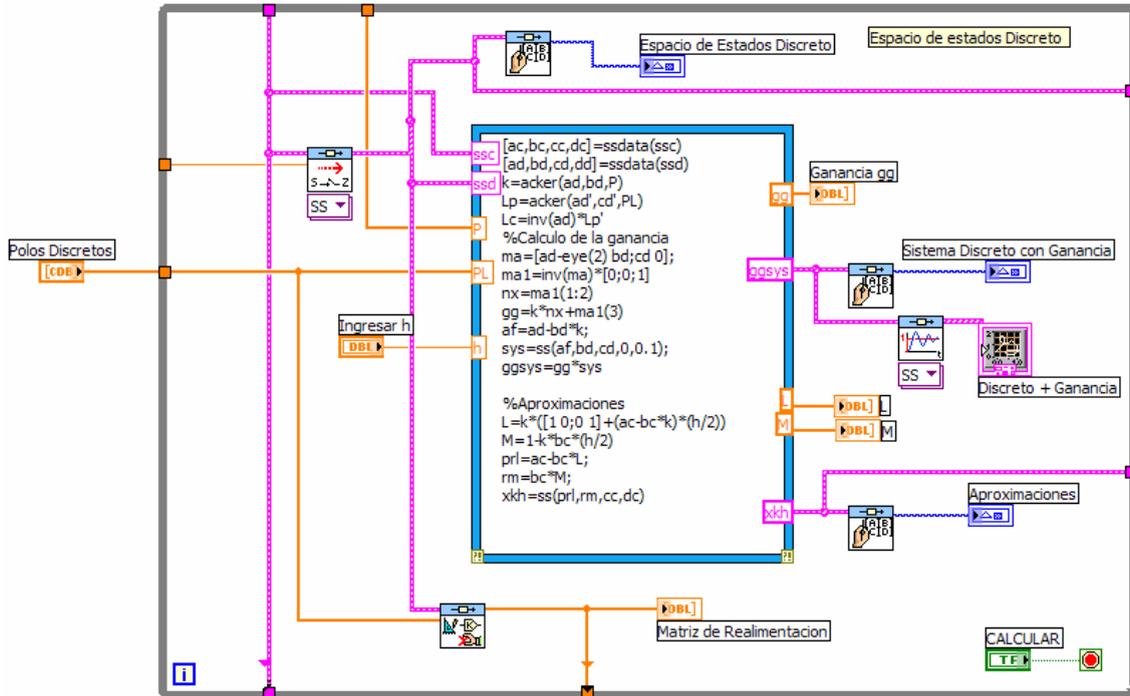
OBTENCION DEL MODELO DE LA PLANTA



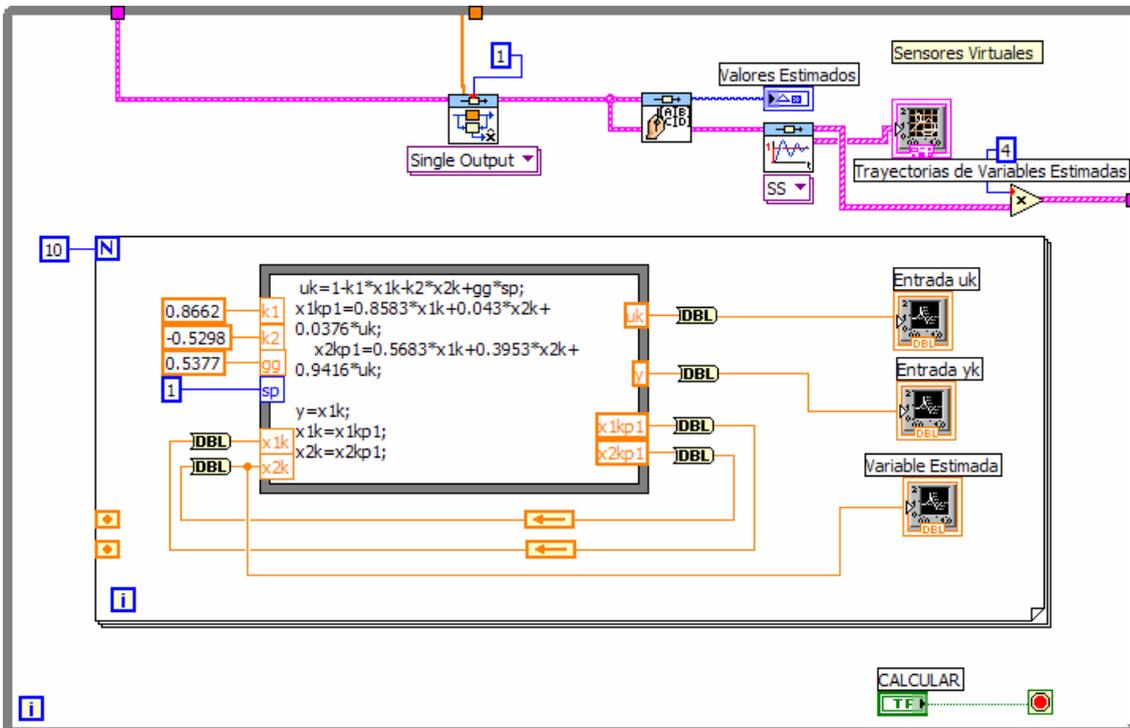
OBTENCION DEL MODELO CONTINUO DE ESPACIO DE ESTADO



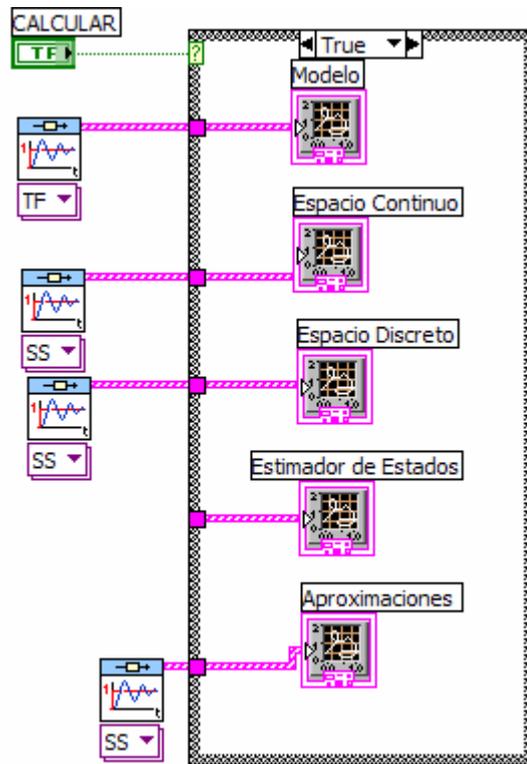
OBTENCION DEL MODELO DISCRETO DE ESPACIO DE ESTADO



OBTENCION DEL ESTIMADOR DE ESTADO



RESPUESTAS DE LOS SISTEMAS ANTE EL ESCALON



GLOSARIO

A

Actuador

Transductor que transforma señales eléctricas en movimientos mecánicos.

Algoritmo

Procedimiento o conjunto de procedimientos que describen una asociación de datos lógicos destinados a la resolución de un problema. Los algoritmos permiten automatizar tareas, siendo una secuencia codificada de instrucciones.

C

Control

Selección de las entradas de un sistema de manera que los estados o salidas cambien de acuerdo a una manera deseada.

Controlador Lógico Programable (PLC)

Equipo electrónico programable que almacena varias secuencias de órdenes llamadas programa en su interior y se encarga de ejecutarlas de forma cíclica con el fin de realizar una tarea.

CPU

Acrónimo de Central Processing Unit (Unidad central de procesamiento). Es el procesador central del ordenador encargado de controlar rutinas, realizar funciones aritméticas y otras tareas propias.

D**Diagrama de Bloques**

Método gráfico de representación de un sistema dinámico, el cual utiliza bloques para representar un subsistema y flechas para indicar la dirección del flujo de señales.

Diseño

Concepción original de un concepto u obra destinados a su implantación o producción.

E**Energía cinética**

Energía que posee un cuerpo de masa m por el hecho de encontrarse en movimiento.

Energía potencial

Capacidad que tienen los cuerpos para realizar un trabajo, dependiendo de la altura o la posición en la que se encuentre.

Entrada

Cualquier evento externo que se provee a un sistema para modificar al sistema de cualquier manera.

Error en Estado Estacionario (ess)

Se define como la diferencia entre la entrada y la respuesta del sistema cuando se ha alcanzado estabilidad.

Espacio de Estados (SS)

Conjunto de todos los estados alcanzables de un sistema desde el estado inicial, se obtiene por cualquier secuencia de operadores. Espacio n-dimensional cuyos ejes de coordenadas son las variables de estado.

Estado

Es el conjunto de variables más pequeño, de forma que el conocimiento de estas variables en $t=t_0$, junto con el conocimiento de la entrada para $t>0$, determinan completamente el comportamiento del sistema en cualquier $t>t_0$.

Estimación

Proceso por el que se trata de averiguar un parámetro no conocido, a partir de un valor estadístico.

F**Función de Transferencia**

Se define como el cociente entre la transformada de Laplace de la salida (función de respuesta) y la transformada de Laplace de la entrada (función de excitación) bajo la superposición de que todas las condiciones iniciales son cero.

I

Identificación

Correspondencia entre un modelo y la porción de realidad que pretende representar. El valor de un parámetro puede ser asumido (como hipótesis) o puede ser estimado a partir de ciertos datos y entonces se dice que los parámetros son identificados.

Identificación de Sistemas

Conjunto de métodos para la obtención de modelos matemáticos a partir de datos experimentales de las entradas y salidas de un sistema.

Interfaz Hombre Maquina (HMI)

Método para mostrar el estado de una máquina, alarmas, mensajes y diagnósticos, usualmente en forma gráfica en un computador personal, permitiendo una realimentación al operador.

M

Modelo

Representación de una manera más sencilla de ciertos aspectos de un proceso o elemento, y el cual es utilizado con objetivos de análisis, control y predicción. Todo modelo se basa en una teoría, pero dicha teoría puede no estar indicada en una forma concisa. Tipos de modelos: a escala, descriptivos, gráficos, analógicos y matemáticos.

O

Observabilidad

Un sistema es observable si se puede determinar el estado inicial de un sistema a partir de la medición de entradas y salidas, en un tiempo finito. Si una variable de estado no influye en la salida, entonces no se puede observar dicha variable y el sistema no es observable.

Orden

Matemáticamente, el orden de un proceso continuo es igual al número de integradores que se requieren para construir su ecuación dinámica.

P**Periodo de Muestreo**

En el muestreo periódico, es el tiempo entre cada una de las muestras.

Perturbaciones

Una perturbación es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema.

PID

Control Proporcional-Integral-Derivativo (o de tres términos), utilizado en cerca del 90% de los sistemas de control existentes en el mundo.

Planta

Parte de un equipo o un conjunto de las partes de una máquina que funcionan juntas.

Polos

Son aquellos puntos singulares en los cuales la función de transferencia o sus derivadas tienden a infinito.

Programa

Secuencia de instrucciones que obliga al ordenador a realizar una tarea determinada. Serie de instrucciones que sigue el ordenador para llevar a cabo una tarea determinada.

R**Realimentación**

Proceso mediante el cual un sistema alcanza de forma automática los valores establecidos para sus variables de estado de forma precisa a pesar de las variaciones que se produzcan en la entrada.

Regulación

Proceso de control que hace que una variable dinámica permanezca fija o cercana a un valor deseado, por medio de una acción correctiva constante.

Regulador

Sistema que determina (selecciona) y hace cumplir (mantiene) los parámetros operativos de otro sistema.

S

Salida

Cualquier cambio producido en el entorno por un sistema. Productos, resultados o partes observables del comportamiento de un sistema.

Sensor

Dispositivo que detecta los valores de fenómenos físicos.

Sensores virtuales

Representa un modelo de sensor pero mediante un programa informático de estimación.

Set Point (SP)

Valor deseado al cual se desea llevar la variable controlada.

Simulación

Operación de un modelo dinámico para obtener una secuencia de resultados que podrían ocurrir en un sistema del mundo real.

Sistema de Control

Se define como la unión de componentes que se agrupan entre sí para cumplir el objetivo de controlar, esta regido por normas y reglas.

Sistema de control en lazo abierto

Son aquellos sistemas en los cuales la salida no tiene efecto sobre la acción de control.

Sistema de control en lazo cerrado

En estos sistemas se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado.

Sistema Dinámico

Esta formado por una cantidad finita de parámetros concentrados descritos mediante una serie de ecuaciones diferenciales, en las cuales el tiempo es la variable independiente.

Sistema invariante en el tiempo

Es aquel que no cambia sus características en el transcurso del tiempo, es decir, la forma de la salida no cambia con el retraso de la entrada

Sistemas lineales

Sistema que obedece las propiedades de homogeneidad y de superposición.

Sistemas multivariables

Aquellos sistemas que poseen más de una variable a controlar.

Sistemas no lineales

Un sistema es no lineal si no se aplica el principio de superposición. Por lo tanto, para un sistema no lineal la respuesta a dos entradas no puede calcularse tratando cada entrada a la vez y sumando los resultados.

T**Transductor**

Dispositivo que convierte una señal de entrada en una señal de salida de naturaleza diferente a la de entrada, tales como los dispositivos que convierten una señal de presión en un voltaje. Tipos: analógicos, de datos muestreados, digitales.

V

Valor Presente (PV)

Variable dinámica que es regulada. Esta variable se la obtiene de las mediciones realizadas por los sensores.

Válvulas

Elementos que mandan o regulan la puesta en marcha, el paro y la dirección, así como la presión o el caudal del fluido.

Variable Manipulada (MV)

Variable dinámica que cambia como función de la variable de control y que modifica directamente la variable controlada.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Textos

1. DOMINGUEZ S., CAMPOY P., SEBASTIAN J.M., JIMENEZ A., *Control en el Espacio de Estado*, Tomo 1, Primera Edición, Editorial Prentice Hall, Madrid 2002
2. PHILLIPS, Charles L., *Feedback Control Systems*, Tomo 1, Tercera Edición, Editorial Prentice Hall, New Jersey 1996, pág. 418-459
3. OGATA, Katsuhiko, *Ingeniería de Control Moderna*, Tomo 1, Cuarta Edición, Editorial Pearson Prentice Hall, Madrid 2003, pág. 752-911
4. ASTROM K., WITTENMARK B., *Computer-Controlled systems Theory and design*, Tomo 1, Tercera Edición, Editorial Prentice Hall information and system sciences series, New Jersey 1997, pág. 301-305
5. CREUS, Antonio, *Instrumentación Industrial*, Tomo 1, Sexta edición, Editorial Alfaomega, Barcelona-España 1997
6. SHINSKEY, F.G., *Sistemas de Control de Procesos Aplicación, diseño y sintonización*, Tomo 1, Tercera Edición, Editorial McGraw-Hill, México 1996
7. DEGEM SYSTEMS, *Manual del estudiante Curso PS-2800 Aplicación de control de procesos*, Tomo 1, Primera Edición, 1994, pág. 5-1, 5-2

Internet

8. GONZALEZ, Guillermo, *Boletín informativo Septiembre 25, 1998*, <http://www.fcfm.uchile.cl/boletin/1998/09/25/>, 25/09/1998, 06/04/2006
9. PIÑON, Andrés, *Implementación de Sensores Virtuales en Foundation Fieldbus*, <http://www.cea-ifac.es/actividades/jornadas/XXIV/documentos/incon/68.pdf>, 06/04/2006
10. FERREIRO, R., *Sensores Virtuales con Foundation Fieldbus*, <http://www.cea-ifac.es/actividades/jornadas/XXIV/documentos/incon/36.pdf>, 06/04/2006

11. *IEC 61131-3: un recurso de programación estándar*, <http://www.plcopen.org>
14/11/2006

Papers

12. PEDDLE, I.K., *Discrete Space State Control*, Abril 2006

HOJA DE ENTREGA

Este proyecto de grado fue entregado al Departamento de Eléctrica y Electrónica y reposa en la Escuela Politécnica del Ejército desde:

Sangolquí, a _____ del 2007

Ma. Belén Aldás Chiriboga.

AUTORA

Ing. Víctor Proaño Rosero.

COORDINADOR DE LA CARRERA DE INGENIERIA
EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACION Y CONTROL