

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

**Escuela de Ingeniería Electrónica**



**Diseño e implementación de un control integral para el proceso de colado de aluminio**

**Empresa donde se realiza el proyecto**

**CVG Aluminios Nacionales S.A**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura**


**German Vásquez Araya**

**Cartago, Junio de 2009**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**  
**PROYECTO DE GRADUACIÓN**  
**TRIBUNAL EVALUADOR**

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.


Miembros del Tribunal



---

Ing. Julio Stradi Granados


Profesor lector



---

Ing. Eduardo Ineriano Salguero

Profesor lector



---

Ing. Juan Carlos Jiménez  
Robles  
Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

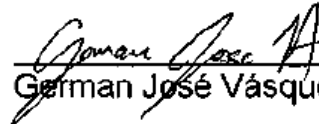
Cartago, Junio de 2009

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, junio de 2009

  
German José Vásquez Araya

Cédula: 6-354-553

# Resumen

El área de ingeniería de esta empresa ha planteado la necesidad de realizar un monitoreo y un control de todos los procesos de la planta desde un cuarto de control remoto y para esto quieren implementar un sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA).

Debido a que el proyecto total es muy grande, este se dividió y como paso inicial para este proyecto se implementara en el proceso de colado de aluminio. Este es uno de los procesos más relevantes para la producción en la empresa y su principal problema es que está incomunicado del resto de la planta, además los variadores de frecuencia y el PLC que conforman dicho proceso se comunican por medio de señales analógicas, las cuales se ven afectadas con el ruido introducido por los motores y los variadores de frecuencia lo que afecta el adecuado desempeño del proceso.

El proyecto que se realiza tiene como función lograr que los variadores de frecuencia y el PLC se comuniquen de forma digital por medio de protocolos abiertos. Además de modelar los procesos que lo requieran con el fin de determinar su comportamiento dinámico y estático así como diseñar el regulador que logre el comportamiento esperado y por ultimo establecer la comunicación de este proceso con el sistema SCADA con protocolo OPC y el software Labview.

**Palabras claves:** SCADA, protocolos de comunicación, Labview y Modelado de procesos.

## **Abstract**

The area of engineering of this company has raised the need for monitoring and control of all processes through the remote room and for this want to implement a SCADA system.

Because the whole project is very large, it was divided and as an initial step for this project was implemented in the process of cast aluminum. This is one of the most important processes for the production in the company and its main problem is the incommunicado with the plant, also, the variable frequency and the PLC that comprise this process are communicated through analog signals, which are affected with the noise introduced by the motors and variable frequency which affects the proper performance of the process..

The project is being done to ensure the driver frequency and the PLC to communicate digitally via an open protocol. Also, to modeling the processes required to design the regulator to achieve the expected answer and finally establish the communication process with the SCADA system with OPC protocol and Labview software.

**Keywords:** SCADA, protocol of comunication, Labview, process modeling.

## **Dedicatoria**

*A mis padres German y Ana por su apoyo en todos estos años. Gracias a sus consejos y valores logré obtener una carrera y una buena vida.*

*A mi hermano por acompañarme todos estos años en el TEC y hacer más entretenida mi estancia en Cartago.*

*A mis compañeros de carrera y a los profesores por su invaluable ayuda, así como a los técnicos del área de electrónica de Alunasa y al Ing. Daniel González.*

*A todos ellos porque siempre estuvieron a mi lado en las buenas y en las malas durante todos estos años o meses.*

## INDICE GENERAL

Capitulo 1: Introducción	1
1.1 Problema existente e importancia de su solución	2
1.1.1 Síntesis del problema	4
1.2 Enfoque de la solución	5
Capitulo 2: Meta y objetivos	7
2.1 Meta	7
2.2 Objetivo general	7
2.3 Objetivos específicos	7
Capitulo 3: Marco teórico	9
3.1 Identificación de procesos	9
3.1.1 Métodos de identificación	9
3.1.2 Identificación paramétrica.	9
3.1.3 Método de mínimos cuadrados (LSE)	11
3.1.4 Método de variables instrumentales	14
3.2 PLC Omron CS1G	15
3.3 Variador de Frecuencia Eurotherm 690+	17
3.4 Protocolo de comunicación.	19
3.5 Software Labview	20
Capitulo 4: Procedimiento metodológico	21
4.1 Reconocimiento y definición del problema	21
4.2 Obtención y análisis de información	21
4.2.1 Investigación bibliográfica	21
4.4.2 Determinación de los protocolos de comunicación.	22
4.4.3 Modelado de Procesos.	22
4.4.4 Restricciones.	22
Capitulo 5: Descripción detallada de la solución	23
5.1 Modelado del motor y el variador del CASTER.	23
5.1.1 Gráficas de la entrada y la salida del proceso real.	23
5.1.3. Modelos estimados	27
5.1.3.1 Modelo 1.	27
5.1.3.2 Modelo 2.	27
5.1.3.3 Modelo 4.	28
5.1.4. Validación de los modelos	28
5.2. Diseño del regulador.	35
5.2.1 Reglas de ajuste para los reguladores PID	36
5.2.2 Diseño mediante el lugar de las raíces.	37
5.2.3 Procedimiento de diseño con SISO Design.	37
5.3. Análisis del variador del enrollador.	40
5.4. Diseño del Sistema A.	42
5.4.1 Protocolos del PLC Omron CS1G	42
5.4.1.1 Host link:	42
5.4.1.2 Sin protocolo:	42
5.4.1.3 NT Link:	42
5.4.1.4 Bus de periféricos:	42
5.4.1.5 PC Link:	43
5.4.2. Protocolos del variador de frecuencia.	43
5.4.2.1 Ethernet.	43
5.4.2.2 Modbus Plus.	44
5.4.2.3 Profibus-DP.	45
5.4.2.4 RS-485.	46
5.4.3. Selección de protocolos	47
5.4.3.1 Host Link	47

5.4.3.2 Tarjeta de comunicación RS-485 (6055).	49
5.4.4 Sistema A.	52
5.4.4.1 Data Station Plus	52
5.4.5 Solución	54
5.4.6 Configuración de las tarjetas de comunicación RS-485 de los variadores.	56
5.4.7 Configuración del Data Station Plus.	56
5.4.8 Comunicación entre los variadores y el PLC.	58
5.4.9 Programación del Data Station Plus en Crimson.	59
5.5. Diseño de la aplicación en Labview para el SCADA.	61
Capítulo 6: Análisis de Resultados	63
6.1 Resultado del modelo estimado y el PID diseñado.	63
6.2 Comunicaciones entre el PLC Omron y los variadores	66
6.3 Comunicación entre los Variadores de Frecuencia y el PLC.	68
6.4 Comunicación con el Sistema SCADA.	71
Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones	72
7.1 Conclusiones	72
7.2 Recomendaciones	72
Bibliografía	73
Apéndices	74
Apéndice A.1 Ejemplo de Identificación de Sistemas con Matlab	74
Apéndice A.2 Hoja de información del proyecto	78



## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Diagrama de bloques del sistema SCADA	1
<b>Figura 1.2.</b> Boquilla	3
<b>Figura 1.3.</b> Proceso de colado de aluminio	3
<b>Figura 1.4.</b> Diagrama del Proceso de colado de aluminio (Visio)	5
<b>Figura 1.5.</b> Diagrama de bloques de la solución	5
<b>Figura 3.1.</b> Estructuras estándar [11].	10
<b>Figura 3.2.</b> Diagrama del Variador de frecuencia Eurotherm 690+ C-D.	18
<b>Figura 5.1.</b> Medición 1 sin carga.	24
<b>Figura 5.2.</b> Medición 2 sin carga.	24
<b>Figura 5.3.</b> Medición 3 sin carga (Zoom Figura 5.1)	25
<b>Figura 5.4.</b> Medición 4 Funcionamiento.	25
<b>Figura 5.5.</b> Mayor diferencia entre la entrada y la salida.	26
<b>Figura 5.6.</b> Comparación 1 entre los diferentes modelos.	29
<b>Figura 5.7.</b> Comparación 2 entre los diferentes modelos.	29
<b>Figura 5.8.</b> Comparación 3 entre los diferentes modelos.	30
<b>Figura 5.9.</b> Comparación 4 entre los diferentes modelos.	30
<b>Figura 5.10.</b> Comparación 5 entre los diferentes modelos.	31
<b>Figura 5.11.</b> Respuesta del modelo 1,2 y 4 a un escalón unitario.	32
<b>Figura 5.12.</b> Gráfica del error del modelo 1 respecto a la salida de la figura 5.10.	33
<b>Figura 5.13.</b> Gráficas de correlación del modelo 1.	33
<b>Figura 5.14.</b> Respuesta al escalón unitario del modelo 1 sin PID.	34
<b>Figura 5.15.</b> Lugar de las raíces del modelo 1.	36
<b>Figura 5.16.</b> Respuesta al escalón unitario del modelo 1 con PID.	38
<b>Figura 5.17.</b> Diagrama de bloques del sistema final.	39
<b>Figura 5.18.</b> Lugar de las raíces del modelo 1 con PID.	39
<b>Figura 5.19.</b> Comparación de la salida real y el modelo 1 con PID y sin PID.	40
<b>Figura 5.20.</b> Tensión de referencia y Tensión real	41
<b>Figura 5.21.</b> Modulo de Preset (DSELite).	43
<b>Figura 5.22.</b> Comandos C-mode. [8]	48
<b>Figura 5.23.</b> Estructura del comando C-mode. [8]	48
<b>Figura 5.24.</b> Comandos FINS. [8]	49
<b>Figura 5.25.</b> Estructura del comando FINS. [8]	49
<b>Figura 5.26.</b> Estructura del comando FINS (Figura 5.25 el cuadro más oscuro). [8]	49
<b>Figura 5.27.</b> Diagrama de conexión con cuatro hilos de un sistema SCADA. [14]	51
<b>Figura 5.28.</b> Ejemplo de lectura al setpoint 1 (ASCII). [14]	51
<b>Figura 5.29.</b> Puertos del Data Station Plus. [15]	53
<b>Figura 5.30.</b> Solución propuesta (Visio).	54
<b>Figura 5.31.</b> Diagrama de conexiones	55
<b>Figura 5.32.</b> Modulo de Tech Option configurado para RS-485 (DSELite) [14]	56
<b>Figura 5.33.</b> Configuración del puerto RS-232 PG del Data Station Plus.	57
<b>Figura 5.34.</b> Configuración del puerto RS-485 del Data Station Plus.	57
<b>Figura 5.35.</b> Configuración del variador en el Data Station.	57
<b>Figura 5.36.</b> Código en C para el Data Station Plus.	59
<b>Figura 5.37.</b> Invocación de los programas.	60
<b>Figura 5.38.</b> Programación de la aplicación en Labview.	61
<b>Figura 5.39.</b> Programación de la aplicación en Labview.	62
<b>Figura 6.1.</b> Medición 1 sin carga.	63
<b>Figura 6.2.</b> Medición 1 con PID	64
<b>Figura 6.3.</b> Medición 2 con PID	64
<b>Figura 6.4.</b> Velocidad de línea digital y analógica	66
<b>Figura 6.5.</b> Referencia de Tensión digital y analógica	67
<b>Figura 6.6.</b> Referencia de diámetro digital y analógico	67

<b>Figura 6.7.</b> Corriente del Motor del Caster digital y analógica.	68
<b>Figura 6.8.</b> Velocidad del Motor del Caster digital y analógica.	69
<b>Figura 6.9.</b> Tensión de la lámina digital y analógica.	69
<b>Figura 6.10.</b> Panel del SCADA en funcionamiento. (Labview)	71
<b>Figura A.1.1.</b> Entrada y salida del modelo (Ecuación A.1)	74
<b>Figura A.1.2.</b> Aplicación Ident.	75
<b>Figura A.1.3.</b> Opciones de estimación por process Models.	76
<b>Figura A.1.4.</b> Comparación entre modelos estimados	76

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1.</b> Resumen de los modelos [11]	10
<b>Tabla 3.2.</b> Características del PLC Omron CS1G CPU42H	16
<b>Tabla 3.3.</b> Características de los variadores de frecuencia Eurotherm 690+ A-D.	19
<b>Tabla 5.1.</b> Comparación entre los diferentes modelos.	31
<b>Tabla 5.2.</b> Descripción de los bytes a leer en protocolo Ethernet.	44
<b>Tabla 5.3.</b> Número de bytes transferidos	45
<b>Tabla 5.4.</b> Descripción de los bytes leídos en set 1.	45
<b>Tabla 5.5.</b> Resumen de los registros o tags utilizados para la comunicación digital	59

# Capítulo 1: Introducción

La empresa CVG Aluminios Nacionales S.A es una empresa dedicada a la manufactura y mercadeo de productos de aluminio laminados y semiterminados a partir de lingote primario. Está ubicada en el cantón de Esparza, provincia de Puntarenas, Costa Rica. Es la única empresa de su género en Centroamérica, el Caribe y Panamá. Produce alrededor de 9 mil toneladas anuales. Exporta más de un 80% a terceros mercados; USA, Canadá, México, el Caribe, Sur América. Esta empresa fue fundada en el año 1978 y en 1990 fue adquirida por la corporación Venezolana de Guayana “CVG”.

El área de ingeniería de esta empresa ha planteado la necesidad de realizar un monitoreo y un control de todo los procesos de la planta desde un cuarto de control remoto y para esto quieren implementar un sistema SCADA. Además se plantea la necesidad de una investigación que determine cual sistema y protocolos son los precisos para la implementación de un sistema de este tipo en el proceso de colado. En la siguiente figura se observa un diagrama de bloques del sistema SCADA.

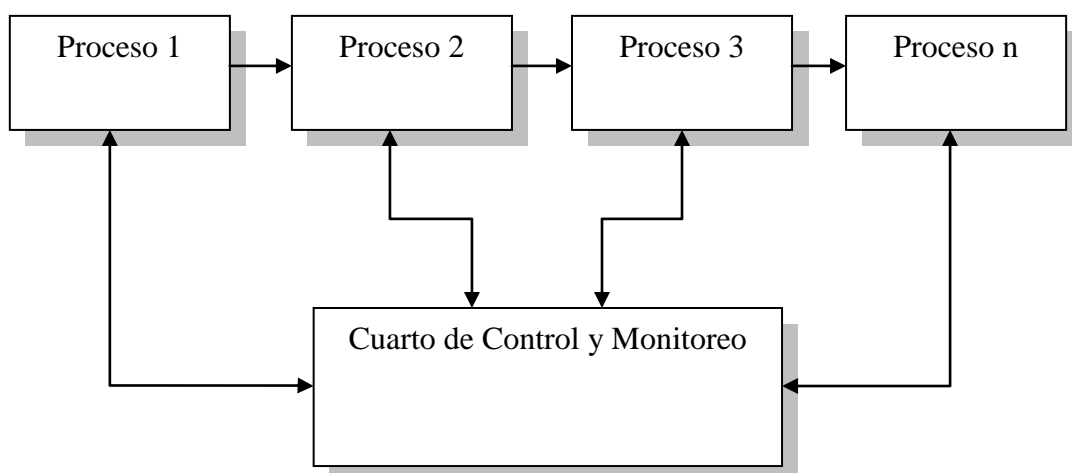


Figura 1.1. Diagrama de bloques del sistema SCADA

En la figura 1.1 se muestran procesos de la planta los cuales son controlados por operadores en la misma área donde se da el proceso. El sistema SCADA implementaría un cuarto remoto el cual tendría la capacidad de controlar y monitorear todos los procesos, esto con el fin de dar un seguimiento y análisis de todos los procesos de la planta.

El proyecto ya ha sido aprobado por la presidencia de la empresa y está dirigido por el ingeniero Daniel González, además contara con la participación de los técnicos del área de electrónica.

Debido a que el proyecto SCADA es muy grande, este se dividió y como paso inicial para este proyecto se implementara en el proceso de colado de aluminio, las características necesarias para implementar el sistema SCADA en toda la empresa en un futuro cercano.

## **1.1 Problema existente e importancia de su solución**

De forma general el proceso de colado de aluminio consiste en introducir una cantidad específica de aluminio fundido proveniente del horno de fundición por una boquilla la cual distribuye de forma uniforme el aluminio (Figura 1.2), posteriormente pasa por dos rodillos los cuales enfrían y forman una lámina de este material (Caster). Dentro de los rodillos pasa agua fría y sale agua caliente debido al proceso de enfriamiento y por fuera de los rodillos se rocía una sustancia de grafito con el fin de evitar que la lámina de aluminio se pegue a los rodillos. Seguidamente la lamina se va enrollando (Enrollador) y cuando el rollo de aluminio alcanza cierto radio se corta y se retira. En la figura 1.3 se observa a grandes rasgos el proceso de colado de aluminio.

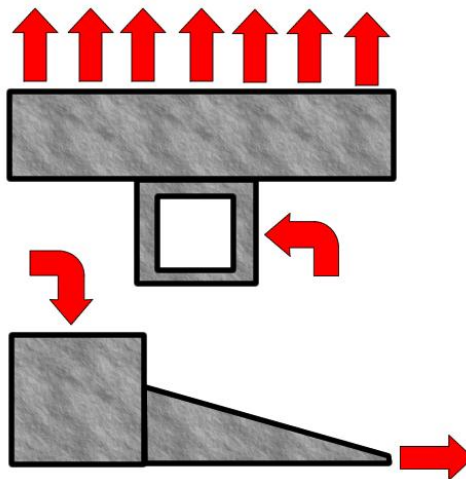


Figura 1.2. Boquilla

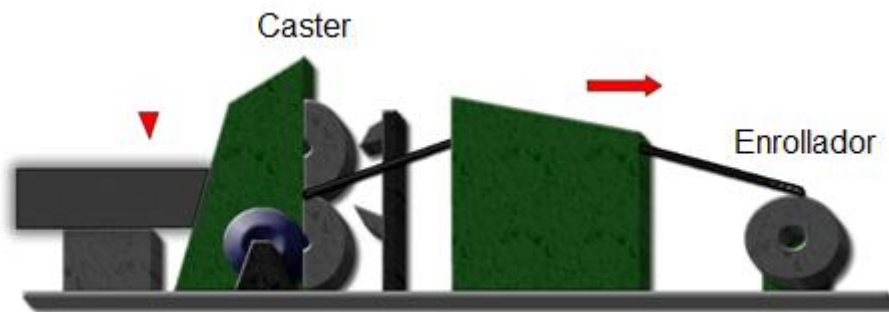


Figura 1.3. Proceso de colado de aluminio

El sistema actual ya cuenta con un control automático parcial el cual solo puede mostrar y controlar las variables más relevantes, pero no las almacena en una base de datos, por lo que no se puede dar un seguimiento del proceso.

En este proceso, el grosor de la lámina depende de la velocidad de los motores que mueven los rodillos, y éste debe variar de acuerdo a las especificaciones requeridas para su uso. La velocidad de los motores es controlada con dos variadores de frecuencia por medio de: un potenciómetro (para el variador de los Rodillos o Caster) y de un control especializado para procesos con rodillos (para el Variador del enrollador).

El control de velocidad del primer variador es muy simple y no presenta un lazo de retroalimentación en su programación, además los ingenieros y los técnicos no tenían un análisis del comportamiento dinámico y estático de estos procesos, por lo que se desconocía si funcionaban de forma eficiente.

Las comunicaciones entre el PLC y los variadores se realizan de forma analógica lo cual repercute en la precisión del grosor deseado (debido a las fluctuaciones introducidas por el ruido). Además la mayoría de los datos provenientes de los variadores no eran observados por lo que se desaprovechaba mucha información relevante del proceso.

Los dos diferentes sistemas de control del proceso de colado (PLC y Variadores) eran independientes entre sí lo que ocasionaba problemas cuando se presenta un error en alguno de los dos. Por lo que se requería de un sistema que integrara a ambos módulos y permita la comunicación entre ellos. Además los diferentes sistemas de control como el PLC y los variadores de frecuencia utilizan distintos protocolos de comunicación por lo que se requería que el sistema a implementar fuera capaz de comunicarse con estos y con el SCADA.

En la figura 1.4 se observa un diagrama de la condición pasada del proceso de colado, en esta se puede observar que la comunicación se daba únicamente por medio de señales analógicas y que el proceso se encontraba incomunicado del resto de planta.

### **1.1.1 Síntesis del problema**

Falta de una comunicación y un control integral en el proceso de colado de aluminio.

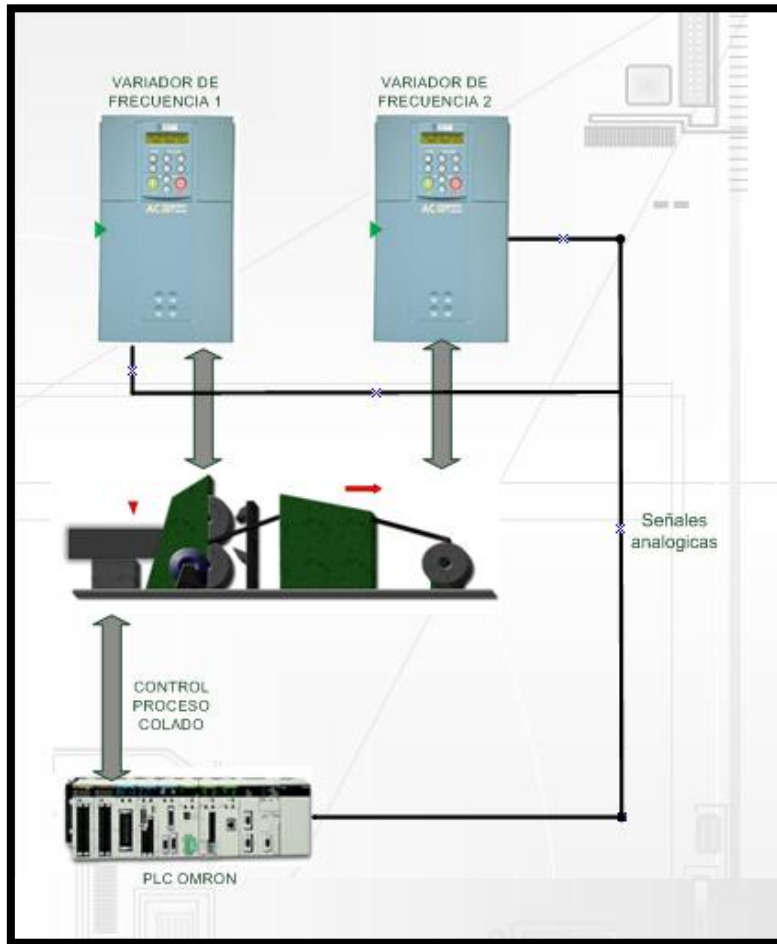


Figura 1.4. Diagrama del Proceso de colado de aluminio (Visio)

## 1.2 Enfoque de la solución

En la figura 1.5 se presenta un diagrama de bloques con el enfoque de la solución.

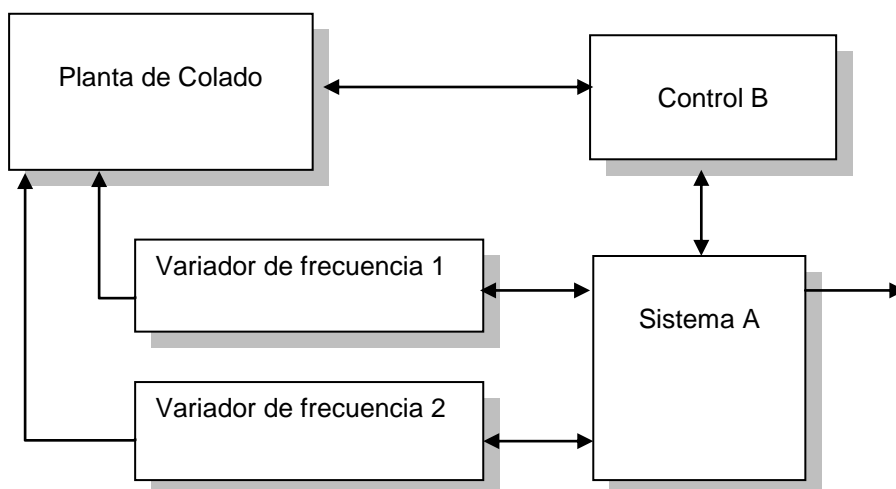


Figura 1.5. Diagrama de bloques de la solución



En la figura 1.5 se observan cinco bloques de los cuales, la planta de colado, el control B y los variadores de frecuencias ya estaban implementados y en funcionamiento.

Para este proyecto se realizó y se implementó el sistema A, el cual permitió la comunicación entre el PLC, los variadores y el SCADA. Además se realizó un modelado del proceso del primer variador y el motor (Caster) para determinar su comportamiento dinámico y estático. Y se diseñó y se implementó un regulador PID en lazo cerrado por medio del análisis del modelo matemático obtenido.

Para un sistema con variadores de frecuencia y motores se espera que el modelo matemático del mismo no difiera del comportamiento real en un porcentaje mayor al 10%. Igualmente el tiempo de estabilización de este sistema a perturbaciones es menor a 1s por lo que se espera que el tiempo de estabilización del sistema con el control a lazo cerrado no sea mayor a 1s.

El sistema A se comunica con los módulos de control B (PLC) y los variadores de frecuencia por medio de protocolos de comunicación abiertos que son compatibles con los módulos, sin importar el fabricante de los mismos.

El sistema A funciona como acople entre los módulos y tiene la capacidad de enviar los datos vía Ethernet con protocolo OPC (OLE for Process Control) a una red con el fin de visualizarlos y manipularlos en el SCADA. Las conexiones entre los módulos se realizaron con cable UTP por lo que se espera que el BER (bit error rate) no sea mayor a  $10^{-6}$  para este tipo de conexiones.

El sistema SCADA se realizó por medio del software Labview y el módulo DSC (Data Logging and Supervisory Control) especializado para sistemas SCADA. Un aspecto importante, es que el sistema A funciona en forma paralela con el sistema pasado, esto con el fin de evitar que todo el proceso de colado de aluminio quede inhabilitado en caso de que falle el sistema A en su fase de prueba.

## Capítulo 2: Meta y objetivos

### 2.1 Meta

Preparar el proceso de colado de aluminio para que cumpla las características necesarias que permitan implementar un sistema SCADA en toda la empresa.

**Indicador:** Implementación del sistema SCADA en el proceso de colado de aluminio y que funcione según los estándares correspondientes a los sistemas SCADA.

### 2.2 Objetivo general

Obtener un control integral del proceso de colado de aluminio por medio de un control automático y un sistema que comunique a los distintos módulos del proceso.

**Indicador:** El sistema cumple las especificaciones de comportamiento esperado y logra la comunicación entre los módulos con un BER menor a  $10^{-6}$ .

### 2.3 Objetivos específicos

- Realizar una investigación y estudio de las características y software de los variadores de frecuencia Eurotherm 690+ y de los PLC Omron CS1G.

**Indicador:** Programar los variadores de frecuencia y el PLC.

- Obtener el modelo matemático del motor y el variador de frecuencia, por medio de un análisis de las entradas y salidas de este sistema.

**Indicador:** Diferencia menor al 10% con el comportamiento real.

- Calcular e implementar el regulador PID por medio del análisis del modelo matemático obtenido del variador de frecuencia y el motor.

**Indicador:** Tiempo de estabilización menor a 1s.

- Establecer los protocolos de comunicación abiertos adecuados para lograr la comunicación con los variadores de frecuencia Eurotherm 690+ y el PLC Omron CS1G por medio del Sistema A.

**Indicador:** Sistema A establezca una comunicación independiente con ambos módulos con un BER (bit error rate) menor a  $10^{-6}$ .

- Acoplar el control B (PLC Omron CS1G) con los variadores de frecuencia Eurotherm 690+ por medio del sistema A y los protocolos de comunicación adecuados.

**Indicador:** El control B establezca comunicación con los variadores de frecuencia y viceversa con un BER (bit error rate) menor a  $10^{-6}$ .

## Capítulo 3: Marco teórico

### 3.1 Identificación de procesos

#### 3.1.1 Métodos de identificación

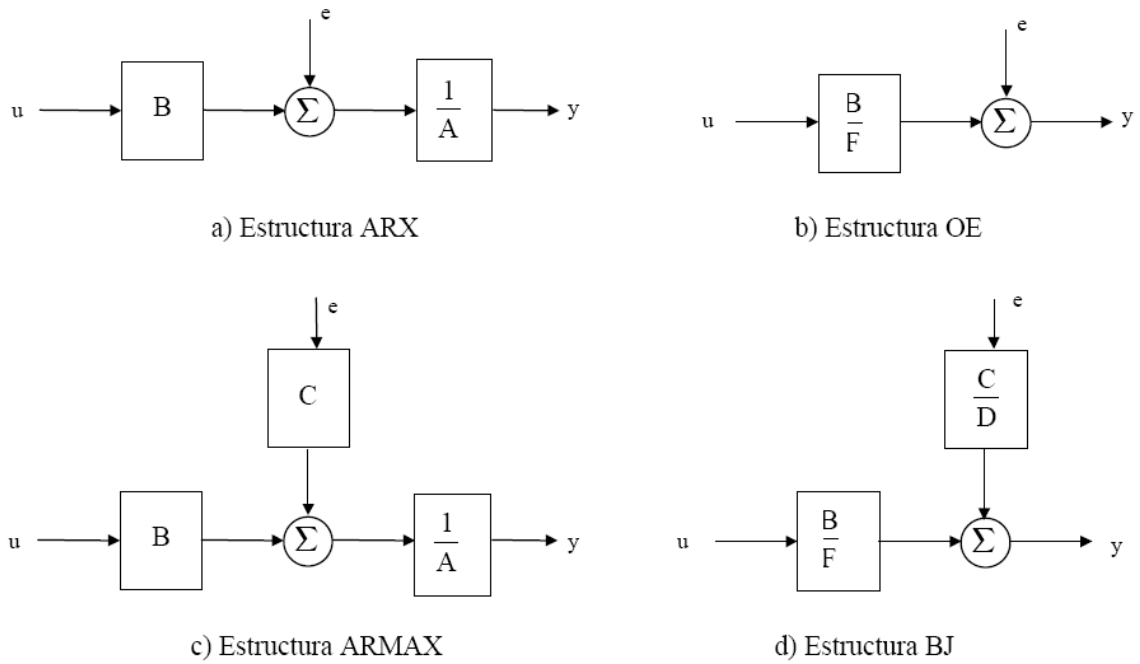
**Métodos no paramétricos:** Son métodos que por medio de pruebas al sistema se logra obtener la función de transferencia del mismo, entre ellos están el análisis de la respuesta en frecuencia, análisis de correlación y análisis espectral.

**Métodos paramétricos:** Estos métodos requieren de una estructura para el modelo. Un conjunto de parámetros describen el sistema y estos se deberán ajustar por medio de un método o un criterio como por ejemplo método de mínimos cuadrados.

#### 3.1.2 Identificación paramétrica.

Cuando no se conoce la estructura de la planta se recurre a la utilización de algunos modelos estándar los cuales funcionan para un amplio rango de sistemas dinámicos. La mayor dificultad de estos modelos radica en la escogencia acertada del tipo de modelo así como el orden y el número de parámetros del mismo, en la mayoría de los casos hay que experimentar con varios de los modelos hasta encontrar el que mejor se adapta al sistema.

Las estructuras de los modelos estándar se observa en la figura 3.1.



**Figura 3.1.** Estructuras estándar [11].

Donde los módulos son de la forma:  $A(q^{-1}, \theta) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{1na}q^{-na}$  y  $\theta$  es el vector de parámetros y contiene a  $(a_1, \dots, a_{na})$ .

**Tabla 3.1.** Resumen de los modelos [11]

Tipo de modelo	Condición	Estructura resultante
Modelo ARX	$F(q^{-1}) = D(q^{-1}) = C(q^{-1}) = 1$	$A(q^{-1}) \cdot y(t) = B(q^{-1}) \cdot u(t) + e(t)$
Modelo Output Error (OE)	$C(q^{-1}) = D(q^{-1}) = A(q^{-1}) = 1$	$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} \cdot u(t) + e(t)$
Modelo ARMAX	$F(q^{-1}) = D(q^{-1}) = 1$	$A(q^{-1}) \cdot y(t) = B(q^{-1}) \cdot u(t) + B(q^{-1}) \cdot e(t)$
Modelo Box Jenkins (BJ)	$A(q^{-1}) = 1$	$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} \cdot u(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})} \cdot e(t)$

Una vez elegido el modelo se procede a determinar el valor de los parámetros. Existen varios métodos para realizar el ajuste de parámetros entre los principales están el método de mínimos cuadrados y el de variables instrumentales.

## Errores de predicción o residuos de un modelo.

Los residuos son la diferencia entre la salida estimada y la real en un determinado instante.

$$\varepsilon(n) = y(n) - y_e(n) \quad (3.1)$$

La salida estimada se puede representar como:

$$y_e(n) = \varphi^T(n) \cdot \theta \quad (3.2)$$

Donde  $\varphi^T(n)$  es un vector columna formado por las salidas y entradas anteriores (vector de regresión) y  $\theta$  es el vector de parámetros a determinar.

### 3.1.3 Método de mínimos cuadrados (LSE)

Para la estimación de los parámetros se tiene un conjunto de N datos de entrada y salida. En resumen se tiene la siguiente ecuación. (Error de predicción)

$$\varepsilon(n) = y(n) - \varphi^T(n) \cdot \theta \quad (3.3)$$

Para un modelo tipo ARX (Auto Regressive with eXogenous inputs) el cual tiene una ecuación de diferencias de la forma:

$$y(n) + a_1 y(n-1) + \dots + a_p y(n-p) = b_1 u(n-1) + \dots + b_M u(n-M) \quad (3.4)$$

Donde el vector de parámetros es:

$$\theta = [a_1 \dots a_p \ b_1 \dots b_M]^T \quad (3.5)$$

Los parámetros de este vector son desconocidos y lo que se pretende es estimarlos a partir de datos obtenidos de las mediciones de las entradas y salidas de la planta. Al encontrar las estimaciones de estos parámetros se puede predecir la salida en función de los datos pasados hasta el instante n-1, y la estimación del vector de parámetros.

El vector de regresión es:

$$\varphi(n) = [-y(n-1) \dots -y(n-P) \ u(n-1) \dots u(n-M)]^T \quad (3.6)$$

La ecuación *criterio de mínimos cuadrados* para una regresión lineal:

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N Tr\{[y(k) - \varphi^T(k) \cdot \theta][y(k) - \varphi^T(k) \cdot \theta]^T\} \quad (3.7)$$

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Tr\{\varepsilon(n)\varepsilon(n)^T\} \xrightarrow{\text{caso Escalar}} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \varepsilon(n)^2 \quad (3.8)$$

La estimación del modelo de mínimos cuadrados es el valor de  $\theta$  ( $\theta_{LSE}$ ) que minimiza al máximo el *criterio de mínimos cuadrados*. El valor de  $V_N(\theta_{LSE})$  es la función de pérdidas del modelo estimado, entre más cercano este a cero mejor será el modelo obtenido. Puede probarse que todo valor  $\theta$  que cumple con la ecuación 3.9 es un mínimo global de la ecuación  $V_N(\theta)$  (Ecuación 3.8).

$$\left[ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \varphi(n)\varphi^T(n) \right] \theta_{LSE} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \varphi(n)y(n) \right] \quad (3.9)$$

Si la matriz de la izquierda es no singular entonces solo existe un valor de  $\theta_{LSE}$  y se puede calcular como se muestra en la ecuación 3.10 (Estimación de mínimos cuadrados).

$$\theta_{LSE} = \left[ \sum_{n=1}^N \varphi(n)\varphi^T(n) \right]^{-1} \left[ \sum_{n=1}^N \varphi(n)y(n) \right] \quad (3.10)$$

La minimización puede computarse analíticamente, por medio de la derivada de  $V_N(\theta)$  con respecto a  $\theta$  e igualando a cero. Cuyo resultado son un

conjunto de ecuaciones denominadas ecuaciones normales, de las cuales se obtienen los valores estimados del vector de parámetros.

$$\frac{d}{d\theta} V_N(\theta) = 2 \sum_{n=1}^N \varphi(n)[y(n) - \varphi^T(n) \cdot \theta] = 0 \quad (3.11)$$

Una variante para calcular el  $\theta_{LSE}$  consiste en agregar un término a la ecuación 3.7. A esto se le denomina criterio de Akaike (ecuación 3.12).

$$V_{AIC}(\theta) = V_N(\theta) \cdot \left(1 + 2 \frac{d}{N}\right) \quad (3.12)$$

Donde d es el número de parámetros y N el número de muestras.

### En Vectores.

Donde los valores de las salidas, el vector de regresión y el error de predicción se presentan como se muestra en la ecuación 3.13. Donde N es el número de ecuaciones.

$$Y = \begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(N) \end{bmatrix} \quad \Phi^T = \begin{bmatrix} \varphi^T(1) \\ \varphi^T(2) \\ \vdots \\ \varphi^T(N) \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_N \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$Y = \Phi^T \theta + \varepsilon \quad (3.14)$$

$$\varepsilon = Y - \Phi^T \theta \quad (3.15)$$

$$\varepsilon^T \cdot \varepsilon = (Y - \Phi^T \theta)^T \cdot (Y - \Phi^T \theta) \quad (3.16)$$

Derivando e igualando a cero se obtiene las ecuaciones normales.

$$\frac{\partial(\varepsilon^T \cdot \varepsilon)}{\partial \theta} = 2\varepsilon^T \frac{\partial(\varepsilon)}{\partial \theta} = 0 \quad (3.17)$$



Y por medio de las ecuaciones anteriores y la 3.17 el valor de  $\theta_{LSE}$  se obtiene por medio de la ecuación 3.18.

$$\Phi^T(Y - \Phi\theta) = 0$$

Despejando  $\theta$ .

$$\theta_{LSE} = (\Phi\Phi^T)^{-1}\Phi Y \quad (3.18)$$

### 3.1.4 Método de variables instrumentales

Para este método se debe cumplir la siguiente ecuación:

$$\theta_{IV} = sol \left\{ \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \xi(t) \cdot [y(t) - \varphi^T(t) \cdot \theta] = 0 \right\} \quad (3.19)$$

Donde  $\xi(t)$  son las variables instrumentales, las cuales se obtienen después de aplicar un filtro lineal al vector de regresión lineal  $\varphi^T(t)$ . Este método proporciona mejores resultados cuando hay correlación entre el ruido y la salida.

### 3.2 PLC Omron CS1G

El PLC (Controlador lógico programable) es un dispositivo especialmente diseñado para aplicaciones industriales. Este dispositivo fue creado en 1969 para la General Motors y desde entonces estos han evolucionado de gran manera hasta el punto de permitir que toda una planta sea completamente automatizada.

De acuerdo con la definición de la "Nema" (National Electrical Manufacturers Association) un PLC es: "Un aparato electrónico operado digitalmente, que usa una memoria programable para el almacenamiento interno de instrucciones para implementar funciones específicas, tales como lógica, secuenciación, registro y control de tiempos, conteo y operaciones aritméticas para controlar, a través de módulos de entrada/salida digitales (ON/OFF) o analógicos, varios tipos de máquinas o procesos".

El PLC realiza una secuencia de operaciones ya establecidas que pueden variar un poco dependiendo del fabricante pero en la mayoría de las ocasiones es el mismo.

- a) Al encender se efectúa una auto comprobación, inhabilita las salidas. Entra en modo de operación.
- b) Lee el estado de las entradas y las almacena en la tabla de imagen de entradas.
- c) En base a su programa de control, el PLC modifica la tabla de imagen de salida.
- d) El procesador actualiza el estado de las salidas "copiando" hacia los módulos de salida el estado de la tabla de imagen de salidas (estas controlan los módulos de salida del PLC, relay, triacs, etc.).
- e) Vuelve paso b)

A cada ciclo de ejecución de esta lógica se le denomina ciclo de barrido (scan).

En el caso del PLC Omron CS1G CPU42H se tiene las siguientes características.

**Tabla 3.2.** Características del PLC Omron CS1G CPU42H

Característica	Descripción
Nº de puntos de E/S	960 (No. de racks expansiones 2)
Capacidad de programa	10 Kpasos
Área DM	32KW
Área EM	32KW x 1 banco
Tiempo de instrucción	40ns
Control	Método de programa almacenado
Control de E/S	Método de scan cíclico o modo bajo demanda.
Idioma de programación	Diagrama de relés
Longitud de instrucción	1 a 7 pasos/instrucción
No. de instrucciones	Aprox. 400
No. de tareas	288 (256 compartidas con tareas de Interrupción)
Tipos de interrupción	Interrupciones programadas, de E/S, de alimentación OFF y de E/S externas (interrupciones de tarjetas opcionales y de unidades de bus de CPU).
Puerto de comunicación interno	1 puerto de periféricos y 1 puerto RS-232C
Productos opcionales instalables	Tarjetas de memoria, tarjetas opcionales (Tarjetas de comunicaciones serie)

### 3.3 Variador de Frecuencia Eurotherm 690+

Un variador de frecuencia se utiliza para variar la velocidad del un motor AC sea monofásico o trifásico por medio del control de frecuencia que se le aplica al motor. Además de variar la frecuencia también se varía la tensión de alimentación del motor para compensar el efecto que sufre el motor por la variación en la frecuencia.

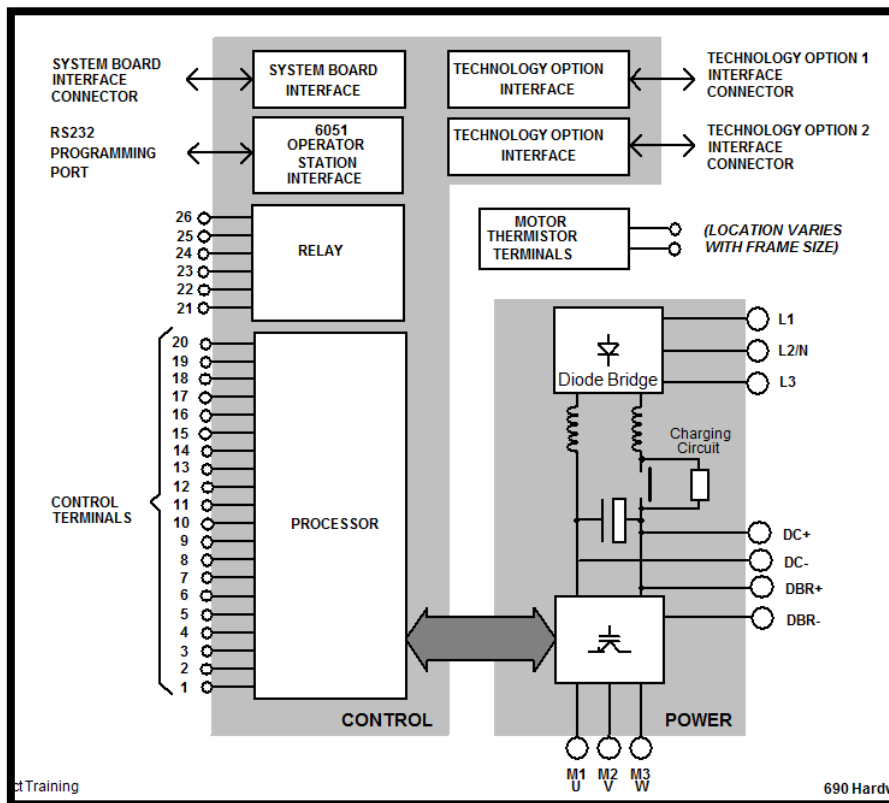
Estos dispositivos operan bajo el principio de que la velocidad síncrona de un motor de AC está determinada por la siguiente ecuación.

$$RPM = \frac{120 \times f}{p} \quad 3.20$$

Donde “RPM” son revoluciones por minuto, “f” es la frecuencia de la línea de alimentación (Hz) y “p” es el número de polos del motor.

De esta ecuación se puede observar que la velocidad del motor es directamente proporcional a la frecuencia de la línea de alimentación, por lo que al aumentar la frecuencia, la velocidad del motor también aumentara en la misma proporción.

El diagrama del variador de frecuencia Eurotherm 690+ se muestra en la siguiente figura.



**Figura 3.2.** Diagrama del Variador de frecuencia Eurotherm 690+ C-D.

De la figura anterior en la etapa de potencia se puede observar el funcionamiento básico del variador, el cual inicialmente rectifica la tensión trifásica de entrada por medio de un puente de diodos y condensadores para posteriormente hacerlo pasar por inversores los cuales pasan esta tensión CD a CA pero con la frecuencia indicada por el control del variador.

Las principales características de los variadores de frecuencia Eurotherm 690+ A-D se resumen en la siguiente tabla.

**Tabla 3.3.** Características de los variadores de frecuencia Eurotherm 690+ A-D.

Característica	Descripción
Configuraciones	Open-loop Drive (V/F Fluxing) Sensor less Vector Fluxing Mode Closed-loop Vector Mode
Tensión de operación	220 V a 500 V $\pm 10\%$
Potencia	0.75 KW a 90 KW
Frecuencias	0 a 480 Hz en pasos de 120Hz 240Hz y 480Hz
Local Control	forward, reverse, run, stop, jog y otros
Pantalla	32 caracteres
Módulos	Retroalimentación de velocidad Comunicaciones
I/O	4 entradas analógicas 3 salidas analógicas 7 entradas digitales 3 salidas digitales
Aplicaciones	7 Macros para diversas aplicaciones pre configuradas

### 3.4 Protocolo de comunicación.

Este se define como el conjunto de reglas y comandos que permiten la comunicación entre distintos dispositivos, sean del mismo o diferente fabricante. Ejemplo Profibus, RS-485, TCP/IP, etc.

Cuando un protocolo se vuelve muy popular y se utiliza en una gran cantidad de dispositivos, este se convierte en un estándar. Ejemplo RS-232, RS-485, Modbus, etc.

### 3.5 Software Labview

Este programa es ampliamente utilizado en la industria tanto para sistemas SCADA como para otra gran cantidad de aplicaciones. Cuenta con módulos especializados para aplicaciones específicas como por ejemplo el DSC (Data Logging and Supervisory Control) para sistemas SCADA.

Labview utiliza una programación gráfica lo cual es una gran diferencia con códigos como C++, Pascal y otros, esta característica permite realizar aplicaciones en menores periodos de tiempo. Otra diferencia se presenta en la forma en que se ejecutan las instrucciones, en lenguajes como C++ el programa se ejecuta línea a línea de forma secuencial, pero en Labview una función se ejecuta hasta que los datos estén en sus entradas no antes, esto garantiza que una aplicación no termine antes de que los datos se generen.

Las aplicaciones generadas en Labview se denominan VI o instrumentos virtuales esto debido a que inicialmente Labview fue concebido para reemplazar instrumentos como osciloscopios y multímetros por aplicaciones en computadoras que se asemejaban a estos. Cada VI tiene dos partes fundamentalmente una llamada panel frontal donde se colocan los controles como osciloscopios, botones, perillas, etc y otra denominada diagrama de bloques donde se coloca las funciones y las conexiones con los controles y las funciones.

Como en los demás lenguajes de programación Labview cuenta con estructuras de programación típicas como: case, for, while, funciones lógicas y otras, pero también cuenta con una gran cantidad de funciones para el análisis de datos, obtención de datos por medio de RS-232, RS-485, Modbus, OPC, para sistemas de control y muchos más. Lo que lo convierte en un programa muy útil para aplicaciones industriales y científicas.

## **Capítulo 4: Procedimiento metodológico**

### **4.1 Reconocimiento y definición del problema**

Con el fin de determinar y reconocer el problema se realizaron varias entrevistas con el Ing. Daniel González quien está a cargo de la implementación del sistema SCADA y con los técnicos de la empresa, estos indicaron los detalles del problema y con ello se determinaron los objetivos del proyecto.

### **4.2 Obtención y análisis de información**

#### **4.2.1 Investigación bibliográfica**

La primera parte del proyecto consistía en la investigación y estudio de los dispositivos que componen el proceso de colado, como el PLC Omron CS1G y los variadores de frecuencia Eurotherm 690+ así como el software y programación de estos, además se estudio y analizó la teoría del modelado de procesos y otros software utilizados para la solución del proyecto.

La investigación se realizó de la siguiente manera:

- Investigación y estudio del PLC Omron CS1G y los variadores de frecuencia Eurotherm 690+.
- Investigación y estudio del proceso de control B.
- Investigación y estudio de los protocolos de comunicación soportados por el PLC Omron CS1G y los variadores eurotherm 690+.
- Estudio del Software Labview y Matlab.
- Investigación y estudio del modelado de procesos.



#### **4.4.2 Determinación de los protocolos de comunicación.**

Para determinar cuáles son los protocolos de comunicación abiertos a utilizar se realizó una investigación y un estudio detallado de los protocolos soportados por el PLC y los variadores de frecuencia. Además se realizó una entrevista con el proveedor de los variadores de frecuencia para aclarar algunas dudas así como conocer que módulos de comunicación nos podían ofrecer.

#### **4.4.3 Modelado de Procesos.**

Para esta etapa se utilizó el software Matlab y la aplicación System Identification Tool la cual realiza las simulaciones, determina los modelos y permite validar los modelos por medio de varias pruebas y comparaciones.

Las mediciones para las simulaciones se realizaron por medio del software de los variadores de frecuencia Eurotherm 690+ el cual permite visualizar y guardar variables en un archivo .csv para Excel.

#### **4.4.4 Restricciones.**

Para este proyecto se presentaban las siguientes restricciones.

- Los protocolos de comunicación debían ser abiertos.
- El Sistema A debía conectarse al sistema SCADA con protocolo OPC.
- El software del SCADA debía ser Labview.

## **Capítulo 5: Descripción detallada de la solución**

Debido a que el proceso de colado es crítico para la producción en la empresa y permanece en funcionamiento continuo, se vio en la necesidad de modelar el mismo, con el fin de poder determinar su comportamiento dinámico y estático.

### **5.1 Modelado del motor y el variador del CASTER.**

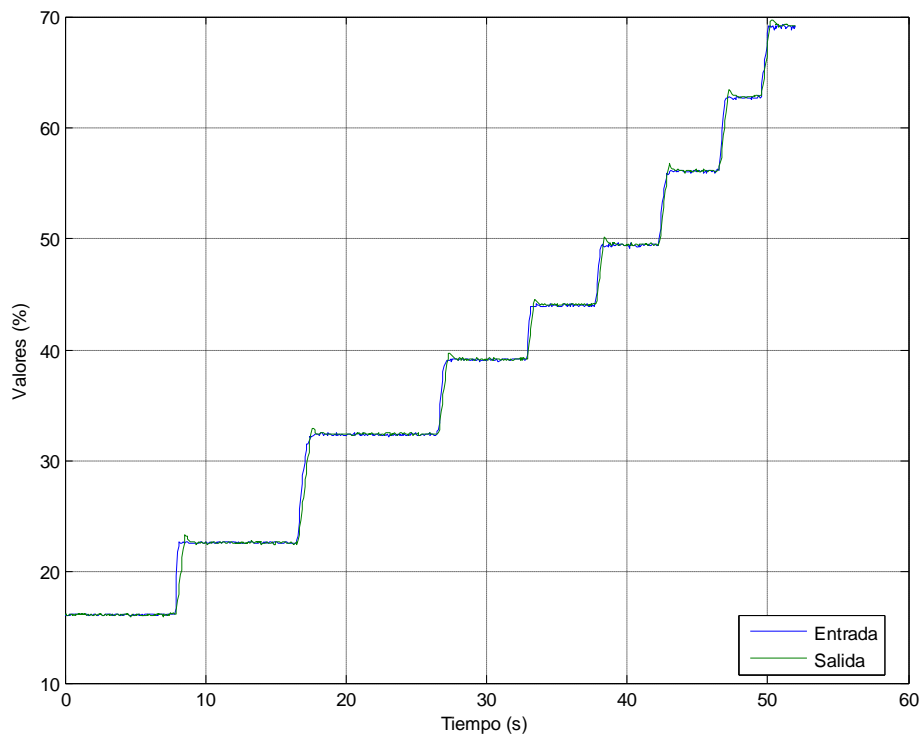
El modelo matemático se realizó por medio del análisis de las entradas y salidas del proceso de control de velocidad, por lo que se realizaron una serie de mediciones cuando el motor estaba sin carga así como cuando estaba en el funcionamiento normal.

Por medio del software MATLAB y la aplicación System Identification Tool se obtuvieron varios modelos y se escogió el que mejor reflejaba el comportamiento real.

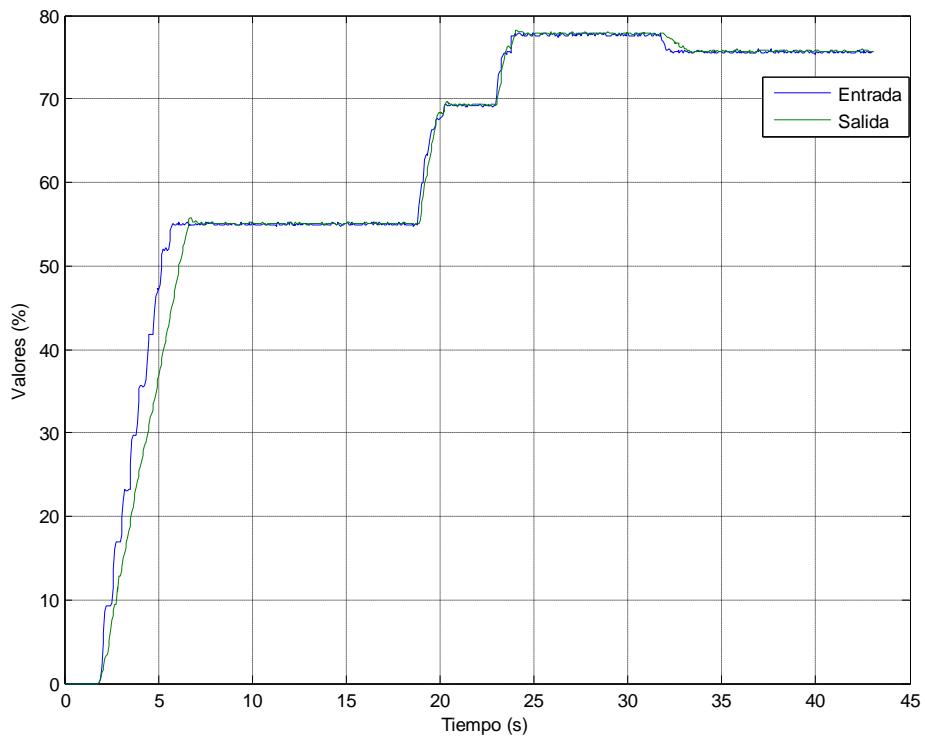
#### **5.1.1 Gráficas de la entrada y la salida del proceso real.**

Las mediciones se obtuvieron mediante la lectura de los valores de consigna (Entrada) y la velocidad de retroalimentación (Salida) la cual es la velocidad real del motor, obtenida mediante el codificador óptico del variador de frecuencia eurotherm 690+. Estos datos se obtuvieron mediante el software que provee el fabricante (DSElite) el cual permite monitorear y almacenar mediante una PC, cualquiera de las variables del variador.

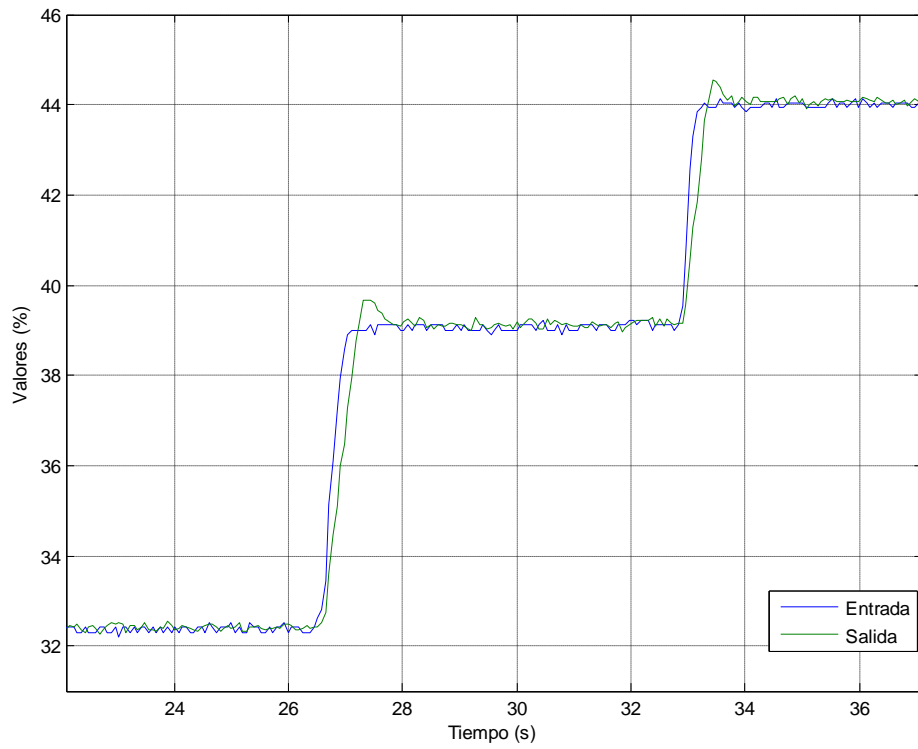
Las siguientes gráficas representan los datos obtenidos de las mediciones. Las tablas no se presentan debido a que son muy extensas y poco explicativas.



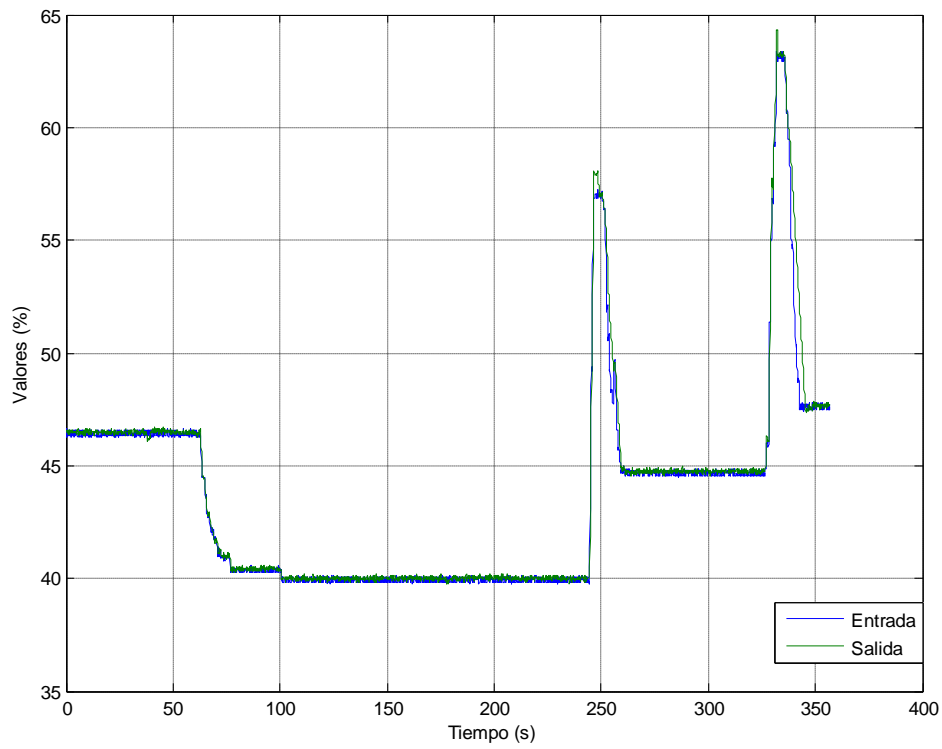
**Figura 5.1.** Medición 1 sin carga.



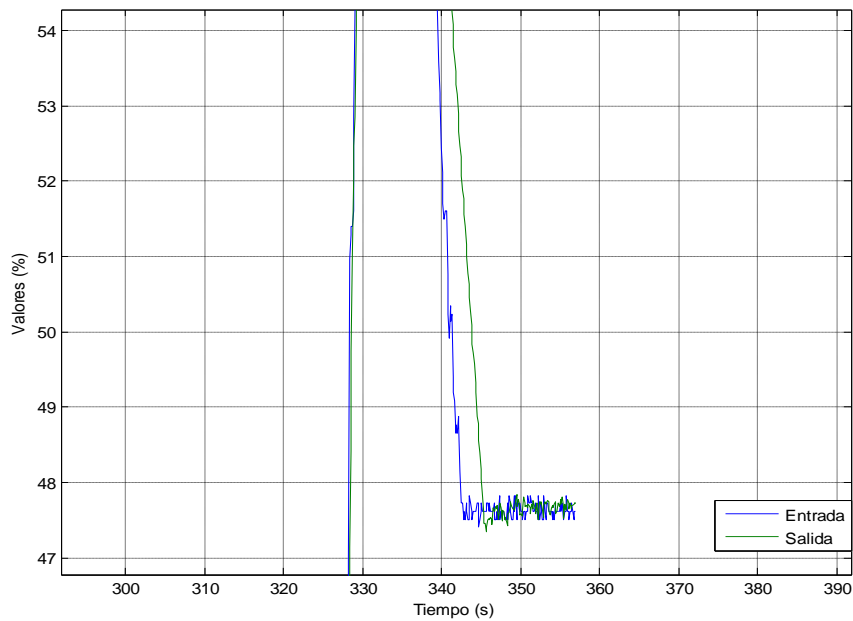
**Figura 5.2.** Medición 2 sin carga.



**Figura 5.3.** Medición 3 sin carga (Zoom Figura 5.1)



**Figura 5.4.** Medición 4 Funcionamiento.



**Figura 5.5.** Mayor diferencia entre la entrada y la salida.

De las figuras anteriores se observa que el variador de frecuencia logra una rápida respuesta del proceso, esto debido a que la salida es prácticamente igual a la entrada a excepción de un pequeño sobre impulso de aproximadamente 8.8% y de la inercia que presenta el motor ante cambios bruscos tal y como se observa en la figura 5.5.

Las mediciones de las figuras anteriores se utilizaron para obtener los modelos estimados así como para compararlos o validarlos entre ellos y de esta manera obtener el modelo final que tenga la mejor aproximación.

El modelado que se realizó para este proyecto es por medio de la identificación paramétrica y se hizo por medio de la aplicación System Identification Tool. Esta aplicación permite varios métodos para la estimación de parámetros, entre los que se utilizaron están la estimación paramétrica, la cual es exactamente igual a la que se explico anteriormente y la de process models, la cual utiliza iterative prediction-error minimization method (PEM), este método utiliza el mismo principio de estimación paramétrica con la diferencia de que PEM utiliza la optimización para minimizar al máximo el criterio de mínimos cuadrados (ecuación 3.7).

### 5.1.3. Modelos estimados

Se presentan los principales modelos estimados obtenidos por medio de la identificación paramétrica y los datos obtenidos en las mediciones (figuras 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4.) Se presentan solo los modelos 1, 2 y 4 debido a que fueron los que mejores resultados presentaron.

Los resultados con los nombres “función de pérdidas” y “FPE” al final de cada modelo son los valores mínimos del criterio de mínimos cuadrados y el criterio de Akaike respectivamente.

#### 5.1.3.1 Modelo 1.

Modelo del proceso con función de transferencia del tipo.

$$G(s) = K \frac{1 + T_z s}{1 + 2 \cdot \text{zeta} \cdot T_w s + (T_w s)^2} \cdot e^{-T_d s} \quad (5.1)$$

Donde:

$$K = 1.0016 \quad T_w = 0.17383 \quad \text{zeta} = 0.6513 \quad T_d = 0 \quad T_z = 0.09889$$

$$G(s) = 1.0016 \frac{1 + 0.09889 s}{1 + 0.22643 s + 0.03022 s^2} \quad (5.2)$$

Estimación usando iterative prediction-error minimization method (PEM).

Función de pérdidas 0.0346784 and FPE 0.0352256.

#### 5.1.3.2 Modelo 2.

Modelo discreto ARX:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t) \quad (5.3)$$

Donde:

$$A(q) = 1 - 0.6255 q^{-1} + 0.01076 q^{-2}$$

$$B(q) = 0.3592 q^{-1} + 0.02688 q^{-2}$$

Modelo estimado usando ARX.

Función de pérdidas 0.0142931 and FPE 0.0143336

Tiempo de muestreo: 0.05723 s.

La función transferencia discreta:

$$G(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{0.3592 z + 0.02688}{z^2 - 0.6255 z + 0.01076} \quad (5.4)$$

Convirtiéndola a continua:

$$G(s) = \frac{5.176 s + 614.6}{s^2 + 79.19 s + 613.3} = \frac{5.176(s + 118.74)}{(s + 8.7)(s + 70.5)} \quad (5.5)$$

#### 5.1.3.3 Modelo 4.

Modelo del proceso con función de transferencia del tipo.

$$G(s) = K \frac{1 + T_z s}{(1 + 2 \cdot \text{zeta} \cdot T_w s + (T_w s)^2)(1 + T_{p3})} \cdot e^{-T_d s} \quad (5.6)$$

Donde:

$$K = 1.0016 \quad T_w = 0.10724 \quad \text{zeta} = 0.69955 \quad T_{p3} = 0.29902 \quad T_d = 0 \quad T_z = 0.33529$$

$$G(s) = 1.0016 \frac{1 + 0.33529 s}{(1 + 0.15 s + 0.0115 s^2)(1 + 0.29902 s)} \quad (5.7)$$

Estimación usando iterative prediction-error minimization method (PEM).

Función de pérdidas 0.033497 and FPE 0.0336396.

#### 5.1.4. Validación de los modelos

En las siguientes figuras se observan las salidas de los modelos así como la salida del proceso real, además se muestra el porcentaje de aproximación entre las salidas de los modelos y la salida real del proceso.

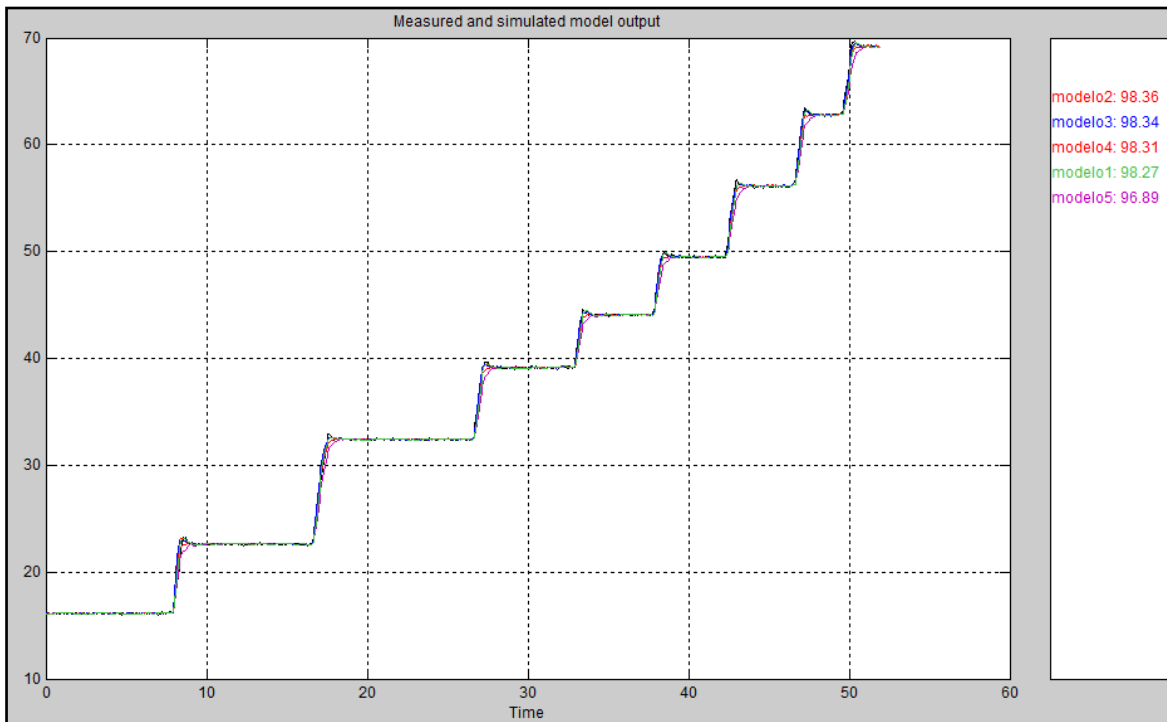


Figura 5.6. Comparación 1 entre los diferentes modelos.

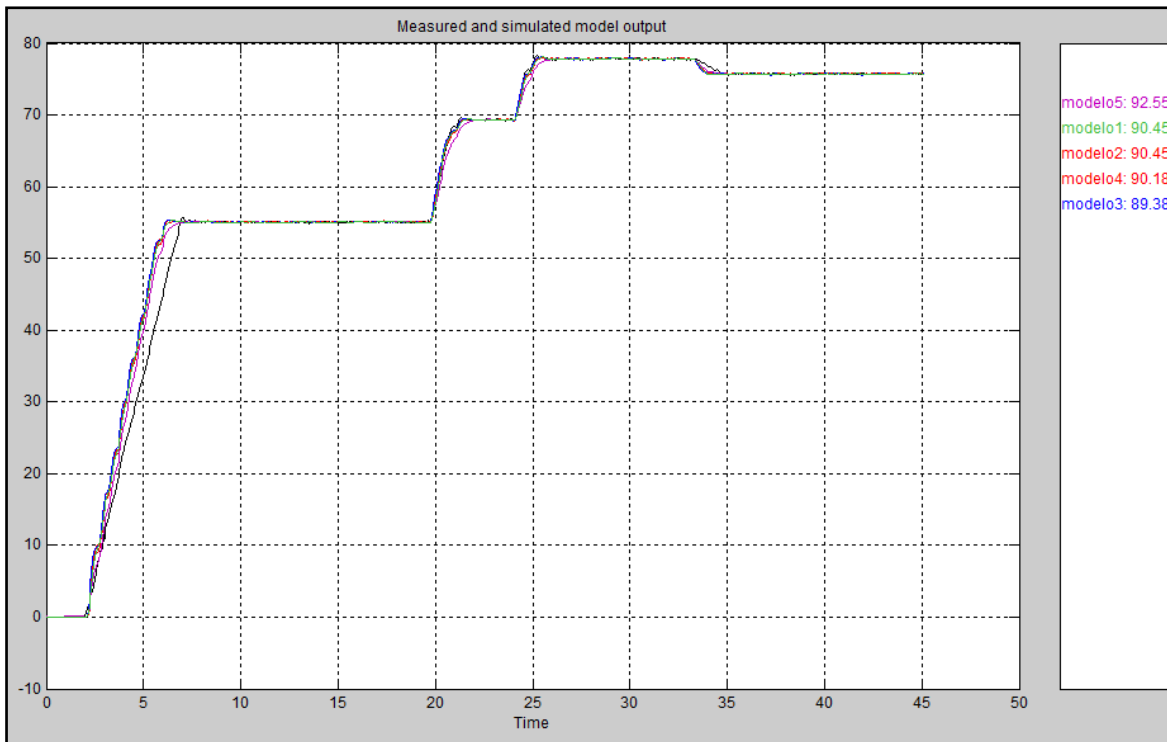


Figura 5.7. Comparación 2 entre los diferentes modelos.



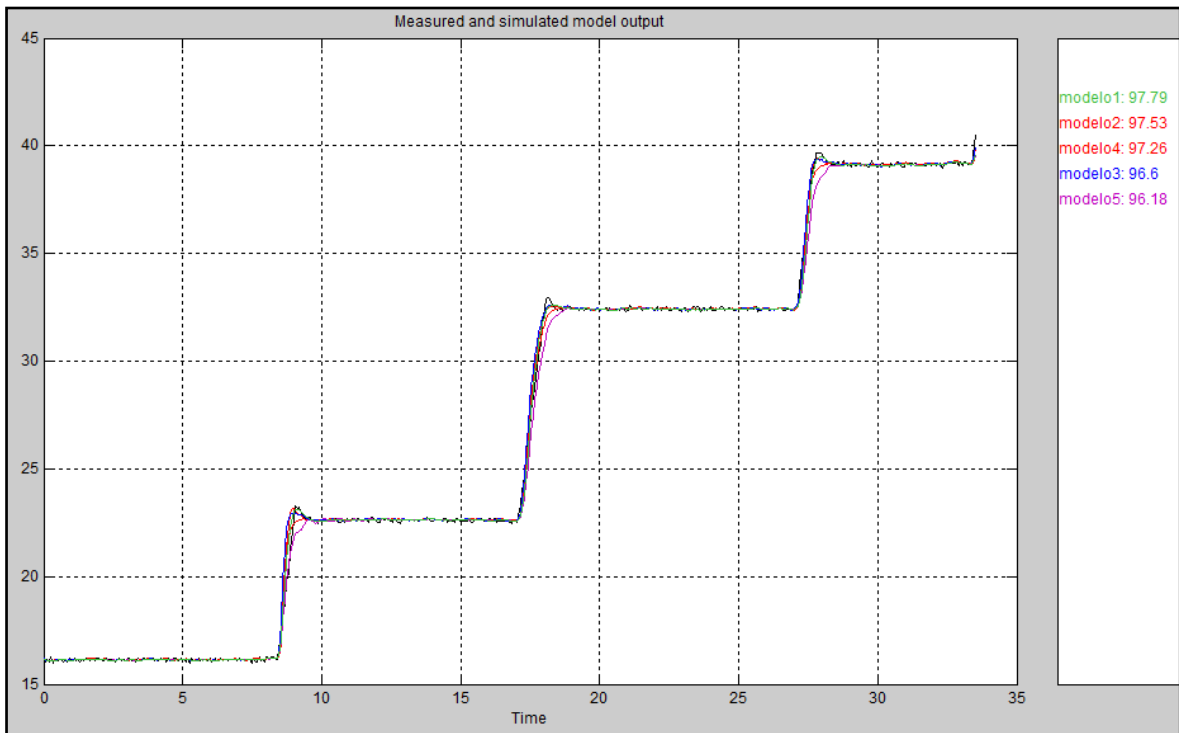


Figura 5.8. Comparación 3 entre los diferentes modelos.

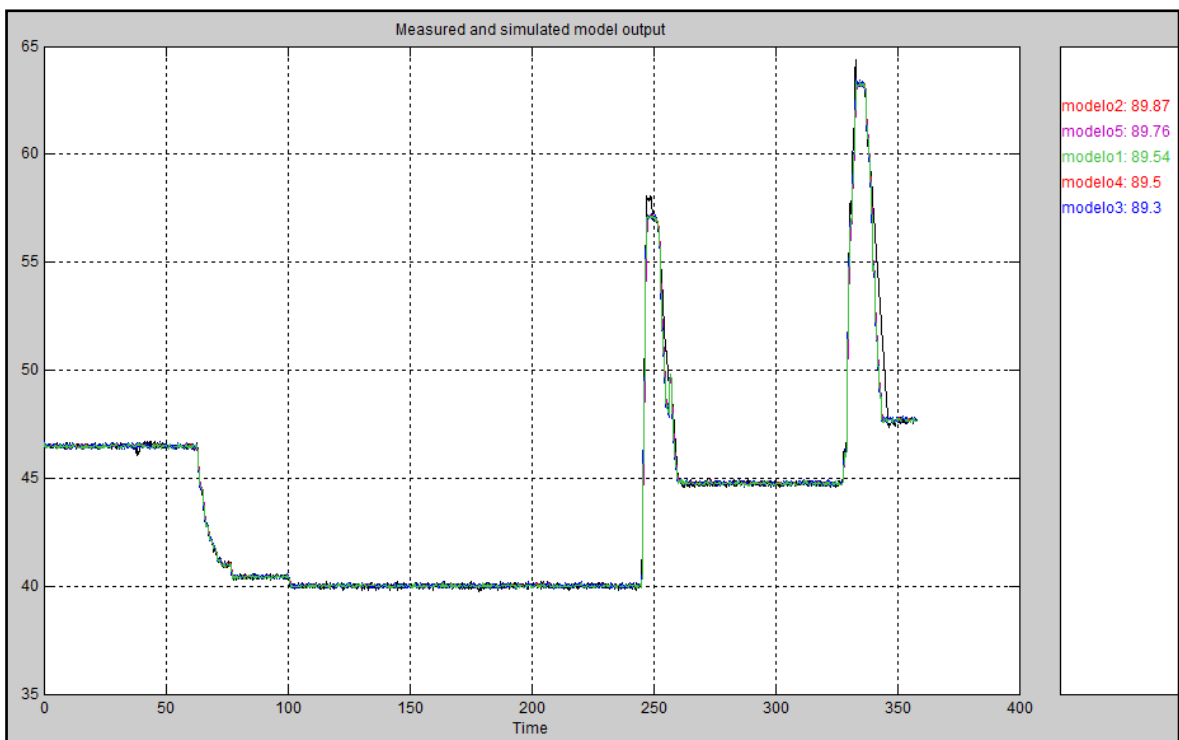
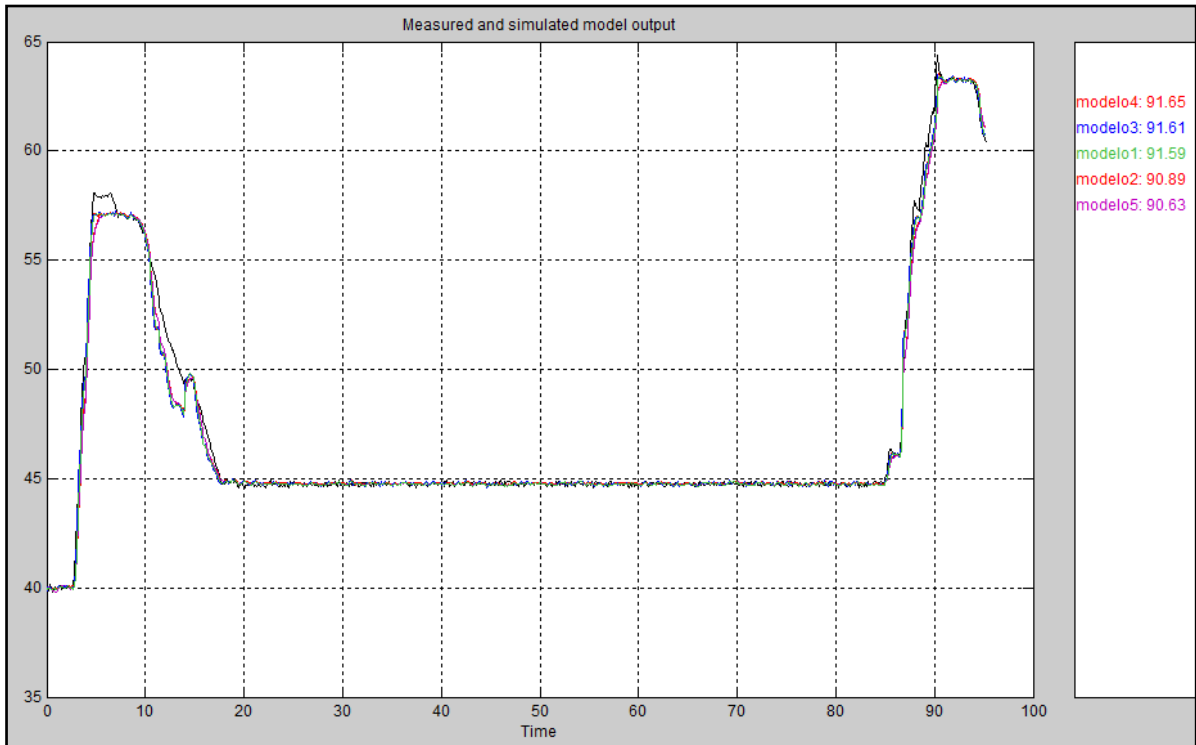


Figura 5.9. Comparación 4 entre los diferentes modelos.



**Figura 5.10.** Comparación 5 entre los diferentes modelos.

En la siguiente tabla se resumen los resultados obtenidos de los diferentes modelos, con la salida del proceso real.

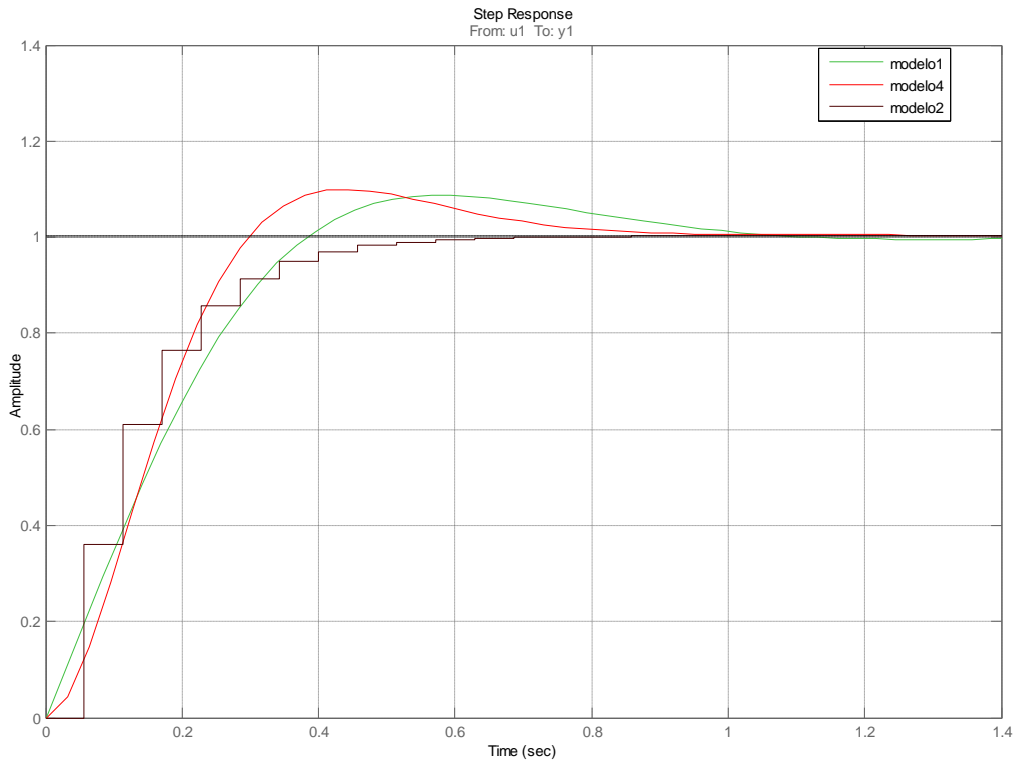
**Tabla 5.1.** Comparación entre los diferentes modelos.

Figura	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
5.6	98.27	<b>98.36</b>	98.34	98.31	96.89
5.7	90.45	90.45	89.38	90.18	<b>92.55</b>
5.8	<b>97.79</b>	97.53	96.6	97.26	96.18
5.9	89.54	<b>89.87</b>	89.3	89.5	89.76
5.10	91.59	90.89	91.61	<b>91.65</b>	90.63
Promedio (%)	<b>93.528</b>	<b>93.42</b>	93.046	<b>93.38</b>	93.202

Como se observa de la tabla 5.1, el tercer mejor modelo, es el modelo 4, pero este tiene tres polos lo que resulta en un modelo más complicado de lo necesario, esto debido a que los otros modelos solamente poseen 2 polos y la diferencia entre estos y el modelo 4 no es mayor a 0.04% por lo que se descarto utilizar a éste.

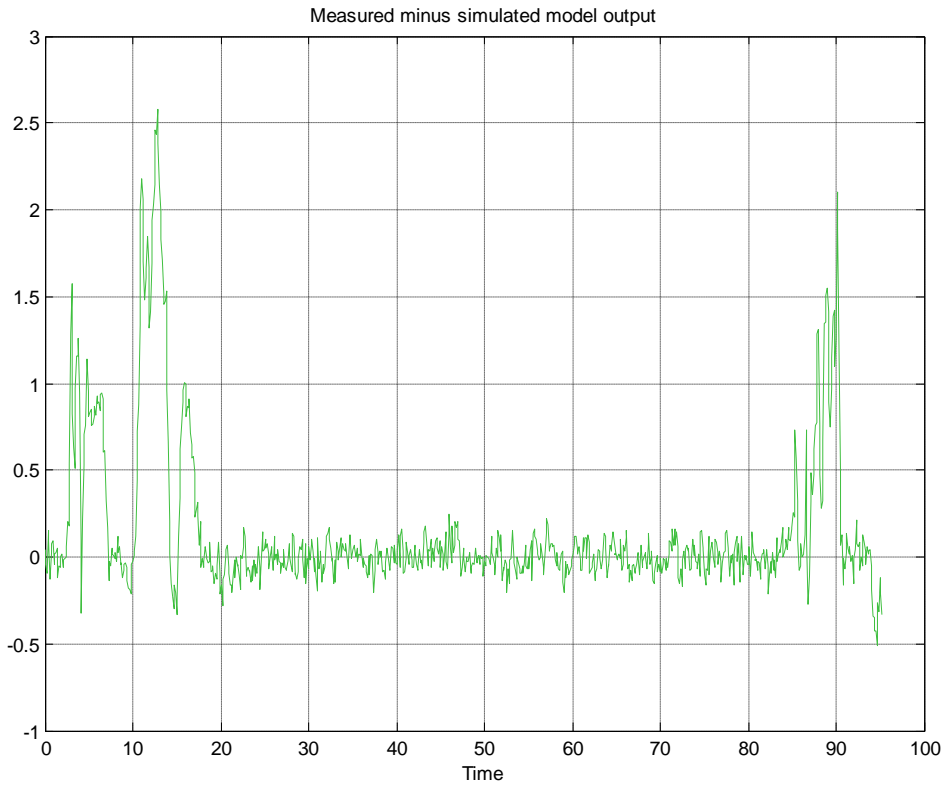
El segundo mejor modelo según la tabla era el modelo dos, pero después de un análisis más detallado de las respuestas al escalón unitario (figura 5.11) se observó que este modelo no tenía sobre impulso así como su tiempo de estabilización era de 0.456 s el cual es 51% menor al de los otros modelos, por lo que se determinó que el mejor modelo del proceso sería el modelo 1, por su respuesta al impulso y por su porcentaje de aproximación (promedio de 93.528). Modelo escogido: Modelo 1 (ecuación 5.8)

$$G(s) = 1.0016 \frac{1 + 0.0988 s}{1 + 0.22643 s + 0.03022 s^2} \quad (5.8)$$

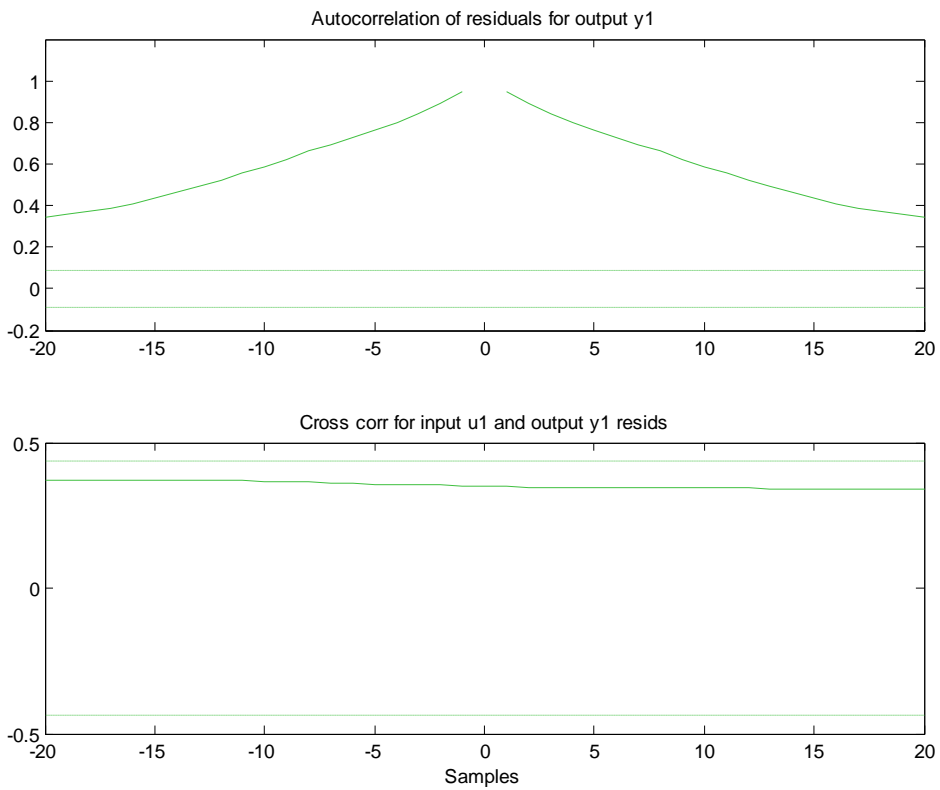


**Figura 5.11.** Respuesta del modelo 1,2 y 4 a un escalón unitario.

En la figura 5.11 se observa que el modelo 2 es discreto debido a que se obtuvo de una estimación paramétrica lineal, mientras que el modelo 1 se obtuvo por medio de la aplicación Process Models el cual proporciona una función de transferencia en tiempo continuo pero utiliza el mismo principio estimación paramétrica.



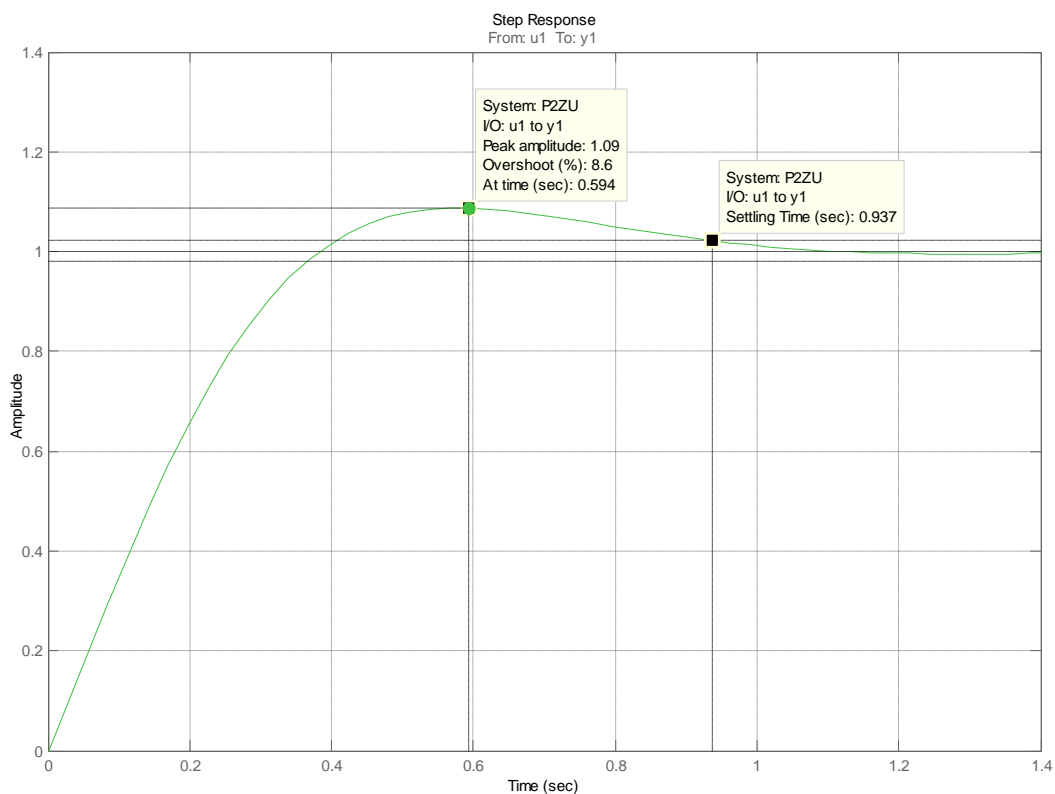
**Figura 5.12.** Gráfica del error del modelo 1 respecto a la salida de la figura 5.10.



**Figura 5.13.** Gráficas de correlación del modelo 1.

La figura 5.12 muestra una gráfica donde se observa el error de la salida del modelo 1 con respecto a la salida de la figura 5.10 en ésta se muestra que la mayor diferencia es de aproximadamente 2.7% lo cual válida el modelo 1. Se utilizó la salida de la figura 5.10 debido a que esta se tomo cuando el proceso estaba en funcionamiento y era de gran importancia que el modelo tuviera una buena aproximación respecto a esa salida específicamente.

En la figura 5.13 se observa la auto correlación entre los residuos de la salida del modelo 1 y el de figura 5.10 así como la correlación cruzada entre la entrada y los residuos de la salida. En la primera figura se determina que los residuos de la salida no son periódicos ya que el máximo esta en cero por lo que no se presentan los mismos errores de forma periódica en las muestras. De la segunda gráfica se observa un valor pequeño y casi constante lo que indica que no hay dependencia alguna entre la entrada y los residuos de la salida por lo que el modelo es capaz de describir completamente la dinámica del proceso. Si la correlación cruzada sobrepasa los límites de  $\pm 3 \cdot \sqrt{P}$  para algún valor de  $\tau$ , significa que los residuos y la entrada no son independientes para ese valor de  $\tau$ .



**Figura 5.14.** Respuesta al escalón unitario del modelo 1 sin PID.

De la Figura 5.14, se observa que el comportamiento dinámico y estático de este sistema, es bastante eficiente y no es de gran necesidad implementar un PID para eliminar un sobreimpulso inferior a 10%. Sin embargo se diseñó y se implementó un PID con el fin de validar de forma real el modelo estimado. Esto significa que si el PID diseñado por medio del modelo estimado, elimina el sobreimpulso y mantiene el tiempo de estabilización del proceso real, el modelo estimado habrá cumplido con su función de describir el comportamiento real del proceso y a su vez validará la identificación de sistemas como un método para obtener reguladores o compensadores en vez de a prueba y error como normalmente se acostumbra en esta empresa.

## 5.2. Diseño del regulador.

Debido a que el software del variador de frecuencia solo posee reguladores de tipo PID, se ve en la necesidad de implementar este tipo de regulador. La ecuación 5.9 muestra la forma típica de un regulador PID y en la ecuación 5.10 se observa el PID tipo 1 del variador de frecuencia.

$$G_{PID}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (5.9)$$

$$K_{PID} = \frac{K_p(1 + s T_i)(1 + s T_d)}{s T_i(1 + s T_f)} \quad (5.10)$$

Donde:  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  son las constantes proporcional, integral y derivativa respectivamente.  $T_f$  es la constante de tiempo para un filtro pasa bajas que se puede implementar para filtrar las componentes de altas frecuencias debidas al termino derivativo.

El PID Tipo 2 del variador tiene una función de transferencia como la que se muestra en la ecuación 5.11.

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{1 + T_f s} \quad (5.11)$$

Donde:  $K_P$ ,  $K_I$  y  $K_D$  son las constantes proporcional, integral y derivativa respectivamente.  $T_F$  es la constante de tiempo para un filtro pasa bajas.

### 5.2.1 Reglas de ajuste para los reguladores PID

Para la sintonización del PID se puede utilizar el segundo método de Ziegler y Nichols, en el cual se debe encontrar  $K_P$  crítica cuando  $T_I = \infty$  y  $T_d = 0$ .  $K_P$  crítica se encuentra cuando la salida del sistema a controlar empieza a oscilar (cuando el sistema es inestable).

Después de encontrar la  $K_{cr}$  se procede a calcular el periodo de la oscilación obtenida ( $P_{cr}$ ). Y por último se obtienen los valores del PID por medio de unas formulas.

El problema es que el modelo 1 no tiene una  $K_{cr}$  por lo que esta forma de sintonización no va a funcionar. Como se observa en la figura 5.15 el lugar de las raíces nunca se acerca a la derecha del cero (Por lo que el sistema nunca será inestable al modificar  $K$ ).

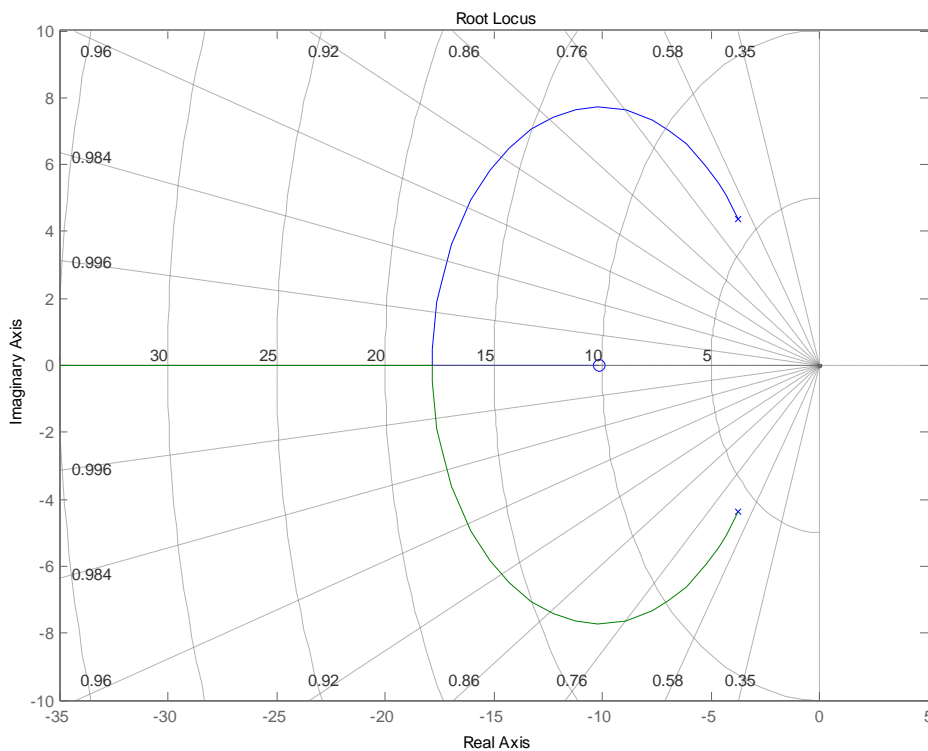


Figura 5.15. Lugar de las raíces del modelo 1.

Debido a esto no se podrá ajustar el PID por lo que se diseñara un compensador de adelanto y de atraso en cascada para implementarlo en el modulo PID (Tipo 1) del variador de frecuencia.

### **5.2.2 Diseño mediante el lugar de las raíces.**

Este consiste el modificar el lugar de las raíces del sistema original agregando polos y ceros para que el nuevo lugar de las raíces en lazo cerrado pase por donde se presenta el comportamiento esperado. El lugar de las raíces del modelo 1 se presenta en la figura 5.15. Y la respuesta al escalón unitario se observa en la figura 5.14. De esta figura se observa que el modelo 1 tiene un sobre impulso de 8.6% y un tiempo de estabilización de 0.937 s.

Debido a que el modelo 1 tiene polos complejos, no se puede diseñar el compensador de adelanto por los métodos más comunes como el de la bisectriz o el de ubicación del cero. Además no se puede aplicar un compensador del filtro de muesca porque el PID del variador no posee una ecuación que sea similar a la del filtro y el modelo es estimado no exacto. Es por esto que se experimentara por medio de aplicación SISO Design de MATLAB la cual permite manipular la ganancia, agregar polos y ceros y analizar el comportamiento del sistema final.

El compensador a diseñar debe de tener la forma que proporciona el PID tipo 1 del variador y que cumpla con los siguientes requerimientos: que tenga un sobre impulso menor del 3% y un tiempo de estabilización menor a 1 s.

### **5.2.3 Procedimiento de diseño con SISO Design.**

Inicialmente se introdujo un compensador de adelanto al sistema de lazo cerrado y se variaron el polo y el cero de este, hasta obtener un comportamiento dinámico deseado. Después de esto se observo que existía un error de estado estacionario por lo que se agrego un compensador de atraso con un polo en el origen y un cero a la derecha del cero del modelo 1

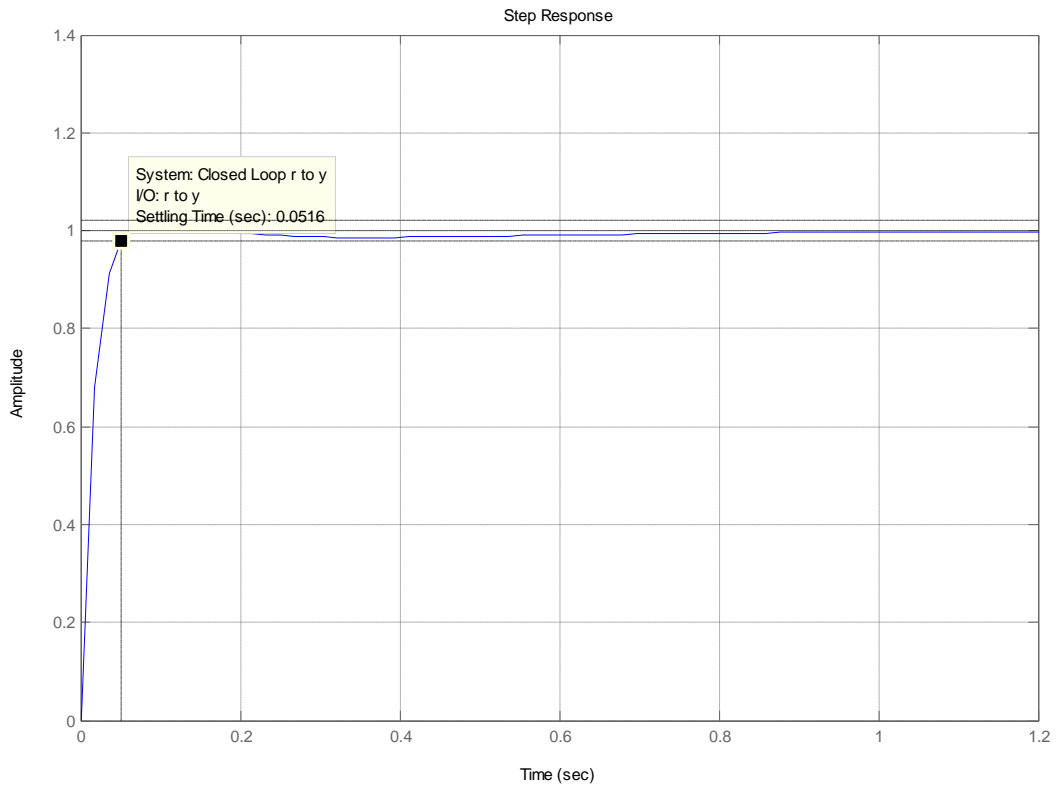


( $s=10.11$ ), esto con el fin de no modificar significativamente la respuesta dinámica.

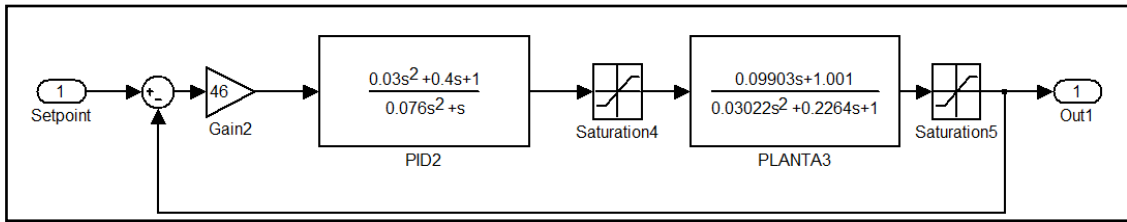
El compensador que cumple con los requerimientos se observa en la ecuación 5.12. Y la salida del sistema a lazo cerrado con el regulador PID se observa en la figura 5.16. El diagrama de bloques de todo el sistema se observa en la figura 5.17.

$$K_{PID} = \frac{4.6(1 + s 0.3)(1 + s 0.10)}{s 0.10(1 + s 0.076)} \quad (5.12)$$

Los valores que se asignarían a las entradas del modulo PID del variador de frecuencia son:  $T_d = 0.3$   $T_i = 0.1$   $T_f = 0.076$   $K_p = 4.6$

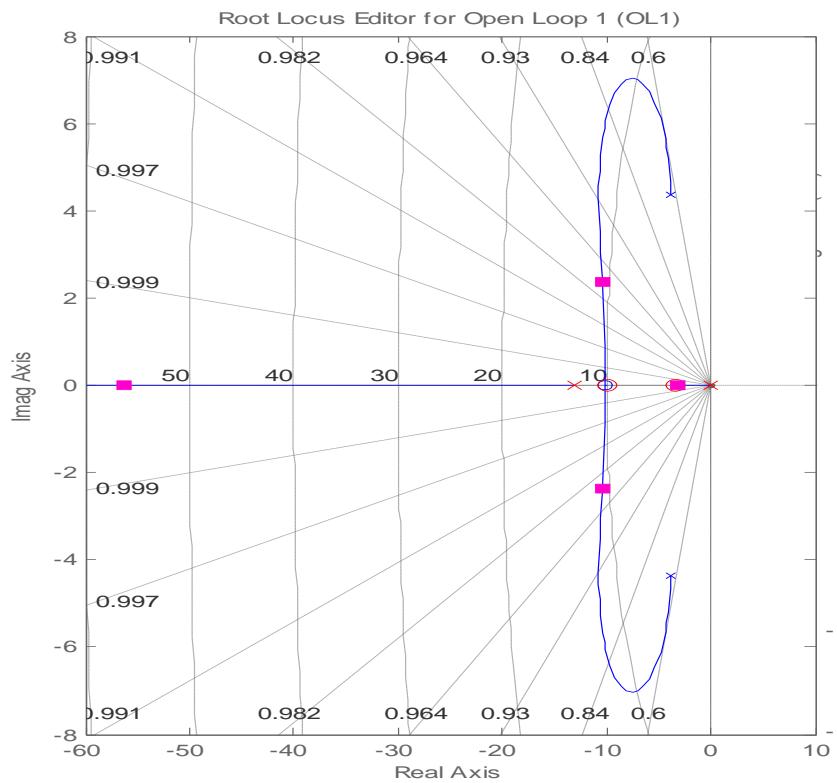


**Figura 5.16.** Respuesta al escalón unitario del modelo 1 con PID.

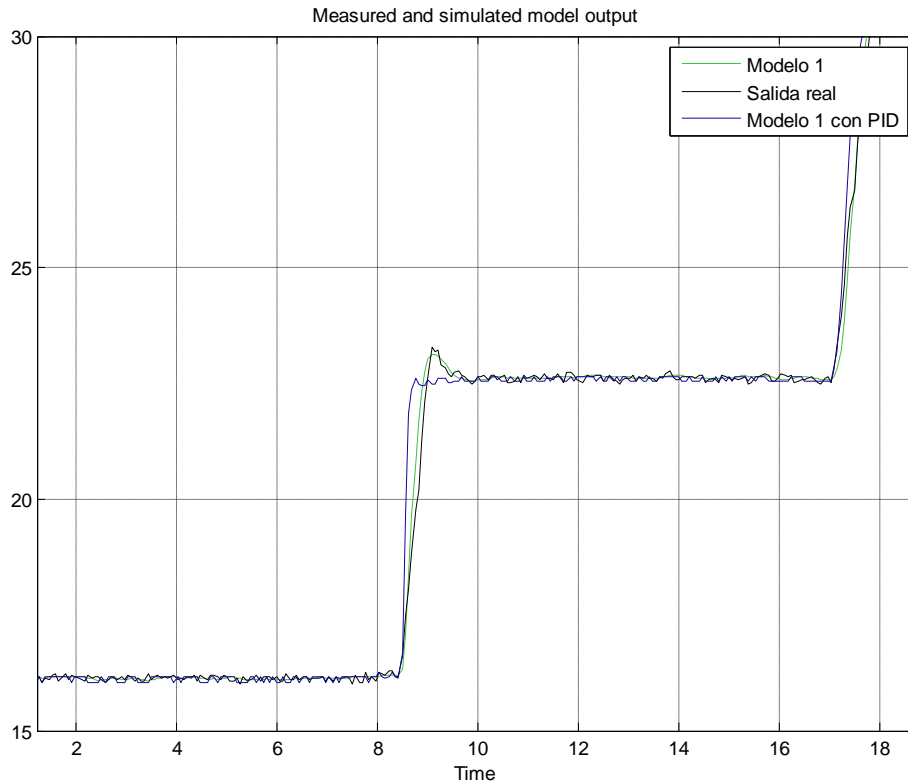


**Figura 5.17.** Diagrama de bloques del sistema final.

En la figura 5.18 se observa el lugar de las raíces del modelo con el regulador PID, y en la cual se pueden observar los polos y los ceros agregados por el PID así como la deformación que sufrió el lugar de las raíces con respecto a la del modelo 1.



**Figura 5.18.** Lugar de las raíces del modelo 1 con PID.



**Figura 5.19.** Comparación de la salida real y el modelo 1 con PID y sin PID.

En la figura 5.19 se puede observar cómo en el modelo 1 con PID se elimina el sobre impulso que se observa en el sistema real y en el modelo 1 sin PID.

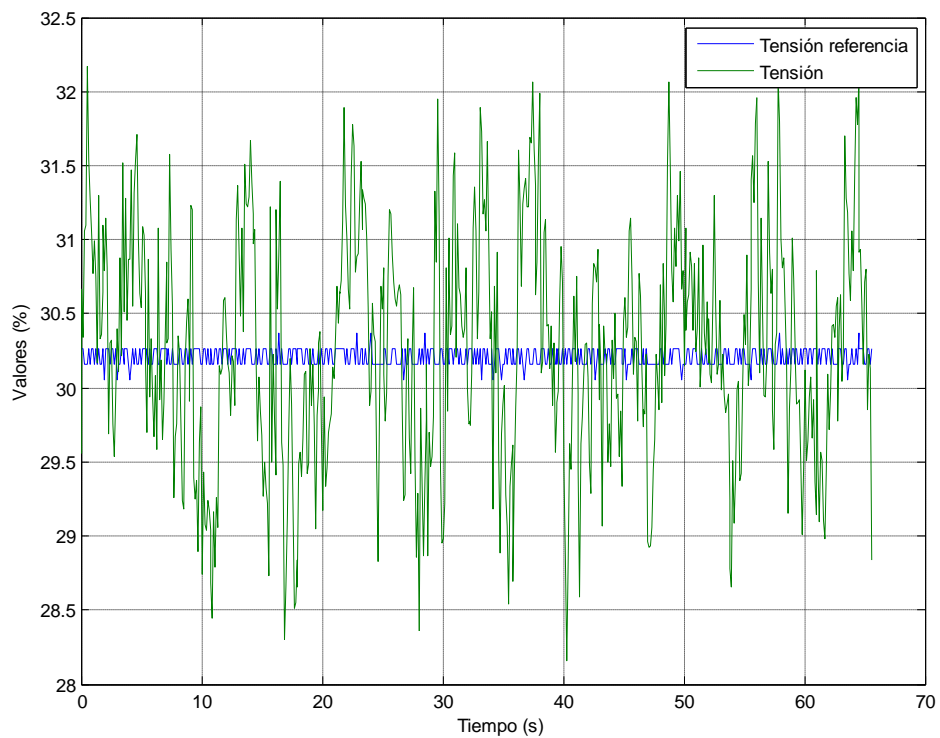
### 5.3. Análisis del variador del enrollador.

La función de este proceso es la de ir enrollando la lamina de aluminio a una tensión constante o tensión de referencia. Pero para realizar el modelado se necesita realizar variaciones en la tensión de referencia lo cual no es posible, debido a que cambios bruscos en este valor ocasionaría que la boquilla en el caster se quebrase, interrumpiendo todo el proceso y generando pérdidas de más de 1 millón de colones.

Pero además en caso de que quisiera obtener el modelo por medio de pruebas sin carga (Sin lamina), este modelo no reflejaría el comportamiento real debido a que no cuenta con los valores reales de los parámetros de

diámetro del rodillo y de la potencia del motor los cuales son necesarios para que el variador calcule la velocidad a la que debe ir para mantener la tensión en la lamina. Todos estos inconvenientes no permitieron realizar un modelado del proceso.

Sin embargo si se realizó una medición con el fin de determinar el funcionamiento de este proceso. En la figura 5.20 se presenta la Tensión de referencia y la tensión real, en esta figura se observa que la tensión real no permanece constante como debería ser, por lo que el PID en este variador no está bien ajustado, sin embargo estas variaciones no producen resultados negativos significativos en el grosor o en la deformación de la lamina por lo que no se realizara ningún cambio al PID, debido al alto riesgo que esto representa.



**Figura 5.20.** Tensión de referencia y Tensión real

## **5.4. Diseño del Sistema A.**

Para la implementación de este sistema se realizó un análisis de los posibles protocolos de comunicación que soportaba el PLC Omron CS1G y el Variador de frecuencia eurotherm 690+.

### **5.4.1 Protocolos del PLC Omron CS1G**

Después de realizar la investigación para el PLC se observó que este solo posee puertos RS-232 y RS-485 los cuales soportan varios protocolos propios del PLC y de su fabricante. Algunos de estos son:

#### **5.4.1.1 Host link:**

Mediante la emisión de comandos Host Link o FINS desde el ordenador host a la CPU del PLC, se pueden ejecutar varios comandos de control, tales como leer y escribir en la memoria de E/S, cambiar el modo de operación y forzar la configuración o reconfiguración de bits. Se utiliza para supervisar datos, tales como el estado de operación, información de errores y datos de calidad del PLC, o para enviar datos al PLC.

#### **5.4.1.2 Sin protocolo:**

Este se utiliza en la comunicación con dispositivos externos que no tienen un formato de respuesta, por lo que solo se utilizan los comandos simples como TXD (236) y RXD (235) del PLC.

#### **5.4.1.3 NT Link:**

Para comunicar terminales programables (PT) sin la intervención de la CPU del PLC.

#### **5.4.1.4 Bus de periféricos:**

Proporciona comunicaciones de alta velocidad con dispositivos de programación distintos de las consolas de programación que normalmente se usan.

#### 5.4.1.5 PC Link:

Proporciona comunicación entre varios PLC (máximo 9 CPUs) Donde una es la unidad de sondeo y el resto son unidades sondeadas.

#### 5.4.2. Protocolos del variador de frecuencia.

Para el caso del variador de frecuencia se encontró que este posee varias interfaces de comunicación por lo que se realizó un análisis de las más relevantes, con el fin de determinar cual cumplía de la mejor manera con los requerimientos del proyecto.

##### 5.4.2.1 Ethernet.

Ethernet es una tecnología Local-area network (LAN) la cual está bajo el estándar IEEE 802.3. Esta tecnología es ampliamente utilizada en el mundo debido a su facilidad de implementación, manejo y mantenimiento, además de que es de un costo relativamente bajo y es fácilmente expandible a redes más grandes. Esta presenta velocidades de 10 Mbps hasta 1000 Mbps.

La interface Ethernet para el variador, permite el protocolo Ethernet así como Modbus TCP/IP. Con esta interfaz se leen y escriben 36 bytes por medio de unos bloques denominados preset (Figura 5.21) los cuales se deben programar en el variador para seleccionar los parámetros que se desea leer o escribir. En la Tabla 5.2 se observa una descripción de los bytes a leer.

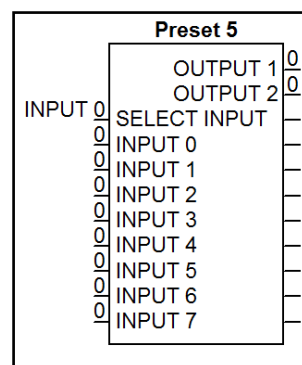


Figura 5.21. Modulo de Preset (DSELite).

**Tabla 5.2.** Descripción de los bytes a leer en protocolo Ethernet.

Bytes	Descripción
0,1	Comms Status
2,3	Mux 1 Output
4,5	Preset 7::Input 0
6,7	Preset 7::Input 0
8,9	Preset 7::Input 0
10,11	Preset 7::Input 0
12,13	Preset 7::Input 0
14,15	Preset 7::Input 0
:	:
34,35	Preset 5::Input 7

De la Tabla 5.2 se observa que hay que definir con anticipación que parámetros se quieren leer o escribir del variador para programar los preset's y si después se requiere leer o escribir en otro parámetro se debe reprogramar el variador lo cual resulta en un proceso ineficiente.

#### **5.4.2.2 Modbus Plus.**

Modbus es un protocolo basado en la arquitectura maestro/esclavo o cliente/servidor, diseñado inicialmente para comunicaciones con PLC's. Es uno de los protocolos más populares en la industria debido a que es abierto y es de fácil implementación. Se utiliza ampliamente en sistemas SCADA. Existen versiones para puerto serie y para Ethernet (Modbus TCP/IP).

En el caso de este variador, se leen o escriben diferentes cantidades de bytes dependiendo del número de set, el cual es asignado por medio del parámetro PARAM MAPPING. En la tabla 5.3 se resumen el número de bytes que se transfieren de acuerdo al número de set.

**Tabla 5.3.** Número de bytes transferidos

Número de set	Bytes transferidos
1	10
2	20
3	36
4	34

En la tabla 5.4 se observan los Bytes que se leen cuando se configuro el modulo de Modbus en el Set 1.

**Tabla 5.4.** Descripción de los bytes leídos en set 1.

Bytes	Descripción
0,1	Comms Status
2,3	Preset 8::Input 0
4,5	Preset 8::Input 1
6,7	Preset 8::Input 2
8,9	Preset 8::Input 3

Como se observa en la tabla 5.4, al igual que en el caso del protocolo Ethernet, se deben de programar con anticipación las variables que se desean leer o escribir.

#### **5.4.2.3 Profibus-DP.**

Este protocolo utiliza una versión rápida del estándar RS-485 y un máximo de 32 nodos (estaciones) sin usar repetidores RS-485. Este funciona bajo la configuración maestro/esclavo y el variador se comporta como esclavo inteligente (solo responde cuando se lo solicitan).

Una característica muy importante de este protocolo para este variador de frecuencia, es que permite el acceso a cualquier Tag del variador, lo que



significa que se puede leer/escribir cualquier parámetro del variador de frecuencia sin la necesidad de reprogramar el mismo.

Para este protocolo se utilizan una serie de comandos con los cuales se puede leer o escribir en cualquier parámetro del variador de frecuencia. Por medio del comando Cfg\_Data se determina si los 30 posibles parámetros (Tag) se van a leer o a escribir y el comando Usr\_Prm\_Data indica cuales serán los parámetros (número de tag). Además posee un comando para leer y escribir en un parámetro únicamente y otro que indica posibles errores o fallas en el variador de frecuencia.

#### **5.4.2.4 RS-485.**

El protocolo RS-485 es un Bus bidireccional de hasta 32 receptores sin repetidoras, puede alcanzar longitudes máximas de 1200 m y velocidades de 100 Kbps (1200 m) a 10 Mbps (12 m). Tiene una topología multipunto, es half dúplex en dos hilos y full dúplex en cuatro hilos. Cuando se tiene una conexión de dos hilos se tiene una configuración multimaster donde cualquier nodo puede comunicarse con cualquier nodo (cualquiera puede ser el máster) pero solo uno a la vez ya que solo se tiene un canal de transmisión y recepción. En la conexión de cuatro hilos se tiene una configuración Master/slave donde las salidas y las entradas del máster se conectan a todas las entradas y salidas de los esclavos respectivamente.

En este protocolo las líneas A y B (Dos hilos) funcionan como un par diferencial (sin tierra) por lo que el uno lógico se presenta cuando el voltaje en A es mayor a B, típicamente  $A-B=5\text{ V}$  y el cero se presenta cuando el voltaje en B es mayor que en A. Es por esto que la comunicación con dos hilos es half Duplex y requiere puertos tri-state mientras que la de cuatro es full dúplex y no requiere puertos tri-state.

Uno de los parámetros del modulo RS-485 de los variadores se denomina protocolo, esto debido a que este modulo presenta tres posibles

protocolos de comunicación para el estándar RS-485, el ASCII, el binario y Modbus RTU. Los protocolos ASCII y binario son muy similares pero como su nombre lo indica el primero envía y recibe caracteres ASCII lo que facilita la visualización de los datos.

Una de las ventajas que presenta esta interfaz al igual que Profibus-DP, es que permite el acceso a todos los parámetros del variador sin la necesidad de reprogramar al variador de frecuencia.

### **5.4.3. Selección de protocolos**

En las secciones anteriores se dio un resumen de los posibles protocolos del PLC Omron CS1G y del variador frecuencia Eurotherm 690+.

Después de realizar un análisis se observa que el protocolo que cumple para la implementación del Sistema A con el PLC, es el Host Link o FINS donde el Sistema A deberá comportarse como el host y tener un puerto RS-232.

Para el caso del variador se analizaron y se determinó que las mejores opciones, eran los protocolos Profibus-DP y el RS-485 debido a que se tiene acceso a todos los parámetros sin tener que reprogramar el variador y a su fácil implementación. Pero debido a que el precio de la interfaz de comunicación del RS-485 es de menor coste y que la implementación es más simple se escoge a este.

#### **5.4.3.1 Host Link**

Este protocolo tiene varios tipos de comandos dependiendo del tipo de configuración y de comunicación. Si la comunicación es entre la PC host y el PLC de forma Serial los comandos pueden ser del tipo C-mode o FINS, si los PLC están en red se debe usar los comandos FINS y si el host es el PLC, se utilizan los comandos CMND/SEND/RECV dentro del programa de Ladder del PLC. Se utiliza el comando CMND para enviar comandos FINS desde el CPU del PLC a la red.

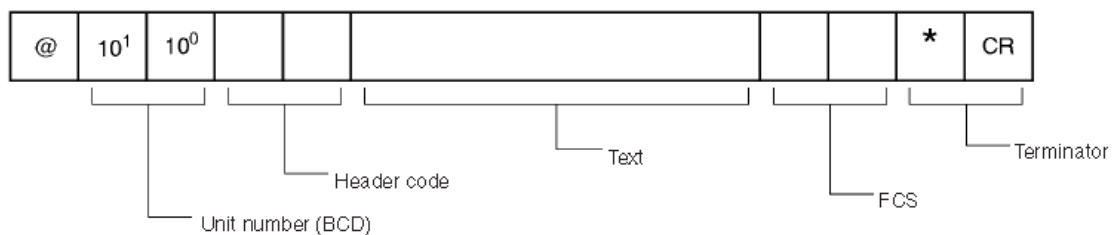
Los comandos C-mode realizan funciones como lectura y escritura de memoria, de contadores y timers así como lectura de registros de status y otras más. En la figura 5.22 se muestra algunos comandos C-mode.

Type	Header code	Name	Function
I/O memory writing	WR	CIO AREA WRITE	Writes the specified data in word units beginning with the designated CIO word.
	WL	LR AREA WRITE	Writes the specified data in word units beginning with the designated LR word.
	WH	HR AREA WRITE	Writes the specified data in word units beginning with the designated HR word.
	WC	TIMER/COUNTER PV WRITE	Writes the specified timer/counter PV data in word units beginning with the designated word.
	WD	DM AREA WRITE	Writes the specified data in word units beginning with the designated DM word.
	WJ	AR AREA WRITE	Writes the specified data in word units beginning with the designated AR word.
	WE	EM AREA WRITE	Writes the specified data in word units beginning with the designated EM word.

**Figura 5.22.** Comandos C-mode. [8]

La estructura de un comando de tipo C-mode se observa en la figura 5.23 estos tienen una extensión máxima de 131 bytes y en esta se observa que el @ indica el inicio del comando, que el Unit number identifica a un CPU específico, el header code identifica el comando, además de que calcula el FCS para detectar errores en el comando y que los símbolos \* y CR (0x0D) indican el fin del comando. Las estructuras de la respuesta y de error son muy similares al del comando.

**Command Frame Format**



**Figura 5.23.** Estructura del comando C-mode. [8]

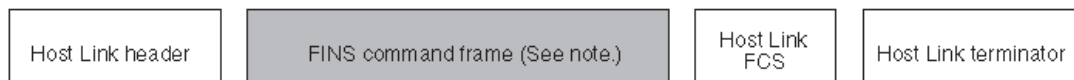
Los comandos FINS realizan funciones como lectura y escritura de memoria, de parámetros, de configuración del CPU, de debugging, de errores, de status y otros más. En la figura 5.24 se observan algunos comandos FINS.

Type	Command code		Name	Function
	MR	SR		
I/O memory area access	01	01	MEMORY AREA READ	Reads the contents of consecutive I/O memory area words.
	01	02	MEMORY AREA WRITE (See note.)	Writes the contents of consecutive I/O memory area words.
	01	03	MEMORY AREA FILL (See note.)	Writes the same data to the specified range of I/O memory area words.
	01	04	MULTIPLE MEMORY AREA READ	Reads the contents of specified non-consecutive I/O memory area words.
	01	05	MEMORY AREA TRANSFER (See note.)	Copies the contents of consecutive I/O memory area words to another I/O memory area.

**Figura 5.24.** Comandos FINS. [8]

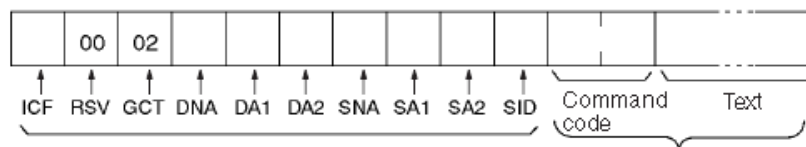
En la figura 5.25 se observa la estructura del comando FINS, donde el Host Link header y terminator son iguales a los que se presentan en la estructura del comando C-mode.

#### Command Frame



**Figura 5.25.** Estructura del comando FINS. [8]

La estructura del comando FINS (Figura 5.25 el cuadro más oscuro) tiene la forma que se observa en la figura 5.26, los parámetros que se observan en esta figura, son utilizados para configurar el comando.



**Figura 5.26.** Estructura del comando FINS (Figura 5.25 el cuadro más oscuro). [8]

#### 5.4.3.2 Tarjeta de comunicación RS-485 (6055).

Esta interface presenta una serie de características entre las cuales se destacan:

- Protección contra el ruido.
- Se configura por medio del bloque de opción de tecnología del variador
- Auto examina el hardware.

- Acceso directo a todos los Tag (parámetros del variador).
- Selección de una variedad de velocidades (Baudios).
- Opción para dos o cuatro hilos.

Descripción de los parámetros del modulo de opción de tecnología configurado para el protocolo RS-485.

Protocol: Selecciona entre los protocolos ASCII, binario y Modbus RTU.

Baud rate: Selecciona la velocidad de comunicación.

GROUP ID (GID): Dirección del grupo de variadores. *Rango: 0 a 7*

UNIT ID (UID): Identificación del variador. *Rango: 0 a 15*

ERROR RESET: Borra el ERROR CODE y pone en cero al ERROR COUNT.

*Rango: FALSE/TRUE*

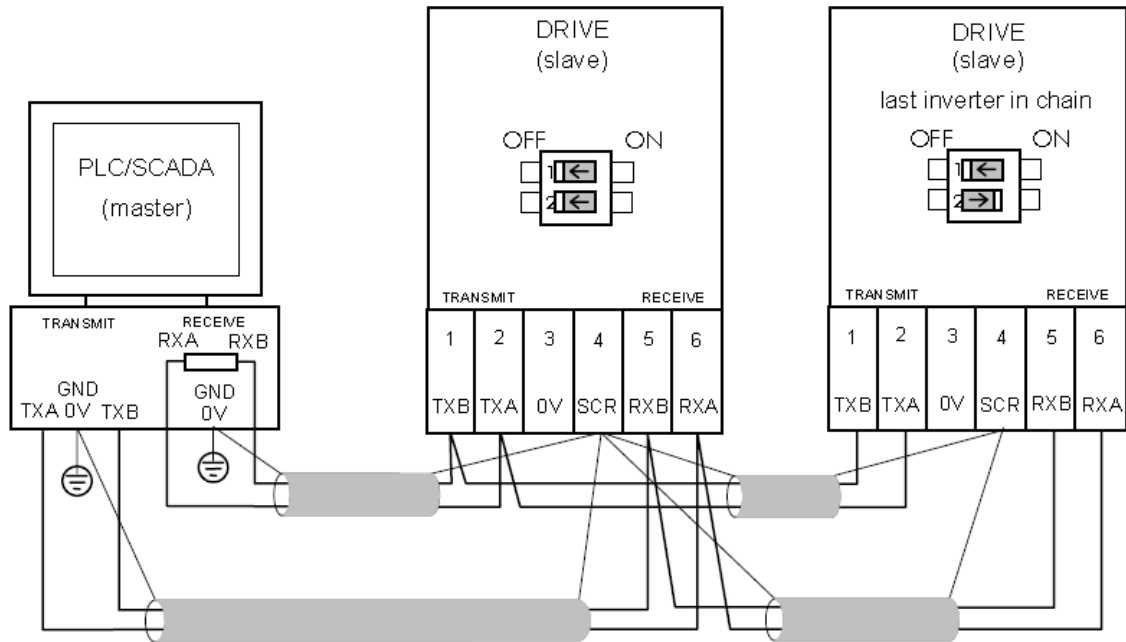
FAULT: indica cual estado esta debido a errores en los datos enviado o de hardware del variador.

VERSION: La versión de la Interfaz. *Rango: 0x0000 a 0xFFFF*

ERROR CODE: Muestra el ultimo error en hexadecimal. *Rango: 0x0000 a 0xFFFF.*

ERROR COUNT: Lleva la cuenta de los errores. *Rango: 0 a 9999*

En la figura 5.27 se observa un diagrama de conexión de un sistema SCADA con dos variadores utilizando el protocolo RS-485 con 4 hilos.



**Figura 5.27.** Diagrama de conexión con cuatro hilos de un sistema SCADA. [14]

En la figura 5.28 se muestra un ejemplo de cómo leer el setpoint 1 del driver 590+ el cual tiene un Tag de 289 y un ID de 81 (El ID es el número que utiliza el protocolo ASCII y binario para acceder al Tag y cada parámetro o Tag tiene uno). La segunda columna muestra la respuesta la cual indica que el setpoint 1 tiene un valor de 30%.

(EOT)	0	0	1	1	8	1	(ENQ)
(STX)	8	1	3	0			(ETX)

**Figura 5.28.** Ejemplo de lectura al setpoint 1 (ASCII). [14]

En el primer comando los primeros cinco bytes son para indicar el comienzo del comando y para indicar la dirección del variador GID y UID los cuales se repiten y los otros son el id del parámetro y el fin del comando. En el segundo comando se envía el id del parámetro y el valor del mismo.

#### **5.4.4 Sistema A.**

Al estar definido los protocolos a utilizar se realizó la búsqueda de un dispositivo que cumpla con las siguientes características.

1. Puerto RS-232 para el PLC.
2. Puerto RS-485 para los variadores de frecuencia.
3. Puerto Ethernet para comunicar con el SCADA.
4. Compatible con los protocolos Host Link o FINS, el ASCII del Variador de frecuencia y el OPC del SCADA.

Después de una investigación se encontró que el Data Station Plus de la empresa Red Lion cumple con las características antes mencionadas.

##### **5.4.4.1 Data Station Plus**

###### **Descripción general.**

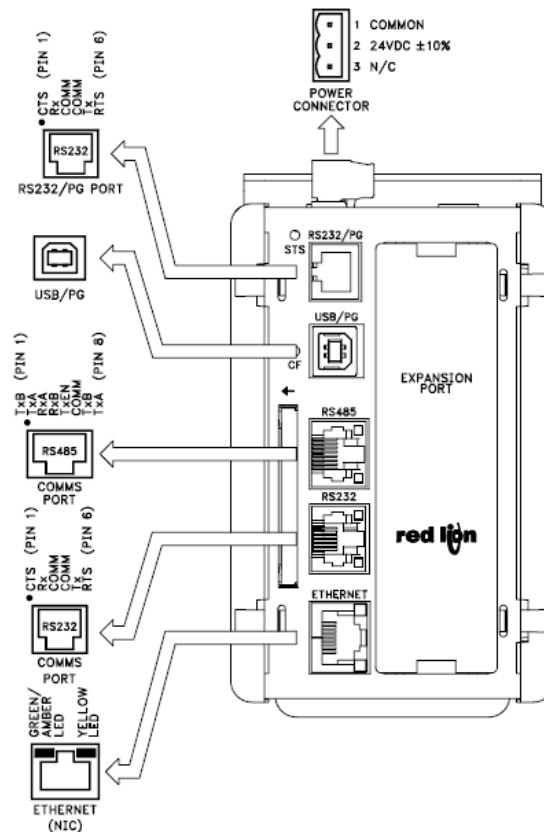
Este dispositivo funciona como nexo para la recolección y manejo de datos, esta unidad permite la conversión de una gran cantidad de protocolos. Posee tres puertos seriales y un puerto 10 Base-T/100 Base-TX Ethernet el cual maneja varios protocolos para poder comunicarse fácilmente con otros dispositivos. Este dispositivo se programa por medio del software Crimson 2.0.

Algunas características importantes de data Station plus.

- Conversión simultanea de diversos protocolos.
- Permite guardar archivos CSV de datos por medio de una memoria COMPACTFLASH®
- Ampliamente utilizado en sistemas SCADA
- Posee gran cantidad de drivers que permiten un fácil mapeo de datos en PLC, PC y sistemas SCADA
- Se pueden enviar notificaciones de alarmas por correo o por mensaje de texto.

- Conexión 10 BASE-T/100 BASE-TX ETHERNET que permite conectarse a un sin número de dispositivos vía cuatro protocolos simultáneamente.

En la figura 5.29 se observan los puertos del data Station Plus.



**Figura 5.29.** Puertos del Data Station Plus. [15]

Una de las características más relevantes de este dispositivo es que maneja los protocolos de una gran cantidad de dispositivos de diversos fabricantes entre ellos las marcas Omron y Eurotherm (SSD Drives) lo que permite lograr una fácil comunicación entre estos. Además permite la opción de utilizarse por medio del puerto Ethernet como un servidor OPC lo que resulta en un sistema ideal para la solución de este proyecto.

Este dispositivo tiene la capacidad de leer y escribir a todas las variables del PLC por medio de sus registros (Memoria) y al variador por medio de sus Tag's además de que permite la comunicación entre el PLC y el variador de frecuencia lo cual es uno de los objetivos de este proyecto.



### 5.4.5 Solución

La solución para este proyecto es comunicar por medio del data Station Plus a los variadores de frecuencia eurotherm 690+, al PLC Omron y al sistema SCADA. Los variadores de frecuencia se comunicarían con el protocolo RS-485 con cuatro hilos y el PLC por medio de puerto RS-232 y finalmente se enviarían los datos al sistema SCADA por medio del puerto Ethernet a un cliente OPC en el cual se ubicaría el software de SCADA en Labview. En la siguiente figura se puede observar el diagrama de la solución propuesta.

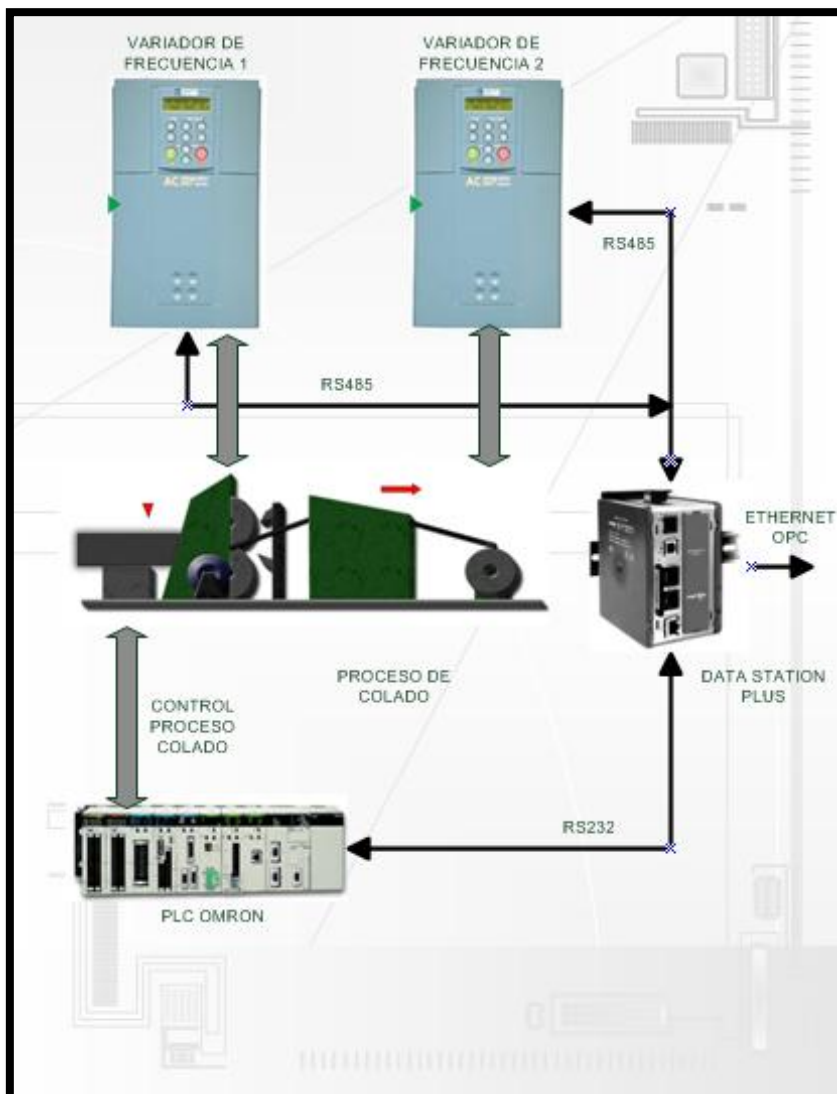
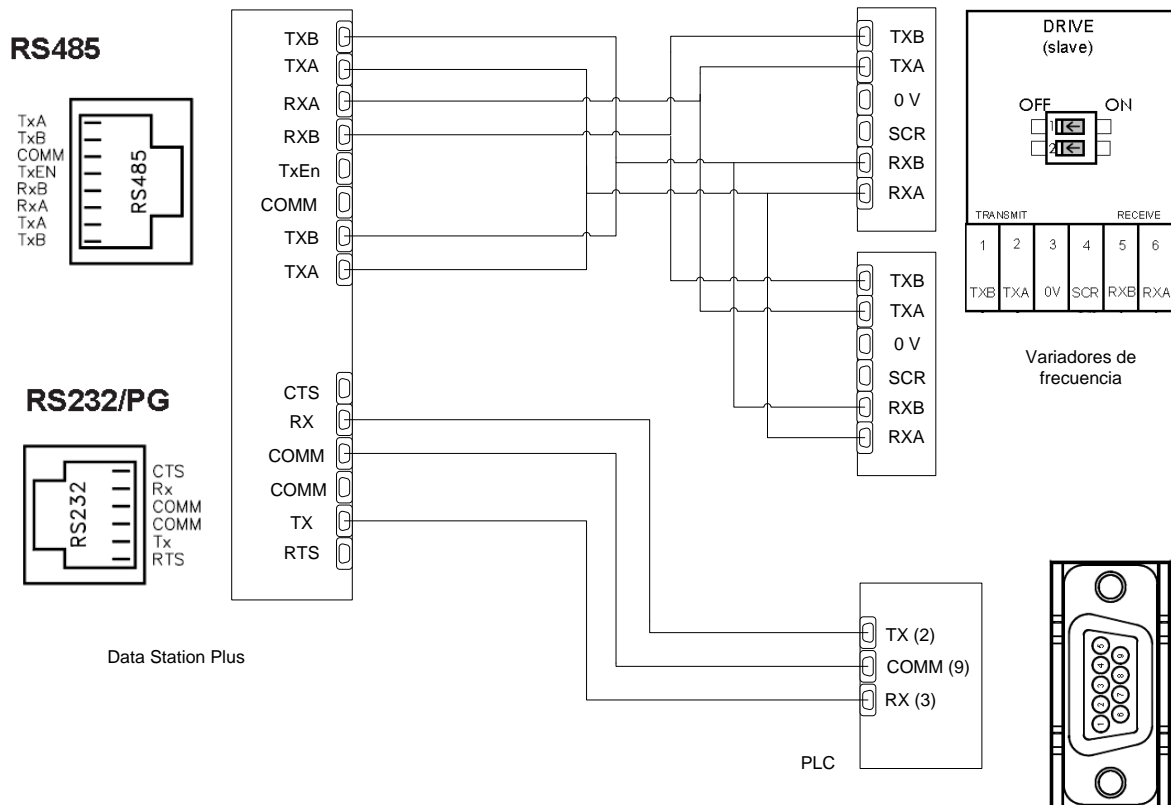


Figura 5.30. Solución propuesta (Visio).

En la siguiente figura se muestra las conexiones entre las tarjetas de comunicaciones RS-485 de los variadores de frecuencia (6055), el Data Station Plus y el puerto RS-232 del PLC.



**Figura 5.31.** Diagrama de conexiones

De la figura 5.31 se puede observar que las tarjetas de comunicación de los variadores presentan unos switch, los cuales se configuraron de la siguiente forma. El primer switch escoge entre RS-485 de 4 hilos o 2 hilos, para este caso es de 4 hilos por lo que el switch está apagado. El segundo habilita una resistencia terminal para acople, y esta solo se habilita en el ultimo variador de la red RS-485 (enrollador).

### 5.4.6 Configuración de las tarjetas de comunicación RS-485 de los variadores.

Tec Option			
	FAULT	[756]	NONE
	VERSION	[757]	0000
	ERROR CODE	[758]	00C0
	ERROR COUNT	[759]	0
RS485	[750] TYPE		
EI ASCII	[751] PROTOCOL		
9600	[752] BAUD RATE		
0	[753] GROUP ID (GID)		
0	[754] UNIT ID (UID)		
FALSE	[755] ERROR RESET		

Figura 5.32. Módulo de Tech Option configurado para RS-485 (DSELite) [14]

Los parámetros GID y UID sirven para identificar al variador dentro de la red RS-485, estos valores no pueden repetirse. (Función similar al de la IP de una red).

Para este caso se tienen los siguientes valores.

- Protocol: 0 (ASCII).
- Baud rate: 5 (para 9600)
- GROUP ID (GID): 0.
- UNIT ID (UID): 0 para el variador del Caster y 1 para el variador del enrollador.
- ERROR RESET: 0 (False).

### 5.4.7 Configuración del Data Station Plus.

Esta consistió en seleccionar los protocolos adecuados así como los parámetros adecuados. En las siguientes figuras se muestran las configuraciones para los puertos RS-485 y RS-232 de programación. En estas se pueden observar los protocolos o drivers escogidos para cada puerto así como su configuración.

Driver Selection

Driver:

---

Port Settings

Baud Rate:

Data Bits:

Stop Bits:

Parity:

---

Port Sharing

Share Port:  TCP Port:

**Figura 5.33.** Configuración del puerto RS-232 PG del Data Station Plus.

Driver Selection

Driver:

---

Port Settings

Baud Rate:

Data Bits:

Stop Bits:

Parity:

Port Mode:

---

Port Sharing

Share Port:  TCP Port:

**Figura 5.34.** Configuración del puerto RS-485 del Data Station Plus.

Device Settings

Enable Device  Favour UI Writes Comms Delay:  ms

---

Device Identification

GID:

UID:

**Figura 5.35.** Configuración del variador en el Data Station.

#### 5.4.8 Comunicación entre los variadores y el PLC.

Con el fin de eliminar el uso de señales analógicas para la comunicación entre los variadores y el PLC, se implemento la comunicación por medio del Data Station Plus. Anteriormente se utilizaban las señales analógicas para comunicar los siguientes variables.

Del PLC al variador del enrollador.

- Velocidad de línea (Analog Output Tag: Q2050 PLC => Analog input Tag R25).
- Referencia de diámetro (Analog Output Tag: Q2003 PLC => Analog input Tag R722).
- Referencia de Tensión (Analog Output Tag: Q2002 PLC => Analog input Tag R715).

De los variadores al PLC.

- Retroalimentación de tensión (Analog Output Tag: R45 variador enrollador => Analog input I2037 PLC).
- Corriente de Caster (Analog Output 731 variador Caster => Analog input I2036 PLC).
- Velocidad de Caster (Analog Output 45 variador Caster => Analog input I2035 PLC).

Inicialmente para la comunicación digital se utilizaran los tags de las salidas analógicas con el fin de obtener los valores pero posteriormente esto se pueden cambiar por otros registros o tags cuando se deseen quitar las señales analógicas de forma definitiva. Los datos de las salidas analógicas serán enviados de forma digital a través del data Station a unos registros o tags libres en los variadores o PLC según sea el caso.

En resumen se utilizaran los siguientes tags.

**Tabla 5.5.** Resumen de los registros o tags utilizados para la comunicación digital

Dirección de la comunicación	Tags de Entrada (Salidas analógicas)	Tags de Salida*
PLC a Variador	Velocidad de línea Q2050	Vel_linea_d R168 (Value Func 8 Enrro)
	Referencia de diámetro Q2003	Ref_diametro_d R173 (Value Func 9 Enrro)
	Referencia de Tensión Q2002	Ref_Tension_d R178 (Value Func 10 Enrro)
Variadores a PLC	Retroalimentación de tensión enrollador R45 (Analog Out)	Tension_digital D1246
	Corriente de Caster R731	Corriente_Caster_d D1247
	Velocidad de Caster R45	Velocidad_caster_d D1248

\*Nota: Se usaron porque están libres, pueden ser otros.

#### 5.4.9 Programación del Data Station Plus en Crimson.

Para establecer una comunicación digital se vio en la necesidad de asignar variables por medio del modulo de programación de Crimson. En la figura 5.36 se observa el código. De esta manera se puede establecer una comunicación entre los variadores y el PLC.

```
//Transfiere el valor de las variables del PLC al Variador de forma digital  
  
Vel_linea_d_VarEnrro:=(Vel_lineaVF_PLC*100.00/4095.00);  
Ref_diametro_d_VarEnrro:=(Ref_diametro_PLC*100.00/4095.00);  
Ref_tension_d_VarEnrro:=(Ref_tension_PLC*100.00/4095.00);
```

```
//Transfiere el valor de la variable del Variador al PLC de forma digital  
  
Retro_Tension_d_PLC:=Retro_Tension_VarEnrro*4095/100;
```

```
//Transfiere el valor de la variable del Variador al PLC de forma digital  
  
Corriente_caster_d_PLC:=Corriente_caster_var*4095/100;  
vel_caster_d_PLC:=Vel_caster_var*4095/100;
```

**Figura 5.36.** Código en C para el Data Station Plus.

Estos programas son llamados por medio de la opción triggers de los tag de entradas (ver tabla 5.5), los cuales al variar en un valor mayor a 1 se dispara el trigger con lo que se llama a los programas para que actualicen los registros o tags de salida (Ver tabla 5.5). En la figura 5.37 se pueden observar con mayor detalle la forma en que se llaman (call) a los programas.

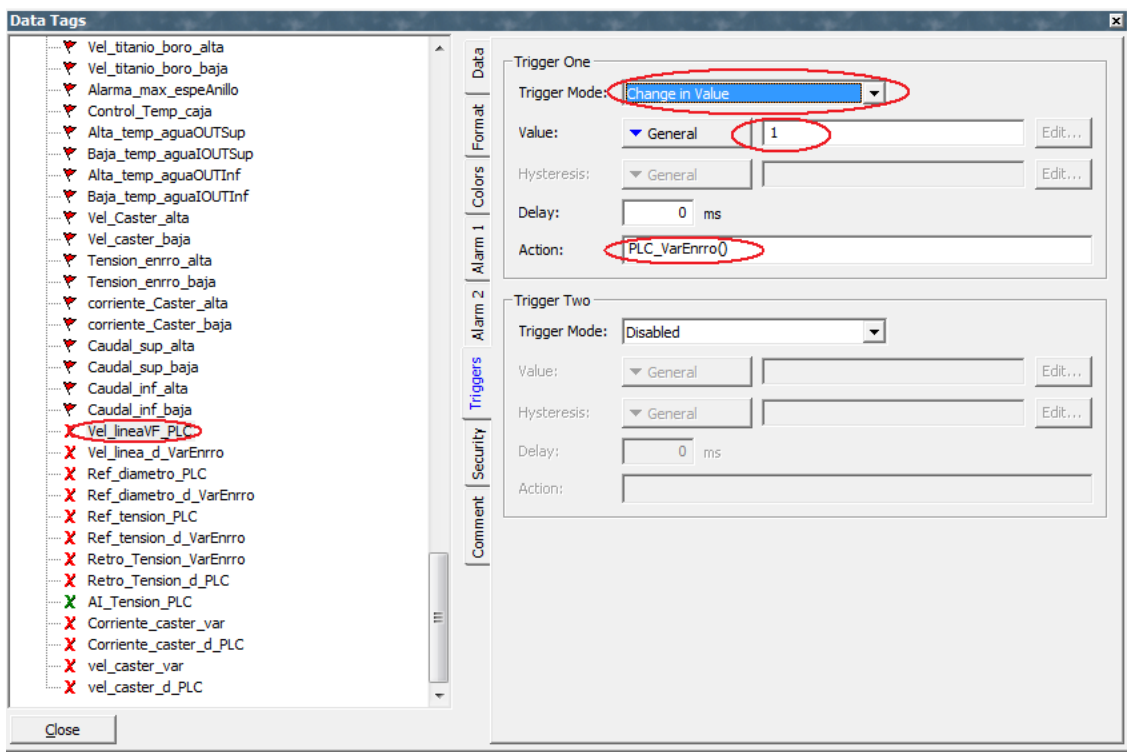


Figura 5.37. Invocación de los programas.

## 5.5. Diseño de la aplicación en Labview para el SCADA.

Con el fin de realizar el monitoreo y seguimiento de las variables más relevantes del proceso de colado se diseñó una aplicación en Labview para el proceso de colado, el cual se integró al sistema SCADA en la empresa.

El Ing. Daniel González ya había realizado la etapa inicial del sistema SCADA por lo que se utilizó la estructura de algunos programas para el desarrollo de la aplicación.

En la figura 5.38 se observa parte de la programación realizada para la aplicación del colado, en esta se observa algunas de las variables del PLC y otras funciones propias del programa.

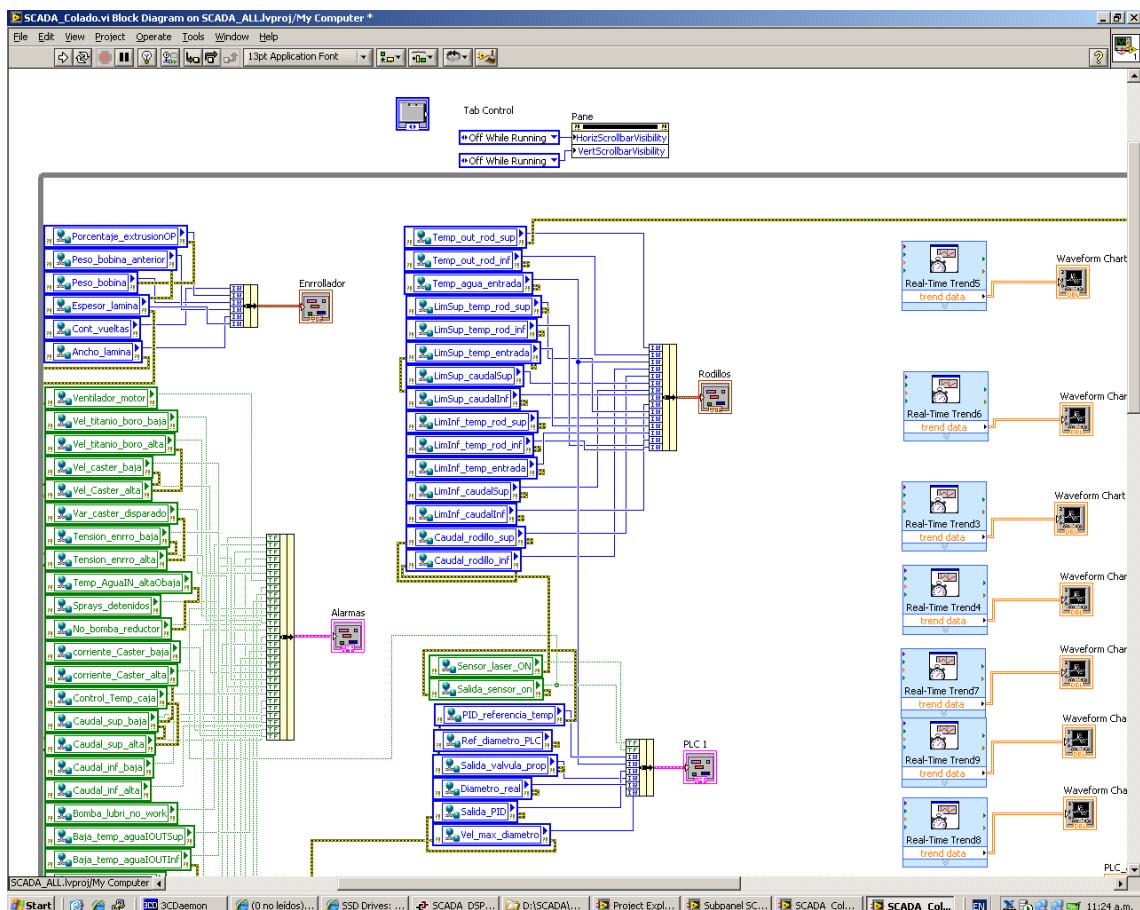


Figura 5.38. Programación de la aplicación en Labview.



En la figura 5.39 se observa uno de los paneles frontales de la aplicación desarrollada, en esta se observa algunas de las variables del PLC Omron.

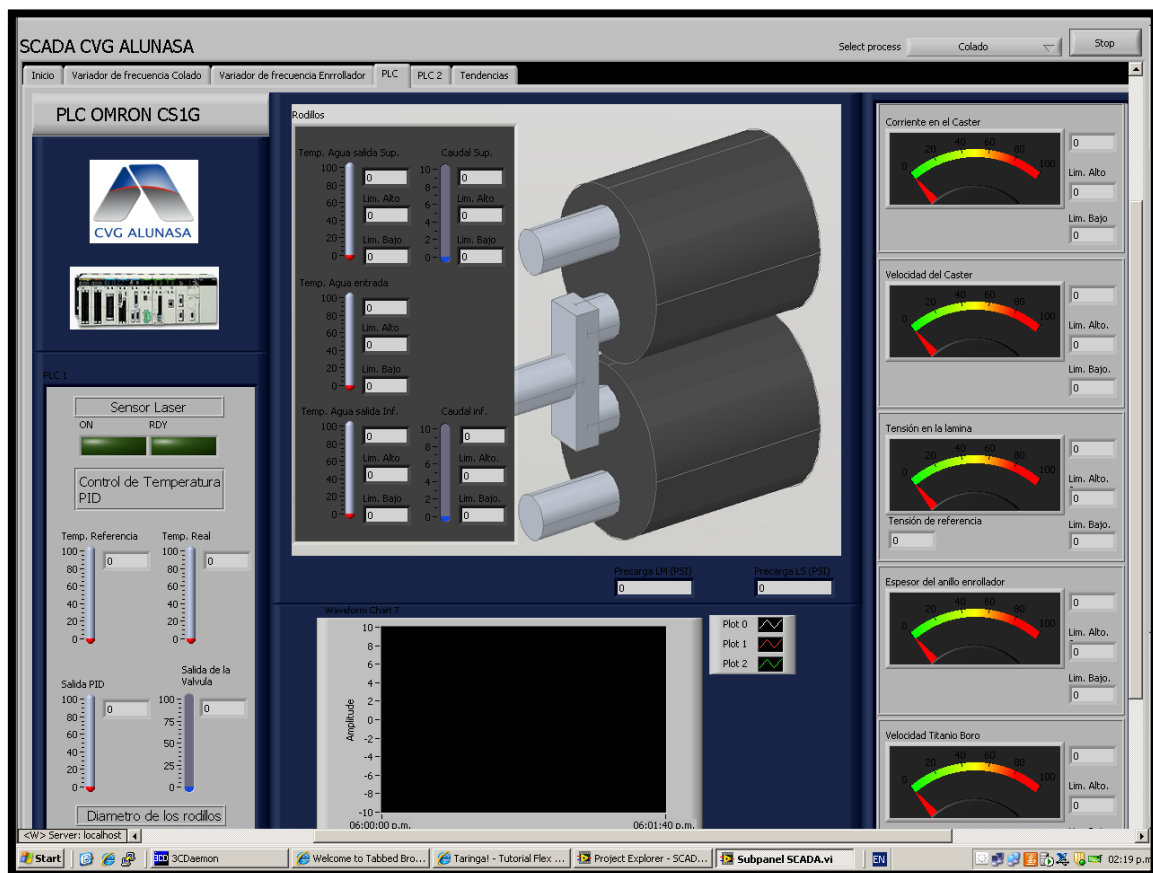


Figura 5.39. Programación de la aplicación en Labview.

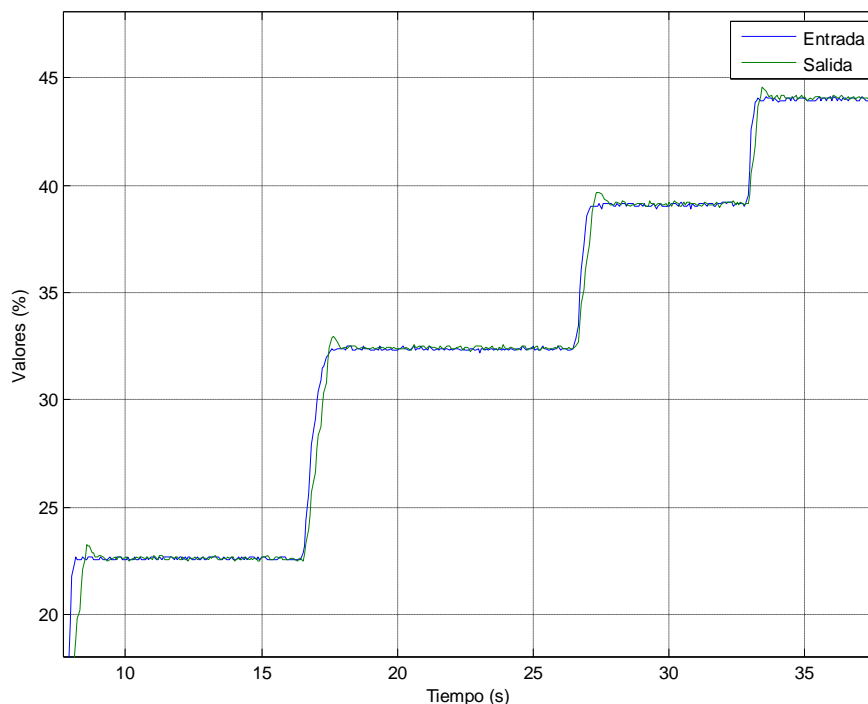
Por medio de esta aplicación se logra obtener los valores en tiempo real de las variables más relevantes del proceso de colado, además de tener la opción de observar históricos, eventos, alarmas así como análisis estadístico y otras características.

La conexión del SCADA se realizó por medio del protocolo OPC donde el Data Station Plus funciona como servidor OPC y el computador del SCADA como cliente OPC. De esta manera el SCADA accede a todas las variables dentro del Data Station.

## Capítulo 6: Análisis de Resultados

### 6.1 Resultado del modelo estimado y el PID diseñado.

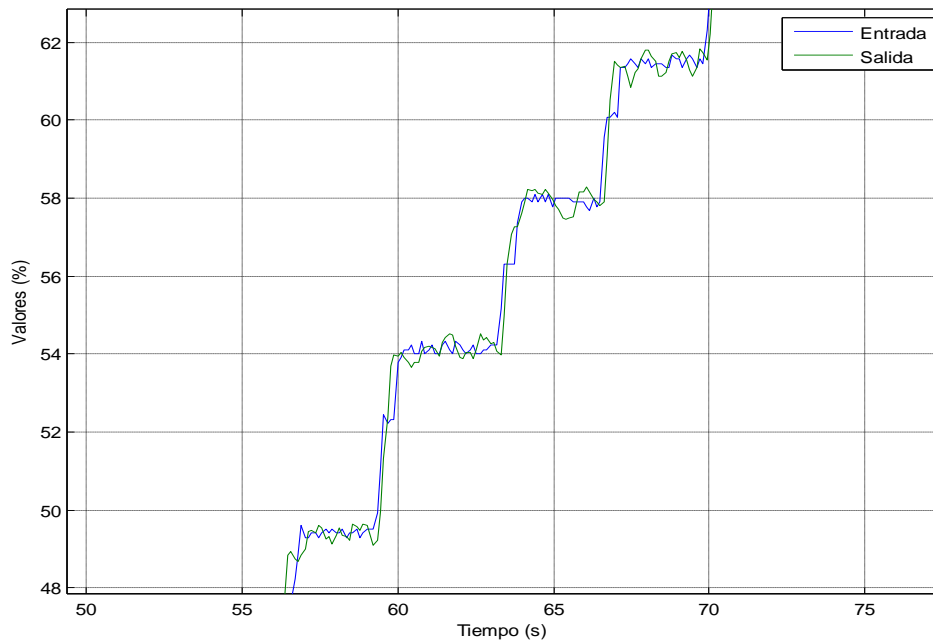
Después de obtener los valores del PID del variador de frecuencia del Caster, se procedió a realizar las pruebas para observar el comportamiento y de esta manera validar el modelo estimado. En la figura 6.1 se observa la medición sin PID donde se observan que en todos los escalones presentan un pequeño sobreimpulso cercano al 8.8%.



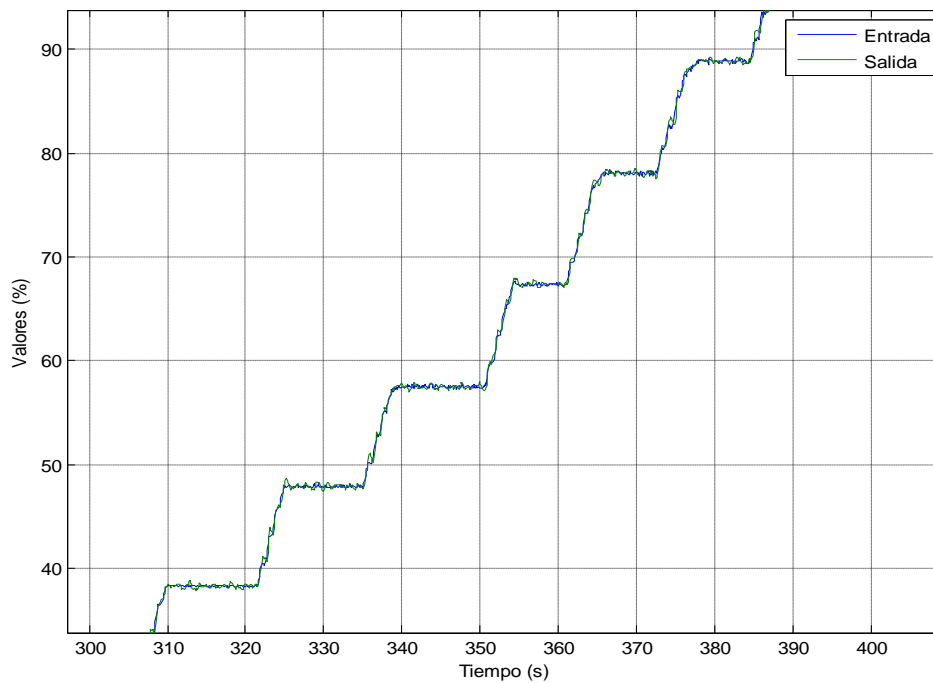
**Figura 6.1.** Medición 1 sin carga.

Las principales funciones del PID diseñado era la de eliminar el sobreimpulso y la de validar el modelo obtenido por medio de la experimentación de la planta (velocidad del Caster). Si la planta con el PID funcionaba como se predijo en las simulaciones del capítulo anterior, esto significaría que el modelo obtenido si reflejo el comportamiento dinámico y estático de la planta. En la figuras 6.2 y 6.3 se observan las mediciones realizadas a la entrada y salida de la planta con PID. Tal y como se observa en estas figuras no hay sobreimpulso y el tiempo de estabilización es menor a 1s,

por lo que el modelo de la planta queda validado de forma experimental y por las simulaciones.



**Figura 6.2.** Medicación 1 con PID



**Figura 6.3.** Medicación 2 con PID

Por medio de estas mediciones y las simulaciones del capítulo anterior se obtiene que la función de transferencia o modelo que refleja el comportamiento dinámico y estático de la velocidad del caster es:

$$G(s) = 1.0016 \frac{1 + 0.09889 s}{1 + 0.22643 s + 0.03022 s^2} \quad (6.1)$$

La cual tiene un porcentaje de aproximación del modelo real de un 93.528% (Tabla 5.1) según las simulaciones.

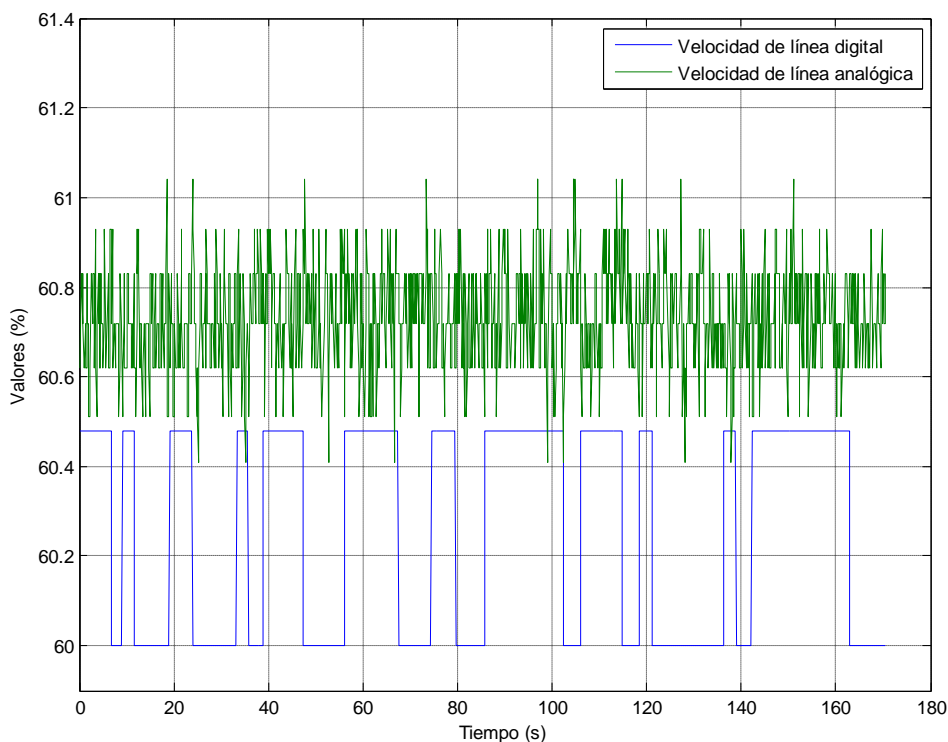
Por medio de este resultado queda expuesto que el método de identificación de sistemas logra buenos resultados y es capaz de obtener modelos que reproducen el comportamiento real de un proceso.

Para el caso del segundo variador, el del enrollador no se pudo realizar un modelo pero según las mediciones mostradas en la sección 5.3 este no posee un buen funcionamiento debido a que no mantiene de forma constante la tensión en la lámina la cual es su función principal. Esto se puede observar en la figura 5.20 de la sección 5.3.

En los anexos de este documento se puede observar un ejemplo simple de identificación de procesos, utilizando el software Matlab.

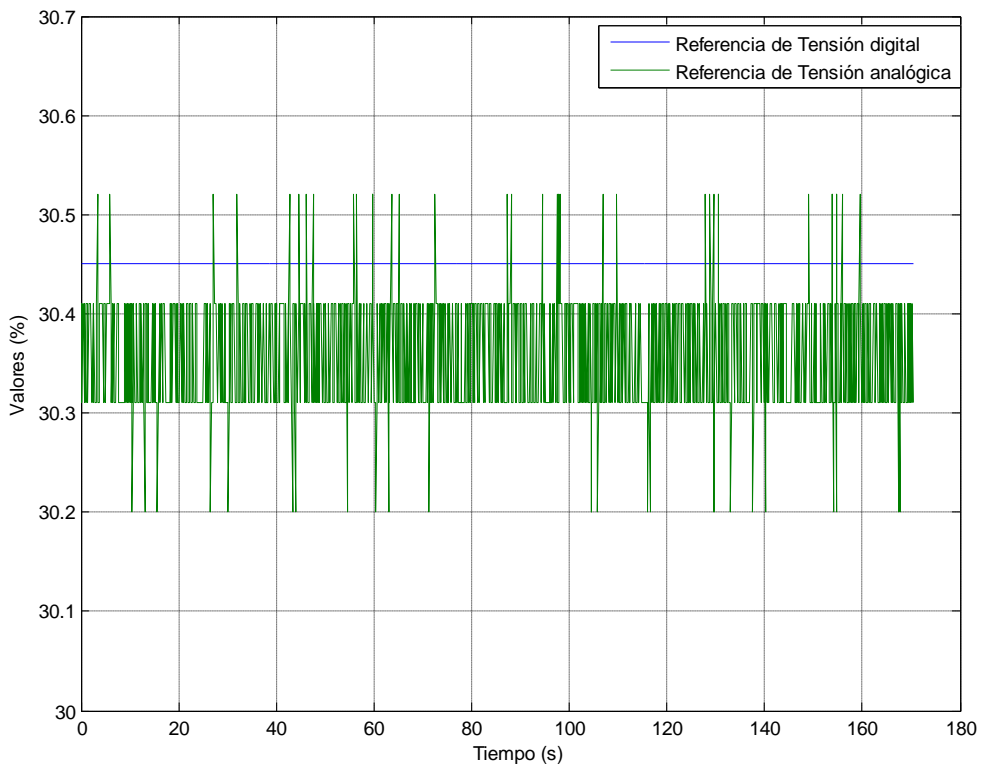
## 6.2 Comunicaciones entre el PLC Omron y los variadores

En las siguientes figuras se pueden observar las señales enviadas del PLC Omron hacia el variador del enrollador, en estas se puede observar como el ruido es introducido en las señales analógicas y estos a su vez afectan la eficiencia del proceso. (Los datos fueron tomados del variador de frecuencia del enrollador).

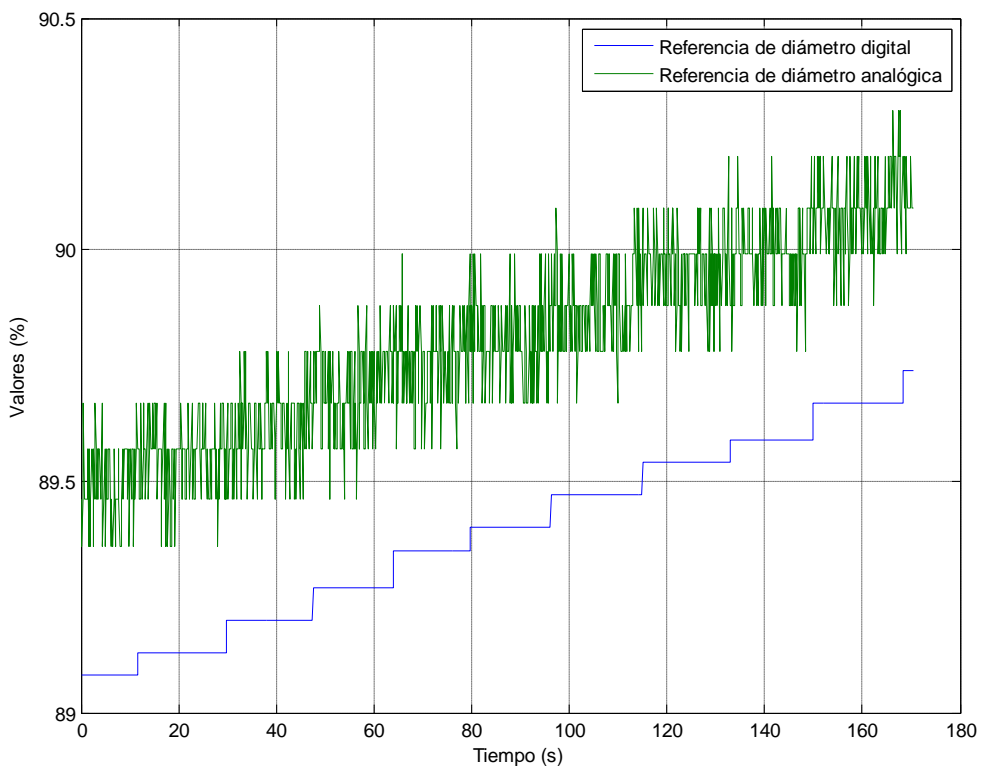


**Figura 6.4.** Velocidad de línea digital y analógica

En la figura 6.4 se observa que la velocidad de línea esta variando entre dos valores y esto es debido a que el PLC genera esta señal por medio de la velocidad de Caster la cual es una señal analógica proveniente del variador del Caster. Esta señal analógica al igual que las demás, se ve afectada por el ruido lo que ocasiona que la velocidad de línea varié entre estos dos valores.



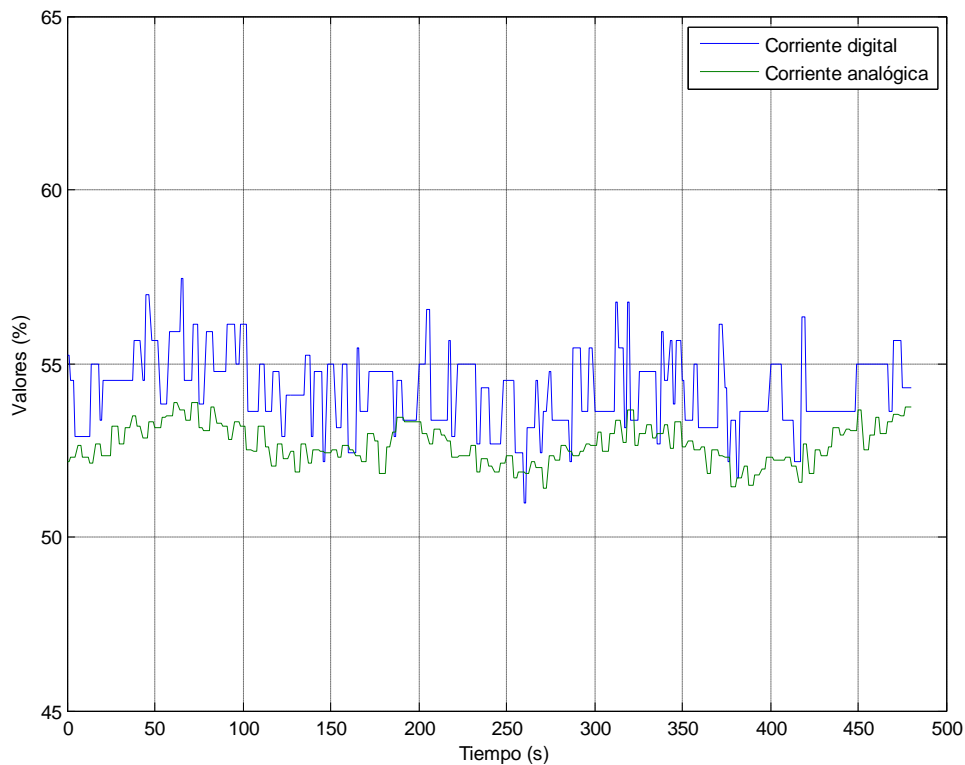
**Figura 6.5.** Referencia de Tensión digital y analógica



**Figura 6.6.** Referencia de diámetro digital y analógico

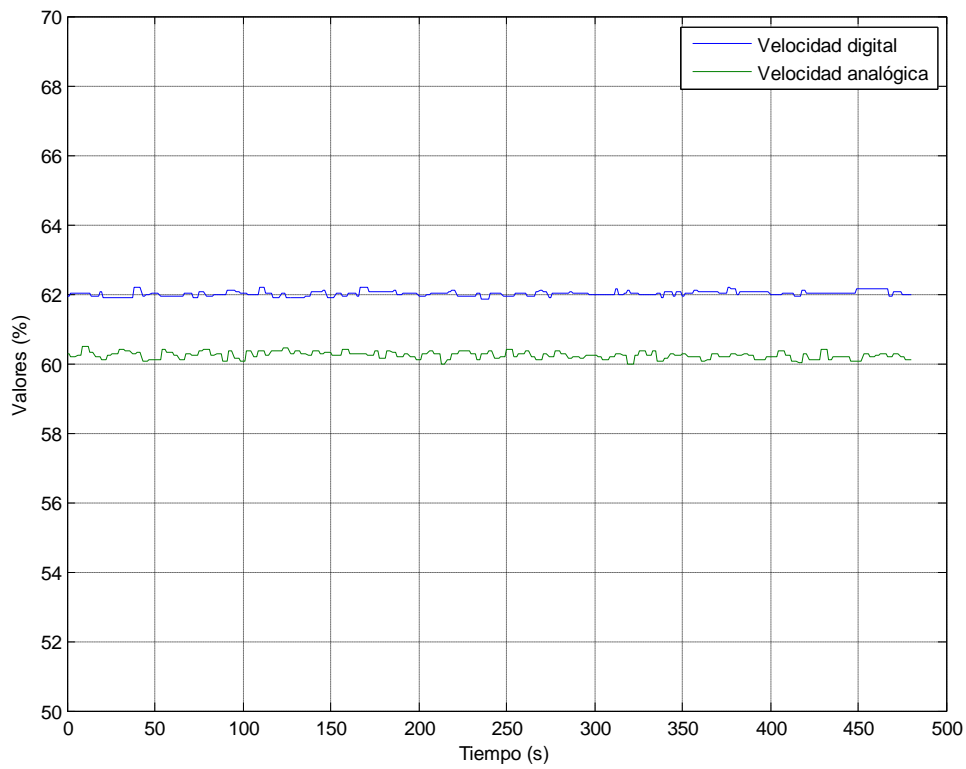
### 6.3 Comunicación entre los Variadores de Frecuencia y el PLC.

En las siguientes figuras se pueden observar las señales enviadas de los variadores de frecuencia hacia el PLC Omron CS1G, en estas se puede observar como el ruido afecta también estas señales analógicas. (Los datos fueron tomados del Data Station Plus).

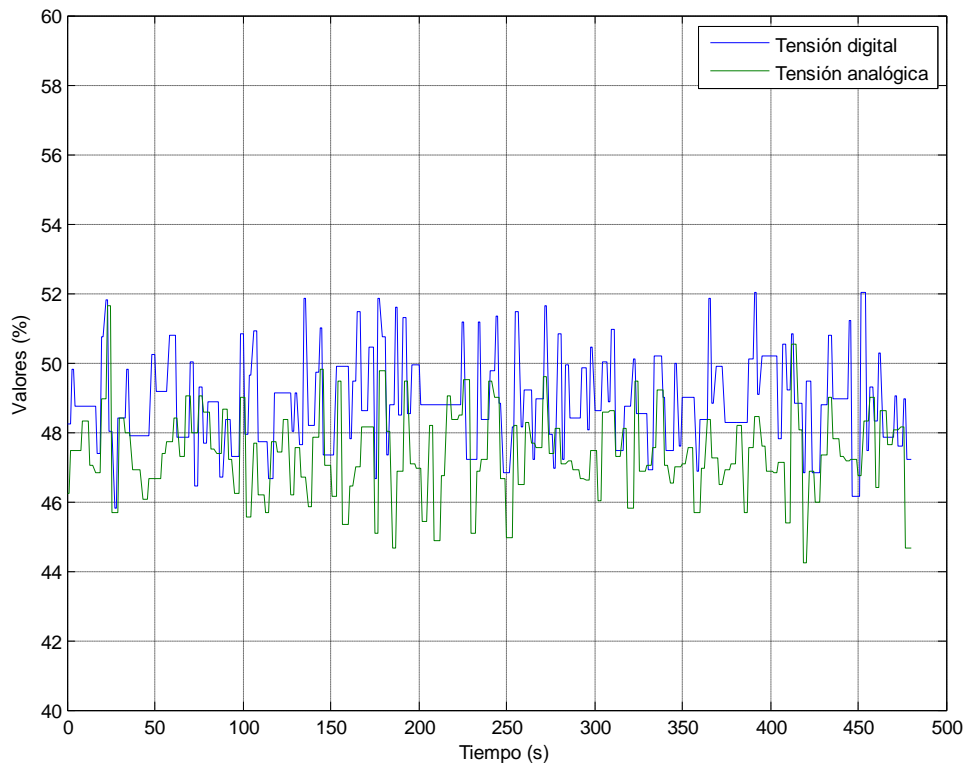


**Figura 6.7.** Corriente del Motor del Caster digital y analógica.

De las figuras 6.7 y 6.8 se determinó que las fluctuaciones de las señales de corriente y velocidad digital se deben a que son mediciones del motor o del proceso, realizadas por los variadores de frecuencia. A diferencia de las señales comunicadas entre el PLC y los variadores que son señales de referencia por lo que sus señales digitales presentan pequeñas o ninguna fluctuación.



**Figura 6.8.** Velocidad del Motor del Caster digital y analógica.



**Figura 6.9.** Tensión de la lámina digital y analógica.



De la figura 6.9 se determina que las fluctuaciones de la tensión digital son debidas al mal ajuste del PID de este variador, tal y como se menciona en la sección 5.3.

De todas las mediciones de las figuras 6.4 a 6.9 se observa que los valores reales de las variables, además de presentar fluctuaciones debidas al ruido, también presentan diferencias en el nivel de CD con respecto a sus valores digitales, lo cual ocasiona una referencia o una lectura incorrecta. En algunas mediciones se encontró una diferencia del voltaje CD de hasta 2%, lo cual no es tan significativo para este proceso pero aun así repercute en la calidad de este.

En los módulos RS-485 de los variadores de frecuencia (figura 5.32) se tiene en la salida 3 el Error code el cual indica el código del último error y en la salida 4 el Error count el cual muestra el número de errores en la comunicación. Después de 5 días en funcionamiento no se ha presentado una sola falla de comunicación. Esta no es una medida del BER pero al menos nos da una medida de la fiabilidad de esta comunicación entre el Data Station Plus y los variadores de frecuencia.

Para el caso del PLC este no contaba con una medida de los errores en la comunicación por lo que no se pudo determinar la fiabilidad de forma directa, pero según las mediciones hechas en el data Station durante varias horas este nunca presento una falla al leer o escribir un parámetro.

Las comunicaciones entre el Data Station Plus, el PLC Omron y los variadores queda establecida y según las mediciones posee una buena fiabilidad y confiabilidad.

## 6.4 Comunicación con el Sistema SCADA.

Una parte del proyecto consistía en que el proceso de colado debía tener una conexión a un sistema SCADA para el monitoreo y seguimiento de las variables más relevantes del proceso. En la siguiente figura se observa en funcionamiento uno de los paneles del SCADA que se diseñó y en este se pueden observar algunas de las variables en tiempo real del PLC Omron CS1G

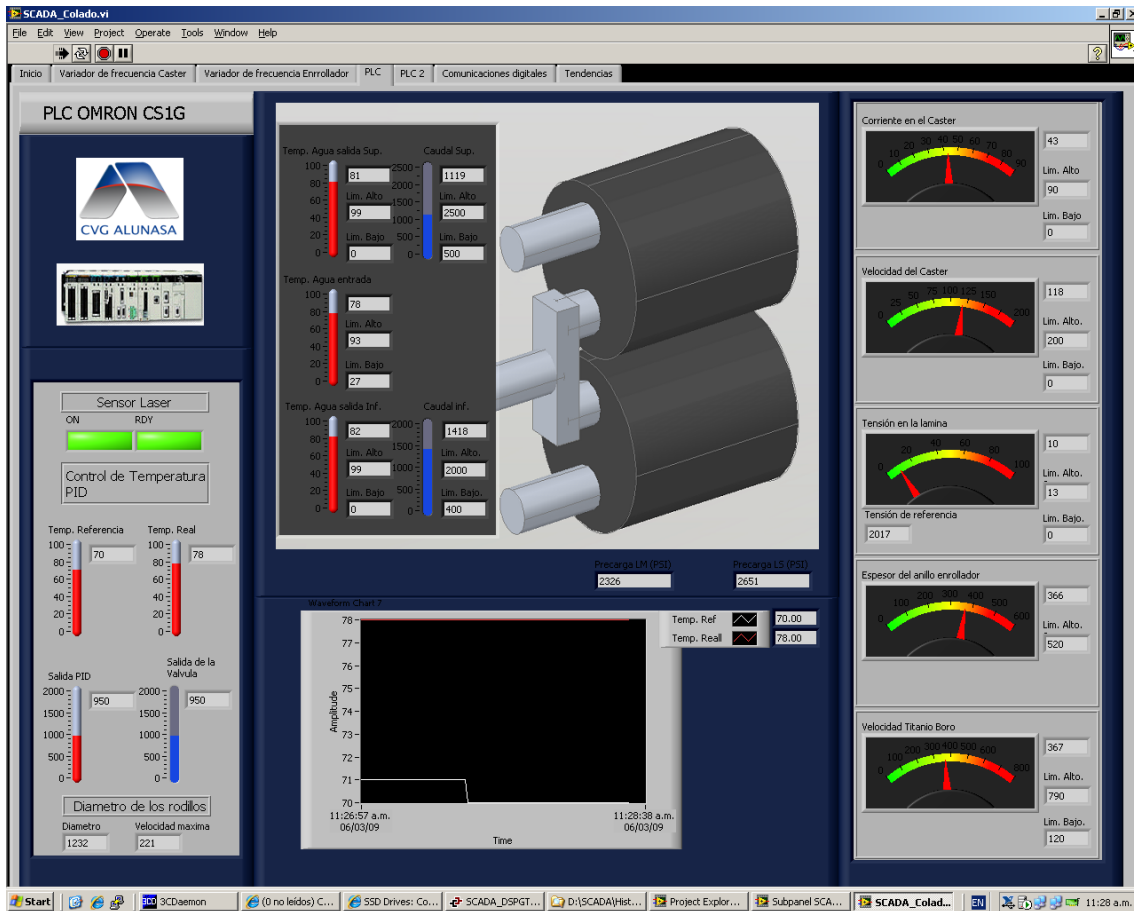


Figura 6.10. Panel del SCADA en funcionamiento. (Labview)

No se obtuvo una medición directa que indicara el correcto funcionamiento de esta conexión, pero por medio de un análisis y pruebas se determinó que la conexión y la aplicación en Labview funcionan de buena forma y según el criterio del ingeniero Daniel González estas fueron bien desarrolladas.

## **Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones**

### **7.1 Conclusiones**

- a) La identificación de sistemas permite estimar un modelo que describe el comportamiento dinámico y estático de procesos reales.
- b) La comunicación de parámetros por señales analógicas presenta problemas debidos al efecto del ruido.
- c) El diseño de reguladores obtenidos por medio de modelos estimados es un método valido y confiable para aplicaciones industriales.
- d) Las simulaciones de modelos estimados permiten reproducir el comportamiento de procesos reales.
- e) Las comunicaciones digitales permiten una mejor integración de los procesos en una empresa.
- f) El SCADA permite un mejor control y seguimiento de los procesos de una empresa.

### **7.2 Recomendaciones**

- a) Reemplazar las señales analógicas por las digitales en la mayoría de los procesos donde el ruido produce fluctuaciones significativas.
- b) Realizar un ajuste al PID del variador del enrollador con el fin de mejorar la calidad del proceso.
- c) Reemplazar el Data Station Plus por la Interface de usuario G3, con el fin de visualizar los parámetros cerca del área de colado.

## Bibliografía

- [1]. Ogata, Katsuhiko. Ingeniería de Control Moderna, Pearson, Prentice Hall, 2003, 4ªEd., Madrid.
- [2]. Dorf, Richard, Bishop Robert. Sistemas de control moderno, 10ª Ed., Prentice Hall, 2005, España.
- [3]. Interiano, Eduardo. Modelado Estocástico por estimación de mínimos cuadrados, ITCR, Cartago.
- [4]. Interiano, Eduardo. Ejemplo Modelado Estocástico, ITCR, Cartago.  
Dirección: <http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/clase/>
- [5]. Matlab , System Identification Toolbox. 2008.  
Dirección: <http://www.mathworks.com>
- [6]. Chapman, Stephen J. Máquinas eléctricas. 3ª Edición. Colombia, Mc Graw Hill, 2004.
- [7]. OPC Task force, OPC Overview. Versión 1. 1997.  
Dirección: <http://www.opcfoundation.org>
- [8]. Omron, Communications Commands 2006.  
Dirección: <http://www.omron.com>
- [9]. Eurotherm Drives, 690+ Series Frequency Inverter, 2003.  
Dirección: <http://www.ssddrives.com>
- [10]. Gómez, Juan Carlos, Identificación de Sistemas, fceia, 2008, Argentina  
Dirección: <http://www.fceia.unr.edu.ar/isis/apuntes.html>
- [11]. Gómez, Juan Carlos, Estimación de mínimos cuadrados, fceia, 2008, Argentina. Dirección: <http://www.fceia.unr.edu.ar/isis/apuntes.html>
- [12]. López, Mª Elena, Identificación de Sistemas 2006.
- [13]. González, Edwin, Diseño e implementación de un sistema de control digital de posición para un motor DC.
- [14]. Eurotherm Drives, RS485 communications Interface, 2007.  
Dirección: <http://www.ssddrives.com>.
- [15]. Red Lion, Model DSP-Data Station Plus, 2007.  
Dirección: <http://www.redlion.com>.
- [16]. Red Lion, Crimson 2 User Manual, 2006.  
Dirección: <http://www.redlion.com>.

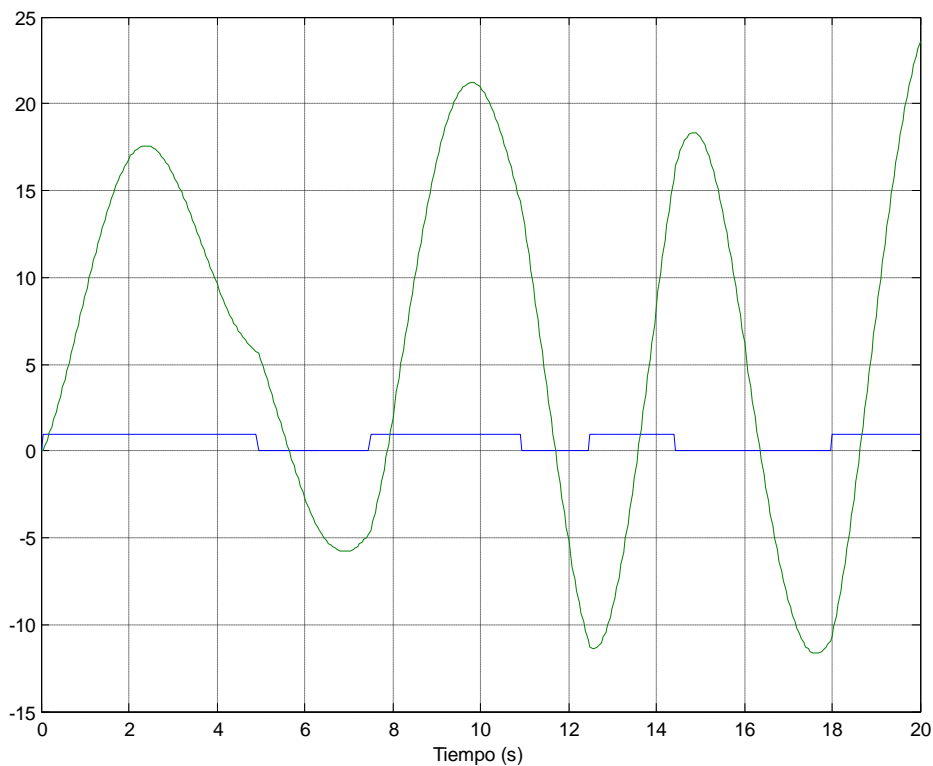
## Apéndices

### Apéndice A.1 Ejemplo de Identificación de Sistemas con Matlab

En esta sección se obtendrá por medio de la identificación de sistemas la función de transferencia de un modelo conocido. En una situación real se desconocería el modelo, pero con el fin de evaluar el ejemplo se utilizó un modelo conocido (ecuación A.1).

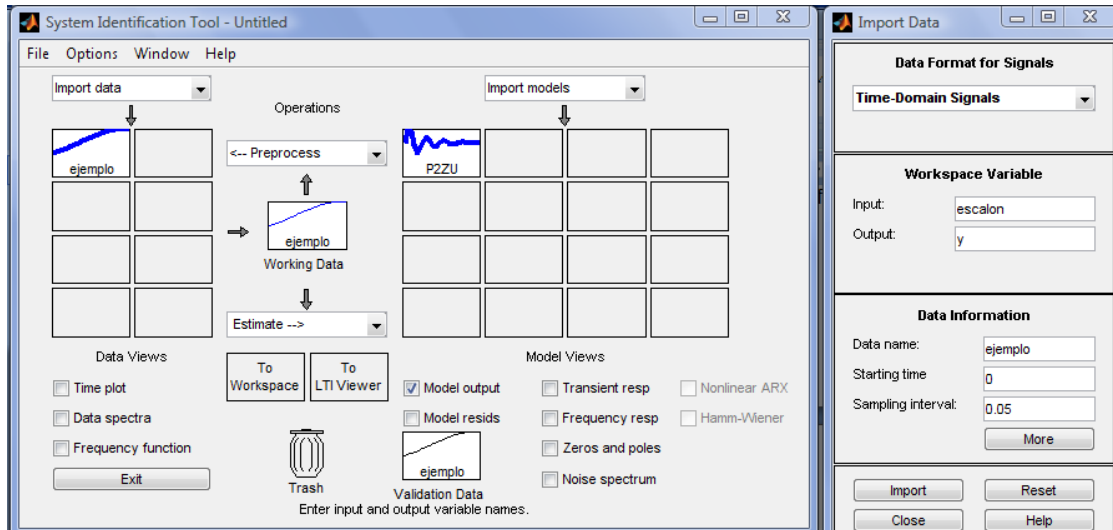
$$G(s) = 10.2 \frac{1 + 0.45 s}{1 + 0.25 s + 0.77 s^2} \quad (A.1)$$

Por medio de Matlab se genera una entrada con una serie de escalones unitarios y se le aplica al modelo de la ecuación A.1 (Utilizando el código del profesor Ing. Eduardo Interiano [4]), y de esta manera se obtuvo la salida del modelo (Figura A.1.1).



**Figura A.1.1.** Entrada y salida del modelo (Ecuación A.1)

Al tener los datos de la entrada (escalón) y salida (Y) utilizamos la aplicación System Identification Tool de Matlab (ident) para identificar el modelo por medio de los datos generados. En la figura A.1.2 se observa la aplicación y la forma de introducir los datos.

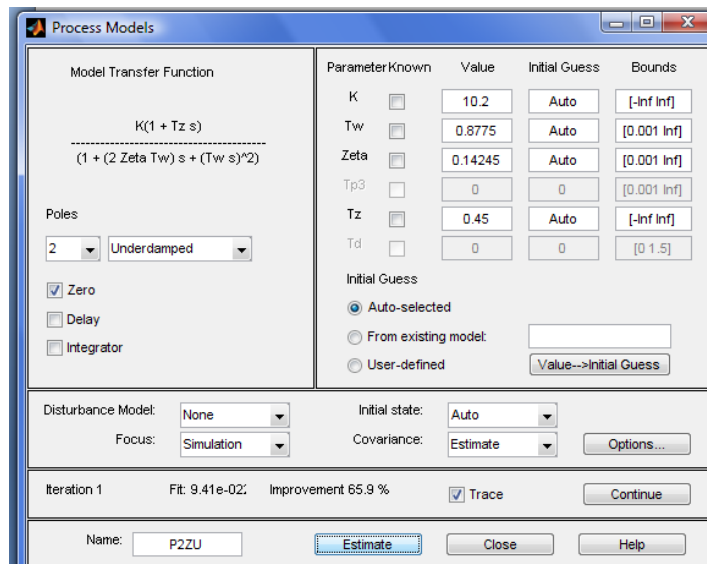


**Figura A.1.2.** Aplicación Ident.

Por medio de esta aplicación es posible realizar un tratamiento previo a los datos, tales como un filtrado para eliminar el ruido de alta frecuencia, eliminación de la componente de CD, escoger el rango de los datos a utilizar, entre otras.

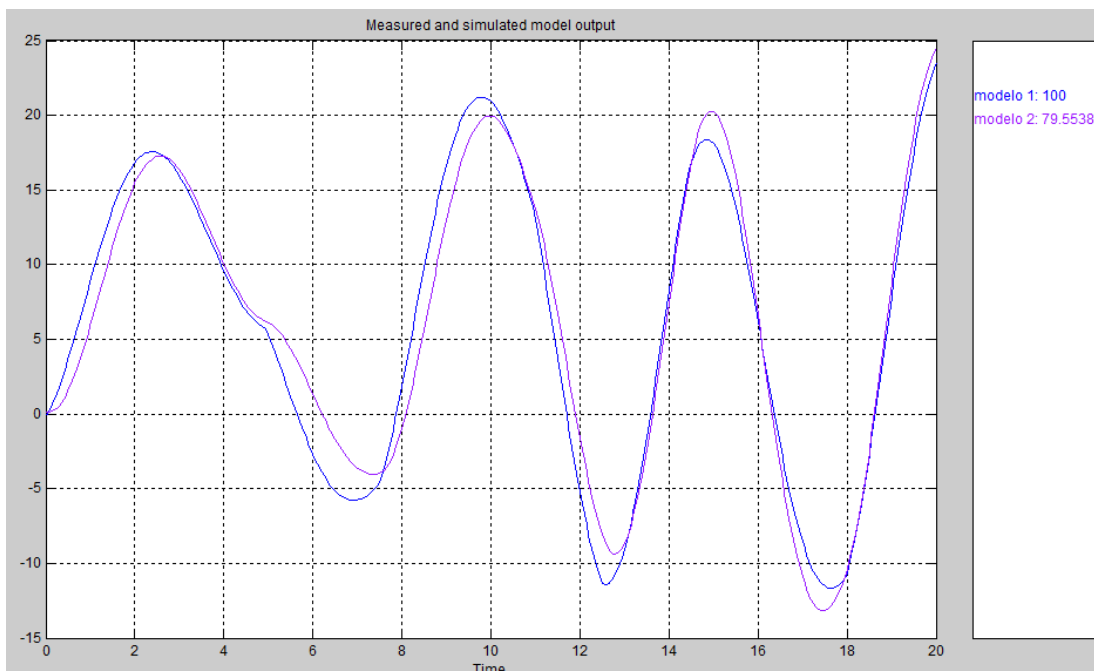
Se puede estimar los modelos por medio de diferentes métodos, entre ellos: paramétricos lineales, de procesos, de correlación, espectrales y no lineales. Para nuestro caso, por medio de estimación de procesos obtenemos la Función de transferencia estimada.

En la figura A.1.3 se observa las opciones para la estimación de procesos, en la que se selecciona cuantos polos, si tiene integrador o si tiene ceros o un retardo. Para nuestro ejemplo seleccionamos dos polos conjugados complejos y un cero.



**Figura A.1.3.** Opciones de estimación por process Models.

Si no se tiene un conocimiento previo de la planta o modelo, la mejor forma de estimarlo es probando varios métodos y formas hasta obtener un modelo que logre un alto porcentaje de similitud con la salida real, tal y como se muestra en la figura A.1.4 para dos modelos estimados.



**Figura A.1.4.** Comparación entre modelos estimados

De la figura A.1.4 se determina que el mejor modelo estimado es el modelo 1 (100%) el cual tiene una función de transferencia como la que se muestra en la ecuación A.2. La cual es prácticamente idéntica a la función de transferencia de la que obtuvimos los datos.

$$G(s) = 10.2 \frac{1 + 0.45 s}{1 + 0.24999975 s + 0.77000625 s^2} \quad (A.2)$$



## Apéndice A.2 Hoja de información del proyecto

### Información del estudiante:

**Nombre:** German José Vásquez Araya

**Cédula:** 6-354-553

**Carné ITCR:** 200433795

**Dirección de su residencia en época lectiva:** 150m norte del CAI  
Esparza Centro

**Dirección de su residencia en época no lectiva:** 150m norte del CAI  
Esparza Centro

**Teléfonos en época lectiva:** 8810-1947 **Teléfonos en época no lectiva:**  
8810-1947/2636-4179

**Email:** germanjva2000@yahoo.es

### Información del Proyecto:

**Duración en meses:** 4

**Nombre del Proyecto:** Diseño e implementación de un control Integral para el proceso de colado de aluminio.

**Área del Proyecto:**Automatización

**Profesor Asesor:** Ing. Daniel González

### Información de la escuela:

**Nombre:** Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica

**Zona:** Cartago

### Información del profesor asesor:

**Nombre:** Juan Carlos Jiménez

**Departamento:** Escuela de Ingeniería Electrónica

**Profesión:** Profesor

**Grado académico:** Licenciado en Ingeniería Electrónica