

# *Trabajo de Diploma en Opción al título de Ingeniero Eléctrico*

**Título:** Modelación y control del proceso de almacenamiento de pulpa de la planta Espesadores en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba

Autor: Dioslider Matos Cantillo

Tutor: Ing. Deynier Montero Góngora

Consultante: Ing. Eduardo Pelegrín Rodríguez

**Moa, 2015**  
**“Año 57 de la Revolución”**  
**Curso: 2014-2015**

**Declaración de Auditoría:**

Declaro ser el único autor del presente Trabajo de Diploma y reconozco al Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez” y al Departamento de Eléctrica como portadores de los derechos patrimoniales del mismo, con carácter exclusivo.

Para que así conste firmamos la presente a los \_\_\_\_días del mes de \_\_\_\_\_ del 2015.

Dioslider Matos Cantillo

\_\_\_\_\_  
Firma Autor

Ing. Deynier Montero Góngora

\_\_\_\_\_  
Firma Tutor

Ing. Eduardo Pelegrín Rodríguez

\_\_\_\_\_  
Firma Consultante

## **PENSAMIENTO**

*El éxito consiste en: merecer el respeto de personas inteligentes, el afecto de los niños, ganar el reconocimiento de críticos honestos; gozar de la belleza, descubrir lo positivo de lo demás, hacer un poco mejor el mundo dejando detrás de ti a un hijo bueno o a un buen jardín cultivado; o bien porque ayudaste a un pobre, saber que no viviste en vano y que gracias a ti una persona puede respirar con más tranquilidad. Esto es haber triunfado.*

**Bessie Anderson**

## **DEDICATORIA**

- A Dios por su fidelidad y todo lo que representa para mí.
- A mi Madre por su inquebrantable amor y continuo apoyo en la cimentación de mi estructura moral y profesional; sin ella nada de esto sería posible.
- A mi Papá por todo el esfuerzo y sacrificio dedicado.
- A mi esposa Irsaidis que ha sido quien me ha dado el soporte y el ejemplo de que sí se puede.
- A mi familia en general que amo tanto.
- A mi hermana Lili.
- A mi hijo
- A todos mis primos y amigos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Luego de culminado este trabajo quiero agradecer a todas las personas que han influido en mi formación académica y social que sería injusto omitir alguna de éstas:

- ✓ Muy especial a ese que todo lo puede (Dios).
  
- ✓ A mis padres Kinidio Matos Guilarte y Ermis Cantillo Azares por sus excelentes y oportunos consejos.
  
- ✓ A mi tutor Ing. Deynier Montero Góngora por su preocupación y constante dedicación.
  
- ✓ A todos los buenos profesores que he tenido durante estos 6 años de carrera.
  
- ✓ A los compañeros de la empresa “Cmte. Pedro Sotto Alba” que me facilitaron el acceso a la información y el desarrollo de la componente experimental, especialmente a los siguientes que fueron claves para la realización de este proyecto: Ing. Eduardo Pelegrín, Argelio Machado, Ing. Isidro Hechavarría, Tecnóloga Yanexis Piñó Cuenca, a las compañeras Lic. Diana Benitez y Lic. Yanelis por su apoyo y gestión, a todos los miembros del grupo Instrumentación y en general a los trabajadores de la Planta de Lixiviación y Espesadores. Gracias a estas personas, todo fue posible.
  
- ✓ A mis amigos y compañeros de aula que estuvimos unidos estos seis largos años.

## **RESUMEN**

Se realiza la identificación experimental del proceso de almacenamiento de pulpa que enlaza el complejo de Plantas: Espesadores - Lixiviación, de la Empresa Cmte. Pedro Sotto Alba del municipio Moa, con la primicia de conocer la dinámica del proceso para su mejor estudio y comprensión. Se explican las técnicas y métodos fundamentales de la identificación así como la señal de entrada para excitar el sistema. Se describen los experimentos que se realizaron, se validan los modelos matemáticos obtenidos y se simulan los mejores parámetros del controlador para optimizar el control del nivel de pulpa en el tanque de almacenamiento. Finalmente se realiza una valoración económica y medioambiental de la propuesta técnica.

## **ABSTRACT**

It is performed an experimental identification process pulp storage that links the complex plants: Leach –Thickeners, Business Cmte: Pedro Sotto Alba of Moa municipality with the scoop to know the dynamics of the process for its study and understanding. Technical and fundamental methods and identifying the input signal to excite the system are explained. Experiments were performed as described, the mathematical models obtained are validated and the best parameters are simulated controller to optimize control of the level of pulp in the storage tank. Finally an economic and environmental assessment of the proposed technique is performed.

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
Capítulo 1 .....	4
Caracterización del proceso de almacenamiento de pulpa y de las técnicas de identificación. ....	4
1.1 Revisión bibliográfica sobre la identificación y control de procesos industriales .....	4
1.2 Características del tanque de almacenamiento de Pulpa.....	6
1.3 Factores que influyen en el almacenamiento de pulpa en la planta de Lixiviación.....	6
1.4 Descripción del esquema tecnológico del proceso de almacenamiento de pulpa .....	7
1.4.1 Estado actual del control y la automatización del proceso.....	7
1.4.2 Instrumentación existente en el proceso.....	8
1.5 Aspectos generales sobre la identificación de sistemas.....	10
1.5.1 Proceso de identificación .....	12
1.5.2 Métodos de identificación.....	13
1.5.3 Identificación de sistemas utilizando el software MATLAB .....	17
Conclusiones.....	18
Capítulo 2 .....	19
Modelación y control del proceso de almacenamiento de pulpa.....	19
2.1 Variables presentes en el proceso de almacenamiento de pulpa .....	19
2.2 Requisitos previos a la experimentación .....	20
2.3 Condiciones generales presentes durante la realización de los experimentos. ....	21
2.4 Identificación experimental del caso de estudio.....	22
2.4.1 Experimento # 1 .....	22
2.4.2 Experimento # 2 .....	25
2.4.3 Experimento # 3 .....	27
2.5 Ajuste de controladores.....	29
2.6 Valoración económica y medioambiental .....	31
CONCLUSIONES GENERALES .....	35
RECOMENDACIONES .....	36
BIBLIOGRAFÍA.....	i
ANEXOS.....	iii
Anexo (1): PLC S7 300 CPU 317 .....	iii
Anexo (2): Variador de Velocidad YASKAWA F7 .....	iii
Anexo (3): Bomba reforzadora.....	iv

Anexo (4): Micropilot M FMR230 .....	iv
Anexo (5): Vista desde el CITECT del experimento 1.....	v
Anexo (6): Vista desde el CITECT del experimento 2.....	v
Anexo (7): Vista desde el CITECT del experimento 3.....	vi
Anexo (8): Funciones del SIT para el preprocesamiento de los datos.....	vi
Anexo (9): Menú Preprocesamiento.....	vii
Anexo (10): Gráficas para el análisis de los datos.....	viii

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los sistemas de control modernos en un contexto mundial constituyen un papel fundamental en el desarrollo de soluciones a inconvenientes o problemas presentados en las aplicaciones domésticas e industriales. Los principales aportes de los sistemas de control modernos a nivel industrial contribuyen a la innovación tecnológica, la rentabilidad y la mantenibilidad de los procesos a los cuales se controla.

Un problema tradicional en dichos procesos industriales, consiste en determinar de qué manera pueden diseñarse controladores que cumplan eficazmente la función de manipular una o varias variables.

Esto va en función del proceso matemático que pueda detectar a través de un sistema dinámico o estático; en definitiva, que controle de manera eficaz cualquier variable que se presente dentro de cualquier sistema empleando una modelo que represente su estructura física en comunicación con el controlador de dicho proceso (Rueda, 2006).

Sin embargo esta tarea resulta compleja, pues se debe regir por las leyes que están involucradas en cada uno de los procesos.

En este sentido, la identificación de sistemas dinámicos proporciona una herramienta capaz de generar métodos que permiten de manera mucho más sencilla, establecer los modelos matemáticos con un adecuado nivel de exactitud.

En la empresa Cmte. Pedro Sotto Alba de Moa, específicamente en el proceso de almacenamiento de pulpa de la planta Lixiviación, es importante mantener un control del nivel de la misma en el tanque de almacenamiento. Para lograr esta tarea, se tiene en cuenta la capacidad de pulpa disponible de la planta Espesadores y la que demanda la Planta Lixiviación, garantizando un determinado balance de flujo de pulpa.

### **Se toma como situación problémica:**

La aparición de constantes averías en el proceso de almacenamiento de pulpa en la planta Lixiviación, debido a que la relación del nivel del tanque de almacenamiento con el flujo de pulpa proveniente de la planta Espesadores a través de las bombas de succión, está funcionando sin tener en cuenta un modelo matemático que relacione las variables de interés de dicho proceso.

## **Problema**

Ineficiencias en el control del nivel de pulpa que tiene lugar en el tanque de almacenamiento de la planta Lixiviación.

## **Objeto**

La relación del nivel de pulpa con el flujo de la misma que es suministrado por motores instalados en las bombas de succión.

## **Campo de acción**

Modelación, Simulación y Control de procesos.

## **Objetivo**

Obtener un modelo matemático del proceso, mediante la aplicación de técnicas de identificación experimental, que permita proponer los parámetros óptimos del controlador del sistema.

## **Hipótesis**

Si se obtiene un modelo matemático del proceso, que pueda ser utilizado para proponer los parámetros óptimos del controlador del sistema, se logrará un control eficiente del nivel de pulpa dentro del tanque de almacenamiento.

## **Tareas**

1. Caracterización de los objetos vinculantes en el proceso de almacenamiento de pulpa de la empresa "Cmte. Pedro Soto Alba".
2. Fundamentación de los métodos de identificación que se utilizaron para la obtención de los modelos matemáticos.
3. Obtención del modelo matemático del proceso de almacenamiento de pulpa por la vía experimental que más se aproxime al sistema real.
4. Proposición de los parámetros óptimos del controlador del sistema utilizando el Matlab.
5. Valoración económica y medioambiental de la propuesta técnica a implementar.

## **Métodos y técnicas empleados en la investigación**

1. Análisis de fuentes documentales.
2. Realización de experimentos. Observación.
3. Simulación.

## **Significación Práctica**

Con el desarrollo de esta investigación se da solución y se cubre la necesidad existente de observar el comportamiento dinámico del proceso de almacenamiento de pulpa en la planta Lixiviación de la empresa “Cmte. Pedro Sotto Alba”. El estudio de las respuestas obtenidas a partir del modelo identificado, en conjunto con el controlador propuesto para el sistema, le da la facilidad al personal de la empresa, de profundizar sus conocimientos acerca del proceso y le proporcionan una buena predicción de la variable de salida ante diferentes situaciones. Además el modelo servirá para posteriores diseños de estrategias de control e investigaciones que puedan realizarse en este tipo de proceso, brindando al investigador una guía para continuar.

# Capítulo 1

## Caracterización del proceso de almacenamiento de pulpa y de las técnicas de identificación.

---

---

El objetivo del presente capítulo es establecer el Marco Teórico - Metodológico de la Investigación, a partir del análisis de los trabajos precedentes y de la metodología seguida para su ejecución. Se ofrece una caracterización integral de las técnicas de identificación y del proceso almacenamiento de pulpa en la Empresa “Cmte. Pedro Sotto Alba” de Moa.

### **1.1 Revisión bibliográfica sobre la identificación y control de procesos industriales**

Para desarrollar la investigación fueron consultados diferentes trabajos y estudios, orientando la revisión bibliográfica sobre el tema de la modelación matemática, la simulación y el control desde el punto de vista científico, técnico y práctico en procesos industriales.

Resultó muy útil la revisión del trabajo de Pérez en 2013 [13], donde se realizan experimentos sobre la base de la identificación experimental en el proceso de precalentamiento de licor de la planta Lixiviación. Se validan los modelos matemáticos obtenidos y se proponen los parámetros del controlador para optimizar el control del nivel de licor en el tanque de precalentamiento.

En el trabajo realizado por Leyes y otros en 2007 [7], se propone el control de nivel de un tanque orientado a la medición de una variable física, selección de un controlador, ajuste de sus parámetros, y uso de un actuador. Se comprobó la coherencia entre los resultados obtenidos en la simulación de la planta con el modelo identificado, y los resultados obtenidos en la implementación de la planta real. Además se determinó un controlador PI que se ajusta a los requerimientos de funcionamiento de la planta en el punto de operación de diseño.

Por su parte, Ormeño y otros en 2011 [12], implementaron un mini sistema de refrigeración industrial y una vez armado, realizaron pruebas experimentales con varias señales de entrada, luego con las señales de salida identificaron el proceso. Inicialmente emplearon modelos no paramétricos como el análisis de correlación y posteriormente se procedió con métodos paramétricos ARMAX, ARIMA, Output Error. Para la validación de los mismos, se verificó cuál de ellos cumplía mejor con la especificación de un modelo válido y en base al modelo seleccionado, se procedió a construir un controlador para el sistema utilizando la herramienta siso tool del matlab.

Añez y Scarano en 2014 [1], manipularon la apertura de la válvula con la finalidad de obtener un tiempo de muestreo del proceso, logrando un ajuste de 85 % para el modelo ARMAX 2222, con una estabilización de 50 Hz, y valores de tendencia y dispersión en los rangos de residuos. Esto permitió optimizar los parámetros de ajuste del controlador para lograr un nivel adecuado de agua en el tanque de la planta piloto, así como ejercer un mejor dominio de la dinámica del proceso antes diferentes perturbaciones.

Larco y otros en 2009 [6], identificaron una estructura de un modelo paramétrico a través del ident de Matlab, que se adaptaba a un cuarto térmico. Con el propósito de regular la temperatura del mismo, realizaron simulaciones para una entrada escalón unitario y apreciaron que el sistema en lazo cerrado sin controlador, exhibía error en estado estacionario apreciable; por lo que propusieron un controlador PI para reducir dicho error.

Estos trabajos conceptualizan con mucha claridad los métodos sistémicos de análisis del conocimiento científico, permitiéndole al investigador el empleo de los mismos para sustentar teóricamente la investigación. A pesar de que algunos términos y definiciones han evolucionado en el presente, su esencia posee actualidad y vigencia.

En el Manual de Operaciones PSA de 2007 [10], se hace clara mención de las principales variables que intervienen en el proceso de almacenamiento de pulpa, que abarca el complejo de plantas Espesadores - Lixiviación, así como las características del proceso que se tuvieron en cuenta en el presente trabajo.

## 1.2 Características del tanque de almacenamiento de Pulpa

Los tanques 135-TK-1A/B (figura 1), tienen como función recibir el mineral precalentado, almacenarlo por un período corto de tiempo y evitar sedimentaciones internas; de forma que garanticen la alimentación continua a los trenes, en caso de afectaciones de suministro de mineral desde la planta de Espesadores. Ambos tanques operan en paralelo y sus datos técnicos se presentan en la tabla 1.



Figura 1. Tanques de Almacenamiento de Pulpa de la planta lixiviación

Tabla 1. Parámetros técnicos de los tanques de almacenamiento de pulpa

<b>Especificación</b>	<b>135-TK-1A/B</b>
Fluido	Pulpa con sólido
Capacidad	148052 Galones(560.4217 m <sup>3</sup> )
Diámetro	28 pulg (8.534 m) de alto x 30 pulg (9.144 m)
Material	Acero Carbono

## 1.3 Factores que influyen en el almacenamiento de pulpa en la planta de Lixiviación

- El sólido extraído de los Espesadores debe estar al 46 % o más. Una disminución de este valor sería perjudicial, pues ocurriría un aumento en el

consumo energético y de ácido en la Planta de Lixiviación, además se necesitaría extraer mayor volumen de pulpa.

- El flujo del mineral extraído de los Espesadores está en dependencia de la capacidad a que se encuentra trabajando Lixiviación. Generalmente se extrae entre 1600 y 1800 TM/diario a cada Espesador convencional.

#### **1.4 Descripción del esquema tecnológico del proceso de almacenamiento de pulpa**

Según Manual de Operaciones PSA de 2007 [10], los tanques instalados en la planta de Espesadores manejan una solución de alimentación de hasta 25 % de sólido, a partir de la cual se concentra de 46 a 48 % a temperatura de 28 °C. Es indispensable para este proceso que la cantidad total de pulpa espesada a la salida del espesador durante un tiempo, sea igual a la cantidad de sólido alimentado en el mismo período. Luego de ser extraída la pulpa por los variadores de velocidad instalados en las bombas de succión, es transportada a través de dos líneas (una de 18 pulgadas y otra de 20) hacia los precalentadores de la planta de Lixiviación, donde por contacto directo de vapor a contracorriente, la pulpa se distribuye en todas las secciones del mismo, para lograr temperatura de 82 °C. Una vez precalentada en el rango de 42 a 45 % de sólido, se descarga por el fondo a los tanques de almacenaje, donde se mantiene homogeneizada por medio de un sistema de agitadores mecánico – neumático. De los tanques de almacenaje, mediante bombas centrifugas, la pulpa es enviada a las bombas de alimentación de alta presión WIRTH, las que suministran el mineral a los calentadores de cada tren.

##### **1.4.1 Estado actual del control y la automatización del proceso**

En el complejo de plantas Espesadores - Lixiviación se encuentra instalado un Sistema de Supervisión y Control (Citect: Versión 7.10), en la figura 2 se pueden observar detalles del mismo.

En cada salida de los espesadores existe una bomba gobernada por un variador de velocidad y a su vez por un control PI, ubicado en Autómatas Programables de la familia Siemens.

La finalidad de este control es mantener un nivel adecuado de pulpa de mineral en la planta de Lixiviación. Según la capacidad demandada por esta planta y las características de sedimentación de cada tanque espesador, será

el flujo específico bombeado. De esta manera se obtiene un flujo total en el tanque de almacenamiento de mineral, que es medido por un radar nivelador. Existen también dos bombas reforzadoras intermedias para ayudar el bombeo debido a la alta viscosidad del mineral.

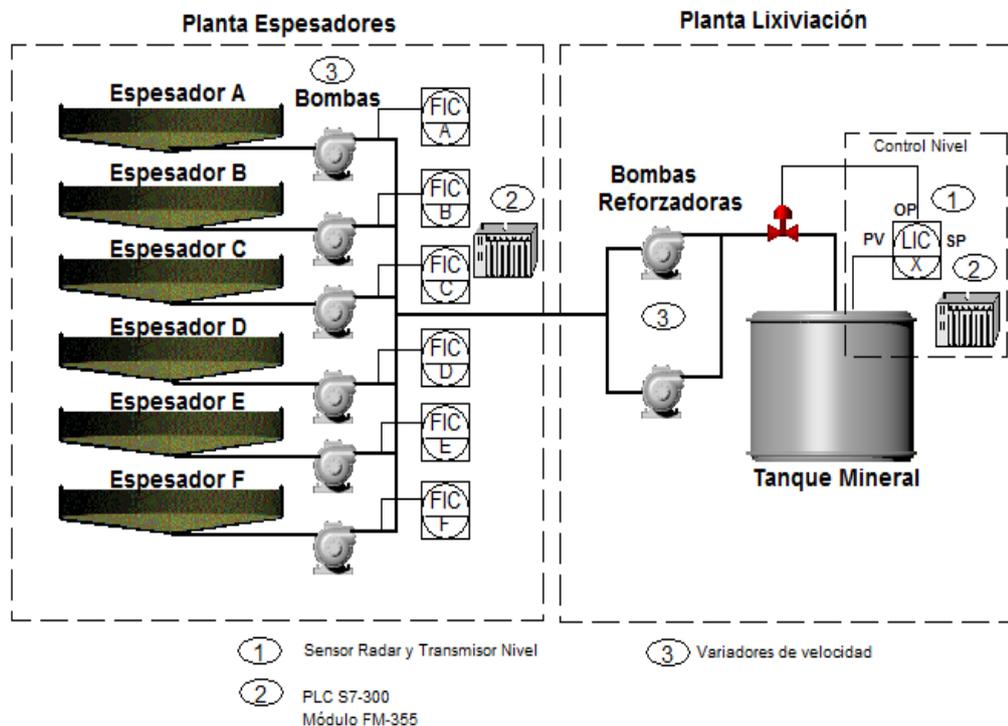


Figura 2. Sistema de Supervisión del proceso Almacenamiento de pulpa

#### 1.4.2 Instrumentación existente en el proceso

En la Tabla 2 se describe la instrumentación vinculada al proceso de almacenamiento de pulpa. Seguidamente se ofrecen otros detalles y especificaciones de la misma.

Tabla 2. Instrumentación

Nombre	Denominación	Rango	Tipo	Marca
PI	Autómata Programable	Medio	S7 300	Siemens
NT	Medidor Nivel	0-100%	FMR230	Micropilot
Fp	Variador de velocidad	0-100%	F7	YASKAWA

- Siemens PLC S7 300 CPU 317
  1. La CPU presenta gran memoria de programa y capacidad para requisitos exigentes.
  2. Es útil para tareas de automatización en la construcción de máquinas especiales y plantas.
  3. Aplicable como control central en líneas de producción con periferia centralizada y distribuida E / S (Entrada/Salida).
  4. Elevado rendimiento de procesamiento en aritmética binaria y de coma flotante.
  5. Interfaz PROFIBUS DP maestro / esclavo.
  6. Para extensas configuraciones de E / S.
  7. Para la creación de estructuras de E / S distribuidas.
  8. Diagnóstico Integral sistema integrado.
  9. Soporta muy bien la inserción de las herramientas de ingeniería SIMATIC. (Ver anexo 1)

- Variador de Velocidad YASKAWA F7

El variador de velocidad regula la frecuencia del voltaje aplicado al motor, logrando modificar su velocidad. Sin embargo, simultáneamente con el cambio de frecuencia, debe variarse el voltaje aplicado al motor para evitar la saturación del flujo magnético con una elevación de la corriente que lo dañaría. Los variadores de velocidad están compuestos por una etapa rectificadora, la cual convierte la tensión alterna en continua mediante rectificadores de diodos, tiristores. Luego pasa por un filtro para suavizar la tensión rectificada y reducir la emisión de armónicos. El Inversor, convierte la tensión continua en otra de tensión y frecuencia variable mediante la generación de pulsos. Actualmente se emplean IGBT's (Transistores Bipolares de compuerta aislada) para generar los pulsos controlados de tensión. Los equipos más modernos utilizan IGBT's inteligentes que incorporan un microprocesador. (Ver anexo 2)

- Bomba reforzadora 135-PU- 23A/B.

Es una bomba centrífuga con revestimiento interno de goma compartido, sello mecánico. Posee succión y descarga de 10" Ø y 8" Ø (pulgadas de diámetro) respectivamente. Cuenta con un sistema de regulación de velocidad rotatoria.

La función de estas bombas es garantizar la alimentación de forma continua, de la pulpa procedente desde planta de Espesadores hacia los precalentadores de mineral en Lixiviación. La pizarra eléctrica de esta bomba informa a través de un pequeño monitor algunos parámetros del motor como son: frecuencia, velocidad y corriente. Para la visualización de éstos, solo hay que apretar la tecla DISPLAY para observar los mismos. Las demás teclas son para programación. Este sistema computarizado requiere para su mantenimiento y reparación, un personal especializado. (Ver anexo 3)

- Micropilot M FMR230

Este es un sistema de la medición "descendente ", el funcionamiento se basa en el método tiempo de vuelo. Tiene en cuenta las medidas de la distancia del punto de la referencia (la conexión del proceso) a la superficie del producto. Los impulsos del radar son emitidos por una antena que se refleja fuera de la superficie del producto y es recibida de nuevo por el sistema del radar.

Es un radar nivelador o transmisor inteligente para tiempo continuo y nivel del contacto, esta es una tecnología rentable conveniente para las situaciones arriesgadas del proceso. (Ver anexo 4)

### **1.5 Aspectos generales sobre la identificación de sistemas**

Un gran número de los métodos de diseño de sistemas de control se basan en el conocimiento del modelo del sistema a controlar. Aunque los modelos obtenidos representan tan sólo una aproximación del sistema real, resultan suficientes para tomar las decisiones necesarias en el control.

Teniendo en cuenta los objetivos que se persiguen con el modelo, se han adoptado principalmente dos enfoques diferentes: identificación analítica e identificación experimental.

1. Identificación analítica: consiste en desarrollar un modelo a partir del conocimiento de las relaciones físico-químicas que describen el comportamiento del proceso a identificar, planteando ecuaciones de balance de masa, energía, u otras. Es importante considerar la complejidad que este método presenta a la hora de considerar todas las leyes físicas que intervienen en un proceso. Esta técnica de identificación obvia las tolerancias de los elementos, desgastes, fuentes de ruido no consideradas,

entre otras, que hacen que el comportamiento real nunca sea el previsto [2].

2. Identificación experimental: en la cual se considera el sistema como una caja negra con determinadas entradas y salidas. En este caso se realiza un conjunto de experimentos que proporcionan pares de medidas de las entradas y salidas, a partir de los cuales se trataría de determinar el modelo del sistema [2].

En la práctica, lo mejor sería combinar ambos enfoques para obtener el modelo final. El uso de datos reales para identificar los parámetros del modelo provee a este de mayor exactitud, pero el proceso de identificación se ve tanto más facilitado cuanto mayor sea el conocimiento sobre las leyes físicas que rigen el proceso [8].

En el campo del control, la identificación de sistemas ha sido una de las ramas más activas en los últimos años. Para diseñar sistemas de control es necesario obtener un modelo matemático del proceso a controlar, lo que supone en la mayoría de los casos la obtención de la estructura y parámetros del modelo matemático, generalmente dinámico, que reproduce con suficiente exactitud para los fines deseados el comportamiento del sistema [13].

La frase Identificación de sistemas, fue acuñada por Lotfi Zadeh en 1962, como: "Identificación es la determinación de un modelo, en base a la entrada y la salida, de un sistema, dentro de una clase de sistemas especificada, a la cual el sistema probado es equivalente" [16].

La identificación de sistemas quedó establecida como un campo de investigación reconocido dentro del área de control automático a mediados de los sesenta: en el tercer congreso de la IFAC en Londres, 1966, en el que fue presentado un artículo de visión general sobre identificación de sistemas. Un año después fue organizado el primer Symposium IFAC sobre identificación de sistemas en Praga. En la actualidad es el Symposium con una serie más larga dentro de la IFAC.

Al final de los sesenta y comienzo de los setenta se desarrollaron los métodos de identificación de sistemas por mínimos cuadrados y de máxima verosimilitud, este último fue desarrollado por Fisher en 1912 y aplicado en sistemas industriales por Åström y Bohlin en 1965.

A partir de la década de los 80, se hizo énfasis en la identificación de sistemas de múltiples entradas y salidas (MIMO), y en los 90, en la identificación con fines de control de procesos industriales [17].

Dentro de la identificación, una de las ramas más activas durante los últimos años, ha sido la utilización de modelos paramétricos. De la misma forma, la obtención de modelos directamente en el espacio de estado, ha tenido un considerable desarrollo teórico.

A pesar del desarrollo de esta disciplina y la necesidad existente en la industria de métodos de identificación eficientes, los resultados obtenidos en la misma durante las últimas décadas no son usados por los ingenieros de control industrial. Se considera que una de las causas de este hecho radica en que muchos investigadores se han enfocado en la estimación de parámetros y análisis de convergencia, lo cual constituye solamente una pequeña parte del procedimiento de identificación, mientras que unos pocos estudian el diseño de experimentos y la validación de modelos, que constituyen las temáticas más próximas a las aplicaciones del modelo. Otra causa se debe al estilo de muchos softwares de identificación, ya que aunque resultan muy flexibles y sencillos para los investigadores y estudiantes, no ocurre lo mismo para los ingenieros de control en las industrias, quienes no tienen entrenamiento académico en identificación de sistemas [17].

Paralelamente, el interés despertado por la identificación de sistemas en los últimos años, ha provocado que reconocidos fabricantes de software incorporen herramientas de identificación a sus aplicaciones, como es el caso de National Instruments y MathWorks, entre otros.

La identificación de sistemas se ha extendido en la actualidad al análisis de dinámicas más complejas, a través de la utilización de técnicas novedosas. Dentro de las técnicas más investigadas recientemente se encuentran las basadas en los sistemas biológicos y la inteligencia humana, que agrupan las redes neuronales artificiales, la lógica difusa y los algoritmos evolutivos [4].

### **1.5.1 Proceso de identificación**

En términos generales, el proceso de identificación experimental comprende los siguientes pasos:

3. Obtención de datos de entrada – salida: para ello se debe excitar el sistema mediante la aplicación de una señal de entrada y registrar la evolución de sus entradas y salidas durante un intervalo de tiempo.
4. Los datos registrados están generalmente acompañados de ruidos indeseados u otro tipo de imperfecciones que puede ser necesario corregir antes de iniciar la identificación del modelo. Se trata, por tanto, de preparar los datos para facilitar y mejorar el proceso de identificación.
5. Elección de la estructura del modelo: si el modelo que se desea obtener es un modelo paramétrico, el primer paso es determinar la estructura deseada para dicho modelo. Este punto se facilita en gran medida si se tiene un cierto conocimiento sobre las leyes físicas que rigen el proceso.
6. Obtención de los parámetros del modelo: se procede a la estimación de los parámetros de la estructura, que mejor ajustan la respuesta del modelo a los datos de entrada-salida obtenidos experimentalmente.
7. Validación del modelo: consiste en determinar si el modelo obtenido satisface el grado de exactitud requerido para la aplicación en cuestión. Si se llega a la conclusión de que el modelo no es válido, se deben revisar los siguientes aspectos como posibles causas:
  - a) El conjunto de datos de entrada - salida no proporciona suficiente información sobre la dinámica del sistema.
  - b) La estructura escogida no es capaz de proporcionar una buena descripción del modelo.
  - c) El criterio de ajuste de parámetros seleccionado no es el más adecuado. Dependiendo de la causa estimada, deberá repetirse el proceso de identificación desde el paso correspondiente.

En la figura 3 se describe la metodología a emplear para la realización de la identificación y obtención de un modelo válido de cualquier sistema por la vía experimental [4], la cual fue descrita anteriormente:

### **1.5.2 Métodos de identificación**

Existen diversos métodos de identificación, que pueden clasificarse según distintos criterios [5].

Dependiendo del criterio de ajuste de los parámetros:

Existen diversos métodos matemáticos para ajustar los parámetros de una estructura a un conjunto de datos de entrada-salida. Algunos de los más utilizados en el campo de la identificación son el método de Mínimos Cuadrados y el método de las Variables Instrumentales [5].

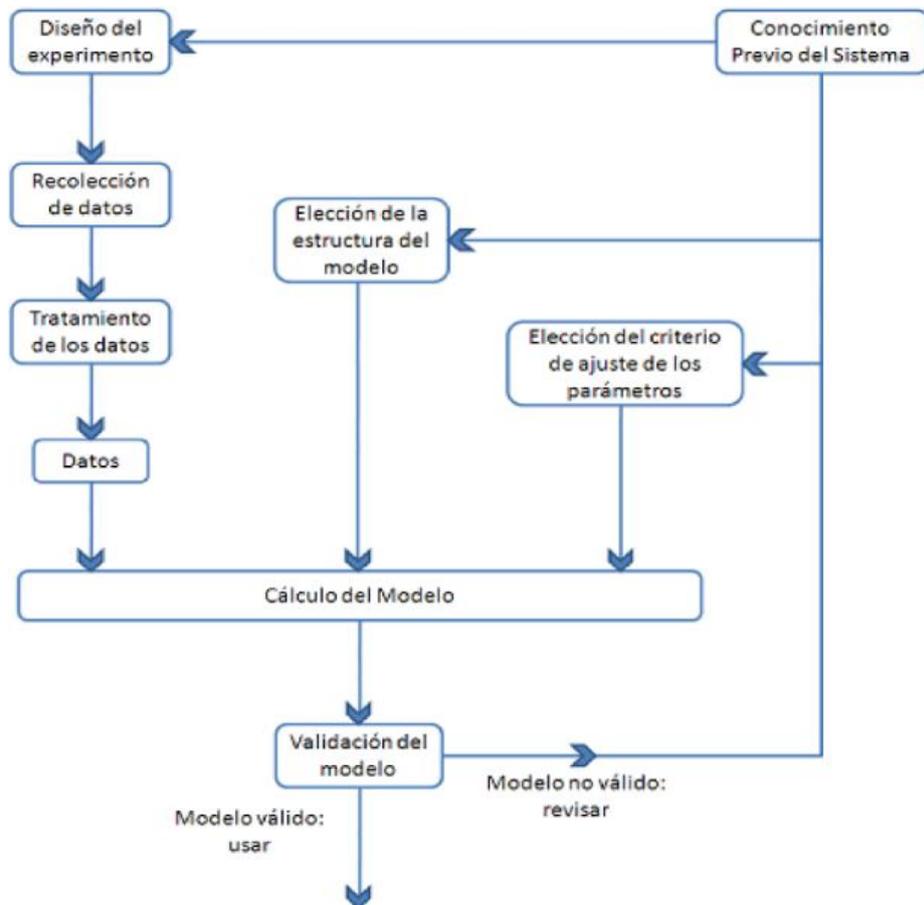


Figura 3. Esquema del proceso de identificación experimental

### Método de Mínimos Cuadrados

El principio de los Mínimos Cuadrados indica que los parámetros de un modelo se deben elegir de tal forma que: La suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores de la salida observada (reales) y los estimados, multiplicada por factores que midan el grado de precisión alcance un mínimo [15].

Considerando un modelo genérico:

$$G(z) \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}} * z^{-d} \quad (1)$$

La identificación del mismo se realiza mediante la estimación de los parámetros desconocidos  $[a_0, a_1, \dots, a_{1n}, b_0, b_1, \dots, b_m]$ . Para ello se procede como se expone dados los  $K+1$  valores de la entrada y los  $k$  de la salida, la siguiente salida estimada,

$$\hat{a} = (k + 1) \tag{2}$$

Será:

$$\hat{y} = (k + 1) = x_{k+1}^t \theta \tag{3}$$

Donde:

$$g = [a_0, a_1, \dots, a_{1n}, b_0, b_1, \dots, b_m] \tag{4}$$

$$x_{k+1} = [-y(k), -y(k-1), \dots, -y(k-n+1), u(k+1-d), u(k-d), \dots, u(k-m+1-d)] \tag{5}$$

La discrepancia entre la salida real y la estimada viene dada por la siguiente expresión de error:

$$e(k + 1) = y(k + 1) - \hat{y}(k + 1) \tag{6}$$

Repitiendo este planteamiento para  $N$  medidas sucesivas, las salidas correspondientes a esos  $N$  instantes se pueden expresar mediante la ecuación matricial siguiente:

$$\begin{bmatrix} y(k+1) \\ y(k+2) \\ \vdots \\ y(k+N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -y(k) & -y(k-1) & u(k+1-d) & u(k-d) \\ -y(k+1) & -y(k) & u(k+2-d) & u(k+1-d) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -y(k+N-1) & -y(k-n-2) & u(k+n-d) & u(k+n-1-d) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ b_0 \\ b_1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

Dicha ecuación  $Y = X\theta$  presenta infinitas soluciones. De todas ellas, se tomará, utilizando el método de Mínimos Cuadrados, aquella que minimice el error. En otras palabras, el estimador de mínimos cuadrados será aquel que proporcione los valores de los parámetros que minimizan la suma de los cuadrados de los errores  $J_k$ .

$$J_k = \frac{1}{2} \sum_{i=K+1}^{K+N} e^2(i) \tag{8}$$

Minimizando dicho índice, los parámetros que minimizan el error se obtienen resolviendo el siguiente producto matricial:

$$\hat{\theta} = (X^t X)^{-1} X^T Y \quad (9)$$

La matriz  $(X^T X)$  es cuadrada, y en determinadas condiciones, que se denominan de excitación permanente, tiene inversa. Como consecuencia de esta característica, para esta técnica de identificación no sirven las entradas usuales como escalón o impulso, ya que no provocan una excitación permanente y hacen que dicha matriz no tenga inversa, lo cual hace impracticable la identificación [14].

En la actualidad, el desarrollo de ciencias computacionales ha permitido crear herramientas de software para la identificación de sistemas, entre estas se encuentra el MATLAB, con este es posible procesar modelos no paramétricos y paramétricos como ARX (Auto-Regressive eXogen), ARMAX (Auto Regressive Moving Averagee Xogen), Modelo OE (Output-Error), Análisis de Correlación, Estimación Directa de Respuesta a Impulso entre otros.

### Modelo lineal general

Un modelo lineal general de un sistema puede ser descrito simbólicamente según la figura 4.

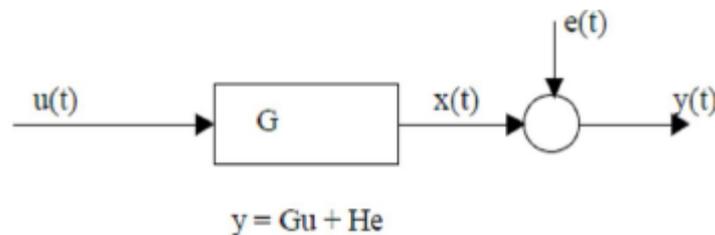


Figura 4. Esquema de un modelo lineal

Donde la salida medida ( $y$ ) es debida a la entrada medida ( $u$ ) y al ruido ( $e$ ).  $G$  denota las propiedades dinámicas del sistema, es decir, cómo la salida se forma desde la entrada. Para sistemas lineales se llama función de transferencia entre la entrada y la salida.  $H$  refiere las propiedades del ruido y se le llama también modelo del ruido, y describe cómo está formada la perturbación en la salida [3].

La estructura de un modelo lineal se representa de la siguiente manera:

$$A(q)y(t) \left[ \frac{B(q)}{F(q)} \right] u(t) \pm \left[ \frac{C(q)}{D(q)} \right] e(t) \quad (10)$$

Donde A, B, C, D y F son polinomios en el operador de retraso  $q^{-1}$

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na} \quad (11)$$

$$B(q) = 1 + b_1 q^{-1} + \dots + b_{nb} q^{-nb} \quad (12)$$

$$C(q) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{nc} q^{-nc} \quad (13)$$

$$D(q) = 1 + d_1 q^{-1} + \dots + a_{nd} q^{-nd} \quad (14)$$

$$F(q) = 1 + f_1 q + \dots + a_{nf} q^{-nf} \quad (15)$$

Los términos  $na$ ,  $nb$ ,  $nc$ ,  $nd$  y  $nf$  dan cuenta de los órdenes de los polinomios y  $(a, b, c, d$  y  $f)$  serán los coeficientes de la función de transferencia discreta y que se obtienen según: Mínimos cuadrados y Variable instrumental.

Los modelos con estructuras *AR*, *ARX*, *ARMAX*, *OE* y *BJ* son casos particulares de la estructura general y se obtienen según corresponda.

La estructura *AR* corresponde con  $nb=nf=nc=nd=0$  y además  $u(t)=0$ .

La estructura *ARX* corresponde con  $nf=nc=nd=0$ .

La estructura *ARMAX* corresponde con  $nf=nd=0$ .

La estructura *OE* corresponde con  $na=nc=nd=0$ .

La estructura *Box-Jenkins (BJ)* corresponde a  $na=0$ .

### 1.5.3 Identificación de sistemas utilizando el software MATLAB

El software profesional MATLAB [11] posee un Toolbox para la Identificación de sistemas, el cual constituye una poderosa herramienta para la obtención de modelos matemáticos de sistemas dinámicos, a partir de un conjunto de datos de entrada - salida. La identificación con el MATLAB se puede realizar de varias formas, una de ellas es a través de la interfaz gráfica (*Ident*), la cual facilita construir los modelos. Otra forma es mediante la creación de programas de identificación a partir de ficheros con extensión ".m", utilizando los comandos de este toolbox. Esta herramienta posee la ventaja de proveer varios métodos y estructuras para obtener un modelo que se aproxime al sistema real. Además nos permite analizar y validar los modelos utilizando respuestas frecuenciales y temporales, así como el análisis de los residuos.

## **Conclusiones**

En este capítulo se realizó una caracterización de los elementos principales del proceso de almacenamiento de pulpa de la empresa “Cmte. Pedro Sotto Alba” del municipio Moa. También se ofreció una panorámica de la identificación de sistemas, describiéndose en breve síntesis las técnicas y métodos más empleados.

# Capítulo 2

## Modelación y control del proceso de almacenamiento de pulpa

---

---

En el presente capítulo se describen los experimentos que se realizaron manipulando el flujo de pulpa a través de los variadores de velocidad instalados en las bombas de succión de la planta Espesadores, para mantener un nivel de pulpa adecuado en el tanque de almacenamiento de la planta Lixiviación. Se analizan los resultados obtenidos luego del procesamiento de los mismos, con los cuales se lograron obtener los modelos previstos y los mejores ajustes para el controlador en lazo cerrado. Finalmente se realiza una valoración económica medioambiental con el empleo de los parámetros del controlador propuesto, para el funcionamiento eficiente del proceso.

### 2.1 Variables presentes en el proceso de almacenamiento de pulpa

A continuación se ofrecen algunos detalles del proceso investigado, que son importantes para su modelado, tal es el caso de las variables que influyen.

El problema de control a ser resuelto se presenta de la siguiente forma: Existen una variable de entrada y una de salida. La variable manipulada considerada también entrada, es la manipulación de flujo de pulpa mediante los variadores de velocidad ( $Fp$ ). La variable a controlar (controlada o de salida) es el nivel de pulpa del tanque de almacenamiento ( $NT$ ). Estas variables se pueden observar en la figura 5.

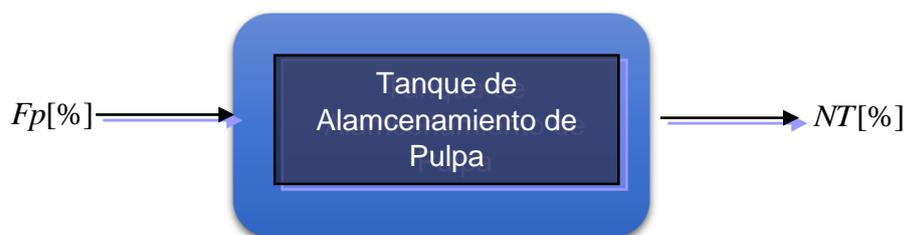


Figura 5. Variables consideradas en el proceso

## 2.2 Requisitos previos a la experimentación

Como se comentó en el capítulo 1, la identificación experimental es un método de construcción de modelos basado en experimentos. La primera de las etapas de un proceso de identificación es el diseño del experimento que incluye la selección y determinación de factores como: diseño de la señal de entrada, selección del periodo de muestreo, identificación on-line u off-line, equipos disponibles para la generación de la señal de entrada, almacén de datos y cálculos, filtro de las señales, teniendo siempre en cuenta las restricciones dadas por las condiciones de operación del proceso y las propiedades de los sensores y actuadores.

Los datos tomados durante los experimentos se tomaron de los registros del SCADA Citect que forma parte del sistema de automatización del complejo de plantas Espesadores-Lixiviación, para su posterior procesamiento.

Para utilizar debidamente los métodos de identificación es necesario, siempre que sea posible, diseñar adecuadamente el experimento. Esto conlleva a que, para el diseño adecuado del experimento, sean necesarios ciertos conocimientos básicos sobre el comportamiento del proceso. Esta información puede obtenerse realizando una serie de experimentos básicos y sencillos conocidos con el nombre de experimentos preliminares. Una manera muy útil consiste en analizar los datos correspondientes al funcionamiento normal del proceso (free run experiments), lo cual no requiere ninguna activación específica de la entrada. El experimento con entrada escalón (staircase experiment) es útil para observar el grado de linealidad del proceso estudiado y determinar las constantes de tiempo del sistema. Consiste en aplicar, a una de las entradas seleccionadas, una variación perceptible para el proceso. Esta información es vital en el diseño y selección de la señal a usar así como sus parámetros de tiempo más importantes (período de conmutación, período de muestreo, rango de amplitud de entrada y orden de la señal).

Para concretar los experimentos se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

1. Afectar la operación de la planta máximo media hora durante la realización de los experimentos.

2. Observar que tanto la alimentación de la planta de Espesadores como la demanda de la planta Lixiviación mantuviera una operación estable previa a la realización del experimento.
3. Ante determinadas perturbaciones externas o internas en el proceso, se desechaban las pruebas.
4. La señal de excitación es una secuencia de escalones positivos y negativos de forma manual, cuya amplitud se definió para cada experimento particular.
5. El período de muestreo a utilizar es 3 segundos.
6. La instrumentación a emplear posee condiciones óptimas (se garantiza el mantenimiento a los sensores antes del inicio de los experimentos).

### **2.3 Condiciones generales presentes durante la realización de los experimentos.**

La calidad de un proceso productivo está definida por un conjunto de parámetros que delimitan el comportamiento satisfactorio del mismo, dentro de un marco establecido de antemano.

Dentro de los principales componentes de la calidad total del proceso productivo de obtención de sulfuro de níquel más cobalto, está la materia prima.

La composición química del mineral suministrado a la Planta “Lixiviación” durante la realización de los experimentos se muestra en la tabla 1, siendo sus parámetros típicos durante el año.

Tabla 3. Composición química del mineral

Características del mineral	Valor
% Ni	1.25
% Fe	43.60
% CO	0.128
% Ext Ni	93.67
% Ext CO	92.75
% SiO <sub>2</sub>	5.35

Granulometría	7.41(+100)
Granulometría	6.17(+200)
Granulometría	86.42(-200)

## 2.4 Identificación experimental del caso de estudio.

Se realizaron varios experimentos aplicando de forma manual secuencias de escalones positivos y negativos al flujo de pulpa de entrada al tanque de almacenamiento, en aras de identificar el proceso.

Los modelos matemáticos que se obtuvieron son modelos paramétricos. Para procesar los datos se utilizó el "Toolbox" de Identificación del paquete profesional de programas MATLAB [10], el cual contiene herramientas para la obtención de modelos matemáticos de sistemas dinámicos basados en los datos entrada-salida observados.

### 2.4.1 Experimento # 1

Durante el experimento se tomaron 667 datos correspondientes a las variables  $NT$  y  $Fp$  con un período de muestreo de 3.0 s, tras aplicarle a esta última una serie de escalones tanto positivos como negativos y con diferentes amplitudes de forma manual. En este caso, los variadores de velocidad instalados en las bombas de succión instaladas en Espesadores experimentaron una variación de 30 a 80 % de su recorrido total. En la figura 6 se pueden observar las mediciones de las variables de entrada y de salida.

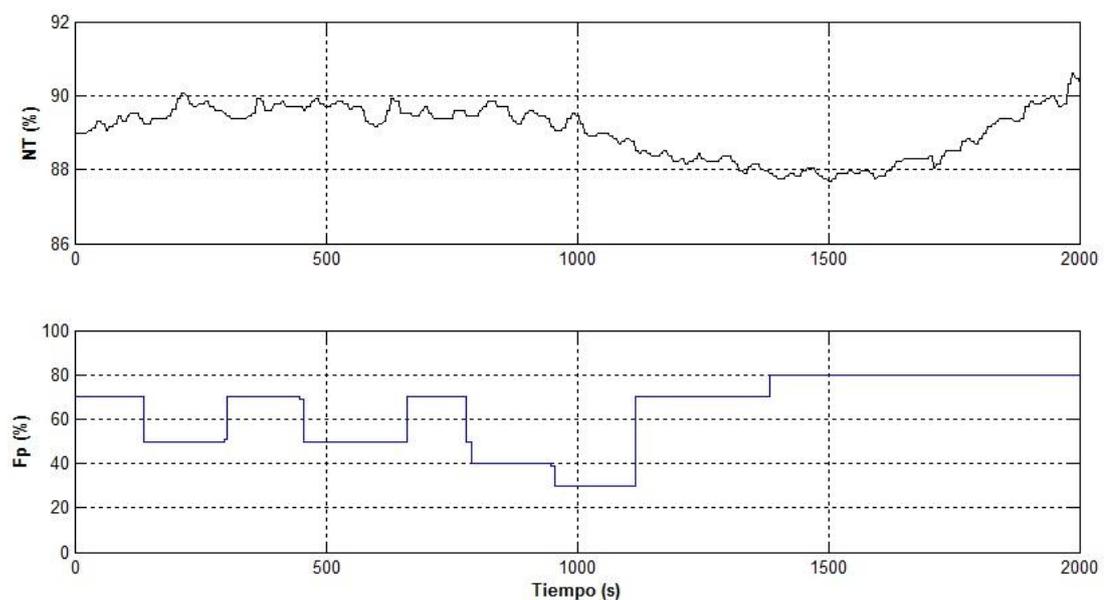


Figura 6. Datos de entrada salida experimento # 1.

Luego de recopilados los datos se hizo una revisión minuciosa de los mismos y a continuación se realizó un pre-procesamiento de los mismos aprovechando las facilidades que brinda el Toolbox de Identificación del MATLAB, el cual consistió en suprimir los niveles constantes y hacer que la media de los datos fuera cero por medio del comando *dtrend*, se probó el comando *Filter* pero no se apreciaron mejoras en el ajuste del modelo, luego con la opción *select range* se seleccionó una parte de los datos para la estimación y otra para la validación.

Para NT se obtuvo como mejor modelo *tf3* con un ajuste de 61.3 %, el cual es un modelo de orden 4.

$$\frac{NT(s)}{Fp(s)} = \frac{\pm 1.42 * 10^{-6} s^3 \pm 8.54 * 10^{-11} s^2 \pm 1.04 * 10^{-13} s \pm 5.38 * 10^{-18}}{s^4 \pm 0.003 s^3 \pm 2.20 * 10^{-7} s^2 \pm 6.67 * 10^{-11} s \pm 3.94 * 10^{-26}} \quad (16)$$

Con respecto a la validación de los modelos, se efectuaron análisis de residuos (errores de predicción), teniendo en cuenta que se realizaron ciertas suposiciones con respecto al ruido [9].

En la figura 7 se muestran los residuos para el modelo, donde se puede observar que la función de correlación se sitúa fuera de los niveles de confianza, mientras que la de correlación cruzada entre los residuos y la entrada se encuentra dentro de los intervalos de confiabilidad.

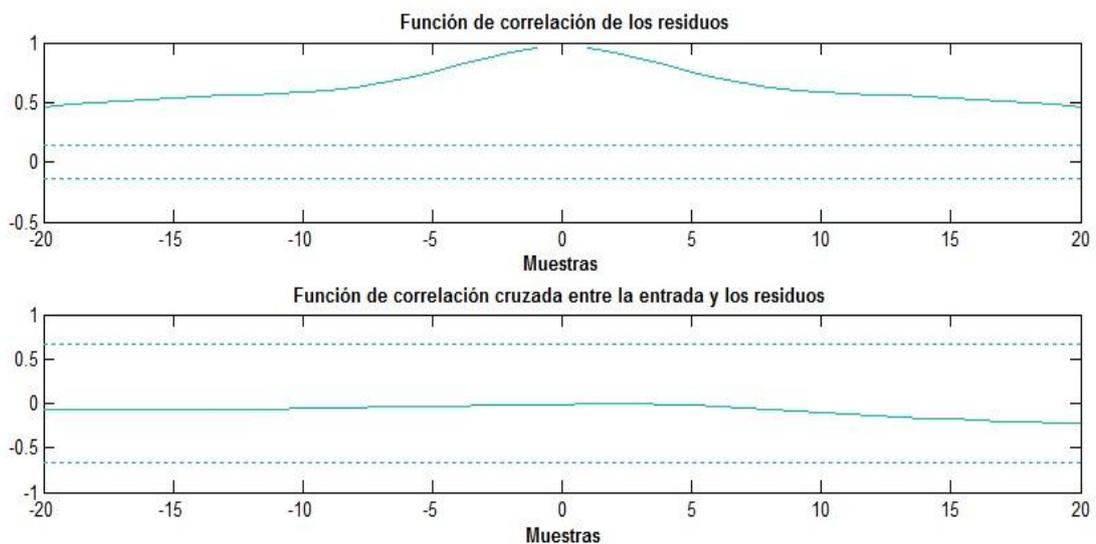


Figura 7. Prueba de residuos para el modelo estimado *tf3*.

En la figura 8 se observa la comparación de la salida medida con la salida del modelo, estimada para un horizonte de predicción infinito. Para ello, se tomó

una parte de los datos originales que no fueron empleados para construir el modelo. El comportamiento del modelo obtenido se aproxima al del sistema real y exhibe cierto grado de imprecisión.

Tal como se observan en la figura 9, los cuatro polos están situados a la izquierda del plano complejo, por lo que el sistema es estable. Se detallan además otros parámetros a tener en cuenta en la configuración de los ceros y polos como son: Amortiguamiento, Sobrepaso y Frecuencia.

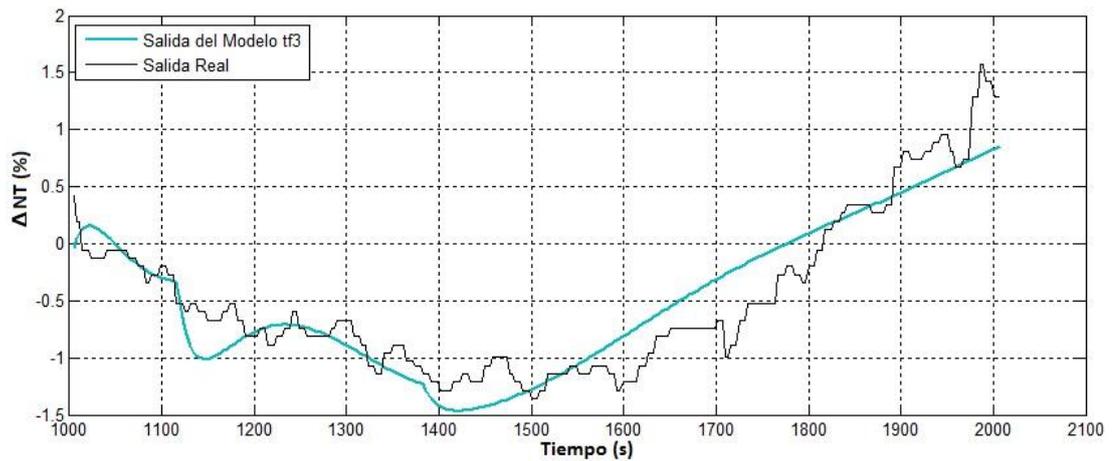


Figura 8. Salida Real menos Salida del Modelo Simulado tf3

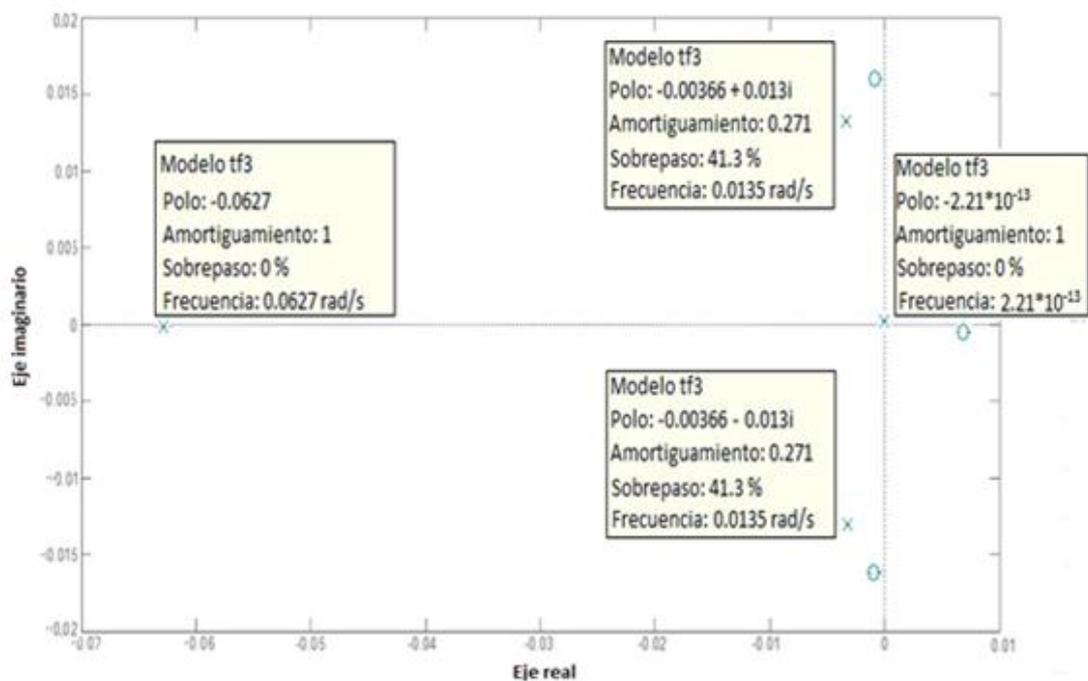


Figura 9. Mapa de polos y ceros del Modelo Simulado tf3

## 2.4.2 Experimento # 2

En este experimento se registraron 667 datos correspondientes a las variables  $NT$  y  $Fp$  con un período de muestreo de 3.0 s, tras aplicarle a esta última una serie de escalones tanto positivos como negativos y con diferentes amplitudes de forma manual. En este caso los variadores de velocidad experimentaron una variación de 20 a 99 % de su recorrido total. En la figura 10 se pueden observar las mediciones de las variables de entrada y de salida.

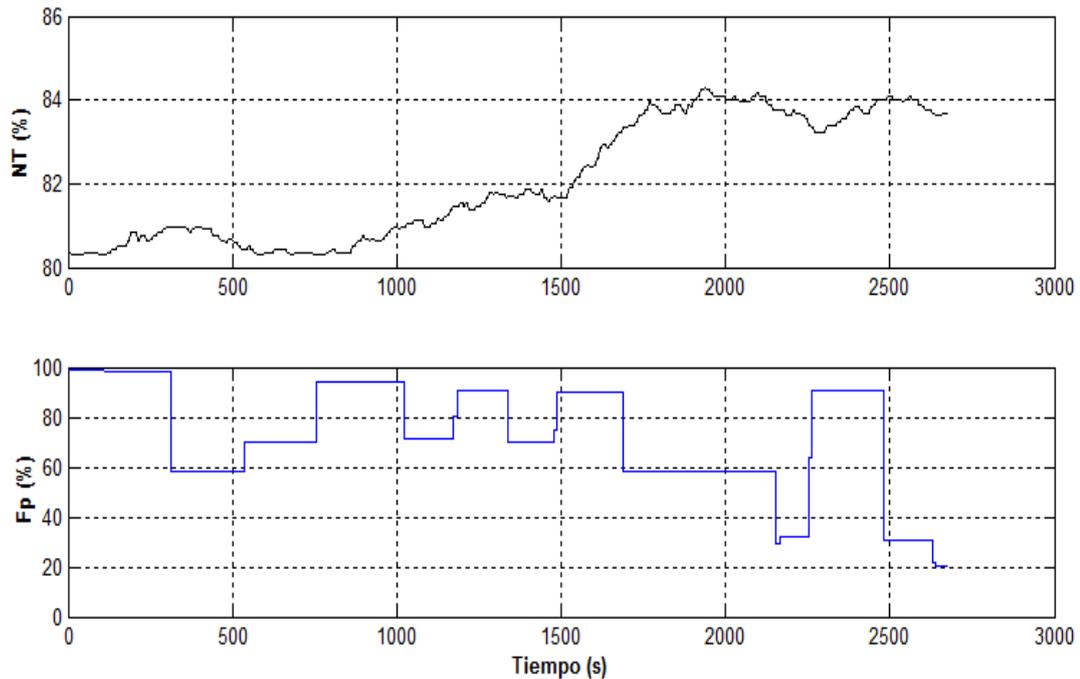


Figura 10. Datos de entrada salida experimento # 2

Se obtuvo como mejor modelo BJ22221 con un ajuste de 78.67.

A través del comando d2c se convirtió el modelo de discreto a continuo, resultando un modelo de segundo orden.

$$\frac{NT(s)}{Fp(s)} = \frac{2.941 * 10^{-5} s + 1.305 * 10^{-6}}{s^2 + 0.01049 s + 7.393 * 10^{-7}} \quad (17)$$

En la figura 11 se observa que, la función de correlación de los residuos se encuentra dentro de los niveles de confianza y la función de correlación cruzada entre los residuos y la entrada, refleja su independencia, pues ésta no se sale de los intervalos de confiabilidad.

Para la validación de este modelo se realizó la comparación de la salida del modelo con la salida real, lo cual se muestra en la figura 12, donde se observa que la salida del modelo se aproxima bastante a la real.

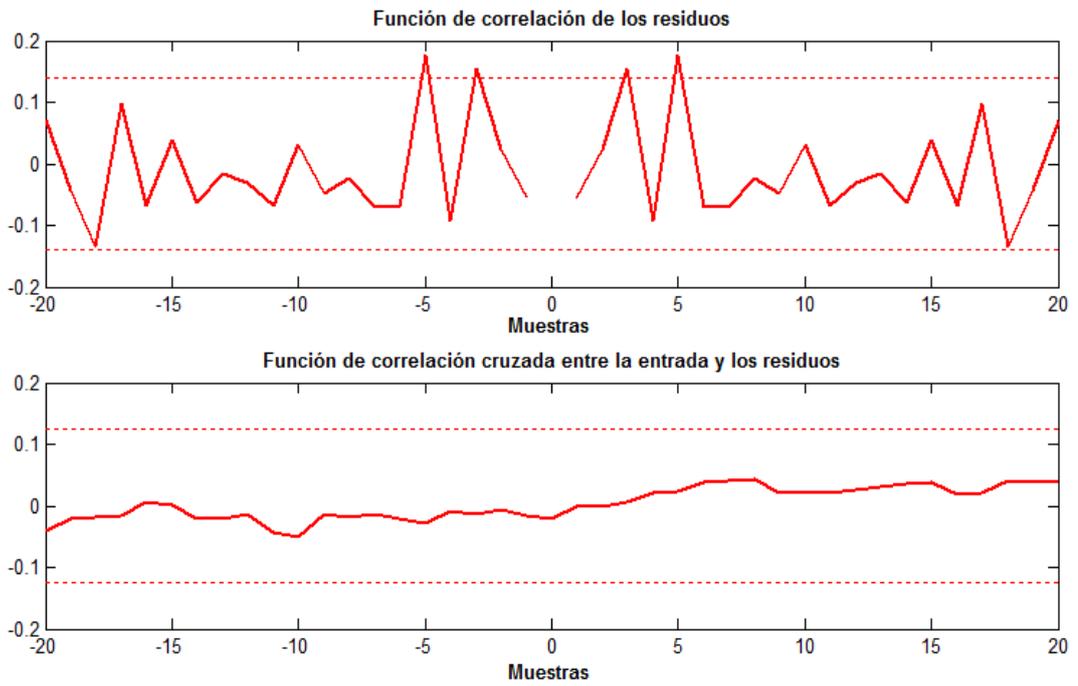


Figura 11. Prueba de residuos para el modelo estimado bj 22221

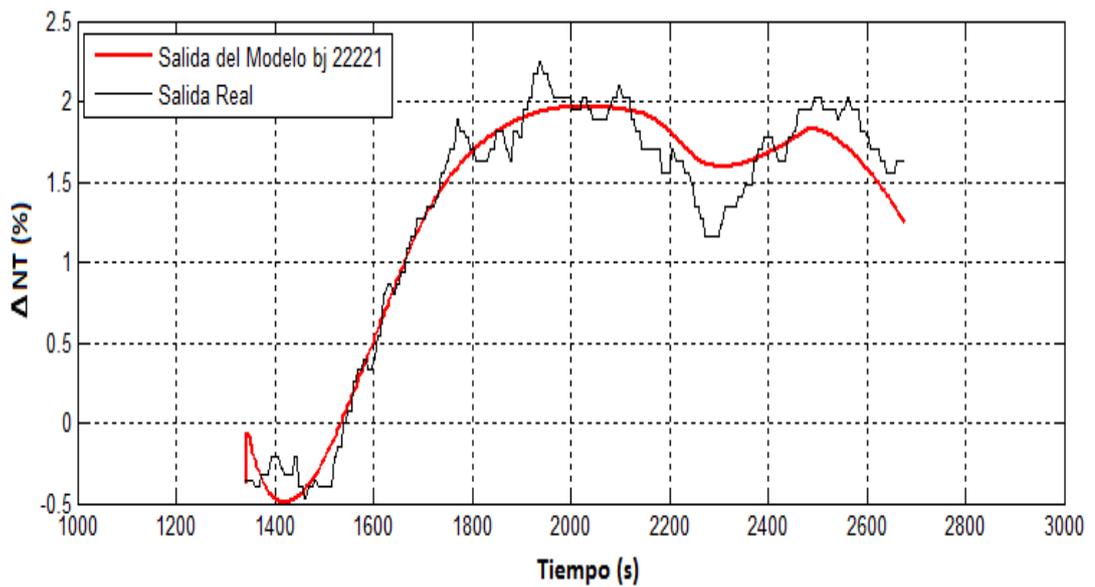


Figura 12. Salida Real menos Salida del Modelo Simulado bj 22221

En cuanto a la configuración de los ceros y polos de este modelo, se evidencia la estabilidad del mismo al estar ubicados los dos polos en el semiplano izquierdo del plano complejo (figura 13).

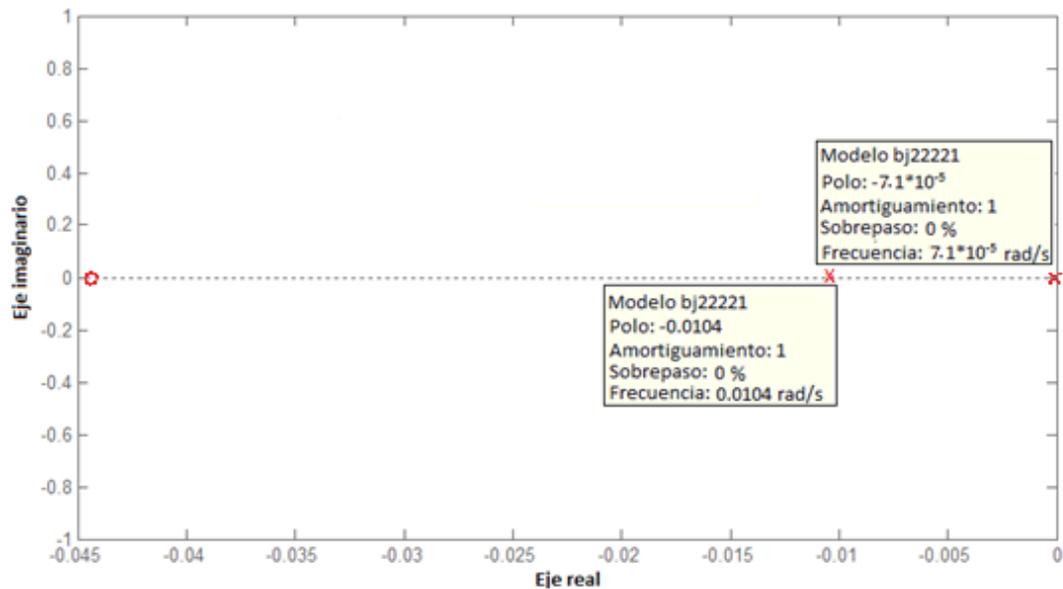


Figura 13. Mapa de polos y ceros del modelo bj 22221.

### 2.4.3 Experimento # 3

En este experimento se registraron 667 datos correspondientes a las variables  $NT$  y  $Fp$  con un período de muestreo de 3.0 s, tras aplicarle a esta última una serie de escalones tanto positivos como negativos y con diferentes amplitudes de forma manual. En este caso los variadores de velocidad experimentaron una variación de 82 a 85 % de su recorrido total. En la figura 14 se pueden observar las mediciones de las variables de entrada y de salida.

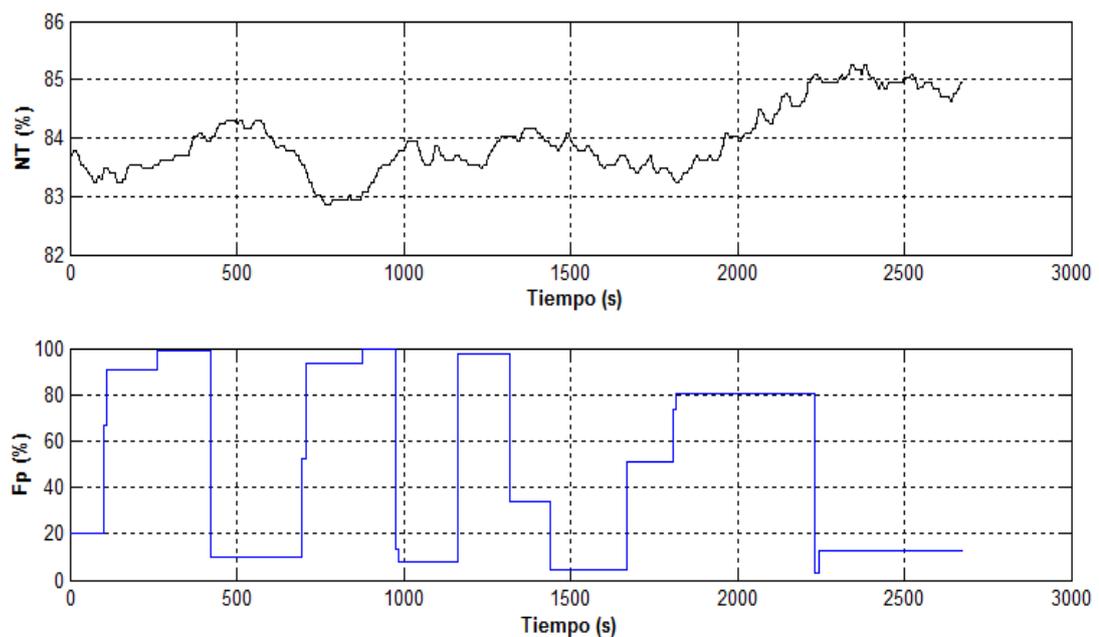


Figura 14. Datos de entrada salida experimento # 3.

Se obtuvo como mejor modelo P3IZ con un ajuste de 70.43 %, el cuál es un modelo de orden 4

$$\frac{NT(s)}{Fp(s)} = \frac{795831s - 7.7133 * 10^5}{20899s^4 + 809866.66s^3 + 20140.3s^2 + s} \quad (18)$$

En la figura 15 se observa la comparación de la salida medida con la salida del modelo, estimada para un horizonte de predicción infinito. Para ello, se tomó una parte de los datos originales que no fueron empleados para construir el modelo. El comportamiento del modelo obtenido se aproxima al del sistema real y exhibe cierto grado de imprecisión.

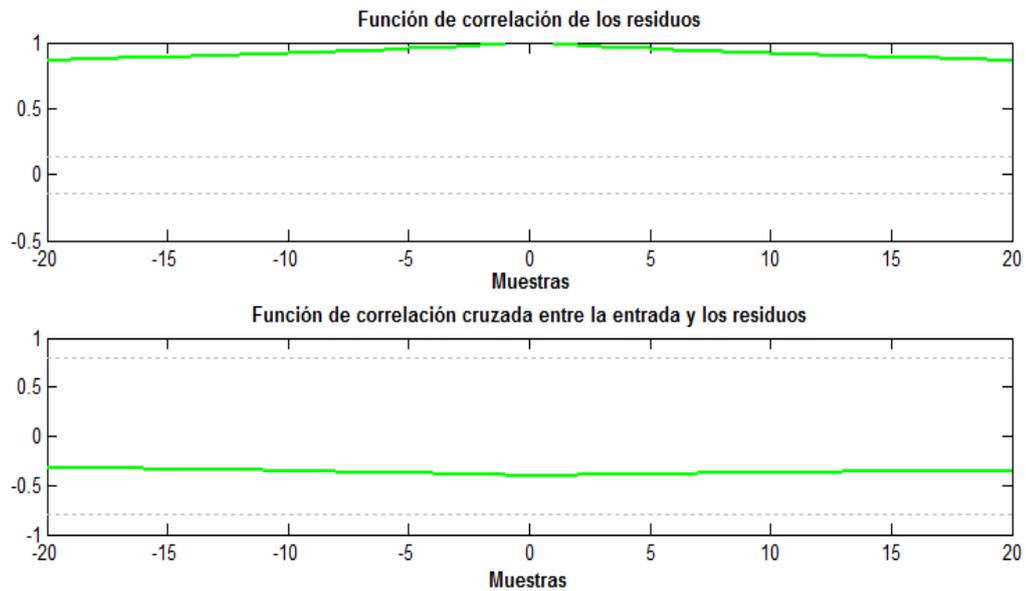


Figura 15. Prueba de residuos para el modelo estimado P3IZ.

Para la validación de este modelo se realizó la comparación de la salida del modelo con la salida real, lo cual se muestra en la figura 16, donde se observa que la salida del modelo se aproxima bastante a la real.

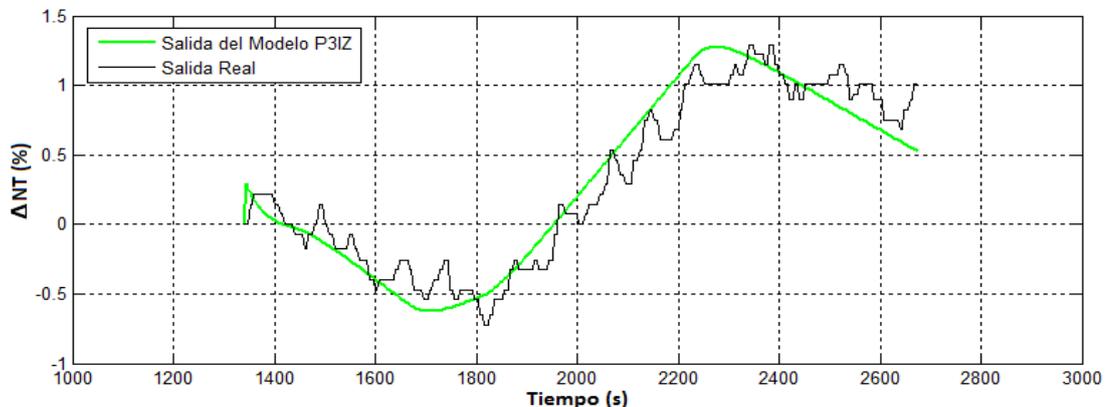


Figura 16. Salida Real menos Salida del Modelo Simulado P3IZ

En cuanto a la configuración de los ceros y polos de este modelo, se evidencia la estabilidad del mismo al estar ubicados los dos polos en el semiplano izquierdo del plano complejo (figura 17).

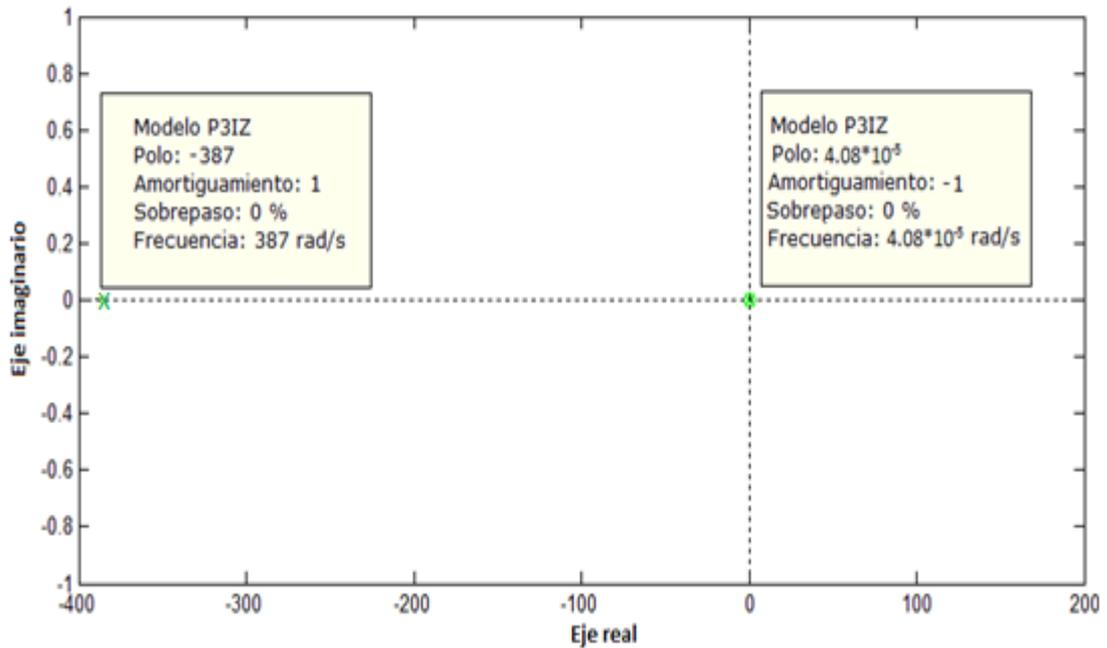


Figura 17. Mapa de polos y ceros del modelo P3IZ

## 2.5 Ajuste de controladores

Se ha determinado a través del análisis del diagrama de polos y ceros, residuos y por ciento de ajuste Fit; que el modelo bj22221 es el apropiado para utilizarlo en estrategias de control.

Para encontrar la mejor sintonía de los controladores en lazo cerrado, se utilizó la interfaz gráfica PID Tuner, invocada mediante el comando pidtool desde la ventana Command Windows del MATLAB.

Para la simulación (Figura 18), se tuvo en cuenta una comparación entre diferentes configuraciones de los controladores adaptados al lazo de control de nivel de pulpa en el tanque, que permitieran seleccionar la configuración más adecuada.

Como se aprecia en la figura 19, la curva azul que representa la respuesta de la planta en lazo cerrado para una entrada escalón unitario, exhibe un error de estado estacionario de 0.36, que difiere mucho de la entrada escalón unitario en magnitud.

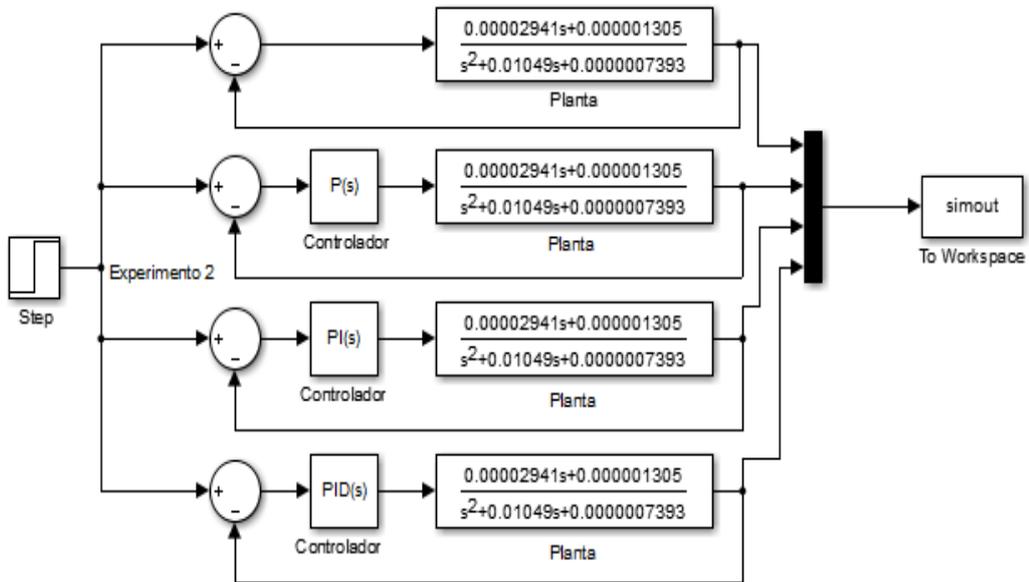


Figura 18. Simulación en el Matlab Simulink para diferentes configuraciones de control

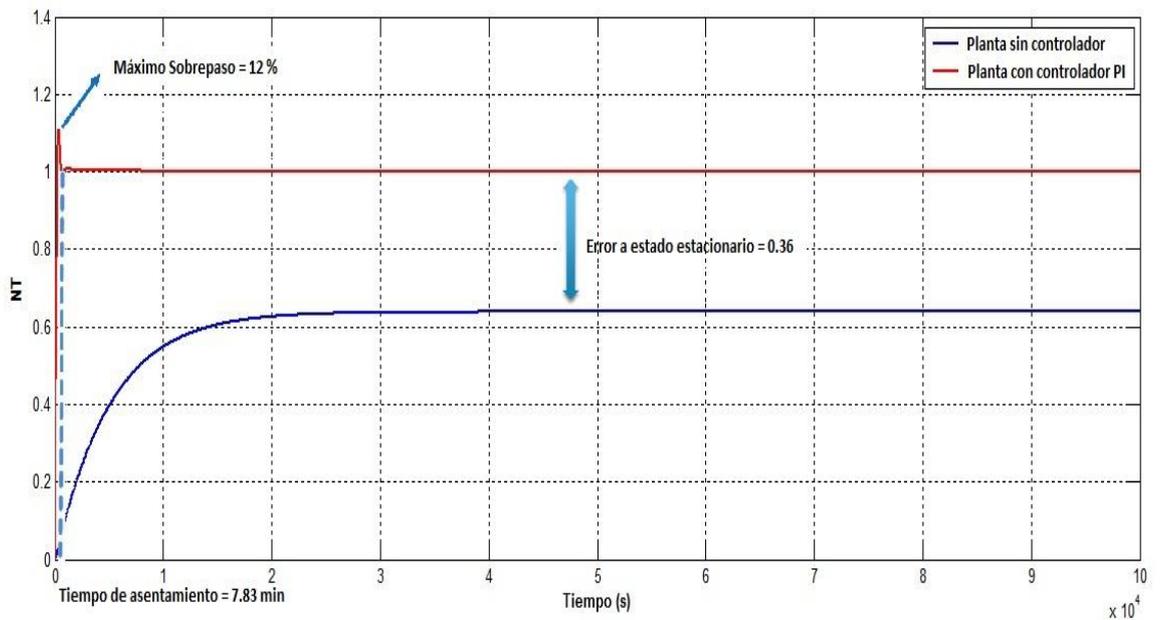


Figura 19. Nivel de pulpa para dos configuraciones de control

Analíticamente podemos corroborarlo mediante la expresión:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s * \frac{1}{1 + G(s)H(s)} * Fp(s) \quad (19)$$

Sustituyendo  $Fp(s)$  por un escalón unitario y  $G(s)H(s)$  por el modelo bj22221 queda:

$$e_{ss} = s * \frac{1}{1 + \lim_{s \rightarrow 0} \frac{2.941 * 10^{-5} s + 1.305 * 10^{-6}}{s^2 + 0.01049 s + 7.393 * 10^{-7}}} * \frac{1}{s} \quad (20)$$

Reduciendo y calculando

$$e_{ss} = \frac{1}{1 + 1.7652} \quad (21)$$

Finalmente  $e_{ss} = 0,3616$

Para corregir este error se ha diseñado un controlador PI (proporcional-integral), cuyos parámetros son:  $K_c=93.5192$ ,  $T_i=0.014778$ , debido a que nuestro proceso es lento y críticamente amortiguado. Se comprueba que la respuesta al step en lazo cerrado con este controlador (curva roja) satisface nuestros requerimientos, con un error a estado estacionario de prácticamente 0, sobrepaso de 12 % y tiempo de asentamiento de 7.83 minutos.

## 2.6 Valoración económica y medioambiental

A partir de la simulación de los controladores para el proceso de almacenamiento de pulpa (Figura 20), se estima que el controlador propuesto tiene un tiempo de asentamiento de 7.83 min y un sobrepaso de 12 %, menores que para el rendimiento del controlador actual de 11.83 min y 22 % (Figura 21).

La consulta con tecnólogos y operadores de planta, permitió asumir que aproximadamente en un día normal de operación, el control del proceso de almacenamiento de pulpa es movido de automático a manual 2 veces. De esta forma, el beneficio económico se presenta desde el punto de vista del consumo de potencia del motor trifásico instalado en la planta Espesadores que es gobernado por el variador de velocidad, para mantener el nivel de pulpa en el tanque. Cuando el proceso conmuta de manual a automático; la respuesta del nivel en lazo cerrado con ambos controladores, permite estimar un ahorro económico a través del comportamiento de los regímenes transitorios.

Se determina que para 11.83 minutos, el motor presenta los siguientes datos como promedio ( $I_n = 54.6$  A,  $V_{ac} = 312.8$  V,  $\cos \alpha = 0.58$ ). La potencia activa se calcula entonces como:

$$P = \sqrt{3} * V * I * \cos \alpha \quad (22)$$

Resultando,

$$P = 17.2 \text{ kW}$$

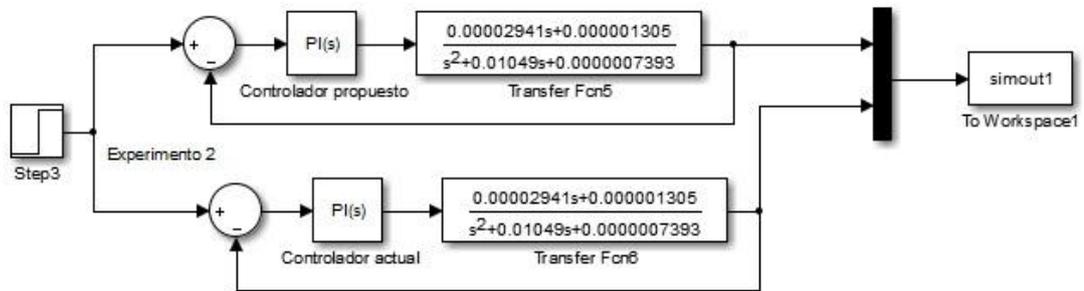


Figura 20. Simulación en el Matlab Simulink para comparar dos controladores

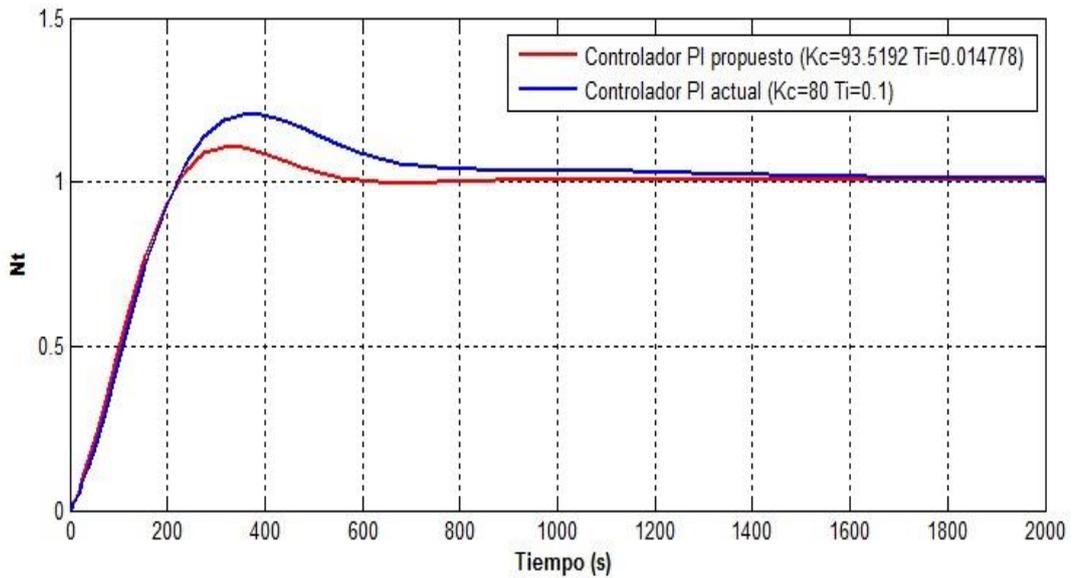


Figura 21. Nivel de pulpa utilizando dos controladores

Con la propuesta de los nuevos parámetros para el controlador PI, el tiempo transitorio es reducido a 7.83 min, y por consiguiente se reduce el consumo de potencia a 11.38 kW.

Luego de la resta de ambos consumos, se evidencia un ahorro de 5,82 kW, que representa una vez en el día y para completar el análisis diario, este valor se multiplica por 2, resultando 11.63 kW. Esto permite determinar que para un año con 365 días, se ahorra un total de 4 245.48 kW.

Al establecer un consumo económico en moneda libremente convertible (CUC), la empresa Cmte. Pedro Sotto Alba tiene un equivalente de 200 CUC

para 1000 kW, luego para un consumo anual de 4 245.48 kW; se reporta un ahorro de 849 CUC.

### Gastos de salario

Para evaluar los gastos relacionados con el ajuste y puesta en marcha de la propuesta técnica, se estima un tiempo aproximadamente de 3 días con la utilización de 2 trabajadores. La tabla 3 muestra el desglose por trabajadores de acuerdo a su categoría.

Tabla 3. Costo en salario para la implementación de la propuesta técnica

Descripción	Cantidad	Costo diario (CUC)	Costo total (CUC)
Técnico superior	1	5	15
Técnico medio	1	3.73	11.19
<b>Costo total de salario</b>			<b>26.19</b>

El costo de la inversión total queda determinado por la expresión (23)

$$C_{inv} = C_{tsal} \quad (23)$$

$$C_{inv} = 26.19 \text{ CUC}$$

### Tiempo de recuperación de la inversión.

El tiempo de recuperación de la inversión está dado por la relación entre la inversión realizada y la energía ahorrada.

$$T_{Amortización} = \frac{\text{Inversión}}{\text{Energía Ahorrada}} \quad (24)$$

$$T = \frac{26.19 \text{ CUC}}{849 \text{ CUC}} = 0.03 \text{ años}$$

En el caso que nos ocupa, el tiempo en que se recupera la inversión es aproximadamente 36 días y con los niveles de ahorro se hace factible la inversión.

Una vez implementada la configuración de los nuevos parámetros del controlador PI, se logrará operar de forma más eficiente los objetos vinculantes del complejo de plantas: Espesadores - Lixiviación y se podrán

reducir las averías que por concepto de desbordamiento del tanque, ocasionan derramamiento de pulpa al entorno.

### **Conclusiones.**

En este capítulo se describieron los experimentos realizados para determinar los modelos de comportamiento del nivel de pulpa en el tanque frente a cambios en el flujo de alimentación a partir de la aplicación de secuencias de escalones positivos y negativos. El procesamiento de los datos obtenidos se hizo a través del MATLAB con el cual se obtuvieron modelos lineales de tipo Tf3, Bj 22221, P3IZ. También se propusieron los valores óptimos para el controlador que rige el lazo de control del proceso. A partir del régimen transitorio de la respuesta del nivel de pulpa con el controlador propuesto, se pudo establecer un ahorro económico, visto desde la energía consumida por el motor trifásico que es gobernado por el variador de velocidad.

## CONCLUSIONES GENERALES

- Se caracterizó el proceso de almacenamiento de pulpa y se determinaron las principales variables a partir de su análisis como objeto de regulación automática.
- Se obtuvieron los modelos aproximados sobre la base de la identificación experimental que relaciona el nivel del tanque de almacenamiento con el flujo de pulpa manipulado por los variadores de velocidad de los motores instalados en las bombas de succión de la planta Espesadores.
- Se realizó la validación de los modelos matemáticos obtenidos Tf3, Bj 22221, P3IZ, los cuales brindaron ajustes entre 61 y 78 %; apreciándose un comportamiento aceptable de los residuos.
- Se propusieron los valores del controlador PI que mejor simularon el comportamiento real del proceso ( $K_c=93.5192$  y  $T_i=0.014778$ ).
- El ahorro de energía al año por el uso del motor trifásico gobernado por el variador de velocidad es de 849 CUC. Esto da un tiempo de recuperación de la inversión de 36 días.

## RECOMENDACIONES

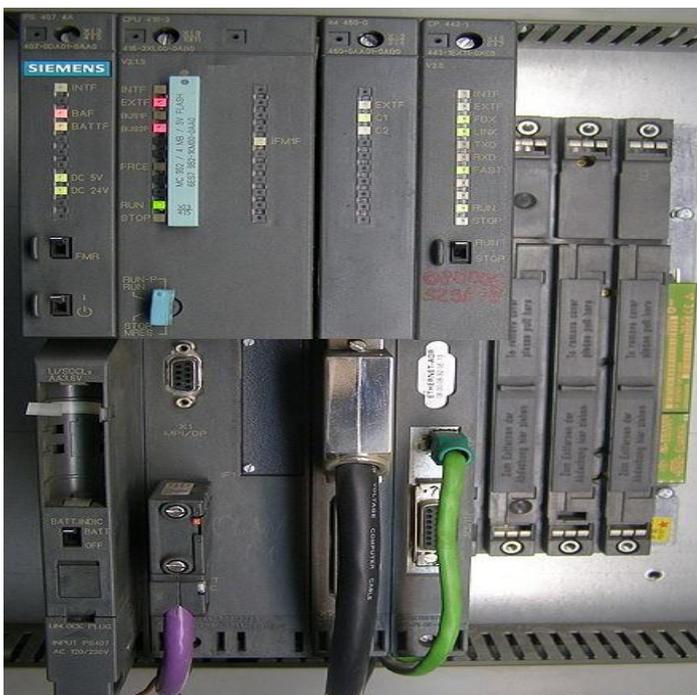
- Que a partir de los modelos obtenidos se investiguen diferentes estrategias de control para el proceso.
- Utilizar secuencias de señales de excitación variantes en período y en amplitud programadas en PLC para simular el comportamiento del flujo de pulpa al proceso de precalentamiento, en aras de optimizar la identificación experimental.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Añez, G. y Scarano, M.: Modelado experimental del nivel de un tanque de agua en una planta piloto. Telematique. 14 (1):58-78. ISSN: 1856-6189.
- [2] Arafet, P. y otros.: Monografía sobre identificación de sistemas. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba, 2004.
- [3] Aróstegui, J. M. y otros.: Metodología del Conocimiento Científico. La Habana: Editorial de Ciencias Sociales, 1978. 445 p.
- [4] Irizar, M.: “La inteligencia computacional en la identificación de sistemas” Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones. Vol. XXVI, No. 1, p. 35-41. Departamento de Automática y Computación, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Cuba. 2005.
- [5] Jordán, M.: *Modelación e Identificación de Sistemas Dinámicos: Teoría y Herramientas*. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, 1996.
- [6] Larco-Torres y otros 2009 Identificación y Diseño del Controlador para un Sistema Regulador de Temperatura en un Cuarto Térmico, Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador
- [7] Leyes Franco JB, Navarrete Díaz Danilo Rafael. Diseño y construcción de un módulo orientado al desarrollo de prácticas de instrumentación industrial bajo la plataforma de Labview. Escuela superior Politécnica del Litoral, Guayaquil–Ecuador, 2007.
- [8] Ljung, L.: *System Identification: Theory for the User*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1987.
- [9] Ljung, L; Guo, L. 1997. : The role of model validation for assessing the size of the unmodeled dynamics. IEEE Transactions on automatic control 42 (9): 1230-1239.
- [10] Manual de Operaciones de la Planta “Lixiviación” de la empresa “Cmte.Pedro Sotto Alba. (Febrero, 2007).
- [11] MATLAB (versión7.10)

- [12] Ormeño E. y otros, 2011: Identificación y diseño del controlador para un sistema regulador de presión en una planta de refrigeración. Campes Prosperina. Km. 30.5 vía Perimetral, Guayaquil, Ecuador.
- [13] Pérez, G. R.: Identificación experimental del proceso de precalentamiento de Licor de la planta Lixiviación en la Empresa Cmdte. Pedro Sotillo Alba. Tesis. Moa: ISMM, 2014.
- [14] Selva, A.: Curso de posgrado sobre Modelación Matemática con Datos Experimentales. ISMM, Moa. Enero 2000.
- [15] Stoica, P.: System Identification II. Prentice Hall. 1989.
- [16] Zadeh, L.: From circuit theory to system theory. In Proc. IRE 50, 1962.
- [17] Zhu, Y.: —Multivariable process identification for MPC: the asymptotic method Journal of Process Control. Vol. 8, No.2, p. 101-115. And its applications. Elsevier Science. Gran Bretaña. 1998.

## ANEXOS



Anexo (1): PLC S7 300 CPU 317



Anexo (2): Variador de Velocidad YASKAWA F7



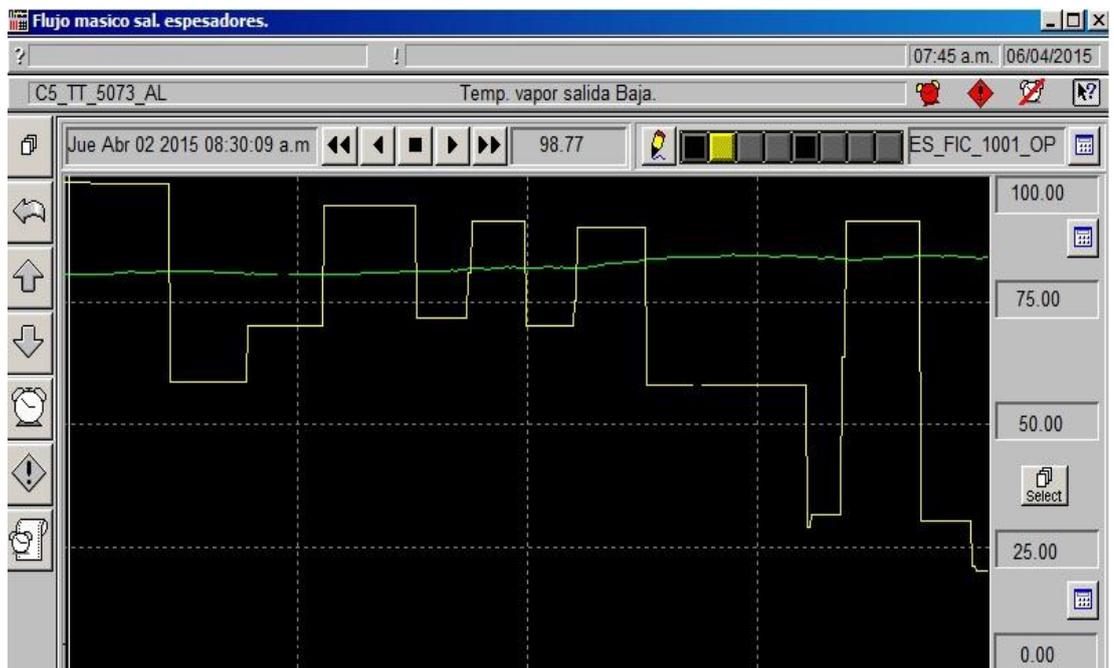
**Anexo (3):** Bomba reforzadora



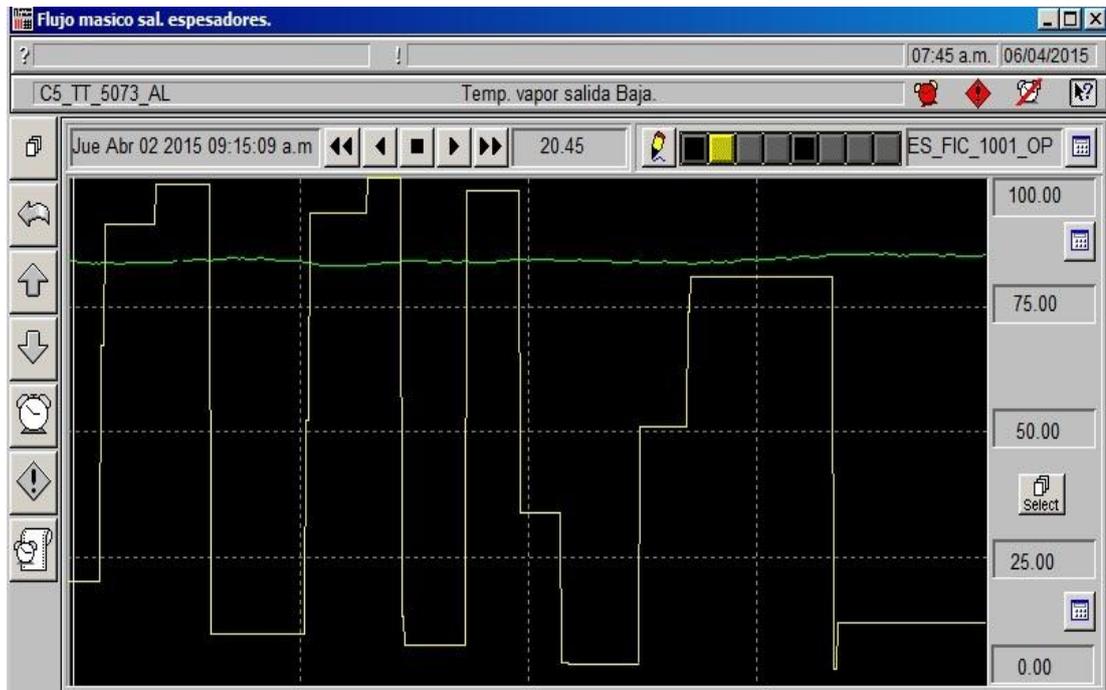
**Anexo (4):** Micropilot M FMR230



**Anexo (5):** Vista desde el CITECT del experimento 1

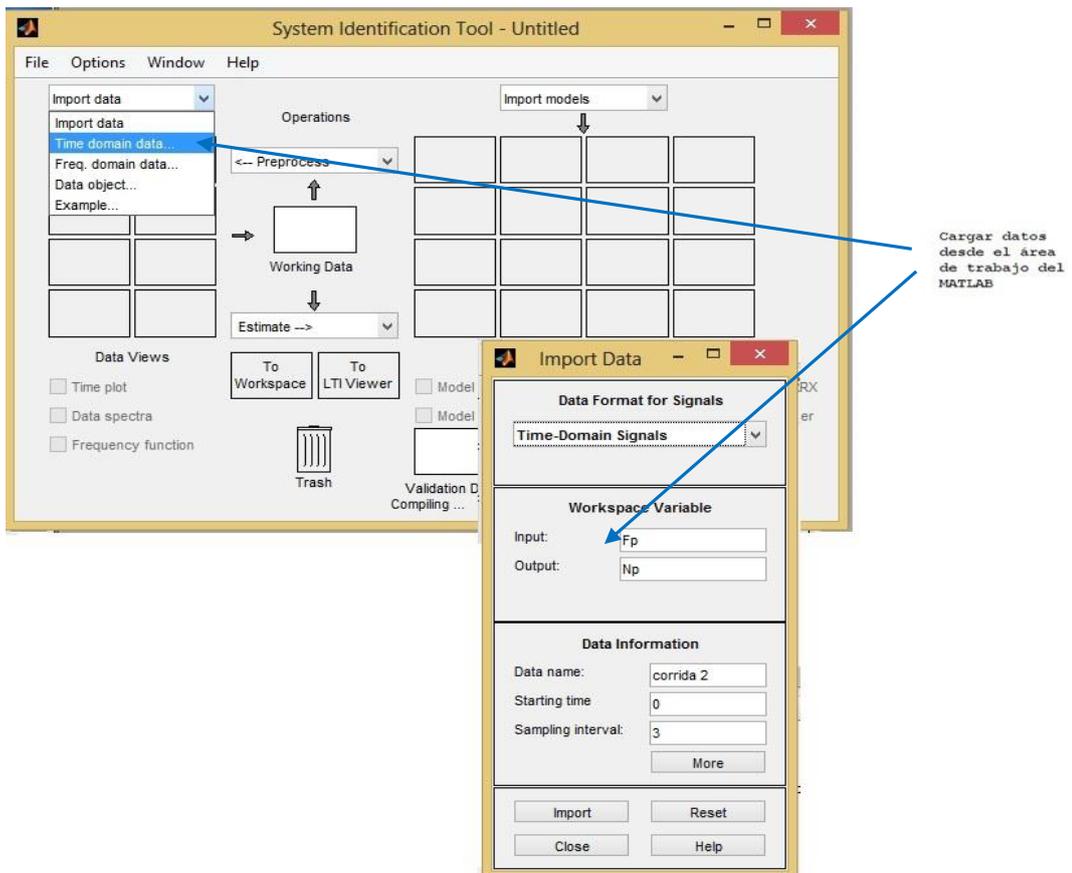


**Anexo (6):** Vista desde el CITECT del experimento 2

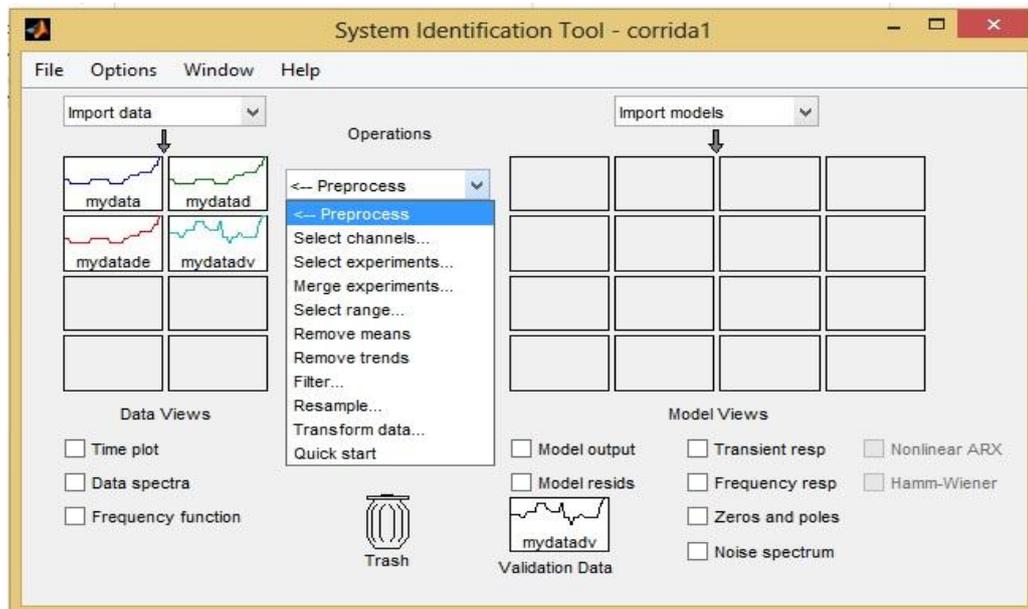


**Anexo (7):** Vista desde el CITECT del experimento 3

Para estas corridas los colores son: (Verde – Nivel) (Amarillo- % Variador)



**Anexo (8):** Funciones del SIT para el preprocesamiento de los datos



### Anexo (9): Menú Preprocesamiento

- **Select channels:**  
Permite seleccionar un a subconjunto de canales de entrada y de salida del juego de datos original (en caso de tenerlos). La numeración de las entradas y salidas es consistente en todos los conjuntos de datos creados a partir del conjunto de datos original.
- **Select experiments (No se usa para datos en función de la frecuencia):**  
Cuando el juego de datos contiene varios experimentos, con esta función se pueden elegir subconjuntos de experimentos.
- **Merge experiments (No se usa para datos en función de la frecuencia):**  
Permite fusionar varios conjuntos de datos en conjuntos multi-experimentos. Es muy útil cuando se necesitan más datos para estimar un modelo, pero hay que tener en cuenta la similitud de ambos experimentos, ya que generalmente los grupos de datos han sido obtenidos en diferentes circunstancias y no pueden ser fácilmente concatenados.
- **Select range (Solo se usa para datos en el dominio del tiempo):**  
Permite seleccionar porciones de datos para usarlos con fines de estimación validación.
- **Remove means (Solo se usa para datos en el dominio del tiempo):**  
Remueve los valores medios de las secuencias de datos de entrada y salida.
- **Remove trends (Solo se usa para datos en el dominio del tiempo):**  
Estima y remueve una tendencia lineal de las señales de entrada salida.
- **Filter:**

Permite filtrar el conjunto de datos con un filtro de Butterworth de orden 5, y así seleccionar las frecuencias de interés.

- Resample:

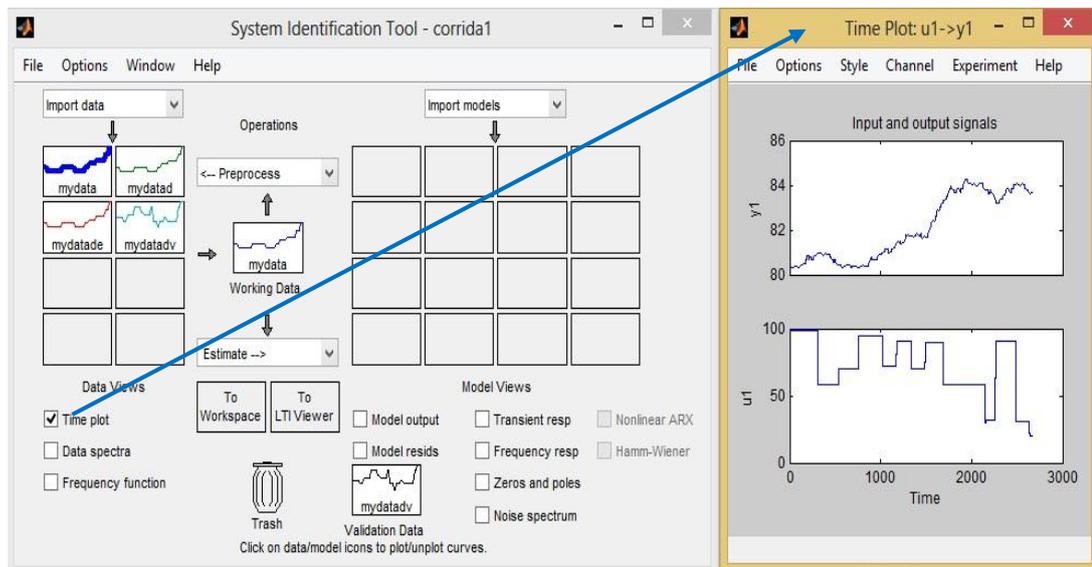
Permite cambiar el intervalo de muestreo por medio de interpolación y decimación.

- Transform data:

Permite transformar de datos en el dominio del tiempo a datos en el dominio de la frecuencia y viceversa.

- Quick start:

Creo tres nuevos conjuntos de datos a partir del conjunto de datos que se encuentra en el Working Data. Primero se remueven los valores medios, luego estos datos se dividen en dos mitades, (la primera mitad se usa para estimación y la segunda para validación. Este comando además abre gráfica temporal de los datos de entrada – salida.



### Anexo (10): Gráficas para el análisis de los datos