



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO DE MOA
DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRICA
FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECHANICA
TESIS EN OPCION AL GRADO DE ING. ELECTRICO

TITULO: Identificación experimental del proceso de precalentamiento de Licor de la planta Lixiviación en la Empresa Cmdte. Pedro Sotto Alba.

AUTOR: Gleider Pérez Reyes.

TUTOR: Ing. Deynier Montero Góngora.

CONSULTANTE: Eduardo Pelegrín Rodríguez.

Moa, 2013-2014

“Año, 56 de la Revolución”

PENSAMIENTO

El deseo humano puede hacer camino a cualquier objetivo aunque murallas inmensas se opongan, todo lo que puedas hacer o soñar hacer, ¡comiéndalo! la audacia tiene genio, poder y magia en ella.

James Allen

DEDICATORIA

- ✓ A Dios por su fidelidad y todo lo que representa para mi.
- ✓ 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 mujer Yuliet que ha sido quien me ha dado el soporte y el ejemplo de que si se puede.
- ✓ A mi familia en general que amo tanto.
- ✓ A mi amada Abuela Imilse Lopez.
- ✓ A mis tías Niurka, Isabel, Marilin, Maribel, Mayelín y Jaque por el amor y comprensión durante estos largos años.
- ✓ A mis hermanos Dailis, Danyer y Yaidis.
- ✓ A todos mis primos y amigos.

AGRADECIMIENTOS

Luego de culminado este trabajo llega quizás la parte más difícil, los agradecimientos, pues son tantas las personas que han influido en mi formación académica y social que sería injusto omitir alguna de estas:

- ✓ Muy especial a ese que todo lo puede (Dios).
- ✓ A mis padres Maricel Reyes y Eider Pérez 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 cinco 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: Orestes Montero Jardinez, Ing. Eduardo Pelegrín, Ing Geolvis Galano, Ing. Isidro Hechavarría, Ing. Daniel Barrabia, al operador Vladimir Calzada Aleaga, 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. 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 precalentamiento de Licor que enlaza el complejo de Plantas: Neutra-Lixiviación-Sulfuros, 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 Licor en el tanque de precalentamiento.

ABSTRACT

It is performed an experimental identification Liquor preheating process that links the complex plant: Neutra-Leach-sulphides, Business Cmte: Pedro Sotro Alba of Moa municipality, with the scoop about the dynamics of the process for its study and understanding. Technical and fundamental methods of identification as well as the input signal to excite the system are explained. The experiments were performed are described mathematical models obtained are validated and the best controller parameters are simulated to optimize the control level in the tank liquor preheating.

NOTACIONES GENERALES.

°C: Grado Celsius.

°F: Grado Fahrenheit.

cm: Centímetro.

Ni: Níquel.

Co: Cobalto.

Fe: Hierro.

Si: Silicio.

Mn: Manganeseo.

T: Temperatura.

Ø: diámetro.

tn: Tonelada métrica.

inch: pulgadas.

mm: milímetro.

m: Metro.

m²: Metros cuadrados

m³: metros cúbicos.

m³/min: Metros cúbicos por minutos.

lb/pulg²: libras por pulgada cuadrada.

rpm: Revoluciones por minutos.

SCADA: Sistema de Control y Adquisición de Datos.

%: Por ciento.

gpm: Galones por minuto.

gal: galón.

g/l: gramo por litro.

psi: Presión.

psia: Presión atmosférica.

PU-16-B/C: Denominación Bombas Lixiviación.

174-PU-4B/D/E: Denominación Bombas Neutralización.

pH: Medida de acidez o alcalinidad de una disolución.

ppm: Partes por millón.

VFD: Variable Frequency Drive

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	- 9 -
Capítulo1: Caracterización del proceso de precalentamiento de licor producto y de las técnicas de identificación.	¡Error! Marcador no definido.
1.1. Revisión bibliográfica sobre el proceso de reducción de níquel y su modelado.	¡Error! Marcador no definido.
1.2. Características del tanque de almacenamiento de Licor Precalentado.....	8
1.3. Factores que influyen en el precalentamiento de licor....	¡Error! Marcador no definido.
1.4. Descripción del esquema tecnológico del proceso de precalentamiento de licor producto.....	11
1.4.1. Estado actual del Control y la automatización del proceso de precalentamiento de Licor	¡Error! Marcador no definido.
1.4.2. Instrumentación existente en el proceso precalentamiento de Licor.	¡Error! Marcador no definido.
1.4.3. Regulación de flujo mediante un Sistema Variador de Velocidad – Bomba.....	16 ¡Error! Marcador no definido.
1.5. Aspectos generales sobre la identificación de sistemas	17
1.5.1. Proceso de identificación	20
1.5.2. Método de identificación.	¡Error! Marcador no definido.
1.5.3. Modelo lineal general	¡Error! Marcador no definido.
1.5.4. Identificación de sistemas utilizando el software MATLAB.	26
Conclusiones Parciales.....	¡Error! Marcador no definido.
Capitulo 2: Identificación experimental del proceso de licor precalentado.	¡Error! Marcador no definido.
2.1. Variables presentes en el proceso de precalentamiento de licor dentro del tanque	29 ¡Error! Marcador no definido.
2.2. Diseño del Experimento de Identificación a escala industrial.....	29
2.3. Identificación experimental de los casos de estudio.....	¡Error! Marcador no definido.
2.3.1. Variación del flujo de licor (Exp # 1).....	32
2.3.2. Modelo matemático para N_t frente a los cambios en L_p (Exp # 2).....	36
2.3.3. Modelo matemático para N_t frente a los cambios en L_p (Exp # 3).....	¡Error! Marcador no definido.
2.4. Ajuste de los controladores.....	42
2.5. Valoración Económica y medioambiental.	¡Error! Marcador no definido.

Conclusiones Parciales.....	45
Conclusiones Generales	¡Error! Marcador no definido.
Recomendaciones.	46
Bibliografía	
Anexos	

INTRODUCCIÓN

La automatización tiene una importancia estratégica en el sector industrial, los procesos extractivos representan un desafío razonable en este sentido. El grado de automatización de algunas industrias es muchas veces inferior al necesario. Estos aspectos provocan grandes pérdidas de energía, materia prima y una baja calidad del producto final, disminuyendo la competitividad de las empresas y aumentando el consumo energético que se revierte en desgaste de equipos y pérdidas económicas.

En un análisis histórico realizado por Ray, W. H. en 1983 [17], se muestra que hasta la década de 1960, prácticamente todo el control de procesos químicos era hecho por controladores analógicos (mecánicos, eléctricos o neumáticos), proyectados para lazos de una entrada y una salida. Estrategias de control más elaboradas tenían poca aceptación debido a las pocas exigencias de protección ambiental y al hecho de que las especificaciones del producto eran menos rigurosas. Mejoras en los sistemas de control, en aquella época, elevarían los costos de forma inaceptable.

Con el amplio desarrollo que ha tenido en la última década los recursos informáticos, la inversión en la automatización de los procesos aumenta significativamente, permitiendo que técnicas de control más elaboradas puedan ser implementadas. Debido a la gran diversidad de procesos y a cuestiones de política industrial, esas mejoras en la automatización no son difundidas en todas las plantas, actualmente existen industrias metalúrgicas donde la automatización es deficiente, particularmente en el área de extracción de mineral.

La región de Moa, situada en el nordeste del país, bañada por las aguas del Océano Atlántico, constituye desde el punto de vista económico un área de marcado interés por la presencia de uno de los mayores yacimientos de níquel del mundo, representando un elemento esencial que funciona como fuente del desarrollo socioeconómico en esta parte del territorio nacional.

La empresa niquelífera "Cmdte. Pedro Sotto Alba" ubicada en este municipio tiene como misión: Incrementar y diversificar la producción de níquel y cobalto alcanzando los estándares internacionales de eficiencia metalúrgica, costos de producción y productividad (...) minimizando los aportes al estado [16]. De ahí que la investigación científica orientada al conocimiento del proceso, el desarrollo de modelos matemáticos dinámicos que representen los fenómenos físico-químicos de las plantas, la simulación por computadora de sus características y por fin el proyecto e implementación de sistemas de control, sean temas de importancias estratégicas para el desarrollo actual del sector industrial.

En el proceso de precalentamiento de licor es importante mantener un adecuado control del nivel en el tanque de almacenamiento situado en la planta Lixiviación. Para esto se tiene en cuenta además la capacidad de licor disponible de la planta Neutralización y la que demanda la Planta Sulfuros, que garantice un determinado balance de flujo de licor.

Se toma como **situación problemática**:

La aparición de constantes averías en el proceso de precalentamiento de Licor, debido a que el lazo de control que relaciona el nivel del tanque de almacenamiento con el flujo de Licor proveniente de las bombas de succión de la planta Neutralización, está funcionando sin tener en cuenta un modelo matemático que relacione las variables de interés de dicho proceso.

El problema de la investigación lo constituye el desconocimiento de un modelo matemático que relacione las variables de interés del proceso de precalentamiento de licor.

Para resolver el problema planteado se traza como **objetivo de la investigación** obtener un modelo matemático del proceso mediante la aplicación de técnicas de identificación experimental, que permita determinar el ajuste óptimo de los parámetros del controlador.

Por este motivo, el **objeto de esta investigación** lo constituye la relación del nivel del tanque de almacenamiento con el flujo de licor que es suministrado por motores instalados en las bombas de succión.

Campo de la investigación: Modelación y Simulación de objetos electromecánicos.

Como **hipótesis** se plantea que si se logra obtener un modelo matemático que permita establecer los parámetros óptimos del controlador, se mejorará la operación de los accionadores instalados en las bombas de succión y a su vez reducirá el esfuerzo de control para mantener el adecuado nivel de Licor dentro del tanque de almacenamiento.

Las **tareas de la investigación** son las siguientes:

1. Caracterizar objetos vinculantes en el proceso de precalentamiento de licor de la empresa “Cmdte. Pedro Soto Alba”.
2. Fundamentar los métodos de identificación que se utilizaron para la obtención de los modelos matemáticos.
3. Obtener el modelo matemático por la vía experimental del proceso de precalentamiento de licor que más se aproxime al sistema real.
4. Proponer los valores óptimos de ajuste del controlador teniendo en cuenta los modelos matemáticos encontrados.

Métodos y técnicas empleados en la investigación:

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

Aporte de esta investigación: Obtención de un modelo matemático por la vía de la identificación experimental, que tenga presente la dinámica del proceso de precalentamiento de licor de la empresa niquelífera "Cmdte. Pedro Sotto Alba".

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 precalentamiento del Licor en la empresa "Cmdte. Pedro Sotto Alba". El estudio de las respuestas obtenidas a partir del modelo identificado, le dan la facilidad al personal de la empresa, de profundizar sus conocimientos acerca del proceso y le proporcionan una buena predicción de las variables 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.

Estructura del trabajo:

La presente investigación se encuentra organizada en dos capítulos:

Capítulo 1. Fundamentación Teórica: se realiza una caracterización histórica y conceptual de las técnicas de identificación y del proceso de reducción de níquel. La caracterización se ha realizado teniendo en cuenta los aspectos históricos y contextuales de la aplicación y desarrollo de los mismos.

Capítulo 2. Se describe el diseño de los experimentos que se realizan en el tanque, teniendo en cuenta ciertas características del proceso en cuestión. Se ofrece un análisis de los resultados de la identificación obtenidos y se presenta una valoración económica y medioambiental del proceso de precalentamiento de licor.

Capítulo

1

Caracterización del proceso de precalentamiento de licor producto 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 de precalentamiento de licor producto en la empresa “Cmte. Pedro Sotto Alba” de Moa.

1.1. Revisión bibliográfica sobre el proceso de reducción de níquel y su modelado.

Una investigación científica de acuerdo a lo planteado por Aróstegui, J. M. y otros en 1975 [4], en cualquier área del conocimiento debe siempre estar sustentada por una investigación empírica y por una investigación teórica, de ahí que sea necesario utilizar los métodos que caracterizan a cada una de ellas

para desarrollar científicamente las mismas a partir de una clara caracterización del objeto, del planteamiento del problema, el objetivo, la hipótesis y las tareas. Para desarrollar la investigación fueron consultados diferentes trabajos y estudios, orientando la revisión bibliográfica en dos líneas fundamentales; por una parte, la información relacionada con el enfoque teórico y metodológico del estudio a realizar y por otra, los trabajos que sobre el tema de la modelación matemática, la simulación y el control desde el punto de vista científico, técnico y práctico se han realizado para este tipo de proceso.

En lo que respecta al primer elemento anteriormente mencionado, resultó muy útil la revisión de varios trabajos sobre la modelación en la industria cubana; en los cuales se abordan las temáticas relacionadas con la teoría general del sistema y la metodología de las investigaciones del mismo. 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 artículo "Modelación y simulación del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso de Lixiviación Carbonato-Amóniacal con minerales lateríticos cubanos" de Guzmán del Río, D. 2000 [8] se realiza un análisis de las principales variables que intervienen en el proceso, obteniendo un modelo matemático dinámico para el tanque de contacto y los enfriadores de licor, expresando todas las dependencias dinámicas en ecuaciones diferenciales no lineales a parámetros concentrados, además de la simulación que valida toda la investigación con resultados óptimos del proyecto.

Muchos procesos tienen intrínseco un conjunto de accionadores: dígase motor, bomba, variador de velocidad y otros objetos que inciden en su eficiencia y su correcto control para elevar la productividad de los mismos. En el artículo

publicado en la revista Minería-Geología, No 2, 2000 con el título "Observador de velocidad para accionamientos de elevadas frecuencias en procesos de Lixiviación y Lavado" los autores Ing. Luis Rojas Purón, Dr. Secundino Marrero Ramírez, Profesor Ignacio Romero Rueda y el Instructor Cayetano Durán Abella [18], demostraron las facilidades que brinda la teoría del campo orientado, aplicada a observadores de velocidad en motores de inducción que accionan bombas de licor de reboso en el proceso de lixiviación de mineral laterítico, donde se realiza un control con técnica de diseño lineal.

El análisis de estos trabajos da una clara idea de la importancia de la evaluación de los sistemas con el fin de optimizar los procesos y elevar la eficiencia y calidad de la producción, teniendo en cuenta las nuevas tecnologías y las bondades que nos brindan en los tiempos actuales.

En el trabajo de Jeniffer Beatriz Leyes y Darío Rafael Navarrete, GUAYAQUIL – ECUADOR, 2007, [10] se realiza el control de nivel de un tanque orientada a la medición de una variable física, selección de un controlador, ajuste de sus parámetros, y uso de un actuador, donde entre otras conclusiones 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 de la determinación que un controlador del tipo PI se ajusta perfectamente a los requerimientos de funcionamiento de la planta en el punto de operación para el cual fue diseñado.

Según Acuña Oyarzún, 2006, [1] el control de nivel entre dos puntos, es una de las aplicaciones más comunes para controlar y medir nivel utilizando elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos.

En el **Manual de Operaciones** de la Planta "Lixiviación" de la empresa "Cmte. Pedro Sotto Alba" [14] se hace clara mención de las principales variables que

intervienen en el mismo, así como las características del proceso y flujo tecnológico de la planta que se tuvo en cuenta en el presente trabajo.

Según Fitt, A. D. en 1996 [6], muchos modelos matemáticos de procesos industriales pueden ser escritos como sistemas $n \times n$ de leyes de conservación en términos de n variables independientes; así mismo Eich-Soellner, E, Lony, P. B. Y Kroner, A. en 1997 [5], señalan que la modelación matemática es una herramienta indispensable en el diseño y operación de las plantas industriales. Estos artículos sirvieron para realizar un análisis del proceso desde el punto de vista fenomenológico con el fin de obtener un conocimiento previo antes de proceder a la identificación.

Tijonov, O. N. en 1978 [22], refiere que para componer las ecuaciones de un objeto en la industria metalúrgica, las cuales representan complejos sistemas dinámicos es necesario despreciar una serie de factores secundarios y sí tener en cuenta las principales variables de entrada, salida y perturbaciones que influyen en la dinámica del mismo; a la vez la sencillez del modelo conformado debe contener las principales peculiaridades del proceso investigado.

También se revisaron otros trabajos vinculados a la investigación que se irán comentado convenientemente en los epígrafes siguientes.

1.2. Características del tanque de almacenamiento de Licor Precalentado.

El tanque (Ver figura 1.1) está fabricado de acero al carbono, dispuesto verticalmente con un diámetro de 4.137 m de alto x 3.5 m de Diámetro (de ladrillo a ladrillo) con un sistema de flota para la operación. Recubierto interiormente con goma Neopreno de 1/8" de espesor y una hilada de ladrillos

antiácido de 4 ½” de espesor completamente. El reboso está ubicado a 3.260 m por encima de la succión.

El tanque (ver tabla 1.1 para conocer otros detalles del mismo) tiene una capacidad efectiva total de 38.902 m³, salidas de licor de 14” Ø, reboso de 12” Ø. Dicho tanque tiene la función de mantener la alimentación de licor producto que procede de la planta de Neutralización caliente (82 °C) a las bombas de licor PU-16-B/C para la planta de Sulfuros.

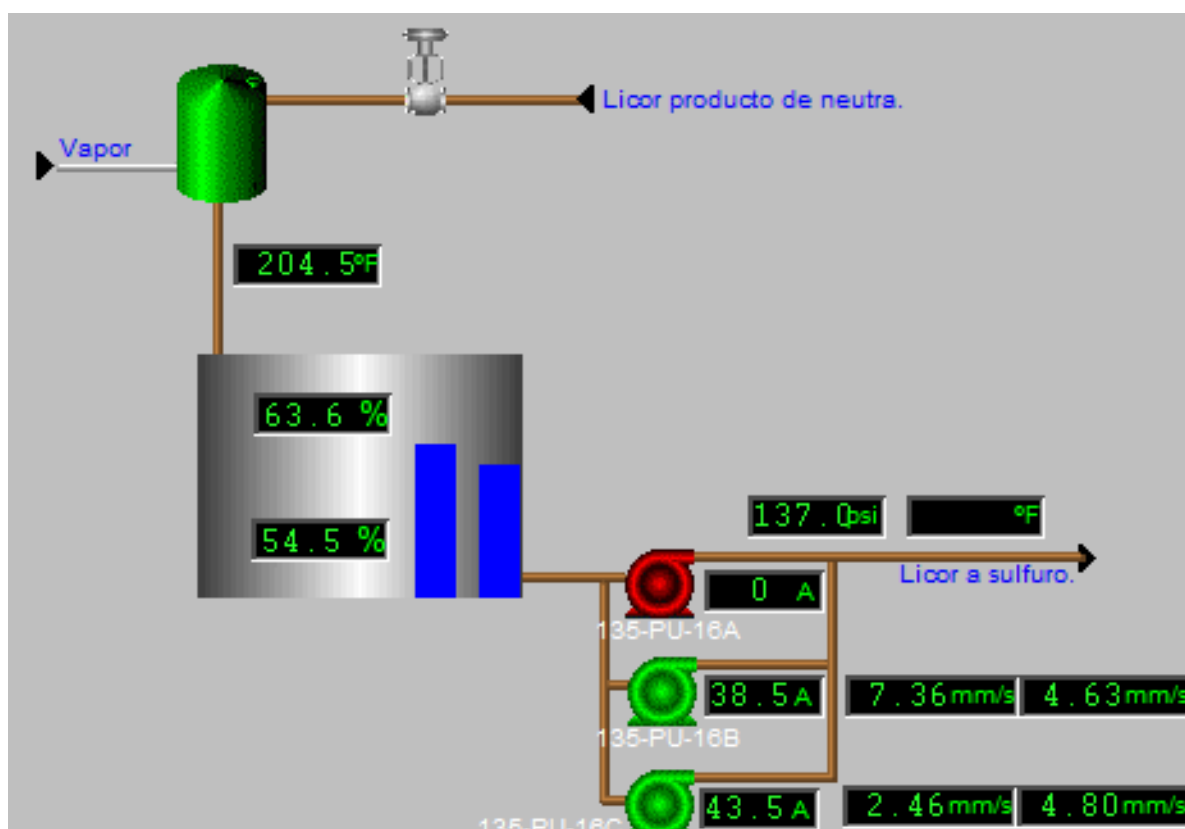


Figura 1.1. Tanque de Almacenamiento de Licor.

Tabla 1.1. Otros parámetros del tanque.

Especificación	135-TK-6	
Fluido	Licor producto precalentado	
Capacidad	9145.6 gal	34.60 m ³
Diámetro interior	2.262 m	10 ft 2 inch

1.3. Factores que influyen en el precalentamiento de licor.

Como resultado de la operación en el complejo de plantas: Neutralización-Lixiviación-Sulfuros se demostró la influencia significativa en la eficiencia, de los siguientes factores:

- La temperatura de 88-90 °C lograda por el vapor de 0 lb/pulg² producido en la planta Lixiviación que entra en el precalentador.
- El equilibrio entre el flujo de licor proveniente desde el tanque de Licor en la planta Neutralización y el flujo succionado por las bombas hacia la planta Sulfuros.
- La presión hacia Sulfuros debe oscilar entre 135 y 140 lb/pulg² para bombear un flujo de 3300 gpm, dicho bombeo es proporcional al de Neutralización, de esta forma se logra mantener el nivel del tanque que abastece a 4 trenes de 1200 gal instalados en dicha planta.

1.4. Descripción del esquema tecnológico del proceso de precalentamiento de licor producto.

Para garantizar una buena lixiviación, es necesario obtener una mezcla entre pulpa y ácido, esto se alcanza mediante la inyección de vapor de 650 Lb/pulg² a través de tubos centrales de agitación y por su parte inferior. Al llegar a la parte superior del reactor, el vapor se separa de la pulpa y a través del tubo de vapor de exceso pasa al calentador, donde se utiliza para su calentamiento.

Luego la pulpa lixiviada fluye por gravedad, del reactor “D” a dos enfriadores por tren, en los enfriadores se reduce la temperatura de la pulpa hasta 130°C (266°F). Al pasar la misma por dentro de la calandria, esta cede su calor al agua que rodea a los tubos, produciéndose de esta manera vapor de 15 Lb/pulg² el que se emplea para precalentar la pulpa a lixiviar y para calentar el licor producto de neutralización a la planta de sulfuros.

La pulpa una vez despresurizada y depositada en tanques, pasa a la caja distribuidora, donde la misma puede ser desviada a cualquiera de las dos líneas de transferencia y por ellas a la sección de lavaderos.

El vapor de 0 Lb/pulg² obtenido durante la despresurización, pasa a los tanques separadores, en los cuales son eliminadas las partículas de pulpa que pueda haber arrastrado el vapor. Este vapor se utiliza para precalentar el licor producto que se envía a un tanque de almacenaje y de aquí es bombeado a la planta de precipitación de sulfuros.

1.4.1. Estado actual del Control y la automatización del proceso de precalentamiento de Licor.

En el complejo de plantas: Neutralización-Lixiviación-Sulfuros de la Empresa se encuentra instalado un Sistema de Supervisión y Control (Citect), en la figura 1.2 se puede observar detalles del mismo.

Existe un PLC S7-300, que es el encargado de recepcionar todas las señales de las diferentes variables del proceso. La medición de nivel de licor en el tanque se realiza a través de un Transmisor de Nivel, que opera una Flota FIELDVUE DLC3010, haciendo girar el eje del tubo de torsión, este movimiento de rotación se convierte a una señal de corriente que es enviada al Controlador Indicador de Nivel. Esta señal se compara con el valor de referencia del Controlador, y se manipula el flujo de licor por medio de variadores de velocidad instalados en los motores que operan las bombas de succión para mantener el nivel adecuado.

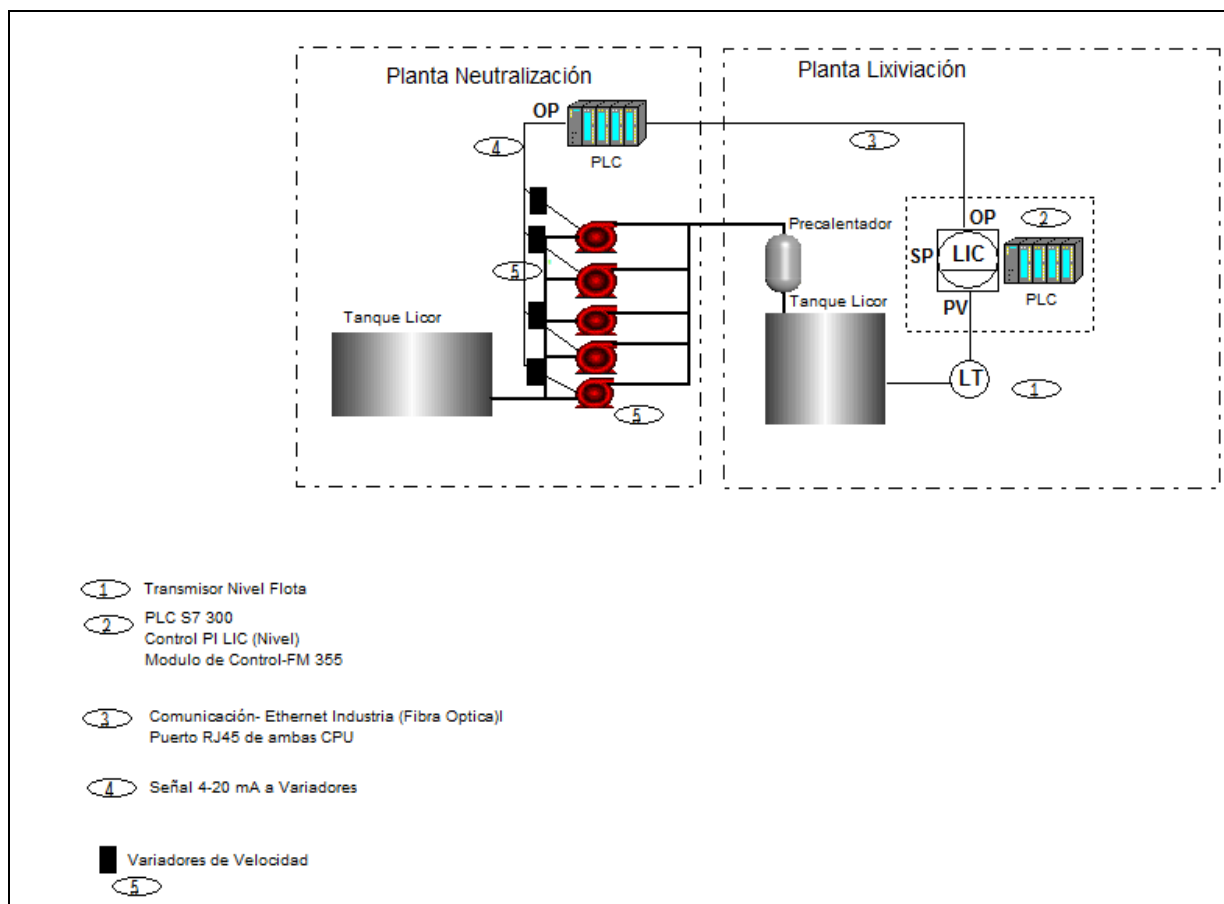


Figura 1.3. Sistema de Supervisión del proceso de precalentamiento de Licor.

1.4.2. Instrumentación existente en el proceso precalentamiento de Licor.

A continuación se describe la instrumentación vinculada al proceso de precalentamiento. En los anexos se ofrecen otros detalles y especificaciones de estos instrumentos:

➤ **Nivel de flota FIELDVUE DLC3010**

Los transmisores de la serie DLC3000 se usan para medir el nivel de líquido, con sensores de nivel de flota. Los cambios en el nivel o la gravedad específica ejercen una fuerza de empuje sobre la flota, que hace girar el eje del tubo de torsión. Este movimiento de rotación se aplica al controlador de nivel, y la señal de salida de corriente resultante se envía a un elemento de indicación o de control final.

➤ **Variador de Velocidad YASKAWA F7**

En la planta Neutralización se encuentran instalados tres variadores de velocidad. 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, etc. 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.

A continuación mostramos el esquema de conexión de los Variadores de Velocidad.

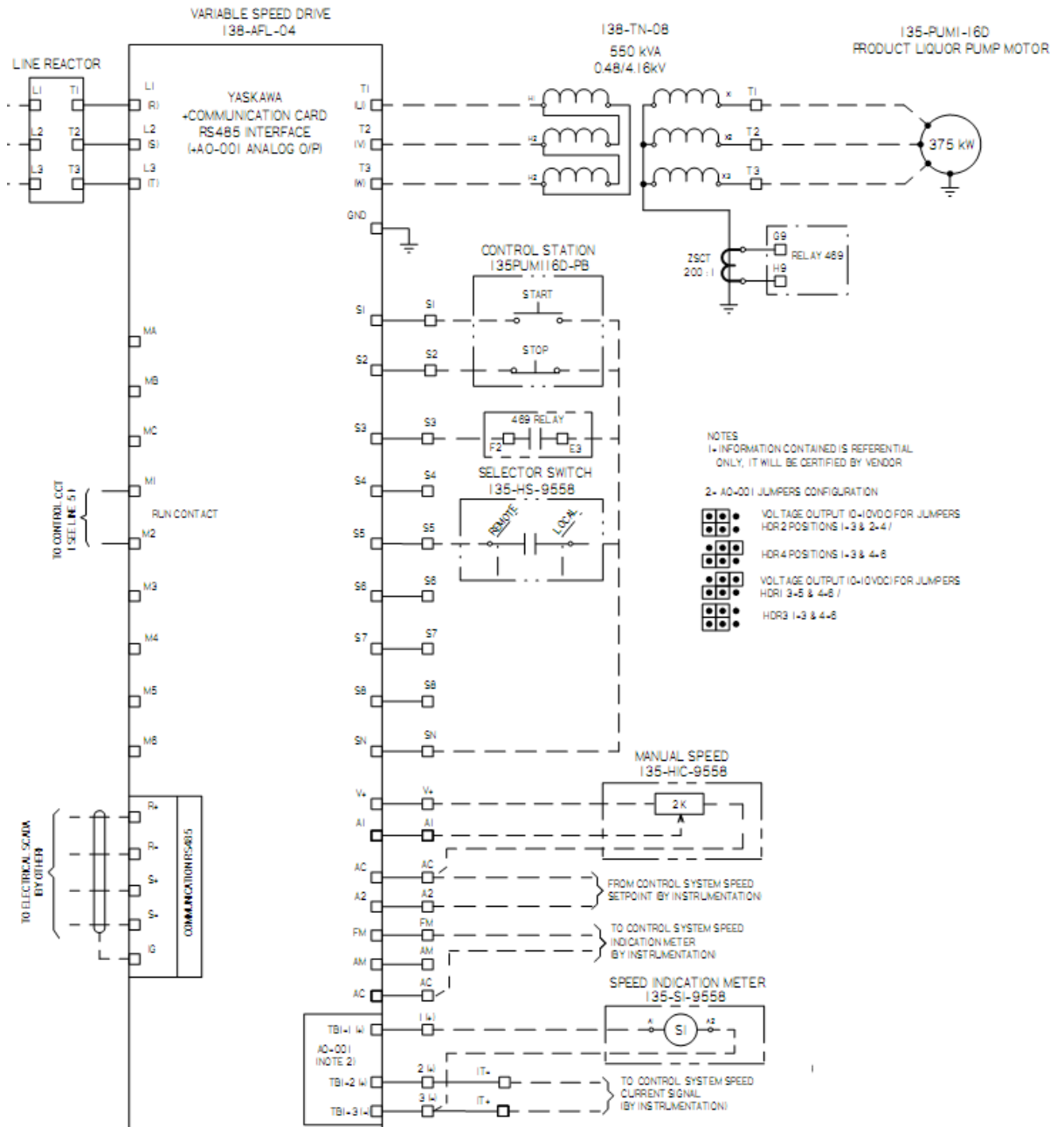


Figura 1.3 Esquema de con esquema de conexión de los VFD.

➤ **Propiedades Siemens PLC S7 300 CPU 317**

La CPU con gran memoria de programa y capacidad de sobra para requisitos exigentes.

- Para tareas de automatización en la construcción de máquinas de la serie, máquinas especiales y plantas.
- Aplicable como control central en líneas de producción con periferia centralizada y distribuida E / S.
- Elevado rendimiento de procesamiento en aritmética binaria y de coma flotante.
- Interfaz PROFIBUS DP maestro / esclavo.
- Para extensas configuraciones de E / S.
- Para la creación de estructuras de E / S distribuidas.
- Diagnóstico Integral sistema integrado.
- Soporta muy bien la inserción de las herramientas de ingeniería SIMATIC.

1.4.3. Regulación de flujo mediante un Sistema Variador de Velocidad – Bomba.

El sistema centrífugo presenta infinidad de ventajas con respecto a los otros tipos de bombeo; aseguran un tamaño reducido, un servicio relativamente silencioso y un fácil accionamiento con todos los tipos de motores eléctricos que se encuentran en plaza. Además presenta una fácil adaptación a todos los problemas del tratamiento de líquidos ya que, por medio de adaptaciones a las determinadas condiciones de uso, son capaces de responder a las exigencias de las instalaciones destinadas.

La característica principal de la bomba centrífuga es la de convertir la energía de una fuente de movimiento, el motor, primero en velocidad o energía cinética y después en energía de presión. El rol de una bomba es el aporte de energía al líquido bombeado, según las características constructivas de la bomba misma y

en relación con las necesidades específicas de la instalación. El funcionamiento es simple; dichas bombas usan el efecto centrífugo para mover el líquido y aumentar su presión. La velocidad del motor asincrónico depende de la forma constructiva del motor y de la frecuencia de alimentación. Como la frecuencia de alimentación que entregan tanto el SEN como la planta Termoeléctrica de dicha empresa es constante, la velocidad de los motores asincrónicos es constante, salvo que se varíe el número de polos, el resbalamiento o la frecuencia. El método más eficiente de controlar la velocidad de un motor eléctrico es por medio de un variador electrónico de frecuencia. No se requieren motores especiales, son mucho más eficientes y tienen precios cada vez más competitivos.

A continuación se ofrecen las características de los motores que operan las bombas de los conjuntos de plantas:

Tabla 1.2 Neutralización-Lixiviación:

Nro	Equipos	Voltaje	Fase	KW	HP	Corriente	Velocidad	Ciclo
1	174-PU-4B	460	3	40	50	66.5	1765	60
2	174-PU-4D	460	3	40	50	66.5	1765	60
3	174-PU-4E	460	3	40	50	66.5	1765	60

Tabla 1.3 Lixiviación-Sulfuros:

Nro	Equipos	Voltaje	Fase	KW	HP	Corriente	Velocidad	Ciclo
1	135-PU-16B	460	3	320	430	57	1792	60
2	135-PU-16C	460	3	320	430	57	1792	60

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 [3].
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 [3].

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 [13].

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 [19].

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" [23].

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 [24].

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 industriales. 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 [24].

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 [9].

1.5.1. Proceso de identificación.

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

1. *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.
2. 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.
3. *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.

4. *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.
5. *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 1.4 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 [9], la cual fue descrita anteriormente:

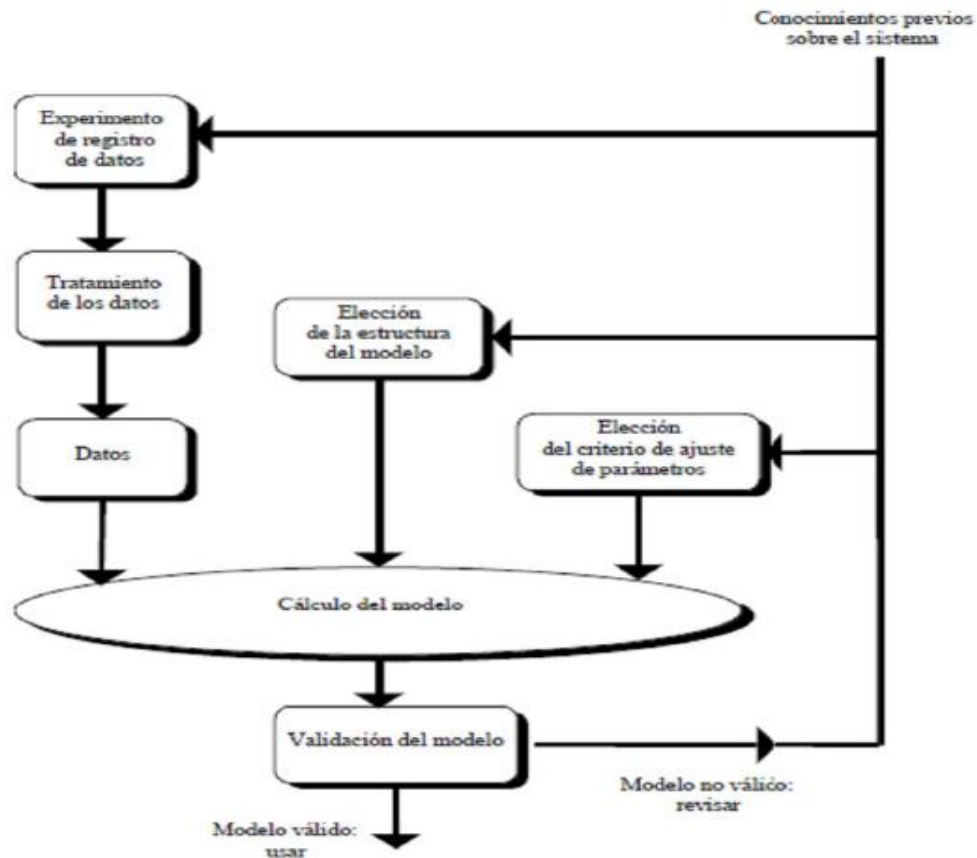


Figura 1.4. Esquema del proceso de identificación experimental.

1.5.2. Métodos de identificación.

Existen diversos métodos de identificación, que pueden clasificarse según distintos criterios [11]:

➤ **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 [11].

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 [20].

Considerando un modelo genérico:

$$G(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}} * z^{-d} \quad (1.7)$$

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

$$\hat{y} = (k+1) \quad (1.8)$$

será:

$$\hat{y} = (k+1) = x_{k+1}^t \theta \quad (1.9)$$

Donde:

$$\theta = [a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m] \quad (1.10)$$

$$x_{k+1} = [-y(k), -y(k-1), \dots, -y(k-n+1), u(k+1-d), u(k-d), \dots, u(k-m+1-d)] \quad (1.11)$$

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

$$e(k+1) = y(k+1) - \hat{y}(k+1) \quad (1.12)$$

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

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

(1.13)

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 .

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

(1.14)

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

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

(1.15)

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 provocarán una excitación

permanente y hacen que dicha matriz no tenga inversa, lo cual hace impracticable la identificación [20].

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.

1.5.3. Modelo lineal general.

Un modelo lineal general de un sistema puede ser descrito simbólicamente según la figura 1.5.

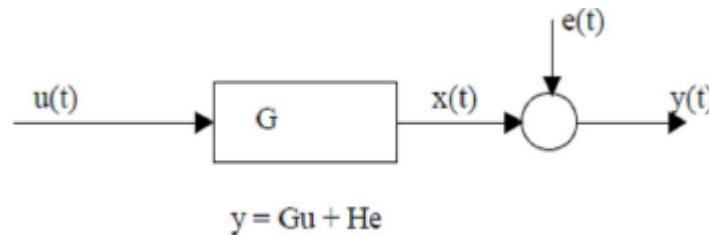


Figura 1.5. Esquema de un modelo lineal.

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 [4].

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

$$A(q)y(t) = \left[\frac{B(q)}{F(q)} \right] u(t) \pm \left[\frac{C(q)}{D(q)} \right] e(t) \quad (1.16)$$

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

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na} \quad (1.17)$$

$$B(q) = 1 + b_1 q^{-1} + \dots + b_{nb} q^{-nb} \quad (1.18)$$

$$C(q) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{nc} q^{-nc} \quad (1.19)$$

$$D(q) = 1 + d_1 q^{-1} + \dots + d_{nd} q^{-nd} \quad (1.20)$$

$$F(q) = 1 + f_1 q^{-1} + \dots + f_{nf} q^{-nf} \quad (1.21)$$

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 $nb=nc=nd=0$ 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 $na=0$.

1.5.4. Identificación de sistemas utilizando el software MATLAB.

El software profesional MATLAB [26] 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 precalentamiento de licor de la empresa “Cmte. Pedro Sotto Alba” del municipio Moa. También se trató la identificación de sistemas, describiéndose en breve síntesis las técnicas y métodos más empleados.

Capítulo

2

Identificación experimental del proceso de licor precalentado.

En el presente capítulo se describen los experimentos que se realizaron manipulando el flujo de licor a través de los variadores de velocidad instalados en las bombas de succión de la planta Neutralización para mantener un flujo de licor óptimo en el tanque de la planta Lixiviación, donde se precalienta el mismo para enviarlo a la planta Sulfuros. 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 presente en lazo de control cerrado.

2.1. Variables presentes en el proceso de precalentamiento de licor dentro del tanque.

A continuación se ofrecerán 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 licor mediante los variadores de velocidad (L_p). La variable a controlar (controlada o de salida) es el nivel del tanque de licor precalentado (N_t). Estas variables se pueden observar en la figura a):

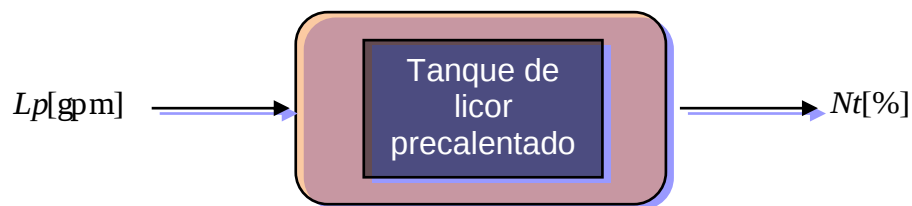


Figura 2.1 Variables consideradas en el proceso.

2.2. Diseño del Experimento de Identificación a escala industrial.

El diseño de un experimento de identificación incluye diversas variantes, tales como: ¿Cuáles señales medir?, ¿Cuándo medir?, ¿Cuáles señales manipular? y ¿Cómo manipular? Se debe considerar también como condicionar las señales una vez muestreadas, como (eventualmente) refinar los datos obtenidos, por ejemplo, removiendo tendencias.

Un punto crucial en el diseño de un experimento es que el procesamiento de los datos es realizado fuera de línea (off line) en una computadora, los datos experimentales solamente pueden ser alterados a través de un nuevo experimento que normalmente es consumidor de tiempo. Por tanto es recomendable proyectar el experimento cuidadosamente de forma tal que al generar los datos estos sean lo suficientemente informativos. Los experimentos

deben ser realizados cuando el proceso está en un modo de operación próximo al deseado.

En muchos casos, experimentos preliminares deben ser realizados para alcanzar el conocimiento del proceso que es necesario para proyectar experimentos apropiados. En estos casos, es preferible usar el análisis de la respuesta al paso escalón o entonces el análisis de correlación de datos de un experimento debido a lo sencillo de esos métodos. Los experimentos preliminares deberán indicar:

- ✓ constantes de tiempo mayoritarias;
- ✓ amplitud permitida de la entrada;
- ✓ presencia de no –linealidades y variación temporal del proceso;
- ✓ niveles de ruido; y
- ✓ retrasos puros.

Esas informaciones pueden entonces ser usadas para el proyecto de experimentos de identificación. El proyecto de un experimento debe considerar los siguientes tópicos:

- ✓ selección de las variables de entrada y salida;
- ✓ señal de entrada (forma, amplitud, espectro);
- ✓ tasa de muestreo;
- ✓ duración del experimento
- ✓ identificación en lazo abierto o cerrado.

Si el proceso a ser identificado es no-lineal y se busca un modelo lineal para representarlo, entonces el experimento debe ser realizado en torno al punto nominal de operación de la planta.

El rango de operación que el modelo debe cubrir determina en parte, la amplitud permitida de la señal de entrada y la selección de la estructura del modelo. Un modelo lineal que pueda ser usado para el control regulatorio estacionario en torno de un dado valor de referencia, requiere un experimento con una amplitud

de entrada baja, lo suficiente para que la linealización no sea violada. Algunas veces la validación indica que el modelo obtenido no es lo suficientemente preciso. Eso puede ocurrir, por ejemplo:

- ✓ amplitud insuficiente de la entrada;
- ✓ señal de entrada no es persistentemente excitante;
- ✓ estructura del modelo no-identificable; y
- ✓ duración del experimento muy corta.

En este caso, un nuevo experimento es la única forma de obtener un modelo más preciso.

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 el tanto la alimentación de la planta de Neutra como la demanda de la planta Sulfuros 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 5 segundos debido a que se están tomando mediciones de parámetros que varían rápidamente en el tiempo.
6. La instrumentación a emplear posee condiciones óptimas (se garantiza el mantenimiento a los sensores y elementos de acción final antes del inicio de los experimentos).

2.3. Identificación experimental de los casos de estudio.

Se realizaron varios experimentos aplicando de forma manual secuencias de escalones positivos y negativos al flujo de licor de entrada al tanque 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 [26], el cual contiene herramientas para la obtención de modelos matemáticos de sistemas dinámicos basados en los datos entrada-salida observados.

2.3.1. Variación del flujo de licor (Exp # 1).

Durante el experimento se tomaron 132 datos correspondientes a las variables N_t y L_p con un período de muestreo de 5.0 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 Neutra, experimentaron una variación de 65 a 85 % de su recorrido total. En la figura a) se pueden observar las mediciones de las variables de entrada y de salida.

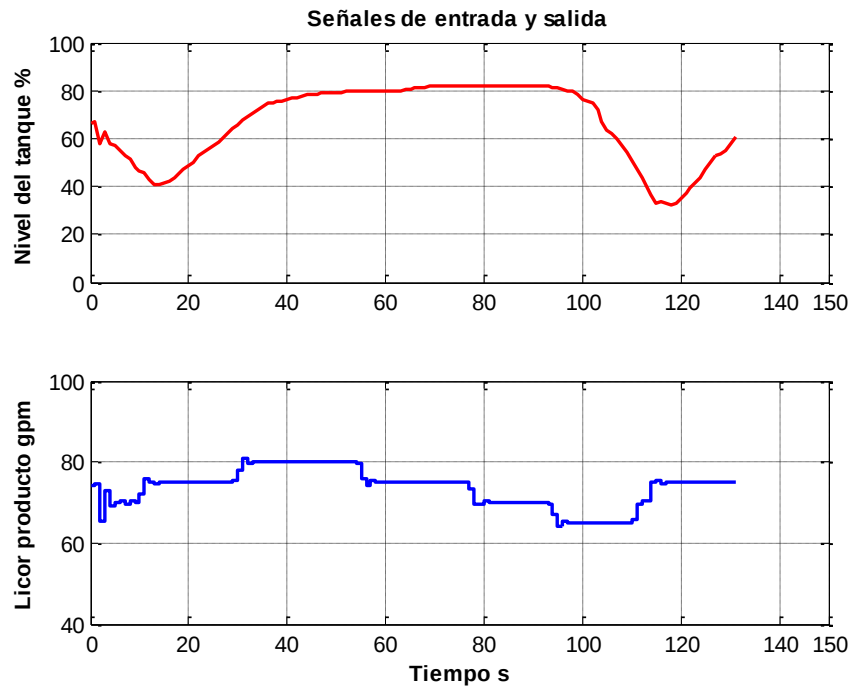


Figura 2.1 Datos de entrada salida experimento # 1.

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 el **bj22221** con un ajuste de 62.75 %, el cual es un modelo de orden 4.

A continuación puede apreciarse el modelo discreto obtenido

$$B(q) = -0.5107 \times q^{-1} + 0.5732 \times q^{-2} \quad (2.1)$$

$$C(q) = 1 - 0.6426 \times q^{-1} - 0.06536 \times q^{-2} \quad (2.2)$$

$$D(q) = 1 - 1.944 \times q^{-1} + 0.9568 \times q^{-2} \quad (2.3)$$

$$F(q) = 1 - 1.436 \times q^{-1} + 0.4306 \times q^{-2} \quad (2.4)$$

A continuación se representa el modelo continuo equivalente, obtenido mediante el comando **d2c**.

$$B(s) = -0.8073s + 0.09241 \quad (2.5)$$

$$C(s) = s^2 + 1.233s + 0.2988 \quad (2.6)$$

$$D(s) = s^2 + 0.04417s + 0.01317 \quad (2.7)$$

$$F(s) = s^2 + 0.8425s - 0.008442 \quad (2.8)$$

Finalmente la función de transferencia queda:

$$G(s) = \frac{Nt(s)}{Lp(s)} = \frac{-0.8073s^3 + 0.05676s^2 - 0.006551s + 0.001217}{s^4 + 0.8866s^3 + 0.04194s^2 + 0.01072s - 0.0001112} \quad (2.9)$$

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 b), donde se observa que la salida del modelo se aproxima bastante a la real.

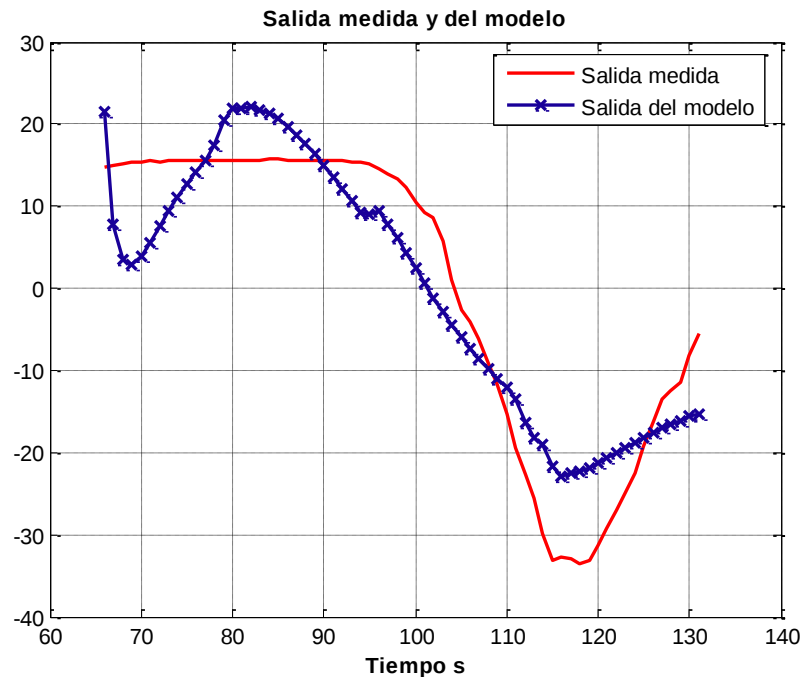


Figura 2.2 Salida del modelo y salida del sistema.

En la figura c); se muestran los residuos, donde se puede observar que la función de correlación se encuentra dentro de los niveles de confianza y, a continuación, aparece la función de correlación cruzada entre los residuos y la entrada en la cual se puede apreciar que no sale de los intervalos de confiabilidad, por lo tanto es aceptable.

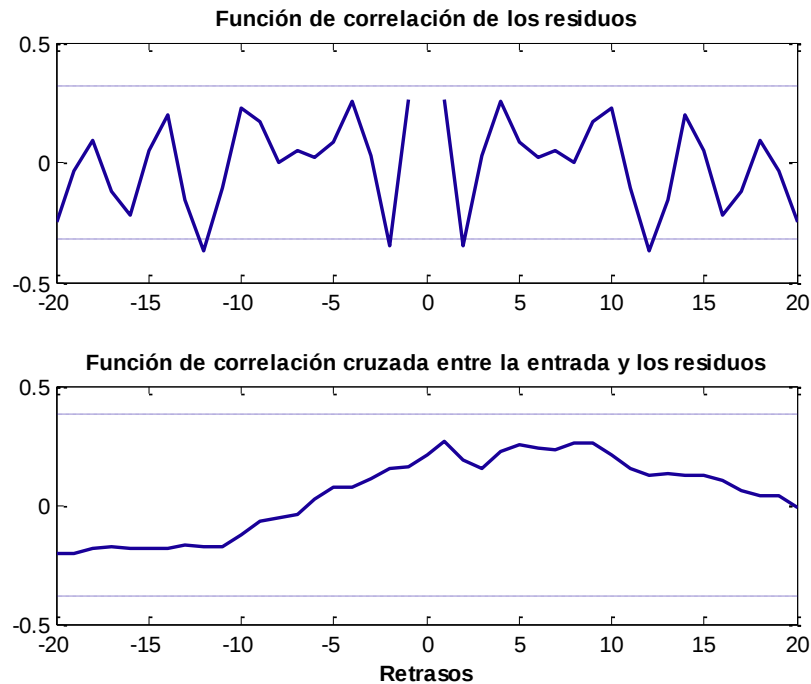


Figura 2.3 Residuos.

2.3.2. Modelo matemático para N_t frente a los cambios en L_p (Exp # 2).

En este experimento se registraron 132 datos correspondientes a las variables N_t y L_p con un período de muestreo de 5.0 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 Neutra, experimentaron una variación de 73 a 95 % de su recorrido total. En la figura d) se pueden observar las mediciones de las variables de entrada y de salida.

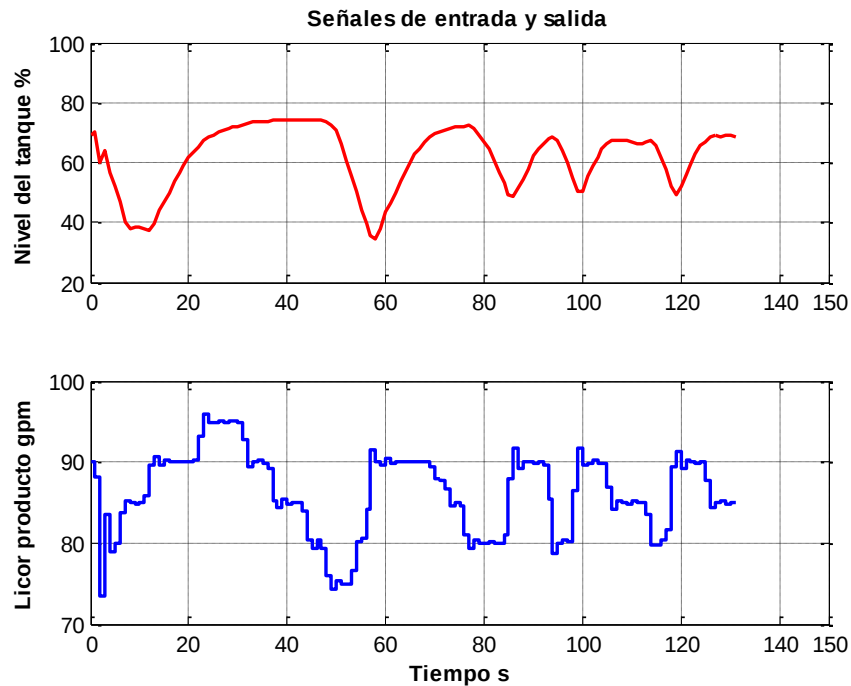


Figura 2.4 Datos de entrada salida experimento # 2.

Con estos datos también se hizo un pre-procesamiento antes de proceder a la estimación y se obtuvo como mejor modelo el **arx 441** con un ajuste de 48.75 %, el cual es un modelo de orden 4.

A continuación puede apreciarse el modelo discreto obtenido

$$A(q) = 1 - 1.688 \times q^{-1} + 0.6656 \times q^{-2} - 0.01027 \times q^{-3} + 0.06006 \times q^{-4} \quad (2.10)$$

$$B(q) = -0.1747 \times q^{-1} + 0.5899 \times q^{-2} - 0.2223 \times q^{-3} - 0.1224 \times q^{-4} \quad (2.11)$$

A continuación se representa el modelo continuo equivalente, obtenido mediante el comando **d2c**.

$$A(s) = s^4 + 2.812s^3 + 5.584s^2 + 0.8954s + 0.124 \quad (2.12)$$

$$B(s) = -0.016s^3 - 1.793s^2 + 1.42s + 0.3247 \quad (2.13)$$

$$C(s) = s^4 + 4.209s^3 + 10.17s^2 + 10.24s + 4.6 \quad (2.14)$$

Finalmente la función de transferencia queda:

$$H(s) = \frac{Ns(s)}{Lp(s)} = \frac{-0.016s^3 - 1.793s^2 - 1.42s + 0.3247}{s^4 + 2.812s^3 + 5.584s^2 + 0.8954s + 0.124} \quad (2.15)$$

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 e), donde se observa que la salida del modelo se aproxima bastante a la real.

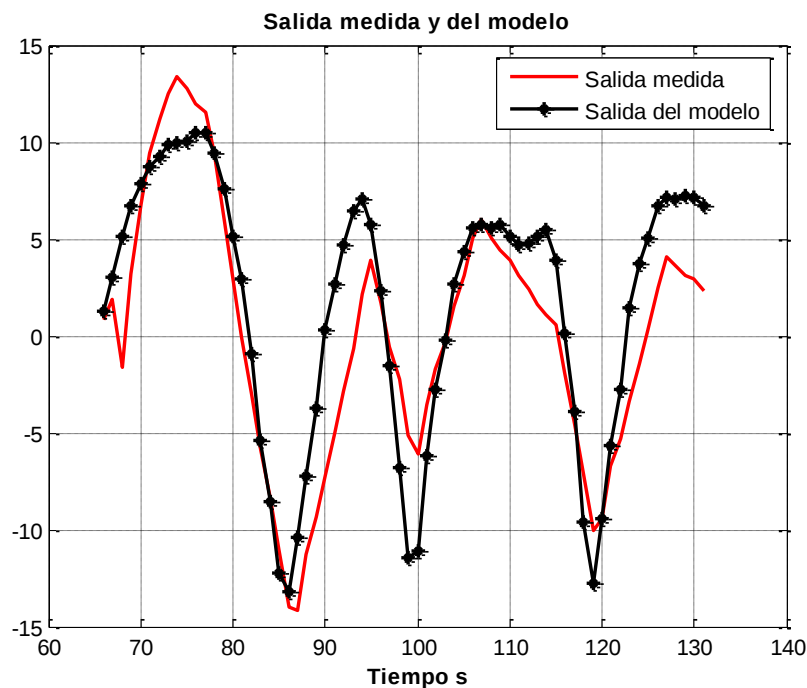


Figura 2.5 Salida del modelo y salida del sistema.

En la figura f) se muestran los residuos, donde se puede observar que la función de correlación se encuentra dentro de los niveles de confianza y, a continuación, aparece la función de correlación cruzada entre los residuos y la

entrada en la cual se puede apreciar que no sale de los intervalos de confiabilidad, por lo tanto es aceptable.

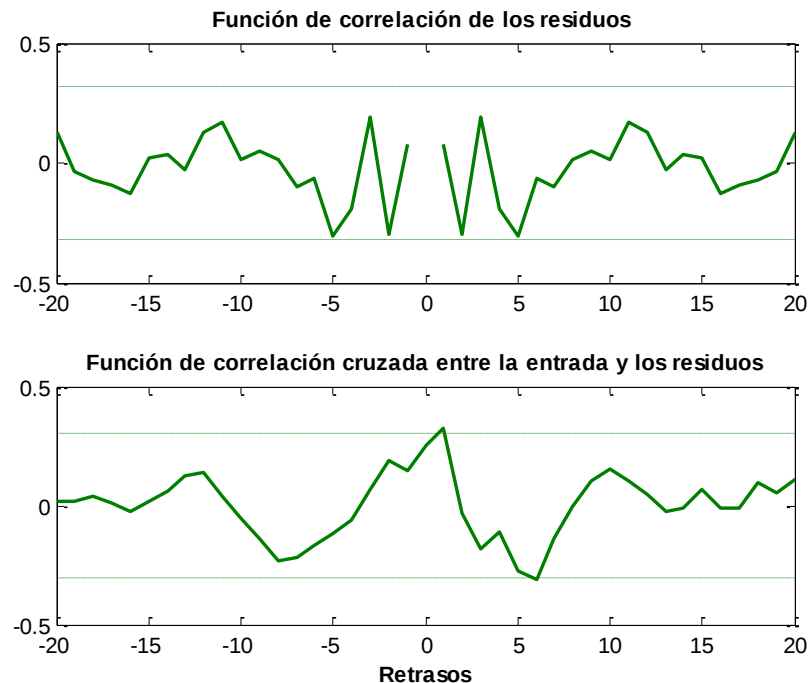


Figura 2.6 Residuos.

2.3.3. Modelo matemático para N_t frente a los cambios en L_p (Exp # 3).

En este experimento se analizaron 132 datos correspondientes a las variables N_t y L_p con un período de muestreo de 5.0 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 Neutra, experimentaron una variación de 37 a 70% de su recorrido total. En la figura g) se pueden observar las mediciones de las variables de entrada y de salida.

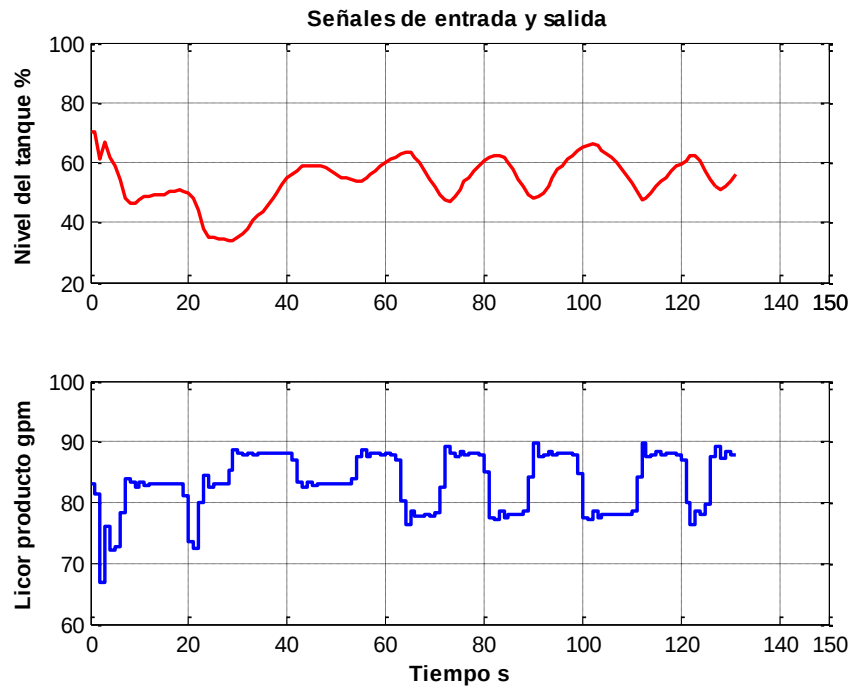


Figura 2.7 Datos de entrada-salida del experimento #3.

Luego de un pre-procesamiento de los datos se obtuvo como mejor modelo el **bj22221** con un ajuste de 56.37%, el cual es un **modelo de orden 4**.

A continuación puede apreciarse el modelo discreto obtenido

$$B(q) = -0.03511 \times q^{-1} + 0.35 \times q^{-2} \quad (2.16)$$

$$C(q) = 1 + 0.9052 \times q^{-1} + 0.09214 \times q^{-2} \quad (2.17)$$

$$D(q) = 1 - 0.5816 \times q^{-1} - 0.4334 \times q^{-2} \quad (2.18)$$

$$F(q) = 1 - 1.181 \times q^{-1} + 0.1903 \times q^{-2} \quad (2.19)$$

(2.4)

A continuación se representa el modelo continuo equivalente, obtenido mediante el comando **d2c**.

$$B(s) = -0.4814s + 0.6461 \quad (2.20)$$

$$C(s) = s^2 + 2.284s + 1.177 \quad (2.21)$$

$$D(s) = s^2 + 0.836s - 0.008856 \quad (2.22)$$

$$F(s) = s^2 + 1.659s + 0.0196 \quad (2.23)$$

Finalmente la función de transferencia queda:

$$H(s) = \frac{Ns(s)}{Lp(s)} = \frac{-0.4814s^3 + 0.2437s^2 + 0.5444s - 0.005722}{s^4 + 2.495s^3 + 1.398s^2 + 0.001697s - 0.0001736} \quad (2.24)$$

En este experimento se procedió de forma similar, en la figura h) se muestra la comparación de la salida del modelo con la salida real, donde se observa también una buena aproximación entre ambas.

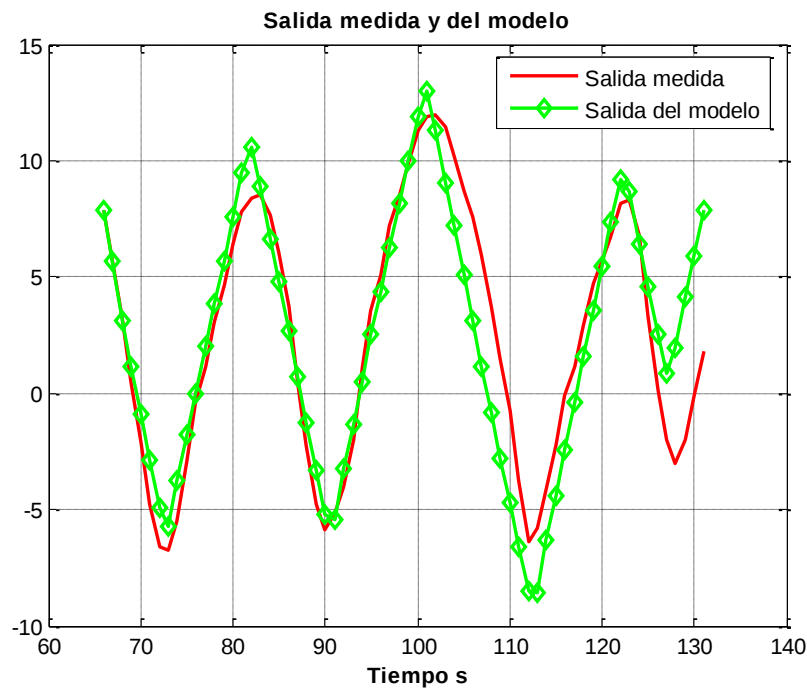


Figura 2.8 Salida del modelo y salida del sistema.

En la figura i) se muestra el análisis de los residuos, y se puede observar que la función de correlación se encuentra dentro de los niveles de confianza, por lo

tanto es confiable, a continuación, aparece la función de correlación cruzada entre los residuos y la entrada la cual es aceptable, pues se encuentra dentro de los intervalos de confiabilidad

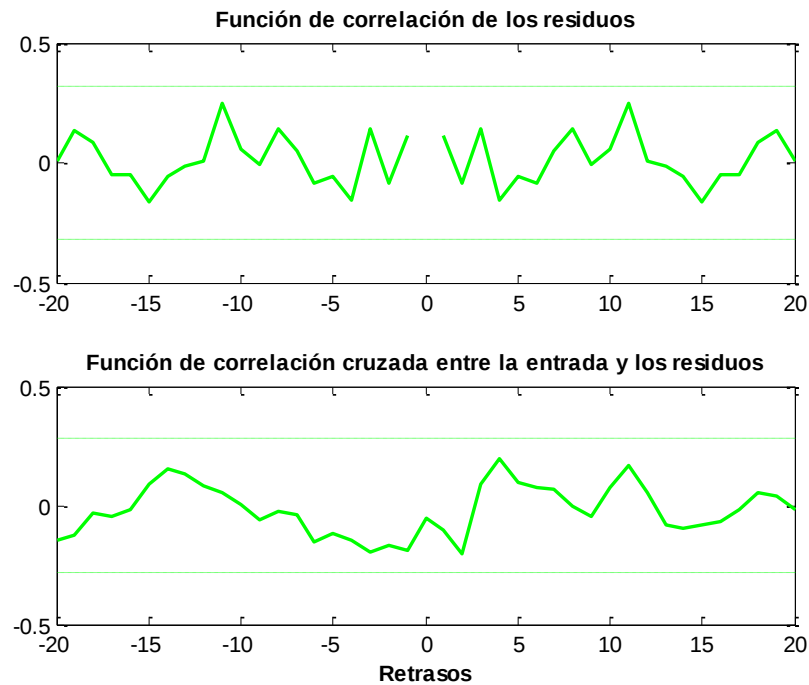


Figura 2.9 Residuos.

2.4. Ajuste de los controladores

Una vez determinados los modelos matemáticos para cada uno de los experimentos, se procedió a buscar la mejor sintonía de los controladores en lazo cerrado. Para esto se utilizó la interfaz gráfica PID Tuner invocada mediante el comando pidtool desde la ventana Command Windows del MATLAB.

Para la simulación se tuvo en cuenta una comparación entre diferentes configuraciones de los controladores adaptados al lazo de control de nivel del tanque (lazo cerrado con el modelo matemático de la planta sin controlador y , lazos cerrados con el modelo matemático de la planta y controladores tipo PI y P), que permitieran seleccionar la configuración más óptima.

A continuación se ofrecen la simulación para el primer experimento

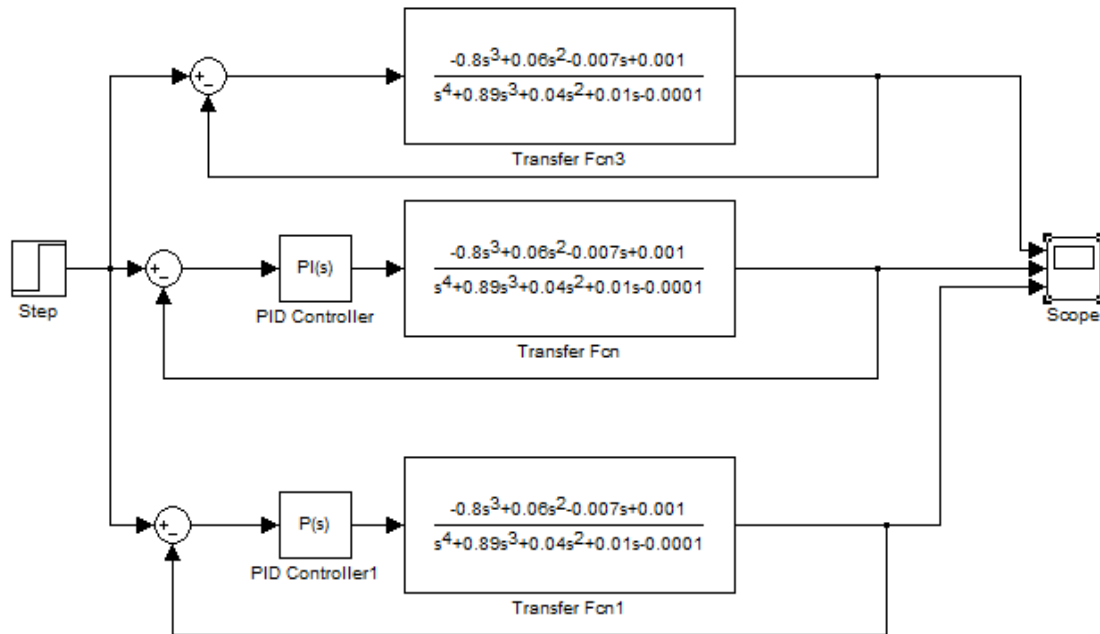


Figura 2.10 Simulación en el Simulink

Como se ve en la gráfica (la de abajo), el comportamiento del modelo matemático en lazo cerrado es oscilatorio y seguidamente, tanto para el controlador P como para el PI se puede apreciar el comportamiento estable de la salida. Para el caso del PID, la salida del sistema resultó ser inestable. Finalmente se concluye que la mejor configuración es utilizar un controlador PI con los siguientes parámetros: $K_c=0.33145$, $T_i=0.0001824$

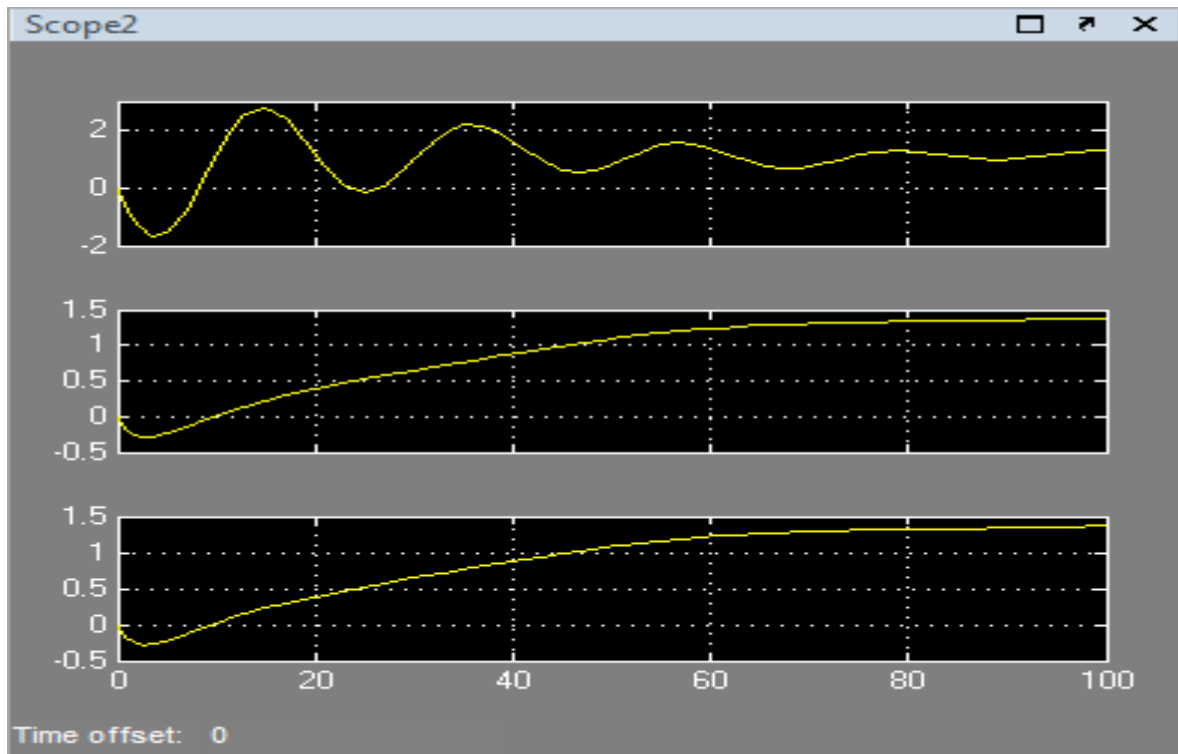


Figura 2.11 Respuesta del sistema para diferentes configuraciones del lazo de control cerrado.

2.5. Valoración Económica y medioambiental.

Como efecto económico de este trabajo planteamos que los modelos matemáticos obtenidos y el ajuste óptimo de los parámetros del controlador posibilitarán optimizar el control del nivel en el tanque de almacenamiento.

Una vez implementados estos resultados, se logrará operar de una forma más eficiente los objetos vinculantes en el complejo de plantas: Neutra-Lixiviación-Sulfuros y por consiguiente se podrán reducir las averías (desbordamientos del tanque, ocasionando derramamiento de licor al medio) en el proceso de precalentamiento.

Es importante decir que los modelos obtenidos permitirán al personal de Automática la ampliación de sus conocimientos sobre el proceso.

Conclusiones.

En este capítulo se describieron los experimentos realizados para determinar los modelos de comportamiento del nivel de licor 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 Bj y ARX. También se propusieron los valores óptimos para el controlador que rige el lazo de control de nivel de licor.

Conclusiones generales.

- Se caracterizó el proceso de precalentamiento de Licor 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 Licor manipulado por los variadores de velocidad de los motores instalados en las bombas de succión de la planta Neutralización.
- Se realizó la validación de los modelos matemáticos obtenidos Box-jenkin 22221, los cuales brindaron ajustes de 62% y además se apreció un comportamiento aceptable de los residuos.
- Se propusieron los valores del controlador que mejor simularon el comportamiento estable de los modelos matemáticos encontrados.

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 Licor al proceso de precalentamiento en aras de optimizar la identificación experimental.

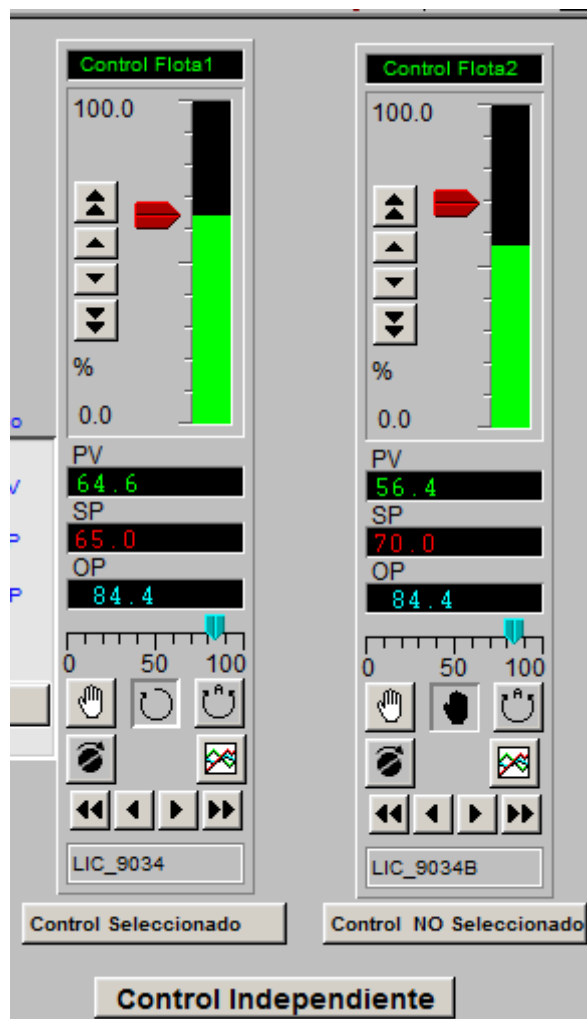
Bibliografía

- [1] Acuña Oyarzún, CD. “Implementación de un sistema de control de nivel para el suministro de petróleo de Grupos Electrónicos”. Universidad de Magallanes, 2006 .
- [1] Aguado, A.: "Temas de Identificación y Control Adaptable". Instituto de Cibernética, Matemática y Física, La Habana, Cuba, 2000.
- [3] Arafet, P. y otros.: Monografía sobre identificación de sistemas. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba, 2004.
- [4] Aróstegui, J. M. y otros.: Metodología del Conocimiento Científico. La Habana: Editorial de Ciencias Sociales, 1978. 445 p.
- [5] CAPITULO1: Eich-Soellner, E., Lony, P. B., Kroner, A.: Stationary and Dynamic Flowsheeting in the Chemical Engineering Industry. Industrial Mathematics Institute Johannes Kepler Universitat. Vol. 7, Nro. 1, 1997.
- [6] Fitt, A. D.: Mixed Systems of Conservation Laws in Industrial Mathematical Modelling. Industrial Mathematics Institute Johannes Kepler Universitat. Vol. 6, Nro. 1, 1996.
- [7] Garrido, S.: *Identificación, Estimación y Control de Sistemas No-lineales* mediante RGO. Tesis doctoral. Madrid, España: UNIVERSIDAD CARLOS III DEMADRID, 1999.
- [8] Guzmán del Río, D. “Modelación y simulación del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso de Lixiviación Carbonato-Amoniacal con minerales lateríticos cubanos”. Revista Minería y Geología, Vol . XVI I, No. 2. Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba, 2000.

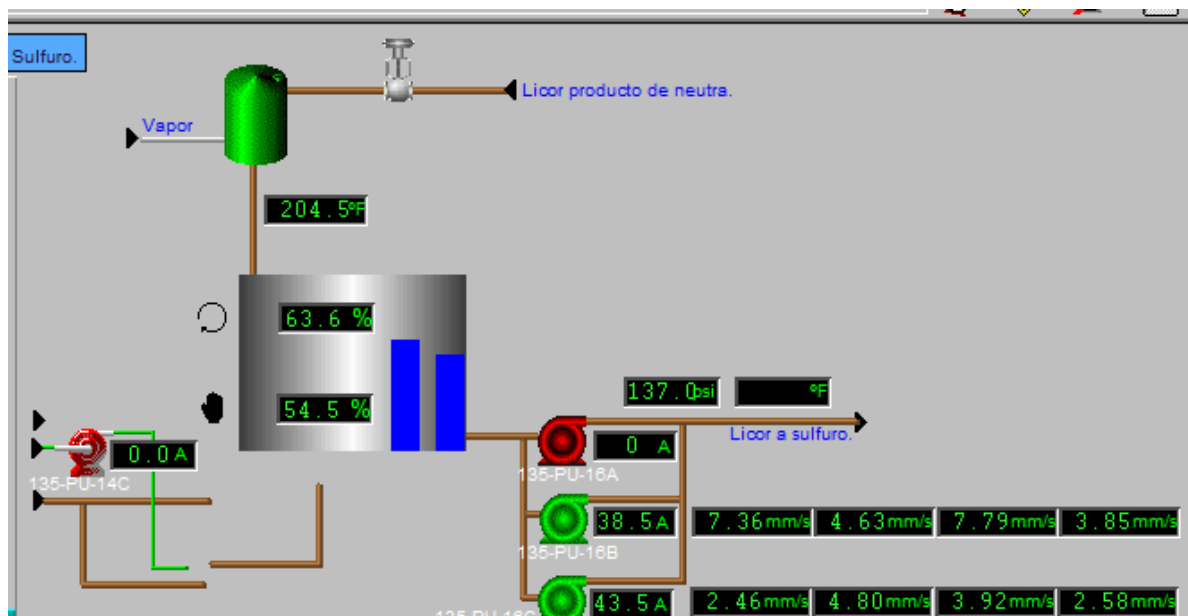
-
- [9] Irizar, M.: “La inteligencia computacional en la identificación de sistemas” Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones. Vol. XXVI, No. 1, p. 35-41. Departamento de Automática y Computación, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Cuba. 2005.
- [10] Leyes Franco JB, Navarrete Díaz Danilo Rafael. Diseño y construcción de un modulo orientado al desarrollo de prácticas de instrumentación industrial bajo la plataforma de Labview. Escuela superior Politécnica del Litoral, Guayaquil– Ecuador, 2007.
- [11] Jordán, M.: *Modelación e Identificación de Sistemas Dinámicos: Teoría y Herramientas*. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, 1996.
- [12] Ljung, L. System Identification Toolbox.: Ayuda del software Matlab 7. The MathWorks. Estados Unidos. 2004.
- [13] Ljung, L.: *System Identification: Theory for the User*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1987.
- [14] Manual de Operaciones de la Planta “Lixiviación” de la empresa “Cmte.Pedro Sotto Alba. (Febrero, 2007).
- [14] MATLAB (versión 11)
- [16] Quintana, R.: Conferencia Sobre la Industria Cubana del Níquel. II Seminario de Perfeccionamiento de Cuadros, ISMM, Octubre 1999.
- [17] Ray, W. H.: Multivariable Process Control-A Survey, Computers & Chem. Eng. v.7, n.367, 1983.

-
- [18] Rojas Purón, L. Secundino Marrero Ramírez, Profesor Ignacio Romero Rueda, Instructor Cayetano Durán Abella. “Observador de velocidad para accionamientos de elevadas frecuencias en procesos de Lixiviación y Lavado”. Revista Minería y Geología, Vol. XVI I, No. 2 Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba, 2000.
- [19] Selva, A.: Curso de posgrado sobre Modelación Matemática con Datos Experimentales. ISMM, Moa. Enero 2000.
- [20] Stoica, P.: System Identification II. Prentice Hall. 1989.
- [21] System Identification Using Matlab. Universidad de Pretoria.
- [22] Tijonov, O.: “Modelos Matemáticos Sencillos en los Procesos Metalúrgicos”. Instituto de Minas de San Petersburgo, 1978. (en idioma ruso).
- [23] Zadeh, L.: From circuit theory to system theory. In Proc. IRE 50, 1962.
- [24] 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.

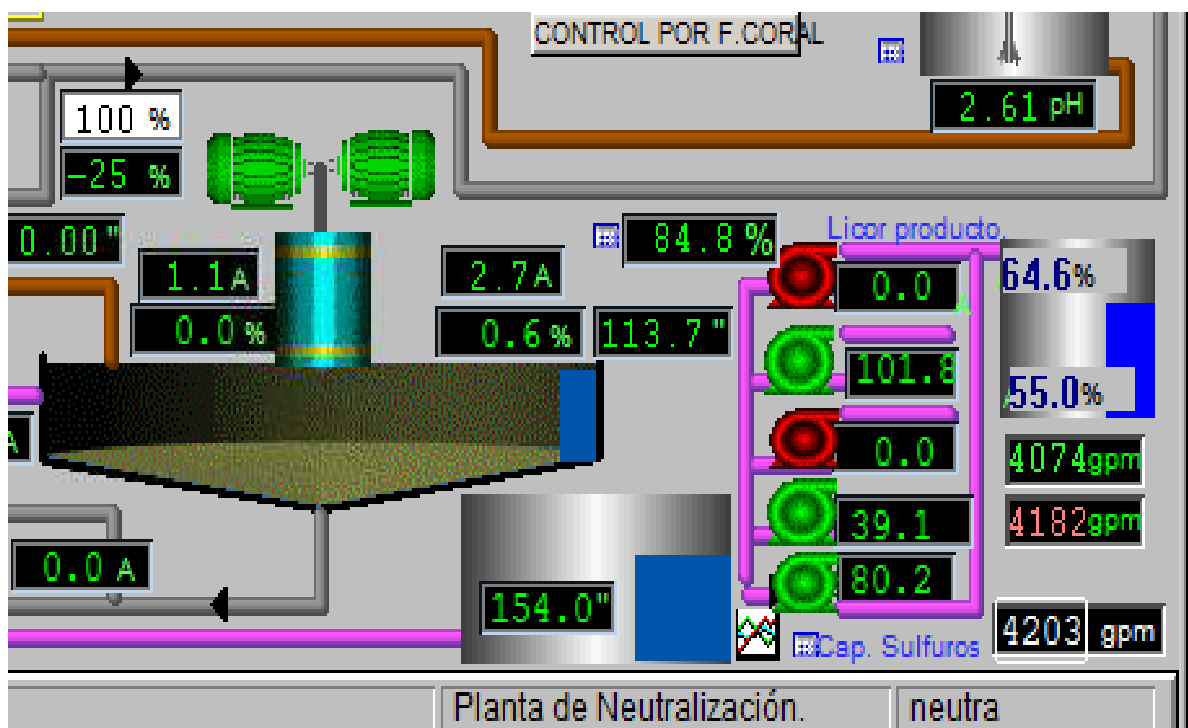
Anexos



Anexo 1.1 Pantalla SCADA Nivel del tanque de licor precalentado.



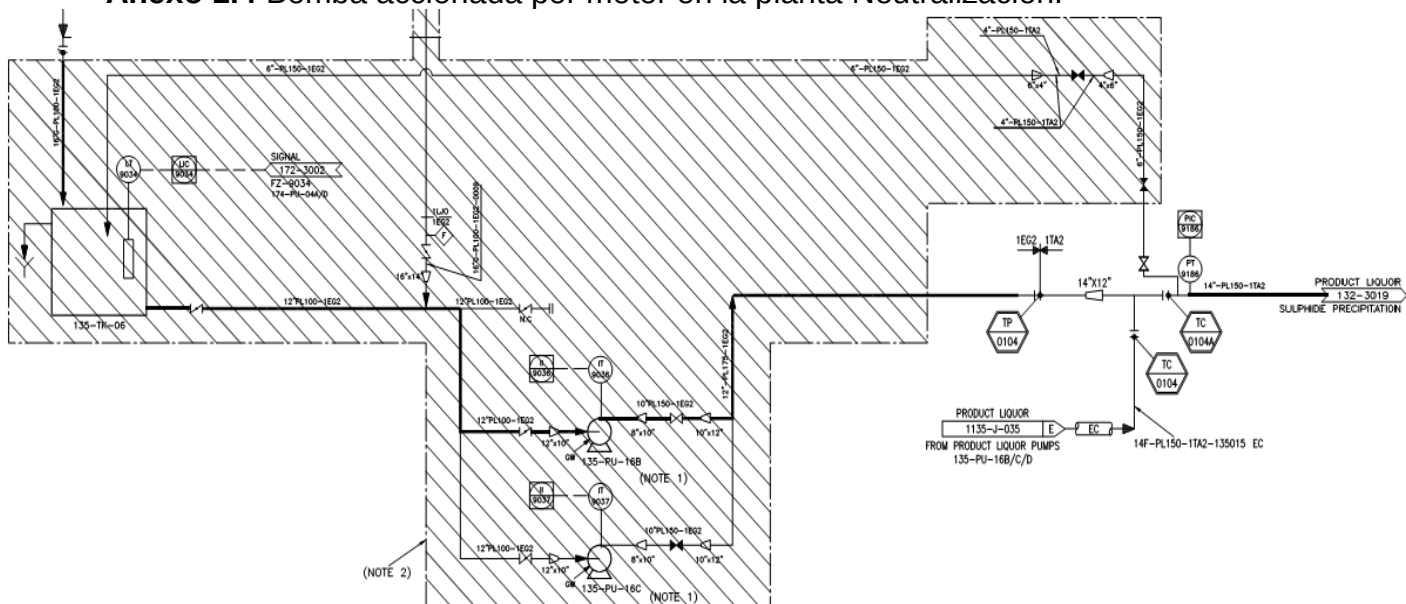
Anexo 1.2 Pantalla SCADA flujo del proceso de precalentamiento de licor (1).



Anexo 1.3 Pantalla SCADA flujo del proceso de precalentamiento de licor (2).



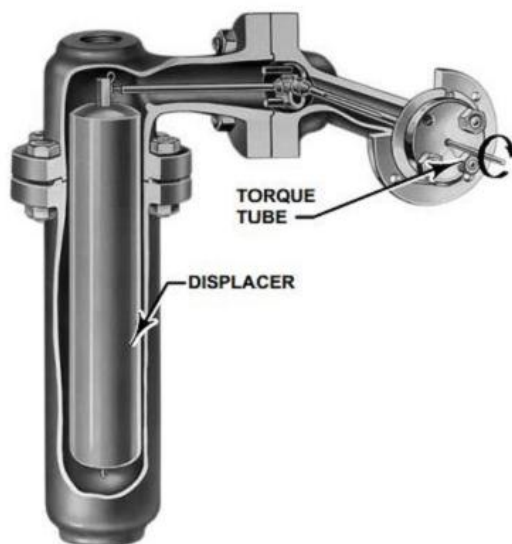
Anexo 1.4 Bomba accionada por motor en la planta Neutralización.



Anexo 1.5 Diagrama flujo tecnológico del precalentamiento de Licor.



Anexo 1.6 Motor eléctrico y bomba de la planta Lixiviación.



Anexo 1.7 Nivel de flota usado en el tanque de licor precalentado.