



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA, 1948

FACULTAD DE QUÍMICA

FARMACIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Diseño del sistema de control automático en la planta de aceites básicos de la refinería “Sergio Soto”.

Autora: Yamirka Valdivia García

Tutor: Dra. María Eugenia O’Farrill Pie

Curso 2016-2017

Dedicatoria

A las dos personas más importantes de mi vida, a las que le debo todo lo que soy y todo lo que seré, a quienes siempre han estado ahí para mí y por los cuales sería capaz de hacer cualquier cosa. A quienes creyeron en mí en todo momento. Mis padres.

Agradecimientos

A todas las personas que me han ayudado a terminar mi carrera, a los que han estado conmigo en momentos buenos y malos, por su apoyo y comprensión: ¡Muchas Gracias!, especialmente...

A mi mamá : *Por ser una de mis razones de ser, por hacerme saber que siempre vas a estar ahí para mí, por ayudarme a crecer como mujer, por ser un ejemplo a seguir como madre. Gracias por las madrugadas y por correr detrás de mis cosas. Gracias por confiar en mí. Te amo incondicionalmente.*

Gracias por todo.

A mi papá: *Por ser el sol que ilumina todos mis días, por hacer que me supere tanto en lo profesional como en lo personal. Sabes que gran parte de lo que he logrado te lo debo a ti: este título es tu sueño convertido en realidad por eso luché tanto para conseguirlo y aquí lo tienes: disfrútalo.*

A mi futuro bebé: *Ya que tal vez apareció en un momento bastante difícil para mí, pero me ha permitido hacer cosas que tal vez no debe hacer ninguna mujer embarazada. Por esto gracias.*

A mi tutora María Eugenia: *Por todas tus atenciones, por confiar en que sí se podía, por estar ahí cada vez que lo necesité, sin importar el día ni la hora. Por todo el apoyo que me brindaste: Gracias.*

A mi pareja: *Por saber comprender lo difícil que han sido estos últimos días.*

A mis profesores: *Por formarme como un profesional de bien, por ser todos diferentes pero con una característica similar: los deseos de enseñarnos.*

A mis amigos: *A los que veo a diario y a los que no lo hago, pero que sé que siempre están ahí para mí. Muy especialmente: Arianna, las Lissett, Yedier, Mario, Patricia, Ana Mayra, Beatriz y Yaidelín. Gracias por apoyarme y por compartir los mejores y peores momentos de mi vida. Por convertirse junto a sus familias en mi propia familia. Ustedes son los mejores, los quiero un mundo.*

A mis compañeros de grupo: *Por compartir juntos cinco años de alegrías y vicisitudes apoyándonos en todo momento, nunca los olvidaré.*

A todos los que no confiaron en mí.

A quienes siempre llevo conmigo y cada día les agradezco lo que soy, al resto de mi familia y a todos los que con su ayuda hicieron posible la realización de este sueño.

¡Muchas Gracias!

Resumen

En este trabajo se propone una estrategia de control automático para la planta de aceites básicos de la refinería "Sergio Soto" empleando sistemas de control automático (SCA) en cascada y lazos simples. Se realizaron corridas de datos en aquellos equipos que tenían instrumentación disponible. Se realizaron los Balances de Masa (BM) y Balances de Energía (BE) para determinar los flujos que serían empleados para los cálculos de los componentes del SCA. Se hicieron histogramas de frecuencias para comprobar cómo se comportaban las variables de interés. Fue confeccionado un modelo matemático de carácter fenomenológico, cuya simulación computarizada, empleando el programa de simulación PSI, permitió conocer el comportamiento dinámico de las variables fundamentales de la planta, se simularon dos alternativas de esquemas de control automático para estudiar el comportamiento ante cambios de variables que perturban al sistema. Según los resultados obtenidos en el trabajo se realiza una propuesta de instrumentación adecuada y se propone una alternativa que garantiza el control de las variables que definen la calidad en el proceso objeto de estudio.

Summary

This paper proposes an automatic control strategy for the basic oil plant of the "Sergio Soto" refinery using automatic control systems (SCA) in cascade and simple loops. Experimental data was run on equipment that had available instrumentation. Mass Balances (BM) and Energy Balances (BE) were performed to determine the flows that would be used to calculate the components of SCA. Frequency histograms were made to verify how the variables of interest behaved. It was made a mathematical model of phenomenological character, whose computer simulation, using the PSI simulation program, allowed to know the dynamic behavior of the fundamental variables of the plant, were simulated two alternatives of automatic control schemes to study the behavior before changes of variables which disturbs the system. According to the results obtained in the work a proposal of adequate instrumentation is made and an alternative is proposed that guarantees the control of the variables that define the quality in the process object of study.

INDICE

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1. Revisión bibliográfica.	9
1.1 Concepto y origen de los lubricantes.....	9
1.2 Características fundamentales.	11
1.3 Riesgos y efectos derivados del mal manejo de aceites.....	14
1.4 Ventajas de los lubricantes:	14
1.5 El mercado mundial de los lubricantes.....	15
1.6 Esquemas tecnológicos para la obtención de aceites lubricantes.....	15
1.7 Esquemas y/o estrategias de control del proceso de obtención de aceites lubricantes.	16
CAPÍTULO 2	18
2.1 Características de la Refinería “Sergio Soto Valdés”, de Cabaiguán.	18
2.2 Origen de la producción de aceite dieléctrico	18
2.3 Descripción del proceso de obtención de aceite dieléctrico para transformador, en la planta “Aceites Básicos”, de la Refinería “Sergio Soto Valdés”, de Cabaiguán.	19
2.4 Equipos y sus características	21
CAPÍTULO 3	32
3.1 Diseño del sistema de control.....	33
Capítulo 4: ANÁLISIS DE RIESGOS.....	46
Recomendaciones	52
ANEXOS	56
Anexo 1: Diagrama de flujo de la refinería	56
Anexo 2: Balances de masa y Energía según metodología de cálculo empleada en la Refinería “Sergio Soto” de Cabaiguán:.....	57
Anexo 3: Tabla de selección de reguladores automáticos.	66
Anexo 4: Programas de simulación.....	67
Anexo 5: Simulación de la Alternativa 1: Control Automático en la Neutralizadora + Digester + Tanque de agua de lavado.....	76
Anexo 6: Simulación de la Alternativa 2: Control Automático en la Neutralizadora+ Tanque de agua de lavado.	77

INTRODUCCIÓN

Los aceites lubricantes se destacan por los precios que presenta, así como por el hecho de que no son posibles de obtener a partir de toda la variedad de crudos existentes, sino de aquellos que tienen determinadas características especiales.

Al triunfo de la revolución, existía en el país una pequeña planta de mezclas para la producción de aceites lubricantes y la obtención de grasas, ubicada en la Ciudad de La Habana, la cual producía solo una pequeña parte de la demanda nacional.

Para eliminar este déficit y así evitar importaciones, el país se ha visto en la necesidad de realizar una serie de inversiones con el montaje de plantas regeneradoras de aceites usados.

Actualmente en nuestras plantas se producen 60 000 t al año de aceites básicos, que representa el 46,2 % del consumo anual de aceites lubricantes. Una de las plantas más importantes de aceites básicos, está ubicada en la refinería “Sergio Soto” de Cabaiguán. Esta planta está destinada para producir aceites básicos a partir de crudos nacionales de base nafténica, provenientes de los yacimientos de Pina y Jatibonico.

Esta fábrica en años anteriores ha llegado a producir 3910 t, representando esta cifra el 6,5 % de la producción nacional de aceites básicos; además se están comercializando dos tipos más de aceites, el Sigatoka y el AC-12I. El Sigatoka lo podemos utilizar como plaguicida, por ejemplo en las plantaciones de plátanos y el AC-12I, como componente para la formación de aceites industriales.

Esta planta es de sumo interés para la economía nacional ya que en ella se producen aceites básicos que en la actualidad se importan, convirtiéndose así en un renglón de sustitución de importaciones.

Problema científico:

La planta no cuenta con un sistema de control automático que regule las principales variables del proceso por lo que no opera al máximo de su capacidad, causando pérdidas económicas tanto para la empresa como para el país.

Objetivo general:

Diseño de un sistema de control automático para la Planta de Aceites Básicos en la refinería “Sergio Soto”, de Cabaiguán.

Objetivos específicos:

1. Desarrollar un análisis bibliográfico sobre las temáticas objeto de estudio
2. Utilizar los balances de masa y energía para el cálculo de los consumos de vapor en el proceso de obtención de aceites básicos en la refinería y otras variables que caracterizan al proceso de producción.
3. Realizar un análisis estadístico descriptivo para analizar el comportamiento de las variables fundamentales a controlar y manipular.
4. Identificar en cada equipo las variables a controlar, a manipular, los disturbios y confeccionar una estrategia de control.
5. Estudiar el sistema de control, mediante la simulación, para garantizar los parámetros operacionales que permitan lograr la calidad de los productos fundamentales, ante variaciones de perturbaciones que afectan a los equipos.
6. Realizar el análisis de riesgo en la planta de aceites básicos.

CAPÍTULO 1. Revisión bibliográfica.

El petróleo es un material combustible más ligero que el agua y casi no se disuelve en esta. Su viscosidad se determina por su composición, y en todos los casos es mucho más alta que la del agua. El nombre del petróleo proviene del latín petra, piedra y óleum, aceite.

Es a través del proceso de refinación por destilación que el petróleo crudo puede ser separado en sus diferentes compuestos. El petróleo es calentado en una torre de destilación donde sus compuestos se evaporan y suben a través de la torre, condensándose los compuestos más pesados en la parte baja de la torre (combustibles pesados, diesel, aceites básicos, etc.) y los más ligeros en la parte superior de la torre (solventes, gasolinas, gas, etc.).

Los aceites producidos en este proceso de destilación se denominan aceites “básicos”, ya que posteriormente serán purificados y mezclados con aditivos que mejorarán su rendimiento para producir aceites de motor, aceites hidráulicos, fluidos de transmisión, lubricantes de engranajes, entre otros.

1.1 Concepto y origen de los lubricantes

Bases Lubricantes: Fracciones de hidrocarburos con puntos de ebullición mayores que 325 °C, manufacturadas por diferentes rutas de procesos a partir de crudos especiales y que cumplen con especificaciones de calidad establecidas para satisfacer las necesidades finales de los lubricantes terminados. También se les denomina Aceites Básicos (Fabricación de bases lubricantes.)

Un aceite lubricante es toda sustancia líquida de origen animal, vegetal, mineral o sintética que permite separar dos superficies en movimiento relativo, reduciendo el desgaste refrigerándolas, evacuando contaminantes y protegiéndolas del medio circundante. Un aceite lubricante consiste, usualmente, en una mezcla de aceites minerales puros, frecuentemente conocidos como “aceites básicos” provenientes de las fracciones pesadas de ciertos crudos que han experimentado un tratamiento de purificación (Hernandez, 2002).

Los aceites lubricantes son sustancias líquidas derivadas del petróleo, compuestas en su mayoría por mezclas de diversos tipos de hidrocarburos que se utilizan para reducir la fricción de partes rodantes o deslizantes, proteger contra la corrosión, enfriar los

sistemas y limpiar algunas piezas. Son el resultado de una combinación de “aceites base”, que proveen las características lubricantes primarios y “aditivos” utilizados para aumentar su rendimiento, eficiencia y vida útil. Los aceites base están compuestos por hidrocarburos entre el 75% y el 85% de la composición total (Ministerio, 2014).

El uso de lubricantes por el hombre data casi desde la época prehistórica con la utilización de lubricantes de origen animal y vegetal en los rudimentarios artefactos que utilizaba para su supervivencia y posteriormente en la incipiente transportación y maquinaria.

Prácticamente desde el inicio del uso de los lubricantes y hasta la edad media el desarrollo en la formulación de estos estuvo estancado. No fue sino hasta la revolución industrial que se reconoció plenamente su utilidad en la disminución de la fricción y el desgaste, pero aún así la formulación de lubricantes seguía siendo totalmente empírica. Los lubricantes eran de origen vegetal, animal o mineral.

Las características de dichos lubricantes fueron resultando ineficientes para su uso en máquinas cada vez más complejas y completas que exigían mejores características de los lubricantes, lo cual forzó la búsqueda de otro tipo de materias lubricantes y con ello el desarrollo de técnicas de obtención y formulación de estos productos.

Una de las nuevas alternativas de lubricantes fue el aceite mineral el cual fue producido comercialmente desde el siglo XVII, pero fue hasta el siglo XIX que tomó mayor auge.

No obstante las ventajas presentadas por los aceites minerales en la lubricación, estos presentan características negativas tales como ser oxidables a altas temperaturas, oponer resistencia al flujo a bajas temperaturas, etc.

Para lograr mejores características de los lubricantes se trabajó en el proceso de refinación del petróleo para obtener bases fluidas que sirvieran tanto en la elaboración de aceites como de grasas lubricantes. No obstante esto no fue suficiente, y ya que anteriormente se había descubierto que la adición de pequeñas cantidades de ciertos materiales (aditivos) a los aceites y grasas mejoraban los lubricantes en ciertas características específicas, se procedió a investigar una serie de compuestos los que adicionados a las bases lubricantes daban como resultado aceites y grasas lubricantes con mejores propiedades, y dependiendo de la formulación con características especiales lo cual los hace útiles en la transportación e industria, así como en otras actividades humanas . Así mismo respecto a un componente esencial de las grasas como son los espesantes, se investigaron otro tipo de estos compuestos que mejoran las propiedades de las grasas (Informe del Instituto Nacional de Ecología).

1.2 Características fundamentales.

La mezcla de aceites sintéticos y minerales da lugar a los aceites base semi-sintéticos. En la tabla 1 se muestra la composición media de hidrocarburos presentes en los aceites bases.

Tabla 1.1. Composición media de aceites base

TIPO DE SUSTANCIA	HIDROCARBURO	COMPOSICIÓN
Parafinas	Alcanos	45-76%
Naftenos	Ciclo alcanos	13-45%
Aromáticos	Aromáticos	10-30%

(Ministerio, 2014)

Tabla 1.2. Índices de calidad

Calificación	Índice de calidad (IC)
Aceite excelente	$IC \geq 5000$
Aceite bueno	$1500 \leq IC < 5000$
Inicio de degradación	$600 \leq IC < 1500$
Degradación avanzada	$300 \leq IC < 600$
Aceite marginal	$150 \leq IC < 300$
Aceite malo	$45 \leq IC < 150$
Aceite muy malo	$22 \leq IC < 45$
Aceite extremadamente malo	$6 \leq IC < 22$
Aceite condición desastrosa	$IC > 6$

(Tapia Arias CR., 2014)

Con el uso, los aceites con base mineral, sintética o semi-sintética acumulan contaminantes que se degradan y hacen que los aceites pierdan sus características y cualidades originales. Ante esta situación, se hace necesaria la sustitución por aceites nuevos generándose de esa forma el residuo conocido como aceite usado, que debe ser gestionado integralmente hasta el aprovechamiento o valorización y eliminación. Los aceites usados más conocidos generados en la actualidad, provienen del uso de:

- Aceite sintético.
- Líquido para transmisión.
- Aceite de motor.

- Aceite de refrigeración.
- Fluidos y aceites en empresas metalúrgicas.
- Aceite para compresores.
- Aceites para laminar.
- Líquidos hidráulicos industriales.
- Soluciones para el trefilado de cobre y aluminio.
- Aceite de aislamiento eléctrico.
- Aceites utilizados como medio de flotación.
- Aceites de procesos industriales.

(Ministerio, 2014)

Las características de las bases lubricantes son fundamentales en las distintas aplicaciones, y la forma de medir estas propiedades es muy importante a la hora de fabricar aceites terminados. Las normas que se usan de manera habitual son las normas editadas por el organismo de normalización norteamericano (ASTM), aceptadas internacionalmente. Las características más importantes son las siguientes:

- **Viscosidad cinemática:** El aspecto más importante a la hora de elegir correctamente un lubricante es su viscosidad (característica fundamental del lubricante). Se mide en centistokes (cSt), a una determinada temperatura que suelen ser 100 y 40 °C. Esta propiedad indica como de pesada es la base lubricante. Las bases más ligeras tienen una viscosidad en torno a 2 cSt (a 100 °C), mientras que las más pesadas están en torno a 45 cSt (a 100 °C). Las bases se suelen nombrar por su viscosidad, una de grado ISO 32 (International Standards Organization) significa un aceite con una viscosidad 32 cSt (a 40 °C), mientras que un ISO 15 tiene una viscosidad de 15 cSt a la misma temperatura. Sin embargo la nomenclatura más usada en el mundo comercial es la denominada viscosidad Saybolt. Así una base SN 150 tiene una viscosidad de 150 SSU (segundos Saybolt Universal) a 40 °C (equivale a un ISO 32). La viscosidad es esencial para asegurar una correcta lubricación hidrodinámica. Por ejemplo en el caso de cojinetes planos (funcionan a altas velocidades y altas cargas) y en los sistemas hidráulicos de baja presión se requieren aceites minerales de baja viscosidad. Una máquina de coser también requiere un aceite de baja viscosidad. Cuando se trabaja con cargas mayores y velocidades más bajas se necesitan aceites con una mayor viscosidad (equipo de orugas para trabajo pesado; sistemas de alta presión). Un refrigerante

requiere un lubricante que retenga sus propiedades a baja temperatura, mientras que en una turbina de vapor el lubricante tiene que ser resistente a la oxidación a altas temperaturas.

- **Índice de Viscosidad:** Este índice indica la capacidad de un lubricante de mantener constante su viscosidad en un amplio rango de temperaturas. Se determina a partir de los valores de viscosidad a 40 y 100 °C (es una medida arbitraria de la forma en que la viscosidad varía con la T y se determina por comparación con un patrón). Un IV alto indica que el cambio de viscosidad con la T es pequeño, mientras que un IV bajo indica que el aceite cambia mucho su viscosidad con la variación de temperatura. Normalmente se desea que el IV sea lo más alto posible, ya que eso significa que la lubricación de las superficies es relativamente similar a todas las temperaturas. Los valores de esta propiedad suelen ser mayores de 90, estando su valor habitual entre 95 y 105 para las bases convencionales.
- **Punto de inflamación:** Es la temperatura a partir de la cual una sustancia arde si se le aplica una llama al menos durante 5 segundos. Este valor limita la temperatura a la que el aceite debe estar expuesto. Cuanto más pesado es el aceite mayor es su Ti. Para los más ligeros la Ti está en torno a 105 °C.
- **Punto de congelación:** Es la temperatura a la cual el producto se congela e indica la temperatura mínima de uso. Las bases convencionales tienen un punto de congelación en torno a -9 °C, pero el de las sintéticas es considerablemente inferior (-20 a -60 °C).
- **Volatilidad:** Es el porcentaje de producto que, bajo determinadas condiciones de temperatura, se evapora. Este ensayo es particularmente importante para bases que deben trabajar a elevada temperatura, como los aceites del motor. Una volatilidad demasiado alta implica una alta evaporación y con ello una variación de las propiedades físicas a lo largo de la vida del aceite, lo que es indeseable.
- **Azufre:** El contenido en azufre mide el grado de refinado de base lubricante, cuanto menor es el contenido de azufre mayor es el refinado. La tendencia actual es una disminución progresiva de azufre hasta su práctica ausencia.
- **Composición hidrocarbonada (sólo para bases convencionales):** La composición hidrocarbonada marca las propiedades de la base. Lo deseable es un alto contenido en hidrocarburos saturados (lineales y ramificados) que proporcionan un alto IV. Los aromáticos presentan bajos IV y su volatilidad es mayor que la de los saturados.

La viscosidad, punto de inflamación y el punto de flujo aumentan con el peso molecular. La densidad tiende a incrementarse con el peso molecular al principio pero luego se hace constante. Además el lubricante ha de ser químicamente estable (no degradarse y oxidarse o formar lodos durante el uso).

1.3 Riesgos y efectos derivados del mal manejo de aceites

AIRE

El aceite lubricante usado que se quema bajo condiciones no controladas puede emitir más plomo al aire que cualquier otra fuente industrial. Los compuestos aromáticos policíclicos constituyentes de los aceites usados pueden evaporarse o tener transformaciones fotoquímicas que los descomponen en gases o partículas que se incorporan a la atmosfera.

AGUA

Los vertimientos a cuerpos de agua forman una película sobre la superficie ocasionando daños a los organismos además de perjudicar la transferencia de oxígeno y producir efectos tóxicos sobre organismos, como algas y peces.

SUELO

El contacto con el suelo de componentes no biodegradables, presentes en aceites lubricantes usados destruye el humus vegetal, alterando la fertilidad de los suelos y generando alto riesgo de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas.

(Ministerio, 2014)

1.4 Ventajas de los lubricantes:

- Reducir el rozamiento mejorando el rendimiento del motor y disminuyendo el consumo de carburante.
- Proteger los órganos mecánicos contra el desgaste y la corrosión para garantizar la duración y la eficiencia del motor.
- El aceite permite evacuar las impurezas gracias al filtro de aceite y al drenaje para mantener la limpieza de las partes motor.
- Reforzar la impermeabilidad (estanqueidad), indispensable para asegurar el buen funcionamiento del motor.
- Evacuar de manera eficaz el calor, enfriando el motor para evitar la deformación de las piezas.
- Un lubricante además de ser un agente antifricción, actúa como sellante, refrigerante, antioxidante y detergente. Los lubricantes de última generación permiten ahorros de combustible y, por tanto, reducen las emisiones de gases perjudiciales para el medio ambiente.

1.5 El mercado mundial de los lubricantes

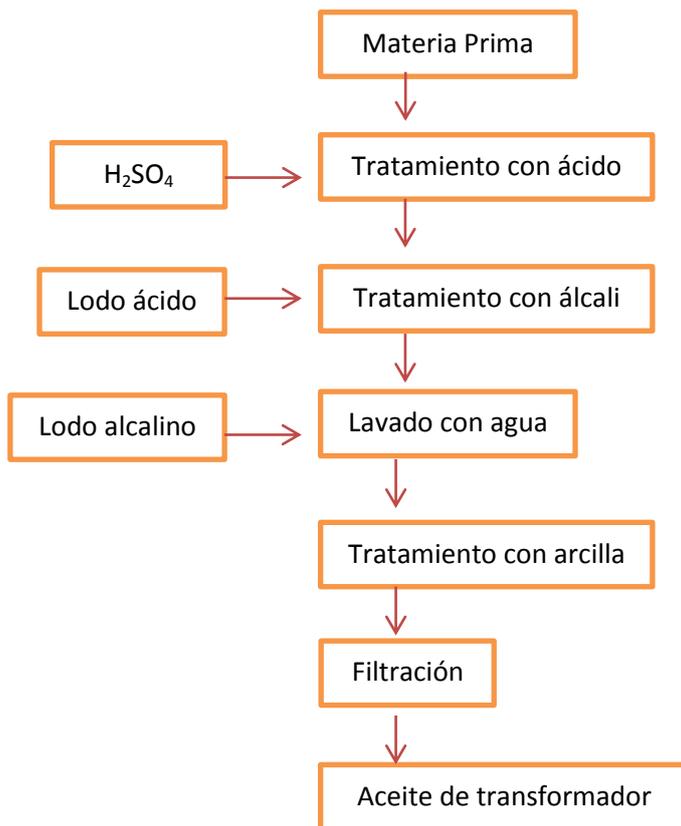
El mercado mundial de lubricantes alcanza los 38,5x106 Tm anuales. El mercado español se sitúa ligeramente por encima del medio millón. La distribución corresponde aproximadamente a:

- Automoción 61%
- Industria 24%
- Otros 15%

En Europa, el consumo de lubricantes de automoción ha sufrido una evolución contraria al de ventas de vehículos y consumo de combustible. Partiendo de un índice 100 en 1979, las ventas de vehículos alcanzaron 163 en 1997, el consumo de combustible creció hasta 146, mientras que el índice de consumo de lubricantes descendió hasta 86 (ver figura). La razón que explica esta divergencia es la mejora constante en la calidad de los lubricantes que permite que un vehículo pueda recorrer una mayor cantidad de kilómetros entre cambios de aceite. Así mientras que en 1970 se efectuaba el cambio de aceite cada 5000 Km, en los coches actuales es suficiente un cambio cada 30.000 Km. El consumo de aceite también ha disminuido de 130 litros en los automóviles de la época de los '70 hasta los 25 litros de los actuales.

1.6 Esquemas tecnológicos para la obtención de aceites lubricantes

Los procesos de obtención de aceites lubricantes, de manera general, se conforman de las siguientes etapas, como se muestra en el esquema a continuación:



(BRETTIS)

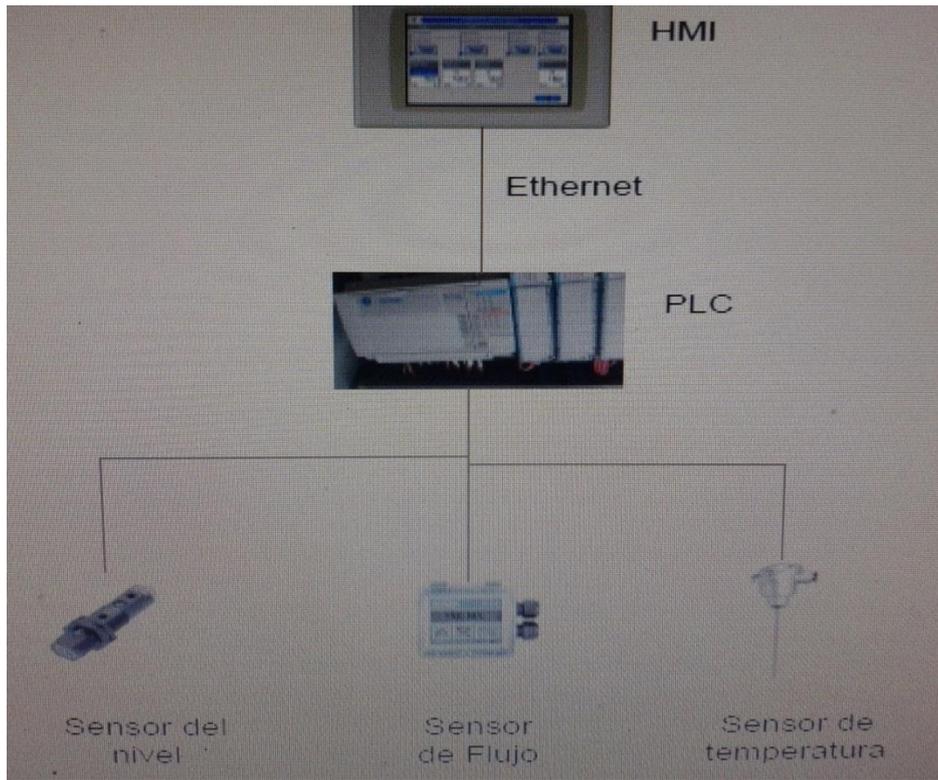
Las operaciones mostradas en el esquema anterior son básicas en cualesquiera de las plantas de obtención de aceites a nivel internacional y nacional.

1.7 Esquemas y/o estrategias de control del proceso de obtención de aceites lubricantes.

En una planta de obtención de aceites básicos las variables principales que son controladas son: las temperaturas, densidades, presiones y el nivel por cuestiones de seguridad y calidad del proceso. (Pozo, Diagnóstico y propuesta de mejora del proceso de control de la calidad en una empresa que elabora aceites lubricantes automotrices e industriales utilizando herramientas y técnicas de la calidad., 2014)

Para la selección de la estrategia de control se deberá tener en cuenta el objetivo operacional a cumplir, la calidad de los productos, la seguridad tecnológica, así como los impactos en la seguridad y el medio ambiente. (Seborg, 2006)

En la actualidad son muy empleados los sistemas de control distribuidos (DCS), así como los sistemas lógicos programables (PLC) (Ardila, 2017)



(BRETTIS)

CAPÍTULO 2

2.1 Características de la Refinería “Sergio Soto Valdés”, de Cabaiguán.

La Refinería “Sergio Soto Valdés” de Cabaiguán, es una empresa refinadora de petróleo, que surgió con la asociación de las compañías de Jarahueca y dos americanos desmovilizados del ejército al concluir la Segunda Guerra Mundial. Fue comprada de uso a la AmacoEngineering Co. de Dallas, Texas, EE.UU, con un volumen de producción de aproximadamente 400 barriles diarios y el llamativo nombre de Cuba OilRefining Co. Surgió en el año 1947 utilizando solamente crudo extraído de Jarahueca. Al triunfo de la Revolución la refinería fue la primera planta particular que pasaba al estado cubano, en junio de ese mismo año los equipos refinaron las primeras cantidades compradas a Colombia. Una vez en manos de la Revolución toma el nombre de “Sergio Soto Valdés”, recibiendo el primer cargamento de crudo soviético por el puerto de Casilda, Cienfuegos, el 17 de Abril de 1960.

A partir de esto, comenzó el proceso de ampliación de la misma, aumentando paulatinamente la producción y la calidad con el esfuerzo de los trabajadores y técnicos. Hoy la refinería tiene una producción de aproximadamente 500 t de crudo por día. Está integrada a la economía nacional a través de la Unión CUPET (Cuba Petróleos), quien es la comercializadora de los productos obtenidos de la producción de la fábrica:

- Nafta, se vende a las Fuerzas Armadas Revolucionarias (FAR) para el lavado de piezas.
- Diesel y gasolina, para abastecer los ServiCentros de las provincias centrales.
- Fuel – oil, para los grupos electrógenos y calderas de otras empresas.
- Asfalto, se vende a la construcción para la pavimentación de carreteras.
- Aceite transformador, para los transformadores de hasta 33 KVA de la Empresa Eléctrica.
- Aceite I-12, como componente para la fabricación de otros aceites.
- Aceite Sigatoka, se utiliza en la agricultura, contra plagas.
- Mezclas Diesel - Fuel, se vende a otras empresas para el consumo de calderas que llevan este combustible.

2.2 Origen de la producción de aceite dieléctrico

La primera corrida experimental en la industria para la obtención del aceite transformador tuvo lugar en 1993 a partir del crudo de Jatibonico. Dada la disminución de los volúmenes de este petróleo se investigaron otros yacimientos aledaños y en 1995 se realiza la corrida industrial de la mezcla de petróleos Pina-Cristales

obteniéndose un aceite transformador que cumplía con los requerimientos de calidad para un aceite clase II de la norma IEC-296 del Comité Electrónico Internacional lo que posibilitó su introducción en el plan de producción de la refinería y posterior comercialización.

Los aceites dieléctricos se conocen como un medio no conductor por lo que son poco corrosivos, sin embargo, la presencia de agua en cantidades de ppm suele generar fenómenos de corrosión (Perez B.).

2.3 Descripción del proceso de obtención de aceite dieléctrico para transformador, en la planta “Aceites Básicos”, de la Refinería “Sergio Soto Valdés”, de Cabaiguán.

La materia prima para la elaboración de aceites básicos se obtiene en la torre de destilación al vacío, esta se almacena en los tanques TK-53 y TK-57, en dependencia del tipo de aceite que se desee producir. Para el tanque TK-53, se envía el producto que se utiliza para la elaboración del Aceite Transformador.

La materia prima almacenada en los tanques es succionada mediante las bombas P-501 o P-502 las cuales la envían a la refinadora R-501. En este equipo se le hace un tratamiento riguroso con H_2SO_4 con el objetivo de eliminarle al aceite una serie de compuestos indeseables como son: hidrocarburos aromáticos, resinas asfálticas, compuestos de azufre y nitrógeno, entre otros. La intensidad del tratamiento con ácido va a depender del tipo de aceite que se quiera obtener.

Para realizar esta operación, primeramente se llena la refinadora hasta un volumen de $90m^3$. Posteriormente se calcula el ácido que se va a añadir y se transfiere esa cantidad desde el tanque de almacenamiento de ácido, TK-1, hasta el tanque de adición de este, se le suministra aire seco a dicho tanque y por presión dentro del mismo, el ácido sube y es añadido. Durante este proceso, el aceite tiene que estar agitándose intensamente para provocar un mejor contacto entre el ácido y los diferentes componentes del aceite. Concluida la operación de tratamiento con ácido, se deja reposar con el fin de que los productos de la reacción, a lo que se le llama Gudrón Ácido, decanten y se acumulen en el cono de la refinadora, procediéndose luego a purgarlos por el fondo hacia el mezclador M-500. Una vez concluido esto, se adiciona un baño de arrastre con agua de lavado, con el objetivo de arrastrar partículas que se hayan quedado en suspensión con el mismo, en esta operación se baña el aceite con $1m^3$ de esta agua manteniendo una agitación intensa, posteriormente se deja decantar dos horas y se purga el baño de arrastre. El aceite que queda en la refinadora es succionado de esta mediante la bomba P-506 con la cual se envía a una de las tres neutralizadoras existentes.

En este equipo se comienza a calentar el aceite para proceder al tratamiento con NaOH (Hidróxido de Sodio o sosa cáustica) el cual requiere temperaturas de 50-55 °C en la masa de aceite, este tratamiento se realiza con varios objetivos: en primer lugar, neutralizar el H₂SO₄ libre que quedó sin reaccionar y que viene con el aceite obtenido del tratamiento con este producto, además se eliminan ácidos nafténicos y algunos compuestos sulfurados. La cantidad de sosa a añadir va a depender de la acidez del aceite y de la concentración de la sosa. La acidez varía de 2 a 5 mg de NaOH/g de solución y la concentración de sosa se exige que esté entre 5-10 % , teniendo estos valores además de la densidad y el volumen de aceite, se realiza el cálculo y se envía el volumen necesario con la bomba P-507 , proveniente del tanque de dilución y adición de sosa . Acabada esta operación, el aceite se continua calentando hasta una temperatura de 80⁰C, a la cual se van a realizar los lavados. Tanto la adición de sosa como los lavados se dejan decantar, después de culminar la adición, durante dos horas, al cabo de las cuales se purgan estas aguas ricas en jabones. La adición de la sosa se realiza con agitación; los primeros tres lavados sin agitación y a partir del cuarto con agitación. Para la realización de los lavados se requiere que el agua tenga una temperatura por encima de la del aceite para evitar emulsiones en el mismo. El agua se va a calentar en el tanque TK-52, que tiene una capacidad de 6m³, se calienta por contacto directo con el vapor, y es bombeada después de tener la temperatura requerida con la bomba P-510, hacia las neutralizadoras, donde es dispersada con duchas para facilitar el contacto entre las fases. El proceso de lavado se realiza hasta que el agua producto de los lavados salga completamente transparente, momento en el cual se le comienza a hacer análisis de cenizas, hasta que esta sea cero. Una vez lavado completamente el aceite, se inicia el proceso de secado. Este se realiza con aire seco que a la vez sirve para agitar la masa de aceite y a una temperatura mantenida a 80⁰C para eliminar toda la humedad presente en el mismo. Durante este proceso se van tomando muestras de aceite y realizándoseles análisis de BSW (agua y sedimentos) hasta que den cero, y el aceite está completamente seco.

Concluida esta operación, se mide el volumen de aceite contenido en la neutralizadora y se divide en cinco cargas, para el tratamiento con tierra en el digestor.

El aceite se pasa de la neutralizadora hacia el digestor por medio de la bomba P-503, determinándose la cantidad mediante la medición constante en la neutralizadora. Una vez completada la carga de aceite en el digestor, se comienza a hacer vacío, mediante eyectores de vapor, con el objetivo de succionar la tierra infusorio (Adsorbente) y se comienza a elevar la temperatura hasta 140⁰C, manteniéndose estas condiciones de

temperatura y vacío por espacio de dos horas, buscando eliminar toda el agua que pueda quedar en el aceite. Durante todo este proceso, se mantendrá la agitación mecánica en el digestor para evitar la sedimentación del sólido y buscar un mejor contacto entre las fases.

El objetivo fundamental de la tierra es mejorar el color del aceite adsorbiendo las partículas que le confieren coloración oscura. La intensidad de este tratamiento depende del aceite que se quiera producir, pues en el transformador es mayor que en el resto, y del color que tenga el aceite después de seco.

Concluido el tiempo en el digestor, el aceite se comienza a reciclar 15min para su posterior filtrado, esto se hace con el objetivo de endulzar las líneas que van a los filtros.

Después de pasados los 15 min se comienza la filtrada teniendo abierta la válvula de recirculación utilizando filtros prensa. El aceite resultante se envía hacia cuatro tanques intermedios de 9,5 m³ cada uno, de los cuales se extraen muestras y se envían al laboratorio donde se le realizan los análisis finales para conocer su calidad, y decidir si es enviado al tanque o reprocesado. Por otra parte, de estos filtros se obtiene la torta de filtrado consistente en tierra impregnada de aceite, la cual se bota para el vertedero.

Al conocerse los resultados de todos los análisis de laboratorio y ser satisfactorios, se procede mediante la bomba P-525 a enviar el producto para los tanques de aceite terminado que van a ser el TK-54 para el componente Sigatoca, el TK-55 y TK-56 para el aceite de transformador.

2.4 Equipos y sus características

A continuación se muestra la descripción técnica de los principales equipos que conforman la planta “Aceites Básicos”, de la Refinería “Sergio Soto Valdés”, de Cabaiguán:

Refinadora

Operación -----	Continua
Materiales manejados -----	Materias primas y H ₂ SO ₄
Forma constructiva -----	Cilindro cónico
Capacidad de operación -----	90m ³

Diámetro -----	4,5m
Altura de la parte cónica -----	1,810m
Altura del cilindro -----	7m
Material de construcción -----	Acero el carbono
Controles esenciales -----	No tiene
Cantidad -----	1

Neutralizadora

Operación -----	Continua
Materiales manejados-----	Aceite ácido y NaOH
Forma constructiva-----	Cilindro cónico
Capacidad de operación-----	87m ³
Diámetro-----	4,5m
Altura de la parte cónica-----	1,810m
Altura del cilindro-----	7m
Material de construcción-----	Acero el carbono
Controles esenciales-----	Monitoreo de temperatura con sensor
Tolerancia permisible-----	3°C
Otra información-----	Posee un Serpentín
Cantidad -----	3

$$Q_g = Q_c * \eta$$

$$-5271631 \text{KJ} = m_v (h_{80} - h_{140}) * 0.85$$

$$m_v = - \frac{5271631}{(334.9496 - 2733.9) * 0.85}$$

$$m_v = 2585,3 \text{ Kg}$$

Digestores

Operación-----	Continua
Materiales manejados-----	Aceite seco y tierra decolorante
Forma constructiva-----	Cilindro cónico
Capacidad de operación-----	20m ³
Diámetro-----	2,5m
Altura total-----	8,890m
Material de construcción-----	Acero el carbono
Controles esenciales-----	No tiene
Requerimientos de aislamiento-----	Capa de amianto
Tolerancia permisible-----	3°C
Cantidad -----	2

$$Q_g = Q_c * \eta$$

$$-18306840,15 \text{ KJ} = m_v (h_{80} - h_{140})$$

$$m_v = -18306840,15 / (334,9496 - 2733,9)$$

$$m_v = 7631,187 \text{ Kg}$$

Agitador del digestor

Operación -----	Continua
Materiales manejados -----	Aceite seco y tierra decolorante
Diámetro -----	0,7m
Revoluciones por min -----	880
Material de construcción -----	Acero el carbono

Filtros prensa

Operación -----	Continua
Cantidad de placas -----	30
Área de filtrado -----	304,8pie ²
Diámetro de entrada y salida -----	0,076m
Cantidad de marcos -----	30
Dimensiones de una placa -----	0,72m X 0,72m
Cantidad -----	4

Bomba de Aceite P-501 y P-502

Flujo -----	45m ³ /h
Velocidad -----	3530 rad/min
Temperatura -----	15 – 100 °C
Potencia -----	10 KW

Bomba de Aceite P-503 y P-504

Flujo -----	10m ³ /h
Velocidad -----	1700 rad/min
Temperatura -----	15 – 100 °C
Potencia -----	2,2 KW

Bomba de Filtrado P-525 y P-526

Flujo -----	18m ³ /h
Velocidad -----	1700 rad/min
Temperatura -----	15 – 100 °C
Potencia -----	2,2 KW

Bomba de Gudrón P-516

Flujo ----- 10m³/h
 Velocidad ----- 3670 rad/min
 Temperatura ----- 15 – 100 °C
 Potencia ----- 30 KW

TB-503(tanque de agua de lavado)

$$Qg = Qc * \eta$$

$$-1758462KJ = m_v(h_{80} - h_{140})$$

$$m_v = -1758462/(334.9496 - 2733.9)$$

$$m_v = 733.02Kg$$

En la siguiente tabla se muestran los parámetros para medir los índices de calidad del aceite transformador, así como el método de ensayo y su valor correspondiente.

Tabla 2.1. Índices de calidad del aceite dieléctrico

INDICES DE CALIDAD	U/M	METODO DE ENSAYO	VALOR ESPECIFICADO
1. Viscosidad a 40°C	mm ² /s	ASTM-D 445	17-24
2. Temperatura Inflamación CA	°C	NC ASTM D 92	165 mín.
3. Contenido Cenizas	% m/m	ASTM D 482	0.01 máx
4. Agua por Destilación	% v/v	NC ASTM D 95	Ausencia

5. Impurezas Mecánicas	-	VISUAL	Ausencia
6. Número de Neutralización	mg KOH/g	ASTM D 974	0.05 máx
7. Color ASTM	-	ASTM D 1500	3.0 máx
8. Densidad 15°C	g/cm ³	ASTM D 1298	0.93 máx
9. Índice Viscosidad	-	ASTM D 2270	Reportar
10. Carbón Conradson	% m/m	ASTM D 189	Reportar
11. Contenido de Azufre Total	% m/m	ASTM D 1551	Reportar
12. ° API	-	ASTM D 1298	19-22

Estos ensayos se realizan en el laboratorio y con los registros existentes se realizaron las cartas de control de la viscosidad en la neutralizadora y la densidad de la materia prima, donde se pudo comprobar que ambos parametros están dentro de los valores normados.

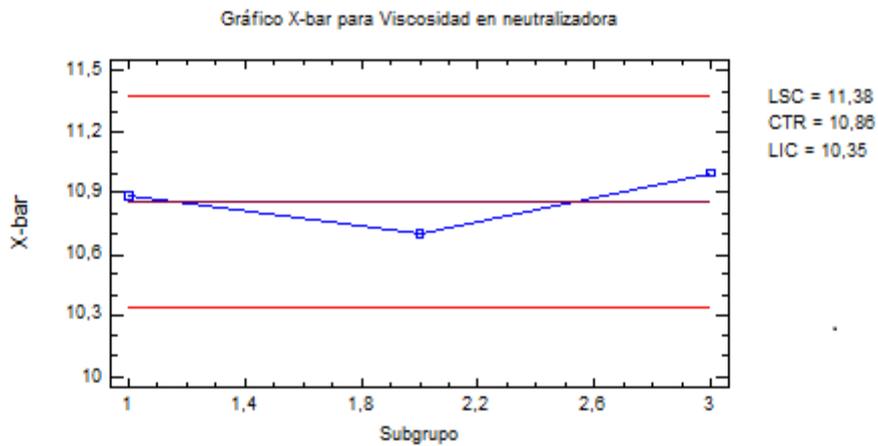


Figura 2.1: Carta de control de viscosidad en la neutralizadora.

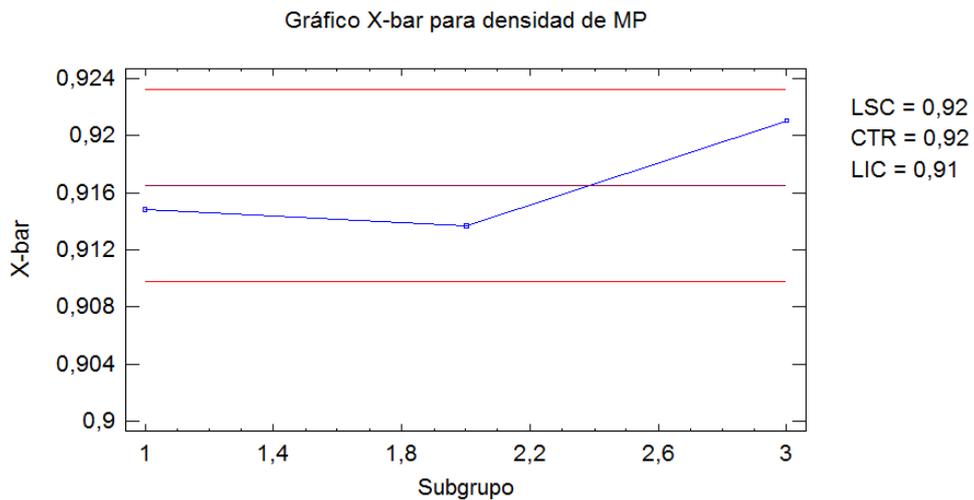


Figura 2.2: Carta de control de densidad de materia prima.

En las neutralizadoras se cuenta con un termómetro, lo que permitió obtener los valores de la temperatura en este equipo.

Tabla 2.3. Valores de la temperatura en la neutralizadora.

# de corridas	Temperatura (°C)	# de corridas	Temperatura (°C)
1	25	4	55
2	30	5	63
3	40	6	70

# de corridas	Temperatura (°C)
7	76
8	85
9	30
10	35
11	44
12	52
13	65
14	76
15	78
16	85
17	25
18	30
19	40
20	55
21	63
22	70
23	76
24	80
25	85
26	25
27	30
28	40
29	55
30	63
31	70
32	76
33	85
34	25
35	30
36	40
37	55
38	63
39	70
40	76

# de corridas	Temperatura (°C)
41	80
42	85
43	25
44	30
45	40
46	55
47	63
48	70
49	76
50	80
51	85
52	25
53	30
54	40
55	55
56	63
57	70
58	76
59	80
60	85
61	25
62	30
63	40
64	55
65	63
66	70
67	76
68	80
69	85
70	25
71	30
72	40
73	55
74	63

# de corridas	Temperatura (°C)
75	70
76	76
77	85
78	25
79	30
80	40
81	55
82	63
83	70
84	76
85	85
86	25
87	30

# de corridas	Temperatura (°C)
88	40
89	55
90	63
91	70
92	76
93	85
94	25
95	30
96	40
97	55
98	63
99	70
100	85

Un análisis a través de un histograma de frecuencia acerca del comportamiento estable se muestra en la figura a continuación:

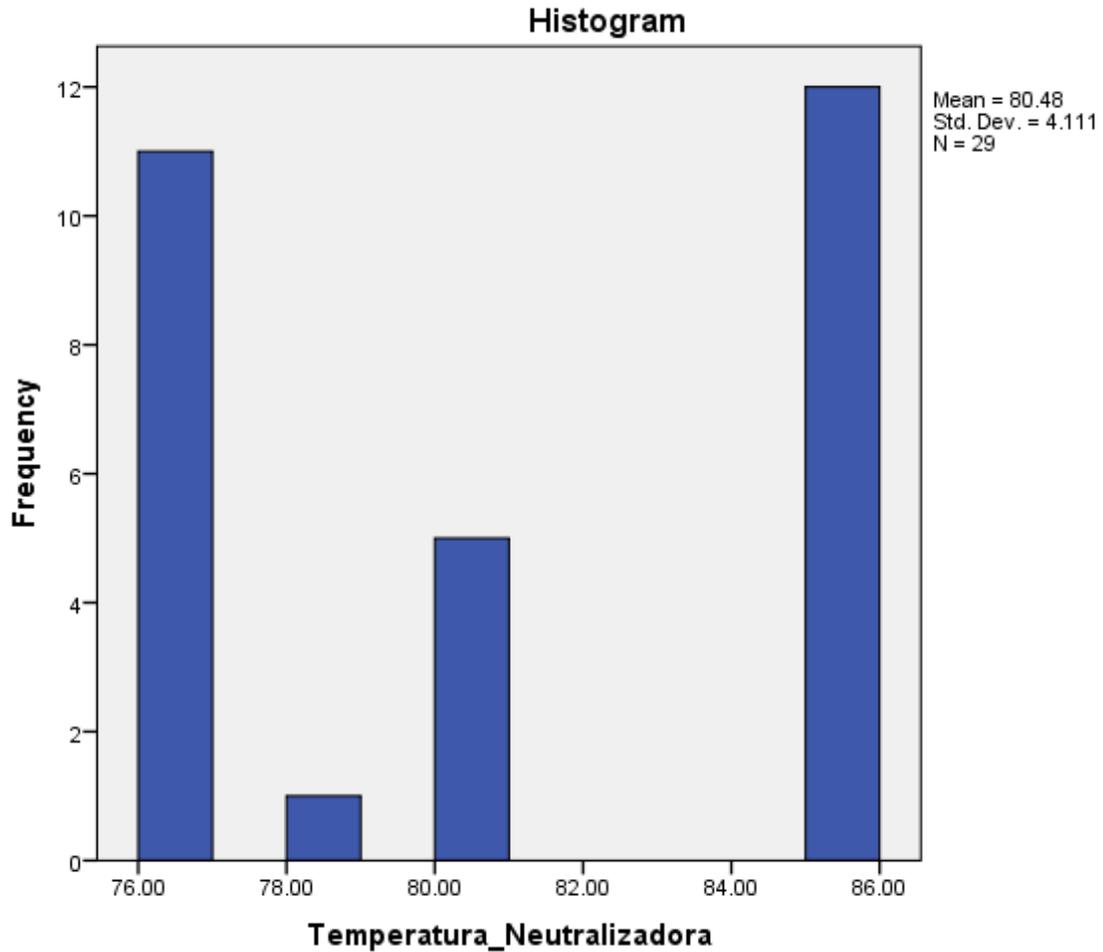


Figura 2.3: Histograma de frecuencia de temperatura en la neutralizadora.

Se puede apreciar que existe significativa variabilidad del parámetro de control, en este caso la temperatura de la columna neutralizadora, cuyo valor de control es 80 °C y puede apreciarse que no siempre se alcanza este objetivo.

Este análisis no pudo ser realizado en los otros equipos que conforman la planta por la ausencia de la instrumentación de campo necesaria para realizar el monitoreo.

La instrumentación y sistemas de automatización con que cuenta la refinería es muy pobre y no permite que en esta se obtenga los máximos resultados posibles, de ahí que resulte necesario la propuesta de un sistema de control adecuado para aumentar su producción y por lo tanto disminuir la importación de los productos que aquí se obtienen.

CAPÍTULO 3

En la Planta de Aceites Básicos se ha previsto la automatización del proceso tecnológico aplicando técnicas avanzadas de medición y regulación para garantizar la eficiencia del proceso productivo, obtener la calidad esperada de los productos y crear condiciones adecuadas de trabajo para los operadores de la planta.

El sistema previsto contempla un autómata programable e instrumentación de campo electrónica. En lo fundamental el equipamiento es SIEMENS, con lo que se logra estandarizar esta planta con respecto al resto de las áreas de la empresa.

El desarrollo de los trabajos comprende:

1. Proyecto, montaje y cableado de la pizarra de control.
2. Programación del autómata programable (S7 314) y el aparato de visualización OP7.
3. Tratamiento de las alarmas del proceso.
4. Enlace AG-PC para visualización y registro de variables del proceso en PC mediante el software SCADA Simatic WinCC.
5. Capacitación del personal.

A continuación se detalla la estrategia de control asumida para los equipos principales en la planta de producción de aceites básicos.

Neutralizadora

Variable a controlar \longrightarrow Temperatura (T_N)

Variable a manipular \longrightarrow Flujo de vapor (W_{VN})

Estrategia de control \longrightarrow Lazo de control avanzado en cascada

Digestor

Variable a controlar \longrightarrow Temperatura (T_D)

Variable a manipular \longrightarrow Flujo de vapor (W_{VD})

Estrategia de control \longrightarrow Lazo de control avanzado en cascada

Tanque de agua lavado

Variable a controlar \longrightarrow Temperatura (T_{TQL})

Variable a manipular \longrightarrow Flujo de vapor (W_{VTQL})

Estrategia de control \longrightarrow Lazo de control avanzado en cascada

3.1 Diseño del sistema de control

Para el análisis de la estrategia de control se construye un modelo matemático de carácter fenomenológico basado en los balances de energía y de masa en estado no estacionario y estacionario para cada equipo que conforma la planta aceites básicos, dado el nivel de complejidad de las expresiones matemáticas que caracterizan el estado dinámico del proceso objeto de estudio, fue necesario transformar las mismas al campo laplaciano de números complejos, para facilitar los procedimientos matemáticos y obtener las relaciones entre las variables de entradas y salidas involucradas en cada equipo.

Consideraciones

- Las constantes de tiempo de los transmisores son despreciables.
- La acción de la válvula y del regulador son directa (K_C y K_V negativas)
- La determinación de las ganancias y constantes de tiempo involucradas en el proceso que se desarrolla en cada equipo se hicieron a partir de los balances energéticos en estado no estacionario.

Neutralizadora

Balance energético en estado no estacionario

$$m * Cp * \Delta T + m_{vapor} * \lambda = V * \rho * Cp * \frac{dT_N}{dt}$$

$$F_{aceite} * \rho * Cp * (T_a - T_N) + W_{VN} * \lambda = V_N * \rho * Cp * \frac{dT_N}{dt}$$

$$K_{WVN} = \frac{\lambda}{F_{aceite} * \rho * Cp}$$

$$K_{Ta} = 1$$

$$\tau_N = \frac{V_N}{F_{aceite}}$$

Transmisor de temperatura: constante de tiempo despreciable

$T_{Nominal} = 85^\circ\text{C}$

Válvula de control: acción directa (-Kv)

Constante de tiempo: 30 segundos

Regulador: PID

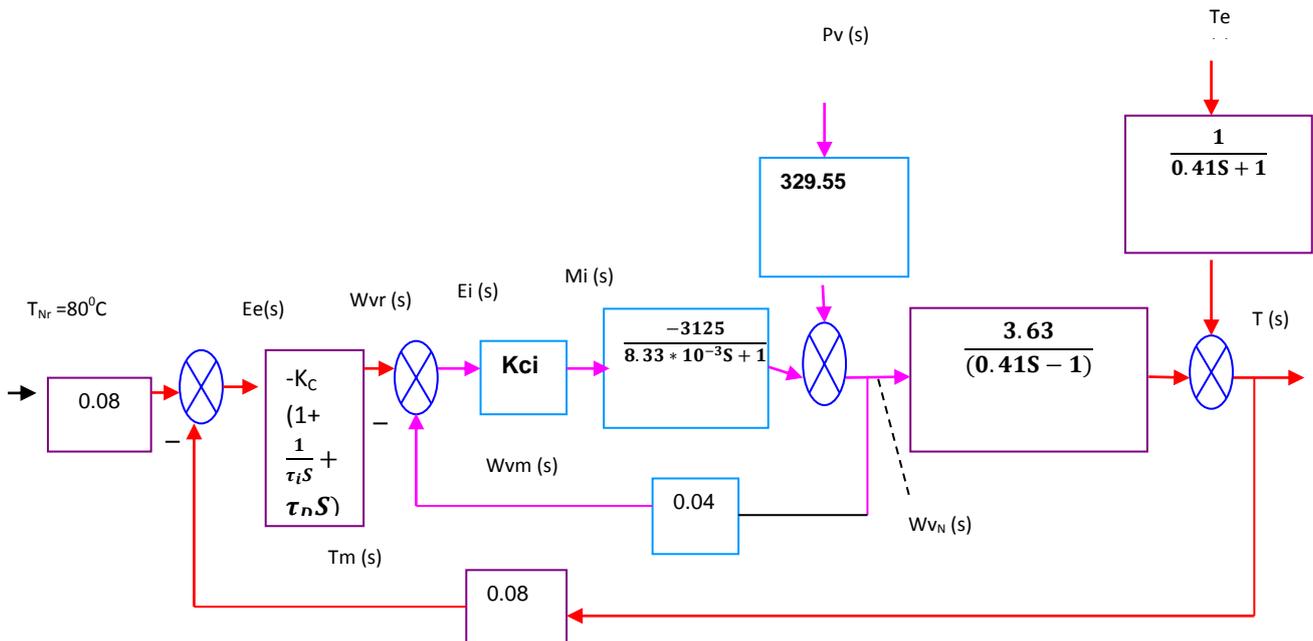


Figura 3.1: Diagrama de Bloques del SCA propuesto para la Neutralizadora

Digestor

Balance energético en el estado no estacionario

$$F_{aceite} * \rho * Cp * (T_N - T_D) + W_{VD} * \lambda = V_D * \rho * Cp \frac{dT_D}{dt}$$

$$K_{WVD} = \frac{\lambda}{F_{aceite} * \rho * Cp}$$

$$K_{TN} = 1$$

$$\tau_D = \frac{V_D}{F_{aceite}}$$

Transmisor de temperatura: constante de tiempo despreciable

$T_{Nominal} = 100^{\circ}C$

Regulador: PID $-K_C$ Acción directa

Válvula de control: Acción directa $-K_V$

Constante de tiempo: 30 segundos

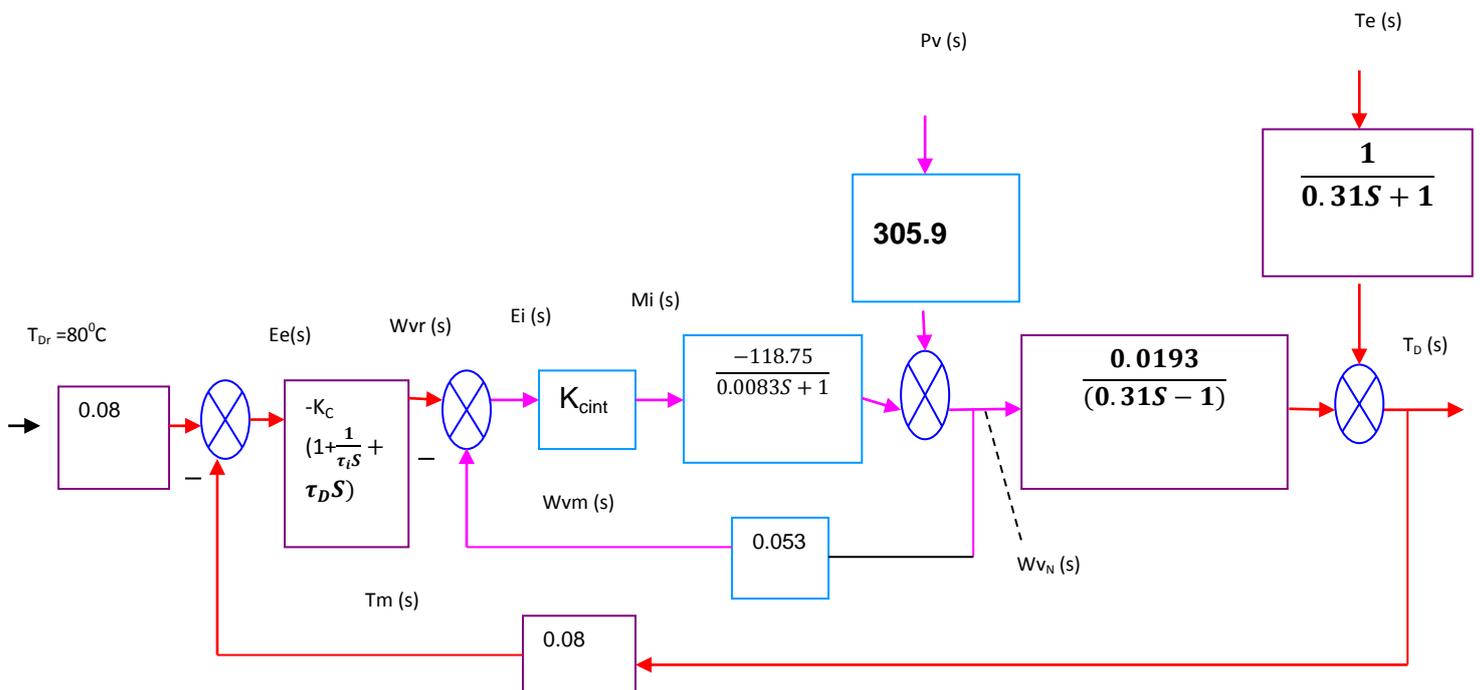


Figura 3.2: Diagrama de Bloques del SCA propuesto para el Digestor

Tanque de agua de lavado

El agua se calienta por contacto directo.

Balance energético en el estado no estacionario

$$F_{agua} * \rho * Cp * (T_a - T_{TQL}) + W_{VTQL} * \lambda = V_{TQL} * \rho * Cp \frac{dT_{TQL}}{dt}$$

$$K_{WTQL} = \frac{\lambda}{F_{agua} * \rho * Cp}$$

$$K_{Ta} = 1$$

$$\tau_{TQL} = \frac{V_{TQL}}{F_{agua}}$$

Regulador: PID $-K_C$ Acción directa

Válvula de control: Acción directa $-K_V$

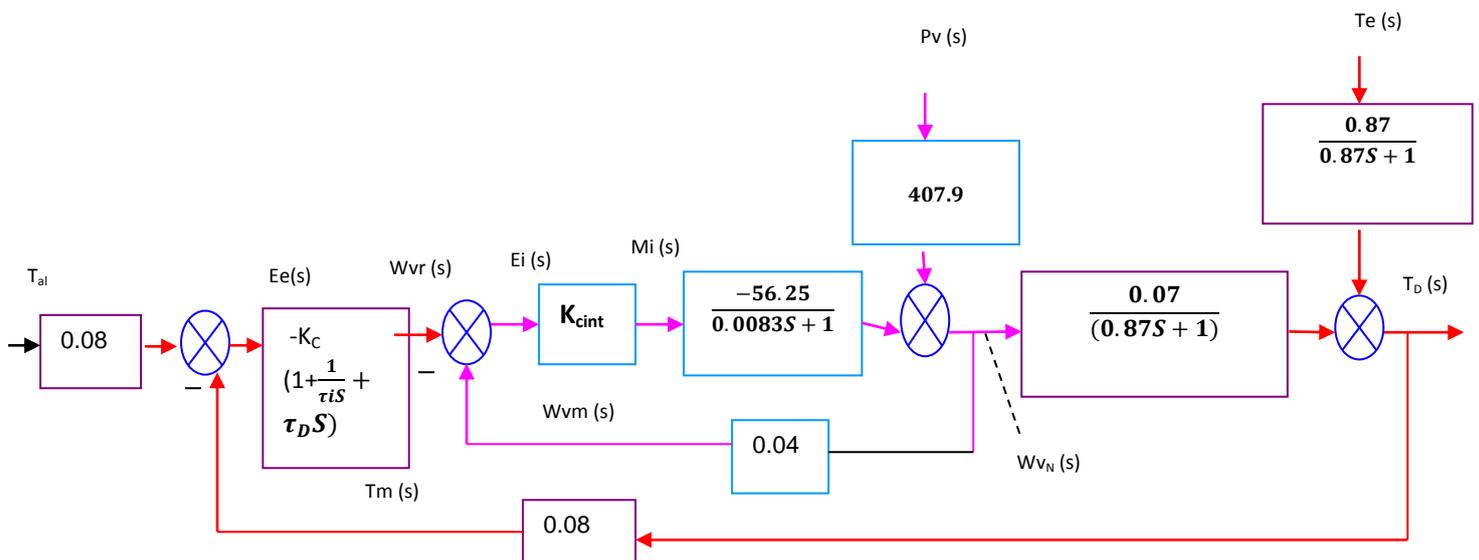


Figura 3.3: Diagrama de Bloques del SCA propuesto para el Tanque de agua de lavado

Este modelo fue validado con los datos experimentales obtenidos, resultando apropiado para la descripción del comportamiento dinámico de las variables involucradas en cada equipo. Su implementación en el programa de simulación PSI, sirvió de base para el estudio de las alternativas de control automático propuestas en el trabajo.

Determinación de las ganancias de los transmisores y válvulas de control automático:

Salida eléctrica: 4-20 ma

$$K_M = \frac{\text{Señal de salida}}{\text{Gama del instrumento}}$$

$$K_V = K_{TIP} * K_{SM} = 0.05 * \frac{\Delta Q}{\text{Señal neumática}}$$

Señal neumática: $0.2-1 \frac{kgf}{cm^2}$

En la tabla a continuación se muestran los resultados para cada equipo:

Tabla 3.1. Constantes de ganancias.

Equipo	K_M (ma/°C)	K_V (kg/h/ma)
Neutralizadora	0.08	-31.25
Digestor	0.08	-118.75
Tanque de lavado	0.08	-56.25

Selección de los reguladores automáticos:

-Se asumen reguladores PID para todos los casos (reguladores externos), siguiendo la metodología de selección desarrollada por Seborg y colaboradores (Seborg, 2006), la cual se muestra en los anexos.

-Se empleó el método de Curva de Reacción de Ziegler y Nichols, para el diseño de los reguladores automáticos, los parámetros fueron diseñados mediante las

expresiones de López y colaboradores para obtener una respuesta óptima se empleó el método del IAE (Integral del Error Absoluto).

(Smith)

Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.2. Valores de ganancia y constantes de tiempo para los reguladores en los equipos.

Equipo	K_C	T_i (h)	T_D (h)
Neutralizadora	66,2419	$4,4965 \cdot 10^{-3}$	$1,717 \cdot 10^{-4}$
Digestor	12760,5	$4,1918 \cdot 10^{-3}$	$1,784 \cdot 10^{-4}$
Tanque de lavado	6868,54	$5,4311 \cdot 10^{-3}$	$1,549 \cdot 10^{-4}$

Regulador Interior de la Cascada:

-Se asume un Regulador Proporcional (P)

Los resultados del cálculo de la ganancia por los métodos establecidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.3. Valores para el regulador P.

Equipo	$K_{CLinterior}$
Neutralizadora	-7,2
Digestor	-1,43
Tanque de lavado	-4

- Las estrategias de control determinadas anteriormente fueron simuladas, para lo cual al modelo de carácter fenomenológico, obtenido se le agregaron las expresiones del sistema de control automático.

El programa de simulación se muestra en el anexo 4.

- Para evaluar la efectividad de cada lazo de control se utilizó el criterio de IAE (Integral del Error Absoluto), así como se tomaron otros parámetros indicativos de la calidad de la respuesta de las variables controladas y se simularon dos alternativas de sistemas de control:

Alternativa 1: Considerando la automatización en la Neutralizadora + Digestor + Tanque de agua de lavado.

Alternativa 2: Considerando la automatización en la Neutralizadora+ Tanque de agua de lavado.

Los resultados de la simulación de ambas alternativas se muestran en la siguiente tabla y en los anexos correspondientes.

Tabla 3.4. Resultados de las alternativas propuestas.

Alternativa	V. control	Set Point (°C)	Valor real (°C)	Tiempo de est (h)	Pico Max. (°C)	IAE	Consumo de vapor (kg/h)
1	Temp Neut	80	80	0.019	80,07	3,43e-05	322,75
1	Temp Dig	100	100	0.009	No se aprecia	3,72e-07	1795,57
1	Temp agua lavado	90	90	0.009	No se aprecia	4,44e-06	607,535
2	Temp Neut	80	80	0.02	80,07	3,43e-05	323,75
2	Temp Dig	100	100,3	1,22	100,3	3,42e-04	1810,87
2	Temp agua lavado	90	90	0,009	No se aprecia	4,44e-06	607,535

De los resultados a los que se arriba, luego de la simulación de las dos alternativas propuestas, puede concluirse lo siguiente:

- ✓ Ambas alternativas de control ofrecen buenos resultados desde el punto de vista de la controlabilidad que se alcanza con las variables objeto de estudio: temperatura de salida en cada equipo, expresado esto en los valores mínimos del criterio IAE, que se alcanza en cada equipo para las dos alternativas simuladas.
- ✓ Si bien en la segunda alternativa, se aprecia un incremento del consumo de vapor en el digestor al no estar regulado este flujo por la válvula de control automático, esto no influye de manera significativa en la controlabilidad de la variable objeto de estudio ya que se aprecia que se sigue alcanzando el valor deseado y el incremento del consumo de vapor es mínimo (15,3 kg/h), lo que implica económicamente un incremento de 3 \$/día en el costo total de producción.

Teniendo en cuenta lo anterior y considerando que la segunda alternativa implica un sistema de control automático avanzado menos a implementar, y en el cual habría que invertir y considerar los costos de mantenimiento posteriores, es que se propone como resultado del trabajo emplear la segunda alternativa de estudio, es decir: Considerar solamente la automatización en la Neutralizadora y en el Tanque de lavado.

Propuesta de la estrategia.

Generalidades

El PLC constará de:

- 1 fuente de alimentación de 24 V DC. 6ES7 307-1KA00-0AA0
- 1 módulos de entrada analógica AI 8X12 BIT 6ES7- 331-7KF02-0ABO
- 2 módulos de entrada analógica AI 8XTC 6ES7- 331-7PF11-0ABO
- 1 módulo de salida analógica AO 8X12 BIT 6ES7-332-5HF00-0AB0
- 1 módulo de Salida digital DO 32x DC24v 0.5A 6ES7-322-1BL00-0AA0
- 1 módulo de Entrada digital DI 32Xdc24v 6ES7-321-1BL00-0AA0

En el PLC se programarán los siguientes lazos de regulación:

Lazo 1: Temperatura en el centro de N501. (TIC 01).

Lazo 2: Temperatura en el centro de N502. (TIC 02).

Lazo 3: Temperatura en el centro de N503. (TIC 03).

Lazo 4: Temperatura Agua de lavado T503. (TIC 06).

Esta propuesta implica emplear dos lazos de control menos que la propuesta que hace la empresa, expresada en la alternativa 1, en la cual se emplearían 6 lazos de control.

Además en el PLC se elaborarán las señales de alarmas que se envían al PANALARM y otras que se indican en la pantalla del SCADA y que se corresponden con puntos y parámetros importantes del proceso.

El sistema trabaja con una impresora que permite imprimir los eventos ocurridos durante el turno. Están previstos varios tipos de reporte.

Todos los Datos deben guardarse con la periodicidad de 10 minutos al menos en una Base de Datos con el formato de SQL server 2008 y se debe usar como SCADA el Win CC de la Siemens.

Direccionamiento:

Señales de entrada y salidas al autómata.

Entradas analógicas:

Módulo 1 (6ES7-331-7KF02-OAB0) (4- 20 mA).

E0	256	Flujo de aire a planta (FT 501)
E1	258	Flujo de vapor a planta (FT 502)
E2	260	Nivel en N501 (LT 501)
E3	262	Nivel en N502 (LT 502)
E4	264	Nivel en N503 (LT 503)
E5	266	Nivel en TB506 (LT 504)
E6	268	Nivel en TB507 (LT 505)

Módulo 2 (6ES7-331-7PF11-0AB0) (TERMOPARES).

E0	272	Temperatura centro N501 (TE 501)
E1	274	Temperatura centro N502 (TE 502)

E2 276 Temperatura centro N503 (TE 503)

E3 278 Temperatura fondo N501 (TE 507)

E4 280 Temperatura fondo N502 (TE 508)

E7 286 Temperatura fondo N503 (TE 509)

Módulo 3 (6ES7-331-7PF11-0AB0) (TERMOPARES).

E0 288 Temperatura agua Lavado (TE511)

Salidas analógicas

Módulo 4 (6ES7 332-5HF00-0AB0)

A0 304 Válvula de vapor a N501 (TCV 501)

A1 306 Válvula de vapor a N502 (TCV 502)

A2 308 Válvula de vapor a N503 (TCV 503)

A3 310 Válvula de vapor a TK agua Lavado (TCV 506)

Entradas digitales

Módulo 5 (6ES7321-1BL00-0AA0)

E 16.0 Selector A/M TCV 501

E 16.1 Pulsador para abrir TCV 501

E 16.2 Pulsador para cerrar TCV 501

E 16.3 Selector A/M TCV 502

E 16.4 Pulsador para abrir TCV 502

E 16.5 Pulsador para cerrar TCV 502

E 16.6 Selector A/M TCV 503

- E 16.7 Pulsador para abrir TCV 503
- E 17.0 Pulsador para cerrar TCV 503
- E 17.1 Selector A/M TCV 504
- E 17.2 Pulsador para abrir TCV 504
- E 17.3 Pulsador para cerrar TCV 504
- E 17.4 Selector A/M TCV 505
- E 17.5 Pulsador para abrir TCV 505
- E 17.6 Pulsador para cerrar TCV 505
- E 17.7 Selector A/M TCV 506
- E 18.0 Pulsador para abrir TCV 506
- E 18.1 Pulsador para cerrar TCV 506
- E 18.2 reserva
- E 18.3 Alto nivel en R501 (LS 501)
- E 18.4 Baja presión de aire a planta (PS 501)
- E 18.5 Baja presión de vapor a planta (PS 502)
- E 18.6 Baja presión en TB507 (PS 503-1)
- E 18.7 Alta presión en TB 507 (PS 503-2)
- E 19.0 Botón de prueba de luces
- E 19.1 Botón reconocimiento de alarmas

Salidas digitales

Módulo 6 (6ES7322-1BL00-0AA0)

- A 20.0 Timbre de alarma
- A 20.1 Lámpara roja

- A 20.2 Lámpara amarilla
- A 20.3 Lámpara verde
- A 20.4 Baja temperatura fondo N501
- A 20.5 Baja temperatura fondo N502
- A 20.6 Baja temperatura fondo N503
- A 20.7 Alta temperatura fondo N501
- A 21.0 Alta temperatura fondo N502
- A 21.1 Alta temperatura fondo N503
- A 21.2 Alta temperatura centro N501
- A 21.3 Alta temperatura centro N502
- A 21.4 Alta temperatura centro N503
- A 21.5 Alta temperatura TB 503
- A 21.6 Baja presión de aire a planta
- A 21.7 Baja presión de vapor a planta
- A 22.0 Alta presión TB507
- A 22.1 Baja presión TB507
- A 22.2 Alto nivel R501

Descripción del panel de control

En el cuarto de control se montarán, el PLC, el panel de operación OP7, los indicadores analógicos ZI, además de los botones y selectores para el mando manual a distancia de las válvulas de control.

La interacción del operador con el OP5 permitirá ver y modificar los parámetros de los lazos de regulación, ver los valores de flujo, nivel y temperaturas, obtener reportes rápidos de las variables de proceso y reportes específicos con cierta periodicidad.

A las teclas de funciones del OP7 se le asignarán las siguientes tareas:

F1: Mostrará los lazos de regulación PID. Se podrá seleccionar el lazo que se quiera ver o modificar en específico de 1 a 6. Una vez seleccionado el número del lazo, con la tecla SCROLL se podrá ir barriando las diferentes pantallas de 4 parámetros de este lazo y con la utilización de las claves se podrá modificar uno o varios de estos parámetros de los lazos. Los bloques de parámetros de los lazos son los siguientes:

Set- point: X
Valor real: Y
Error reg. : +/-
Yext. : +/-

$K_p =$
$T_i =$
$T_d =$
Palabra de mando

F2: Responderá a la visualización de los valores de todas las variables de temperatura, flujo y nivel, etc.

F3: Se podrán sacar reportes rápidos a pedido de las diferentes variables. Para obtener estos reportes no se hace necesario una palabra clave. Los reportes pueden ser parciales, completos, y periódicos.

F4: Con esta tecla se podrán obtener reportes del funcionamiento de toda la planta con los parámetros fundamentales del cierre de turno u otros, para tener acceso a ellos se utilizará una palabra clave.

Para el mando manual a distancia de las válvulas reguladoras se utilizará un selector de dos posiciones A/M y dos botones uno para abrir y otro para cerrar que se montarán en el cuarto de control, en el mímico según las posiciones de las válvulas en el proceso.

Capítulo 4: ANÁLISIS DE RIESGOS

Se plantea la necesidad de realizar un análisis de riesgos en la Planta de Aceites Básicos, con el objetivo de identificar y minimizar o anular en caso de ser posible los riesgos de mayor prioridad, ya sea por alta frecuencia, por graves consecuencias o ambas a la vez. La mejor opción para este análisis exhaustivo es la aplicación del método de Hazop. Este método también sirve para perfeccionar el funcionamiento de la planta.

Para la realización de este trabajo se definieron las desviaciones del proceso que se analizaron mediante el Hazop, cada desviación le corresponden una o varias causas, efectos y consecuencias, así como salvaguardas o sistema de protección, recomendaciones o actuación para su correcto funcionamiento y si es necesario se plantean observaciones.

Tabla 4.1. Análisis de riesgo.

AR-1. Planta de aceites básicos	Llenado de la refinadora R-501	<p>Nodo 1. Llenado de la refinadora R-501</p> <p><u>Parámetros:</u> flujo, presión, nivel, % de agua en el aceite.</p>
	Refinación del aceite, con Ácido Sulfúrico.	<p>Nodo 2a. Adición de ácido sulfúrico</p> <p><u>Parámetros:</u> presión, nivel.</p> <p>Nodo 2b Tratamiento con ácido sulfúrico: R-501. Parámetro: concentración (del ácido sulfúrico), tiempo agitación, nivel.</p> <p><u>Parámetros:</u> tiempo de agitación, flujo de agua, nivel.</p> <p>Nodo 2c. Baño de arrastre</p>

		<u>Parámetros:</u> flujo de agua, tiempo, volumen de agua.
	. Neutralización, con Hidróxido de Sodio.	Nodo 2. Neutralizadora: N-501, N-502, N503. Parámetro: Temperatura (del aceite), concentración (del NaOH), tiempo de tratamiento, flujo (de NaOH).
	. Lavado, con agua Industrial.	Nodo 3. Neutralizadora N-501, N-502, N-503. Parámetro: Temperatura (del aceite y del agua), volumen (de agua).
	. Secado, con aire seco.	Nodo 4. Neutralizadora N-501,N-502,N-503. Parámetro: Temperatura, velocidad de agitación.
	. Refinación con arcilla decolorante.	Nodo 5. Digestores para el tratamiento con arcilla decolorante: D-501 y D-502. Parámetro: Flujo, tiempo, vacío en el digestor, temperatura del aceite en el digestor.
	. Filtración	Nodo 6. Banco de filtros prensa: FP-501, FP-502, FP-503 y FP-504. Parámetro: Flujo, temperatura.
	. Aditivación. (solamente para el aceite Transformador).	Nodo 7. TB-501: Parámetro: Tiempo, flujo
	. Embidonado del aceite transformador	Nodo 8. TB-520 de Nitrógeno líquido
	o. Tratamiento al gudrón	Nodo 9. Tanque mezclador del gudrón ácido: M-500. Tanque de lavado de gudrón

		TK-10 Parámetros: Temperatura del agua y del gudrón.
--	--	---

A su vez, el Hazop modificado permite valorar las consecuencias y la probable frecuencia de cada desviación, para darle posibles soluciones. Todo esto permitió la realización de la Matriz de riesgo como forma de priorizar las acciones ante cada riesgo evaluado.

Para el diseño de la Matriz de riesgo se definieron cuatro zonas de seguridad operativa, en ellas se ubicaron cada uno de los peligros identificados en dependencia de la magnitud esperada de sus consecuencias y de la frecuencia probable de ocurrencia, obteniéndose la matriz de riesgo con la probabilidad de ocurrencia del daño asociado a la gravedad esperada para cada uno de los factores, según las zonas descritas a continuación.

Zona Roja: Es la **zona inadmisibles** de las consecuencias de los accidentes, situada en la parte superior derecha de la matriz, bien por la severidad de los mismos o bien por la frecuencia en que puedan de ocurrir. No se puede admitir un factor de riesgo cuyas consecuencias queden en esta zona, por eso se considera esta zona, como la de mayor prioridad de actuación (**actuación inmediata**). Se debe eliminar o disminuir sus consecuencias, por tanto aquellos puntos situados en ella deben ser objeto de actuaciones, para tratar de disminuir su frecuencia de ocurrencia o minimizar las consecuencias del accidente probable.

Aquí no se ubicó ningún **F. Riesgo**.

Zona Anaranjada: Situada entre la diagonal de la matriz (zona amarilla) y la zona roja. Corresponde a los factores de riesgo con consecuencias “**importantes**”, es decir, aquellos que aunque técnicamente responden a un nivel de protección que garantiza en gran medida una seguridad aceptable, las posibilidades de un desarrollo de un evento indeseado, son altas sin llegar a ser inadmisibles. Esta **zona es de transición a corto plazo**, y la evolución positiva o negativa del factor depende de la actuación para minimizarlos.

Aquí se ubicó (1) **F. Riesgo**. En la unidad 10 que corresponde al tratamiento de gudrón.

Zona Amarilla: Situada en la diagonal de la matriz. Corresponde a los factores de riesgo con consecuencias “**aceptadas**”, es decir, aquellos que técnicamente responden a un nivel de protección que garantiza una seguridad relativamente aceptable, donde las posibilidades de un desarrollo de un evento indeseado, están reducidas. Esta **zona es de transición a mediano o largo plazo**, y la evolución positiva o negativa del factor depende de la actuación para minimizarlos.

Aquí se ubicaron **(0) F. Riesgo**.

Zona Verde: Situada en la parte inferior izquierda de la matriz. Corresponde a los factores de riesgo con consecuencias aceptables, debido a su baja frecuencia de ocurrencia o a su insignificante efecto. Dentro de la **zona admisible** que es la de más bajo riesgo, aunque se debe conocer de la existencia de estos peligros no se requiere de medidas para minimizarlos.

Aquí se ubicaron **(30) F. Riesgo**. Presentes en todas las unidades de la planta.

La ubicación en la Matriz se muestra a continuación.

ÁREA DE RIESGO No.1							
0	0	0	0	0	≤1 mes	5	FRECUENCIA
4	0	0	0	0	>1 mes ≤1 año	4	
10	6	0	1	0	>1≤5 años	3	
5	2	3	0	0	>5≤10 años	2	
0	0	0	0	0	>10 años	1	
Daño Insignificante	Daño Limitado	Daño serio	Daño muy serio	Catastrófico	CONSECUENCIAS		

Figura 4.1. Matriz de riesgo.

Según el estudio de riesgo realizado en la planta de Aceites Básicos de la refinería se pudo comprobar que no hay áreas con daño catastrófico, solo existe un área de daño muy serio en un período de 1 a 5 años, siendo lo demás correspondiente a un período superior a los 5 años o de daño insignificante o limitado.

Conclusiones

1. El modelo dinámico de carácter fenomenológico obtenido, basado en las leyes de conservación de la masa y la energía, describe de manera adecuada el proceso que se lleva a cabo en la planta de aceites básicos de la refinería “Sergio Soto” de Cabaiguán.
2. El modelo matemático obtenido permite estudiar el comportamiento de las variables fundamentales involucradas en los principales equipos de la planta de obtención de aceites básicos, en el estado estacionario y dinámico ante la presencia de perturbaciones.
3. Las variables principales que caracterizan a cada uno de los equipos que conforman la planta de aceites básicos muestran variabilidad significativa ante cambios en las variables perturbadoras de entrada y durante el proceso.
4. De acuerdo a la naturaleza de las perturbaciones en cada equipo y los objetivos operacionales a lograr son necesarias estrategias de control automático avanzadas en la neutralizadora, el digestor y el tanque de agua de lavado, consistentes en lazos de control de Cascada, combinados con lazos simples retroalimentados.
5. Las dos alternativas de esquemas de control simuladas muestran resultados favorables desde el punto de vista de exactitud y rapidez en el control de las variables de temperatura. Siendo la segunda alternativa (Control automático en la neutralizadora y el tanque de agua de lavado) la más favorable desde el punto de vista económico por el concepto de ahorro en la inversión de la instrumentación de campo y dispositivos para el sistema de control automático.
6. En la planta de aceites básicos de la refinería no hay áreas con daño catastrófico, solo existe un área de daño muy serio en un período de 1 a 5 años, siendo lo demás correspondiente a un período superior a los 5 años o de daño insignificante o limitado.

Recomendaciones

1. Profundizar en el estudio de los fenómenos de reacción química que ocurre en la planta para enriquecer el modelo matemático propuesto.
2. Facilitarle a la planta de aceites básicos los resultados obtenidos en el capítulo 3 y que estos constituyan documentos bases ante una propuesta de instrumentación y automatización a implementarse.
3. Ampliar los estudios de estrategia de control de la planta una vez que se logre mejorar la instrumentación de campo disponible.

Referencias bibliográficas

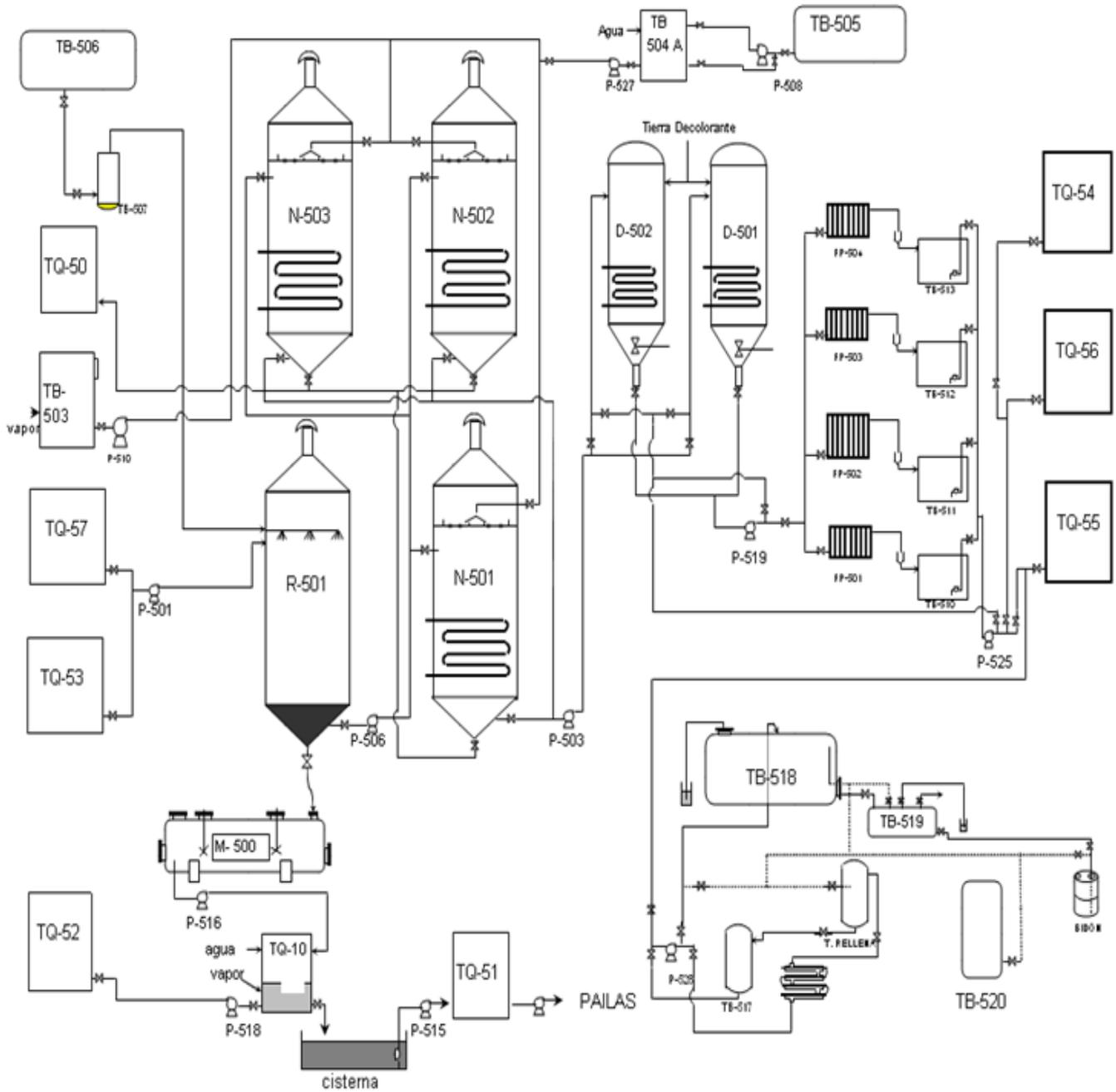
1. Ardila, O. (2017). *Estado actual y futuro de la ingeniería de control*.
2. BRETTIS. (s.f.). Tutoriales de Lubricacion. En *Modulo 8: Transformadores*.
3. *Fabricación de bases lubricantes*. (s.f.).
4. Hernandez, H. (2002).
5. Informe del Instituto Nacional de Ecología. (s.f.).
6. Ministerio, d. A. (2014). Manual técnico para el manejo de Aceites Lubricantes Usados de origen automotor e industrial. *2da*. Bogota, Colombia.
7. Perez B., L. V. (s.f.). *Aceite transformador cubano, una opción para el ahorro energetico nacional*. Centro de Investigaciones del Petroleo Refineria Sergio Soto.
8. Pozo, F. G. (2014). *Diagnóstico y propuesta de mejora del proceso de control de la calidad en una empresa que elabora aceites lubricantes automotrices e industriales utilizando herramientas y técnicas de la calidad*.
9. Seborg, D. E. (2006). *Process dynamics & control*.
10. Smith, C. a. (s.f.). *Texto básico de ICAP- II*.
11. Tapia Arias CR., E. M. (Febrero de 2014). *Repotenciacion y automatizacion de la purificadora de aceite dielectrico KLV-3A marac KATO utilizada en la empresa CELEC EP Termopichincha*. Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Carrera de Ingenieria Mecatronica.
12. *Refinería "Sergio Soto", Instrucción para el puesto de trabajo. Análisis químico del petróleo y químico analista*. (s.f.).
13. A. Palou Garcia, B. R. (2015). *Desarrollo de nuevas metodologías espectrales para el control analítico de productos y procesos petroquímicos y farmacèuticos*.
14. *Aceite transformador cubano, una opción para el ahorro energetico nacional*. (s.f.).
15. *Automatización de la planta de aceites básicos, Refineria "Sergio Soto" de Cabaiguàn*. (s.f.).

16. (Diciembre 2014). *Chemical Engineering*.
17. *Ejemplo y problemas por la Tecnología de petróleo y el Gas*. (s.f.).
18. Franklin, B. a. (s.f.). *Statistical analysis in chemistry and the chemical industry*.
19. González, P. I. (s.f.). 25. *Tabla y Gráficos. Propiedades de los fluidos, Universidad Nacional Experimental "Francisco de Miranda"*.
20. *Historia del Centro: Empresa Refinadora de Petróleo de Cabaiguán*. (s.f.).
21. <http://www.unizar.es/guiar>. (s.f.).
22. John, P. H. (1967). *Chemical engineering Hand book*. Edición Revolucionaria, Tomo I, La Habana.
23. Joseph, K. H. (1988). *Steam tables "Thermodynamic Properties of water including vapor, liquid and solid phases"*.
24. Julio, R. (1988). *Hidrodinámica y separaciones mecánicas, Tomo I*. Editorial Pueblo y Educación.
25. King, R. (1990). *Safety in the Process Industries*. Londres.
26. kobe, K. A. (s.f.). *Advances in Petroleum Chemistry and Refining*.
27. Lester C., U. (s.f.). *Petroleum production engineering*.
28. Luyben, W. L. (1996). *Process modeling, simulation and control for chemical engineers*.
29. Ministerio, d. A. (2014). *Manual técnico para el manejo de Aceites Lubricantes Usados de origen automotor e industrial. 2da*. Bogota, Colombia.
30. mouzo, J. V. (2017). *Control automàtico de temperatura para cadena de frío mediante tecnología RFID*.
31. Pavlov, K. F. (1981). *Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química*. Moscú: Mir.
32. Perez B., L. V. (s.f.). *Aceite transformador cubano, una opción para el ahorro energetico nacional*. Centro de Investigaciones del Petroleo Refineria Sergio Soto.
33. Perry's, R. H. (1999). *Chemical Engineers handbook*.

34. Peters, M. S. (s.f.). *Procedimiento para la operación de la planta de aceites básicos, Refinería "Sergio Soto" de Cabaiguán.*
35. *Planos de las diferentes secciones de la planta.* (s.f.).
36. *Procesos de transferencia de calor.* (s.f.). Edición Revolucionaria.
37. R., J. (s.f.). *Hidrodinámica y separaciones mecánicas, Tomo I.* Editorial Pueblo y Educación.
38. *Refinería "Sergio Soto", Instrucción para el puesto de trabajo. Análisis químico del petróleo y químico analista.* (s.f.).
39. *Revista Petróleo Internacional, (mayo-junio 1994), Volumen 52 #3.* (s.f.).
40. *Revista Petróleo Internacional, (nov-dic 1993), Volumen 51 # 6.* (s.f.).
41. Rivkin, S. L. (s.f.). *Propiedades termodinámicas de los gases.*
42. Rolando, V. P. (1981). *Principios de la refinación de petróleo.* Editorial Orbe.
43. S. Mora, S. V. (2017). *Producción más limpia (p+ l): una estrategia de mejoramiento ambiental en el sector aceitero de Colombia. Estudio de caso.*
44. Sánchez, J. A. (2013). *Instrumentación y control avanzado de procesos.* Díaz de Santos.
45. Seborg, D. E. (2006). *Process dynamics & control.*
46. Smith, C. a. (s.f.). *Texto básico de ICAP- II.*
47. Tapia Arias CR., E. M. (Febrero de 2014). *Repotenciación y automatización de la purificadora de aceite dielectrico KLV-3A marac KATO utilizada en la empresa CELEC EP Termopichincha.* Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Carrera de Ingeniería Mecatronica.
48. www.azsa.es. (s.f.).
49. www.buenaspracticas.com. (s.f.).
50. www.vaxasoftware.com. (s.f.).
51. www.vaxasoftware.com. (s.f.).

ANEXOS

Anexo 1: Diagrama de flujo de la refinería



Anexo 2: Balances de masa y Energía según metodología de cálculo empleada en la Refinería “Sergio Soto” de Cabaiguán:

Planteamiento de los balances de materiales y de energía en los equipos

A continuación se muestra un ejemplo del cálculo a partir del destilado del crudo de Jatibonico.

Balance de materiales. Proceso de Refinación con ácido sulfúrico

Datos:

$$MP' = 100m^3$$

1ra adición de (AS): 1%v/v

$$AS'_1 = 1m^3$$

2da-4ta(AS'): 2%v/v

Se sabe que por cada decantación de gudrón, se pierden alrededor de 300lt, que son $0,3m^3$. Por lo tanto aceite ácido

$$(AAC') = 100(0.3 \cdot 4) = 98,8m^3$$

$$\text{Agua de lavado (AL')} = 2m^3$$

$$\text{Aceite ácido y húmedo (AACH')} = 98m^3$$

$$AS'_2 = 1,994m^3 \approx 2m^3$$

$$AS'_3 = 1,988m^3 \approx 2m^3$$

$$AS'_4 = 1,982m^3 \approx 2m^3$$

$$AS'_{\text{Total}} = 6m^3$$

Balance de materiales. Proceso de tratamiento con Sosa

Datos:

Conversión de unidades

$$MP' = 98m^3$$

Materia prima (MP)

$$X_{mp} = 0$$

- Con °API Tabla 1-12 pág. 1-28. Perry

$$T = 27^\circ C$$

Por interpolación, gravedad específica:

$$^\circ API = 17,5$$

$$G_e = 949,6 \text{ kg/m}^3$$

$$DS' = 1,856m^3$$

Disolución de sosa (DS)

- Con °API y T (°F) Manual Fischer/TAG

$$X_{ds} = 0,8468$$

Por interpolación, Factor de Reducción de Volumen, F.R.V

$$F.R.V = 0,9920$$

$$T_{ds} = 27^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Conc} = 15,32 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{MP} = \text{MP}' * \text{F.R.V} * \text{GE}$$

$$\text{AL}' = 124\text{m}^3$$

$$\text{MP} = 98\text{m}^3 * 0,9920 * 949,6$$

$$\text{Ta} = 95^{\circ}\text{C}$$

$$\text{MP} = 93069,92\text{kg}$$

$$\text{Tp. Agit} = 5,3\text{h}$$

$$\text{Ac}' = 84,47\text{m}^3$$

- con T ($^{\circ}\text{C}$) y Conc (%) Tabla 3-92 pág. 3-78. Perry

$$\text{Tac}_1 = 85^{\circ}\text{C}$$

Por interpolación, densidad de la solución

$$^{\circ}\text{API} = 17,4$$

$$\rho = 1163,8 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Tp. Trat} = 82,33\text{h}$$

$$\text{DS} = \text{DS}' * \rho$$

$$\text{Xac}_1 = 4.10^{-3}$$

$$\text{DS} = 1,856\text{m}^3 * 1163,8 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{DS} = 2160,01 \text{ kg}$$

Agua de lavado (AL)

-Con T ($^{\circ}\text{C}$) Tabla 3-29 pág. 3-71 Perry

densidad del agua a 95°C

$$\rho = 961,92 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{AL} = \text{AL}' * \rho$$

$$\text{AL} = 124\text{m}^3 * 961,92 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{AL} = 119278,08 \text{ kg}$$

Aire de agitación (AA)

Flujo del compresor = $16\text{m}^3/\text{min}$

$$\text{AA}' = 16\text{m}^3/\text{min} * 60\text{min}/1\text{h} * 960\text{m}^3/\text{h} * 5,3\text{h} = 5088\text{m}^3$$

Densidad del aire, Tabla V pág 548 Pavlov

$$\rho = 1,293 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{AA} = \text{AA}' * \rho$$

$$\text{AA} = 5088\text{m}^3 * 1,293 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{AA} = 6578,78 \text{ kg}$$

Aceite húmedo (Ac)

- Con $^{\circ}\text{API}$ Tabla 1-12 pág 1-28 Perry

Por interpolación, gravedad específica, $G_e = 950,3 \text{ kg/m}^3$

- Con $^{\circ}\text{API}$ y $T(^{\circ}\text{F})$

Por interpolación, factor de reducción de volumen, $F.R.V = 0,9531$

$$Ac_1 = Ac' * F.R.V * G_e$$

$$Ac_1 = 84,47 \text{m}^3 * 0,9531 * 950,3 \text{ kg/m}^3$$

$$Ac_1 = 76507,09 \text{ kg}$$

Aire de salida (AS1)

$$As_1 = AA$$

$$As_1 = 6578,78 \text{ kg}$$

Balance total

$P = ?$ (Cantidad de purga total)

$$MP + AL + AA = Ac_1 + As_1 + P$$

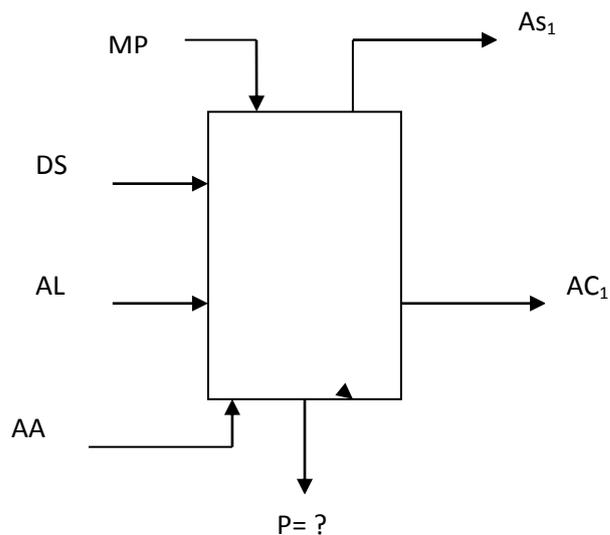
$$P = MP + DS + AL + AA - Ac_1 - As_1$$

$$AA = As_1$$

$$P = MP + DS + AL - Ac_1$$

$$P = 75438,44 \text{ kg} + 2160,01 \text{ kg} + 119278,08 \text{ kg} - 58354,43 \text{ kg}$$

$$P = 138522,1 \text{ kg (cant. Purga total)}$$



Balance parcial del agua

$$X_p = ?$$

$$MP * X_{mp} + DS * X_{ds} + AL * X_{a_1} + AA * X_{aa} = Ac_1 * X_{ac_1} + AS_1 * X_{as_1} + P * X_p$$

$$X_{mp} = 0$$

$$X_{a_1} = 1$$

$$X_{aa} = X_{as_1}$$

$$DS * X_{ds} + AL = Ac_1 * X_{ac_1} + P * X_p$$

$$X_p = \frac{DS * X_{ds} + AL - Ac_1 * X_{ac_1}}{P}$$

$$X_p = \frac{2160,01 * 0,8468 + 119278,08 - 58354,43 * 0,004}{138522,1}$$

$$X_p = 0,8725954 \text{ (Fracción de humedad de la purga)}$$

$$A_p = P * X_p$$

$$A_p = 138522,1 * 0,8725954$$

$$A_p = 120873,74 \text{ Kg (Cantidad de agua de la purga)}$$

$$J_{YP} = P - A_p$$

$$J_{YP} = 138522,1 - 120873,74$$

$$J_{YP} = 17648,36 \text{ Kg (Cantidad de jabones y pérdidas que salen por la purga)}$$

Balance de energía

- Cálculo de las entalpías
- Entalpía de la materia prima (H_1)

$$H_1 = \frac{1}{\sqrt{Ge}} \langle 0,403(t) + 0,000405(t^2) \rangle \quad (\text{Ejemplo y problemas por la Tecnología de}$$

petróleo y el Gas)

$$H_1 = \frac{1}{\sqrt{0,9496}} \langle 0,403(27) + 0,000405(27 * 27) \rangle$$

$$H_1 = 11,4678 \text{ Kcal/Kg} * 4,18$$

$$H_1 = 47,9358 \text{ KJ/Kg}$$

- Entalpía de la disolución de sosa (H_2)

Fig. 3-40 pág. 3-204 Perry

- Con 0,1532 de concentración de la solución a 80,6 °F

$$H_2 = 40 \text{ BTU/lb}$$

$$1 \text{ BTU/lb} = 2326 \text{ J/Kg (Tabla 1-7 pág. 1-24 Perry)}$$

$$H_2 = 93040 \text{ J/Kg} \frac{1 \text{ KJ}}{1000 \text{ J}}$$

$$H_2 = 93,04 \text{ KJ/Kg}$$

- Entalpía del agua (H_3)

$$H_3 = C_p * \Delta t$$

$$H_3 = C_p(t - t_r)$$

$$C_p \text{ del agua} = 4,21 \text{ KJ/Kg } ^\circ\text{C}$$

(www.vaxasoftware.com)

$$H_3 = 4,21/\text{Kg } ^\circ\text{C} * (95 - 0) ^\circ\text{C}$$

$T_r =$ Temperatura de referencia, $^\circ\text{C}$

$$H_3 = 399,95 \text{ KJ/Kg}$$

- Entalpía del aire de agitación (H_4)

A 35°C Tabla III-2 pág. 29 (Propiedades termodinámicas de los gases S. L. Rivkin)

$$H_4 = 308,35 \text{ KJ/Kg}$$

- Entalpía del aceite húmedo (H_5)

$$H_5 = \frac{1}{\sqrt{Ge}} \langle 0,403(t) + 0,000405(t^2) \rangle \quad (\text{Ejemplo y problemas por la Tecnología de}$$

petróleo y el Gas).

$$H_5 = \frac{1}{\sqrt{0,9503}} \langle 0,403(85) + 0,000405(85 * 85) \rangle$$

$$H_5 = 38,1403 \text{ Kcal/Kg} * 4,18$$

$$H_5 = 159,42 \text{ KJ/Kg}$$

- Entalpía del aire a la salida (H_6)

A 85°C Tabla III -2 pág. 30 (Propiedades termodinámicas de los gases S. L. Rivkin)

$$H_6 = 358,65 \text{ KJ/Kg}$$

- Entalpía de las purgas

➤ Para el agua (H_7)

$$H_7 = C_p * \Delta t$$

$$H_7 = 4,18 \text{ KJ/Kg } ^\circ\text{C} * (85 - 0) ^\circ\text{C}$$

$$H_7 = 355,3 \text{ KJ/Kg}$$

➤ Para los jabones y pérdidas (H_8)

$$H_8 = H_5$$

$$H_8 = 159,42 \text{ kJ/kg}$$

Nota: Todas las entalpías están referidas a $^{\circ}\text{C}$.

$$Q_g + Q_c = 0$$

$$Q_{gt} = \sum m * H_e - \sum m * H_s$$

$$Q_{gt} = MP * H_1 + DS * H_2 + AL * H_3 + AA * H_4 - [Ac_1 * H_5 + AS_1 * H_6 + Ap * H_7 + JYP * H_8]$$

$$Q_{gt} = 75438,44 * 47,9358 + 2160,01 * 93,04 + 119278,08 * 399,95 + 6578,78 * 308,35 - [58354,43 * 159,42 + 6578,78 * 358,65 + 120873,74 * 355,3 + 17648,3 * 159,42]$$

$$Q_{gt} = - 3871270 \text{ KJ (Calor ganado por la masa de aceite)}$$

Balace de materiales en el proceso de secado

$$Ac'_1 = 83.2 \text{ m}^3$$

Conversión de unidades

$$TAc_1 = 85^{\circ}\text{C}$$

- Aire de secado (AZ)

$$^{\circ}\text{API} = 17,4$$

Flujo del compresor = $16 \text{ m}^3/\text{min}$

$$Ac'_2 = 82,54 \text{ m}^3$$

$$AZ = 16 \text{ m}^3/\text{min} * 60 \text{ min}/1 \text{ h} = 960 \text{ m}^3/\text{h} * 9,7 \text{ h} = 9312 \text{ m}^3$$

$$TAc_2 = 90^{\circ}\text{C}$$

Densidad del aire, Tabla V pág. 548 Pavlov

$$^{\circ}\text{API} = 17,5$$

$$\rho = 1,293 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

$$Tpo \text{ Sec.} = 9,7 \text{ h}$$

$$AZ = AZ' * \rho$$

$$AZ = 9312 \text{ M}^3 * 1,293 \text{ M}^3$$

$$AZ = 12040,41 \text{ Kg}$$

- Aceite seco (Ac_2)

- Con $^{\circ}\text{API}$ Tabla 1-12 pág 1-28 Perry

Por interpolación, $Ge = 949,6 \text{ Kg}/\text{m}^3$

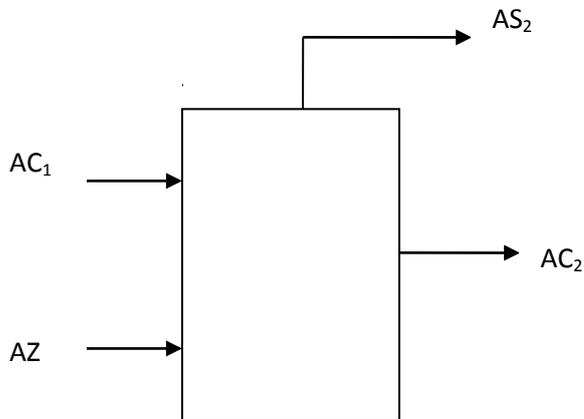
- Con $^{\circ}\text{API}$ y $T(^{\circ}\text{F})$ Manual Fisher/TAG

Por interpolación, factor de reducción de volumen

$$F.R.C = 0,9498$$

$$AC_2 = Ac'_2 * F.R.C * Ge$$

$$AC_2 = 68950,39 \text{ Kg}$$



Balance total

$$AC_1 + AZ = AC_2 + AS_2$$

$$AS_2 = ?$$

$$AS_2 = AC_1 + AZ - AC_2$$

$$AS_2 = 58354,43 + 12040,41 - 57953,51$$

$$AS_2 = 12441,33 \text{ Kg (Cantidad de aire a la salida)}$$

Balance parcial del agua

$$AC_1 * X_{ac_1} + AZ * X_{az} = AC_2 * X_{ac_2} + AS_2 * X_{as_2}$$

$$X_{as_2} = ?$$

$$X_{ac_2} = 0$$

$$AC_1 * X_{ac_1} + AZ * X_{az} = AS_2 * X_{as_2}$$

$$X_{as_2} = \frac{58354,43 * 0,004 + 12040,41 * 0,00002}{12441,33}$$

$$X_{as_2} = 0,018781 \text{ (Fracción de humedad con que sale el aire)}$$

$$A_{as_2} = AS_2 * X_{as_2}$$

$$A_{as_2} = 233,66 \text{ Kg (Cantidad de agua que sale con el aire a la salida)}$$

$$P_{as} = AS_2 - A_{as_2} - AZ$$

$$P_{as} = 167,26 \text{ kg (Pérdidas de aceite en el secado)}$$

Balance de energía

- Cálculo de las entalpías

- Entalpía del aire de secado (H_9)

A 30°C Prop. Termod de los gases S.L.Rickin

Tabla III – 2 Pág. 29

$$H_9 = 303,33 \text{ kJ/kg}$$

- Entalpía del aceite seco (H_{10})

$$H_{10} = \frac{1}{\sqrt{0,9496}} [0,403(t) + 0,000405(t * t)] \text{ (Ejemplos y problemas para la tecnología de}$$

refinación de Petróleo y Gas)

$$H_{10} = 40,5827 \text{ kcal/kg} * 4,18$$

$$H_{10} = 169,63 \text{ kJ/kg}$$

- Entalpía del aire a la salida (H_{11})

A 90°C Prop. Termod de los gases S. L. Rivkin

$$H_{11} = 363,69 \text{ kJ/kg}$$

- Todas las entalpías están referidas a 0°C.

$$Q_g - Q_c = 0$$

$$Q_{gs} = AC_1 * H_5 + AZ * H_9 - [AC_2 * H_{10} + AS_2 * H_{11}]$$

$$Q_{gs} = 1400361 \text{ kJ (Calor ganado por el aceite seco)}$$

$$Q_{gN} = Q_{gs} + Q_g$$

$$Q_{gN} = -1400361 \text{ kJ} - 3871270 \text{ kJ}$$

$$Q_{gN} = -5271631 \text{ kJ}$$

Balance de materiales en el proceso de digestión

$$T_c' = 48 \text{ sacos}$$

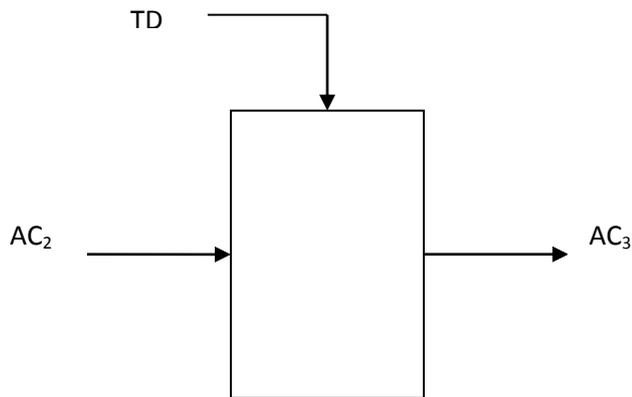
$$T_{cal}' = 16 \text{ sacos}$$

$$P_{tc} = 46 \text{ Kg}$$

$$P_{t cal} = 15 \text{ Kg}$$

$$AC_2' = 83,1 \text{ m}^3$$

°API= 17, 5



Tiempo dando vacío= 1,7 h0

Presión de vacío= 0,6 kg/cm²

Tiempo para alcanzar 100 °C= 5,32 h

Presión en el digester= 0

Tiempo trabajando a 100°C= 3 h

Tiempo total de digestión= 10,02 h

Cálculo de TD

$$T_c = T_c' * P_{tc}$$

$$T_c = 48 * 46$$

$$T_c = 2208 \text{ kg (Cantidad de tierra)}$$

$$T_{cal} = T_{cal}' * P_{tcal}$$

$$T_{cal} = 240 \text{ kg (Cantidad de Cal)}$$

$$TD = T_c + T_{cal}$$

$$TD = 2208 + 240$$

$$TD = 2448 \text{ kg (Cantidad de tierra decolorante)}$$

Balance total

$$AC_2 + TD = AC_3$$

$$AC_3 = 71398,39 \text{ kg (Cantidad de tierra más aceite a la salida del digester)}$$

Balance de energía

Por cada 100m³ de R3 que entra al proceso llegan 98m³ a la neutralizadora y se necesitan 4,9 veces el volumen en los digestores, que son 5 corridas en los digestores por lo tanto el calor para un digester se multiplicará por 4,9.

$$H_{12} = \frac{1}{\sqrt{0,9496}} [0,403(t) + 0,000405(t * t)] \text{ (Ejemplos y Tecnología para refinación de}$$

Petróleo y Gas)

$$H_{12} = 196,43 \text{ kJ/kg}$$

- Todas las entalpías están referidas a °C.

$$Q_g + Q_c = 0$$

$$Q_{gd} = \sum M * H_e - \sum M * H_s$$

$$Q_{gd} = AC_2 * H_{10} + TD * H_{TD} - AC_3 * H_{12}$$

$$H_{TD} = 0$$

$$Q_{gd} = AC_2 * H_{10} - AC_3 * H_{12}$$

$$Q_{gd} = -4208469 \text{ kJ (Calor ganado por la mezcla en el digestor)}$$

$$\text{Para } 98\text{m}^3: Q_{gd} = -4208469 \text{ kg} * 4,9$$

$$Q_{gd} = -18306840,15 \text{ kJ}$$

Anexo 3: Tabla de selección de reguladores automáticos.

Tabla con los criterios heurísticos para la selección de reguladores automáticos

TABLA PARA LA SELECCIÓN DEL REGULADOR AUTOMATICO		
PROCESO *	REQUERIMIENTOS DE LA CALIDAD DE LA REGULACION.	REGULADOR**
<u>PROPORCIONAL</u> $G(s) = K$	a) CONTROL PROMEDIO. (DP $\neq 0$) b) CONTROL EXACTO. Se obtiene rapidez de respuesta en ambos casos ajustando la Kc.	a) P b) PI o I
<u>PRIMER ORDEN</u> $G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$	a) CONTROL PROMEDIO (DP $\neq 0$) . b) CONTROL EXACTO (DP = 0) .	a)P b)PI

	Se obtiene rapidez de respuesta ajustando Kc y Ti o Kc.	
<u>SEGUNDO ORDEN</u> $G(s) = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$	a) CONTROL EXACTO Y LENTO. b) CONTROL EXACTO Y RAPIDO. c) CONTROL PROMEDIO.	a) PI b) PID c) P o PD.
<u>ALTO ORDEN</u> $G(s) = \frac{K e^{-\tau_o s}}{\tau s + 1}$	a) CONTROL EXACTO Y RAPIDO. (0.6 ≥ τ_o/τ ≥ 0.25) b) CONTROL EXACTO Y RAPIDO. (τ _o /τ < 0.25) c) CONTROL EXACTO Y RAPIDO (τ _o /τ > 0.6)***	a) PID. b) PI. c) PI o PID

Anexo 4: Programas de simulación.

%Programa de Simulación de Sistema de Control Automático

%Disturbios

Deneut=1.5; %Perturbación: Temperatura a la entrada de la Neutralizadora

Dineut=0.05; %Perturbación: Presión de Vapor en la Neutralizadora

Dediges=Ceneut; %Perturbación: Temperatura del aceite proveniente de la Neutralizadora

Didiges=0.05; %Perturbación: Presión del Vapor en el Digestor

Detaglav=10; %Perturbación: Temperatura inicial del agua de lavado

Ditaglav=0.05; %Perturbación: Presión del vapor en el Tanque de Lavado

%Alternativas de Control Automático

Mineut=Kcineut*Eineut; %Con Control Automático en la Neutralizadora

%Mineut=0; %Sin Control Automático en la Neutralizadora

Midiges=Kcidiges*Eidiges; %Con Control Automático en el Digestor

%Midiges=0; %Sin Control Automático en el Digestor

Mitaglav=Kcitaglav*Eitaglav; %Con Control Automático en el Tanque de Lavado

%Mitaglav=0; %Sin Control Automático en el Intercambiador

%NEUTRALIZADORA

Reneut=0;

Re1neut=Reneut*Kmeneut;

%Regulador PID exterior de la cascada.

Eeneut=Re1neut-Cmeneut;

Meneut=Pneut+Kc2neut/Ti2neut*Ineut+Kc2neut*Td2neut*Dneut;

Pneut=Kc2neut*Eeneut;

Ineut=int(Eeneut par:0);

Dneut=Dif(Eeneut par:0);

%Cálculo de los parámetros de Matsuburo para el lazo exterior.

%Si Tpe1neut>Tpe2neut.

Kneut=Kscineut*Kpmeneut*Kmeneut;

Taodeneut=0.000833;

Taoeneut=Tpe1neut;

rtaoneut =Taodeneut/Taoeneut;

%Cálculo de los parámetros por el método de la curva de reacción.

%Ecuaciones de López.

$Kc2neut = 1.435 / Kneut * (rtaoneut)^{-0.921}$;

$Ti2neut = Taoeneut / 0.878 * (rtaoneut)^{0.749}$;

$Td2neut = 0.482 * Taoeneut * (rtaoneut)^{1.137}$;

%Sistema de Control Interior de la Cascada

$Rineut = Meneut$;

$Eineut = Rineut - Cmineut$;

$Kcineut = 9 / (Kmineut * Kvneut)$;

$Cimneut = \text{inf}(Mineut \text{ par}: 0, Kpmi1neut, Tpineut)$;

$Kpmi1neut = Kvneut$;

$Kvneut = -31.25$;

$Kpdineut = 329.55$;

$Kineut = Kpmi1neut * Kmineut * Kcineut$;

$Kscineut = Kpmi1neut * Kcineut / (1 + Kineut)$;

$Tscineut = 0.1 * Tpineut$;

$Tpineut = 0.00833$;

$Cidneut = Kpdineut * Dineut$;

$Cineut = Cidneut + Cimneut$;

$Wv1_SC = Wv1s + Cineut$;

$Cmineut = Kmineut * Cineut$;

$Kmineut = 0.04$;

%Funciones de Transferencia del Proceso del Lazo exterior

$Cem1neut = \text{Inf}(Cineut \text{ par}: 0, Kpmeneut, Tpe1neut)$;

$Kpmeneut = 3.63$;

```

Kpdneut=1;
Tpe1neut=0.41;
Ced1neut=inf(Deneut par:0,Kpdneut,Tpe1neut);
Ceneut=Cem1neut+Ced1neut;
Tneut_SC=Tneut_SCs+Ceneut;
Tneut_SCs=80;
%Retroalimentacion del Lazo exterior.
Cmeneut=Kmeneut*Ceneut;
Kmeneut=0.08;

%Valores Estables
Wv1s=((5271631/0.85)/landa_neut)/8; %323.16;
Tneuts=80;
Tis=25;
Pv_neuts=0.9806; %Presión del Vapor en la Neutralizadora (MPa)
U=7106.4; %Coeficiente total de transferencia de calor (kJ/h-m^2-oC)
landa_neut=2398.95; %Calor Latente del Vapor en la Neutralizadora (kJ/kg)

%Criterios de optimización.
laeneut=int(abs(Eeneut) par:0);
%lse=int(Ee^2 par:0);
%ltae=int(abs(Ee)*t par:0);
%ltse=int(Ee^2*t par:0);

%DIGESTOR
Rediges=0;
Re1diges=Rediges*Kmediges;
%Regulador PID exterior de la cascada.

```

```

Eediges=Re1diges-Cmediges;
Mediges=Pdiges+Kc2diges/Ti2diges*Idiges+Kc2diges*Td2diges*Ddiges;
Pdiges=Kc2diges*Eediges;
Idiges=int(Eediges par:0);
Ddiges=Dif(Eediges par:0);
%Cálculo de los parámetros de Matsuburo para el lazo exterior.
%Si Tpe1diges>Tpe2diges.
Kdiges=Kscidiges*Kpmediges*Kmediges;
Taodediges=0.000833;
Taoediges=Tpe1diges;
rtaodiges =Taodediges/Taoediges;

%Cálculo de los parámetros por el método de la curva de reacción.
%Ecuaciones de López.
Kc2diges=1.435/Kdiges*(rtaodiges)^-0.921;
Ti2diges=Taoediges/0.878*(rtaodiges)^0.749;
Td2diges=0.482*Taoediges*(rtaodiges)^1.137;

%Sistema de Control Interior de la Cascada
Ridiges=Mediges;
Eidiges=Ridiges-Cmidiges;
Kcidiges=9/(Kmidiges*Kvdiges);
Cimdiges=inf(Midiges par:0,Kpmi1diges, Tpidiges);
Kpmi1diges=Kvdiges;
Kvdiges=-118.75;
Kpdidiges=305.9;
Kidiges=Kpmi1diges*Kmidiges*Kcidiges;
Kscidiges=Kpmi1diges*Kcidiges/(1+Kidiges);

```

```

Tscidiges=0.1*Tpidiges;
Tpidiges=0.0083;
Ciddiges=Kpdidiges*Didiges;
Cidiges=Ciddiges+Cimdiges;
Wv2_SC=Wv2s+Cidiges;
Cmidiges=Kmidiges*Cidiges;
Kmidiges=0.053;

%Funciones de Transferencia del Proceso del Lazo exterior.
Cem1diges=Inf(Cidiges par:0,Kpmediges,Tpe1diges);
Kpmediges=0.0193;
Kpdediges=1;
Tpe1diges=0.31;
Ced1diges=inf(Dediges par:0,Kpdediges,Tpe1diges);

Cediges=Cem1diges+Ced1diges;
Tdiges_SC=Tdiges_SCs+Cediges;
Tdiges_SCs=100;
%Retroalimentacion del Lazo exterior.
Cmediges=Kmediges*Cediges;
Kmediges=0.08;

%Valores estables
Pv_digess=0.9896; %Presión del Vapor en el Digestor (MPa)
Tdigess=100;
landa_diges=2398.95; %Calor Latente del Vapor en el Digestor (kJ/kg)
Wv2s=((18306840.15/0.85)/landa_diges)/5;
%Criterios de optimización.

```

```

laediges=int(abs(Eediges) par:0);

%TANQUE DE LAVADO

Retaglav=0;

Re1taglav=Retaglav*Kmetaglav;

%Regulador PID exterior de la cascada.

Eetaglav=Re1taglav-Cmetaglav;

Metaglav=Ptaglav+Kc2taglav/Ti2taglav*Itaglav+Kc2taglav*Td2taglav*Dtaglav;

Ptaglav=Kc2taglav*Eetaglav;

Itaglav=int(Eetaglav par:0);

Dtaglav=Dif(Eetaglav par:0);

%Cálculo de los parámetros de Matsuburo para el lazo exterior.

%Si Tpe1taglav>Tpe2taglav.

Ktaglav=Kscitaglav*Kpmetaglav*Kmetaglav;

Taodetaglav=0.000833;

Taoetaglav=Tpe1taglav;

rtaotaglav=Taodetaglav/Taoetaglav;

%Cálculo de los parámetros por el método de la curva de reacción.

%Ecuaciones de López.

Kc2taglav=1.435/Ktaglav*(rtaotaglav)^-0.921;

Ti2taglav=Taoetaglav/0.878*(rtaotaglav)^0.749;

Td2taglav=0.482*Taoetaglav*(rtaotaglav)^1.137;

%Sistema de Control Interior de la Cascada

Ritaglav=Metaglav;

Eitaglav=Ritaglav-Cmitaglav;

Kcitaglav=9/(Kmitaglav*Kvtaglav);

Cimtaglav=INF(Mitaglav par:0,Kpmi1taglav,Tpitaglav);

```

```

Kpmi1taglav=Kvtaglav;
Kvtaglav=-56.25;
Kpditaglav=407.9;
Kitaglav=Kpmi1taglav*Kmitaglav*Kcitaglav;
Kscitaglav=Kpmi1taglav*Kcitaglav/(1+Kitaglav);
Tscitaglav=0.1*Tpitaglav;
Tpitaglav=0.0083;
Cidtaglav=Kpditaglav*Ditaglav;
Citaglav=Cidtaglav+Cimtaglav;
Wv3_SC=Wv3s+Citaglav;
Cmitaglav=Kmitaglav*Citaglav;
Kmitaglav=0.04;

%Funciones de Transferencia del Proceso del Lazo exterior.
Cem1taglav=Inf(Citaglav par:0,Kpmetaglav,Tpe1taglav);
Kpmetaglav=0.07;
Kpdetaglav=0.87;
Tpe1taglav=0.87;
Ced1taglav=inf(Detaglav par:0,Kpdetaglav,Tpe1taglav);
Cetaglav=Cem1taglav+Ced1taglav;
Ttaglav_SC=Ttaglav_SCs+Cetaglav;
Ttaglav_SCs=90;

%Retroalimentacion del Lazo exterior.
Cmetaglav=Kmetaglav*Cetaglav;
Kmetaglav=0.08;

%Valores estables
Pv_taglavs=0.9896; %Presión del Vapor en el Digestor (MPa)
Ttaglavs=90;

```

landa_taglav=2398.95; %Calor Latente del Vapor en el Digestor (kJ/kg)

Wv3s=1755600/landa_taglav;

%Criterios de optimización.

laetaglav=int(abs(Eetaglav) par:0);

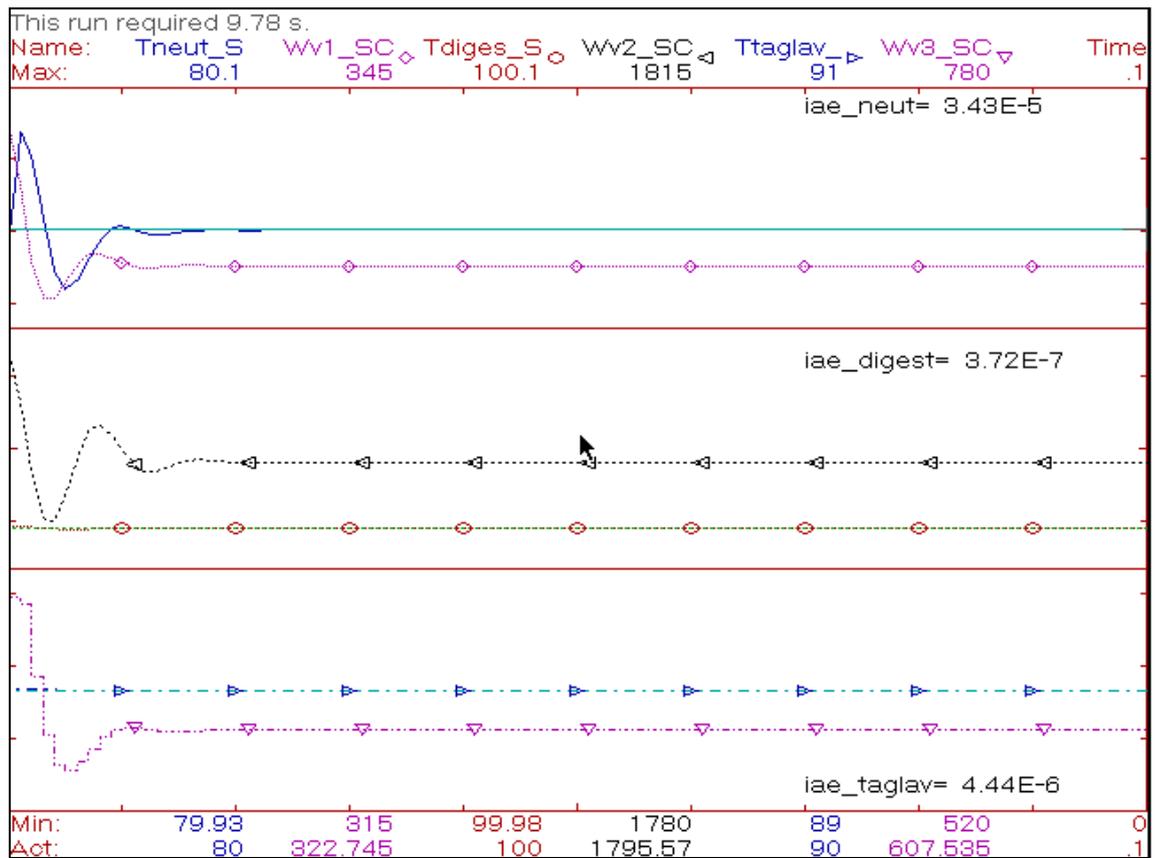
%Visualización en pantalla

s1=DPV(laeneut par:0.7,0.9,6,IAE_neut=);

s2=DPV(laediges par:0.7,0.6,6,IAE_digest=);

s3=DPV(laetaglav par:0.7,0.1,6,IAE_taglav=);

Anexo 5: Simulación de la Alternativa 1: Control Automático en la Neutralizadora + Digestor + Tanque de agua de lavado.



Anexo 6: Simulación de la Alternativa 2: Control Automático en la Neutralizadora+ Tanque de agua de lavado.

