

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIAS DE MEJORAMIENTO DEL
SISTEMA AUTOMATIZADO DE ESTABILIZACIÓN DEL PH DE AGUA
RESIDUAL INDUSTRIAL, EN UN TANQUE DE NEUTRALIZACIÓN DE LA
PLANTA DPA EN VALLEDUPAR**

DAVID RUMIÉ DE LA HOZ

FREDY MCNISH BERNAL

JHONATTAN CANO VARGAS

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARTAGENA DE INDIAS

2011

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIAS DE MEJORAMIENTO DEL
SISTEMA AUTOMATIZADO DE ESTABILIZACIÓN DEL PH DE AGUA
RESIDUAL INDUSTRIAL, EN UN TANQUE DE NEUTRALIZACIÓN DE LA
PLANTA DPA EN VALLEDUPAR**

DAVID RUMIÉ DE LA HOZ

FREDY MCNISH BERNAL

JHONATTAN CANO VARGAS

**TRABAJO INTEGRADOR PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
ESPECIALISTA EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS
INDUSTRIALES**

DIRECTOR

DR. JOSE LUIS VILLA RAMIREZ

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARTAGENA

2011

Cartagena de Indias D.T. y C., Octubre 26 de 2011

Señores:

Comité Evaluador

Facultad de Ingeniería

Apreciados señores:

Por medio de la presente me permito informarles que el proyecto integrador titulado **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIAS DE MEJORAMIENTO DEL SISTEMA AUTOMATIZADO DE ESTABILIZACIÓN DEL PH DE AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL, EN UN TANQUE DE NEUTRALIZACIÓN DE LA PLANTA DPA EN VALLEDUPAR”** ha sido desarrollado de acuerdo a los objetivos establecidos.

Como autores del proyecto consideramos que el trabajo es satisfactorio y amerita ser presentado para su evaluación.

Atentamente,

David Rumié De La Hoz

Jhonattan Cano Vargas

Fredy McNish Bernal

Cartagena de Indias D.T. y C., Octubre 26 de 2011

Señores:

Comité Evaluador

Facultad de Ingeniería

Apreciados señores:

Por medio de la presente me permito informarles que el proyecto integrador titulado **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIAS DE MEJORAMIENTO DEL SISTEMA AUTOMATIZADO DE ESTABILIZACIÓN DEL PH DE AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL, EN UN TANQUE DE NEUTRALIZACIÓN DE LA PLANTA DPA EN VALLEDUPAR”** ha sido desarrollado de acuerdo a los objetivos establecidos.

Como director del proyecto considero que el trabajo es satisfactorio y amerita ser presentado para su evaluación.

Atentamente,

Dr. José Luis Villa Ramírez

Nota de aceptación

Firma de presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Cartagena, Octubre 26 de 2011

DEDICATORIAS

*Quiero dedicarle este trabajo a Dios
que me ha dado las ganas y la fortaleza para asumir este reto,
a mis Padres por estar ahí apoyándome (en especial a mi madre por su ayuda)
y a mis compañeros y amigos, por su constante cooperación.*

Fredy McNish Bernal

AGRADECIMIENTOS

Primero, queremos agradecer a DIOS por guiarnos y permitirnos tener esta gran oportunidad para demostrar mediante este trabajo el esfuerzo que hemos realizado por lograr nuestros sueños.

Quisiéramos también darles las gracias a todos los profesores de la especialización, por brindarnos su apoyo incondicional y por guiarnos y ayudarnos a través de todo el proyecto.

Y no podemos de dejar de agradecer a nuestros compañeros y todas las personas que nos dieron su cooperación cuando los necesitamos, ya que también fueron parte de este proyecto y ayudaron a que este fuera posible.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	1
2. Esquema de operación de la planta (estado Inicial)	3
2.1. Operación en modo manual.....	9
2.1.1. Bomba de recirculación.....	9
2.1.2. Válvula desviación producto.....	9
2.1.3. Botones de adición manual de químicos.....	10
2.2. Operación en modo automático.....	10
3. Marco teórico (estado del arte)	13
3.1. Descripción del comportamiento del pH	13
3.1.1. Relación ácido fuerte y base fuerte	17
3.1.2. Relación ácido débil y base fuerte.....	18
3.1.3. Relación ácido fuerte y base débil.....	19
3.1.4. Relación ácido débil y base débil	20
3.1.5. Análisis de la relación del proceso actual.....	21
3.2. Técnicas para el control del pH	21
3.2.1. Control clásico.....	23
3.2.2. Control por lotes	24

3.2.3. Control pre alimentado	25
3.2.4. Control por rango dividido	27
3.2.5. Control a implementar	28
4. Análisis de la situación INICIAL	30
5. Descripción de la solución	36
5.1. Implementación de un rango de SetPoint de pH para el drenado	37
5.2. Implementación de doble rango de dosificación y ajuste de los tiempos de dosificación.....	39
5.3. Instalación de agitador.....	40
5.4. Revisión de secuencias de los aseos y proceso productivo para limitar la cantidad de líquido que debe ingresar al tanque.....	43
5.5. Control en las válvulas del colector de entrada	44
5.6. Cambio en el montaje físico del sensor de nivel.....	45
5.7. Cambio del switch de nivel con mejor tecnología	47
5.8. Reubicación de puntos de dosificación de químicos	48
5.9. Diseño e Instalación de un aspersor para el mezclado la homogenización de los líquidos	48
5.10. Implementación de SetPoint de nivel para inicio del proceso de neutralización y bloqueo de aseos	49

5.11.	Validación de pH OK para inicio de la etapa de drenaje	50
6.	Esquema de operación FINAL de la planta	52
6.1.	Operación en modo manual.....	52
6.2.	Operación en modo automático.....	53
6.3.	Ajustes del sistema de neutralización	55
7.	Resultados y conclusiones	58
8.	Glosario	63
9.	Bibliografía.....	64
Anexo 1.	Mantenimiento del sistema.....	67
Anexo 2.	Resolución de problemas.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. P&ID de la planta en su estado inicial.....	4
Figura 2. PFD del proceso en su estado inicial.....	5
Figura 3. HMI inicial para el control del proceso de neutralización	8
Figura 4. Comportamiento del pH en el rango del 3 al 11.....	15
Figura 5. Curva de neutralización con relación de varias sustancias.....	16
Figura 6. Curva de titulación de un ácido fuerte y una base fuerte	18
Figura 7. Curva titulación ácido débil base fuerte	19
Figura 8. Curva de titulación ácido fuerte base débil	20
Figura 9. Curva de titulación ácido débil base débil.....	21
Figura 10. Control PID clásico	24
Figura 11. Esquema típico de control de pH por lote	25
Figura 12. Esquema de control pre alimentado	27
Figura 13. Diagrama de bloques típico para el control por rango dividido	28
Figura 14. Históricos del proceso Marzo 15 de 2011	30
Figura 15. Históricos del proceso Marzo 16 de 2011	31
Figura 16. P&ID de la planta después de la modificación.....	37
Figura 17. P&ID del agitador neumático	42

Figura 18. Agitador eléctrico	43
Figura 19. Ubicación inicial del transmisor de nivel	46
Figura 20. Ubicación final del transmisor de nivel.....	47
Figura 21. Pantalla operación manual	52
Figura 22. Ajustes modo manual	55
Figura 23. Pantalla de ajustes de químicos automático.....	56
Figura 24. Pantalla Mantenimiento CIP	57
Figura 25. Pantalla liberación aseos	57
Figura 26. Históricos 18 Agosto 2011	59
Figura 27. Históricos 16 Septiembre 2011	59
Figura 28. Tanque de neutralización.....	67

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de sustancias según su pH.....	14
Tabla 2. Análisis de Causa-Efecto.....	34
Tabla 3. Análisis de causa y mejora planteada.....	35

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la norma ambiental Colombiana en el Decreto 3930 de 2010 y el proyecto de resolución que se está tramitando en el MinAmbiente establecen que toda agua resultante de un proceso industrial debe cumplir ciertas características físico-químicas antes de poder ser devuelta a cualquier cuerpo de agua natural (lo anterior con el fin de evitar daños al ambiente o al entorno en donde se opera).

Debido a esto, y a que el proceso industrial abordado en este documento afecta al agua en su composición y calidad original (pues agrega materiales disueltos y/o suspendidos), se construyó una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) con el fin de recoger todos los vertimientos de la planta y tratarlos adecuadamente antes de disponerlos, dándole cumplimiento a las normas legales y ambientales vigentes.

Sin embargo, aunque esta planta resuelve el problema, para su óptimo funcionamiento se requiere que la carga hidráulica que ingrese en ella tenga ciertas características (por ejemplo el pH debe estar en un rango entre 5 y 8.5) y al no cumplirse ocasiona inestabilidad en el proceso, mal acabado del agua (por ejemplo, presencia de mal olor), deterioro de los equipos y daño ambiental en la zona, concluyendo en el incumplimiento de la ley ambiental establecida, acarreando graves sanciones para la compañía.

Por este motivo, y para garantizar el adecuado funcionamiento de la PTAR, se construyó un tanque de neutralización, cuyo propósito es recibir todos los enjuagues y desechos resultantes de los aseos químicos, para procesarlos y llevarlos a niveles de pH aceptables, de manera tal que luego puedan ser tratados en la PTAR.

El presente trabajo presenta una forma de mejorar el sistema automatizado de estabilización del pH en el tanque de neutralización, el cual recibe soluciones básicas provenientes de los residuos en la producción de leche (pH entre 11 y 13) los cuales se mezclan con la sustancia usada en los aseos (soda cáustica y agua) y luego con ácidos para realizar su neutralización. Este desarrollo parte de la necesidad de mejorar esta etapa del proceso, debido a que en la actualidad se han presentado eventos no deseados (como incidencias ambientales en el entorno y retrasos e ineficiencias en el arranque del proceso de producción) causados por fallas en la actual estrategia de control de la neutralización.

2. ESQUEMA DE OPERACIÓN DE LA PLANTA (ESTADO INICIAL)

En esta sección se describen el proceso general de operación que se lleva a cabo para el sistema de neutralización de pH. En esta se describen cada una de sus etapas, los parámetros esperados, el objetivo de estas y sus resultados.

Para dar cumplimiento a las políticas corporativas y gubernamentales existentes en el campo ambiental, y en especial aquellas correspondientes a vertimientos de aguas industriales en cuerpos de agua, la fábrica DPA de Valledupar cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para recoger y procesar los residuos líquidos generados por las líneas de producción, con el objetivo de que puedan ser dispuestos cumpliendo a cabalidad las políticas ya mencionadas. Para poder realizar este proceso de tratamiento adecuadamente, la planta requiere que se den ciertas condiciones de entrada tanto en el control como en la parte física del sistema. Uno en particular es que el valor del pH de los líquidos que entran a la PTAR se debe encontrar entre 5 - 8,5 para que la PTAR pueda tener un funcionamiento óptimo. Para entender las razones de esto hay que conocer un poco los diferentes productos que se procesan y cómo se realiza la limpieza de las líneas.

Durante cada ciclo de producción se procesan entre 12.000 y 14.000 litros de leche por hora, los cuales se alternan entre diferentes tipos de leche (diferente sabor, diferente concentración o diferentes complementos adicionados). Debido a esta variedad de productos, después de cada ciclo de producción o después de una suspensión prolongada, se hace necesario realizar ciclos de limpieza en las líneas. Estas limpiezas en su mayoría se realizan con agentes químicos en fases que van desde enjuagues y barridos hasta la adición de soda y adición de ácido, de aquí que se deba ejercer un tratamiento previo a estos residuos antes de ser enviados a la PTAR. Para esto se construyó un tanque de neutralización que se encarga de llevar el nivel de pH de los residuos de estos aseos a un nivel

procesable por la PTAR, garantizando la variable pH para una correcta operación de la planta.

Una idea clara de cómo se encuentra distribuida físicamente la planta se puede ver en la Figura 1 y en la Figura 2, los cuales muestran un P&ID y un PFD respectivamente, del estado inicial de la planta:

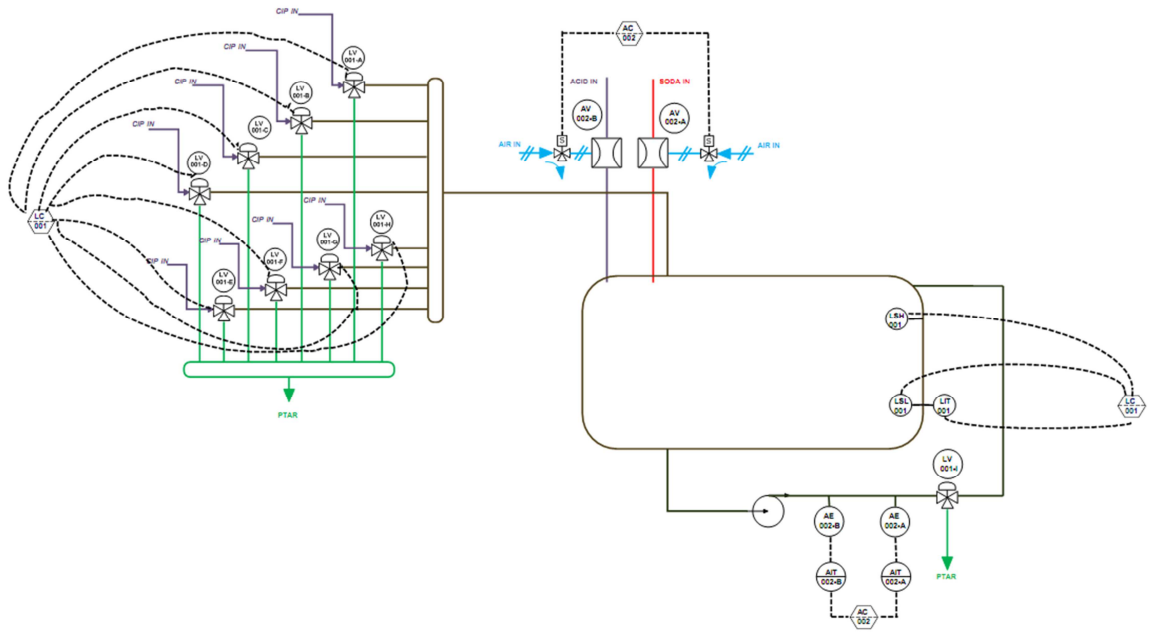


Figura 1. P&ID de la planta en su estado inicial

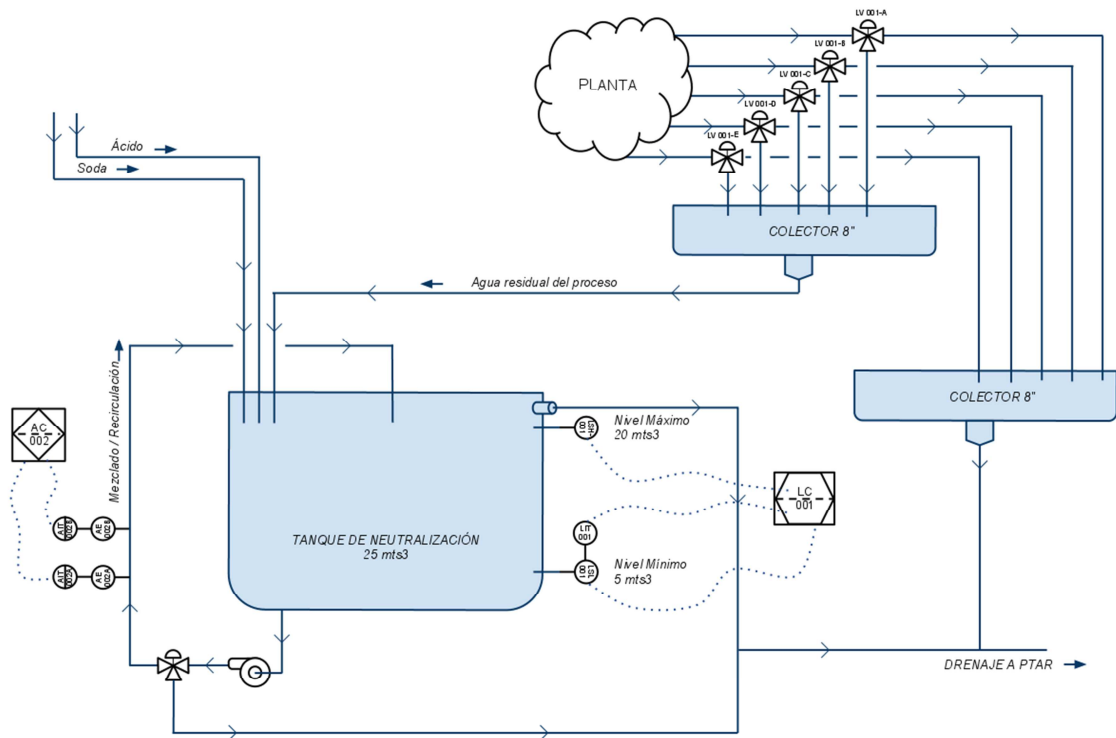


Figura 2. PFD del proceso en su estado inicial

Las etapas en las que se realiza un aseo se pueden resumir de la siguiente forma:

- i. Al finalizar un ciclo de producción se prepara la línea para CIP (Cleaning In Place).
- ii. Una vez preparada la línea, se inicia la limpieza con el enjuague Inicial. El enjuague inicial es un ciclo que inyecta agua a temperatura de 45°-60°C para retirar la capa superficial de suciedad y arrastrar los residuos gruesos a los colectores. De esta manera se prepara la línea para el siguiente paso.
- iii. El paso siguiente es la adición de soda sin recuperación: la soda es el químico que realiza la limpieza y el desprendimiento del sucio que queda alojado en las tuberías: grasas, proteínas etc. Entra en concentraciones entre el 1.5% - 2% y a temperaturas de 70°- 80°. Como esta soda es

líquida, se hace recircular para tratar de arrancar todo el sucio acumulado. Al finalizar este paso, estos residuos son desechados al tanque de neutralización.

- iv. El siguiente paso es la recirculación de soda con recuperación: en este paso se adiciona soda nuevamente, y de igual forma que el paso anterior, se recircula. Pero en este caso, la soda es recuperada en el “tanque de soda reusada” debido a que no contiene mucho residuo.
- v. Luego sigue un enjuague donde se adiciona agua a la línea para enjuagar la soda y preparar el siguiente paso.
- vi. Se procede luego con la adición y recirculación de ácido sin recuperación: el ácido se adiciona para arrancar minerales y algunas proteínas, a temperaturas de 60°-70° C y concentraciones del 0.5% - 1%. Se realiza de manera idéntica que la recirculación de soda.
- vii. Luego sigue la recirculación de ácido con recuperación: de igual forma que la recirculación de soda con recuperación, se realiza la recirculación de ácido y se recupera en un tanque de ácido reusado
- viii. Se continúa con un enjuague de agua para remover los residuos de ácido.
- ix. Y por último se realiza un enjuague final, con agua a temperatura ambiente 23° C, la cual se recupera y se usa para el primer enjuague del próximo aseo.

Con ese último paso, se da por terminada la etapa de limpieza y aseo de la línea, con lo cual se puede iniciar con el proceso de neutralización. Se le denomina neutralización al proceso químico que se origina de la reacción entre una solución ácida y una básica. Se le llama neutralización porque las soluciones pierden sus

características ácidas y básicas al momento de reaccionar entre sí, aunque no necesariamente implica que el pH de la solución resultante sea neutro [2].

En la Figura 3 se observa el HMI de control de CIP, con el cual se interviene el proceso de neutralización y sus principales elementos con el fin de garantizar una estabilización del pH dentro de los rangos permitidos empleando la menor cantidad de tiempo. En el siguiente apartado se explicará los diferentes modos de operación del HMI.

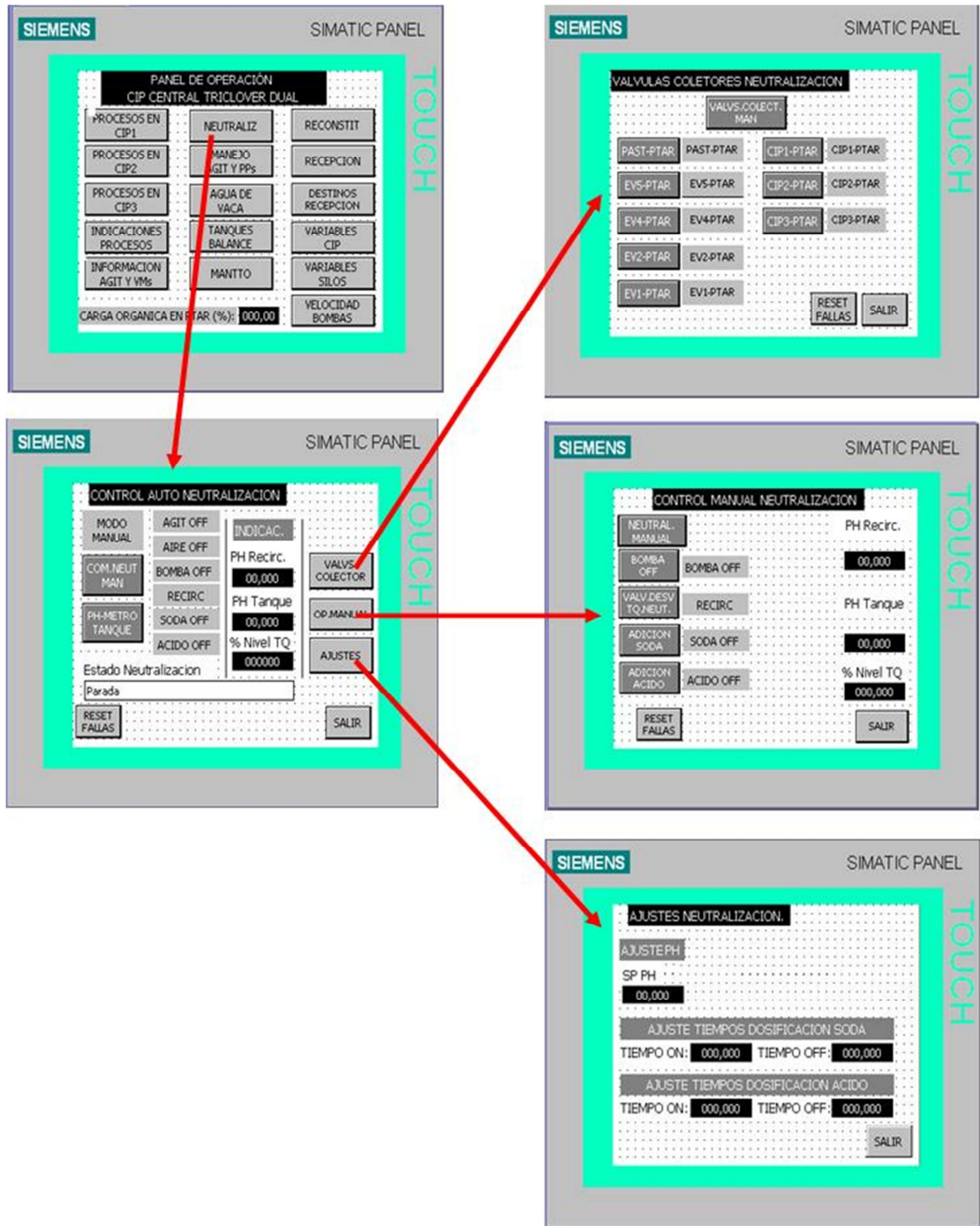


Figura 3. HMI inicial para el control del proceso de neutralización

El sistema de neutralización tiene dos modos de operación: modo manual y modo automático.

2.1. OPERACIÓN EN MODO MANUAL

Una vez el operador esté en la pantalla principal de neutralización podrá acceder a este modo pulsando el botón “*Neutraliz*” -> “*OP. Manual*” -> “*Neutral. Manual*”.

Este modo de operación está condicionado a la experiencia y capacidad de reacción del operador y solo será conducido por las acciones manuales. Con este modo se permite acceso a las siguientes acciones.

2.1.1. Bomba de recirculación

Este botón aparece en el HMI de operación manual con el nombre “*BOMBA OFF*” o “*BOMBA ON*” (dependiendo el caso si está encendida o no), y cada vez que se pulsa, se activa o no la operación de la bomba de recirculación. Para saber en qué estado se encuentra la bomba, al lado de este botón, se encuentra la indicación de su estado. En caso de falla la indicación oscilará entre estos dos estados (ON y OFF).

2.1.2. Válvula desviación producto

Este botón aparece en el HMI de operación manual con el nombre “*VALV.DESV.TQ.NEUT*” y permite manejar manualmente la válvula que lleva el producto hacia el tanque de neutralización (Recirculación) o hacia la PTAR. Para saber en qué estado se encuentra la bomba, al lado de este botón, se encuentra la indicación de su estado (“*RECIRC*” o “*PTAR*”).

2.1.3. Botones de adición manual de químicos

Estos botones aparecen con el nombre de “ADICION SODA” y “ADICION ACIDO” y permiten la adición manual de químicos, mientras se oprime.

2.2. OPERACIÓN EN MODO AUTOMÁTICO

Una vez el operador esté en la pantalla principal de neutralización podrá acceder a este modo pulsando el botón “*Neutral. Auto*”

El modo Automático es el modo de operación recomendado. Solo debería requerir supervisión del operador.

Nota: Cuando se activa la opción automática, todos los comandos manuales que se encuentren activos se apagaran para garantizar que la próxima vez que se active el modo manual estén apagados.

En modo automático el sistema de neutralización está estructurado por fases. Cada fase está marcada por eventos específicos que determinan el inicio o final de la fase. Las fases del sistema se definen así:

- i. **Recirculación en espera de nivel:** el objetivo de esta fase es alcanzar el nivel de llenado deseado en el tanque para que se inicie el proceso de neutralización. Mientras esto sucede, y si el switch de bajo nivel se encuentra activado, se hace recircular el líquido presente en el tanque para facilitar el mezclado y la estabilidad del pH. Esta fase se inicia con la activación del modo de operación automático y lleva a cabo las siguientes acciones: 1. Cambia el estado de la válvula del tanque LV-001-I a “recirculación” y 2. Energiza la bomba del tanque o de recirculación si y solo si el switch de bajo nivel LSL-001 esté activo. Estas dos acciones garantizan la recirculación del producto. Esta fase finaliza cuando se activa

el switch de nivel alto del tanque LSH-001, lo cual significa que el líquido ha llenado el tanque hasta el nivel máximo y debe empezar la etapa de neutralización.

- ii. **Neutralización:** el objetivo de esta fase es llevar el pH de los líquidos a un nivel tolerable por la PTAR. Esta fase inicia cuando el nivel del tanque supera el límite de llenado del tanque o cuando se pulsa el comando manual de neutralización. Durante esta fase de neutralización, se realiza la adición de químicos partiendo del siguiente criterio: si el pH es mayor que 7.0 se adiciona ácido o si es menor que 7.0 se adiciona soda. Esta adición se hace por pulsos de tiempo y es posible programar su tiempo de encendido y apagado. La fase de neutralización finaliza cuando el pH alcanza un valor dentro de un rango establecido en el HMI denominado pH OK. Para tomar esta medida, la línea cuenta con dos medidores de pH (en la tubería de recirculación, uno se usa como respaldo del otro). Siempre es posible seleccionar cuál de los dos pH-metros se usa como referencia, mediante el pulsador de selección de pH-metro.
- iii. **Drenando a PTAR:** en esta fase se hace el vaciado del tanque para enviar los residuos ya neutralizados a la PTAR. Esta fase se activa cuando el valor del pH del medidor seleccionado se encuentra en el rango de pH OK y al activarse esta señal, se inicia la fase de drenaje del tanque. Aquí la válvula de recirculación del producto LV-001-I se posiciona hacia la PTAR y se quedará en esta posición hasta cuando el switch de bajo nivel LSL-001 sea activado.

Una vez realizadas estas tres etapas se puede decir que los residuos contenidos en el tanque se encuentran neutralizados (esto es, con un pH entre 5 - 8,5) y ya pueden ser procesados por la PTAR sin inconvenientes.

Estas tres etapas se dan de manera secuencial, solo una puede empezar cuando finalice la otra. De igual forma, después que finaliza la etapa “Drenando a PTAR”, la secuencia vuelve a iniciar con la primera etapa “En espera del nivel”.

Por otra parte, debido a la versatilidad que permite una HMI, la operación de este proceso también cuenta con una. La HMI utilizada en el sistema es una OP de Siemens, táctil, monocromática, compatible con CPU S7 300 y 400. El PLC usado en esta planta es un Siemens S7 400: CPU 416.

Otras características que se pueden mencionar del HMI implementado es que, así como se mostraba en la imagen, esta permite realizar ajustes a los parámetros del proceso de neutralización automático, como lo son:

- i. **Ajuste SetPoint de pH:** permite establecer el valor de pH al cual se desea realizar el drenaje hacia la PTAR, en la fase de neutralización. Cuando el valor de pH del pH-metro se iguale a este valor, se dará por terminado la fase de neutralización.
- ii. **Ajustes tiempos dosificación:** establece los tiempos de duración para la energización y des-energización de las bombas de dosificación de químicos. Es posible ajustar el valor del estado energizado (ON) y el valor del estado apagado (OFF). La intención de estos pulsos de dosificación es hacer una adición de químicos seguido de una pausa para evaluar la nueva medición de pH. Los valores de tiempo están en segundos.
- iii. **Válvulas colector:** esta pantalla es para manipular las válvulas de ingreso de producto al tanque. Las válvulas pueden colocarse en modo manual o en modo automático. En modo manual el operador debe seleccionar el lugar de descarga de la válvula entre PTAR y Neutralización. En el modo automático las válvulas deben apuntar en proceso hacia la PTAR, y durante los aseos hacia neutralización.

3. MARCO TEÓRICO (ESTADO DEL ARTE)

El control del pH en tanques de agitación ha sido tratado de manera extensa en la literatura hoy en día. De esta misma forma, una gran cantidad de información en el campo del control del pH se dedica a la neutralización continua de aguas residuales (a diferencia del control por lote, que es nuestro caso) porque representa un desafiante problema de control el cual es de suma importancia industrial. En este capítulo haremos una recopilación de esta información destacando lo más relevante y lo más cercano a nuestro enfoque de análisis, con el fin de acotar y describir el problema real.

3.1. DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL PH

El pH es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución. El pH indica la concentración de iones hidronio $[H_3O^+]$ presentes en determinadas sustancias. La sigla significa "potencial de hidrógeno" (pondus Hydrogenii o potentia Hydrogenii; del latín pondus, n. = peso; potentia, f. = potencia; hydrogenium, n. = hidrógeno). Este término fue acuñado por el químico danés Sørensen, quien lo definió como el logaritmo negativo de base 10 de la actividad de los iones hidrógeno, así como se muestra en la siguiente ecuación (1)

$$pH = -\log_{10}[aH_3O^+] \quad (1)$$

Se sabe que desde entonces, el uso del término pH se ha utilizado universalmente por ser más práctico que el uso de cifras. Por ejemplo una concentración de $[H_3O^+] = 1 \times 10^{-8} = 0,00000001$ es simplemente un pH de 8 ya que: $pH = -\log_{10}[10^{-8}] = 8$

La escala de pH va de 0 a 14 siendo el 7 el pH neutro. Los valores por debajo de 7 se denominan como sustancias ácidas (y a medida que va disminuyendo este

valor, mas ácida será esta sustancia); mientras que las sustancias con pH con un valor superior a 7 se denominan sustancias bases o alcalinas (ver Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de sustancias según su pH

PH	TIPO DE DISOLUCIÓN
< 7 (menor que siete)	Ácida
= 7	Neutra
> 7 (mayor que siete)	Básica

El concepto de pH neutro en un valor de 7 se fundamenta en el agua pura, debido a que esta se ioniza en concentraciones iguales de iones de Hidrógeno e Hidroxilo.

Una característica predominante de la ecuación de pH es su naturaleza logarítmica en base 10, es decir, cuando una solución se vuelve diez veces más ácida, el pH disminuirá en una unidad. Debido a esta no linealidad, el control de esta variable por lo general se considera una actividad muy importante pero difícil de realizar [3] [4].

Un gráfico del comportamiento del pH se puede apreciar en la Figura 4.

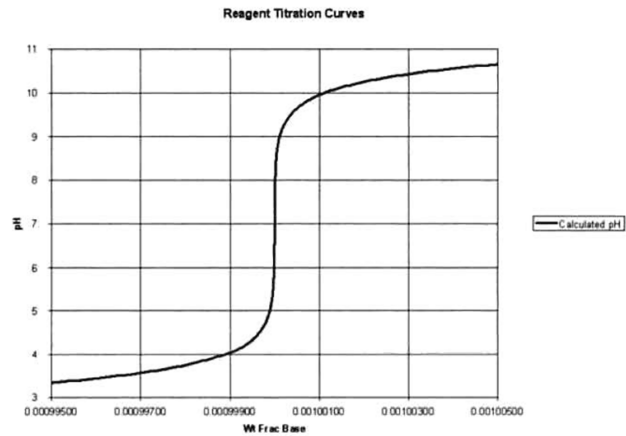


Figura 4. Comportamiento del pH en el rango del 3 al 11

Una forma de analizar cómo se da esta reacción es a través de la curva de neutralización. La curva de neutralización, o de titulación, es un diagrama en el que se indica en el eje Y el valor del pH y en el eje X se indica la relación de ácido a base o diferencia entre las concentraciones de ácido y base, volumen o flujo. La curva de neutralización se considera la pieza más importante de información para el diseño, commissioning y solución de problemas para los sistemas de control de pH [5].

Un gráfico que muestra la curva de neutralización para 3 posibles combinaciones de ácidos y bases, tanto débiles como fuertes, lo podemos ver en la Figura 5:

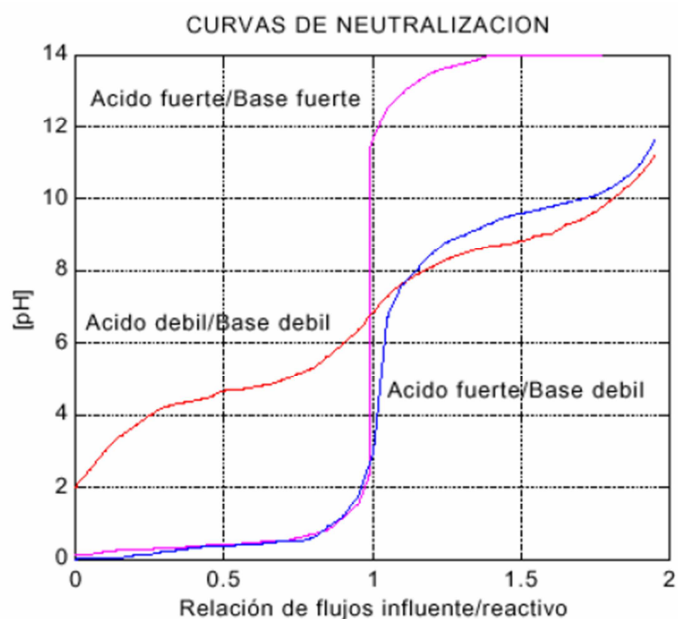


Figura 5. Curva de neutralización con relación de varias sustancias

Para una correcta interpretación de la curva de neutralización es necesaria la comprensión de dos parámetros los cuales son:

- Punto neutral: dentro de una curva de titulación es donde la concentración de iones de Hidrógeno es igual a la concentración de iones de hidroxilo.
- Punto de equivalencia: dentro de una curva de titulación es donde la concentración de iones de ácido es igual a la concentración de iones de base.

En un proceso de interacción entre el influente, que para nuestro caso son los aseo de la línea de producción, y el reactivo, que es la base o el ácido a adicionar para neutralizar la sustancia, se pueden dar cuatro posibles combinaciones, lo cual nos arroja cuatro posibles curvas de neutralización aunque en la práctica, se suele trabajar con combinaciones de curvas de titulación de pH dependiendo en qué etapa se encuentra el proceso.

3.1.1. Relación ácido fuerte y base fuerte

Cuando interactúa un ácido fuerte con una base fuerte, todos sus grupos de Hidrógeno o Hidroxilo aparecen en la forma ionizada en solución. Este tipo de mezclas arrojan una curva (ver Figura 6) con una pendiente casi vertical en un rango muy amplio de pH, convirtiendo al sistema en un sistema altamente sensible, lo cual lo hace uno de los más difíciles de controlar. Por ejemplo en el caso de que existiera una solución básica con pH de 12, será necesario agregar un ácido para llevar la solución a un pH neutro; pero al querer neutralizar una base fuerte con un ácido fuerte (por ejemplo ácido nítrico), se tendría una angosta o casi nula zona de amortiguamiento, sobrepasando el punto neutral con mucha facilidad y convirtiendo la sustancia en ácida. Unas medidas para facilitar el control de pH de bases y ácidos fuertes es la construcción de un buen tanque de neutralización con la geometría y ubicación correcta de los electrodos de los pH-metros, el uso de un eficiente sistema de mezclado y la implementación de controladores no lineales para contrarrestar la no linealidad de los sensores.

Una ventaja, si se desea neutralizar un ácido, es que se requerirá una cantidad pequeña de base para lograrlo, sin embargo nos conduce al problema de lograr exactitud a la hora de agregar el reactivo para evitar sobrepasar el punto de control o neutralidad. La exactitud es un problema debido a que las válvulas dosificadoras deberían tener una precisión de 1 parte en 10.000, cosa que en estos momentos es físicamente imposible de alcanzar con una válvula o bomba dosificadora. Una de las técnicas usualmente usadas para contrarrestar este inconveniente es usar una combinación de válvulas que entregue la cantidad de reactivo necesario a la hora de la demanda y usar válvulas de menores dimensiones y capacidad para realizar los ajustes en el rango fino.

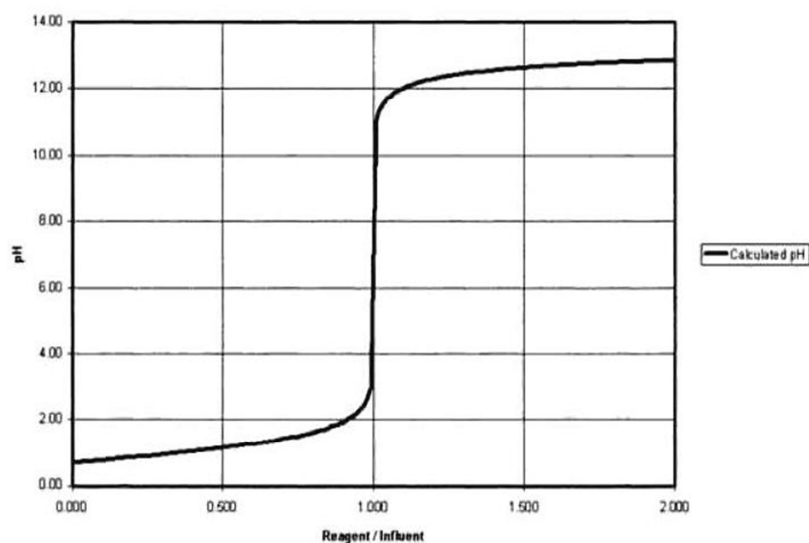


Figura 6. Curva de titulación de un ácido fuerte y una base fuerte

3.1.2. Relación ácido débil y base fuerte

Al realizar la combinación entre un ácido débil y una base fuerte, se observa un fenómeno de disociación aportado por el ácido débil; por el contrario, la base se ioniza completamente lo cual ubica el punto de equivalencia lejos del punto neutral. Si se observa detalladamente la Figura 7 y se realiza una comparación con el caso anterior, se nota que el rango de operación del pH se ha acotado sustancialmente, esto implica que el riesgo de llevar la solución de totalmente ácida a básica es menor puesto que se requiere más reactivo para lograrlo. Sin embargo se logra evidenciar una pendiente casi vertical en el rango superior de 6 a 11 aproximadamente: este es el punto donde se debe ejecutar el mejor control posible porque es el punto de mayor influencia de la base fuerte sobre el ácido débil.

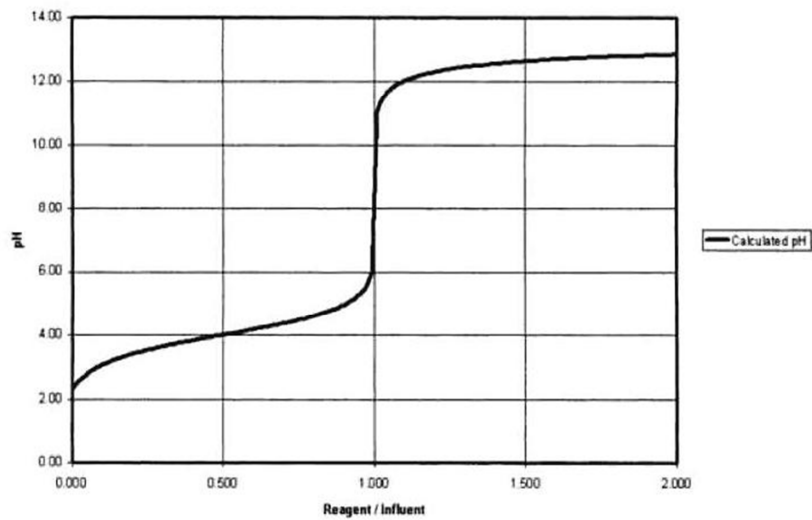


Figura 7. Curva titulación ácido débil base fuerte

3.1.3. Relación ácido fuerte y base débil

En estas combinaciones se presenta que el ácido fuerte se encuentra totalmente ionizado y la base débil se encuentra parcialmente desasociada, y evidentemente el punto de equilibrio no es neutral. Al observar la gráfica de esta relación (ver Figura 8) se aprecia una pendiente precipitada en el rango inferior de la escala del pH, en donde el punto de equivalencia depende de la constante de disociación de la base débil. Contrario del caso anterior tenemos gran sensibilidad en el rango bajo del pH. Al tener un influente base débil se requiere de más reactante para llevarlo a un punto neutral, esto es considerablemente un ventaja a la hora de adicionar el reactivo.

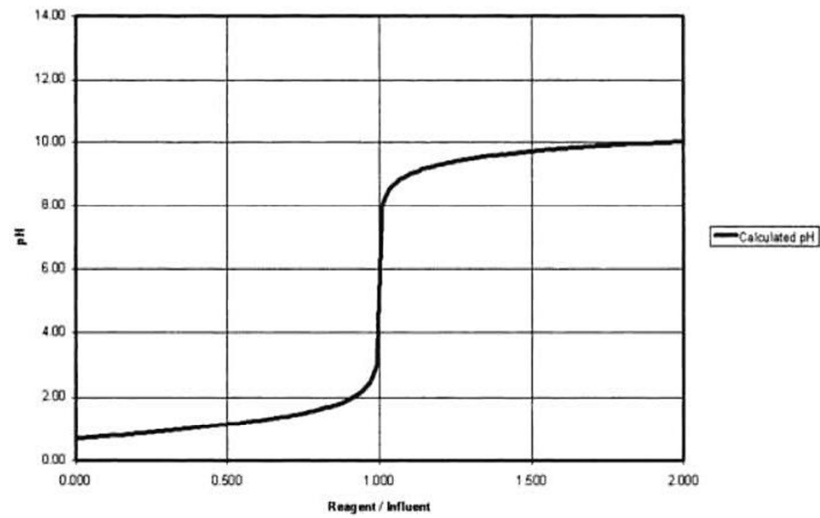


Figura 8. Curva de titulación ácido fuerte base débil

3.1.4. Relación ácido débil y base débil

El punto de equivalencia depende de las constantes de asociación de las dos sustancias, y debido a la baja influencia de uno al otro, se tiene poca ganancia del proceso en el rango de pH. Por tal motivo no se observan en la gráfica de su relación (ver Figura 9), pendientes abruptas ni cambios inesperados en el pH.

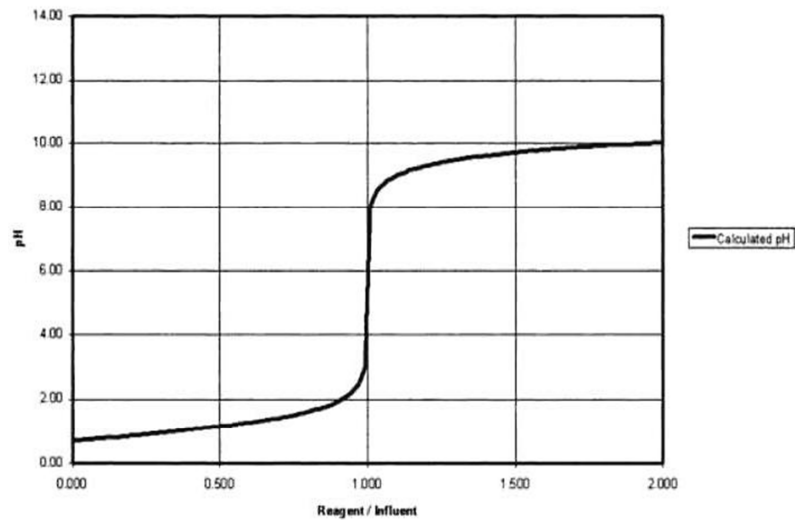


Figura 9. Curva de titulación ácido débil base débil

3.1.5. Análisis de la relación del proceso actual

Debido al origen del influente (aseos) no se puede determinar la concentración del mismo. Si bien la mayoría de los aseos son realizados con soda cáustica al 51 %, también se realizan aseos con ácido nítrico, por lo cual la relación puede alternar de base fuerte a base débil. Sin embargo mediante prueba de laboratorio podríamos determinar la curva controlando el flujo de influente (en nuestro caso los aseos) y luego también controlando el flujo del reactante fuerte (ácido nítrico).

3.2. TÉCNICAS PARA EL CONTROL DEL PH

La característica no lineal convierte al pH en una de las variables más complejas para controlar a nivel industrial debido a las limitaciones físicas de los actuadores y de los mismos sistemas de control. Es poco usual tratar de controlar el pH en un valor específico (por ejemplo el valor ideal de 7), por lo que con regularidad lo que se intenta es mantener la variable o a las desviaciones que esta pueda tener,

dentro de un rango en particular (por ejemplo, entre 6 y 8) dependiendo de las características propias del procesos.

Para realizar un control de pH adecuado de cualquier tipo hay que tener en cuenta una serie de elementos o características que pueden en cierta medida facilitar o dificultar el proceso de neutralización y control de pH; y se debe analizar si estos son los más adecuados para nuestro proceso.

- Elemento Sensor (electrodos, medidor, transmisor)
- Tanque
- Equipo de Mezclado
- Válvula o Actuadores
- Curva de comportamiento del pH.
- Agentes reactivos (soda o ácidos)

Otro factor relevante para el control de pH es la homogenización de las sustancias. Está claro que al entrar en contacto dos sustancias, su unión molecular no es uno a uno y de forma ordenada, lo cual ocasiona que la mezcla no posea las mismas propiedades en toda la sustancia, y por ende no tengamos una lectura de pH confiable. Sea cual sea la técnica de mezclado, su control es complicado (dependiendo del volumen del contenedor) debido a la espera y/o corrección que hay que hacer de la desviación de la variable controlada, pues medir esta desviación y tomar la decisión adecuada puede llevar un período de tiempo considerable.

Aquí mostramos y planteamos las técnicas de control que revisamos y que consideramos pueden ser aplicadas para nuestra aplicación, dando una

descripción de en qué consiste, como se implementa y cuáles serían sus beneficios y dificultades.

3.2.1. Control clásico

El control más básico que se puede implementar sería un control de tipo PI, el cual consiste en entregar a la salida del controlador la suma de la proporción del error del pH y la integral del error del pH, donde el error es la diferencia entre el valor medido del pH y su valor deseado (SetPoint). Este tipo de control tiene una desventaja a la hora de manejar tanques o reactores de un volumen considerable y es que este control puede resultar en un proceso largo y lento, por lo que se hace necesario introducir un poco de velocidad con un componente derivativo PID. Sin embargo la gran debilidad de los sistemas retroalimentados es que hay que esperar todo un ciclo completo para tomar la acción correctiva, es decir: la medición del pH en el proceso, el control por parte del PID, la respuesta de la planta a la acción de control y volver a tomar la medida para ingresar un nuevo error al sistema. Adicional a esto las limitaciones físicas como tal de los sensores o electrodos en este caso y los actuadores ya sea una válvula o una bomba dosificadora aportan retrasos o tiempos muertos, que perjudican el control del pH, esto debido a la alta sensibilidad de la curva en la región neutral. Otro factor que añade complejidad al control de pH es la no linealidad de la medida del pH, aunque está muy bien definida como el logaritmo negativo de la concentración de iones de Hidrógeno, lo cual nos indica la linealidad, los sensores o electrodos en este caso sufren de no linealidad, lo que obliga el uso del llamado controlador no lineal [6]**Error! Reference source not found.** Por esta razón descartamos este tipo de control. Un esquema típico de este control lo podemos ver en la Figura 10¹.

¹ Imagen tomada de [13]

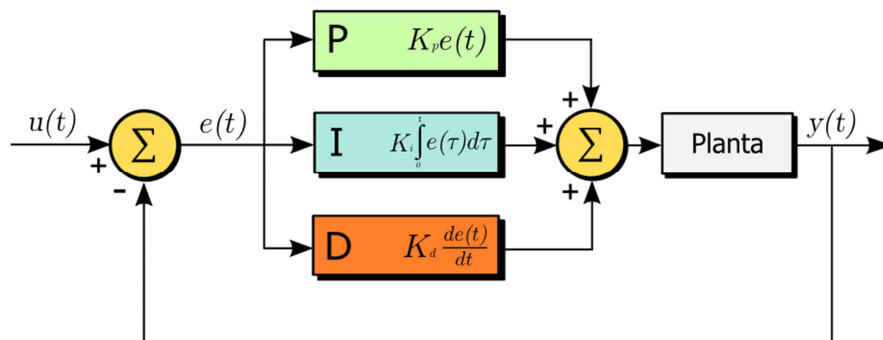


Figura 10. Control PID clásico

3.2.2. Control por lotes

Este tipo de control tiene como particularidad que su estrategia se centra en procesar lotes de volúmenes específicos, por lo cual, la adición de los reactivos (bases o ácidos) se hace basándose en recetas preestablecidas y teniendo como referencia el volumen total contenido en el tanque, el cual debe mantenerse constante durante todo el proceso de control. Este tipo de control tiene la ventaja de ser muy simple de llevar a cabo y resulta sencilla su implementación, también tiene desventajas tales como determinar el correcto ajuste de esas recetas por los tiempos de respuesta de los medidores de pH, la eficiencia del mezclado, el diseño del tanque, la precisión en las mediciones químicas, los tiempos de reacción química y la inteligencia programada para el control del pH [8].

Para la planta DPA, este es el caso implementado y del cual partirá toda nuestra estrategia de control. En el caso actual ya se conocen plenamente las concentraciones de los reactivos, pero la concentración y pH de los aseos es variante en el tiempo, por lo tanto es necesario que el operador realice cambios en la receta (lo cual no solo es inconveniente sino que, si se hace una mala estimación, puede llevar a altos tiempos de neutralización). Es por esta razón que

la técnica clásica de lotes no resulta muy efectiva. Sin embargo si se considera como un buen punto de partida.

Una instalación típica de este tipo lo podemos ver en la Figura 11.

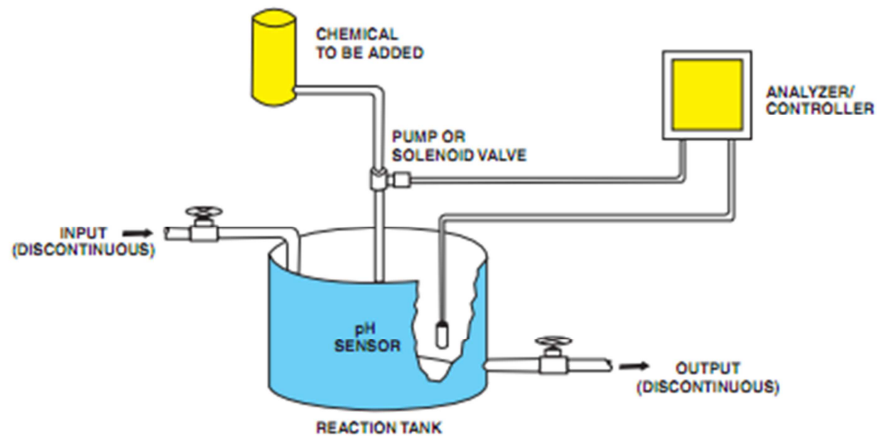


Figura 11. Esquema típico de control de pH por lote

3.2.3. Control pre alimentado

El control Pre-alimentado o FeedForward (FF) es un esquema que utiliza el concepto de control no-supervisado, es decir "si conozco bien como trabaja, no necesito medir lo que resulta". Bajo este concepto, si se conoce bien el modelo del proceso y todas las entradas entonces se puede determinar sus salidas, o determinar cuál debe ser el valor de una entrada para obtener una salida deseada, de forma tal que se puede tomar una acción de control antes de que ocurra el error [12]. Vale decir que este es un esquema que se aplica cuando al sistema lo afecta una perturbación significativa y no es posible controlarla.

Una manera de desarrollarlo es utilizando los balances de materia y energía, así como también realizando correlaciones empíricas (en el caso en que sean necesarias).

Este sistema pretende contrarrestar o compensar la perturbación antes de que la misma ingrese al proceso. El procedimiento consiste en medir la perturbación y en función de esta, introducir una corrección adicional que se suma a la señal de salida del controlador. De ahí radica su ventaja (ver Figura 12).

En el caso del pH, para que este tipo de control sea efectivo, se debe tener una buena medición de esta variable, ubicando de la mejor manera los sensores, y también se debe tener control sobre el tiempo de dosificación de los reactivos. Este tipo de control es fundamental para complementar la acción de un control retroalimentado a la hora de las grandes y rápidas fluctuaciones de pH. Sin embargo, a la hora de realizar la sintonía en campo, pueden aparecer serias dificultades debido a que los aseos en el colector tienen un pH con agentes débiles y fuertes. Para contrarrestar esto se puede tener un tanque y un sistema de mezclado adecuado, para garantizar la homogenización de la solución.

La forma de llevarlo a cabo sería de la siguiente forma: los residuos que entren al tanque se tratarán como una perturbación, por lo cual, se debería instalar un pHmetro en la tubería de ingreso de los aseos y con esta información, el controlador tendría conocimiento previo del error que ingresa y podría ejecutar acciones para contrarrestarlo (mayor o menor adición de químicos por ejemplo); y estas acciones partirían de un cálculo previo del proceso, haciendo uso de correlaciones realizadas a partir de la medición del comportamiento actual de los aseos.

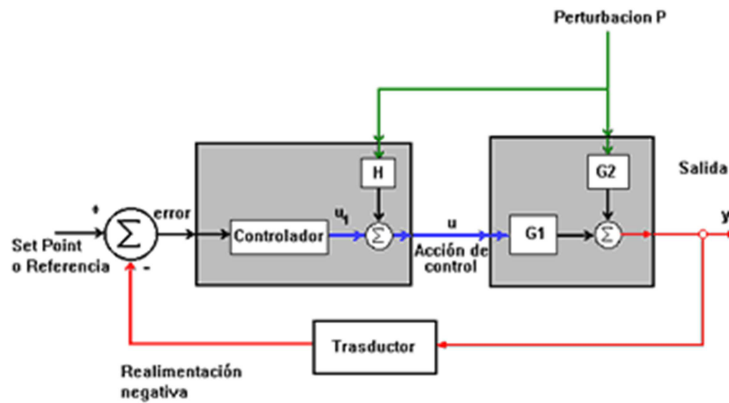


Figura 12. Esquema de control pre alimentado

3.2.4. Control por rango dividido

También denominado control de rango partido, control de gama partida o “Split Range” (nombre en inglés), este tipo de estrategia se caracteriza por tener diferentes rangos de control. Suele usarse en sistemas en el que una variable manipulada tiene preferencia con relación a otra u otras variables del proceso o en el caso en que un regulador pueda manipular dos o más actuadores (o variables manipuladas).

La señal de control es dividida o usada más de una vez, cada una de ellas con el fin de asociarlas con una de las variables manipuladas. El proceso finalmente es controlado por la coordinación de las acciones de varias variables manipuladas, las cuales causan un efecto particular en la salida controlada. En la práctica esto requiere compartir la señal de salida del controlador con varios elementos actuadores.

Para nuestro caso, si bien no aplica este tipo de control en su definición exacta, lo que hemos hecho es extraer la idea principal de esta técnica para nuestra aplicación, usando la lógica de control por rangos en el dosificador. La idea es usar un dosificador de escala mayor en una parte de la gama de valores de pH y

otro dosificador de escala menor (y por ende, de ajuste más fino) en la parte baja de valores de pH. De esta forma, la dosificación será acorde a la cantidad requerida en cada etapa del proceso.

Un diagrama de bloque representativo de este tipo de control se puede apreciar en la Figura 13.

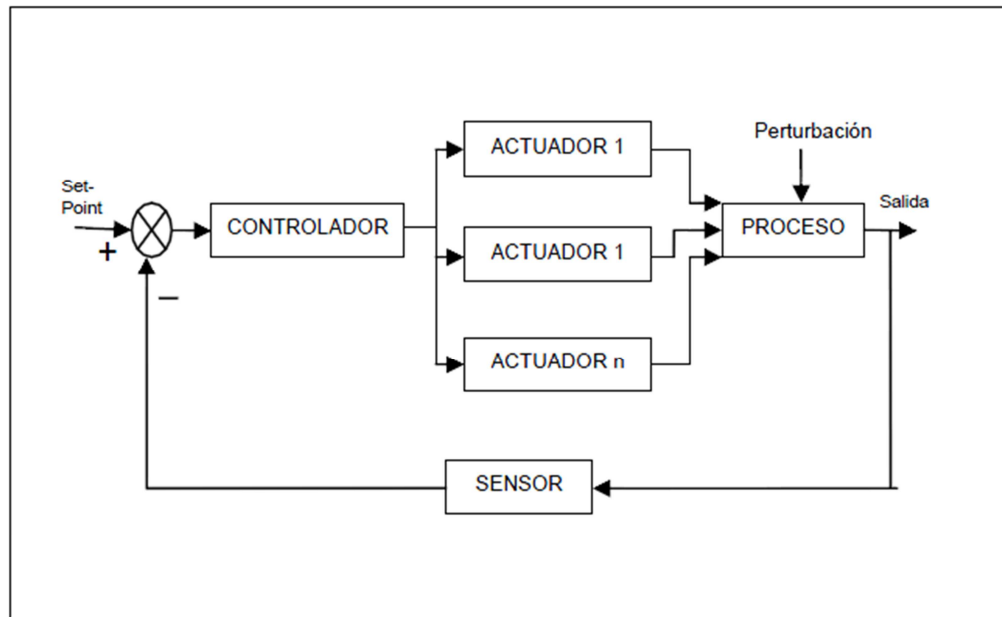


Figura 13. Diagrama de bloques típico para el control por rango dividido

3.2.5. Control a implementar

Luego de analizar todas estas técnicas de control se plantea hacer un control híbrido partiendo de las mejores ideas de cada una de las técnicas revisadas, realizando una mezcla de cada una de ellas. Básicamente, el control es así: se implementa un control por lotes, se aplica la teoría de control pre alimentado para previamente conocer la perturbación que causará el ingreso de los aseo y se le agrega la lógica de división de rango, para el control de la dosificación.

Vale la pena resaltar que para implementar esto en la práctica se requiere conocer las dimensiones exactas del tanque de neutralización, tener un sistema eficiente de mezclado, un medidor en línea para el pH y adicionar o inyectar el reactivo en la línea de proceso o de recirculación, minimizando el tiempo de acción de los químicos. De aquí parten las mejoras a implementar.

4. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN INICIAL

En esta sección se registran datos históricos de la operación y se cuantifican las fallas del proceso con el fin de establecer sus condiciones iniciales. También se hace un análisis de la información extraída y, aplicando metodologías de análisis grupal, se buscan sus causas y subcausas. Esta información es la que se utiliza como base para proponer las mejoras al sistema.

Con el fin de obtener una descripción cuantificada de la situación inicial, se almacenaron datos históricos de las variables: Nivel_Tanque y PH_Tanque durante dos semanas durante las cuales hubo producción. Esta información se extrajo del supervisorio y se procedió a realizar tendencias y gráficos del proceso, como se muestra en la Figura 14 y en la Figura 15.

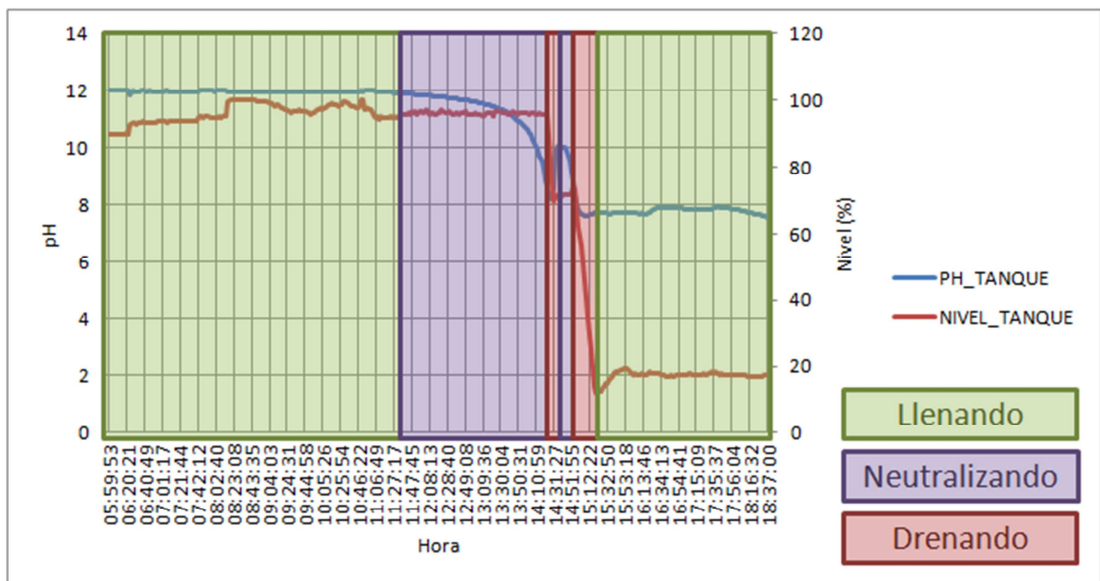


Figura 14. Históricos del proceso Marzo 15 de 2011

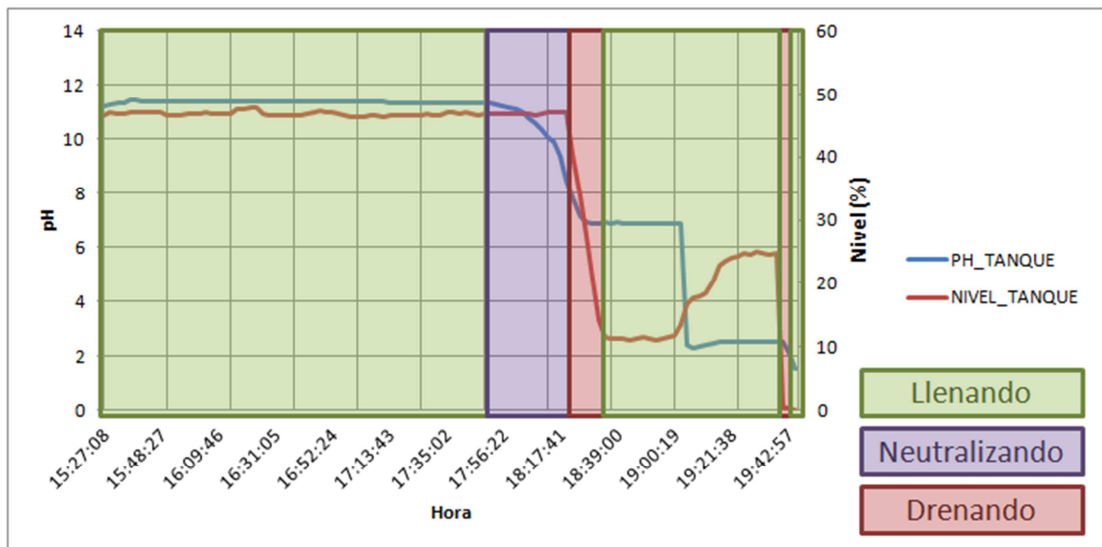


Figura 15. Históricos del proceso Marzo 16 de 2011

Del análisis de estos históricos surge la siguiente información:

- La duración del proceso típico de neutralización varía de 7 a 12 horas.
- El proceso de neutralización inicia cuando el nivel del tanque es del 100% (aunque como se puede ver, también se presenta el caso en el que el nivel no ha llegado al 50% y se inicia el proceso por orden manual).
- La neutralización de algunos aseos requieren de más de una etapa para neutralizarlos pero el sistema no lo detecta y lo drena.
- El pH de los residuos al ingreso varía en el rango entre 11 y 12; y debe salir en el rango entre 5 y 8,5
- Una vez neutralizados los aseos, se inicia el vaciado del tanque hasta llegar a un nivel de llenado del 15% o menos.
- El vaciado del tanque, por completo, toma aproximadamente 1 hora

- En algunos puntos se detecta que aún después de iniciado el proceso de neutralización, los aseos siguen llegando al tanque haciendo que varíe su nivel afectando el valor del pH durante la neutralización.

Con base en los datos obtenidos se pueden proponer los siguientes puntos de mejora:

- Se evidencia que la estrategia de control implementada en el tanque de neutralización no es la más apropiada pues, según lo observado, el pH sale y entra del rango óptimo de trabajo varias veces, antes de poder decir que se ha finalizado el proceso de neutralización.
- La adición de los ácidos no tiene un control implementado y el mecanismo de mezclado tampoco es el más adecuado. Debido a esto y otros inconvenientes en el proceso, tenemos tiempos largos en la neutralización y un alto consumo en los químicos usados para nivelar el pH de la carga hidráulica.
- Uno de los puntos evidenciados en el PFD es que todos los aseos, requieran o no neutralización, se llevan al tanque de neutralización. Aquí hay una oportunidad de mejora debido a que algunos aseos son solo agua y esta no tiene mayor variación en su pH.
- Se presenta un insuficiente control sobre los niveles del tanque tanto al momento de iniciar el proceso, como durante y al final de este.

Como consecuencias de estas falencias del sistema se desprenden dos problemas importantes, como lo son:

- Desperdicio de químicos (ácidos y bases) durante el proceso de neutralización. Lo cual es causado por la mala dosificación.

- Demora del tiempo de neutralización, lo cual es causado por la ineficiencia en la homogenización.

A estas dos fallas importantes es lo que denominamos “**ineficiencia en el control del proceso de neutralización**” y para resolver esto se realizó una lluvia de ideas. De estas ideas planteadas se descartaron las no viables por ser de largo plazo o por requerir una inversión mayor a 20.000 USD y se llevaron a un diagrama de Ishikawa para llegar a su causa raíz. Una vez desglosada su causa y subcausa, se agruparon en una tabla y aquí se presentan a manera de Hazop, con el fin de mostrar las relaciones de causa y efecto y la solución planteada. El análisis de cada falla se puede ver en la Tabla 2 y las mejoras propuestas para estas se puede ver en la Tabla 3.

<i>Causa</i>	<i>SubCausa</i>	<i>Efecto</i>
<i>Máquinas</i>	<i>Reproceso de los líquidos durante la neutralización</i>	<i>Alto consumo de químicos</i>
	<i>Baja capacidad de mezclado</i>	<i>Demora del proceso</i>
	<i>Ingreso de nuevos aseos durante la neutralización</i>	<i>Alto consumo de químicos</i> <i>Demora del proceso</i>
<i>Materiales</i>	<i>Orden de inicio del proceso de neutralización es manual</i>	<i>Demora del proceso</i>
	<i>Mala dosificación de los químicos</i>	<i>Alto consumo de químicos</i> <i>Demora del proceso</i>
<i>Hombre</i>	<i>Olvido en la orden de inicio o seteo del proceso</i>	<i>Demora del proceso</i>
	<i>Alteración del proceso para ajustes y cambios manuales</i>	<i>Alto consumo de químicos</i> <i>Demora del proceso</i>
<i>Métodos</i>	<i>Lógica lineal para control de comportamiento no lineal del pH</i>	<i>Alto consumo de químicos</i> <i>Demora del proceso</i>
	<i>No hay restricciones para el ajuste del proceso</i>	<i>Demora del proceso</i>

Tabla 2. Análisis de Causa-Efecto

<i>Causa</i>	<i>SubCausa</i>	<i>Mejora</i>
<i>Máquinas</i>	<i>Reproceso de los líquidos</i> <i>Baja capacidad de mezclado</i>	<i>Implementación doble rango de dosificación y ajuste tiempos de dosificación</i> <i>Instalación de agitador</i> <i>Limitar la cantidad de líquido que deben ingresar al tanque</i>
	<i>Ingreso de nuevos aseos durante la neutralización</i>	<i>Control en las válvulas del colector de entrada</i>
<i>Materiales</i>	<i>Orden de inicio del proceso de neutralización es manual</i>	<i>Cambio en el montaje físico del sensor de nivel</i> <i>Cambio de switch de nivel con mejor tecnología</i>
	<i>Mala dosificación de los químicos</i>	<i>Reubicación de puntos de dosificación de químicos</i> <i>Diseño e Instalación de una flauta para la homogenización de los líquidos</i>
<i>Hombre</i>	<i>Olvido en la orden de inicio o seteo del proceso</i>	<i>Implementación de Set Point de nivel para inicio del proceso de neutralización y bloqueo de aseos</i>
	<i>Alteración del proceso para ajustes y cambios manuales</i>	<i>Implementación de SetPoint para el drenado y para el inicio de la neutralización</i>
<i>Métodos</i>	<i>Lógica lineal para control de comportamiento no lineal del pH</i>	<i>Implementación doble rango de dosificación y ajuste tiempos de dosificación</i> <i>Instalación de agitador</i>
	<i>No hay restricciones para el ajuste del proceso</i>	<i>Validación de rango de pH para la etapa de drenaje</i>

Tabla 3. Análisis de causa y mejora planteada

De esta forma se puede apreciar que se requieren mejoras a nivel de máquinas, en los materiales e insumos del proceso, en los operadores y en los procedimientos (métodos) que se usan actualmente para la operación y el control de este proceso.

5. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN

En esta sección se describen las mejoras realizadas en el sistema de neutralización de pH. Cada mejora se introduce con una descripción de la debilidad del sistema actual y la propuesta de mejoramiento implementada.

Como fue mencionado en el capítulo anterior, tras la lluvia de ideas aparecieron buenas propuestas que sin embargo no se pudieron llevar a cabo. Por esta razón es necesario resaltar que por las características del proceso, por las herramientas que se tenían disponibles y por el presupuesto autorizado manejar, se decidió realizar las mejoras que aquí se plantean, teniendo en cuenta que su elección se basó en una estimación de su costo y su beneficio, partiendo del criterio del personal de mantenimiento y montajes de la empresa.

A manera indicativa aquí se listan cada una de las mejoras adoptadas, teniendo en cuenta que sus cambios son compatibles con el resto de las propuestas planteadas. El detalle final de estas modificaciones lo podemos ver en la Figura 16 (se resaltan los cambios en rojo):

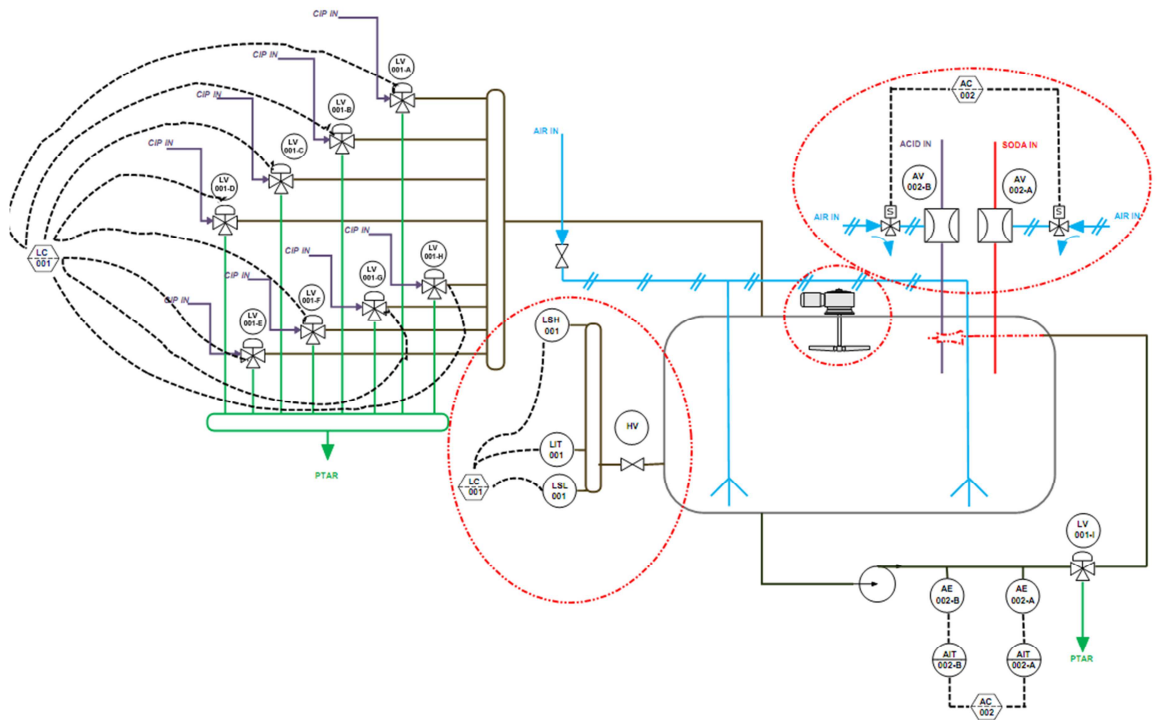


Figura 16. P&ID de la planta después de la modificación

5.1. IMPLEMENTACIÓN DE UN RANGO DE SETPOINT DE PH PARA EL DRENADO

La situación encontrada es que una vez que los pH-metros detectan que el valor de pH del líquido que está circulando es igual al establecido como SetPoint, se inicia la fase de drenado, la cual no finalizaba hasta que el switch de bajo nivel se lo indicara. Esto resultó en un problema debido a la baja homogenización que ocurría en el tanque. Estos dos puntos se expondrán con un poco más de detalle a continuación, seguidas de su acción o acciones correctivas.

- i. **Baja Homogenización:** aparece debido a que la mezcla entre el líquido y los químicos que se adicionan para la neutralización, soda o ácido, se daba

por acción de la bomba de recirculación, cuyo caudal es de 45 m³/h. Debido a que este tanque tiene un volumen de 25m³, la bomba tarda en teoría aproximadamente 34 minutos para recircular una vez el volumen total del tanque y sin embargo, no se garantiza una homogenización adecuada de la mezcla tras esto). Debido a esto, la mayoría del volumen del tanque no tiene el pH requerido para ser tratado por la PTAR afectando severamente su buena operación, generando malos olores por la muerte de los microorganismos que se encargan de la remoción de la carga orgánica. También se detecta que durante la neutralización los valores de pH varían demasiado, pasando de un extremo al otro (es decir de ácido a básico y viceversa) haciendo que el proceso se vuelva incontrolable y se deba neutralizar de manera manual, representando una pérdida exagerada de tiempo, retrasando arranques de línea, disminuyendo el desempeño de la producción y además causando pérdidas de químicos.

- i. **Poca eficiente dosificación de químicos:** La estrategia para la dosificación se estableció por pulsos de tiempo a prueba y error, sin embargo no se dedicó el tiempo suficiente para hacer un buen estimado y una validación de la estrategia. El tiempo que se requiere para poder generar una variación del pH, depende del valor de pH y del volumen que tenga el líquido dentro del tanque, lo que implica que la dosificación debería estar ligada a una cantidad determinada por el pH o más bien por la concentración del líquido y su volumen.

Acción correctiva implementada

Debido a el rango de tolerancia de la PTAR, en cuanto a los valores de pH de entrada, se decidió que el proceso no era necesario fijarlo en un valor cerrado sino que, como permite una flexibilidad, podemos drenar el volumen del líquido si este se encuentra dentro del rango de valores de pH permitidos por la PTAR. Por esta

razón el SetPoint se modificó: ya no se establece un único valor de pH sino que se establece un rango de valores de pH permitidos en los cuales el tanque puede iniciar su proceso de drenaje. Estos valores pueden ser ingresados por HMI pero se sugieren dejar fijados en 5 y 8,5 (debido a que estos son los valores dentro de los cuales la PTAR trabaja de manera adecuada).

5.2. IMPLEMENTACIÓN DE DOBLE RANGO DE DOSIFICACIÓN Y AJUSTE DE LOS TIEMPOS DE DOSIFICACIÓN

Con esta propuesta se pretende mejorar la estabilización del pH y disminuir la sobre dosificación de químicos. Se detectó que los tiempos de reacción a la dosificación establecida no eran constantes y que además las variaciones obtenidas en los valores de pH tampoco, por lo cual los tiempos de neutralización variaban. Esta respuesta empeoraba a medida que el pH se acercaba más al valor de 7. Lo que se observó fue lo siguiente: cuando el pH iniciaba en 13 (básico), se dosificaba ácido por un tiempo de 1 minuto cada 30 segundos para que el pH disminuyera su valor en X décimas. Cuando el pH llegaba a 12 y se seguía dosificando de igual manera, la variación era de un valor Y décimas (siendo $Y > X$). A medida que disminuía el pH, esta variación se incrementaba mucho más (siendo muy notorio después de un pH de 9) hasta el punto en que el proceso se hacía mucho más sensible y cambiaba hacia el extremo ácido, llevando el proceso al desperdicio de químicos ya que además de haber proporcionado más ácido del necesario, ahora se debía iniciar una dosificación con soda para alcanzar la neutralización.

Acción correctiva implementada

A través de un procedimiento de ensayo y error se realizaron pruebas de dosificación manual para un nivel fijo del tanque (70%). La metodología usada en

las pruebas fue de la siguiente forma: se fijó el nivel en 70%, el pH en un valor de 12 y el control del tanque en manual, se dosificó ácido durante el tiempo inicial del sistema (1 minuto cada 30 segundos tres veces) y se esperó el tiempo necesario en el que hubiera un cambio en el valor del pH. Este proceso se repitió en toda la escala del pH. Tras realizar estas pruebas se detectó que el pH se comportaba similar en algunos rangos y su efecto también tomaba tiempos similares. Con esto se llegó a la conclusión de que para mejorar el ajuste de la dosificación la solución era dividir los tiempos de dosificación en dos rangos diferentes, de acuerdo al valor de pH detectado, así:

Ácido:

Rango 1 (10-14): 20s de dosificación. Respuesta favorable a los 300s.

Rango 2 (8,5-10]: 5s de dosificación. Respuesta favorable a los 150s.

Soda:

Rango 1 [1-5): 15s de dosificación. Respuesta favorable a los 360s.

Rango 2 (5-6,5): 10s de dosificación. Respuesta favorable a los 240s.

Con esta mejora se logró estabilizar de manera más rápida el pH dentro del rango requerido sin sobrepasar los límites y prácticamente se eliminaron los desbordes, disminuyendo el desperdicio de químicos adicionados por ciclo de neutralización realizado.

5.3. INSTALACIÓN DE AGITADOR

Se encontró que los tiempos de homogenización del líquido neutralizado no son los adecuados puesto que en el mejor de los casos el tiempo de neutralización

duró entre 2 - 3 horas o simplemente nunca se logró neutralizar el volumen del líquido con el sistema en automático (los operadores indicaban que un tiempo razonable sería entre 1 - 2 horas). Cuando duraba demasiado, se procedía a dosificar en modo manual o simplemente drenar y exponer la planta de tratamiento a una alta carga de ácido o soda y asumir todo los riesgos que esto pudiera traer. Las causas detectadas para estos largos periodos de neutralización fue la baja capacidad de mezclado. La conclusión fue que para reducir el tiempo de neutralización se requería un aumento de la capacidad de agitación y mezclado. Para conseguir esto se procede a instalar un agitador que garantice una buena mezcla del líquido y los químicos.

Acción correctiva implementada

Montaje de un agitador para mejorar la mezcla, su grado de homogenización y reducir significativamente su tiempo, de tal manera que las lecturas de pH realizadas por los pH-metros sean realmente representativas del volumen total del líquido y no medidas puntuales de algunos baches del líquido que se está neutralizando.

La agitación y homogenización se generó de dos formas:

- i. Primero se realizó un montaje provisional de un agitador neumático ya que no se tenía recursos definidos para invertir y la necesidad de lograr rápidamente una mejora que se pudiera apreciar ya que los tiempos de entrega de los equipos generalmente oscilan entre las 6 y 8 semanas en el mejor de los casos. Este agitador neumático es una electroválvula y un par de lanzas que inyectan aire comprimido en el tanque durante periodos de tiempos configurables por el operador vía HMI (ver Figura 17).

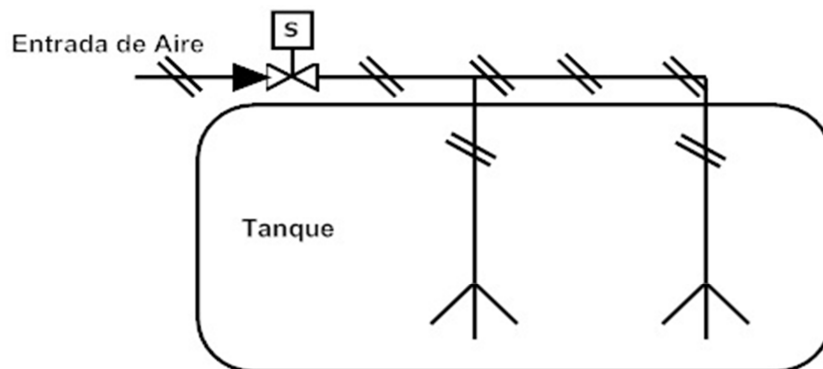


Figura 17. P&ID del agitador neumático

- ii. Se programa la compra de un agitador.

Nota: Finalmente el agitador no se compró, sin embargo se montó un agitador que se retiró de un silo existente. Este agitador no es de gran revolución pero se aprovechó para mejorar la mezcla, poder disminuir los tiempos de activación de la electroválvula y bajar el consumo de aire comprimido. La Figura 18 muestra una foto de la instalación realizada.



Figura 18. Agitador eléctrico

5.4. REVISIÓN DE SECUENCIAS DE LOS ASEOS Y PROCESO PRODUCTIVO PARA LIMITAR LA CANTIDAD DE LÍQUIDO QUE DEBE INGRESAR AL TANQUE

Las válvulas del colector de entrada siempre se encuentran apuntando hacia el tanque de neutralización realizando vertimientos dentro del tanque que no son necesarios de neutralizar (por ejemplo hay rutinas de aseo que no llevan residuos y son solo agua de enjuague). Se debe optimizar el control para que estas apunten al tanque solo cuando realmente sea necesario, garantizando que al tanque no irá ningún residuo no deseado y así no se le restará capacidad de

recibo al tanque. Además se debe asegurar que, una vez que el tanque alcance el SetPoint deseado, el nivel de líquido dentro del tanque se mantenga para no desestabilizar el sistema ni alargar los tiempos de neutralización lo cual no se cumplía como se encontró en los históricos (se trata en el siguiente literal).

Acción correctiva implementada

Se verificaron los aseos que son afluentes del tanque de neutralización y se garantizó que las válvulas del colector en modo automático ciclen de acuerdo a los pasos de los aseos. Un ejemplo de esto es que durante los pasos de enjuague inicial y final de los aseos, las válvulas de los colectores deben apuntar hacia la PTAR directamente y no a neutralización ya que en estos pasos no hay presencia de químicos (ácidos o bases).

Durante las secuencias de producción, las válvulas también deben estar apuntando hacia la PTAR (esto por la misma razón): en los ciclos de producción no hay posibilidades de generar residuos de químicos y si grandes volúmenes de agua que restan capacidad de recibo al tanque de neutralización.

5.5. CONTROL EN LAS VÁLVULAS DEL COLECTOR DE ENTRADA

Durante las observaciones realizadas al sistema se detectó que durante la fase de neutralización el nivel del tanque aumentaba y el pH variaba sin razón aparente. Revisando, encontramos que estas perturbaciones tenían su origen en aseos que se realizaban simultáneamente cuando el tanque estaba en su fase de neutralización y que vertían sus desechos al tanque, ocasionando que los tiempos de homogenización y neutralización se aumentarían y la dosificación de químicos se descontrolara.

Acción correctiva implementada

Se agregó una rutina de control para las válvulas del colector y líneas de CIP con el fin de garantizar que cuando el tanque se encontrara en fase de neutralización, los aseos que se estén realizando, se suspendan, de manera que no se generen residuos hacia el tanque durante dicha fase.

5.6. CAMBIO EN EL MONTAJE FÍSICO DEL SENSOR DE NIVEL

Tras la primera revisión se detectó que la señal de indicación de nivel muchas veces no se estabilizaba, realizando oscilaciones que no permitían al operador estimar el volumen real del tanque. Otras veces aparecía un valor de nivel en la indicación pero el tanque en realidad no se encontraba en el nivel mostrado.

Se programó un análisis más detallado y se desmontó el transmisor de nivel, se realizaron verificaciones para descartar fallas o errores de calibración pero el equipo se encontró en buenas condiciones. También se analizaron los históricos del equipo y se observó que la variación de nivel no es continua. Por esto se procedió a revisar la ruta de cableado y se encontró que el cable de señal del transmisor está muy cerca de una bandeja que lleva cables de potencia para el encendido de bombas del evaporador 5. Por esta razón se procedió a cambiar la ruta de cableado.

Después de realizado el cambio de la ruta del cableado, las oscilaciones desaparecieron pero el nivel esporádicamente mostraba diferencias. Por esta razón, se revisó nuevamente la instalación y se encontró también que el sensor no tenía la mejor ubicación (el diafragma del sensor se ensuciaba muy rápido generándose una costra en él debido a la naturaleza del residuo recogido en el tanque).

Acción correctiva implementada

Se modificó la instalación del sensor, retirándolo del tanque y montándolo en un capilar conectado por una especie de vaso comunicante al tanque. Este capilar aleja el sensor de variaciones bruscas de presión generadas sobre el sensor y de la espuma de soda (la cual ocasionaba la suciedad en el diafragma). También se adecuó la instalación para que el capilar fuera desmontable, facilitando su limpieza y calibración. En la Figura 19 se muestra una indicación de la ubicación inicial del capilar, y en la Figura 20 se muestra la ubicación final.



Figura 19. Ubicación inicial del transmisor de nivel



Figura 20. Ubicación final del transmisor de nivel

5.7. CAMBIO DEL SWITCH DE NIVEL CON MEJOR TECNOLOGÍA

El inicio de la fase de neutralización y el final de la fase de drenado son indicados por boyas flotantes dentro del tanque. Los operadores argumentan falsas señales de “*activación de neutralización*” y “*final de fase de drenado*”, lo que se pudo evidenciar es que las boyas se enredaban entre sí debido a la turbulencia generada por la bomba de recirculación en el tanque.

Acción correctiva implementada

Se cambia la tecnología de las boyas por un switch de nivel fijo ubicado en el mismo tubo capilar que se instaló el sensor de nivel. Se pudo confirmar la eliminación de las falsas activaciones de las señales.

5.8. REUBICACIÓN DE PUNTOS DE DOSIFICACIÓN DE QUÍMICOS

Los puntos de dosificación de químicos se encontraron encima de la succión de la bomba de recirculación en uno de los extremos del tanque, a lo cual consideramos que esta ubicación no favorece a la homogenización, pero si a la sobredosificación de químicos. Esto se pudo evidenciar cuando se detectaron cambios rápidos en el valor del pH: cuando la bomba succionaba una carga de químico dosificado el pH-metro indicaba un valor que correspondía a un “paquete de dosificación” y no realmente al valor del pH del líquido.

Acción correctiva implementada

Se modifican los puntos de descarga de los químicos, ubicándose ahora en el extremo opuesto a la succión de la bomba de recirculación, evitando que los baches de químicos adicionados sean succionados de manera inmediata por la bomba y detectados por los pH- metros generando acciones de control erróneas como la adición de químicos o el inicio de la fase de drenaje hacia PTAR.

5.9. DISEÑO E INSTALACIÓN DE UN ASPERSOR PARA EL MEZCLADO LA HOMOGENIZACIÓN DE LOS LÍQUIDOS

Como se explicó anteriormente los químicos dosificados caían al tanque y eran succionados por la bomba además de generar sobredosificación de químicos y desestabilización del pH también contribuye a un retardo de la homogenización ya que el paquete de dosificación no se mezcla bien hasta que no son recirculados varias veces dentro del tanque, generando grandes retrasos en los tiempos de aseo

Acción correctiva implementada

Se diseñó e instaló un aspersor tipo flauta al final de la tubería de recirculación para atomizar y esparcir el líquido que es succionado por la bomba (causando un efecto spray). Con esto se busca disminuir el tiempo de homogenización ya que los paquetes de químicos que son adicionados entran atomizados. Se propone colocar también las descargas de los químicos dentro de la flauta pero se deben comprar cheques que garanticen que los residuos del tanque no se regresarán hacia los tanques de químicos.

5.10. IMPLEMENTACIÓN DE SETPOINT DE NIVEL PARA INICIO DEL PROCESO DE NEUTRALIZACIÓN Y BLOQUEO DE ASEOS

El transmisor de nivel tiene tecnología Hart y salida 4-20 mA pero solo es usado como señal de indicación de nivel, lo cual es un desaprovechamiento del instrumento, ya que no se están utilizando todos los beneficios que él puede brindar para mejorar las condiciones del proceso. Al tener solamente como activación de la fase de neutralización la señal originada por la conmutación del switch de nivel (Entrada digital 24 Vdc), se está limitando al sistema a activarse solo cuando el tanque se llene prácticamente por completo y para la finalización se debe esperar a que el proceso de drenaje termine (entrada digital 24 Vdc del switch de bajo nivel). Esto genera que los tiempos de espera sean altos entre aseo y aseo y además no le permite ningún tipo de flexibilidad a la línea. En muchas situaciones se nota también que el nivel del tanque no alcanza su valor máximo y sin embargo se requiere poder neutralizar. Por la forma en que se desarrolló la estrategia de control esto no era posible.

También se encontró que cuando no se alcanza el nivel alto para la activación del switch y se terminan los aseos en la línea, se generan grandes traumatismos al

comenzar un nuevo ciclo ya que el tanque no tiene la capacidad suficiente de recibo de aseos y empieza a rebosarse. Aunque estos desechos caen a un dique de contención, su limpieza es muy engorrosa y genera gastos adicionales por concepto de limpieza.

Acción correctiva implementada

Se establece un valor de SetPoint de nivel el cual puede ser modificado por el operador mediante una HMI sin embargo sugerimos mantenerlo en 70% (ya que durante las pruebas de puesta en marcha fue el valor de nivel que mejor desempeño permitió para el sistema). También se mantiene la señal del switch de alto nivel como medida de emergencia en caso de que el transmisor falle: el switch de nivel alto dará inicio a la fase de neutralización una vez este conmute. De igual manera se estableció un límite inferior para la señal de finalización de drenaje y apagado de la bomba. Este valor no es programado por el operador (ya que corresponde a una señal de seguridad para proteger la bomba). El switch de bajo nivel se conserva en caso de falla del transmisor, pues en este caso será él quien apagará la bomba de recirculación.

Este valor de SetPoint también bloquea los aseos que se estén realizando durante la fase de neutralización: los aseos que se estén realizando no podrán ingresar al tanque para no alterar el proceso porque, como se mencionó antes, se evidenció en los históricos que en ocasiones el nivel del tanque seguía aumentando, y el valor del pH variaba durante la neutralización.

5.11. VALIDACIÓN DE PH OK PARA INICIO DE LA ETAPA DE DRENAJE

Como ya se reportó anteriormente al iniciar la etapa de drenaje la válvula de recirculación cambia su estado y todo el volumen del tanque es enviado hacia la PTAR hasta que la boya de bajo nivel indique que la bomba debe detenerse y la

válvula regresa a su estado normal (tanque en recirculación). Debido a que una vez el pH-metro detectaba el pH en el valor del SetPoint, se iniciaba el drenaje y no se tenía en cuenta si toda la mezcla era homogénea o no, llevando el proceso en ocasiones a descompensación en la planta debido a la gran cantidad de líquido con pH fuera de norma que se enviaba a la PTAR.

Acción correctiva implementada

Después de iniciada la etapa de drenaje la válvula de “RECIRCULACIÓN / PTAR” es controlada por el valor del pH medido, de manera que, si dentro de esta fase de drenado el pH se desvía por fuera de los límites establecidos, la válvula regresa inmediatamente a la posición de recirculación evitando drenar producto fuera de norma.

6. ESQUEMA DE OPERACIÓN FINAL DE LA PLANTA

En este apartado se muestra cómo es la operación de la planta después de haber implementado las mejoras descritas en el apartado anterior.

Para la operación de la planta, al igual que antes, se dejaron dos modos de operación del sistema de neutralización: modo manual y modo automático.

6.1. OPERACIÓN EN MODO MANUAL

Para la operación manual se mantuvieron todas las acciones descritas en el apartado 2 y se adicionaron los comandos del agitador y de la válvula de aire (ver Figura 21). Además se le agregó a la pantalla de ajustes los tiempos de dosificación manual de químicos tenga una duración establecida por HMI y no sea manteniendo el botón pulsado como era originalmente.

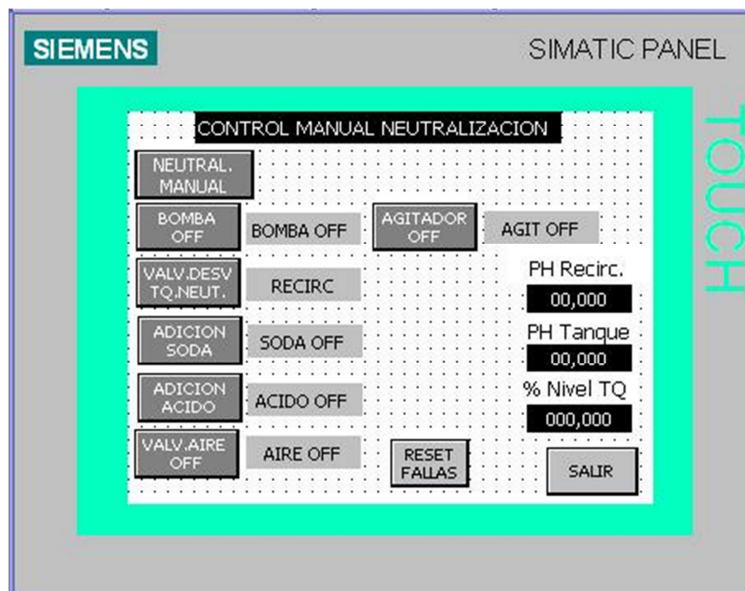


Figura 21. Pantalla operación manual

6.2. OPERACIÓN EN MODO AUTOMÁTICO

En modo automático el sistema de neutralización se dejó con la misma estructura por fases. Cada una de las fases quedó establecida así:

- i. **Recirculación en espera de nivel:** Una vez se seleccione el modo de operación automático, se activa la bomba de recirculación y la válvula de producto estará apuntando hacia recirculación (tanque), esta fase permanecerá activa hasta que el tanque logre el SetPoint de nivel fijado por el operador en la HMI (se recomienda establecer este valor en 70%) o hasta que el switch de alto nivel sea activado por el líquido (señal de seguridad para evitar reboses del tanque y garantizar que el proceso de neutralización será activado). **NOTA:** La bomba se activará solo si el switch de bajo esta activo.
- ii. **Neutralización:** La activación de la fase de neutralización se presenta cuando el nivel del tanque alcanza el valor del SetPoint, cuando se pulsa el botón de comienzo de neutralización manual o en un caso de falla cuando el switch de alto nivel lo indique. Durante la fase de neutralización el sistema realiza la adición de químicos: si el pH es mayor que 7.0 se adiciona ácido y si es menor que 7.0 se adiciona soda. Una vez activada la fase de neutralización el sistema enviará un bit de bloqueo para los demás aseos que puedan estar presentándose en la línea. Esta función puede habilitarse o deshabilitarse vía HMI pero requiere de una contraseña para poder realizarlo. Esta acción está habilitada por defecto. La adición de químicos se hace por pulsos, los cuales son intervalos de tiempo establecidos por el usuario mediante una HMI. Se deben establecer los tiempos de duración de la dosificación y el tiempo de apagado de la dosificación de acuerdo a los límites superiores e inferiores de pH los

cuales se programan vía HMI. Para poder realizar una mejor dosificación (debido a la variabilidad del proceso en el caso de esta planta en particular) se establecieron como límites superior e inferior en el dosificador 1 los límites de operación de la PTAR 5 y 8,5; y los límites superior e inferior del dosificador 2 se establecieron, de acuerdo a los ensayos de prueba y error, en 10 para el superior y en 3,5 para el inferior. La fase de neutralización finaliza cuando el valor marcado por el pH-metro esté dentro del rango de valores establecidos como SetPoint de pH, límite superior y límite inferior fijados por el usuario en la HMI dando inicio a la fase de drenado hacia la PTAR (se sugiere como límite inferior 5 y límite superior 8,5 para no alterar el buen funcionamiento de la PTAR). Durante la etapa de neutralización se activa y desactiva la válvula de aire del agitador neumático durante tiempos programados por el operador en la HMI. El agitador eléctrico siempre se mantiene encendido.

- iii. **Drenando a PTAR:** Cuando el valor del pH marque dentro del rango del SetPoint se cumple entonces la validación de pH OK y se inicia la fase de drenaje a la PTAR. Durante la fase de drenado, cuando se detecta una desviación de los valores establecidos dentro del SetPoint de pH, la válvula de recirculación conmuta y regresa de inmediato a la posición de recirculación. Entonces el sistema valida el nivel de tanque: si este es inferior al 40% el sistema da por finalizada la neutralización y regresa a la fase de recirculación; de lo contrario, el sistema regresa a la fase de neutralización y volverá a dosificar el químico que sea necesario. De no presentarse ninguna desviación, la fase finalizará solamente cuando el transmisor de nivel indique una lectura menor del 10% y apague la bomba (o en caso de falla una activación del switch de bajo nivel apagará la bomba).

Una vez realizadas estas tres fases se puede decir que los aseos y residuos contenidos en el tanque se encuentran neutralizados y pueden ser procesados por la PTAR sin inconvenientes.

Estas tres fases se dan a manera de ciclos, solo una puede empezar cuando finalice la otra. De igual forma, después que finaliza la etapa “*Drenando a PTAR*”, la secuencia vuelve a iniciar con la primera etapa “*En espera de nivel*”.

6.3. AJUSTES DEL SISTEMA DE NEUTRALIZACIÓN

Presionando el botón de ajustes del menú principal se puede acceder a la pantalla de ajustes (ver Figura 22). Los ajustes aquí hechos se cargarán y utilizarán cuando el sistema esté en modo manual. Los tiempos de “*Aire en Recirculación*” y “*Aire en Neutralización*” son comunes para ambos modos.

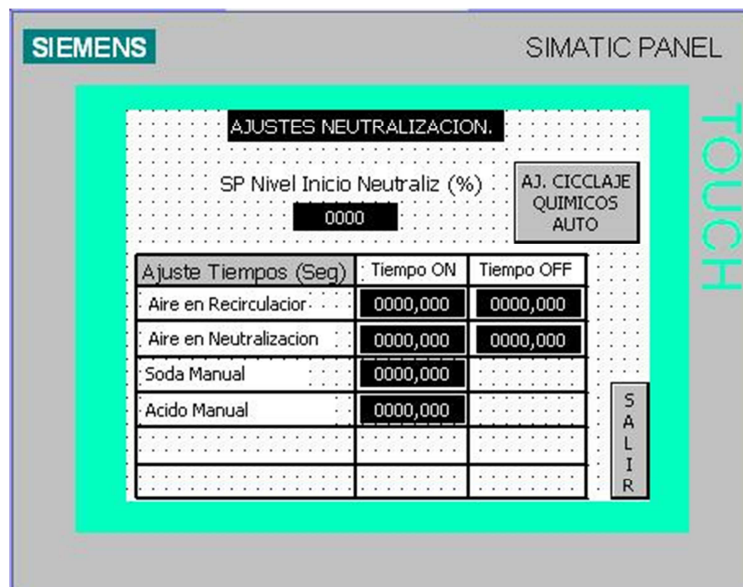


Figura 22. Ajustes modo manual

En la Figura 23 se pueden ver las pantallas de ajustes para el modo automático, la cual solo se puede acceder presionando el botón de “AJ. CICCLAJE QUIMICOS AUTO” de la pantalla anterior.

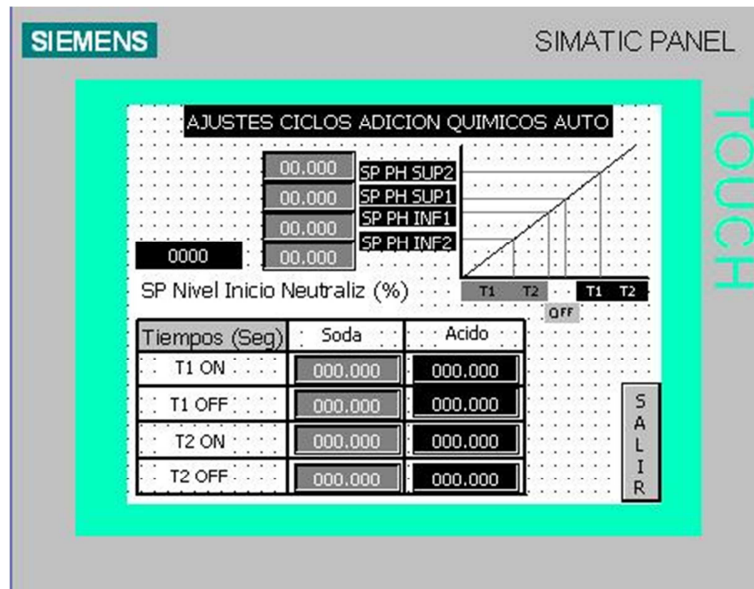


Figura 23. Pantalla de ajustes de químicos automático

La pantalla para habilitar o deshabilitar los bloqueos de aseos cuando se inicia la neutralización, se carga presionando el botón de Mantenimiento de la pantalla principal del CIP. Luego se debe digitar la contraseña de acceso para poder ingresar y en esta pantalla (ver Figura 24) se debe presiona el botón “LIBERACION BLOQ. ASEOS”.

La pantalla de liberación de aseos se puede ver en la Figura 25.

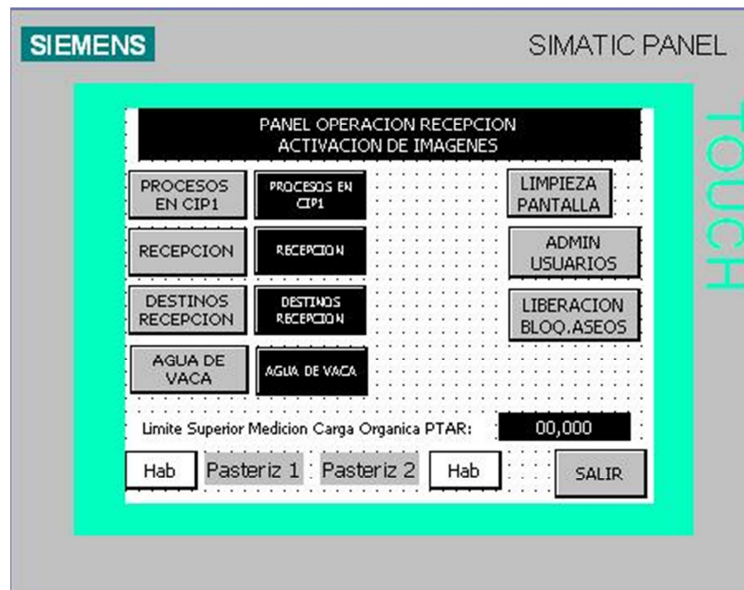


Figura 24. Pantalla Mantenimiento CIP

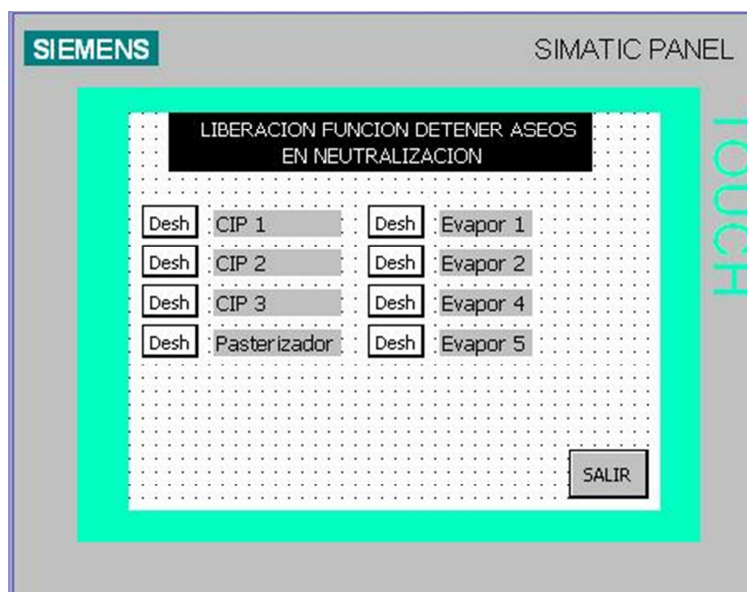


Figura 25. Pantalla liberación aseos

7. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En esta sección se describen las conclusiones y los resultados obtenidos tras la implementación de las mejoras propuestas en el capítulo anterior. Se expone cada uno de los resultados de manera que se pueda contrastar con el caso “antes de”.

Para empezar, queremos resaltar que por las características del proceso, por las herramientas que se tenían disponibles y por el presupuesto que teníamos autorizado manejar, estas mejoras que se implementaron fueron la manera más óptima que encontramos para operar la planta y mejorar el tiempo de espera de aseos, los tiempos de neutralización y lograr una mejora en términos de eficiencia del proceso.

Para proceder con este análisis, al igual que antes y con el objetivo de tener una descripción cuantificada de la situación final, se analizaron los datos históricos de las variables Nivel_Tanque y PH_Tanque en períodos de tiempo diferentes donde hubo producción. Esta información se extrajo del supervisorio y se procedió a realizar tendencias y gráficos del proceso.

Aquí se agregan los gráficos del comportamiento de estas variables, resaltando las etapas del proceso y se realiza su análisis:

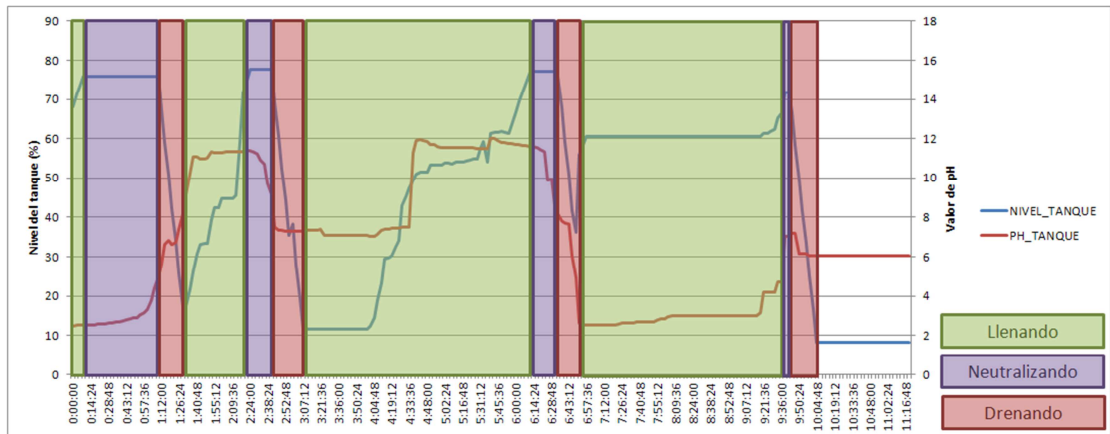


Figura 26. Históricos 18 Agosto 2011

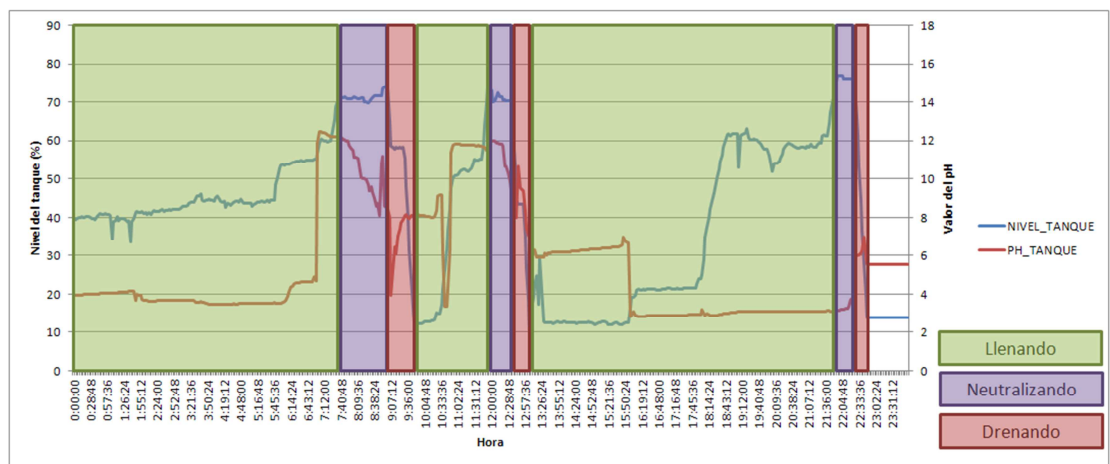


Figura 27. Históricos 16 Septiembre 2011

Del análisis de estos históricos obtenemos la siguiente información:

Si bien la duración del proceso típico de neutralización en algunos casos mantuvo la duración inicial, también se detecta que ya no hay pérdida de tiempo por inicio del proceso porque este inicia en automático con el SetPoint de Llenado; a diferencia de antes que no siempre se llenaba al 100%, quedando el proceso en

espera de la orden manual (dilatándose el inicio del proceso en los peores casos hasta por 5 horas).

- De acuerdo a lo establecido, a través de la observación del proceso pudimos constatar que el proceso de neutralización inicia cuando la capacidad del tanque se encuentra en un 70% de su capacidad. Sin embargo se evidencia que a pesar de fijar el SetPoint en 70%, el nivel final sigue aumentando después de iniciar el proceso de neutralización hasta niveles de 76% - 77%.
- No se volvió a presentar el caso en el que una misma carga del tanque se neutralizó en más de una etapa (a diferencia de antes que se presentaban casos en los que se hacía más de una vez).
- El pH de los residuos a la salida del proceso modificado siempre estuvo en el rango válido (5 - 8,5)
- El tiempo de ocupación del tanque de neutralización (suma de las duraciones de las fases de neutralización y drenaje del tanque), en el peor caso medido resultó en el orden de 1h + 45 m. En el proceso anterior, en el peor caso medido, llegó al orden de 3h + 50 m.
- La neutralización más demorada que se obtuvo fue cuando se presentó la neutralización de una sustancia ácida (dando tiempos similares a la situación inicial). En el caso de las básicas, siempre se obtuvieron tiempos menores.
- Una vez iniciado el proceso de neutralización, no ingresaron al proceso otras cargas hidráulicas hasta que finalizó el proceso.

Partiendo de esta información, se puede concluir que los cambios implementados causaron las siguientes mejoras:

- Se está garantizando una estabilización del pH en un menor tiempo y evitando drenar a la PTAR líquidos con pH por fuera de rango establecido.
- Debido a la estrategia implementada, se hace un mejor aprovechamiento de la línea debido a que la ocupación del tanque de neutralización disminuyó, lo cual aumenta la disponibilidad y la productividad de la línea.
- Se evidencia que la estrategia y mejoras implementadas en el proceso de neutralización fue eficiente en comparación con la anterior.
- La implementación del rango dividido en la dosificación causó un mejor uso de los químicos puesto que el pH no se sale del rango requerido y no se presentan compensaciones como en el proceso anterior.
- Otra mejora en la disponibilidad de la línea, se generó al cambiar el no ingreso de líquidos que no requieren ser neutralizados (enjuagues).
- Desapareció la intervención del operario para la activación de modo manual, anteriormente era muy frecuente emplear el modo manual debido a que los aseos eran retenidos por largo tiempo retrasando al disponibilidad de línea de producción. cabe anotar que este modo manual continúa activo pero se agregó una contraseña al HMI para evitar la activación de este modo sin la debida autorización.

De igual forma, a nivel de realización de proyectos de automatización, se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- Toda intención de automatización debe partir del buen conocimiento del proceso que se requiere mejorar.

- Es necesario poner el foco de la estrategia de automatización en lo que en realidad necesita el proceso que se pretende automatizar (no es necesario modificar toda una línea para realizar una mejora).
- El proceso de neutralización de pH puede ser muy complejo y difícil de estabilizar si no está bien parametrizado.
- Para el caso particular revisado en este trabajo la estrategia de control planteada fue desarrollada usando conceptos de las diferentes literaturas encontradas sin embargo su implementación fue un proceso que tomo un tiempo significativo y requirió realizar pruebas de ensayo y error en especial en el ajuste de dosificación.
- Al comparar la situación inicial con la actual mediante la observación y análisis de los históricos se aprecia una mejoría bastante significativa en el proceso los tiempos de neutralización disminuyeron lo que mitigo de manera impactante los retrasos entre aseos cuando hay múltiples líneas para limpieza.
- Las mejoras en el área de control avanzado son las que más impacto pueden causar en un proceso automatizado.

8. GLOSARIO

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

PFD: “Process Flow Diagram” o “Diagrama de Flujo del Proceso”.

P&ID: “Process & Instrumentation Diagram” o “Diagrama de Proceso e Instrumentación”.

Paquete de dosificación: mezcla entre sustancia ácida y base usada para estabilizar el pH durante el proceso de neutralización.

Titulación: La titulación es un método de análisis químico que permite determinar el volumen necesario de una sustancia en una reacción química, partiendo del volumen de una solución de concentración conocida. Si este análisis lo medimos con pH-metro y lo llevamos a un gráfico, se puede extraer además el comportamiento y el punto final de la reacción, además de obtener la cantidad exacta del reactivo.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] MinAmbiente. “Proyecto Resolución límites máximos permisibles de parámetros en vertimientos puntuales a sistemas de alcantarillado público y a cuerpos de aguas continentales superficiales de generadores que desarrollen actividades industriales, comerciales o de servicio”. 28 Oct 2010. Disponible en internet: http://www.minambiente.gov.co/documentos/DocumentosAmbiente/proyectos_norma/proyectos/281010_proy_res_vertimientos_181110.pdf
[Consultado el 10 Octubre 2011]
- [2] Grupo Lentiscal. “Reacciones de neutralización”. Gobierno de Canarias. Laboratorio Virtual de Química. 2005. Disponible en internet: <http://www.gobiernodecanarias.org/educacion/3/Usrn/lentiscal/1-CDQuimica-TIC/FlashQ/Acido-Base/VolumetriaNeutralizacion/teoriaVolumetriasAcidoBase.htm>
[Consultado el 10 Octubre 2011]
- [3] D.F. Ahmed; S.K.H. Al-Dawery y H.A.O. Al-Anbari. “On-Line control of the neutralization process based on fuzzy logic”. Emirates Journal for Engineering Research, Vol. 12 No. 2, p 89-97. 2007. Regular Paper. Disponible en internet: http://www.engg.uaeu.ac.ae/ejer/issues/v12/pdf_iss2_12/11.pdf
[Consultado el 10 de Octubre de 2011]
- [4] E. Sivaraman y S. Arulselvi. “Neuro modeling and control strategies for a pH process”. International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST). Vol. 3 No. 1, p 194. Enero 2011. Disponible en internet:

<http://www.ijest.info/docs/IJEST11-03-01-004.pdf> [Consultado el 10 de Octubre de 2011]

- [5] Osorio L., Hermes H y Vargas D., Rodrigo A. "Diseño del sistema de control automático de pH en la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa termocartagena S.A. E.S.P." Tesis de pregrado. Cartagena, Colombia. Universidad Tecnológica de Bolívar. 2005
- [6] McMillan, Gregory K. y Cameron, Robert A. "Advanced pH Measurement and Control". 3rd Edition. EEUU. ISA. Vol 8 No. 1, p 199. Octubre 2004. ISBN 978193439-4434.
- [7] Mendiburu D, Henry A. "Automatización MedioAmbiental". Indecopi. Perú. 2003. Disponible en internet: <http://www.galeon.com/hamd/pdf/1libro1.pdf> [Consultado el 16 Octubre 2011]
- [8] Digital Analysis Corp. "pH Adjustment - A Primer-". NY, EEUU. Disponible en internet: <http://www.phadjustment.com/pH.htm> [Consultado el 16 de Octubre de 2011]
- [9] Omega Engineering. "pH Control Systems". 2009. EEUU. Disponible en internet: http://www.omega.com/green/pdf/PHCONTROL_REF.pdf
- [10] Romero Rojas, Jairo Alberto. "Tratamiento de aguas residuales (teoría y principios de diseño)". Bogotá, Colombia. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. 2008.
- [11] Gunt Hamburg. "Conocimientos básicos: Control difuso". [folleto]. 2005. Disponible en internet: http://www.gunt.de/download/fuzzy_control_spanish.pdf [Consultado el 10 Octubre 2011]

- [12] Unamo, Jorge y Cardona, Daniel. "Control en cascada y feedforward". Sistemas de Control II. Universidad Simón Bolívar. Venezuela. 26 Sep 2005. Disponible en internet: http://www.ps.usb.ve/Control/PS2323_0105/apuntes/semana8.pdf
[Consultado el 10 de Octubre de 2011]
- [13] Urquizo, Arturo. Archivo: PID.svg. 5 Octubre 2008. Disponible en internet: <http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:PID.svg>. [Consultado el 25 Octubre 2011]
- [14] Shinskey, F.G. Sistemas de control de procesos. Aplicación, diseño y sintonización. México: McGraw Hill / Interamericana de México, 1996.

ANEXO 1. MANTENIMIENTO DEL SISTEMA

Este capítulo está enfocado al mantenimiento preventivo y correctivo del sistema, se elaboran una serie de rutinas y procedimientos encaminados primeramente a mantener operativo el sistema y todos los elementos que en el interactúan, evitando en lo posible errores en la ejecución del proceso de neutralización.

La rutina de Mantenimiento del sistema de neutralización se concentra básicamente en la inspección rutinaria de sus componentes e instrumentos para garantizar el buen funcionamiento del sistema.



Figura 28. Tanque de neutralización

Se recomienda revisar los manuales de los instrumentos que se encuentran como anexo a este documento.

1. Rutina de Inspección válvulas de los colectores y de recirculación.

¿Dónde?: En campo

¿Cuándo?: Cada mes

¿Qué?:

- i. Revisar el estado general de los racores y acoples rápidos que llevan el suministro del aire comprimido a la electroválvula que se encuentra en el cabezal de cada uno de los actuadores de las válvulas.
- ii. Revisión general de tubos flexible que lleva el aire comprimido hacia los actuadores.
- iii. Inspeccionar estado de sensores inductivos que generan las señales de confirmaciones de posición de la válvula hacia el PLC.
- iv. Inspección Visual de fugas por Uniones SMS entre válvulas y tuberías, o por vástagos de las válvulas que indiquen ruptura de O'Rings o retenedores o empaquetaduras

¿Cómo?:

- i. Inspección visual, auditiva y sensorial, ajuste los racores y apriételes adecuadamente acerque la mano por cada uno de las uniones rápidas entre las mangueras de aire y los actuadores de las válvulas así como de la electroválvula misma, si percibe, escucha o siente flujo de aire comprimido intente presionar el borde del acople rápido y retire la manguera y vuelva a

introducirla nuevamente si el flujo de aire persiste, cambie el acople rápido o racor.

- ii. Observe el estado de las mangueras y verifique que no estén rotas a simple vista, acerque la mano a las mangueras de manera similar al paso anterior si percibe flujo de aire reemplace la manguera.
- iii. Retire la tapa del cabezote del actuador, ajuste los tornillos de la bornera de conexión del cabezote, actúe de forma manual la electroválvula que está en el cabezote girando la perilla hacia la posición 1. Verifique que la señal del led luminoso en forma de flecha se encienda en la posición al sentido de actuación del vástago de la válvula, de lo contrario intente ajustar los sensores inductivos que están ubicados en el mismo cabezote del actuador atornillando o desatornillando, vuelva a repetir este paso hasta que se logre la señal de no poder recibir la confirmación solicitar repuesto al fabricante.
- iv. Solo requiere observación.

¿Quién?: Instrumentista de fábrica

Nota: se sugiere realizar mensualmente debido a que la instalación está a la intemperie.

2. Rutina de Inspección Transmisor de Nivel y Switch de Nivel

¿Dónde?: En campo

¿Cuándo?: Cada mes

¿Qué?:

- i. Estado del capilar remoto y sello de detección.

- ii. Cableado y conexiones en bornera (Transmisor y Switch).
- iii. Estado de las partes móviles de los Switch de Nivel.

¿Cómo?:

- i. Primero aislé el sensor de nivel del proceso cerrando la válvula manual que permite el paso de la columna de líquido hacia la cámara de aquietamiento (Tubo en donde se genera la columna de líquido a medir)
- ii. Retirar la tapa del Transmisor para acceder a las borneras de conexión, ajustar borneras, luego en tablero de control apretar cables en la bornera para los switch realizar procedimiento de forma similar en tablero, inspeccionar estado general del cableado y prensaestopas.
- iii. Primero aislé los switch de nivel del proceso de igual forma como se aisló el sensor de nivel. Examine visualmente puntos de apoyo de las partes móviles, mueva la posición de estas para tratar de generar la activación.

¿Quién?: Instrumentista de fábrica.

3. Rutina de Calibración Switch de Nivel y Transmisor de Nivel

¿Dónde?: En laboratorio.

¿Cuándo?: Anual.

¿Qué?:

- i. Transmisor de nivel
- ii. Switch de nivel

¿Cómo?:

- i. Aislé el transmisor de todo el proceso productivo, cerrando la válvula de conexión a proceso. Corte la alimentación de energía del transmisor desde el tablero de control desconecte el transmisor de las borneras eléctricas, retire el transmisor y lleve al laboratorio para realizar rutina de calibración, de acuerdo a los procesos establecidos por el fabricante y por el laboratorio que realizara la calibración.
- ii. Aislé switch de nivel de todo el proceso productivo, cerrando la válvula de conexión a proceso. Corte la alimentación de energía de los switch desde el tablero de control desconecte los switch de las borneras eléctricas, retire y lleve al laboratorio para realizar rutina de calibración, de acuerdo a los procesos establecidos por el fabricante y por el laboratorio que realizara la calibración.

¿Quién?: Instrumentista de fábrica.

4. Rutina de Inspección Transmisor y sonda de pH

¿Dónde?: En campo.

¿Cuándo?: Cada mes.

¿Qué?:

- i. Estado General cableado, prensaestopas, borneras de conexión.
- ii. Inspección de fugas en las uniones SMS o empaquetadura.

¿Cómo?:

- i. En el tablero de control ajuste borneras de conexión de Transmisor y observe estado general de cableado y prensaestopas.
- ii. Inspección visual de uniones SMS no deben presentar fugas si se evidencia ajustar SMS con llave de uñas o llave de Tubo, de persistir la fuga se debe programar cambio de empaquetadura.

¿Quién?: Instrumentista de fábrica

5. Rutina de Calibración e Inspección Transmisor y sonda de pH

¿Dónde?: En laboratorio.

¿Cuándo?: Cada 6 meses.

¿Qué?:

- i. Transmisor de pH.
- ii. Sonda de pH.

¿Cómo?:

- i. Corte la alimentación de energía del transmisor desde el tablero de control desconecte el transmisor de las borneras eléctricas, retire el transmisor y lleve al laboratorio para realizar rutina de calibración, de acuerdo a los procesos establecidos por el fabricante y por el laboratorio que realizara la calibración. **Nota:** Se recomienda el uso de soluciones patrones de calibración certificadas y conservadas de acuerdo a las observaciones de los fabricantes.
- ii. Aislé la sonda de pH de todo el proceso productivo, cerrando la válvula de conexión a proceso, parando y bloqueando eléctricamente la bomba de recirculación. Corte la alimentación de energía del transmisor desde el tablero de control desconecte el transmisor de las borneras eléctricas, retire la sonda y el transmisor y lleve al laboratorio realice limpieza de la membrana de la sonda pH inspeccione el nivel de reactivo en la membrana según las indicaciones del fabricante si se observa deteriorada o rasgada debe ser reemplazada, si el nivel de reactivo es bajo reponga de acuerdo a las indicaciones del fabricante. Verificar estado de O'rings de la sonda y reemplazar si es necesario.

¿Quién?: Instrumentista de fábrica.

6. Rutina de Inspección Bombas dosificadoras de Químicos

¿Dónde?: En campo.

¿Cuándo?: Cada mes.

¿Qué?:

- i. Revisar el estado general de los racores y acoples rápidos que llevan el suministro del aire comprimido a la electroválvula de activación de la bomba.
- ii. Estado General cableado, prensaestopas, borneras de conexión.
- iii. Revisión general de tubos, uniones o racores que llevan el aire comprimido hacia las Bombas dosificadoras y en la misma bomba que indiquen ruptura de diafragma.
- iv. Inspección visual de fugas por uniones SMS entre bombas y tuberías y en la bomba misma que indiquen ruptura de O'Rings, retenedores o empaquetaduras.

¿Cómo?:

- i. Inspección visual, auditiva y sensorial, ajuste los racores y apriételos adecuadamente acerque la mano por cada uno de las uniones rápidas entre las mangueras de aire y la electroválvula, si percibe, escucha o siente flujo de aire comprimido intente presionar el borde del acople rápido y retire la manguera y vuelva a introducirla nuevamente si el flujo de aire persiste, cambie el acople rápido o racor.
- ii. En el tablero de control ajuste borneras de conexión de la electroválvula y observe estado general de cableado y prensaestopas.
- iii. Observe el estado de las mangueras y tubos verifique que no estén rotas a simple vista, acerque la mano a las mangueras de manera similar al paso anterior si percibe flujo de aire remplace la manguera o tubo. Actué de forma manual la electroválvula en el tablero de control girando la perilla hacia la posición 1 observe si la bomba activa y dosifica en pulsos sin pérdida de aire comprimido o producto por el cuerpo de la bomba si

detectara alguna fuga se debe programar mantenimiento para reemplazo de internos (Diafragmas o'rings y empaques)

iv. Solo requiere Observación.

¿Quién?: Instrumentista de fábrica.

7. Rutina de Inspección Bomba de Recirculación

¿Dónde?: En campo.

¿Cuándo?: Cada mes.

¿Qué?:

- i. Estado general de cableado, prensaestopas, borneras, contactores y guarda motores.
- ii. Consumo de corriente y temperatura del motor.

¿Cómo?:

- i. Verifique el estado del cableado, ajuste prensaestopas y tornillos de las borneras, verifique cableado en contactores y guarda motores ajústelos de ser necesario, verificar punto de disparo de guarda motores con respecto a la corriente del motor.
- ii. Utilice pinza amperimétrica para medir la corriente de consumo y compare con la corriente nominal del motor de estar por encima o en el límite revisar que no exista una condición anormal en el proceso que pueda estar aumentando la carga, después de descartar esta opción si la medición continua desviada programar mantenimiento.

- iii. Con una sonda de medición de temperatura o una pistola de medición verifique la temperatura del motor de estar por fuera de las condiciones de operación revise la ventiladora del motor no se encuentre obstruida, y que el proceso no existan condiciones anormales si después de revisar persiste la temperatura elevada programar mantenimiento.

¿Quién?: Electricista de fábrica.

8. Rutina de Inspección Bomba de Recirculación

¿Dónde?: En campo.

¿Cuándo?: Cada mes.

¿Qué?:

- i. Estado general sellos y acoples de la Bomba.

¿Cómo?:

- i. Verificar el estado de los acoples no presenten juego ni ruidos anormales durante la operación, si se evidencia presencia de fuga se debe programar cambio de sellos de la bomba.

¿Quién?: Mecánico de fábrica.

ANEXO 2. RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Con este capítulo se pretende orientar al usuario para detectar posibles causas generadoras de fallas. Aquí se enumeran las fallas más comunes encontradas en el sistema y lo que se puede realizar para encontrar rápidamente una solución.

Cuando un botón esta iluminando de forma intermitente el sistema está indicando que ese comando está o estuvo en falla. Para reconocerla presione el botón de “Reset fallas” que se encuentra en las pantalla HMI. Si la falla no desaparece siga las recomendaciones a continuación de acuerdo con el caso.

1. Posiciones de válvulas en falla

Si encuentra alguna de las indicaciones de las válvulas del colector o la válvula de recirculación intermitentes verifique que la señal de confirmación de la válvula está llegando como entrada al PLC. Para esto abra el tablero de control y con la lista de símbolos y entradas o con la numeración del cableado identifique cual es la válvula en falla, después busque el número de entrada en la tarjeta del PLC y con un multímetro verifique la presencia de voltaje en la entrada. Si no detecta voltaje, descarte problemas en la tarjeta de entradas. Al descartar la falla de la tarjeta verifique la señal de salida de la válvula, para esto diríjase hasta la válvula y revise los leds de indicación de posición en el cabezote del actuador de la válvula enciendan de acuerdo a la activación del actuador, actúe manualmente la válvula por medio de la electroválvula en el cabezote del actuador girando la muletilla a la posición 1 espere que la válvula actúe y verifique que los leds cambien de estado si no hay cambio de estado en los leds pero la válvula si cambia de posición debe cambiar los sensores inductivos del cabezote, si la válvula no actuó revise el sistema de alimentación de aire comprimido y la electroválvula.

2. Indicación de Bomba en falla

Verifique cableado de contactos auxiliares y que el guarda motor no se encuentre disparado, si encuentra el guarda motor en funcionamiento y el contactor activado verifique que la señal de salida de los contactores esté llegando a la entrada del PLC para esto proceda de manera similar a lo explicado en el apartado anterior (Posiciones de válvulas en falla). Descarte averías o daños del motor.

3. Bomba de recirculación no enciende

Si después de realizar las verificaciones del párrafo anterior la bomba no enciende verifique la señal de entrada al PLC y el estado del Switch de bajo nivel, está siempre debe estar presente de no ser así la bomba nunca se activara, revisar cableado y borneras del switch, verificar que se esté presentando la conmutación simulando manualmente la activación ejerciendo presión en la palanca de activación del switch.

4. Indicaciones erróneas de Nivel o pH

Verificar el buen estado de calibración de los sensores y del cableado que lleva la señal de salida hacia de los transmisores hacia el PLC, si persiste la falla revisar alimentación de los sensores y verificar con un multímetro o un calibrador de procesos la señal de salida de los equipos estén dentro del rango 4-20 mA.

5. Sistema congelado en fase de Neutralización Adición Soda/Ácido

Verificar la Tarjeta de salidas digitales del PLC en donde están las salidas hacia las electroválvulas que activan las bombas de dosificación de químicos.

Verificar que el voltaje proveniente de las salidas este llegando a las electroválvulas con el uso de multímetro.

Descartar fugas de aire comprimido en las mangueras o tubos que alimentan la electroválvula y la bomba.

Nota: Estas son recomendaciones básicas, que tienen la intención de orientar al personal de mantenimiento para facilitar sus labores no debe ser considerado como una herramienta de entrenamiento.

6. Listado de materiales y equipos

Componente	Marca	Modelo	Cant.
Bomba dosificación ácido	Aro Ingersoll rand	PD05R	1
Bomba dosificación soda	Aro Ingersoll rand	66605J	1
Bomba recirculación	APV		1
Transmisor de pH	Mettler Toledo	2100e	2
Sonda de pH	Mettler Toledo	Inpro4260	2
Transmisor de nivel	Rosemount	3051	1
Switch de nivel	Kobold	NKP501Y	2
Válvula de producto	APV	DeltaSW4	9