



## IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIA DE CONTROL DE PROCESO EN PLANTA DE SAPONIFICACIÓN CONTINUA

MODALIDAD DE TITULACIÓN:  
“EXPERIENCIA PROFESIONAL”

NOMBRE DEL ALUMNO: RAFAEL LUGO SEGURA

NÚMERO DE CUENTA: 403098279

CARRERA: INGENIERÍA MECATRÓNICA

ASESOR: M.I. MIGUEL ÁNGEL CRUZ MORALES

AÑO: 2011



## **Agradecimientos**

A Dios, por acompañarme en todos los momentos de mi vida y cuidar de mí y de mi familia llevándonos siempre por el buen camino, poniendo en nuestras vidas las situaciones y personas correctas. A Él debo todo lo que soy.

A mis padres, a quienes agradezco de todo corazón el brindarme un hogar cálido y depositar en mí su entera confianza sin dudar un solo momento de mi inteligencia y capacidad, mostrándome que el único camino verdadero para el éxito es la perseverancia y constancia en todos los proyectos de mi vida. Siempre los llevo conmigo.

A mi hermano, del cual la vida no pudo darme mejor compañero, amigo, maestro, consuelo y consejero para enfrentar las diferentes etapas de mi vida. Este logro también es tuyo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, por brindarme la mejor educación y una formación integral de excelencia, no sólo en el ámbito académico, sino también en todos los aspectos que constituyen a una verdadera Universidad.

A mi asesor, por su amabilidad y paciencia en todas las revisiones y en el proceso de titulación, por su disponibilidad de tiempo y sus correcciones oportunas, aunado a las pláticas no relacionadas con este trabajo, pero que resultaron siempre igual de provechosas.

## ÍNDICE

Antecedentes	3
P&G en México	7
Zest	11
Camay	16
Escudo	17
Proceso de saponificación continua	19
Dosificación	21
Reacción	27
Extracción	32
Neutralización	35
Planta desmineralizadora de agua	36
Descripción del puesto	39
Organigrama	40
Actividades realizadas	42
Estrategia de control de proceso en saponificación continua	42
Condiciones iniciales	42
Definición de <i>centerlines</i> de proceso	44
Calificación del proceso de <i>centerlines</i>	57
Administración del proceso de <i>centerlines</i>	62
Presentación de resultados	68
Comentarios finales	83



## **Antecedentes**

William Procter llega a Estados Unidos en 1832 con su hermano y su primera esposa buscando alguna fuente de ingresos que le permitiera pagar las deudas que había dejado atrás en Inglaterra, donde había abierto una tienda la cual fue consumida en su totalidad por un incendio. Poco tiempo después, ya en Cincinnati, su esposa muere de cólera, por lo que endeudado, viudo y en un país que le resultaba desconocido, decide iniciar un negocio de velas y jabones, aprovechando que la ciudad era un importante centro de empaque de carne, lo cual le brindaba una gran oportunidad de obtener materia prima de manera fácil y a un buen precio.

Por otra parte, James Gamble había llegado a Estados Unidos en 1791 procedente de Irlanda a la edad de 19 años y aunque el plan original de sus padres era establecerse en Louisville, después de una enfermedad de James durante el viaje, decidieron permanecer en Cincinnati donde al poco tiempo de llegado, James Gamble se inició como aprendiz de fabricante de jabón.

Los caminos de ambos se cruzan cuando se casan con 2 hermanas, Olivia y Elizabeth Norris. El padre de las hermanas les sugiere que se unan en los negocios y es así que para 1837, Gamble se muda al negocio de Procter.

Para 1859 la empresa tenía ya ventas por un millón de dólares, de acuerdo a la Cámara de Comercio de Cincinnati. Para sobrevivir y seguir creciendo, la empresa

tuvo que adaptarse y sufrir transformaciones las cuales tienen lugar incluso hoy en día; sin embargo, el rastro de todos los productos de la compañía se puede seguir hasta las grasas y los aceites, materias primas con las que fabricaron sus primeras velas y jabones.

Cada uno de los socios tuvo 10 hijos, los Gamble estuvieron a cargo de la fábrica, los Procter por su parte estuvieron a cargo de la mercadotecnia y publicidad. James N. Gamble, fue la primera persona dentro de la compañía en estudiar como mejorar la manufactura del jabón y las velas. El jabón *Ivory* representa la cumbre de su investigación; introducido al mercado en 1879, fue uno de los primeros jabones que se podía utilizar tanto para el aseo personal como para el lavado de la ropa, antes de *Ivory* el jabón de ropa era muy agresivo para la piel y el jabón de tocador no limpiaba las telas.

*Ivory* fue tan exitoso que se construyó una nueva fábrica ocho millas fuera del centro de Cincinnati llamada Ivorydale, construida con la mejor tecnología y diseñada para ser un excelente lugar para trabajar. Sin embargo, años más tarde, en respuesta a la demanda del negocio y enfocados a mantenerlo siempre delante de los competidores, la compañía tuvo que vender la planta aunque los actuales dueños siguen elaborando jabones para P&G.

La manera en que la compañía entrena y piensa acerca de su gente viene desde William Cooper Procter, nieto del fundador; él empezó a trabajar para la compañía en la década de 1880 y para 1907 era ya presidente. Trabajó lado a lado

con los obreros escuchando y entendiendo lo insatisfechos que estaban con las condiciones de trabajo y los salarios, con lo que empezó a idear una forma en que los empleados se sintieran parte de la compañía y al mismo tiempo darle un mayor éxito al negocio. Creó el reparto de utilidades y la venta de acciones que se tiene hasta nuestros días aunque con ligeras diferencias, sin perder el enfoque que afirma que los empleados deben ser también dueños de la compañía. De igual forma, cambió las regulaciones internas para incluir la afirmación que dice que los intereses de la compañía y de los empleados son inseparables. La importancia de los empleados como el principal bien de la compañía se puede rastrear hasta William Cooper Procter.

Dentro del campo de la publicidad Procter & Gamble lanzó su primera publicación a color en la revista *Cosmopolitan* de 1896 en un anuncio de *Ivory*, así como anuncios de radio en 1923, año en el que por primera vez se pudo comprar tiempo comercial para este medio. En 1924 inicia operaciones un departamento de investigación de mercado, lo cual coloca a la empresa como una de las primeras en enfocarse en lo que el consumidor realmente quiere y necesita.

En 1915, abre la primera subsidiaria internacional en Canadá y en 1930 adquiere la compañía Thomas Headley en Inglaterra. En 1935 se da la expansión a Filipinas. Para el inicio de la segunda guerra mundial, Procter & Gamble tenía ya empleados en 5 países, pero el verdadero crecimiento global comienza en la posguerra.

Cualquier compañía en crecimiento que inicia como un negocio familiar llega a un punto crítico en donde la familia no debe involucrarse más, el reto entonces es mantener los principios y filosofías que hicieron a la compañía originalmente exitosa. Esta transición vino gracias al primer presidente de la compañía que no llevaba ninguno de los apellidos; Richard Deupree, quien inició en la compañía en 1905 sin un diploma de bachillerato, para 1920 era el número uno en ventas y en 1934 alcanzó el puesto de presidente de la compañía.

En la década de 1920, aumentó significativamente el personal en el área de investigación, guiando a la compañía a algunos avances importantes, en 1933 se introdujo el detergente *Dreft*, que realmente lavaba mejor que cualquier jabón. Rápidamente se adaptó la tecnología de los detergentes para aplicarla al shampoo y sus efectos en el cabello; de igual modo, toda la experiencia en cuidado de la piel inició con el estudio del detergente sintético.

El primer producto que realmente marcó una diferencia fue *Tide*, un detergente de uso rudo que funcionaba mucho mejor que *Dreft* o cualquier otro detergente sintético en el mercado. Lanzado en 1946, para 1949 era la marca número uno de detergentes en Estados Unidos y continúa siéndolo hasta hoy en día. El éxito de *Tide* ayudó a financiar la expansión global, llevando esta tecnología de detergente a América Latina y Europa, posteriormente al Oriente Medio y al norte de África. En 1955 se lanza al mercado *Crest*, siendo la primera pasta dental con un efecto anticaries realmente efectivo. *Crest* fue desarrollada en colaboración con la escuela

de dentistas de la Universidad de Indiana, siendo la primera vez en que Procter&Gamble trabajaba de esta forma con una universidad.

## **P&G en México**

Procter & Gamble entra a México en marzo de 1948, con la adquisición de un molino de aceite vegetal en las afueras del Distrito Federal. La compañía tenía que encontrar la manera de hacer de México no sólo un mercado exitoso, sino también una plataforma de expansión para Latinoamérica y estructuras globales de negocio. El ingreso a nuevos países por medio de adquisiciones era una estrategia ya probada por la compañía en Inglaterra, Cuba y Filipinas durante la década de 1930, sin embargo, el esfuerzo de construir desde una base ya formada en México pronto trajo importantes complicaciones. La compañía esperaba encontrar una compañía de jabones, decidiendo al final por una fábrica de aceites comestibles, sólo después de no encontrar una mejor opción. Aunque el negocio batalló desde el principio, poco tiempo después la fábrica demostró ser obsoleta y decadente, con lo que la compañía consideró salir del país luego de este fracaso.

Mientras tanto, las posibilidades de mercado para el detergente parecían ser limitadas. Dado el bajo ingreso *per capita* de los consumidores y las evidentes diferencias entre la economía mexicana y la norteamericana, la potencial demanda para un producto de gama alta como el detergente sintético parecía insignificante. La compañía subestimó el deseo de los consumidores latinoamericanos de adquirir productos de limpieza con desempeño y valor superior, hasta que un empresario en

Venezuela comenzó a importar Tide descubriendo un mercado sorprendentemente robusto. Intrigada, la empresa compró el negocio y expandió las ventas de *Tide* a Cuba y México. Cuando Colgate empezó a levantar una fábrica de detergentes en México, P&G rápidamente alineó un plan para construir su propia planta de detergentes en Nuevo Vallejo, Ciudad de México.

Procter & Gamble entró al mercado mexicano de detergentes con *Ace*, una fórmula basada en *Tide*, pero modificada para las condiciones de lavado mexicanas, con algo de más activo y más espuma. Colgate por su parte compitió con *Fab*, el cual tenía un nivel mucho más alto de activo y perfume que *Ace*. La mayoría de los consumidores lavaban su ropa a mano, con agua fría en arroyos o tinas de metal, condiciones bajo las cuales *Ace* tenía un mucho menor desempeño que *Fab*, con lo que después de algunos años, los consumidores mexicanos conocían a cualquier detergente como *Fab* de manera general; incluso al comprar *Ace*, las personas lo solicitaban como *Fab* rojo, que era el color de la caja en la que venía empacado el detergente de la compañía.

En 1956 la compañía lanzó *Star*, un detergente mejor formulado para lavar con agua fría y soportado por una campaña de mercado más innovadora y estratégicamente construida; las cajas de *Star* venían empacadas con pequeños regalos de plástico, juguetes, utensilios, boletos de cine y cosas similares. *Star* apenas impactó el liderazgo de *Fab* en el mercado, pero al menos generó ingresos modestos para la compañía. A mediados de los años cincuentas, el mercado del detergente en México empezó a cambiar cuando productores locales como La

Corona y 1-2-3 crearon sus propias plantas de detergentes ofreciendo producto a granel con un desempeño considerablemente menor que *Ace* o *Fab*, aunque también de mucho menor precio. Era una propuesta de valor diferente, que puso el detergente sintético al alcance de más consumidores mexicanos. Este nuevo mercado era apenas rentable, aunque debido al volumen generaba ganancias, particularmente si una compañía que decidía entrar tenía ya una planta de detergente. P&G y Colgate se unieron a este mercado, vendiendo producto a granel sin marca.

El mercado a granel dañó a Colgate fuertemente, ya que erosionó la imagen de marca que la empresa había construido alrededor de *Fab*. Los consumidores comprando producto a granel continuaban pidiendo *Fab*, los vendedores lo ofrecían como tal y rápidamente la asociación con la marca cambió. El consumidor comenzó a relacionar a *Fab* con un producto degradado que se desempeñaba significativamente peor que el detergente en caja. Colgate reconoció el fenómeno y luchó desesperadamente para proteger el nombre de su marca, pero sus esfuerzos fueron inútiles.

P&G por su parte sintió que estaba ante una importante posibilidad de mercado, por lo que en 1958 la compañía respondió con *Rápido*, de color azul, formulado para lavar con agua fría y para las preferencias de los consumidores mexicanos, con considerables niveles de perfume y mayor desempeño de espumabilidad comparado con sus consumidores a granel, además empacado en bolsas de polietileno, lo cual le ofrecía una protección adicional al agua comparado con el papel periódico donde

generalmente se empacaba el detergente a granel y permitiendo reducir su costo para resultar más competitivo. Aunque *Rápido* fue la primera marca de la compañía que mostró un verdadero conocimiento del mercado mexicano, P&G todavía no estaba ganando cómodamente en la categoría de lavado, por lo que en 1967 la compañía decidió lanzar un nuevo detergente basado en tecnología de enzimas desarrollado en Europa.

Debido a que era costoso, *Ariel* no parecía muy atractivo para contender en la participación del mercado mexicano. La tecnología de *Ariel* se adaptaba particularmente a las condiciones del país, dado que entregaba un desempeño superior a través de un amplio rango de condiciones de lavado, su tecnología de enzimas limpiaba manchas impermeables para otros detergentes ordinarios, funcionaba bien lavando a mano y con agua fría así como con altos niveles de dureza en el agua. La compañía inició pruebas de mercado de *Ariel* en enero de 1968 e hizo el lanzamiento a nivel nacional para mayo del mismo año. Basado en el precio de *Ariel*, P&G México proyectó que la nueva marca atraería menos del 5% de la participación de mercado. Sin embargo, una vez más los consumidores mexicanos demostraron su capacidad para reconocer un producto de desempeño superior por el cual estaban dispuestos a pagar. Rápidamente, los números de *Ariel* empezaron a sobrepasar los objetivos iniciales de la compañía, indicando que los consumidores juzgaban a la marca como una verdadera propuesta de valor, incluso a un precio aproximadamente 150% mayor que *Rápido*, con lo que nació una de las campañas publicitarias más exitosas de P&G México. El reto creativo era desarrollar una campaña que pudiera vender un producto muy sofisticado para ser utilizado de una

manera muy poco sofisticada. En poco tiempo, a pesar de su precio, P&G México tenía la fabricación de una mega marca en sus manos. Para mediados de los años ochentas, de acuerdo con Jaime Dávila, gerente general de P&G México en ese entonces, *Ariel* se había convertido en un símbolo de calidad absoluta para el consumidor.

Las implicaciones del surgimiento de *Ariel* como una mega marca permearon a través de toda Latinoamérica. A finales de los setentas y principios de los ochentas, mientras P&G reorganizaba sus negocios internacionales a través de divisiones globales y se expandía en una nueva ronda de mercados latinos, P&G México se convirtió en la plataforma de lanzamiento para más amplias iniciativas estratégicas regionales, con *Ariel* como punta de lanza. En 1980, los detergentes sintéticos representaban el 80% del volumen de la división de América Latina, de lo cual sólo *Ariel* representaba el 60%; con la campaña de *Ariel* denominada *Tú siempre puedes*, surgida en México y exportada a otros países latinos en los años ochentas como el mensaje de mercado central de la marca, *Ariel* se consolidó como una de las mega marcas de la compañía.

## **Zest**

Para mediados de 1982, la deuda externa de México excedía los 80 mil millones de dólares, la cual era evidente que el país era incapaz de pagar dado que el precio del petróleo caía en el mercado mundial. En Agosto de ese año, el peso se colapsó enviando a la economía mexicana a una severa depresión la cual se extendió por el

resto de la década. En lo más profundo de la crisis, uno de los pocos puntos brillantes de P&G México era *Zest*. El staff de la compañía detectó un mercado potencial para la marca a principios de los setentas, cuando notaron que los consumidores en la región de Baja California (donde prevalecía la reglamentación de libre importación), estaban comprando grandes cantidades de barras de jabón sintético. Debió tener un 60 o 65% de participación, aunque nadie podía entender realmente, tal vez se debía a la dureza del agua en la región, la cual hace que el jabón sintético *Zest* sea mucho más eficiente que el jabón tradicional. Al detectar una gran oportunidad, el personal de P&G México pidió a las oficinas centrales un permiso para construir una planta y comercializar *Zest* en todo el país. Debido a que el producto era muy caro para fabricar, los ejecutivos en Cincinnati dudaron en tomar el costo del capital. De cualquier modo, poco tiempo después abandonaron el proyecto.

Los primeros retornos de capital eran gratificantes, *Zest* encontró un mercado fértil en México, particularmente cuando la compañía condujo y explotó la investigación de mercado local, la cual reveló que los consumidores utilizaban *Zest* como shampoo, con lo que el cuidado del cabello se convirtió en un punto de entrada para la marca, ya que una vez que los consumidores comenzaban a utilizarlo para lavar el cabello, lo usaban entonces en mucho mayores cantidades para todo lo demás.

Las imposiciones de control de precio del mercado mexicano cortaron severamente el margen de ganancias iniciales de *Zest*, que estaba categorizada

como una barra de jabón convencional y valuada de acuerdo a su clasificación, aunque en realidad era mucho más costosa de producir, por lo que tiempo después la compañía encontró la forma de contrarrestar la situación. Luego de diseñar una significativa mejora del producto, P&G pidió al gobierno reclasificar a *Zest* en una nueva categoría: El producto no era realmente un jabón, argumentó la compañía, si no un dermo-limpiador hecho de ingredientes sintéticos, un estudio de la Universidad Nacional Autónoma de México apoyó la propuesta, de tal forma que el gobierno fue finalmente persuadido de reclasificar a *Zest*.

Fue una modesta victoria en medio de una etapa oscura, pero para una compañía hambrienta de ganancias, la marca empezó a generar desesperadamente necesidad de flujo de efectivo. Ya liderando el mercado mexicano de barras de jabón, *Zest* pronto fue dando un índice de precio de 53% comparado con otras barras en el mercado. En México y Estados Unidos, la mercadotecnia se movió alrededor del concepto *Vuelve a la vida con Zest*, que para P&G México, significó un slogan con extraña resonancia interior.

Pequeñas victorias como *Zest* alimentaban el negocio. Gradual e incrementalmente, las condiciones generales en México comenzaron a mejorar, las sucesivas administraciones presidenciales empezaron a relajar los controles de precio y otras restricciones económicas. La economía lentamente se recuperó y fortalecido por la crisis P&G México consolidó su posición de mercado.

De hecho, la compañía salió de la crisis de los ochentas como una organización altamente disciplinada y un negocio más fuerte. Forzada a operar bajo estrictos controles de precio, las operaciones se volvieron extraordinariamente eficientes. Para finales de los ochentas, los costos de manufactura de detergentes y barras de jabón eran más bajas en México y la productividad más grande que en cualquier otra parte del mundo.

La experiencia de establecerse y luego defender la posición en el mercado mexicano trajo invaluable enseñanzas sobre hacer negocios en economías en desarrollo. La compañía no encontró lo que esperaba cuando entró a México en 1948, el primer grupo de marcas que P&G puso en el mercado no estaban bien formulados para las condiciones locales. A pesar de que la compañía había ya creado un amplio conocimiento sobre los consumidores norteamericanos, no tenía nada comparable con México, donde Colgate llevaba haciendo negocios por décadas antes de que P&G llegara, inevitablemente los primeros esfuerzos de la compañía de construir sus marcas fueron dolorosos. Sólo a través de la determinación la compañía fue capaz de establecer y mantener un punto de apoyo en el país. Además, sólo cuando P&G empezó a poner productos en el mercado que cumplían con los estándares de calidad locales, valor y desempeño fue que empezó a construir sus marcas ganadoras. *Rápido*, lanzado en 1958, marcó el punto de inflexión; *Ariel* en 1968 se convirtió en la marca de ruptura.

En otras palabras, P&G tuvo que reaprender una fuerte lección mientras cambiaba de *Ace* a *Rápido* y posteriormente a *Ariel*. Puede que los consumidores

mexicanos hayan tenido un ingreso *per capita* menor que sus contrapartes en Estados Unidos, sin embargo demandaban desempeño y además estaban dispuestos a pagar por él. La compañía aprendió a ser respetuosa con los diferentes mercados, algunas veces se piensa que si los consumidores tienen un nivel de ingreso menor se les puede decir lo que deben hacer. P&G no logró hacer avances en nuestro país hasta que aprendió que en México, como en cualquier otro lado, el consumidor sigue siendo el jefe.

La compañía pudo dar la vuelta a la esquina, después de décadas de difíciles lecciones y trabajo duro. Pero incluso entonces, el camino siguió siendo rocoso. Cuando la economía colapsó en los ochentas, P&G México estuvo a punto de hundirse, enfrentando condiciones más difíciles que cualquier otra anterior en los Estados Unidos. Lo que sostuvo a la organización en este oscuro episodio fue la capacidad y sentido de compromiso que P&G había construido. Sentido de propiedad apasionada en un nivel local probó ser vital para el éxito. Enfrentando y superando una prueba suprema, P&G México surgió del desastre económico a final de los ochentas con una de las más esbeltas, eficientes y capaces organizaciones que la compañía jamás haya creado.

México fue importante entonces, no sólo por lo que tuvo que enseñar a P&G sobre la forma de construir marcas, si no también acerca de construir organizaciones. Para poder operar de manera global, P&G tuvo que ser capaz de conducir el negocio a través de una crisis. Colapsos económicos como el que golpearon a nuestro país a mediados de los ochentas son típicos en economías en

desarrollo, por lo que el precio de hacer negocios en estas economías es saber manejar este tipo de situaciones. La compañía prefirió entonces la postura de asumir que la crisis siempre existiría en la región, en lugar de esperar a que esta terminara. Al final, ganar en este ambiente no era cuestión de contener la crisis, sino de capitalizar esta oportunidad.

## **Camay**

Introducido en Estados Unidos y Canadá en el año de 1926, llega a México para 1953 como *The Soap of Beautiful Women* (El jabón de las mujeres hermosas), la publicidad incluía testimonios de jóvenes esposas y dermatólogas que afirmaban que no sólo era delicado con su piel, sino que la aclaraba y embellecía. *Camay* fue el primer producto de *gestión de marca* para P&G, esto significa que fue lanzado intencionalmente para competir contra Ivory junto con los demás competidores, resultado de 2 años de investigación realizada en el nuevo Departamento de Investigación de Mercado, uno de los primeros en todo Estados Unidos. Los diseños de las envolturas, los colores, la forma de las barras y los perfumes fueron todos cuidadosamente probados por miles de mujeres. Camay fue una marca popular desde el principio. Ganó además la aprobación médica de 73 especialistas de la piel como un jabón de tocador lo suficientemente suave para las pieles más delicadas. Un grupo especial de ventas fue puesto en marcha para introducir Camay en todos los mercados, mientras que la fuerza normal de ventas continuaba vendiendo Ivory. Para 1959 se introducen los colores verde, azul y amarillo, dándoles a los consumidores una más amplia gama para satisfacer sus gustos. En 1970 sale al

mercado una fórmula con exceso de grasa (50% sebo, 50% aceite de coco) en una envoltura brillante y satinada de alta calidad mejorando la imagen de la marca en un momento en que los competidores estaban reduciendo la calidad.

## **Escudo**

Introducido en todo el territorio norteamericano en el año de 1965, llega a México en 1966. Posicionado como el más efectivo jabón antibacterial disponible en el mercado, la fórmula original de *Safeguard* presentaba una mejora significativa contra los jabones en barra existentes en el mercado en términos de efectividad germicida y eliminación de olores. Material de publicidad enviado a un grupo de médicos nombraba a *Safeguard* como “un nuevo jabón de tocador con acción antibacteriana residual de reducción sostenida de microorganismos en la piel”. *Safeguard* cumplía con los dos objetivos de:

1. Eliminación inmediata de la mayoría de las bacterias transitorias en la piel.
2. Deposición de un residuo antibacterial que resultaba, con el uso cotidiano, en la reducción sostenida del número de bacterias residentes en la piel.

En 1968, los colores blanco y rosa fueron incluidos para complementar al color beige, estos fueron seleccionados como los colores más consistentes con la decoración de los baños y el gusto de los consumidores. Además de proveer una

alternativa deseable para el consumidor, los colores representaban una excelente forma de obtener un alto grado de visibilidad de marca en el aparador.

Poco después de su introducción, Safeguard se convirtió en un producto con exceso de grasa (esto es, el proceso de agregar aceite de coco a los ingredientes resultando en una mayor espumosis). En 1976, una investigación con pruebas de ojos vendados demostró concluyentemente que los consumidores preferían este jabón enriquecido con espumosis más cremosa lo cual colocó fácilmente a *Safeguard* como el favorito frente a sus mayores competidores de barras de jabón desodorantes.

## Proceso de Saponificación Continua

El propósito del proceso de saponificación continua es producir jabón base de manera eficiente que cumpla con los requerimientos de la compañía y los consumidores asociados con desempeño, calidad y precio. Para tener un proceso de saponificación continua eficiente es necesario tener un sistema preciso, reproducible e ininterrumpido de medición en los componentes involucrados y en las proporciones correctas para mantener un balance constante en los electrolitos del sistema.

La reacción que da origen al jabón es conocida como saponificación. Un mol de la mezcla de grasas y aceites reacciona con tres moles de la base fuerte para liberar un mol de glicerina y tres moles de jabón base anhidro.

El proceso de saponificación continua tiene muchas ventajas sobre el proceso de producción por lotes. Dado que la reacción de saponificación es exotérmica, una vez que los componentes han sido calentados hasta la temperatura de reacción, ya no es necesario seguir calentando el reactor, ya que el calor producido por la reacción mantiene el sistema a la temperatura adecuada. En el proceso de producción por lotes, una gran cantidad de vapor necesita ser empleado, no sólo para suministrar la temperatura necesaria para la reacción, sino también para proveer al sistema de un primitivo sistema de agitación. La segunda ventaja del proceso de saponificación continua es que elimina en gran medida la dependencia de factores humanos. En el proceso de saponificación por lotes, la cantidad de jabón que se obtiene está fuertemente correlacionada con la habilidad de la persona que

prepara el lote, mientras que en el proceso de saponificación continua la eficiencia de la reacción alcanza por lo menos el 95%. La tercera ventaja es la reducción del tiempo necesario para producir el jabón, mientras que en el sistema de producción por lotes se necesitan varios días para terminar un lote completo, en el proceso de saponificación continua se tiene un flujo ininterrumpido de producción, por lo que un solo sistema de saponificación continua puede sustituir a varios tanques de producción de jabón por lotes, conocidos como pailas, las cuales ocuparían una gran cantidad de espacio, lo que representa una ventaja más. Por último, la cantidad de glicerina extraída como subproducto de la reacción puede ser controlada más eficientemente en el proceso de saponificación continua comparada con el proceso de producción por lotes.

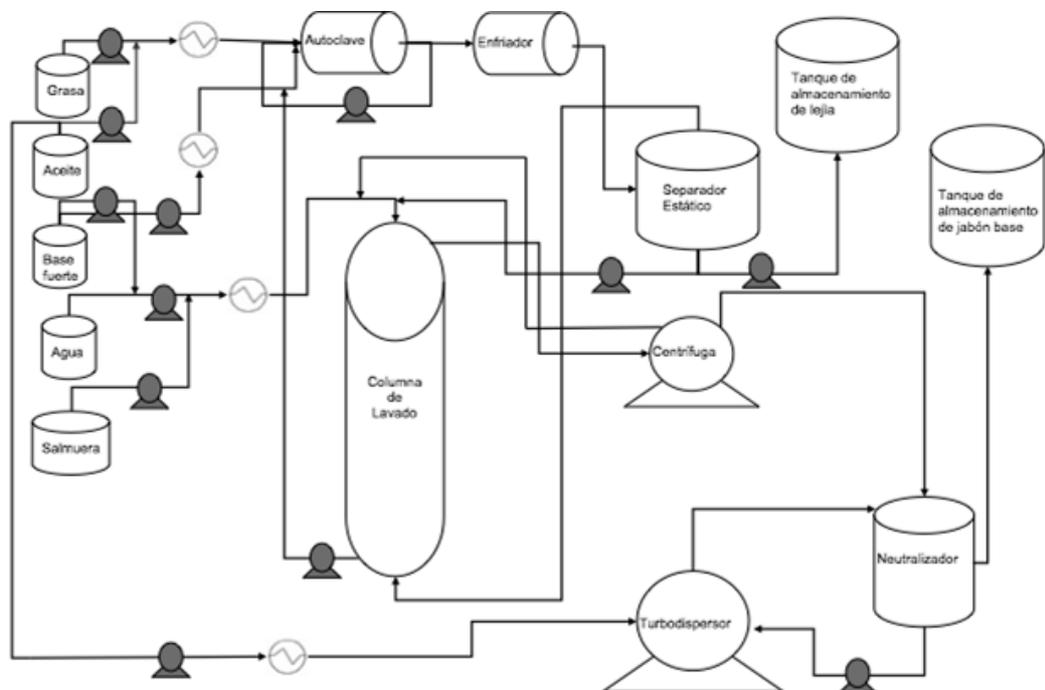


Figura 1. Representación esquemática de los principales equipos en una planta de saponificación continua.

El proceso de saponificación puede ser dividido en las siguientes etapas.

### **1) Dosificación**

El sistema de dosificación se conforma de los siguientes equipos.

Tanques de almacenamiento para agua, solución de base fuerte, salmuera, grasas y aceites.

Bombas de dosificación para base fuerte de lavado, agua de lavado, salmuera de lavado, grasas y aceites de reacción, aceite de neutralización, base fuerte de reacción, salmuera de reacción, lejía media y lejía gastada.

Las materias primas básicas para la producción de jabón son las grasas de origen animal, los aceites de origen vegetal y algunas bases fuertes, típicamente la sosa cáustica (NaOH) o la potasa (KOH). Las grasas y los aceites son una mezcla de diferentes triglicéridos. Un triglicérido se conforma por una molécula de glicerol unida a tres moléculas de ácidos grasos por medio de un éster. En otras palabras los triglicéridos son glicerol con ésteres de ácidos grasos. Usualmente en la naturaleza sólo existen cadenas de ácidos grasos formadas por un número par de carbonos, distribuidos en cadenas lineales donde no hay otros grupos funcionales ligados a estas. Los ácidos grasos son diferenciados así entre ellos por el número de carbonos que conforman sus cadenas. Así mismo se puede hacer otra clasificación de ácidos

grasos entre los saturados y los insaturados. Los ácidos grasos saturados son los que tienen su cadena hidrocarbonada completamente repleta de hidrógenos, por lo que sólo se tienen cadenas simples en los carbonos presentes en dicha cadena, lo que genera una estructura rectilínea de la molécula. Estos ácidos grasos son más comunes en las grasas animales. Por otro lado los ácidos grasos insaturados son ácidos carboxílicos de cadena larga que no está completamente saturada de hidrógenos, lo cual genera uno o más dobles enlaces entre sus átomos de carbono. Se presentan con mayor frecuencia en los aceites vegetales.

SATURADOS		INSATURADOS		
Número de carbonos	Nombre común	número de carbonos	número de dobles cadenas	nombre común
4	ácido butírico			
6	ácido caprónico			
8	ácido caprílico			
10	ácido cáprico	10	1	ácido caproléico
12	ácido laúrico	12	1	ácido lauroléico
14	ácido mirístico	14	1	ácido miristoléico
16	ácido palmítico	16	1	ácido palmitoléico
18	ácido estérico	18	1	ácido oléico
			2	ácido linoléico
			3	ácido linolénico
			4	ácido parinámico
20	ácido arachídico			
22	ácido behénico	22	4	Ácido clupanodóico

Tabla 1. Nombre común y composición de los principales ácidos grasos presentes en las grasas animales y aceites vegetales.

La distribución de las cadenas es la huella digital de las grasas y los aceites, es por eso que el sebo, el aceite de palma y cualquier otra grasa o aceite puede ser identificada, dado que tienen porcentajes definidos de los diferentes tipos de ácidos grasos. Una de las pruebas más importantes que se les puede realizar a estas

materias primas es la determinación de la composición de ácidos grasos a través de una cromatografía líquido-gas (GLC). En esta técnica, los triglicéridos se convierten en metil ésteres los cuales debido a su gran volatilidad son separados por el cromatógrafo. Es importante mencionar que las características de la grasa o el aceite dependen de la distribución de las cadenas de ácidos grasos presentes. A continuación se presenta una tabla de la distribución de ácidos grasos de distintas grasas y aceites.

Distribución de ácidos grasos	Manteca de cerdo	Sebo de res	Aceite de palma	Aceite de coco	Aceite de oliva	Aceite de semilla de palma
ácido caprílico (C8:0)	0	0	0	7	0	4
ácido cáprico (C10:0)	0	0	0	6	0	5
ácido laúrico (C12:0)	0	0	0	48	0	50
ácido mirístico (C14:0)	2	2.5	1	19	0	15
ácido palmítico (C16:0)	25	27	45	9	14	7
ácido palmitoléico (C16:1)	3	0	0	0	1	0
ácido estérico (C18:0)	12	20	0	2	3	2
ácido oleico (C18:1)	45	42	5	8	71	15
ácido linoléico (C18:2)	10	5	39	1	10	1
ácido linolénico (C18:3)	0	1	9	0	0	0
isómeros	3	2.5	1	0	1	1

Tabla 2. Distribución de ácidos grasos de algunas grasas animales y aceites vegetales

En el proceso de saponificación existen parámetros claves en las materias primas que garantizan una reacción exitosa. El valor de saponificación se define como la cantidad de potasa en miligramos que se necesita para saponificar completamente un gramo de aceite o grasa. El valor de neutralización es el valor analítico a la cantidad de ácidos grasos libres que están presentes en una grasa neutralizada, el procedimiento regular para este analítico consiste en convertir el valor de neutralización en un porcentaje de ácidos grasos libres expresados como

ácidos oléicos. Cada valor de neutralización corresponde a 0.503% de ácidos grasos libres. Los equivalentes de saponificación y neutralización indican cuantos gramos de ácidos grasos y grasas respectivamente se pueden convertir en jabón por cada mol de potasa (56.104 g) y sosa cáustica (40 g).

El color es una característica importante en la calidad de las grasas y aceites, ya que en ocasiones se pueden encontrar ciertas pigmentaciones naturales asociadas con los procesos y los materiales con los que se obtienen las grasas y aceites usados en la producción del jabón los cuales son relativamente sencillos de separar a través de procesos de blanqueado y refinado, mientras que algunas otras contribuyen al mal olor del jabón y son difíciles de separar, además de generar pérdidas en el proceso de producción del jabón. Para la grasa es mejor medir su calidad en términos de color blanqueado y refinado para producir jabón de alta calidad, dado que no hay una correlación significativa entre el color puro y el color blanqueado y refinado. Los sistemas de color puro no permiten un blanqueo parcial o el mezclado de grasas con diferentes colores en las plantas que las suministran, donde el color puede ser equivalente al del sebo crudo, pero el proceso durante la saponificación puede presentar un comportamiento distinto.

El color de los ácidos grasos es la mejor medida del costo de procesamiento para obtener jabón blanco de alta calidad. Ésta propiedad así mismo permite determinar si la materia prima ha sido sometida a algún abuso, como continuos cambios de temperatura durante su almacenamiento, lo cual aumentaría la pérdida de grasas durante el proceso de saponificación.

Otra propiedad importante es el valor de yodo, que se define como la cantidad de yodo en centigramos que son absorbidos por cada gramo de grasa y este valor está directamente relacionado con el nivel de insaturación de las cadenas que conforman el aceite, la grasa o el ácido graso. Con esto nos es posible determinar los tipos de cadenas que forman los ácidos grasos que se emplearán. Diferentes valores de yodo pueden afectar la operación, dado que la dureza del jabón depende indirectamente del número de cadenas insaturadas encontradas. Un bajo índice de yodo resulta en una alta dureza del jabón.

El titer se define como la temperatura en grados centígrados a la cual los ácidos grasos se solidifican y es una medida directa de la dureza o suavidad del jabón. Esta propiedad varía principalmente dependiendo del origen del sebo. En general, una grasa dura permite fabricar un jabón firme, mientras que una grasa suave produce un jabón que fácilmente puede tener problemas en su procesamiento a menos que la grasa sea sujeta a un proceso de hidrogenación.

Este valor se determina al mezclar la grasa con potasa, los cuales una vez combinados con los ácidos grasos para formar jabón de potasa, libera glicerina. Este jabón se mezcla con ácido sulfúrico, lo que permite que los ácidos grasos sean liberados, éstos ácidos grasos son recolectados y congelados. La temperatura a la cual la solidificación ocurre es precisamente el titer de la grasa.

Para determinar la cantidad de ácidos grasos contenidos en la grasa, se sigue el mismo procedimiento que en el titer y la cantidad de ácidos grasos recolectados en porcentaje determinan la cantidad de ácidos grasos reales.

Los ácidos grasos libres son relevantes debido a que la presencia de una alta acidez en las grasas y aceites es debida a la acción de las enzimas y la reacción que ocurre entre la grasa y el agua. Un alto contenido de acidez significa que la grasa o el aceite han sido tratados de manera inadecuada y que han sido sometidos a un considerable nivel de degradación durante su almacenamiento. Mientras más alto sea el contenido de ácidos grasos libres en la grasa o el aceite, más rápido se degradará. Al mismo tiempo, la medida de ácidos grasos libres refleja la cantidad de glicerina que no se producirá durante la reacción de saponificación. Cuando se tiene un alto valor de ácidos grasos libres, la cantidad de glicerina que será producida disminuye y la cantidad de base fuerte y salmuera que será necesario utilizar en el proceso aumenta. Además el color del jabón será más oscuro y tendrá un olor desagradable que se le atribuye a la misma degradación a la que la materia prima ha sido sometida.

La humedad y las impurezas son compuestos sin valor que generalmente constituyen menos del 1% de la grasa o el aceite. Cuando el nivel de humedad es alto, se combina con las impurezas haciéndola difícil de separar de la materia prima afectando el proceso al necesitar un exceso de lejía de reacción, dado que hay un índice más bajo de ácidos grasos y el índice de base fuerte se vuelve mayor en el sistema.

Por último, los insaponificables son generalmente materiales solubles contenidos en la grasa o el aceite que no pueden ser utilizados para producir jabón. Éste es un material indeseable porque además de no poder ser saponificado, su presencia dentro del producto disminuye su poder de lavado hasta por tres veces su peso dentro de la pastilla.

## **2) Reacción**

El lugar donde se produce la reacción de saponificación se conoce como autoclave o reactor. Este es un equipo dividido en 4 compartimientos donde las adiciones de grasas, aceites, base fuerte de reacción, salmuera de reacción y lejía media, producto del lavado del jabón en la columna, son medidas y controladas. Todos los componentes son adicionados en el flujo de recirculación al reactor. Los reactantes comienzan a disolverse en micelas de jabón hasta que la reacción puede considerarse homogénea. La velocidad de reacción aumenta mientras las grasas son saponificadas. Dado que el reactor trabaja con una base fuerte diluida en agua, un sistema de dos fases constituido por jabón y lejía se forma en el reactor. A saber se conoce como lejía a la mezcla de agua, base fuerte, sal y glicerina.

La reacción de saponificación es exotérmica y el calor generado se compone del calor liberado por la hidrólisis de los triglicéridos y el calor liberado por la neutralización de los ácidos grasos formados por la reacción. El calor generado por la hidrólisis de 1 mol de triglicéridos es equivalente a 75.24 J, mientras que 58.52 J

son generados mediante la neutralización de un mol de ácidos grasos. El calor total generado asociado con la saponificación de un mol de triglicéridos resulta igual a  $75.24J + (3)(58.52J) = 250.8J$ .

### Etapas de saponificación

Los 2 componentes, la mezcla de grasas y aceites junto con la base fuerte, son completamente insolubles entre sí, por lo que la mezcla de reacción se puede considerar heterogénea.

Un triglicérido está compuesto por tres moléculas de ácidos grasos unidas por una molécula de glicerina. Durante la primera etapa de la reacción, hay una reducción gradual de triglicéridos hacia diglicéridos, monoglicéridos y finalmente a ácidos grasos y glicerol. La reacción con la base fuerte no puede ser llevada a cabo hasta que existan ácidos grasos libres disponibles, por lo que la reacción se lleva a cabo en 3 diferentes etapas, a saber la etapa inicial, la etapa autocatalítica y la etapa final. La reacción de saponificación puede ser representada de la siguiente forma

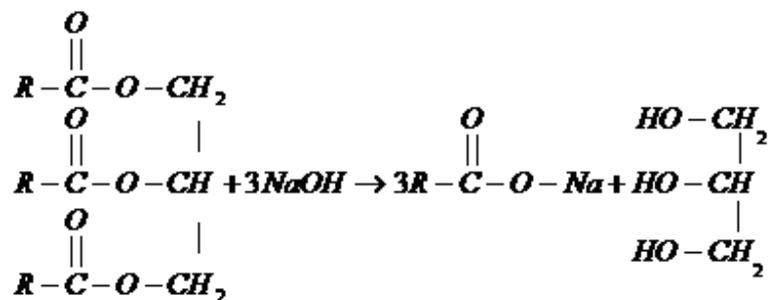


Figura 2. Reacción de saponificación

### **Etapas inicial**

La solubilidad de los reactantes es mínima en esta etapa, por lo que la reacción que se lleva a cabo está restringida a una pequeña porción homogénea del sistema, comenzando precisamente en las fases intermedias. El tamaño de las fases intermedias determina la velocidad de reacción en la fase inicial. Dado que el jabón es un buen emulsificador de grasas en agua, el jabón formado en esas pequeñas interfases produce un incremento en el tamaño de dichas interfases con la consecuente aceleración de la velocidad de reacción, por lo que la velocidad de la reacción continuará aumentando siempre y cuando se mantenga un correcto balance de electrolitos dentro del reactor, ya que un exceso de estos puede reducir la solubilidad del jabón en la fase acuosa, deteriorando su efecto emulsificante. La velocidad de saponificación es mayor en grasas que además contienen ácidos grasos libres en lugar de triglicéridos puros.

### **Etapas autocatalítica**

Esta etapa se caracteriza porque los reactantes en el reactor forman una emulsión prácticamente homogénea, en vez de contener grandes cantidades de grasas y aceites no saponificadas. La razón de este efecto es que la grasa es solubilizada en las micelas de jabón. Una vez que ambos reactantes han sido disueltos en las micelas, la reacción puede ser considerada homogénea, llevándose a cabo en dicha solución. Hay además un incremento en la velocidad de reacción

hasta que toda la grasa ha sido adsorbida, lo cual sucede cuando se ha llevado a cabo cerca del 50% de la reacción. La velocidad de reacción empieza a disminuir conforme se acerca a su etapa final, que se caracteriza por un 90% de reacción total. Este proceso es llamado autocatalítico porque el producto obtenido funciona además como un medio de reacción. Esta etapa se utiliza en el proceso de saponificación continua a través de la inyección de grasas en el flujo de jabón recién formado, provocando que la reacción comience en la parte más alta de la curva de tiempo contra velocidad de saponificación y manteniendo a su vez al sistema siempre dentro de dicha etapa.

### **Etapas final**

Conforme la reacción se acerca a su etapa final, la concentración de los reactantes disminuye, produciendo un menor nivel de material no reaccionado en las micelas donde la reacción se lleva a cabo, por lo que la velocidad de reacción también disminuye.

Un factor importante en la reacción de saponificación es la cantidad de electrolito contenida en la mezcla reaccionada. Muchos electrolitos en el proceso de saponificación producen diferentes efectos, basados en la etapa en que se encuentren. En la etapa inicial, cuando existe una gran y bien definida interfase, un pequeño excedente de electrolito resulta saludable. Por otro lado, si el exceso sobrepasa los límites especificados, producirá gránulos que afectarán la formación de la emulsión.

La velocidad de reacción aumenta durante la etapa autocatalítica después de que el electrolito es agregado en cantidades que no afectan considerablemente los niveles de sal en el jabón. La razón de esto es un incremento en la formación de micelas debida a la adición de electrolitos. Cuando hay mucha sal, habrá una caída en la velocidad de reacción seguida por un incremento en los valores de los electrolitos. Estas consideraciones representan una ventaja en el sistema de saponificación continua. Las grasas y aceites son agregadas junto con la base fuerte a una mezcla de lejía y jabón altamente granulado, con lo que se asegura que se mantiene una alta velocidad de reacción. La etapa final del proceso será así la más rápida y completa con las menores concentraciones de electrolitos, especialmente si se tiene una baja concentración de jabón. Si la concentración de jabón es alta, como usualmente ocurre en el proceso de saponificación continua, un pequeño exceso de electrolito en forma de la base fuerte es necesario para llevar la reacción a su fin en un corto periodo de tiempo.

Si la concentración de jabón es baja, esto es por debajo de la concentración crítica de micelas, la velocidad de reacción será también baja. Una vez que la concentración de jabón permite la formación de micelas, estas solubilizan las grasas insaponificadas incrementando así la velocidad de reacción. Por otro lado, cuando la concentración de jabón es demasiado alta, es posible la formación de cristales de jabón líquido y esto permite a su vez una muy alta velocidad de reacción, dado que estos cristales actúan como un medio de reacción. De esta forma ambos reactantes se solubilizan y la reacción puede ser considerada homogénea.

Las variables críticas a controlar en el sistema de reacción para garantizar una correcta saponificación son la temperatura y la presión del reactor para asegurar así que el sistema se encuentre siempre en su fase auto catalítica y la base fuerte presente en la lejía de reacción, ya que al tenerla en exceso este componente se garantiza que las grasas y aceites han sido saponificadas completamente.

### **3) Extracción**

El sistema de extracción se compone de un enfriador, un separador estático, un tanque de alimentación a columna de lavado, una columna de lavado, un tanque de alimentación a centrífugas y tres centrífugas.

La mezcla de jabón y lejía que sale del reactor debe ser enfriado para poder separar la lejía gastada del jabón antes de ser lavado. Este proceso se lleva a cabo en la unidad de enfriamiento, el cual es un tipo especial de intercambiador de calor con un agitador interno así como un serpentín por donde fluye el agua de enfriamiento. Así el jabón enfriado es enviado al separador estático, cuyo propósito es separar las dos fases que fueron creadas: El jabón y la lejía gastada. La lejía gastada puede ser sujeta al proceso de tratamiento, evaporación y destilación de la glicerina para obtenerla con un alto grado de pureza o puede ser reciclada de vuelta al sistema hacia la columna de lavado para retener la cantidad de glicerina deseada en el jabón.

El separador estático tiene una salida en la parte superior, la cual nutre de jabón el tanque de alimentación a la columna de lavado y una salida en la parte inferior, por donde se extrae la lejía gastada mencionada anteriormente.

La columna de lavado, la cual cuenta con 40 etapas de extracción cada una de las cuales está formada por un disco de acero inoxidable fijado al cuerpo de la columna y un plato giratorio acoplado al agitador, es alimentada de jabón por la parte inferior y por lejía combinada por la parte superior. La lejía combinada se compone de lejía gastada extraída del separador estático y de lejía fresca, que a su vez está formada por agua, salmuera y la base fuerte de lavado.

Al alimentar el jabón por la parte inferior y la lejía combinada por la parte superior, se produce un contacto en contracorriente de ambos fluidos, promoviendo la separación de la lejía que permanecía mezclada con el jabón base y formando así la lejía media, la cual es extraída por la parte baja del reactor y enviada directamente a la línea de recirculación del reactor. Uno de los flujos que entra a la columna se dispersa dentro del otro y el tamaño de las partículas dispersas dependerá directamente de la velocidad de agitación. La lejía que entra en contacto con el primer disco se proyecta hacia el jabón y así se forman los primeros corpúsculos, estos corpúsculos de lejía circulan entre los discos y caen por gravedad en el siguiente compartimiento. En teoría, la fase dispersa debe ser la menos viscosa, así que cuando se dispersa la lejía en el jabón, la interfase se debe mantener debajo del último disco inferior, por lo que una condición crítica en este proceso es mantener un nivel de interfase adecuado, el cual puede ser monitoreado a través de las mirillas de

la columna de lavado y es controlado por el flujo de lejía combinada que entra a la columna y lejía media que sale de ella.

Junto con la etapa de reacción, el proceso de lavado constituye una de las partes esenciales del proceso de saponificación continua. El objetivo fundamental del lavado es el de remover todas las impurezas solubles en la lejía y recuperar parte de la glicerina producida durante la saponificación de los triglicéridos.

En la lejía combinada se debe utilizar una concentración de electrolito cercana al límite de solubilidad, esto es, donde la glicerina es completamente soluble en la lejía y el jabón es prácticamente insoluble en la misma.

Por último, el jabón extraído de la columna fluye hacia las centrifugas, donde por acción de esta fuerza se logra la última y más fina separación entre jabón y lejía. De esta forma el jabón fluye hacia el neutralizador y la lejía es incluida en la lejía combinada, aunque debido a la pequeña cantidad de lejía extraída de las centrifugas comparada con el total de lejía combinada, este flujo se considera despreciable.

Las variables críticas que se consideran en el sistema de extracción son la temperatura de salida del enfriador, con lo que se asegura poder comenzar la correcta separación entre fases y los electrolitos totales en la lejía combinada y la lejía media para garantizar la extracción y el lavado de los componentes mediante el balance de los electrolitos de entrada y salida.

#### **4) Neutralización**

El jabón obtenido del centrifugado contiene una excesiva cantidad de base fuerte que necesita ser neutralizada para cumplir con los requerimientos de la fórmula. En el neutralizador mucha de la base fuerte libre después de reaccionar con el aceite neutralizante es eliminada, formando así una pequeña cantidad adicional de jabón y glicerina.

El objetivo del neutralizador es precisamente llevar a cabo la reacción de neutralización entre el jabón y el aceite neutralizante. El sistema está además equipado con un agitador vertical cuyo objetivo es promover la turbulencia entre los componentes que se encuentran dentro del neutralizador. La bomba de recirculación de jabón, que acelera la reacción de neutralización se usa para enviar el jabón parcialmente neutralizado hacia el turbodispersor, en donde los componentes se integran para lograr una correcta homogenización necesaria para neutralizar adecuadamente el jabón. Después de que el producto ha sido recirculado y neutralizado hasta que el nivel deseado de basicidad es obtenido, el jabón es enviado a los tanques finales de almacenamiento de jabón base.

La variable crítica para la neutralización es el flujo de agente neutralizante, el cual se ajusta cuanto sea necesario para garantizar que el jabón base terminado cumpla con las especificaciones de la fórmula.

## **Planta Desmineralizadora de agua**

El proceso de intercambio iónico no elimina los iones de agua, simplemente, reemplaza los iones indeseables como sodio, calcio, magnesio y sílice del agua del proceso por iones más convenientes como hidrógenos e hidroxilos. El medio de intercambio es una resina sintética y el proceso de intercambio es reversible. Cuando la resina de intercambio se satura con los iones indeseables, se regenera mediante lavado con una solución concentrada de los iones deseados, como el ácido clorhídrico y la sosa cáustica. El regenerador concentrado elimina los iones indeseables de la resina y los reemplaza por los iones deseados como hidrógeno e hidroxilos. El lavado arrastra los iones al drenaje.

Las resinas de intercambio iónico están diseñadas para reaccionar sea con cationes (intercambiadores catiónicos) o con aniones (intercambiadores aniónicos). Una resina de intercambio iónico no puede reaccionar con ambos.

Existen varias aplicaciones del intercambio iónico, una de estas es la desmineralización, la cual utiliza una combinación de intercambiadores aniónicos y catiónicos. Existen varios tipos de sistemas basados en el tipo de resina usado en los intercambiadores. Uno de estos tipos generales es de ácido fuerte y base fuerte, todos los cationes son reemplazados por iones hidrógeno ( $H^+$ ) y todos los aniones son reemplazados por iones hidroxilo ( $OH^-$ ). El resultado neto es el reemplazo de una sal iónica por una molécula de agua.

La planta desmineralizadora funciona de acuerdo a la siguiente secuencia de operación:

El agua que llega a la planta desmineralizadora proviene del tanque elevado que se provee a su vez del pozo de agua municipal. El agua pasa a través de una bomba centrífuga para alimentar a los filtros huracán o pulidores que son filtros que eliminan impurezas y sólidos suspendidos. A la salida de los filtros pulidores se alimenta el agua a los filtros de carbón activado, el cual elimina olor, color y sabor al agua. Una vez eliminados los sólidos suspendidos, olor, sabor y color, el agua entra al sistema de intercambio iónico que consiste en una columna de intercambio catiónico y otra columna de intercambio aniónico.

En las columnas de intercambio catiónico es donde se lleva a cabo el intercambio de iones positivos como sodio, magnesio y calcio por iones de hidrógeno a través del ácido clorhídrico al 8% como regenerante para entrar al sistema intercambiador. Este regenerante satura la cama de la resina con iones hidrógeno para hacer el intercambio de los iones.

La resina intercambiadora de cationes es fuertemente ácida, tipo gel, sintética y de alta capacidad, tipo Poliestireno sulfonado, es una partícula esférica, transparente y de color amarillo.

Después el agua libre de iones positivos se pasa por el tanque desgasificador o tanque intermedio para disminuir la presión de los gases por exceso de bióxido de

carbono dentro del agua. Si no se libera el bióxido de carbono la carga se concentra en las columnas aniónicas disminuyendo así su eficiencia.

El segundo intercambio iónico es a través de las columnas aniónicas donde se retienen aniones como carbonatos ( $\text{CO}_3$ ), silicatos ( $\text{SiO}_2$ ), cloruros ( $\text{Cl}$ ) y sulfatos ( $\text{SO}_4$ ) por medio del intercambio con los iones  $\text{OH}^-$ , la resina de intercambio aniónico es un divinyl benzeno tipo gel, sintético y de alta capacidad, que también permite remover contaminantes orgánicos.

El intercambiador de base fuerte utiliza como regenerante a la sosa cáustica al 50%. Esta puede eliminar todos los ácidos (fuertes y débiles) producidos por el intercambiador catiónico o de hidrógeno.

En la salida del sistema intercambiador de iones, se cuenta con un filtro de salida para evitar el paso de materia extraña, resina o quizá algunos sólidos suspendidos al tanque de almacenamiento de agua de proceso. Al término de este tratamiento obtenemos como resultado un agua desionizada con una baja dureza en términos de partes por millón de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

## Descripción del puesto

La misión del rol de ingeniero de proceso en el área de operaciones es la de optimizar la maquinaria del departamento a través de las herramientas del sistema integrado de trabajo propio de la compañía. Mejorando las variables de confiabilidad de la producción, costo de mantenimiento y métodos operativos.

Los objetivos específicos del rol son los siguientes:

- Garantizar la óptima operación de los equipos del área a través de la observación de sus características operativas, haciendo análisis de pérdidas para encontrar los tiempos muertos y atacarlos según su priorización, generando un plan de eliminación enfocado a algún equipo. Justificando y abriendo inversiones de capital para alcanzar los objetivos de eliminación de pérdidas. Mejorar y crear los estándares de operación para que los equipos mantengan las condiciones básicas de diseño. Diseñando y dando seguimiento al sistema de *centerlines* propio del área.
- Estableciendo estándares operativos y siendo dueño de ellos, ayudando al establecimiento de estándares operativos de las máquinas (limpieza, inspección, lubricación, seguridad y calidad), viéndose reflejados en su norma de inspección diaria, sábana de mantenimiento planeado, estándares de operación y estándares de manufactura. Retroalimentando a los operadores para seguir los estándares operativos. Adicionando, corrigiendo y actualizando

los estándares de manufactura del área. Ayudando a los análisis de fallas de proceso y los incidentes de calidad a los pequeños grupos de trabajo. Asegurando que se aprueben, documenten y cierren los controles de cambios del área.

- Estableciendo un modelo de mejora enfocada, seleccionando modelos de pérdidas o modos de defectos del área para ser analizados utilizando la Herramienta Unificada de Solución de Problemas.
- Apoyando a la selección y especificación de nueva tecnología en equipos nuevos. Participando como líder de arranque por parte de la operación para los proyectos de ahorro, reemplazos o equipos nuevos en el área. Ejecución del proceso de Comisionamiento, Calificación y Verificación, involucrándose desde la fase conceptual, diseño y construcción de los proyectos.

## **Organigrama**

El área de operaciones está liderada por el gerente de operaciones, al cual le reportan los gerentes de área de empaque y fabricación. Al gerente de fabricación a su vez le reportan los ingenieros de proceso y los líderes de área. Los dos ingenieros de proceso están a cargo de las áreas de fabricación y servicio respectivamente.

El puesto de ingeniero de proceso de fabricación (making) tenía inicialmente a su cargo las áreas de saponificación continua (consap), pailas (donde se funde el

jabón fuera de especificación y se fabricaba el jabón por lotes antiguamente), recibo de materiales, reproceso (donde se muele el jabón dentro de especificaciones pero con problemas de empaque) y glicerina (donde se trata, evapora y destila la lejía producto de la saponificación hasta obtener glicerina con una alta concentración).

Después de un cambio organizacional, las áreas de glicerina y sulfatación se delegaron a un tercer ingeniero de proceso, el cual a su vez reporta a un tercer gerente de área independiente a empaque y fabricación.

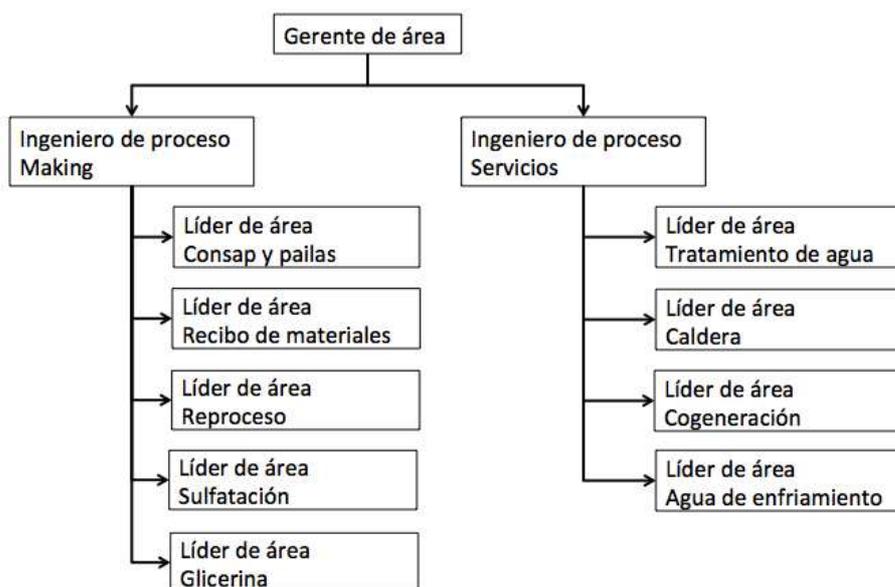


Figura 3. Organigrama del área de fabricación y servicios

## Actividades realizadas

### Estrategia de control de proceso en saponificación continua

#### Condiciones iniciales

**Centerline:** es el ajuste óptimo para los parámetros de proceso de un sistema (presión, temperatura, concentración, etc.). Cuando un sistema está bien establecido en condiciones de *centerline*, entrega producto que cumple con todas las variables y atributos de calidad mientras el proceso cumple a su vez con los objetivos de confiabilidad.

La planta de saponificación continua operaba con un control de proceso basado sólo en la experiencia de los operadores, se realizaban análisis de laboratorio al producto terminado y a algunos intermedios cada ocho horas, lo cual no daba una buena visibilidad de las condiciones reales de proceso. Se tenían algunos *centerlines* establecidos, sin embargo, no se tenía una justificación de la lista de *centerlines* al incluir algunos y excluir otros, por lo que las condiciones de operación que se monitoreaban en el proceso, no eran observadores claros de las transformaciones intermedias que garantizan una producción de jabón base exitosa.

Como consecuencia se tenía producción fuera de especificación aproximadamente una vez al día, reduciendo la confiabilidad de la operación y poniendo en riesgo el manejo de inventario, ya que aunque se cuenta con dos

tanques de almacenamiento de jabón base, al obtener un resultado analítico del laboratorio de aseguramiento de calidad fuera de especificación, automáticamente se detenía el consumo de jabón base de las siguientes etapas del proceso y el tanque era bloqueado para su inspección. El tanque bloqueado era entonces muestreado por el equipo de aseguramiento de calidad en nueve puntos representativos para determinar el estado del resto del producto almacenado. Si se encontraba alguna muestra fuera de especificación, el tanque tenía que ser enviado a las pailas para ser reprocesado y vendido para su uso en un proceso fuera de la planta, ya que el jabón reprocesado no puede volver a las líneas de producción.

En ocasiones el producto fuera de especificaciones tardaba demasiado tiempo en ser detectado y pasaba a las siguientes operaciones dentro de la planta, por lo que para cuando se detenía el tanque, ya se tenía también fideo o producto terminado empacado con jabón base fuera de especificación, lo cual provocaba un trabajo adicional que no agregaba valor a la cadena de suministro, ya que se tenía que detener también el fideo producido así como el producto terminado, teniendo que ser analizado y si era posible, liberado mediante una desviación aprobada a los estándares de calidad, lo cual representaba una pérdida de recursos de operaciones, aseguramiento de calidad y si tenía que ser también reprocesado en las pailas, significaba una pérdida aún mayor, ya que no sólo se perdía la producción de jabón base, si no los servicios, tiempo de máquinas y gente de operación para secar el jabón, así como el material de empaque en el producto terminado y la gente necesaria para pelar el jabón ya empacado, molerlo, verterlo en las pailas, fundirlo y lavarlo para ser vendido a un precio mucho menor que el jabón base original.

## **Definición de *centerlines* de proceso**

Por cuestiones de confidencialidad, en esta sección no se indicarán los valores reales de flujos, presiones, temperaturas, velocidades, concentraciones, etc., que se emplean en el proceso, ya que de estos se podrían deducir las características finales de la formulación de jabón base.

Para determinar las condiciones del proceso inicial, se tomó el diagrama del proceso y la teoría disponible de los manuales del proveedor, revisando también las transformaciones que se realizaban en cada uno de los equipos principales, con lo que se fueron estableciendo cuales eran las variables que realmente influían en el éxito de dichas transformaciones así como la manera en que se debían controlar. Del resultado de este análisis se obtuvo lo siguiente:

El primer punto antes de iniciar el estudio del proceso, son las condiciones de almacenamiento de las materias primas que se dosifican al sistema. En general las grasas y aceites requieren de dos temperaturas diferentes, la de almacenamiento y la de operación. Se cuenta con dos tanques para cada material, uno de almacenamiento en el que se reciben directamente los materiales y uno de día al que se transfieren para poder ser alimentados en el proceso.

La temperatura de almacenamiento se debe mantener entre ciertos rangos establecidos, ya que si esta es muy baja, será imposible bombear las grasas y

aceites cuando se solidifican o se tendrán variaciones de flujo hacia el proceso y si es muy alta, los materiales reducen su tiempo de vida dentro del tanque, ya sea hidrolizándose, lo que provocaría una mala dosificación de materia prima pura, ya que se estaría adicionando agua proveniente de la humedad del ambiente o en el peor de los casos, al ranciarse volviéndose completamente inservible. Esta temperatura se controla mediante un serpentín de vapor que pasa alrededor del tanque de almacenamiento y una válvula automática que restringe el flujo de vapor de acuerdo al transmisor de temperatura instalado en el tanque.

La temperatura de operación, por su parte, es necesaria para dar un precalentamiento a las materias primas y facilitar así la reacción dentro del autoclave. Si las grasas y aceites no se dosificaran a la temperatura adecuada, tomaría más tiempo iniciar la reacción y mantener la fase auto catalítica, por lo que esta temperatura es controlada después de realizar la mezcla de grasas y aceites, al hacerlos pasar por un intercambiador de calor el cual tiene una válvula reguladora automática que controla el flujo de vapor de acuerdo a la temperatura requerida en la pantalla de control y a la lectura en línea del sensor.

Por su parte, los tanques de almacenamiento de base fuerte y salmuera, no cuentan con un control de temperatura, ya que se almacenan a temperatura ambiente, sin embargo, en estos puntos resulta crítica la concentración de las materias primas, para garantizar que las dosificaciones tengan los valores estimados en los balances de materia teóricos.

La base fuerte se recibe directamente del proveedor a la concentración deseada, por lo que el área de recibo de materiales envía muestras al arribar la materia prima y el departamento de aseguramiento de calidad determina si el producto se encuentra a la concentración necesaria para ser utilizado en el proceso o no. Después en el cuarto de control se analiza el producto cada ocho horas, para realizar los ajustes finos a los flujos de acuerdo a las pequeñas variaciones que el material pueda presentar.

La salmuera se prepara dentro de la planta, utilizando agua desmineralizada y sal que es recibida en grano. La sal se disuelve en el agua en equipos dedicados para la preparación de salmuera y se muestrea por lotes hasta obtener la concentración deseada. Una vez liberada por aseguramiento de calidad, se pasa al tanque de día, donde es bombeada directamente hacía el sistema.

La primera parte propiamente del proceso, tomando como base el flujo de grasas a través del sistema, es el autoclave, donde se lleva a cabo la reacción. De acuerdo a los manuales del proveedor, la temperatura y presión de este equipo son claves para la correcta reacción de las grasas con la base fuerte para producir jabón de manera eficiente, sin tener grasas sin reaccionar a la salida del autoclave, por lo que la temperatura y presión fueron las primeras variables que se consideraron incluir en el sistema de *centerlines*.

Otras variables importantes son las dosificaciones de grasas y aceites dentro del autoclave. El flujo total de grasas y aceites determina el flujo de jabón que saldrá

del sistema. Para controlar las dosificaciones de materias primas hacia y dentro del sistema, se utilizan bombas de desplazamiento positivo controladas por variadores de frecuencia y sensores de flujo másico. Todas las bombas de dosificación se programaron para que si existe una variación mayor a 5% del flujo deseado durante más de 30 segundos, se tiene un paro completo de planta, para evitar una mala adición de materias primas lo que ocasionaría problemas en el producto.

Adicionalmente a las grasas, es necesario dosificar la base fuerte al sistema para llevar a cabo la reacción dentro del autoclave. A este flujo directo de base fuerte se le agrega además, el flujo de lejía media que sale de la columna de lavado, la cual está conformada por agua, sal, la misma base fuerte y glicerina. La basicidad de la lejía media colabora en completar la reacción dentro del autoclave, mientras que el exceso de sal y base disueltos en agua y glicerina, funcionan como emulsificante para facilitar el contacto entre los reactivos del sistema. Esta lejía media se analiza para conocer las condiciones del proceso dentro de la columna de lavado así como para balancear el flujo de base fuerte en la reacción.

Después de la reacción, es necesario tener un excedente de base fuerte para garantizar que todas las grasas reaccionaron correctamente, por lo que a la salida del autoclave se toma una muestra de jabón, la cual se deja que se haga la separación de jabón y lejía. Un claro indicador de una reacción malograda o una mala concentración de los electrolitos en el jabón, es la separación de estas fases en un vaso de precipitado. Si la separación se realiza de manera clara y la interfase

entre el jabón y lejía es bien definida, se puede suponer que el jabón producido en el reactor está en buenas condiciones.

Una vez separado este jabón, se toma una muestra de la lejía del fondo del vaso y se analiza para verificar que existe la suficiente base en exceso y que la concentración de sal es la correcta para un buen granado del jabón, el cual previamente se comprobó gracias a la separación.

La siguiente etapa del proceso es el enfriador. En este equipo únicamente se lleva a cabo un intercambio de calor con agua de enfriamiento, por lo que la variable crítica de proceso a monitorear es la temperatura de salida del jabón.

Adicionalmente, es de suma importancia asegurar que el servicio de agua de enfriamiento funcione correctamente, por lo que se tienen instaladas alarmas en caso de paro de la bomba de recirculación del circuito de enfriamiento, bajo nivel de agua, paro en el ventilador de la torre de enfriamiento y baja temperatura del agua de enfriamiento.

El siguiente equipo es el separador estático, en donde la variable más importante es el nivel de interfase que se observa en la mirilla. Se debe observar una clara separación entre el jabón en la parte superior y la lejía en la parte inferior. Este equipo se encuentra ubicado en el segundo piso, arriba del cuarto de control, por lo que originalmente los operadores debían salir, subir las escaleras y caminar hasta el tanque para observar la ventana. Para un mejor monitoreo de esta condición de

proceso, se decidió instalar un sistema de cámaras con una pantalla en el cuarto de control, de este modo los operadores pueden observar la interfase de ambos separadores al mismo tiempo y de manera continua, sin necesidad de descuidar el resto de las variables del proceso.

El separador estático tiene como entrada el flujo de jabón proveniente del autoclave, ya que el enfriador sólo realiza una transferencia de material, por lo que en este equipo no se realiza ninguna adición ni extracción. Por otro lado, las salidas del separador estático las constituyen los flujos de lejía gastada recirculada hacia la columna de lavado, lejía gastada hacia tanques de almacenamiento y jabón hacia columna. Este último flujo no se puede controlar directamente, ya que está dado por el derrame del equipo, por lo que primero es necesario determinar la cantidad de lejía que se debe sacar del separador estático para mantener la interfase en el nivel adecuado. Este flujo total se determinó de manera experimental, manteniendo la suma de los flujos de lejía gastada y recirculada constantes y observando el comportamiento de la interfase directamente en el monitor.

Una vez establecido el flujo de lejía gastada total que debe salir del separador estático, se obtuvo el flujo de lejía recirculada hacia la columna de lavado, el cual determina la cantidad de glicerina que permanecerá en el jabón base. La columna de lavado es un equipo diseñado para limpiar las impurezas e insaponificables que pueda llevar el jabón y extraer la máxima cantidad de glicerina del sistema dado que es un fluido soluble en salmuera e insoluble en jabón.

Al introducir lejía fresca en el sistema, formada por agua, sal y base con la concentración de electrolito adecuada para facilitar la separación de fases, la extracción de glicerina se vuelve más o menos eficiente dependiendo del nivel de la interfase en la columna de lavado, ya que mientras más arriba se encuentre esta, mayor será el tiempo que pase el jabón inyectado a la columna para subir hasta la fase de jabón, por lo que la extracción de glicerina de las micelas de jabón tendrá un mayor tiempo de residencia, siendo así más eficiente.

La cantidad total de lejía fresca introducida en el sistema resulta ser entonces una variable clave, ya que junto con el flujo de jabón a la salida de la operación, esta determinará el tiempo de residencia del jabón en la columna y la eficiencia de extracción de glicerina, así como también la concentración de sal y base en la lejía media, necesaria para alimentar correctamente de estos productos al autoclave.

Dado que inicialmente se consideraban los flujos de agua, salmuera y base de lavado de manera independiente, se tenían variaciones considerables en las adiciones totales de lejía como materia prima a la columna de lavado, lo cual ocasionaba un descontrol general en la interfase de la columna así como en las concentraciones de la lejía media.

Para determinar el flujo total de lejía fresca, se consideró el flujo de salida de la columna de lavado, (después de esta etapa prácticamente no existen adiciones significativas al proceso, la salida de este equipo determina el flujo de salida de jabón del sistema), ya que la cantidad de lejía que se introduce a la columna es

directamente proporcional a la cantidad de grasas necesarias para producir el jabón deseado. Este flujo se determinó de manera experimental, fijando un flujo de producción de jabón base y variando poco a poco el flujo de lejía hasta obtener la estabilidad en el sistema. Después se realizó el cálculo de lejía para un flujo de producción de jabón diferente y una vez establecidos estos dos puntos de operación, se calculó la recta que define la relación entre lejía y grasas, con lo que se obtuvo la siguiente gráfica, se omiten los valores exactos de grasas y lejía por confidencialidad de información.

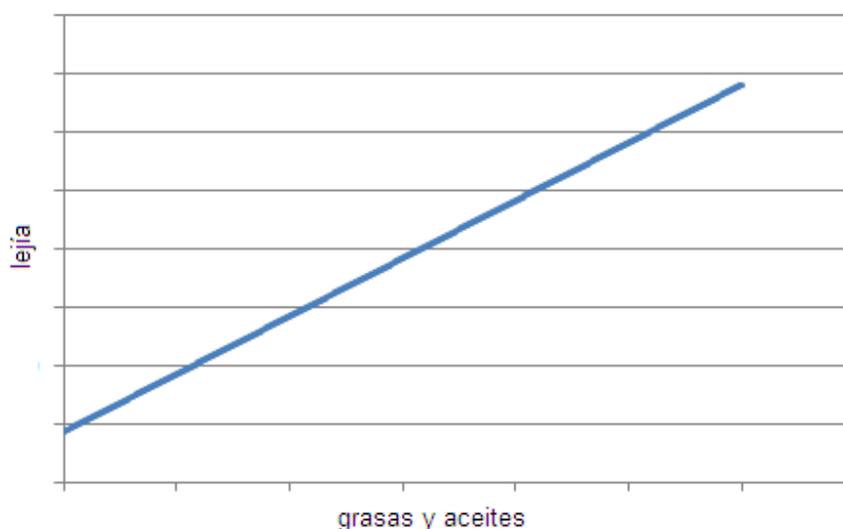


Figura 4. Gráfica de la relación entre el flujo de lejía y el flujo total de grasas y aceites

Otra variable importante en la columna de lavado es la velocidad del agitador, la cual influye directamente en la formación de la interfase y la extracción de glicerina en la columna. Para fijar esta velocidad, se utilizó el dato proporcionado por el proveedor y se fijó de manera definitiva, impidiendo que los operadores pudieran variarlo para tratar de arreglar problemas en el proceso. Dado que las columnas de

las dos plantas de saponificación tienen diferentes motores y reductores de velocidad en sus respectivos agitadores, sólo fue necesario calcular la frecuencia a la que debían trabajar sus variadores de velocidad de la forma.

$$\omega_s = f \omega_{nom} \frac{\omega_{out}}{\omega_{in}} \dots (1)$$

En donde:

- $\omega_s$  es la velocidad angular de salida deseada de la flecha.
- $f$  es el porcentaje de frecuencia.
- $\omega_{nom}$  es la velocidad de salida del motor a la frecuencia nominal de 60 Hz.
- $\frac{\omega_{out}}{\omega_{in}}$  es la relación de reducción de la caja de engranes.

Por lo que despejando el porcentaje de frecuencia y tomando los datos de placa de los diferentes motorreductores de cada planta de saponificación, se puede obtener así el valor del centerline necesario para cada operación.

Una de las salidas críticas de la columna de lavado, como ya se ha visto es el flujo de lejía media, el cual es controlado por una bomba de desplazamiento positivo y un variador de frecuencia el cual está gobernado por un medidor de flujo. Este flujo ya ha sido mencionado dentro de las variables del autoclave, sin embargo, a la salida de la columna de lavado es necesario tomar muestras de esta lejía para analizar la

alcalinidad y la sal que contiene y poder así realizar los ajustes necesarios en el sistema.

La temperatura de operación del jabón dentro de la columna es otra variable a medir en el proceso; el mantener una temperatura correcta nos garantiza una buena separación del jabón, una temperatura muy alta no permite la separación de fases y una temperatura muy baja, puede provocar una sobre corriente en el motor del agitador o en el motor de la bomba de lejía media.

La temperatura de la columna se determina por dos variables. La temperatura de entrada de lejía combinada y la temperatura del agua del enchaquetado del sistema.

La lejía combinada pasa por un intercambiador de calor el cual mediante una válvula reguladora, restringe el paso de vapor automáticamente de acuerdo a la temperatura deseada. El sistema de enchaquetado está compuesto por un tanque de nivel, (el cual mantiene constante la cantidad de agua necesaria en el proceso restituyéndola en caso de pérdidas por derrames o evaporación), un tanque calentador que mantiene la temperatura deseada mediante un sistema de resistencias eléctricas y una bomba centrífuga que alimenta a todo el circuito de agua caliente.

Los siguientes equipos a considerar, son las centrifugas que permiten la separación más fina de jabón y lejía del proceso. Para estos equipos, las primeras

variables para tomar en cuenta son la velocidad de salida del tazón y la corriente del motor. Estas variables son críticas, porque una baja velocidad o una alta corriente pueden provocar problemas en la operación, teniendo una mala separación del jabón o en el peor de los casos, provocando un derrame y un paro prolongado del proceso.

El sistema cuenta con protecciones térmicas por diseño para evitar daños al motor por sobre amperaje, además de un variador de velocidad para lograr una rampa de arranque lo suficientemente larga que no requiera un consumo excesivo de corriente y una rampa de frenado que permita detener el motor más rápido, sin dañar la transmisión debido a la inercia.

El punto crítico para controlar estas variables se presenta durante los arranques, ya que no se tiene un sistema automático de dosificación, el meter el flujo completo de jabón cuando el equipo está en vacío, puede provocar una subida repentina de corriente y el consecuente paro del motor, por lo que los operadores deben ir abriendo manualmente la válvula de entrada, monitoreando la corriente y velocidad del motor, hasta que logren la apertura completa y el flujo de jabón no tenga ya ninguna restricción.

Adicionalmente, las centrífugas cuentan con manómetros a la salida de lejía que se recircula hacia la columna de lavado y del jabón que fluye hacia el neutralizador. Estas presiones deben también ser monitoreadas para asegurar que la separación se está llevando a cabo de manera correcta y que el jabón se encuentra en buenas condiciones. Un aumento en la presión en cualquiera de estas líneas,

puede significar una mala concentración de electrolito en el jabón y la lejía, lo cual a su vez puede provocar una mala separación o el atascamiento de algunos equipos por tener un jabón pesado en el sistema.

El último equipo en el flujo del jabón en el proceso es el neutralizador. En este equipo la variable más importante es el flujo de aceite de neutralización, el cual determina la concentración final de la base fuerte en el sistema, por lo que se debe tener un flujo constante y bien controlado para garantizar la neutralización del excedente de base fuerte luego de todas las etapas de separación. Las adiciones totales de grasas y aceites en el sistema están dadas por el flujo de grasa al reactor, el flujo de aceite al reactor y el flujo de aceite de neutralización. Los flujos de grasa y aceite total, siempre deberán cumplir con la proporción correcta para garantizar el cumplimiento de la formulación deseada. Sea  $X$  el flujo total de grasa y  $Y$  el flujo total de aceite el cual está dado por  $Y = Y_R + Y_N$ , entonces

$$k_1 = \frac{X}{X + Y_R + Y_N} \dots (2)$$

$$k_2 = \frac{Y_R + Y_N}{X + Y_R + Y_N} \dots (3)$$

$$k_3 = \frac{Y_R}{X + Y_R + Y_N} \dots (4)$$

$$k_4 = \frac{Y_N}{X + Y_R + Y_N} \dots (5)$$

$$k_1 + k_2 = 1 \dots (6)$$

$$k_3 + k_4 = k_2 \dots (7)$$

Siendo el flujo de grasa, la suma de flujos de aceite, el valor de las constantes  $k_1$ ,  $k_2$  y el flujo requerido de neutralización, se puede resolver para  $k_4$  de (5) y despejar de (4).

$$Y_R = \frac{k_3(X + Y_N)}{1 - k_3} \dots (8)$$

Despejando  $k_3$  de (7) y sustituyendo en (8)

$$Y_R = \frac{(k_2 - k_4)(X + Y_N)}{1 - k_2 + k_4} \dots (9)$$

A partir de las ecuaciones anteriores, se determinó que los centerlines que podían ser modificados directamente desde la pantalla de control del PLC serían el flujo de sebo y  $k_4$ , ya que con este último, los flujos de aceite de reacción  $Y_R$  y neutralización  $Y_N$  serían dados automáticamente y así se garantiza también que las dosificaciones de grasas y aceites sean siempre en las proporciones adecuadas en todo el jabón producido, ya que un ajuste manual en uno de los flujos sin ajustar su complemento, provocaba variaciones en la composición del jabón y en el consumo proyectado de materias primas. Gracias a esta modificación se logró reducir hasta un 90% el sobre consumo debido a ajustes de proceso realizados respecto a la base.

La temperatura de entrada del aceite de neutralización resulta de suma importancia, dado que el neutralizador es un equipo pequeño y el tiempo de residencia es muy corto, el aceite debe elevarse a una temperatura mayor que en el reactor para lograr la neutralización correcta. Una mala reacción dentro del neutralizador puede ocasionar que la base en el jabón continúe reaccionando con el aceite libre dentro del tanque de almacenamiento y dado que esta es la última etapa del proceso, al analizar el producto a la salida del neutralizador podría parecer que está dentro de parámetros de calidad, pero al analizarlo nuevamente a la salida del tanque de almacenamiento después de un determinado tiempo de residencia dentro del mismo, se pueden encontrar valores de alcalinidad por debajo del límite de especificación, lo cual provocaría la detención de la producción por tener jabón liberado que después de un tiempo no cumpla con las especificaciones del producto.

### **Calificación del proceso de *centerlines***

Una vez establecidos los *centerlines* del proceso, la siguiente etapa consistió en realizar la calificación de los mismos para asegurar que se tienen los rangos correctos de operación.

El primer paso fue analizar el balance teórico de materia, para esto se utilizó el documento proporcionado por el fabricante de los equipos y se hicieron los ajustes específicos a las condiciones de la planta, de esta forma se pudo determinar las cantidades teóricas puntuales de cada materia prima necesarias para la correcta fabricación del jabón.

El siguiente paso consistió en reunir al menos 400 datos históricos de operación en cada flujo de operación; de esta forma se obtuvo la información necesaria para describir el comportamiento de cada variable de proceso y el número de datos suficientes para generar una muestra significativa.

Se seleccionaron los puntos en donde se observara una estabilidad aceptable en las variables de salida de proceso y se descartaron datos extremos para evitar desviaciones no deseadas en los cálculos estadísticos posteriores.

Para determinar la estabilidad de las variables de salida de proceso, se partió de los límites de especificación y los criterios de éxito de los estadísticos de control de proceso ( $-0.5 \leq Tz \leq 0.5$ ,  $Cr \leq 0.75$  y  $Cpk \geq 1.33$ ). Los cálculos de dichos estadísticos se muestran a continuación.

$$Tz = \frac{\bar{x} - T}{s} \dots (10)$$

$$Cr = \frac{6s}{LSE - LIE} \dots (11)$$

$$Cpk = \text{mínimo} \left( \frac{LSE - \bar{x}}{3s}, \frac{\bar{x} - LIE}{3s} \right) \dots (12)$$

Donde

$\bar{x}$  es el promedio de los datos

T es el valor objetivo de la variable

s es la desviación estándar de los datos

LSE es el límite superior de especificación

LIE es el límite inferior de especificación

Es importante mencionar que  $C_r$  se utiliza cuando los límites de especificación son simétricos respecto al objetivo, mientras que  $C_{pk}$  se utiliza para límites asimétricos respecto al objetivo. Esto de acuerdo a los estándares de la compañía y a las características propias de las ecuaciones.

Los límites de control se generaron a partir de una serie de datos aleatorios distribuidos uniformemente centrados en el objetivo de la variable, de tal forma que se amplió y redujo el rango hasta que los datos cumplieran simultáneamente con los estadísticos de control correspondientes. De esta forma se garantiza que aunque los datos reales se comporten completamente de manera aleatoria dentro de estos rangos, los resultados de control estadístico estarían dentro de especificación.

Los límites de precaución se generaron a partir de una serie de datos aleatorios distribuidos normalmente, con media igual al objetivo de la variable y modificando la desviación estándar hasta que el conjunto de datos cumplieran simultáneamente con los estadísticos de control correspondientes. Los rangos se fijaron a una desviación estándar del objetivo de la variable. Este criterio es más estricto que el anterior, ya que la probabilidad de obtener datos cerca del objetivo de la variable es más alta, por lo que los límites reducen su rango.

Una vez obtenidos los límites de control y precaución, se analizó la estabilidad de las variables de salida de acuerdo a las reglas de control estadístico, descartando así de los datos obtenidos los que presentaran las siguientes condiciones.

- Cualquier dato fuera de especificación.
- Cualquier dato fuera de los límites de control.
- Tres o más datos consecutivos fuera de los límites de precaución.
- Cinco o más datos consecutivos con una tendencia ascendente o descendente.
- Siete o más datos consecutivos por encima o por debajo del objetivo de la variable.

De cada conjunto de datos para las variables de proceso se analizó su ajuste a una distribución normal mediante la prueba de D'Agostino con un p-valor de 0.05, usando como hipótesis nula  $H_0$  que los datos tienen una distribución normal y como hipótesis alternativa  $H_1$  la negación de la hipótesis nula. Se calculó el estadístico de D'Agostino mediante la ecuación

$$DA = \frac{\sum_{i=1}^n \left( i - \left( \frac{n+1}{2} \right) \right) x_i^*}{n^2 \sigma_n} \dots (13)$$

Donde

DA es el estadístico de D'Agostino.

$i$  es el índice correspondiente a cada dato.

$n$  es el número de datos totales.

$x_i^*$  es el dato de la muestra ordenado de menor a mayor de acuerdo al índice  $i$ .

$\sigma_n$  es la desviación estándar de la muestra.

Para interpretar y manipular correctamente los datos, es necesario que estos se apeguen a una distribución normal, por lo que cuando las variables de proceso no cumplían con el criterio de la prueba de D'Agostino, se aplicó una transformación Box-Cox de la forma.

$$U(\lambda) = \begin{cases} \frac{x^\lambda - 1}{\lambda \bar{x}^{(\lambda-1)}} & \lambda \neq 0 \\ \bar{x} \ln(x) & \lambda = 0 \end{cases} \dots (14)$$

Donde  $\bar{x}$  es la media geométrica  $\sqrt{x_1 x_2 \dots x_n}$

Maximizando la función de verosimilitud  $L(\lambda)$  se obtienen los valores de  $\lambda$  para cada variable a transformar.

$$L(\lambda) = -\frac{n}{2} \ln \left( \sum_{i=1}^n (U_i(\lambda) - \bar{U}(\lambda))^2 \right) \dots (15)$$

Dada la complejidad del cálculo para maximizar la función de verosimilitud, regularmente se prefirió dibujar la gráfica de la función y obtener el valor de  $\lambda$  de los puntos máximos observados o probando valores entre -3 y 3 realizando la transformación y observando directamente la forma de la distribución de la variable transformada.

Ya que se tenían todas las variables de proceso o sus correspondientes transformadas con una distribución normal, se fijaron los límites de precaución a  $\pm 1$  desviación estándar, los límites de control a  $\pm 2$  desviaciones estándar y los límites de especificación a  $\pm 3$  desviaciones estándar de la media. En el caso de las variables de proceso transformadas para cumplir con la distribución normal, ya establecidos los límites para la variable transformada, se regresó a la variable original mediante la función.

$$x = \begin{cases} \sqrt{\lambda^{-1} U(\lambda) \lambda \bar{x}^{(\lambda-1)}} & \lambda \neq 0 \\ e^{\frac{U(\lambda)}{\bar{x}}} & \lambda = 0 \end{cases} \dots (16)$$

### **Administración del proceso de *centerlines***

Una vez definidos los *centerlines* de proceso, fue necesario establecer el sistema que permitiera estandarizar la administración del proceso mediante el cual, de forma sistémica, a través de la implementación y monitoreo de los *centerlines* de proceso, se llevara a cabo una reducción continua de paros menores, fallas de proceso y averías en las diferentes áreas operativas de la planta. Como resultado, se

debía mantener un proceso de mejora continua de la eficiencia de los procesos operativos.

El requerimiento se estableció como un sistema claro, sencillo y efectivo que garantizara el seguimiento adecuado a la administración de *centerlines*.

Primero se establecieron los pasos a seguir para administrar el sistema de *centerlines*, que se muestran a continuación.

- 1. Toma de datos de *centerlines*:** En este punto, cada operador debía revisar, de acuerdo a la frecuencia establecida por el ingeniero de proceso del área (En este caso cada dos horas) las condiciones de operación del proceso, ya sea en la pantalla del PLC o en los instrumentos locales directamente en las áreas operativas.
- 2. Revisar si los *centerlines* se encuentran dentro de rango excluyendo las desviaciones previas autorizadas:** Los operadores debían conocer las variables que estaban autorizadas a operar temporalmente fuera de rangos y asegurarse que el resto estuvieran dentro de cumplimiento. Para determinar si una variable debía ser autorizada a operar temporalmente fuera de rangos, se realizaba un análisis de falla entre el operador en turno que observó por primera vez dicha variable fuera de control, el líder de área, el experto de mantenimiento y el ingeniero de proceso. Ya que se determinaba que la

variable debía ser calificada nuevamente, se generaba un formato de desviación temporal en el cual se anotaba la variable, la causa encontrada para la desviación y la fecha compromiso para establecer los nuevos rangos; este formato era firmado por todos los participantes del análisis y se guardaba en una carpeta disponible en el área para su consulta. Adicionalmente se agregaba un comentario en la hoja de captura de datos para mantener a los operadores informados.

- 3. Regresar la variable a su valor correcto:** En el caso de que la variable estuviera fuera de rango y sin un formato de desviación temporal autorizado, los operadores debían ser capaces de regresar la variable a su valor correcto inmediatamente después de haber sido detectada.
  
- 4. Revisar si el realizar el ajuste provocó problemas en la operación:**  
Los operadores debían conocer las condiciones básicas de operación de sus sistemas e identificar posibles problemas que se podían presentar debido al ajuste en términos de seguridad, calidad o confiabilidad de la operación.
  
- 5. Documentar en el formato de desviación:** Después de realizar el ajuste, los operadores debían iniciar el llenado del formato de desviación, anotando sólo la variable, el rango permitido, el valor encontrado, así como la fecha y hora en que se presentó, para posteriormente ser completado por el equipo mencionado en el paso dos.

- 6. Solicitar la autorización del líder de área y/o del ingeniero de proceso para operar fuera del rango:** Cuando se encontraba un parámetro fuera de rango, se debía contactar al líder de área y/o al ingeniero de proceso ya sea directo en la planta o vía telefónica para realizar un análisis rápido de la gravedad del problema y determinar si era posible continuar operando bajo esta condición.
- 7. Detener la operación hasta corregir la condición del *centerline* fuera de rango:** En el caso de no autorizar la operación fuera de rango debido a un potencial riesgo en la integridad del producto o la seguridad física y de las áreas operativas, el personal debía iniciar el paro del proceso para realizar el análisis y la corrección de la causa del problema. Se debía informar al gerente del área y al gerente de operaciones sobre el paro no programado y mantener comunicación constante sobre el tiempo estimado para el arranque.
- 8. Continuar con la operación y documentar la falla de proceso o avería:** Una vez que la operación fuera de rangos fue autorizada o se detuvo la operación hasta corregir el problema, se debía continuar con la operación e iniciar la documentación de la falla de proceso o avería, donde se realizaba el análisis para encontrar la causa y las contramedidas a tomar para evitar la recurrencia.

**9. Documentar el porcentaje de *centerlines* capturados y el porcentaje de *centerlines* dentro de especificación:** Los operadores debían conocer el porcentaje de *centerlines* que fueron capturados ya que en ocasiones, si algún instrumento se encontraba dañado, no era posible tomar alguna lectura, lo cual también se consideraba una desviación y era necesario determinar una fecha específica para la reparación o el remplazo. El porcentaje de *centerlines* dentro de especificación se revisaba para conocer la eficiencia del sistema y el número de variables que se tenían fuera de control.

**10. Cumplimiento de los objetivos:** Por último, se revisaba el cumplimiento de las medidas de proceso de acuerdo al plan del área. A diferencia del punto anterior, aquí se revisaban los datos históricos mientras que en el anterior se revisaban los que estaban siendo tomados en el momento de finalizar la toma de *centerlines* correspondiente. Adicionalmente se revisaban el porcentaje de desviaciones documentadas y el porcentaje de planes de acción cerrados en tiempo.

A todo el sistema de *centerlines* se le realizaba una auditoría semanal, revisando los puntos arriba mencionados y dándole a cada uno de manera individual la calificación de cero o cien. Al final se sacaba un promedio de las calificaciones obtenidas y ese era el resultado de la auditoría de salud al sistema de *centerlines*. Cada área tenía diferentes objetivos y tiempos para lograr consistentemente un cien por ciento de calificación en su auditoría de salud, por lo que se revisaba el

cumplimiento respecto a su objetivo y el seguimiento a los planes de acción propuestos en auditorías anteriores.

Después del primer mes de auditorías, se revisaba el promedio de calificaciones de cada punto evaluado para determinar de manera más clara cuales eran los puntos débiles del sistema en cada área. Adicionalmente de manera mensual se realizaba una junta con los líderes de área donde el sistema estaba funcionando correctamente, para determinar si era necesario realizar alguna modificación en el sistema de administración y que de esta forma fuera más efectivo.

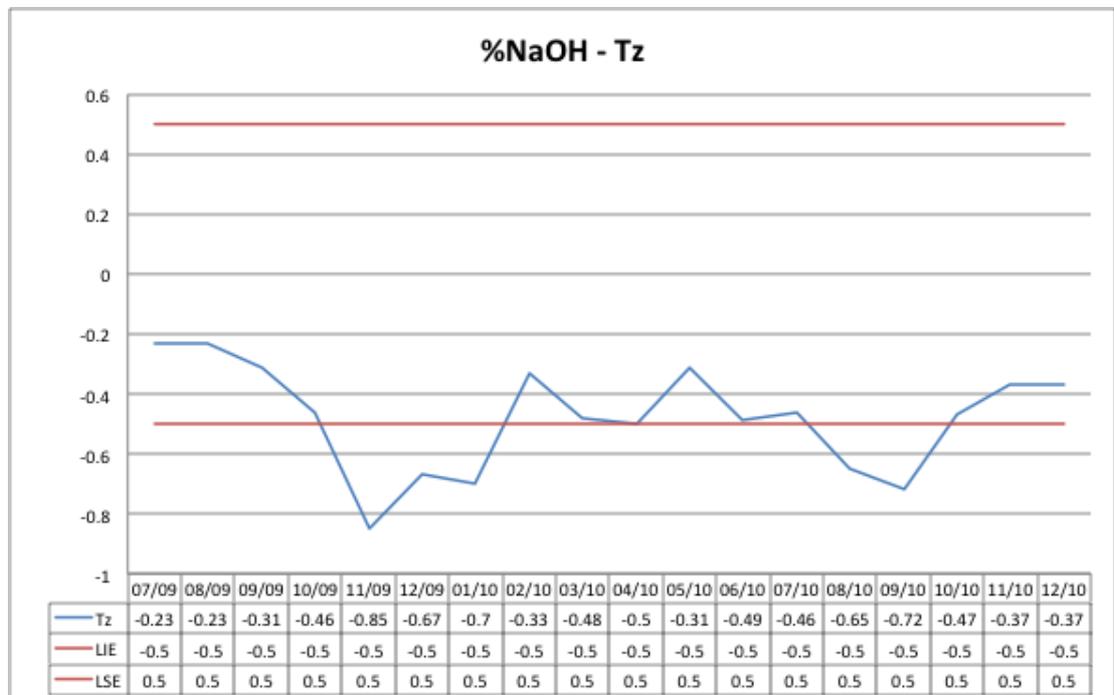
Al final, el sistema se implementó completamente en el área de saponificación continua y en secado de jabón base. En las áreas de glicerina y planta de tratamiento de agua el sistema empezaba a dar resultados positivos, pero aún necesitaba más tiempo de maduración y ajustes para ser realmente efectivo; mientras que en el área de líneas de empaque, nunca se logró una implementación que entregara algún resultado.

## Presentación de resultados

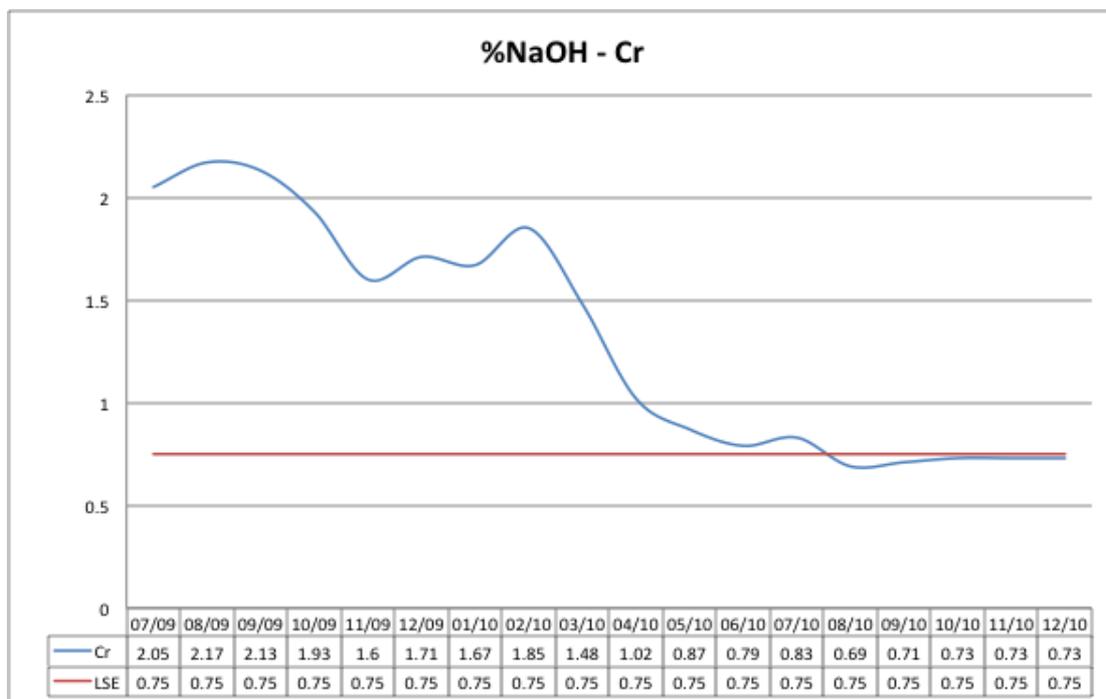
Los resultados obtenidos muestran la efectividad del sistema de *centerlines* así como los beneficios en términos de calidad y predictibilidad de la operación.

El porcentaje de base fuerte en el jabón base era inicialmente la variable que mayor variación presentaba, siendo la principal responsable de las desviaciones de calidad y la producción de jabón base fuera de especificación.

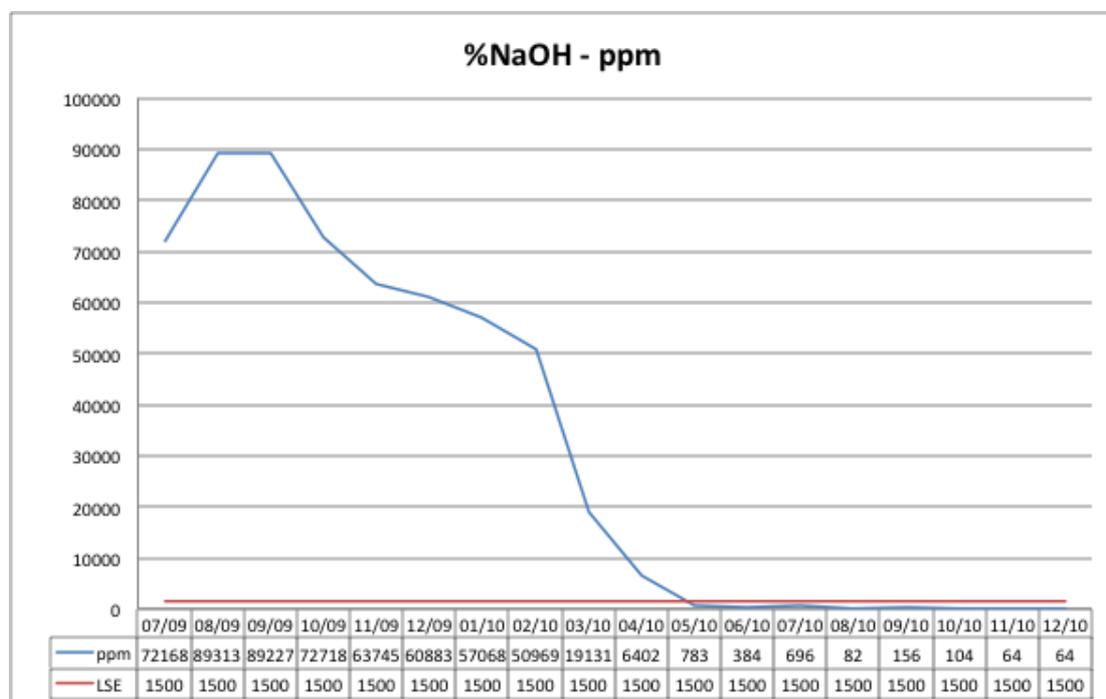
A continuación se presentan las gráficas de Tz, Cr y partes por millón de defectos calculados mensualmente en alcalinidad de jabón base en el periodo comprendido entre julio de 2009 y diciembre de 2010.



Gráfica 1. Tz de alcalinidad mensual entre julio de 2009 y diciembre de 2010



Gráfica 2. Cr de alcalinidad mensual entre julio de 2009 y diciembre de 2010

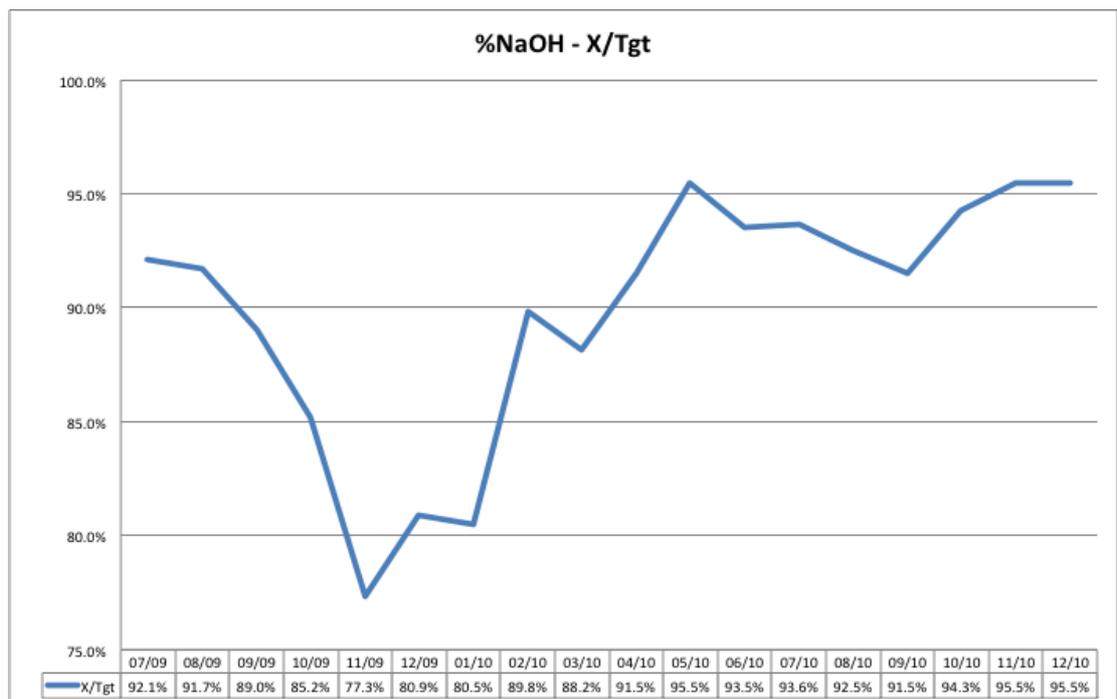


Gráfica 3. Partes por millón de defectos en la alcalinidad mensual entre julio de 2009 y diciembre de 2010

En los resultados observados para la concentración de base fuerte en jabón base, se observa claramente una reducción dramática en la variabilidad del proceso, partiendo de un valor extremo de 2.17 en Cr hasta estar dentro de especificación en los últimos cinco meses analizados. Mientras que para las partes por millón de defectos, se inició con un valor máximo de 89,313 hasta estar dentro de especificación en mayo de 2010, llegando a valores de 64 en los dos últimos meses, los cuales pueden ser interpretados como prácticamente una producción libre de defectos.

Por su parte, la interpretación del estadístico Tz puede dar lugar a una mala percepción debido a que, al incluir la desviación estándar dentro del cálculo, si la variación del proceso es grande, el cumplimiento de Tz resulta más sencillo de alcanzar, mientras que al reducir la variación, el estadístico se torna más estricto.

Para mostrar mejor el desempeño del promedio de los datos respecto al objetivo, se presenta a continuación la gráfica en donde cada promedio de datos mensual ha sido sólo dividido por el objetivo, eliminando así la influencia de la desviación estándar en el resultado.



Gráfica 4. Porcentaje del promedio de alcalinidad mensual respecto al objetivo entre julio de 2009 y diciembre de 2010.

De esta manera resulta evidente el acercamiento del promedio de los datos al objetivo de la variable, lo cual permitió a su vez, controlar el proceso más centrado dentro de los límites de especificación, evitando así que cualquier dato fuera de control, se presentara fuera de los límites de especificación debido a que la operación pudiera estar en promedio, muy por debajo o por encima del objetivo de la variable.

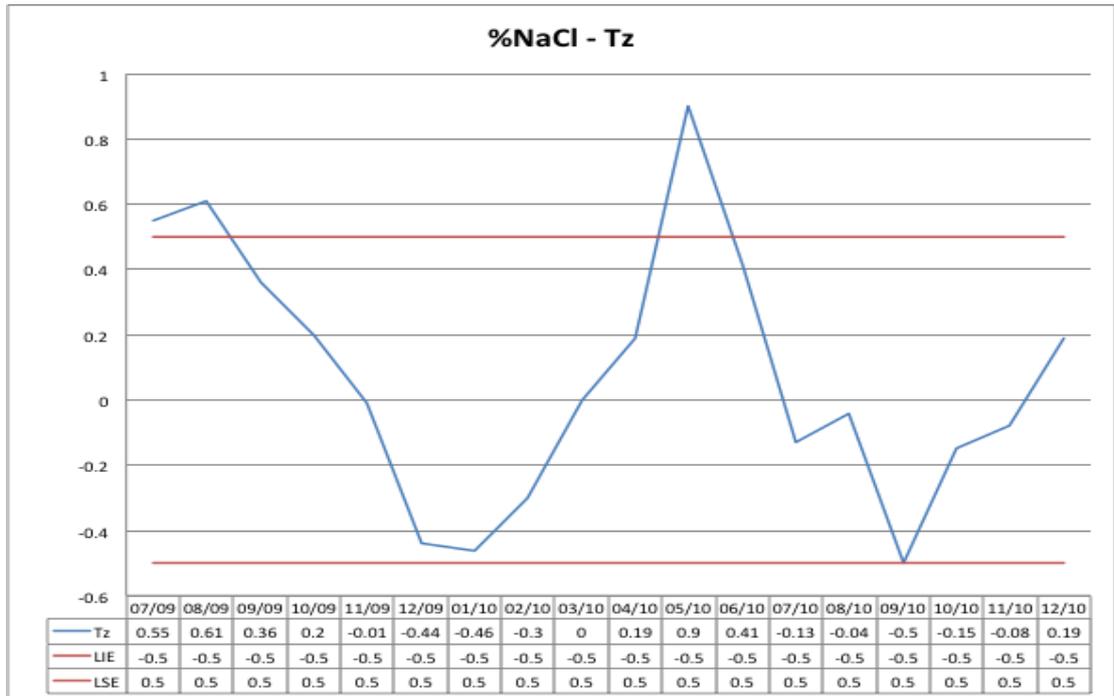
Inicialmente, antes de la implementación de las mejoras al proceso, la variable presentaba al menos un dato fuera de especificación al día, lo cual ocasionaba paros en la producción de al menos dos horas diarias, llegando en ocasiones a presentarse

tanques completos de almacenamiento fuera de especificación o incluso producto ya empacado con estas características.

Después de la implementación del sistema de control de proceso y *centerlines*, la reducción de datos fuera de especificación se fue dando casi de manera inmediata, llegando hasta el punto en que, para los últimos ocho meses analizados, no se había presentado un solo problema en términos de calidad, llevando así al 100% la confiabilidad del proceso en términos de resultados analíticos fuera de especificación.

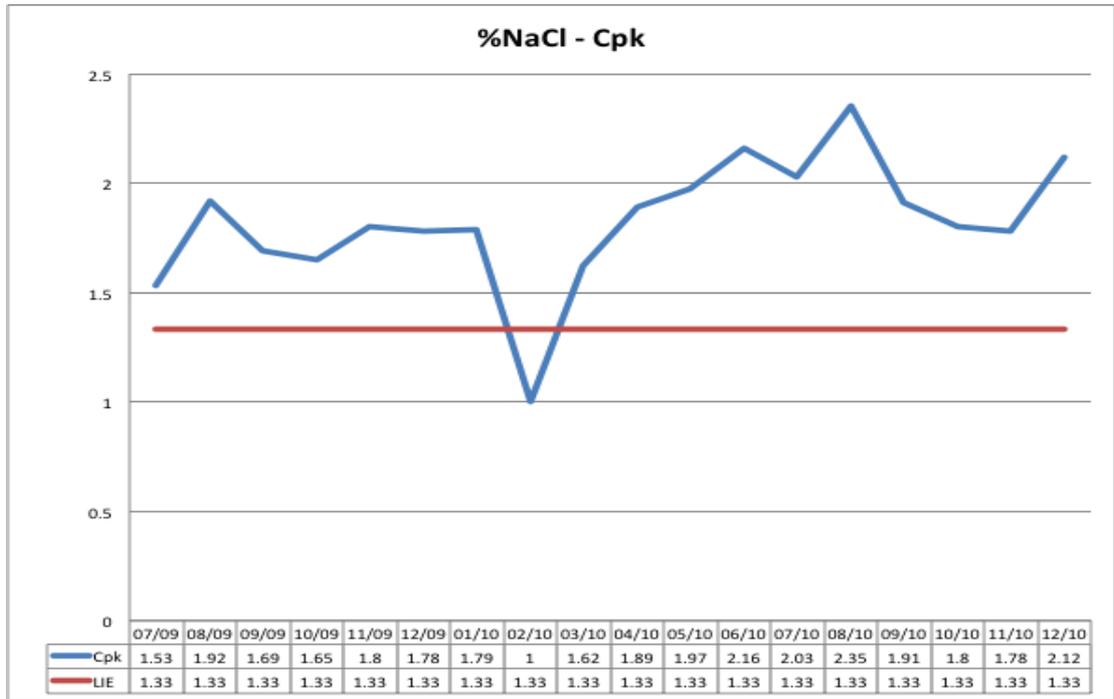
Por otro lado, dado que el flujo de aceite de neutralización es la principal variable que controla de manera directa la alcalinidad de salida en el jabón base, se tenían muchas variaciones en este flujo, ocasionando inconsistencias en la formulación y sobre consumos de este material. Con las mejoras implementadas, se logró estabilizar la formulación del jabón, permitiendo ahorros hasta por 10,000 dólares mensuales, debido a la eliminación del sobre consumo del aceite de neutralización.

La siguiente variable es la sal del jabón base, de la cual se presentan a continuación las gráficas de Tz, Cpk y partes por millón de defectos calculados para el periodo comprendido entre julio de 2009 y diciembre de 2010.

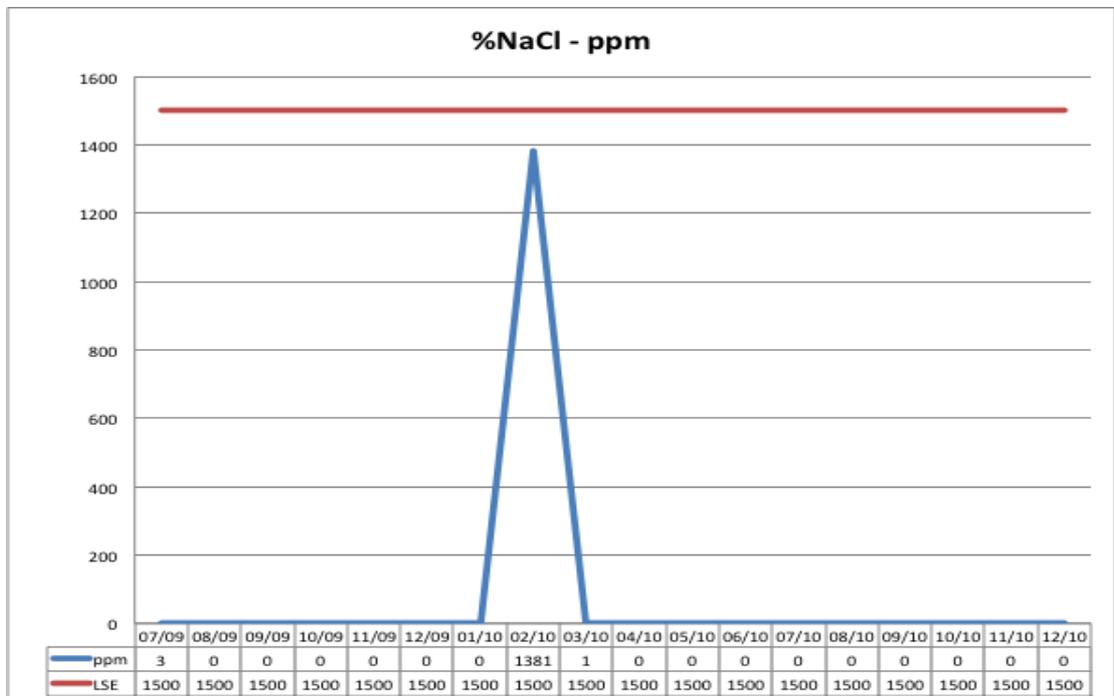


Gráfica 5. Tz de concentración mensual de sal entre julio de 2009 y diciembre de 2010.

Para el cumplimiento del estadístico Tz, se observa que prácticamente en todo el periodo de tiempo considerado en la gráfica, la variable de sal en jabón base estuvo dentro de cumplimiento a partir de septiembre de 2009, con un solo dato fuera de especificación en mayo de 2010 debido a una avería puntual en el agitador de la columna de lavado, con la que no fue posible operar con la agitación correcta durante aproximadamente 20 días del periodo.



Gráfica 6. Cpk de concentración mensual de sal entre julio de 2009 y diciembre de 2010.



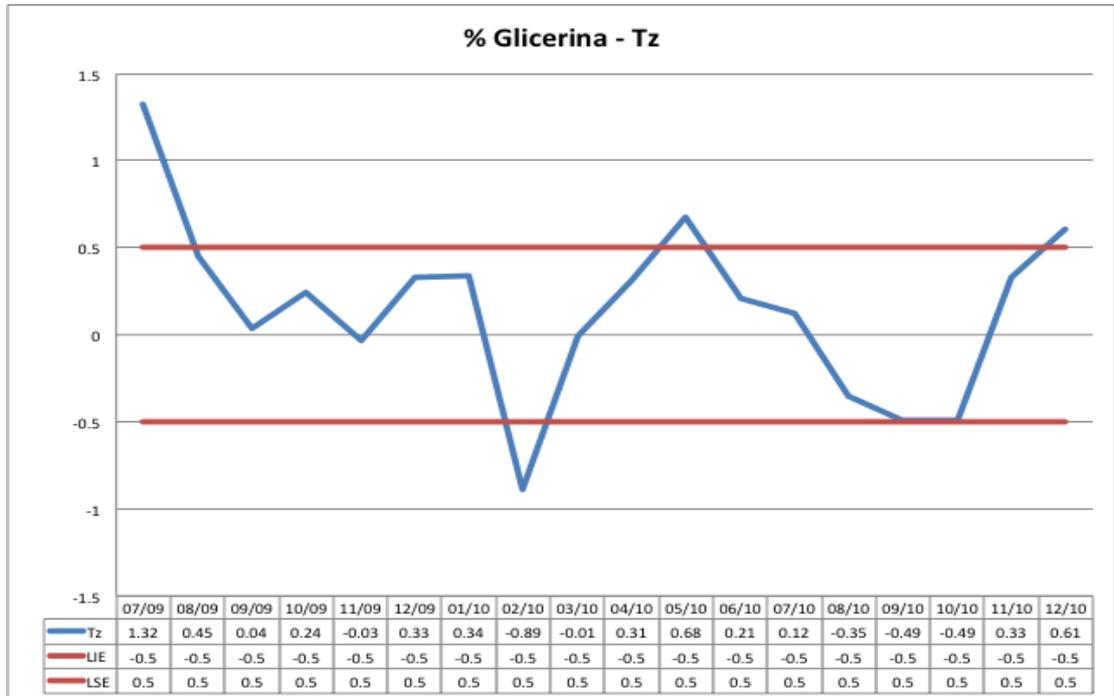
Gráfica 7. Partes por millón de defectos en la concentración mensual de sal entre julio de 2009 y diciembre de 2010.

Para las variables estadísticas de Cpk y partes por millón calculadas, el proceso se encontraba dentro de control durante todo el periodo analizado, excepto en febrero de 2010, donde una falla de proceso en la preparación de la materia prima provocó que el sistema tuviera fuertes variaciones durante el consumo de todo un lote el cual impactó de manera puntual en el resultado total de dicho mes.

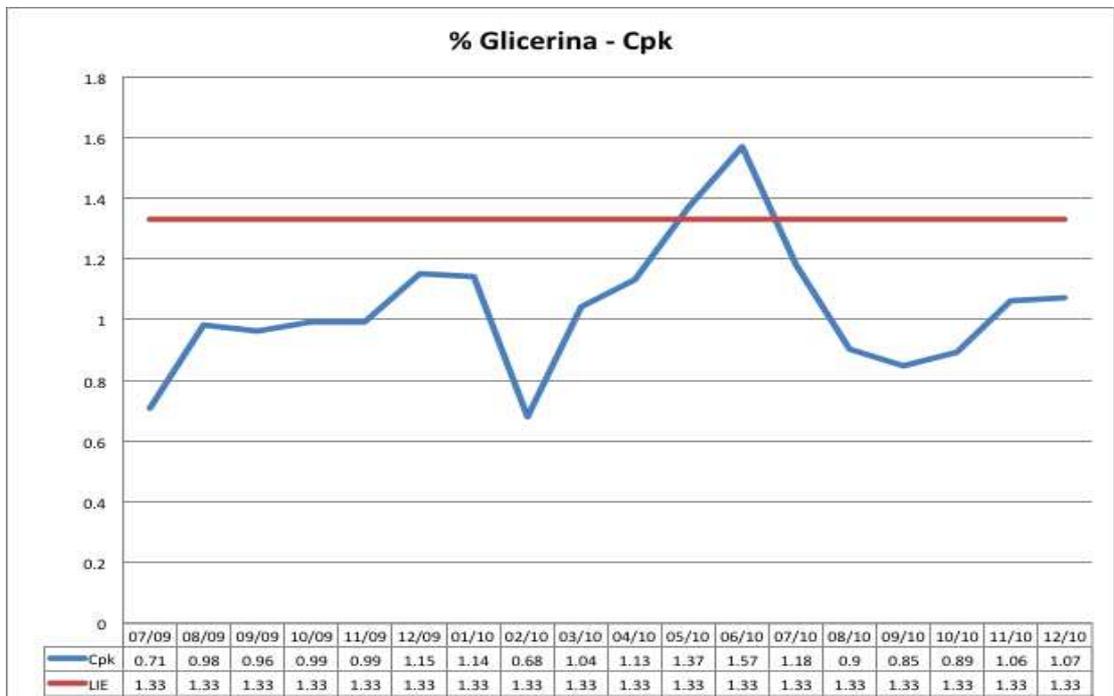
Es importante mencionar que para la sal en el jabón base, nunca se presentó algún resultado fuera de especificación que provocara la detención de producto o la necesidad de analizar de manera especial la producción para asegurar el cumplimiento de los parámetros de calidad.

La sal en el jabón base representa cerca del 90% del total de electrolito en el producto final mientras que el electrolito restante lo aporta la base fuerte, por lo que al utilizar esta última sólo como reactivo en exceso para evitar la presencia de grasas o aceites insaponificados al final de la producción, la mayor parte de la función como electrolito la aporta la sal, siendo así como conclusión que el electrolito total dentro del jabón base se encuentra dentro de especificación de la misma manera que la sal para el periodo analizado.

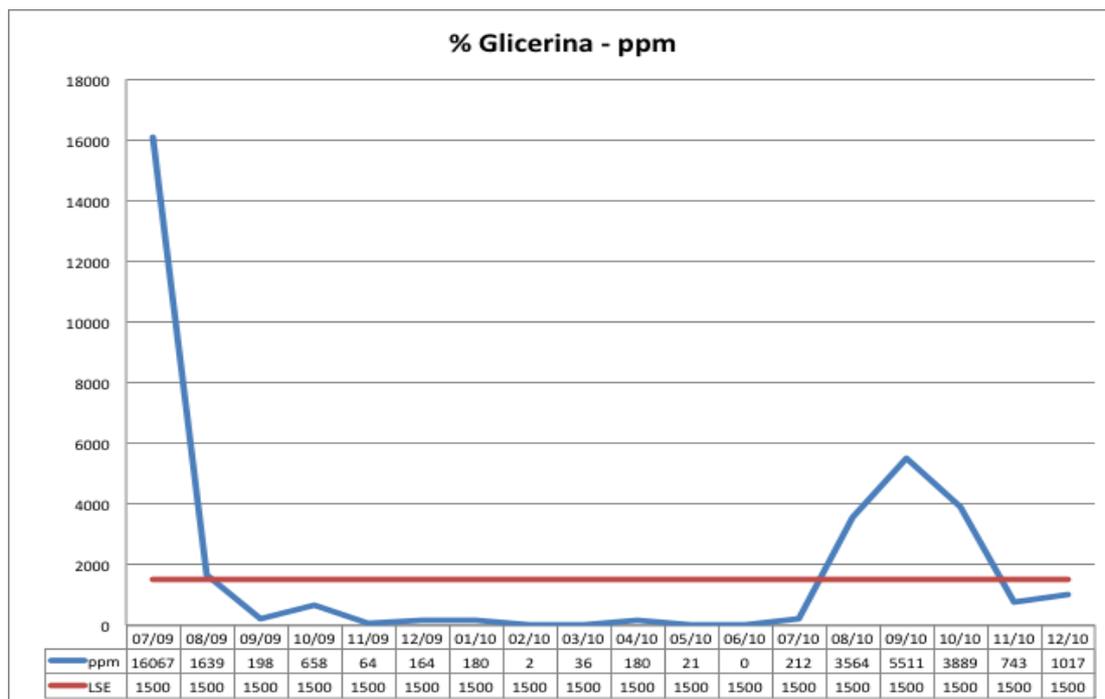
Los resultados estadísticos de glicerina en jabón base se muestran a continuación.



Gráfica 8. Tz de glicerina mensual entre julio de 2009 y diciembre de 2010.



Gráfica 9. Cpk de glicerina mensual entre julio de 2009 y diciembre de 2010.



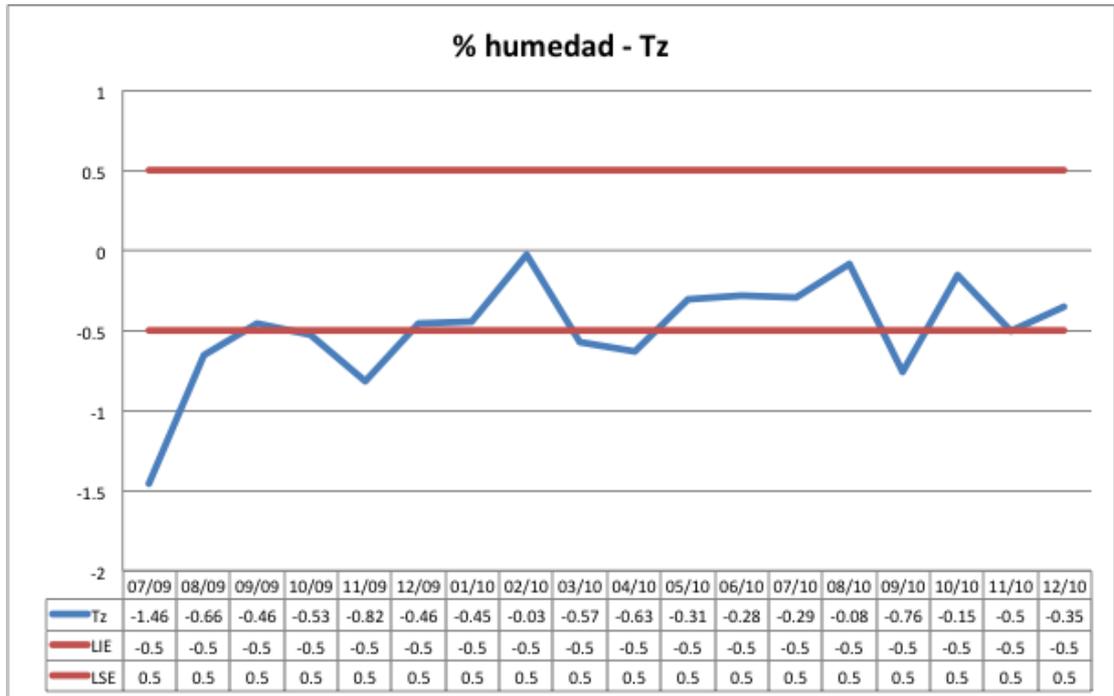
Gráfica 10. Partes por millón de defectos en la concentración mensual de glicerina entre julio de 2009 y diciembre de 2010.

El objetivo del estadístico Tz se encuentra dentro de especificación para prácticamente todos los meses del periodo mostrado, mientras que las principales variaciones en el objetivo de la variable se observaron debido a constantes cambios en la concentración solicitados por la siguiente etapa del proceso de fabricación, ya que en el secado de jabón, la concentración de glicerina impacta directamente en el tiempo de secado, la presión de vapor, la temperatura del secador y otras variables propias del proceso, por lo que al no tener su proceso en control, se presentaba frecuentemente la situación en que solicitaban modificaciones en la concentración para ayudarlos a controlar su proceso.

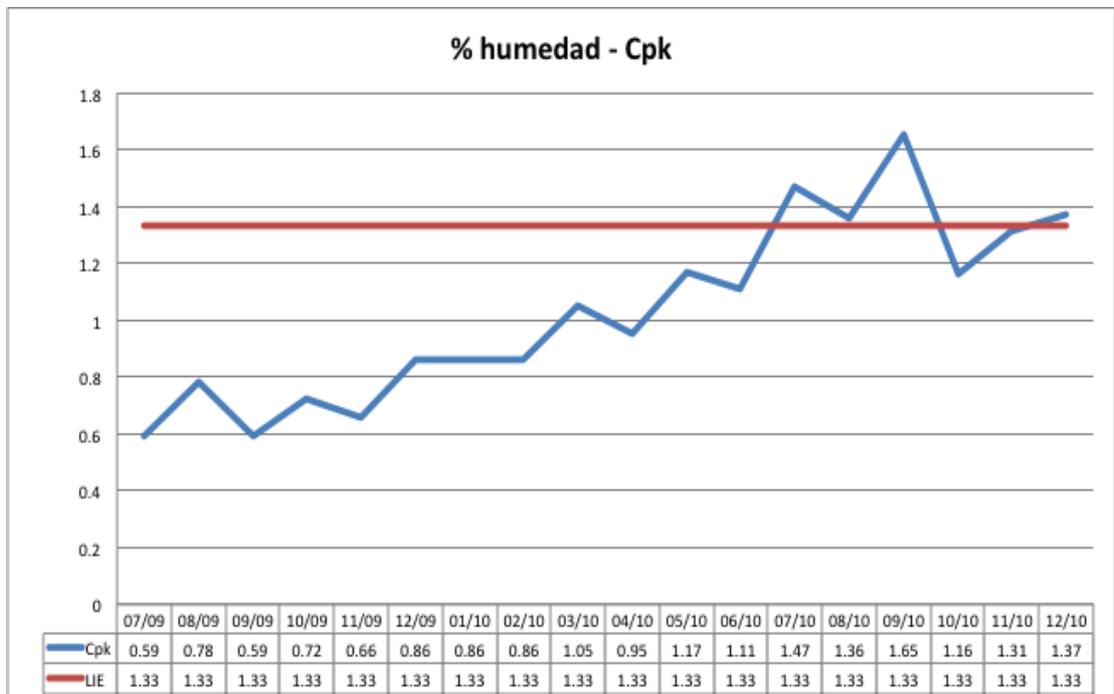
Una de las principales fuentes de variación identificadas era el momento de arrancar los equipos, ya que para lograr la concentración de glicerina deseada, se requerían de al menos 24 horas de operación para poder saturar el sistema completo de glicerina. Este tiempo de estabilización impactaba en la variable de salida, toda vez que aunque el jabón no estaba fuera de especificación, tomaba mucho tiempo estando por debajo del límite de especificación y una vez alcanzado el objetivo, se requería de un tiempo similar para estabilizar el proceso.

Dado que la operación se llevaba a cabo de lunes a viernes debido a la demanda en la producción, el fin de semana se vaciaban algunos equipos para evitar taponamiento de tuberías, por lo que al final, los primeros dos días de la semana en operación se empleaban para alcanzar y estabilizar el objetivo de glicerina deseado y el último día se utilizaba en saturar de lejía algunos equipos y vaciar los restantes; se tenían en realidad 2 días de operación estable a la semana, lo cual hacía que nunca se lograra realmente el control estadístico en la variación del proceso.

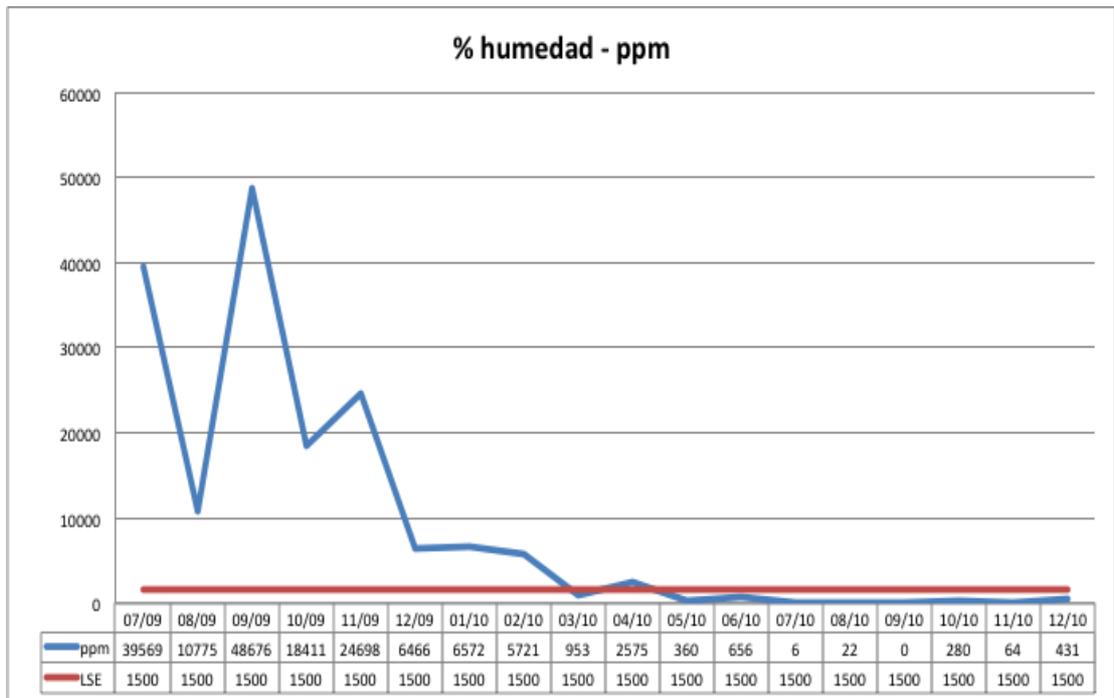
Por último, se muestran los resultados de las variables estadísticas del porcentaje de humedad en el jabón base.



Gráfica 11. Tz del porcentaje de humedad mensual entre julio de 2009 y diciembre de 2010.



Gráfica 12. Cpk del porcentaje de humedad mensual entre julio de 2009 y diciembre de 2010



Gráfica 13. Partes por millón de defectos en la concentración mensual de humedad entre julio de 2009 y diciembre de 2010.

La humedad es la variable más difícil de controlar en la salida del proceso, debido a que nunca se encontró una variable intermedia que estuviera directamente relacionada para poder utilizarla como controlador.

La principal relación que se encontró fue que la concentración de glicerina es inversamente proporcional a la humedad en el jabón base, aunque nunca se logró determinar una verdadera correlación entre ambas variables que pudiera hacer a un observador de la otra.

El resto de las variables que ayudaban al control de la humedad eran el electrolito total en lejía media, la dosificación de lejía combinada a la columna de

lavado, el nivel de interfase en la columna de lavado y la presión de entrada y salida de las centrífugas.

Al no contar con una variable específica de control para la humedad de salida en el jabón base, el control de dicha variable al final, dependía del estado general de todo el proceso, por lo que para mantenerla en control, era necesario mantener el resto de las variables controladas.

Esta variable además tomaba mucho tiempo para mostrar un ajuste mal realizado que ocasionara una situación fuera de control, así como un tiempo similar para regresar el sistema a su estabilidad. Esto ayudó a concientizar a los operadores sobre la importancia de realizar ajustes correctos y en el momento preciso para no afectar la producción aún después de terminado su turno.

Al final, aunque no se alcanzó el objetivo para el estadístico Tz de manera consistente, en la gráfica se nota una mejora considerable, ya que a partir de mayo de 2010 sólo el dato de septiembre se encuentra fuera de especificación, mientras que el resto de los datos se encuentran dentro de la franja permitida.

Para los estadísticos de Cpk y partes por millón de defectos calculados, ambos relacionados con la variabilidad del proceso. En el caso de Cpk, se alcanzó el objetivo por primera vez en julio de 2010, aunque de manera intermitente presentando algunos meses fuera de especificación, mientras que la mejora más importante se

observa en las partes por millón de defectos calculados, entrando en cumplimiento a partir de mayo de 2010 y permaneciendo dentro el resto de los meses analizados.

Con esta mejora se logró así mismo colaborar en el proceso del secado de jabón base, ya que al reducir la variabilidad de la humedad, se pudo también tener un secado más controlado y eficiente, teniendo resultados más consistentes a la salida de su proceso.

## **Comentarios finales**

Durante el desempeño profesional en el puesto descrito, la formación obtenida dentro de la Facultad fue de suma importancia para comprender el principio de operación de las máquinas eléctricas utilizadas, los reductores de velocidad, los controladores de flujo y demás equipos utilizados en la producción, pudiendo además no sólo entender su funcionamiento, si no permitiendo también tener la capacidad de elegir nuevos equipos de acuerdo a las necesidades específicas que surgieran en el área y determinar las causas de ciertos modos de falla de acuerdo a la teoría aprendida en algunas de las materias de ingeniería.

Adicionalmente, aunque mi formación no tuvo una parte importante de ingeniería química la cual era necesaria para desempeñarme en el rol, el conocimiento matemático y el pensamiento estructurado obtenido en las aulas me permitió desarrollar la capacidad necesaria en los conocimientos de química para entender, operar y realizar mejoras en el proceso.

Considero que un aspecto importante que no se realizó, fue el modelado del sistema de manera estricta, ya que todas las variables obtenidas para controlar el proceso fueron encontradas de manera empírica o como el resultado de un análisis de falla, pero nunca se generó un modelo físico que permitiera conocer los observadores, controladores, puntos de equilibrio y demás parámetros que caracterizan a los sistemas. El principal impedimento para no concluir exitosamente este punto, fue la falta de conocimientos teóricos, ya que aunque tenía nociones

sobre el modelado de sistemas físicos aprendidos en la carrera, las deficiencias en el conocimiento de la parte química y la naturaleza no lineal del propio sistema siempre me presentaban nuevas barreras que me fueron imposibles de abatir. Considero que teniendo conocimientos más amplios sobre el modelado de sistemas y dándole la importancia necesaria dentro de la organización, se hubiera logrado un mejor control sobre el sistema completo, así como el resto de operaciones en la planta.

Por último, algunas habilidades adicionales las cuales fueron desarrolladas principalmente a partir de la entrega de proyectos y en general cualquier trabajo que requiriera realizarse en colaboración con otros compañeros, permitieron desarrollar el trabajo en equipo y la solución de problemas no a partir de un único elemento, sino de la sinergia del total de los conocimientos aprendidos durante la carrera.