



# **UNIVERSIDAD MICHUACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

### **LIMPIEZA DE EXTRUSORES DE NYLON EN LÍNEA**

#### **MEMORIA PROFESIONAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA  
LUIS NOÉ VELÁZQUEZ ALCARAZ**

**ASESORES  
MA. DE LA SALUD LAURA GARCÍA SALINAS  
AGUSTÍN CASTRO MONTOYA  
RODOLFO RUIZ HERNANDEZ**

**MORELIA MICHUACÁN, JUNIO 2019**

# TITULO

## LIMPIEZA DE EXTRUSORES DE NYLON EN LINEA

### DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis hijos, que son el **mayor tesoro de mi vida**, y quienes me han impulsado a realizar todas las labores necesarias para el cumplimiento de mis ocupaciones, ellos son esa importante fuente motivacional de felicidad, sin la cual la realización de esta tesis **no hubiera tenido el mismo éxito**

### AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi madre, María del Refugio Alcaraz López, por ser la principal impulsora de mis sueños, por confiar y creer en mis expectativas, por los consejos, valores y principios que me ha inculcado.

A mis hermanos Adriana, Nelly, Gaby, David y Selene y a mi esposa Irma por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento: gracias. A toda mi enorme familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

A todos mis amigos y en las diferentes etapas de mi vida, por apoyarme y estar para mí cuando lo he necesitado, por extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día, de verdad mil gracias siempre los llevo en mi corazón.

A los docentes de la Escuela de Ingeniería Química de la UMSNH por haber compartido sus conocimientos para la culminación de nuestra profesión, de manera especial, al maestro Rodolfo Ruiz tutor de mi proyecto de investigación, quien ha guiado con su paciencia, y su rectitud como docente, y a los compañeros de trabajo por su valioso aporte de esta investigación.

# ÍNDICE

TITULO.....	2
LIMPIEZA DE EXTRUSORES DE NYLON EN LINEA.....	2
ÍNDICE.....	3
INTRODUCCION.....	4
CAPÍTULO 1.....	5
ANTECEDENTES .....	5
1.1 Historia de la empresa .....	5
1.2 Descripción de la problemática.....	6
1.3 Justificación.....	8
1.4 Objetivos .....	8
1.4.1 Objetivos generales.....	8
1.4.2 Objetivos específicos .....	8
CAPÍTULO 2.....	9
MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Fundamento teórico .....	9
2.1.1 Nylon .....	9
2.1.2 Nylon 6 y Nylon 6.6 .....	10
2.1.3 Proceso continuo de Hilado de Nylon.....	11
2.1.4 Viscosidad .....	13
2.1.5 Transición vítrea, punto de reblandecimiento y punto de fusión del Nylon .....	14
2.1.6 Procesos de Transferencia de Calor .....	15
2.1.7 Limpiador químico NALCO® 66 PULV .....	16
2.2 Análisis situacional.....	16
2.2.1 Impacto económico .....	19
CAPÍTULO 3.....	22
MARCO DESCRIPTIVO.....	22
3.1 Estrategia de solución.....	22
3.2 Desarrollo del proyecto .....	23
3.2.1 Análisis de causa raíz (RCA) .....	23
3.2.2 Inspección .....	24
3.2.3 Experimentación.....	24
3.2.4 Diseño .....	25
3.2.5 Plan de Implementación.....	26
CAPÍTULO 4.....	27
RESULTADOS .....	27
4.1 Logros alcanzados.....	27
4.2 Conclusiones.....	27
ANEXO A.....	29
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	29
ANEXO B.....	29
Alineación de las moléculas de Nylon en el proceso de polimerización .....	29
ANEXO C .....	30
RCA Interrupción de recorte a extrusores .....	30
ANEXO D .....	31
Programa preventivo de limpieza de intercambiadores de calor de extrusores .....	31
ANEXO E.....	31
Hojas de seguridad del producto (MSDS) Nalco® 66 Pulv .....	31
ANEXO F.....	32
GLOSARIO.....	32
RESUMEN.....	33
ABSTRACT .....	34

## INTRODUCCION

Hace 80 años el nylon apareció en el firmamento para convertirse en la primera fibra sintética en la historia, pero también para revolucionar el mundo de la moda con una prenda icónica del guardarropa femenino: las medias.

Esta poliamida se ha ganado un lugar dentro de los materiales más recurridos para la fabricación no solamente de ropa, sino también de redes, cuerdas de guitarra y hasta piezas de autos, por sus cualidades: elasticidad, resistencia al desgaste y al calor, inherencia química, abrasión y capacidad antiadherente.

Su nombre: NYLON, de acuerdo a una de las historias más difundida, refiere que son las iniciales de las dos ciudades en las que se realizaban las investigaciones de este polímero: Nueva York, Estados Unidos y Londres, Inglaterra.

En Monterrey llegó para quedarse al instalarse la primera planta de manufactura de Nylon en el municipio de San Pedro Garza García hace 60 años instalándose la planta de igual nombre: Nylon de México la cual hasta la fecha ha operado de manera ininterrumpida, pero si cambiando los procesos de manufactura, evolucionando a nuevas tecnologías, desarrollos y aplicaciones.

Es aquí en esta empresa en la que en el año 2000 se me brinda la oportunidad de continuar mi desarrollo profesional integrándome a las operaciones de manufactura de esta impresionante fibra sintética.

Juntos hemos emprendido un camino lleno de desafíos y retos contribuyendo para tener una mejor eficiencia en la manufactura, mejorando la confiabilidad de la planta, incrementando la disponibilidad de los activos y con ello la rentabilidad de los procesos para continuar posicionando la marca y tener permanencia en el mercado.

Nylon de México se ha caracterizado por invertir en tecnología de punta para la manufactura, por buscar y retener el talento de la gente y en tener solidez en sus procesos haciéndolos buenos, robustos y sustentables. Los incidentes de manufactura, interrupciones en el proceso y/o las fallas en la maquinaria son siempre oportunidades para ofrecer soluciones creativas e ingenieriles para regresar a operación la línea de producción y estabilizar el proceso nuevamente. Es en este contexto en el centro la investigación, en como de manera creativa los ingenieros ofrecemos soluciones que se traducen en el ahorro de miles de dólares en beneficio de la empresa, de los accionistas y en consecuencia de quienes laboramos en la empresa.

# CAPÍTULO 1

## ANTECEDENTES

### 1.1 Historia de la empresa

Las raíces de la empresa Nylon de México se remontan a fines Siglo XIX, cuando se establecen las primeras industrias del grupo ALFA en Monterrey México. En 1974 Un grupo de empresarios encabezados por Don Roberto Garza Sada funda ALFA, a fin de administrar sus intereses en diversos negocios. La empresa fue constituida con tres subsidiarias: Hojalata y Lámina (acero), Empaques de Cartón Titán (cartón) y Draco (minería)

1975 Debido a que el 80% de sus ingresos era generado por el negocio del acero, ALFA emprende un programa de crecimiento y diversificación. Se adquieren las empresas Polioles (poliestireno, uretanos y glicoles) y **Nylon de México (nylon)**. Dos años después ALFA agrupa sus negocios en tres divisiones: Acero, Papel y Empaque y Fibras Químicas (fibras poliéster, Nylon y Lycra).

1991 ALFA realiza inversiones para expandir su capacidad de producción en aceros no planos, lámina galvanizada, nylon y Lycra® y hacia el año 2000 se inician las ampliaciones de las plantas C5 a C9 con tecnología T95 para la fabricación de Nylon. Con esto el sitio monterrey se convierte en la planta más grande del mundo en manufactura de Nylon 6 y N66 (Figura 1.1)

2005 grupo ALFA vende los negocios de Nylon y Lycra® a la empresa Invista una filial de Koch Industries y con ellos Nylon de México pasa a formar parte de este consorcio con presencia en más de 100 países en los 5 continentes.

Actualmente Nylon de México enfrenta una transferencia más, al anunciarse este año que sus activos, junto con los negocios de Lycra® y Apparel and Advanced Textil fueron adquiridos por la empresa china Shandong Ruyi dándose con esto la separación de Nylon de México del grupo Invista.



Figura 1.1 Paquetes de Nylon

## 1.2 Descripción de la problemática

El polímero de Nylon, llamado también flake, chip o recorte por ser el resultado de recortar los fideos plásticos de nylon es transportado al reactor principal llamado SPP (Solid Phase Polimerizer) para el inicio del proceso de manufactura del Nylon.

El SPP, con una capacidad de 5 toneladas es responsable de la continuidad del proceso acondicionando y pre-alineando las moléculas del polímero de nylon para su posterior alimentación por gravedad a la garganta de los extrusores donde se completa la alineación de la molécula de nylon al ser calentada y extruida a través de las toberas.

El proceso se lleva a cabo de manera continua por días o incluso meses por lo que una interrupción a la continuidad del proceso estriba en direccionamiento de la materia prima a desperdicio, cientos de horas hombre de operaciones, mantenimiento para la limpieza de la maquinaria y posterior rearranque para restablecer el proceso

En la línea de manufactura 715 se han presentado eventos en los que sin causa definida el polímero deja de fluir del SPP al extrusor. Se hace el protocolo de paro de máquina para vaciar el SPP, desacoplar las líneas de alimentación a los extrusores e inspeccionar en busca de obstrucciones.

En el historial de eventos registrados en otras máquinas en otros momentos, hay registro de formación de muérganos, que son como especie de nidos de pájaro formados por recorte mal cortado, los cuales tapan la línea y obstruyendo el paso del recorte.

En los eventos relacionados a estas máquinas al desacoplar se observa el conducto libre, las tendencias de las variables de proceso no muestran disturbios previos al evento sino hasta obviamente al vaciarse el extrusor en que la velocidad se dispara buscando mantener la presión y las temperaturas de las zonas de calentamiento se disparan por la falta de materia prima.

Un análisis de causa raíz fue conducido para enlistar las causas y efectos de todas las posibilidades: variación en la materia prima, condiciones de proceso, condiciones ambientales, gasto, entre otras.

Los análisis realizados a la materia prima tanto en forma como en composición química no arrojaron evidencia contundente que explicara los eventos. La tendencia de las variables de proceso: flujo (gasto), temperatura, presión y viscosidad no muestra picos o valles que evidencie fallas en el equipo o sistemas de control de la maquinaria del reactor de postcondensación y/o de extrusión. Así mismo las condiciones ambientales de Presión, temperatura y humedad del salón están dentro de los rangos de operación.

Las interrupciones al proceso de la línea de producción 715 se hicieron más frecuentes e incluso aparecieron en otra línea de producción, la 716.

Esta situación desconcertó a los encargados del proceso y de la administración de la planta, ya que ambas líneas de producción operan con materia prima diferente, condiciones de proceso diferentes y no comparten maquinaria, salvo servicios periféricos.

En el análisis de causa raíz se incorporaron variables o sistemas comunes a las dos líneas de producción. Uno de estos sistemas es el agua de enfriamiento de la transmisión del motor y de la garganta de alimentación de recorte al extrusor.

La variable de medición y control del agua de enfriamiento es el flujo en litros por minuto, los cuales están dentro de rango, y la temperatura del agua en la entrada al intercambiador también en rango.

La medición de la temperatura del agua en salida del intercambiador no es una variable de control ni monitoreo, al medirla manualmente se detectó muy poca variación respecto a la temperatura de entrada lo que hace sospechar de una baja eficiencia en la transferencia de calor en el intercambiador de la garganta de alimentación del extrusor.

La teoría que explica este comportamiento es que el polímero está entrando a la garganta de extrusión a una temperatura mayor a la de acondicionamiento en el SPP, el efecto de este incremento en la temperatura afecta directamente la viscosidad del polímero. Al estar en fase sólida no tiene viscosidad (o cercana a cero) con el incremento de la temperatura se inicia el rompimiento y la alineación de las moléculas del Nylon a cadenas de moléculas más largas con pesos moleculares mayores pasando por un estado de reblandecimiento de muy alta viscosidad que visto desde el exterior se interpreta como un apelmazamiento en la pierna de alimentación al extrusor.

La inspección a los ductos del intercambiador de calor de la garganta del extrusor muestra la existencia de una capa de sarro adherida a las paredes de las tuberías internas del intercambiador de calor.

El sistema de agua helada para enfriamiento de los extrusores es cerrado, el agua caliente se recolecta a la salida de los intercambiadores, se almacena y envía nuevamente a las máquinas de refrigeración donde se enfría y se envía de regreso al sistema.

El nivel del tanque se recupera con agua suave, esto es agua pasada por un proceso de intercambio de iones con zeolita donde se intercambian los iones de calcio por iones de sodio. El agua del sistema por este motivo con el paso del tiempo va formando incrustaciones en las paredes de los intercambiadores.

Se realizaron pruebas con diferentes sustancias para deshacer las incrustaciones de sodio en las paredes del intercambiador, siendo la fórmula **NALCLEAN™ 66 PULV** la que tuvo un mejor desempeño al deshacer por completo las sales en el interior.

La limpieza pudo ser hecha por que la máquina estaba parada por el evento descrito, sin embargo, en el resto de las maquinas en operación deben ser sometidas a una inspección y limpieza también.

Cada paro del proceso programado o no programado representa un costo de **\$21 MUSD** por lo que buscar otras alternativas para efectuar la limpieza química del extrusor es prioritario.

Debido a que el reactivo químico no puede ser simplemente agregado al agua del sistema, ya que forma sales solidas que es necesario drenar del sistema y que de no hacerlo dañarían los internos de las bombas y de los intercambiadores de calor de los extrusores u otros elementos del sistema. Realizar la limpieza en línea, sin parar la maquina es el reto, en la alternativa para hacerlo se centró este proyecto.

### **1.3 Justificación**

La justificación del proyecto se centra en realizar la limpieza de los intercambiadores de calor de los extrusores sin parar el proceso. El impacto de hacer la limpieza en línea está en el ahorro de costos derivados del paro de máquina, re arranque y estabilización del proceso. El ahorro lo obtenemos al no enviar a desperdicio las toneladas de materia prima en el paro y en la reactivación del proceso en el arranque, los costos operacionales de las maniobras previas, durante y posteriores al paro, así como los costos de mantenimiento de las actividades en torno al paro.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivos generales**

- Evitar interrupciones a las líneas de proceso por suciedad en el interior de la garganta de los extrusores de Nylon.

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Ahorro de costos en la manufactura del Nylon alrededor de \$ 200 MUSD al año causados por las interrupciones en el proceso
- Evitar los riesgos de lesión al personal al quitar las toberas de extrusión para la desactivación del proceso, ya que estas toberas se encuentran cerca de los 300 °C y deben ser quitadas manualmente por los operadores de extrusión.
- Mantener la productividad y el rendimiento de la línea de producción causados por los paros inesperados
- Cumplir el programan de producción y con ello evitar reclamos de los clientes por no hacer las entregas de la producción establecidas.

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Fundamento teórico**

Nylon de México es un productor completamente integrado de N6 y N66 y está preparado para licenciar sus costos en tecnologías competitivas para la manufactura de Ácido Adípico de alta calidad, DME y Polímeros de Nylon 6.6. Esas tecnologías están ahora disponibles bajo licencia a través del IPT

La tecnología de Nylon de México está basada en más de 75 años de experiencia en manufactura de Nylon 6,6 y múltiples evoluciones de las plataformas de tecnología. La tecnología para polimerización continua y en baches del Nylon 6.6 está basada en el proceso de fabricación del ácido Adípico de alta calidad y costo competitivo

##### **2.1.1 Nylon**

Es nombre genérico para las fibras de cadena larga que forman fibras de poliamida con grupos amida recurrentes. La poliamida (Nylon) constituye la mayor familia de los plásticos de ingeniería con una gama muy amplia de aplicaciones. Las Poliamidas (Nylon) se forman a menudo en forma de fibras y se utilizan para monofilamentos e hilos. Característicamente las poliamidas (Nylon) son muy resistentes al desgaste y abrasión, tienen buenas propiedades mecánicas incluso a temperaturas elevadas, tienen una baja permeabilidad a los gases y tiene una buena resistencia química.

La Poliamida (Nylon) fue un polímero introducido comercialmente por DuPont como resultado del trabajo de una investigación significativa de WH Carothers en la década de 1930, quienes realizaban los primeros esfuerzos de la investigación extensa en poliésteres y poliamidas. La primera poliamida importante fue el Nylon 6.6 producido por la reacción de ácido adípico y hexametildiamina (carbono 6 alifático diamina)

## 2.1.2 Nylon 6 y Nylon 6.6

**Nylon 6.6**, también conocido como nylon 6.6 es una poliamida de clase nylon. El polímero está hecho de hexametildiamina y ácido adípico que dan al nylon 6.6 un total de 12 átomos de carbono en cada unidad de repetición.

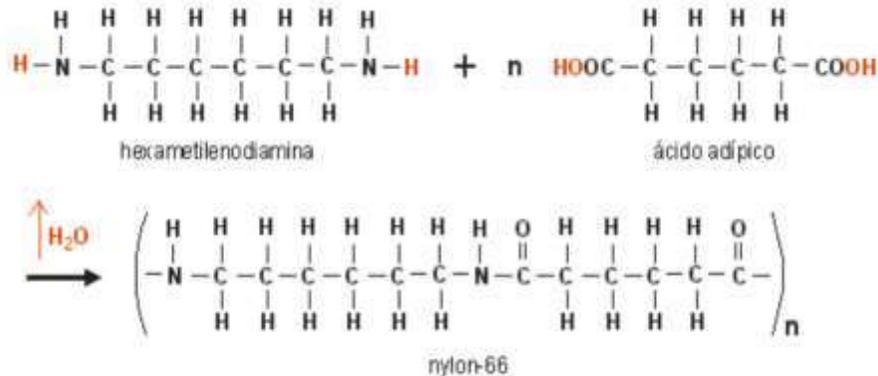


Figura 2.1 Proceso de polimerización para obtener Nylon 6.6

El Nylon 6.6 tiene un punto de fusión de  $280^\circ\text{C}$ , alto para una fibra sintética, aunque no a la altura de poliéster o aramiditas como el Kevlar. Este hecho hace que sea resistente al calor y la fricción y permite soportar procesos de teñido por termo-fijado.

Tiene una estructura densa con poros pequeños, espaciados de manera uniforme. Esto significa que el nylon 6.6 es difícil de teñir, pero una vez teñido tiene solidez del color superior y es menos susceptible a la decoloración de la luz solar y al ozono y al amarillamiento de óxido nitroso.

Nylon 6.6 se usa frecuentemente cuando una alta resistencia mecánica, gran rigidez y una buena estabilidad en el calor es necesario. Se utiliza para las jaulas de cojinetes de rodamientos, elementos electro-aislantes, tuberías, perfiles y en diversas partes de la máquina. Otras aplicaciones populares son: ropa, alfombras, bolsas de aire, paracaídas, llantas, bandas de sujeción, cuerdas, cintas transportadoras y mangueras.

**Nylon 6** o policaprolactama es un polímero desarrollado por Paul Schlack a IG Farben para reproducir las propiedades del nylon 6,6, sin violar la patente de su producción. A diferencia de la mayoría de los otros tipos de Nylon, el nylon 6 no es un polímero de condensación, sino que se forma por polimerización de apertura de anillo. Esto hace que sea un caso especial en la comparación entre la condensación y polímeros de adición (Figura 2.2).

Su competición con el nylon 6.6 ha modelado también la economía de la fibra sintética industrial. El Nylon 6 posee alta resistencia a la atracción, así como la elasticidad y el brillo. Ellos son a prueba de arrugas y altamente resistente a la abrasión y a los productos químicos tales como ácidos y álcalis. Las fibras pueden absorber hasta un 2,4% de agua, aunque esto disminuye la resistencia a la atracción. (Fibras Artificiales, 2013)

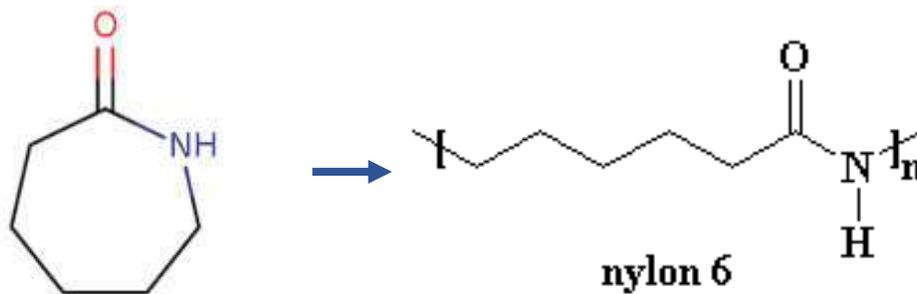


Figura 2.2 Polimerización de la molecula de caprolactama para producir Nylon 6

### 2.1.3 Proceso continuo de Hilado de Nylon

Todas las poliamidas lineales comerciales que funden por debajo de 280°C son fundidas alrededor del punto de fusión en fibras porque el proceso es más barato.

Las fibras poliamídicas son fabricadas por hilado en punto de fusión (extrusión) seguidas de un proceso de hilado. El polímero es pre-acondicionado en un reactor vertical donde inicia la alineación de las moléculas. De aquí se descarga por gravedad a los extrusores donde el polímero se funde y se completa la alineación del polímero. El polímero fundido se distribuye por un manifold para ser conducido a los cabezales de hilado.

El polímero fundido atraviesa un filtro y es conducido a los cabezales de bombeo donde es pasado por los packs (toberas) hiladores. El polímero debe enviarse rápidamente a la máquina de hilado en cantidades controladas, pues de lo contrario el tamaño de los filamentos variarán y los productos finales serán inaceptables estéticamente o en funcionamiento. Una bomba de medición provee el flujo exacto de polímero fundido por unidad de tiempo a presiones superiores a los 300 Bares y a 300° C de temperatura.

El polímero puede contener residuos de catalizadores, partículas tipo gel, aditivos precipitados, etc., los cuales obstaculizan los agujeros de la tobera. Por lo tanto, el polímero debe filtrarse y someterse a esfuerzos de empuje para lograr la homogeneidad deseada. Esta operación se realiza en una cavidad cilíndrica de 3.7 cm de diámetro x 3.7 cm de profundidad y rellena de capas de diferentes tipos de arena con las más finas en el extremo inferior y las más toscas en el extremo superior, con mallas que retienen la arena en su lugar. Más recientemente, las capas de arena han sido reemplazadas por pantallas especialmente diseñadas y metal sinterizado. Estos packs deben minimizar la posibilidad de puntos de estancamiento donde el polímero pudiera degradarse térmicamente.

Como regla general, cualquier variación en el diámetro del filamento puede resultar en una rotura, un extremo con diferente orientación, o cambio en la humedad puede resultar en una raya en uso final del hilo.

Por lo tanto, cualquier porción del polímero en el hilado debe ser completamente uniforme y de propiedades similares al resto de los hilos de la máquina.

En el mercado están disponibles máquinas hiladoras de extrusión de con packs de 7 hasta cientos de agujeros para la formación de cada hilo. Los filamentos fundidos entran al tope de un ducto o chimenea, donde son templados o enfriados por aire a contracorriente. El flujo de aire se controla cuidadosamente para evitar la turbulencia. Hacia el fondo del ducto, los filamentos convergen para formar la línea de hilo en forma de V con husillos de cerámica para ir guiando la trayectoria.

Los filamentos convergen en un cabezal de varios pasos: por medio de un jet se le aplica una preparación al hilo para proporcionar lubricación y protegerlo de la estática al enrollarlo en los carretes usualmente de cartón, otros jets aplican vapor para relajar un poco el hilo y aire para proporcionar un entrelazado al hilo necesario en los procesos textiles siguientes.

El hilo es finalmente enrollado en los carretes de cartón con tamaños a velocidades superiores a 6000 metros / min mediante enrolladoras automáticas que permiten una operación continua al contar con dos malacates, mientras uno está en operación el otro está en espera descargando paquetes de 3 a 20 Kg. de manera alternada. Los paquetes son enviados al área de almacenamiento y consolidación para ser después empacado y enviado a los procesos secundarios usualmente Tensado, Texturizado y urdido previos al proceso de tejido.

En el proceso de Tensado el dibujo del hilo se controla y se modifica para lograr las propiedades para el uso específico. El dibujo convencional se usa para tenacidad moderada (ropa de hilado plano), y se aplica calor, seguido por un paso de relajación en caliente para alta tenacidad (hilos de cubiertas de bajo estiramiento).

Para aplicaciones para alfombras y algunas aplicaciones para ropa deportiva, lencería y corsetería los hilos planos son texturizados para impartir suavidad y cobertura de fabricación similar al algodón, pero con resistencias muy superiores.

Otro proceso post-spinning es el acomodo de varios cientos de hilos enrollados simultáneamente en carretes de aluminio llamado proceso de urdido para aplicaciones de tejido **tricot**.

Las combinaciones de dos o más de los pasos anteriores en procesos consecutivos, como tensado, Texturizado o Urdido, reduce costos industriales.

Además del hilo de filamento continuo, el nylon se ofrece también en estopa, y formas de flóculos. Otro producto es hecho cortando hilos del filamento continuo en longitudes de 3 a 20 cm este tipo de fibra puede ser procesado y

mezclado con fibras naturales como por ejemplo lana y algodón. (Textos científicos, 2005)

#### 2.1.4 Viscosidad

La viscosidad es la propiedad termo física de los fluidos ocasionada por sus fuerzas de cohesión molecular y resulta en la oposición que oponen a escurrir. Todos los fluidos conocidos presentan algo de viscosidad, siendo el modelo de viscosidad nula una aproximación bastante buena para ciertas aplicaciones. Un fluido que no tiene viscosidad se llama **fluido ideal**

La viscosidad es una característica que está presente en los líquidos que se encuentran en movimiento, no se puede ver reflejada en un sólido o líquido que se encuentre estático debido a que si permanece fijo las moléculas que lo componen no tendrán la necesidad de interactuar entre sí para tratar de permanecer unidas.

Mientras más grandes sean las moléculas de un líquido mayor resistencia pondrán a su desplazamiento, por lo tanto, en este caso se dice que estos fluidos son más viscosos debido a que el desplazamiento que pueden presentar sus moléculas se da de una manera más lenta, la razón es que las fuerzas intermoleculares que están presente en este líquido son más fuertes. En caso el contrario, cuando las moléculas que lo conforman son más pequeñas tendrán menor fuerza de oposición por lo que su movimiento será más rápido por que presentan fuerzas intermoleculares débiles.

El hecho de que un fluido sea más viscoso que otro quiere decir que tiene mayor oposición a su deformación, sin embargo, con la sola acción de aplicarle energía calórica a un fluido ocasiona que disminuya su viscosidad, lo que provoca este pueda moverse de una manera mucho más rápida.

A parte de los líquidos los gases también poseen la característica de la viscosidad debido a que estos también son fluidos o se pueden poner en movimiento, sin embargo, en este caso sus efectos suelen ser despreciables en vista que son tomados en cuenta como fluidos ideales.

En conclusión, las viscosidades de todos los fluidos están en función de la temperatura y la presión, aumentan para los gases y disminuyen para los líquidos al subir la temperatura o la presión. Un fluido viscoso tiende a adherirse a una superficie sólida que está en contacto con ella. Siempre hay una capa de frontera delgada de fluido cerca de la superficie, en la que el fluido está casi en reposo respecto a ella. (Freedman, 2009)

Las unidades de la viscosidad más utilizadas son [mPa.s] aunque en el sistema cegesimal se sigue usando la unidad centiPoise [cP]

$$1 \text{ cP} = 1 \text{ mPa} \cdot \text{s} \quad \text{o} \quad 1 \text{ Poise} = 1 \text{ gr} / \text{cm} \cdot \text{s}$$

### 2.1.5 Transición vítrea, punto de reblandecimiento y punto de fusión del Nylon

La transición vítrea es un estado que se manifiesta en los polímeros amorfos, es decir, polímeros cuyas cadenas no están dispuestas según un ordenamiento cristalino, sino que están esparcidas en cualquier ordenamiento, aun en estado sólido.

Los polímeros cristalinos también tienen alguna porción amorfa, por lo general constituye el 40-70% de la muestra polimérica. Esto explica por qué una misma muestra de un polímero puede tener una temperatura de transición vítrea (**T<sub>g</sub>**) como una Temperatura de fusión, pero lo importante es saber que la porción amorfa solo experimenta la **T<sub>g</sub>**, y la porción cristalina sólo la fusión, las cadenas pueden moverse con facilidad de modo que cuando toma una porción de polímero y se dobla, las moléculas que ya están en movimiento no tendrán problemas en moverse. En caso contrario si se trabajara con un **T<sub>g</sub>** menos las cadenas ya no podrían desplazarse con facilidad.

Para el Nylon la temperatura de transición vítrea, punto de reblandecimiento y fusión se muestran en la siguiente tabla

Tabla 2.1 Temperaturas críticas del Nylon 6 y Nylon 6.6

Material	Temperatura de transición vítrea (T <sub>g</sub> )	Punto de reblandecimiento	Temperatura de fusión (T <sub>m</sub> )
Nylon 6	50	155	215
Nylon 6.6	57	159	258

Entre **T<sub>g</sub>** y **T<sub>m</sub>**, hay un punto de reblandecimiento en que las moléculas del polímero adquieren una consistencia plastosa es el punto en que la velocidad de cristalización es máxima, es decir, a esta temperatura se producen muchas nucleaciones lo que indica un aumento en la masa molecular de la cadena, por lo tanto, crecimiento del grano causando flujo altamente viscoso irreversible. En la figura 2.3 se muestra este comportamiento para los dos tipos de Nylon.

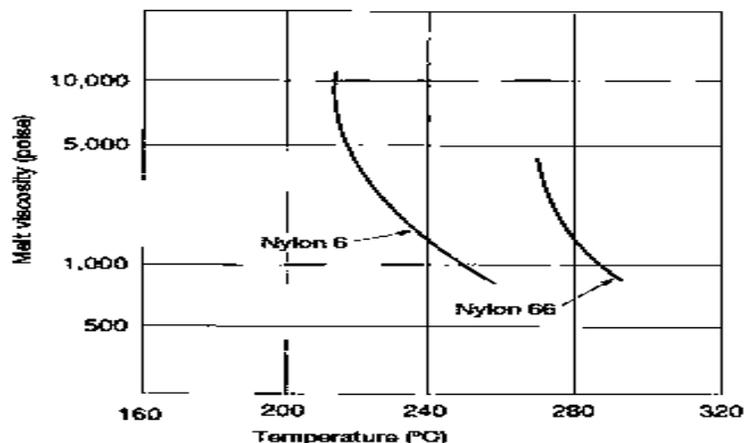


Figura 2.3 Cambio de la viscosidad del Nylon en función de la temperatura

## 2.1.6 Procesos de Transferencia de Calor

Transferencia de calor. La ciencia de la termodinámica trata de las transiciones cuantitativas y reacomodos de energía como calor en los cuerpos de materia. La ciencia de la transferencia de calor está relacionada con la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos llamados fuente y receptor. Cuando se vaporiza una libra de agua o se condensa una libra de vapor, el cambio de energía en los dos procesos es idéntico. La velocidad a la que cualquiera de estos procesos puede hacerse progresar con una fuente o receptor independiente es, sin embargo, inherentemente muy diferente. Generalmente, la vaporización es un fenómeno mucho más rápido que la condensación.

Mecanismos de la transferencia de calor. Hay tres formas diferentes en las que el calor puede pasar de la fuente al receptor, aun cuando muchas de las aplicaciones en la ingeniería son combinaciones de dos o tres. Estas son, conducción, convección y radiación.

Conducción. La conducción es la transferencia de calor a través de un material fijo tal como la pared estacionaria. La dirección del flujo de calor será a ángulos rectos a la pared, si las superficies de las paredes son isotérmicas y el cuerpo es homogéneo e isotrópico el flujo de calor por hora es proporcional al cambio de temperatura a través de la pared y al área de la pared. Si  $t$  es la temperatura en cualquier punto de la pared y  $x$  es el grueso de la pared en dirección del flujo de calor, la cantidad de flujo de calor  $dQ$  es dada por:

$$dQ = kA \left( - \frac{dt}{dx} \right) \text{ Btu/hr}$$

El término  $-dt/dx$  se llama gradiente de temperatura y tiene un signo negativo si se supuso una temperatura mayor en la cara de la pared en donde  $x = 0$  y menor en la cara donde  $x = X$ . En otras palabras, la cantidad instantánea de transferencia de calor es proporcional al área y a la diferencia de temperatura  $dt$  que impulsa el calor a través de la pared de espesor  $dx$  (Figura 2.4). La constante de proporcionalidad  $k$  es peculiar a la conducción de calor por conductividad y se le conoce por conductividad térmica. (Kern, 1992)

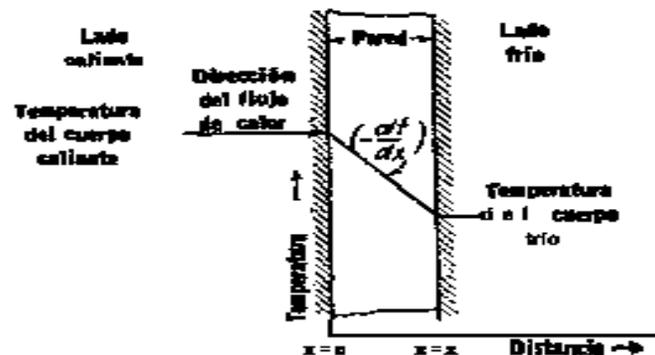


Figura 2.4 Flujo de calor a través de una pared.

## 2.1.7 Limpiador químico NALCO® 66 PULV

El limpiador químico **NALCO® 66 PULV** es un producto pulverizado que contiene una mezcla de ácidos secos su pH es de 0 a 1.8 al 3%. Su composición Química se detalla en la tabla 2.2. Está inhibido para proteger a los metales comúnmente encontrados en el equipo industrial. El indicador de tinte produce un cambio de color (azul verde a púrpura) en las soluciones **NALCO® 66 PULV** al agotarse la concentración del ácido. (NALCO Company, 2018)

Tabla 2.2 Composición química del limpiador de incrustaciones.

Nombre químico	No. CAS	Concentración (%)
Ácido sulfámico	5329-14-6	30 - 50
Ácido Orgánico	Patentado	20 - 30
Ácido bórico	10043-35-3	10 - 20
Mercaptobenzotiazol	149-30-4	1 - 5
Colorante	Patentado	< 0.1

## 2.2 Análisis situacional

En los eventos en los que el recorte deja de fluir hacia la garganta del extrusor lo primero que se observa en las tendencias es un incremento en la velocidad del motor del extrusor (SI157 en color amarillo) debido a la caída de presión en el interior.

El lazo de control de presión sintonizado con inversor que controla la velocidad del motor busca mantener la presión subiéndola la velocidad, sin obtenerlo debido a la ausencia de materia prima.

Los indicadores de presión en el interior y salida del extrusor (16PC157 y 16PI158) se caen, gradualmente los sensores de temperatura de las 5 etapas de calentamiento del extrusor se van para arriba aun y cuando el control disminuye su salida a hasta casi 0% lo que corrobora la ausencia de materia en el interior del extrusor como se muestra en la figura 2.5

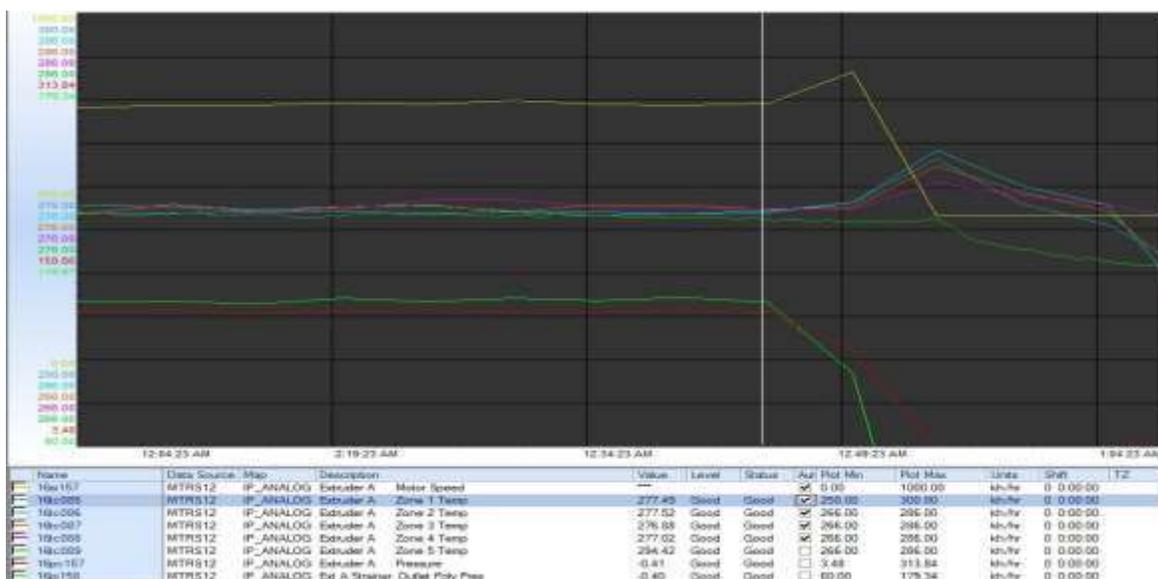
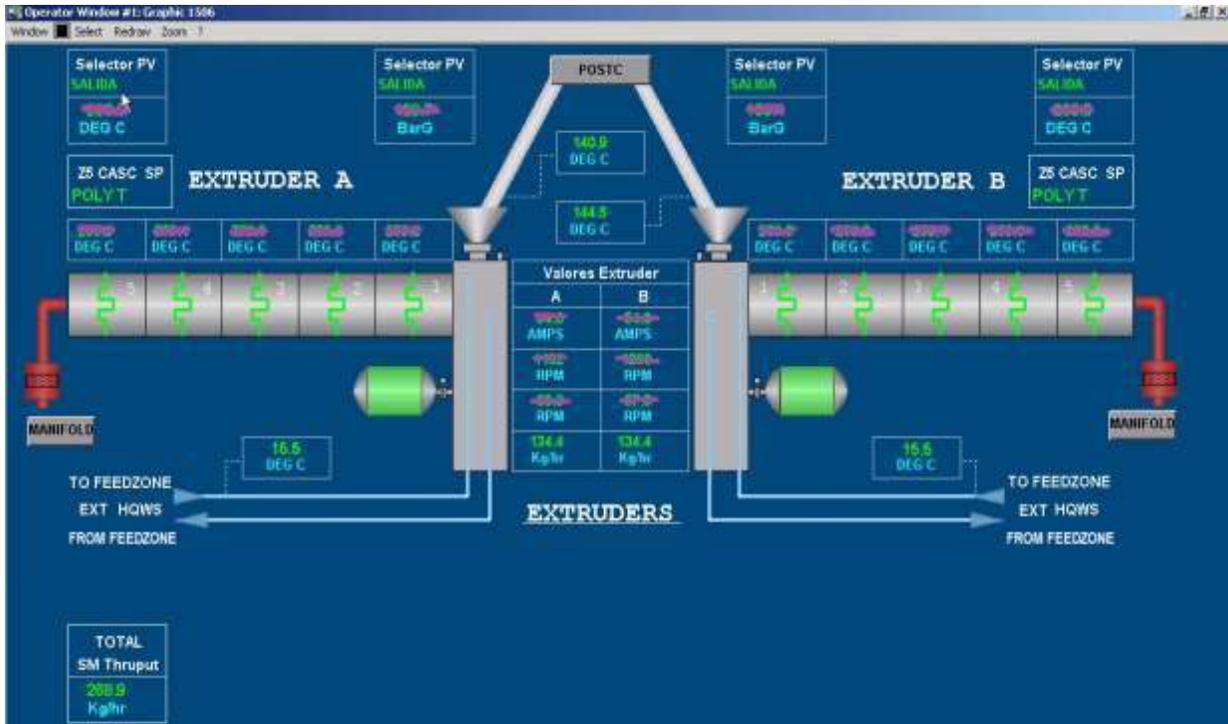


Figura 2.5 La línea superior muestra la velocidad del extrusor, las líneas centrales las temperaturas de las zonas de calentamiento y las dos inferiores corresponden a los indicadores de presión del extrusor.

El recorte proveniente del reactor cae en la garganta del extrusor a una temperatura alrededor\* de 140 °C. En el proceso de extrusión el recorte pasa por 5 zonas de calentamiento para ser fundido y descargado al manifold de distribución a los cabezales de hilado (Figura 2.6). La temperatura de la primera etapa de fusión del extrusor es alrededor\* de 290 °C.

Para evitar que el calor de esta zona se propague por conducción a la garganta de alimentación y funda prematuramente el polímero, la garganta está equipada con un intercambiador de calor enchaquetado en el que se inyecta agua helada a 15.5 °C para mantener la temperatura del polímero en la entrada del extrusor.

De acuerdo a los datos de diseño del extrusor, la cantidad de calor que se transfiere de la primera zona a la estructura del extrusor está calculada en aproximadamente **17 000 Joules**, los cuales son necesario disipar por medio del intercambiador de calor para impedir que ese calor se propague al resto de la estructura.



**Figura 2.6** Extrusores horizontales de Nylon. Muestra las 5 etapas de fundición y la temperatura del agua para enfriamiento de la garganta de alimentación

El agua de enfriamiento de la garganta entra a 15.5 °C. El flujo está controlado mediante un switch de flujo y un rotámetro en campo ajustado a 5 litros/min. Si el flujo cae por debajo del setting fijado una alarma aparece en la pantalla mostrada en la Figura 2.6 Sin embargo, que la temperatura y flujo sean los adecuados no asegura una buena transferencia de calor y enfriamiento de la garganta.

Las sales de sodio presentes en el agua helada del sistema de enfriamiento se fueron alojando en el interior del intercambiador de calor de la garganta formando una capa de incrustaciones por solidificación y reduciendo su diámetro en hasta un 40%, la formación de depósitos de incrustación en intercambiadores de calor es la mayor causa de reducción de la eficiencia y capacidad de enfriamiento del sistema.

Como la transferencia de calor es directamente proporcional al área de contacto y al delta de temperatura entre los fluidos, la eficiencia del intercambiador de calor se empieza a ir mermando por la disminución del diámetro de la tubería, en algunos casos de hasta el 40% y el excedente de calor de la primera zona brinca la barrera del intercambiador y se propaga a la estructura del extrusor y en consecuencia a la garganta del extrusor incrementando gradualmente la temperatura. En la figura 2.7 se muestra el esquema del extrusor y en la tabla 2.3 los datos obtenidos para el intercambiador.

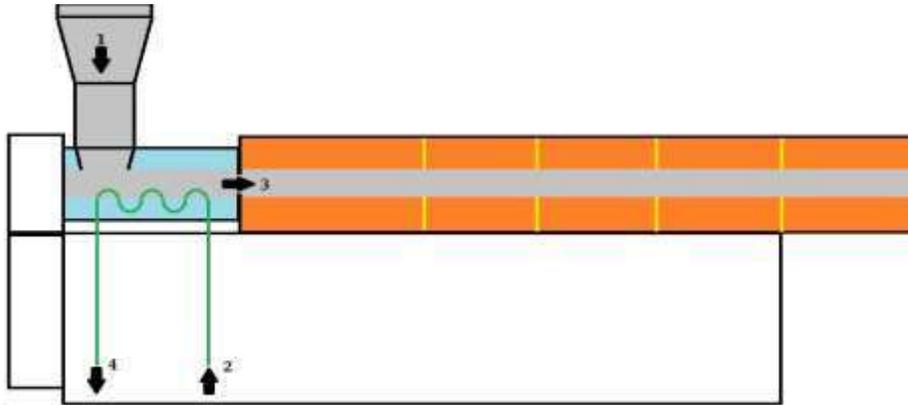


Figura 2.7 Diagrama esquemático Intercambiador de calor

Tabla 2.3 Datos del balance de energía del intercambiador de calor

DATOS	CORRIENTE			
	1	2	3	4
Masa ( Kg )	268.5	300.0	268.5	300.0
Temp ( °C )	145.0	15.5	140.0	25.0
ΔT ( °C )	135.0	5.5	130.0	15.0
Cp ( J/ Kg °C )	1670.0	4186.0	1670.0	4186.0
H ( J/ Kg )	225450.0	23023.0	217100.0	62790.0

Formulas:

*Cálculo de la Entalpía*

$$H = \int_{T_1}^{T_2} Cp \Delta T$$

$$H = Cp ( T_2 - T_1 )$$

*Balance de Energía*

$$m_1 H_1 + m_2 H_2 + Q = m_3 H_3 + m_4 H_4$$

$$Q = m_3 H_3 + m_4 H_4 - m_1 H_1 + m_2 H_2$$

$$Q = 16,595,025.0 \text{ Joule.} \quad Q = 16,595.03 \text{ KJ}$$

Al bajar la eficiencia del intercambiador de calor, la cantidad de calor de la primera zona se iguala con la de la garganta y paulatinamente se incrementa y la rebaza. Este excedente de energía que no es posible disipar se transfiere a las piernas de alimentación y en consecuencia al polímero de Nylon afectando su viscosidad.

El polímero de Nylon en las piernas de alimentación debe permanecer en fase sólida con un factor de viscosidad casi cero para que pueda caer por gravedad en la boca del extrusor mientras se va incrementando poco a poco la humedad hasta llegar a valores 6 – 7 % de RH, si se incrementa la viscosidad en esta etapa, las cadenas de Nylon se empiezan a alinear para formar cadenas más largas, físicamente se observa como los granos se adhieren unos a otros y se forma una especie de tapón que detiene el flujo de polímero a la garganta del extrusor.

### **2.2.1 Impacto económico**

Al detenerse el flujo, el polímero en el reactor se degrada al incrementarse su tiempo de residencia ya que los demás reactivos se siguen alimentando y cambia las propiedades del producto final. Pocos minutos bastan para que el polímero estacionado sea afectado en sus propiedades, por lo que si no se puede restablecer inmediatamente la totalidad del gránulo en el reactor se tiene que bajar y enviar a desperdicio. La capacidad del reactor es de 4.5 Ton. El costo del Nylon en recorte es de \$3.8 Usd/Kg. Y vendido como desperdicio su valor es de 1 Usd/Kg.

**Por lo tanto, el costo de la materia prima enviada desperdicio por evento es de \$12.6 MUSD**

Los packs filtrantes y las toberas de hilado que se tapan al detenerse el proceso. Cada uno de estos packs tiene un costo aproximado de \$11 USD el volverlo a habilitarlos para el proceso. 96 de estos packs son requeridos para una maquina hiladora.

**El costo de este rubro es de \$1.056 MUSD.**

El costo de oportunidad es lo que dejamos de ganar al no estar produciendo la máquina y este se obtiene con la disponibilidad de la máquina, y el valor marginal del producto. La disponibilidad o en este caso, la no disponibilidad representa el tiempo que la máquina estuvo parada a causa del disturbio en el proceso. Para calcularlo consideramos el tiempo de duración del paro desde la interrupción hasta que el proceso es iniciado nuevamente y estabilizado. En los eventos considerados en esta investigación restablecer la maquina tomó 12 Horas en el menor de los casos y se fue hasta 36 horas en otro caso debido a que se tuvo que hacer verificación de integridad mecánica.

El gasto de la maquina es de **268.5 Kg/Hr** con un factor de rendimiento de **95%**.

El valor marginal del producto de **\$2.5 Usd/Kg** y representa la ganancia que entrega el producto al negocio.

Este se calcula como diferencia del precio de venta menos los costos fijos y variables en la fabricación, esto es, para un precio de venta del producto de \$6.5 USD/Kg:

Valor marginal = Precio venta Prod.- Materia Prima – Aditivos - Energía – C Fijos

Valor marginal = \$6.7 Usd/Kg – 3.8 Usd/Kg – 0.1 Usd/Kg – 0.2 USD/Kg- 0.1 Usd/Kg

**Valor marginal para el producto = \$ 2.5 USD/Kg**

El costo de Oportunidad por la no disponibilidad lo obtenemos así:

**(268.5 Kg/Hr \* 0.95 \* 1 Hr \* 0.0025 MUSD/ Kg) = \$ 0.637 Musd / Hr**

**Con esto entonces calculamos el impacto de cada interrupción al proceso**

Impacto= Desperdicio + Packs + Costo oportunidad x tiempo

Por ejemplo, para un evento con duración de 12 horas:

**12.6 + 1.056 + (12 Hr \* 0.637 Musd / hr) = \$ 21.3 MUSD**

Los costos de operación y mantenimiento son considerados dentro de los costos fijos ya que estos recursos se tienen y solo tienen que ser canalizados a las actividades de recolección de la materia prima en desperdicio y limpieza de la máquina, sin embargo, se incrementa el factor riesgo por actividades no rutinarias como son el quitar los packs a alta temperatura y el llenar y moverlos los pallets con material a desperdicio.

El historial de eventos muestra 6 paros relacionados en dos líneas de producción durante el 2018 (Tabla 2.4)

**Tabla 2.4 Historial de eventos en los extrusores de líneas 715 y 716**

<b>FECHA</b>	<b>HORA</b>	<b>SM</b>	<b>EVENTO</b>	<b>DUR (Hrs)</b>	<b>IMP (MUSD)</b>
<b>10-05-18</b>	3:34:00 PM	<b>715</b>	Deja de fluir el recorte en el extrusor A. El control de presión del extrusor registra baja presión, se confirma con las lecturas de antes y después de filtro y antes y después de ensambles. La velocidad del extrusor se incrementa.	<b>12.5</b>	<b>21.62</b>
<b>12-05-18</b>	2:35:00 PM	<b>715</b>	Volvió a presentarse el evento en el extrusor A. Se cae la presión del extrusor, se cortan las posiciones, la salida del extrusor se va hacia arriba y se para.	<b>14.5</b>	<b>22.58</b>
<b>13-06-18</b>	9:44:00 PM	<b>715</b>	Se presenta nuevamente el mismo hecho. Se les da la indicación de limpiar Con N6, Cambiar toberas y volver a arrancar. Se les comenta que si vuelve a fallar se deje la viga parada	<b>12</b>	<b>21.3</b>
<b>16-06-18</b>	10:09:00 AM	<b>716</b>	Deja de fluir recorte en el lado B, similar a los eventos que se han presentado en la V715. Se limpió con N6 y se volvió a arrancar.	<b>24</b>	<b>28.95</b>
<b>14-07-18</b>	3:06:00 AM	<b>715</b>	Deja de fluir recorte en el lado A, debido a que ya no hay toberas se deja parada la viga.	<b>36</b>	<b>36.6</b>
<b>16-07-18</b>	4:22:00 PM	<b>716</b>	Deja de fluir recorte en el lado B, Se da indicación de limpiar y dejar la línea parada hasta terminar investigación RCA	<b>72</b>	<b>58.25</b>

El impacto para el negocio se calcula en casi \$200 MUSD. En el último de los eventos la maquina tuvo que ser parada por varios días hasta concluir la investigación y tener una acción que diera solución al problema.

## **CAPÍTULO 3**

### **MARCO DESCRIPTIVO**

#### **3.1 Estrategia de solución**

La estabilidad de los procesos químicos se mantiene y se incrementa con el paso del tiempo. Evitar disturbios y paros inesperados es vital para mantener un buen rendimiento del proceso. Los análisis económicos de un producto se mueven en la medida que el proceso sea inestable de ahí que cuidar y atacar las causas que afectan la estabilidad del proceso es vital para mantener una operación continua.

La estrategia para evitar paros inesperados en las líneas de producción de Nylon a causa de la baja eficiencia en el intercambiador de calor de la garganta del extrusor e incluso paros programados para realizar limpieza del intercambiador es hacer las adecuaciones a las líneas de entrada y salida de agua helada del extrusor para conectar temporalmente un equipo de limpieza portátil para suministrar el ácido Nalco® 66 Pulv.

Las adecuaciones en el extrusor son instalar una derivación en la entrada y salida de las líneas de agua de enfriamiento, con sus respectivas válvulas de bloqueo y conexiones rápidas para hacer la conexión – desconexión del equipo de limpieza.

Por medio de este equipo se pondrá a circular la solución limpiadora NALCO® 66 PULV al 4 % o hasta un 6% % en peso dependiendo de la cantidad de incrustación de acuerdo al siguiente procedimiento:

- a)** Al desacoplar la tubería del intercambiador de calor del extrusor se hace una inspección rápida y medición de la cantidad de incrustación en los internos. Con esto se termina la concentración y horas que se dejara recirculando la solución limpiadora, desde un 4% hasta un 6% en peso y de 2 a 12 horas de trabajo.
- b)** Las temperaturas de limpieza recomendados son 50-55 °C (120-130 ° F) con una temperatura máxima de 60 °C (140 °F). La velocidad de reacción disminuye proporcionalmente con la temperatura por lo que al llevar la solución a 10 – 12 °C en la recirculación es necesario incrementar el tiempo de exposición.
- c)** La cantidad de incrustaciones, la concentración, temperatura debe revisarse cuidadosamente para para reducir al mínimo el tiempo necesario para la limpieza tanto como sea posible para reducir la corrosión por la sustancia a los internos de intercambiador y las tuberías.
- d)** El reactivo NALCO™ 66 PULV se añade gradualmente al agua una vez iniciada la recirculación usando un embudo de goma o polietileno.
- e)** Dejar el equipo en recirculación durante el tiempo establecido 4 – 12 horas hasta que las incrustaciones hayan sido removidas o el ácido se ha agotado.

f) Valorar el ácido con la prueba de control por descalcificación, esto es puede considerarse completa cuando el pH se mantiene constante entre 1.5 - 2.0 % rango para 15 - 30 minutos.

Si la descalcificación no es completa después de 8 a 12 horas, la unidad debe ser drenada y una nueva solución añadida. Esto es necesario porque los iones férricos disueltos se corroen las superficies metálicas a pesar de la presencia del inhibidor.

g) Después de que la descalcificación es completa, remover las incrustaciones aflojadas con agua fresca a manera de enjuague.

h) Recircular agua con solución al 0.2% con NaOH para neutralizar toda la superficie del equipo.

i) Finalmente enjuagar con agua fresca.

j) Reconectar las líneas del sistema de agua helada del extrusor y retirar el equipo de recirculación para tenerlo disponible para la limpieza a otra línea.

## 3.2 Desarrollo del proyecto

Para dar seguimiento a la implementación del proyecto y completar las tareas satisfactoriamente se establecieron las siguientes etapas

### 3.2.1 Análisis de causa raíz (RCA)

Desde la aparición de los primeros eventos en los cuales el flujo de polímero se interrumpe y causa el paro del proceso, se realizaron las investigaciones para determinar las causas contribuyentes y directas de los eventos. Esto permitió ir armando el rompecabezas y poder establecer una teoría que explicará la razón por la cual el polímero se detiene en la entrada al extrusor y poder postular una estrategia de solución.

El análisis de causa raíz arrojó varias acciones derivadas de la relación causa efecto. Algunas de las acciones más significativas realizadas se enlistan a continuación:

- Desacoplar la tubería de alimentación de recorte al extrusor en busca de obstrucciones tipo **muérganos** o **nidos de pájaro** formados por recorte mal cortado bloqueando la caída de recorte del SPP al extrusor.
- Pruebas de hermeticidad en el silo de postcondensación y a los retenes de la transmisión del **tornillo de extrusión** para detectar fugas de nitrógeno que causarán zonas de baja presión o presión negativa en ducto de alimentación impidiendo el flujo de recorte en su camino a las zonas de calentamiento del extrusor
- Extracción del tornillo extrusor para revisar formación de geles de polímero cristalizado de fusión y que bloquean el flujo del polímero fundido en el interior del extrusor.
- Análisis de las propiedades del polímero, principalmente físicas, ya que las propiedades químicas están enlistadas en su especificación y debe cumplirse rigurosamente para que sea importado a la planta.

La forma de los gránulos, tamaño y presencia de espaguetis por mal proceso de cortado son contribuyentes a la formación de muérganos, o exceso de monómero en forma de polvo el cual se va acumulando en las paredes reduciendo el diámetro de la tubería causando con una disminución del flujo en todo el proceso de transportación del polímero de Nylon. Y que en la pierna de alimentación al extrusor pudiera estar estrangulando el gasto requerido.

- Análisis termográfico en las piernas de alimentación, garganta y zonas de calentamiento del extrusor. Este análisis mostró que el enchaquetado de las piernas era hermético, la temperatura del aire que rodea las piernas estaba a las condiciones climáticas del salón coincidiendo con la prueba de hermeticidad, La temperatura de las zonas de calentamiento es la parte con la temperatura más alta en el proceso necesaria fusión del polímero y aunque está aislada y enchaquetada el calor fluya por conducción a la estructura y a los sistemas aledaños. La termografía de la garganta de alimentación si mostro datos inusuales, la temperatura estaba 10 - 15 °C más alta de la temperatura a la cual sale el polímero del SPP.

Este análisis evidenció que parte del calor de la primera zona de calentamiento se conduce hacia la garganta y que el agua halada que se suministra a la garganta para hacer la función de barrera era insuficiente y la temperatura se fue elevando lenta y gradualmente hasta llegar al punto de activación de la polimerización prematura causando con ello la detención del proceso. (RCA en anexo C)

### 3.2.2 Inspección

**Una inspección física** al interior del intercambiador de calor de la garganta. Se desacoplo la tubería de alimentación y salida del intercambiador de calor de la garganta haciendo visible la reducción en casi un 50 % del diámetro de la tubería por incrustaciones de sales de sodio en las paredes del equipo.

### 3.2.3 Experimentación

En la estufa de calentamiento de toberas se metieron varias muestras con polímero de Nylon 6 y Nylon 6.6 sacado del SPP y se sometieron a un proceso de calentamiento a varios rangos de temperatura desde 150 hasta 200°C en intervalos de 10°C. La revisión de las muestras mostró que a temperaturas cercanas a los 160°C el Nylon entra en una fase de reblandecimiento, los gránulos se pegan unos a otros e incluso se adhieren a las paredes del recipiente.

Con este dato en mente era necesario evitar que la temperatura de la garganta de alimentación de recorte sobrepasara este punto.

En el extrusor se aumentó el flujo de agua al intercambiador de la garganta de un flujo nominal de **5 lt/min** gradualmente hasta **20 lt/min** sin que la temperatura en la barrera disminuyera considerablemente a los rangos establecidos para el proceso.

Se intentó remover mecánicamente las incrustaciones del intercambiador de calor introduciendo sondas y aditamentos para limpieza de cavidades, no fue posible, las incrustaciones eran sólidas y fuertemente adheridas a las paredes, Por lo que una limpieza química fue considerada como la opción más viable.

Se contactó al proveedor NALCO el cual cuenta con reconocimiento en suministro de sustancias químicas para la industria y limpieza a equipo industrial como calderas, torres de enfriamiento, compresores, máquinas de refrigeración e intercambiadores de calor de diversos tipos y en coordinación con planta se realizaron varias pruebas con varias sustancias químicas, encontrando que la solución **Nalco® 66 Pulv** era la que disolvía con mayor facilidad y rapidez las incrustaciones del intercambiador.

### 3.2.4 Diseño

El diseño del equipo para limpieza del intercambiador se muestra en el esquema de la figura 3.1

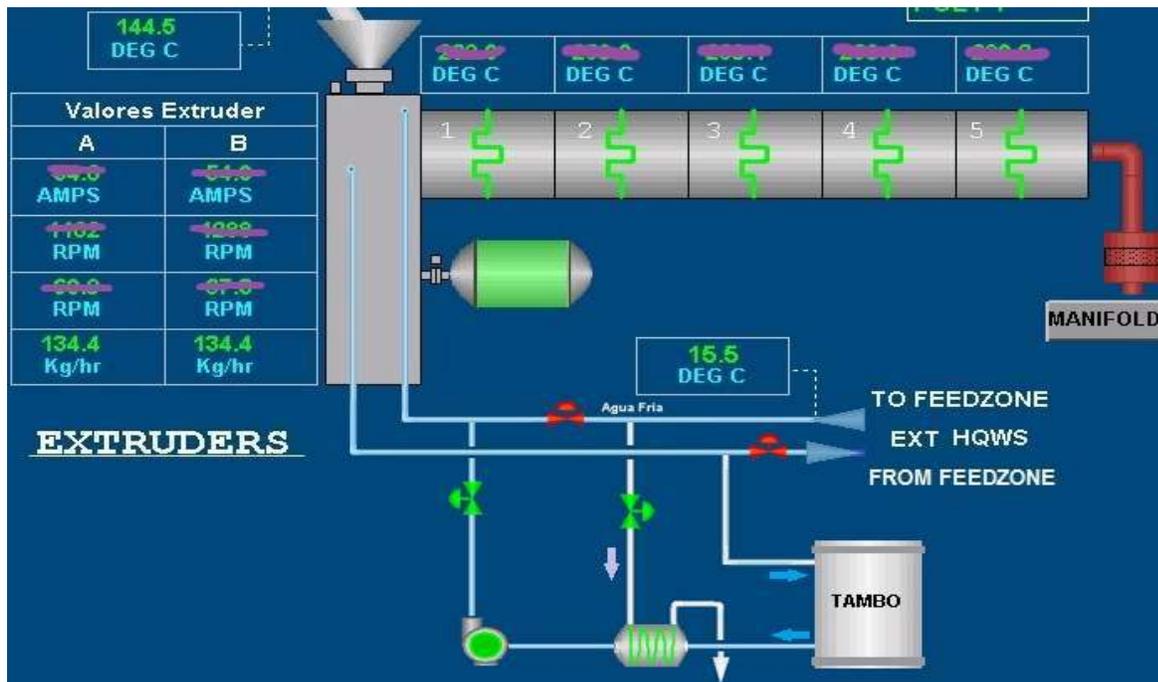


Figura 3.1 Esquema de arreglo de equipo para limpieza de extrusores.

Para su diseño se consideraron los siguientes componentes:

- Tanque contenedor** para la solución limpiadora **Nalco® 66 Pulv** removedor de incrustaciones.
- Intercambiador de calor** para bajar la temperatura de la solución limpiadora. El proceso requiere de agua helada a 18 °C para mantener la temperatura de la garganta, de ahí que el líquido limpiador debe ser enfriado tanto como sea posible para evitar que la temperatura de la garganta se incremente en el proceso de limpieza.

- c) **Bomba de recirculación** para alimentar la solución a la garganta del extrusor, pasarla por ambos intercambiadores de calor e impulsarla de regreso al tanque contenedor.
- d) **Válvulas de bloqueo** para desviar el flujo de agua helada e ingresar la solución limpiadora y viceversa.
- e) **Conexiones rápidas y mangueras flexibles** para conexión y desconexión del equipo de limpieza de manera rápida sin afectación al proceso. Para las interconexiones del equipo en las líneas de entrada y salida de agua helada se considera de tubería de acero galvanizado de ½" con conectores rápidos tipo DIXON y manguera flexible de baja presión PARKER. (Mangueras y Conexiones, 2018)
- f) **El equipo para limpieza es portátil**, de manera que se puede mover a cualquiera de los extrusores de las diversas líneas de producción y proveerles una limpieza a sus intercambiadores de calor.

### 3.2.5 Plan de Implementación

En coordinación con el departamento de ingeniería y operaciones se estableció una estrategia para realizar la limpieza de los extrusores de todas las líneas de producción.

Para determinar un orden y establecer prioridades en la realización de la limpieza se realizaron las siguientes pruebas:

- a) Análisis termográfico en la garganta del extrusor para detectar delta de temperatura Zonas de calentamiento – Garganta – Piernas de alimentación.
- b) Cálculo de la eficiencia del intercambiador de calor mediante un balance de energía considerando los flujos y temperatura de entrada y salida del agua helada vs el gasto de materia prima fluyendo al proceso.
- c) Ponderación de los resultados incluyendo también la criticidad y demanda del producto, y cambios de producto en la línea de producción que en este caso estos casos resultan en un punto ideal para realizar la limpieza debido a que en caso de retraso en la interconexión se reduce el impacto.

Con estos puntos se elaboró el programa de limpieza para las 16 líneas de producción activas y se inició una vez que se aseguró el suministro de la solución limpiadora para todas ellas.

Para asegurar la efectividad del programa se establecieron las siguientes acciones administrativas:

- d) En el sistema de administración de planta (SAP) se dio de alta el plan de limpieza para cada máquina, inicialmente se estableció con una frecuencia anual misma que en relación a los hallazgos se somete a revisión. (Se detalla programa en anexo D)
- e) Codificación de la sustancia limpiadora para la adquisición y suministro controlado a planta.
- f) Alta de la sustancia limpiadora en el sistema de administración de sustancias peligrosas en la planta para su almacenaje, manejo y disposición de residuos de manera segura en base a sus MSDS. (Ver hojas S MSD en anexo E)

## **CAPÍTULO 4**

### **RESULTADOS**

#### **4.1 Logros alcanzados**

Con la limpieza al intercambiador de la garganta del extrusor se llevó su eficiencia a los valores de diseño, disipando el exceso de calor que se transfiere por conducción del extrusor a las piernas de alimentación. Como resultado la viscosidad del polímero en el conducto se mantuvo permitiendo que el polímero en fase sólida cayera libremente a la garganta para ser fundido y extruido.

Después de la limpieza química al interior de la garganta del extrusor el proceso se mantuvo sin interrupciones. Se programó la otra línea de proceso que había estado presentando apelmazamiento también para limpieza y con ello se tuvo una operación ininterrumpida. En la planta hay 10 líneas más de proceso que si bien no había exhibido el problema estaban en amenaza de presentarlo ya que sus sistemas de enfriamiento han estado expuestos a los mismos agentes del agua.

De agosto 2018 a la fecha (Mar 2019) se han programado y efectuado las limpiezas a los intercambiadores de calor de los extrusores del resto de las máquinas sin parar la línea de producción, esto es haciendo el bypass al equipo de limpieza portátil en línea, sin afectar la continuidad del proceso.

Los ahorros para la empresa con las limpiezas de los extrusores en línea ascienden a \$190 MUSD. Estimando una duración mínima de 8 horas para realizar la limpieza y costo por paro promedio de \$16.6 MUSD por evento para las 10 líneas de producción restantes.

#### **4.2 Conclusiones**

En general la temperatura influye en el comportamiento viscoelástico de los polímeros, afecta su estructura, grupos funcionales y en sí la cadena del polímero, influye en su capacidad para fluir al romper los enlaces químicos, (por las fuerzas de Van der Waals entre las cadenas) cuando la temperatura aumenta los enlaces se alinean y tiene lugar el flujo viscoso más fácilmente con menor tensión aplicada. A muy altas temperaturas, los enlaces covalentes de la cadena principal pueden destruirse, el polímero se quema o se carboniza. Esta temperatura, denominada temperatura de degradación, limita la utilidad del polímero y representa la temperatura superior a la cual el polímero puede ser conformado de manera útil.

Cuando la temperatura de los polímeros lineales es alta, la viscosidad es baja. Las cadenas pueden moverse con facilidad incluso sin fuerzas externas, y si se aplica una tensión, el polímero fluye prácticamente sin que exista deformación elástica.

El comportamiento que exhibe aparece reflejado en la figura 4.1, en el que la resistencia y módulo de elasticidad son casi nulos.

Sin embargo, cuando bajamos la temperatura, se incrementa la viscosidad y no se mueven con facilidad las cadenas. A temperaturas cercanas al punto de reblandecimiento el polímero obtiene su punto más alto de viscosidad, las cadenas no deslizan y el polímero presenta un comportamiento de sólido rígido.

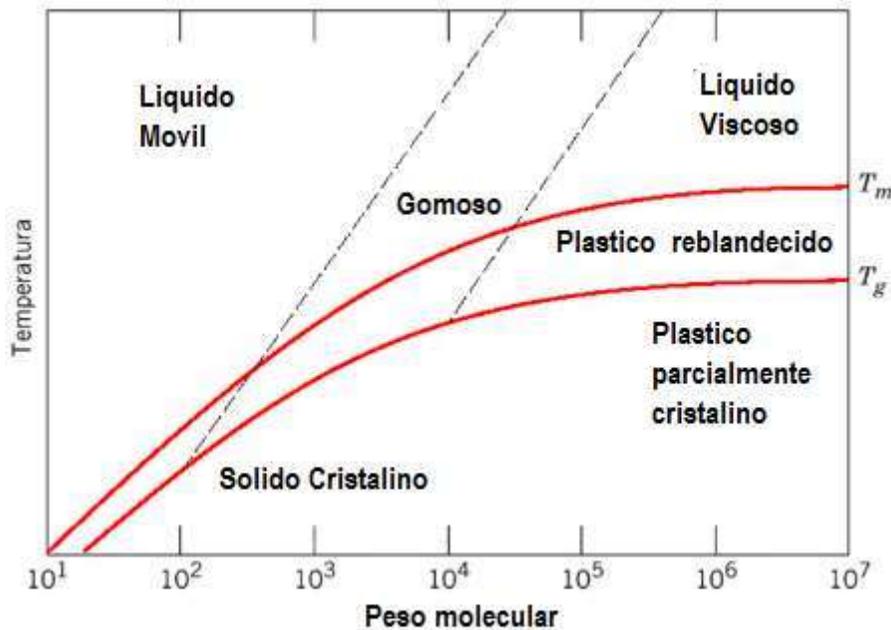


Figura 4.1 Estados del polímero en función de la temperatura

Llevar al polímero al punto de reblandecimiento  $155 - 165 \text{ }^\circ\text{C}$  es el causante del colapsamiento del recorte en las piernas de alimentación a los extrusores. A esta temperatura se producen muchas nucleaciones lo que indica un aumento en la masa molecular de la cadena, por lo tanto, crecimiento del grano causando flujo altamente viscoso irreversible, los gránulos de recorte se adhieren unos a otros como resultado de la alineación prematura de las cadenas y con ello deteniendo el flujo del granulo al extrusor. (Brydson, 1999)

## ANEXO A

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Fibras Artificiales. (01 de 01 de 2013). *Fibras Artificiales*. Recuperado el 10 de 02 de 2019, de Fibras Sintéticas y Especiales: <https://fibras-artificiales.webnode.mx/poliamida/nylon/>

Freedman, Young. (2009). *Física Universitaria*. Mexico: Addison-Wesley.

Invista Net. (01 de 01 de 2018). *INVISTA PERFORMANCE TECHNOLOGY*. Recuperado el 10 de Febrero de 2019, de NYLON 6,6 VALUE CHAIN: <https://ipt.invista.com/en/Nylon-66-value-chain>

Kern, D. Q. (1992). Procesos de Transferencia de Calor. En D. Q. Kern, *Procesos de Transferencia de Calor* (págs. 13, 14, 15). Nueva York: CECSA.

Mangueras y Conexiones. (01 de 01 de 2018). *Casa Mayers*. Recuperado el 22 de 02 de 2019, de Casa Mayers Ferretero: <https://www.casamyers.com.mx/>

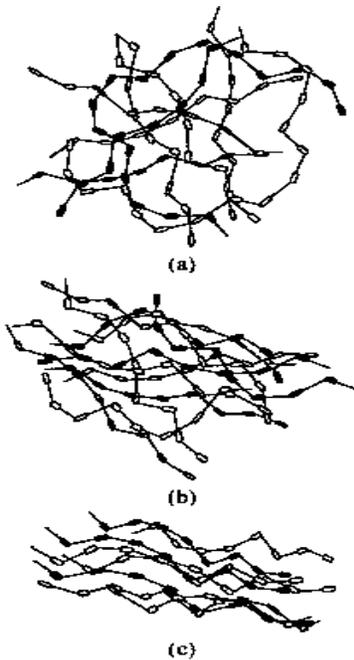
NALCO Company. (24 de 09 de 2018). *NALCO an Ecolab Company*. Recuperado el 22 de 02 de 2019, de Hojas de datos de Seguridad: [www.nalco.com](http://www.nalco.com)

Textos científicos. (29 de 08 de 2005). *Textos Científicos.com*. Recuperado el 10 de 02 de 2019, de Textos Científicos: <https://www.textoscientificos.com/polimeros/nylon/produccion>

Brydson, J. A. (1999). *Plastic Materials*. London: Butterworth.

## ANEXO B

### Alineación de las moléculas de Nylon en el proceso de polimerización



a) moléculas de polímero en estado sólido. b) moléculas de Nylon pre-alineadas. C) moléculas de Nylon alineadas como resultado del proceso de extrusión

# ANEXO C

## RCA Interrupción de recorte a extrusores

### NYLON DE MÉXICO

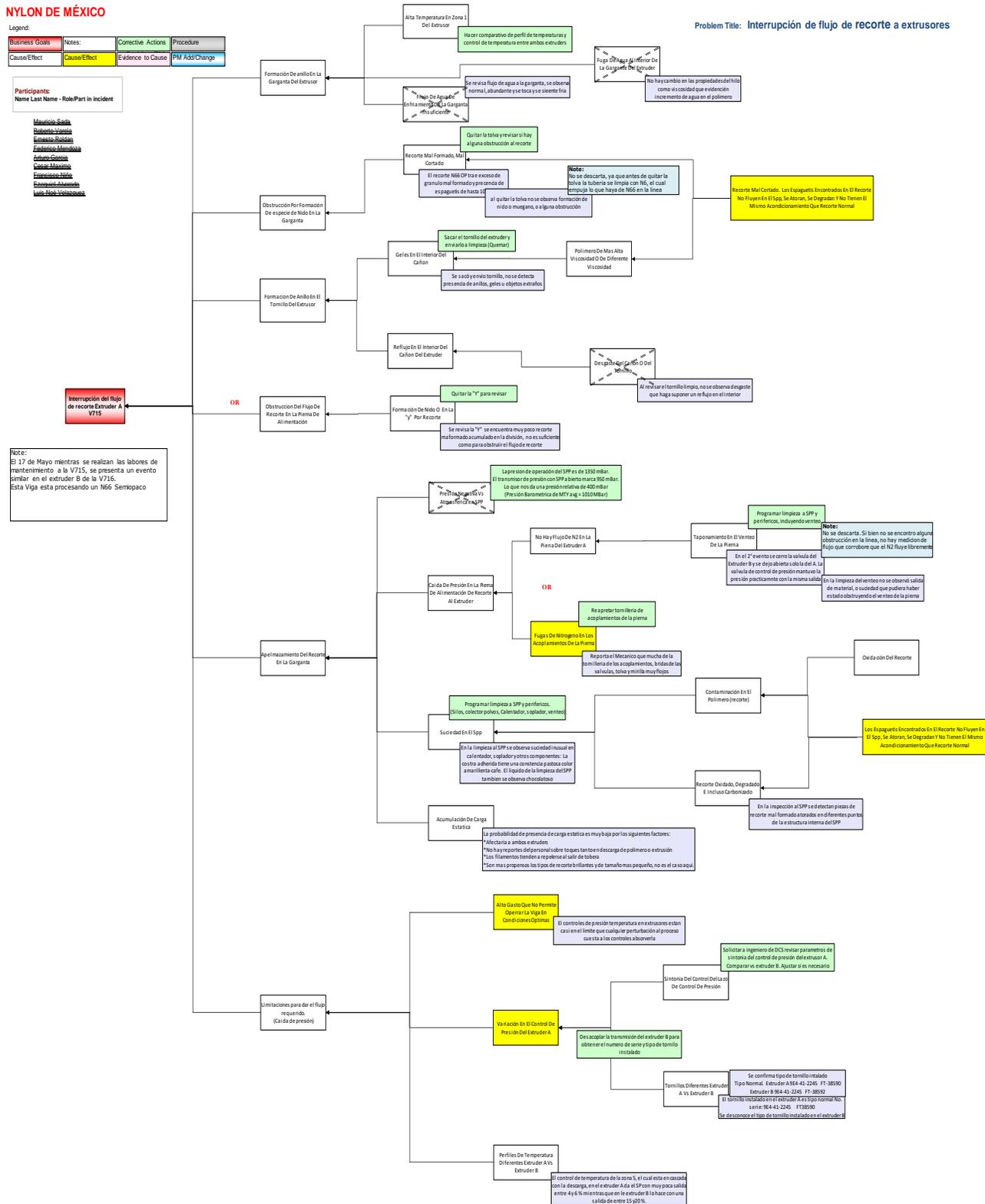
Legend:

Business Goals	Notes	Corrective Actions	Procedure
Cause/Effect	Cause/Effect	Evidence to Cause	PM Add/Change

**Participants:**  
Name Last Name - Role/Part in Incident

Martín Gadea
Daniela Yanes
Esteban Robles
Federico Mancilla
Arturo Cisneros
Óscar Mancino
Emiliano Nolasco
Wladimir Velasco

Problem Title: Interrupción de flujo de recorte a extrusores



## ANEXO D

### Programa preventivo de limpieza de intercambiadores de calor de extrusores

**Display Maintenance Plan: Strategy plan 000000006445**

Maintenance plan: **6445** MP LIMPIEZA QUIMICA A EXTRUSORES

Maint. plan header

Maintenance plan cycle 05/23/2019 | Maintenance plan scheduling parameters | Maintenance plan additional data

Cycles

Cycle	Unit	Maintenance cycle text	Offset
	365DAY	Cada 12 meses	0

Item overview | Item | Object list Item | Item location | Cycle Item 05/23/2019

Maintenance item	Maintenance Item Text	O..	S...	T..	Functional Location
7810	MP LIMPIEZA QUIMICA A EXTRUSOR A V20	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	MTY-DUP-C08-V20-EXT-EXEA
7811	MP LIMPIEZA QUIMICA A EXTRUSOR B V20	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	MTY-DUP-C08-V20-EXT-EXEB
7812	MP LIMPIEZA QUIMICA A EXTRUSOR A V19	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	MTY-DUP-C08-V19-EXT-EXEA
7813	MP LIMPIEZA QUIMICA A EXTRUSOR B V19	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	MTY-DUP-C08-V19-EXT-EXEB
7814	MP LIMPIEZA QUIMICA A EXTRUSOR A V18	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	MTY-DUP-C08-V18-EXT-EXEA
7815	MP LIMPIEZA QUIMICA A EXTRUSOR B V18	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	MTY-DUP-C08-V18-EXT-EXEB
7816	MP LIMPIEZA QUIMICA A EXTRUSOR A V17	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	MTY-DUP-C08-V17-EXT-EXEA
7817	MP LIMPIEZA QUIMICA A EXTRUSOR B V17	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	MTY-DUP-C08-V17-EXT-EXEB
7818	MP LIMPIEZA QUIMICA A EXTRUSOR A V16	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	MTY-DUP-C08-V16-EXT-EXEA
7819	MP LIMPIEZA QUIMICA A EXTRUSOR B V16	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	MTY-DUP-C08-V16-EXT-EXEB
7820	MP LIMPIEZA QUIMICA A EXTRUSOR A V15	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	MTY-DUP-C08-V15-EXT-EXEA
7821	MP LIMPIEZA QUIMICA A EXTRUSOR B V15	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	MTY-DUP-C08-V15-EXT-EXEB
7822	MP LIMPIEZA QUIMICA A EXTRUSOR A V14	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	MTY-DUP-C08-V14-EXT-EXEA
7823	MP LIMPIEZA QUIMICA A EXTRUSOR B V14	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	MTY-DUP-C08-V14-EXT-EXEB
7824	MP LIMPIEZA QUIMICA A EXTRUSOR A V13	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	MTY-DUP-C08-V13-EXT-EXEA
7825	MP LIMPIEZA QUIMICA A EXTRUSOR B V13	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	MTY-DUP-C09-V13-EXT-EXEB

## ANEXO E

### Hojas de seguridad del producto (MSDS) Nalco® 66 Pulv



Nalco 66 Pulv.pdf

## ANEXO F

### GLOSARIO

**Ácido adípico:** El ácido adípico también llamado ácido hexano dioico es un compuesto orgánico con fórmula  $(CH_2)_4(COOH)_2$ . Es producido por la mezcla de ciclohexanol y ciclohexanona su principal aplicación es su uso como monómero para la producción de nylon.

**Amida:** Es un compuesto orgánico cuyo grupo funcional es de tipo R-CON-R, se caracterizan por tener un átomo de nitrógeno con tres enlaces unido al grupo carbonilo

**Aramida:** Es una fibra compuesta por macromoléculas lineales formadas por grupos aromáticos unidos por enlaces amida. Dos de las aramidas más ampliamente usadas son el Kevlar y el Nomex

**Bobinado:** Proceso de enrollado de un hilo (Nylon, metal, etc) en un carrete.

**Extrusión:** Proceso de transformación en el que un material fundido es forzado a atravesar una boquilla para producir un artículo de sección transversal constante y de longitud definida.

**Hexametildiamina:** También llamada 1.6-hexanodiamina y 1.6-diaminohexano, es una diamina de fórmula molecular  $C_6H_{16}N_2$ . Se utiliza en su mayor parte —en torno al 88%— como monómero en la manufactura del nylon 6.6

**Lactama:** Las lactamas son amidas cíclicas formadas a partir de moléculas que contienen grupos carboxílico y amina.

**Manifold:** Es un colector o distribuidor de flujo.

**MBM®:** Market Base Management

**MSDS:** Material Safety Data Sheet, (Hojas de seguridad del producto)

**Muégano:** Dulce mexicano hecho con trocitos cuadrados de harina de trigo fritos y pegados unos con otros con miel. En la industria de los polímeros el término se usa para referirse a aglomeraciones de recorte de Nylon pegados.

**Nido de pájaro:** Término para referirse a obstrucciones en las líneas de transporte por espaguetis de Nylon mal cortados que se van entrelazando y tejiendo hasta taponear por completo las tuberías.

**RCA:** Root Cause Analysis (Análisis de Causa Raíz)

**Recorte:** Trocitos de polímero de Nylon. Su nombre se debe a que es el resultado del proceso de corte de los fideos ó espaguetis de Nylon. También suele ser llamado chip o flake.

**SAP:** Sistema de administración de los procesos

**SPP:** Silo contenedor donde se inicia la reacción de polimerización del proceso de Nylon. Es el acrónimo de: **Solid Phase polymerizer** y es el contenedor en el cual se lleva a cabo la reacción de polimerización del Nylon

**Tricot:** Tipo de tejido industrial, usualmente telares de 3 a 4 metros de ancho y de varios km de largo.

## RESUMEN

La mayoría los procesos químicos se caracterizan por continuos, días o incluso meses por lo que una interrupción a la continuidad del proceso estriba en direccionamiento de la materia prima a desperdicio, cientos de horas hombre de operaciones, mantenimiento para la limpieza de la maquinaria y posterior re arranque para restablecer el proceso.

El proceso de fabricación del Nylon no es la excepción, es un proceso que la eficiencia, el rendimiento y la calidad del producto final aumenta a medida que se aumenta la corrida de producción, es decir el tiempo que el producto se realice de manera continua, de ahí que los eventos que causan interrupciones o disturbios al proceso son siempre analizadas para regresar de manera pronta a una condición estable el proceso.

En este documento se describe y analiza un problema específico en los intercambiadores de calor de los extrusores de Nylon 6 y Nylon 66 de la planta Nylon de México situada en Monterrey N. L. y se propone una estrategia de solución para evitar colapsamiento de las líneas de alimentación a los extrusores por variación de la viscosidad del polímero por variaciones de temperatura en los intercambiadores de calor llevando a un punto de reblandecimiento anticipado del Nylon

El proyecto se centra en realizar la limpieza de los intercambiadores de calor de los extrusores sin parar el proceso. El impacto de hacer la limpieza en línea está en el ahorro de costos derivados del paro de máquina, re arranque y estabilización del proceso. El ahorro lo obtenemos al no enviar a desperdicio las toneladas de materia prima en el paro y en la reactivación del proceso en el arranque, los costos operacionales de las maniobras previas, durante y posteriores al paro, así como los costos de mantenimiento de las actividades en torno al paro.

## **ABSTRACT**

Most of chemical process operates in continuous way; days or even months without an interruption, To Impact the continuity of the process pass on in addressing the raw material to waste, hundreds of man hours of operations, maintenance for cleaning the machinery and subsequent re start to restore the process.

The manufacturing process of Nylon is not the exception, it is a process that the efficiency, the performance and the quality of the final product increases as the production run is increased, I mean the time that the product is carried out continuously, hence, the events that cause interruptions or disturbances to the process are always analyzed to quickly return the process to a stable condition.

This document describes and analyzes a specific situation in the heat exchangers of the Nylon 6 and Nylon 66 extruders of the Nylon de México Plant located in Monterrey NL and proposes a solution strategy to avoid the collapse of the "feeding supply lines of the extruders by varying the viscosity of the polymer by temperature variations in the heat exchangers that affects the solid phase of Nylon.

The project focuses on cleaning the extruders heat exchangers without stopping the process. The impact of performing online cleaning is in the cost savings derived from machine shutdown, restart and stabilization of the process. The savings are obtained by not sending to waste the tons of raw material in the strike and in the reactivation of the start-up process, the operational costs of the previous maneuvers, during and after the stoppage, as well as the maintenance costs of the activities around unemployment.

## **PALABRAS CLAVE:**

Nylon, Extrusores, Viscosidad, Polímero, Reblandecimiento