

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

“Mejoramiento de la eficiencia de una extrusora de doble tornillo  
para fabricación de tubería”

**TESIS DE GRADO**

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentada por:

Juan Alberto Suéscum Trejos

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2007

## AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme vida y sabiduría; a mis Padres y Hermanos, por su apoyo incondicional; a mi novia Andrea, quien siempre esta a mi lado dándome su apoyo; y a la empresa Amanco Plastigama por permitir el desarrollo de este tema de tesis.

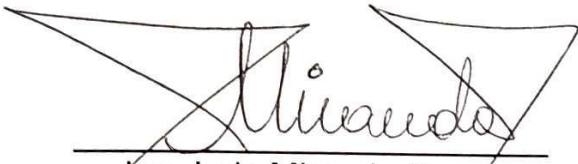
## DEDICATORIA

A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

A MI NOVIA

## TRIBUNAL DE GRADUACION



---

Ing. Luis Miranda S.  
DELEGADO DECANO FIMCP  
PRESIDENTE




---

Ing. Andrés Rigail C.  
DIRECTOR DE TESIS



---

Ing. Jorge Duque R.  
VOCAL



---

Ing. Mario Patiño A.  
VOCAL



## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente, y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).



  
Juan Alberto Suéscum Trejos

## RESUMEN

Hoy en día, en una industria plástica, el factor más importante en la fabricación de sus productos es la velocidad con la cual los manufacturan. Sin embargo, al intentar obtener mayores rendimientos en sus máquinas se encuentran con muchos limitantes que empeoran su desempeño disminuyendo las características físicas del producto final. Este es el caso que se vive en la fabricación de tuberías, debido a que no existe una máquina que funcione con cualquier tipo de materia prima obteniendo los mismos resultados.

Se conoce que para un óptimo rendimiento de una máquina extrusora de doble tornillo, se deben considerar varios factores como: el diseño del tornillo y molde, las propiedades del compuesto a utilizarse y el comportamiento del material durante el proceso. Estos factores son los de mayor incidencia en la obtención de un producto de buena calidad, debido a que un mal diseño o manejo de éstos puede acarrear grandes pérdidas de producción y por ende genera altos costos en el producto final.

Además de obtener mayores rendimientos, hay que considerar el factor medio ambiental mediante la aplicación de soluciones que se enfocan en la

reducción de la generación de residuos sólidos y en el ahorro de los recursos energéticos, que hoy en día es un tema crucial para la humanidad.

El presente trabajo se enfoca en la optimización del funcionamiento de una extrusora de doble tornillo de procedencia europea. Por lo tanto, se identificarán cuales son las limitantes de producción y se establecerán las posibles soluciones para la misma, con la finalidad de incrementar su productividad, y por lo tanto, ahorrar recursos e insumos.

La metodología utilizada para la optimización del proceso consistió de pruebas en sitio de una máquina extrusora nueva de doble tornillo en donde nos enfocamos en tres subprocesos importantes: la formulación, el diseño del molde y el diseño del calibrador. Para definir las prioridades de solución, se aplicaron herramientas de identificación y evaluación de aspectos ambientales en donde se incluye la variable de calidad. Adicionalmente, antes de realizar modificaciones en los procesos de formado se han considerado las leyes aplicables a los materiales viscoelásticos, en este caso, PVC.

En primera instancia, se mostrarán descripciones de los principales insumos que se requieren para la fabricación de tubería, asimismo una breve descripción de los diversos procesos y equipos. De igual manera, se mostrarán las consideraciones que se deben mantener para definir las propiedades de los materiales viscoelásticos en la elaboración de la tubería, así como una metodología para establecer controles de los impactos ambientales a ser analizados.

Luego, se identificarán cuales fueron las limitantes del proceso para poder obtener altos rendimientos considerando la formulación del compuesto, el molde y los calibradores; y se definirán cuáles de estos son los mas prioritarios de solucionar considerando sus aspectos ambientales.

A partir de lo anterior, se establecerán soluciones a estos problemas y se estudiarán los beneficios de la aplicación de éstos, tanto del punto de vista del cuidado ambiental como el de una mayor rentabilidad.

Se debe considerar que los cambios que se realizan en este estudio son únicamente para esta máquina, ya que, como se mencionó anteriormente, una buena fabricación de tubería con altos rendimientos se debe tener un

buen balance de los factores de la formulación del compuesto, del diseño del molde y del diseño del tornillo.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	I
ÍNDICE GENERAL.....	V
ABREVIATURAS.....	VIII
SIMBOLOGÍA.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. FUNDAMENTOS DE EXTRUSIÓN Y LA GESTIÓN AMBIENTAL.....	2
1.1. Obtención del PVC.....	2
1.2. Materiales viscoelásticos.....	9
1.2.1. Viscoelasticidad.....	10
1.2.2. Modelo de Maxwell.....	11
1.3. Materiales / Insumos para la producción.....	17
1.4. Maquinaria que se utiliza.....	23
1.4.1. Extrusora.....	23
1.4.2. Moldes.....	29
1.4.3. Tina de enfriamiento.....	31

1.4.4. Jaladora.....	32
1.4.5. Sierra.....	32
1.4.6. Acampanadora.....	33
1.5. Gestión de Recursos.....	33
1.5.1. Sistemas de Gestión Ambiental.....	35
1.5.2. Entradas y salidas del proceso.....	37
1.5.3. Aspectos ambientales del proceso.....	38
1.5.4. Indicadores de Ecoeficiencia.....	39

## CAPÍTULO 2

2. LIMITANTES EN LA FABRICACIÓN ADECUADA DE LA TUBERÍA.....	42
2.1. Limitantes comunes del rendimiento de la máquina.....	43
2.1.1. Compuesto.....	43
2.1.2. Moldes.....	45
2.1.3. Tina de enfriamiento – Calibradores.....	48
2.2. Aspectos ambientales del proceso.....	49
2.2.1. Metodología de identificación.....	49
2.2.2. Aspectos que se deben considerar.....	52
2.2.3. Priorización de los aspectos.....	54
2.3. Identificación y evaluación de los aspectos ambientales.....	59
2.3.1. Matriz de identificación y evaluación.....	59
2.3.2. Resultados obtenidos.....	61

## CAPÍTULO 3

3. SOLUCIONES PROPUESTAS.....	64
3.1. Cambios en formulación del compuesto.....	64
3.2. Modificaciones al diseño inicial del molde.....	67
3.3. Modificación de los calibradores.....	73
3.4. Cambios en el proceso.....	74

## CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE LAS SOLUCIONES PROPUESTAS Y RESULTADOS.....	77
4.1. Análisis de las soluciones.....	77
4.2. Comparación de los resultados obtenidos.....	79
4.2.1. Análisis de valores.....	79
4.2.2. Comparación de costos.....	80

## CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	82
5.1. Conclusiones específicas.....	82
5.2. Recomendaciones.....	84

## BIBLIOGRAFÍA

## ABREVIATURAS

Cl	Cloro
H	Hidrógeno
k/h	kilogramo por hora
kw-h	kilovatio por hora
mm	Milímetro
MPa	Mega pascales
PE	Polietileno
PP	Polipropileno
PVC	Cloruro de polivinilo
seg.	Segundos

## SIMBOLOGÍA

$\sigma$	Esfuerzo [MPa]
$E$	Módulo de elasticidad [MPa]
$\delta$	Deformación
$\eta$	Viscosidad [MPa · seg]
$t$	Tiempo [seg]
$\tau$	Tiempo de relajación [seg]
$EL$	Espesor del extruido [mm]
$H$	Espacio interno del molde [mm]

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Representación de un polímero.....	3
Figura 1.2	Representación de una molécula del monómero cloruro de vinilo.....	5
Figura 1.3	Representación de la inserción de un iniciador.....	6
Figura 1.4	Representación de una cadena molecular.....	7
Figura 1.5	Representación de un polímero.....	8
Figura 1.6	Comparación entre materiales elásticos y viscoelásticos.....	9
Figura 1.7	Modelo de la ley de Hooke.....	11
Figura 1.8	Modelo de la Ley de Newton.....	12
Figura 1.9	Modelo de Maxwell.....	13
Figura 1.10	Máquina extrusora.....	23
Figura 1.11	Diagrama de una extrusora.....	24
Figura 1.12	Zonas del tornillo.....	26
Figura 1.13	Túnel y doble tornillo.....	27
Figura 1.14	Diseño de tornillos.....	28
Figura 1.15	Molde con patas de araña.....	30
Figura 1.16	Molde espiral.....	30
Figura 1.17	Tina de enfriamiento y calibrador.....	32
Figura 1.18	Acampanadora.....	33
Figura 1.19	Diagrama de un flujo de proceso.....	38
Figura 2.1	Diagrama de flujo del proceso de extrusión.....	51
Figura 2.2	Esquema de una matriz de impactos ambientales.....	55
Figura 3.1	Esquema de la sección interna de un molde.....	68
Figura 3.2	Enfriamiento del tornillo.....	75
Figura 3.3	Calentamiento del tornillo.....	76
Figura 4.1	Análisis de causas y acciones.....	78

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Formulación típica del compuesto.....	22
Tabla 2	Identificación de aspectos ambientales del proceso.....	53
Tabla 3	Matriz de identificación y evaluación de aspectos ambientales.....	60
Tabla 4	Optima formulación para la fabricación del producto.....	66
Tabla 5	Comparación de rendimientos .....	80
Tabla 6	Comparación de consumo energético.....	81

# INTRODUCCIÓN

En la actualidad el mercado exige que se cumplan tiempos de fabricación, tiempos de entrega, y alta calidad en sus adquisiciones, es por esto que las empresas deben enfocar su esfuerzo en suplir estas necesidades que tienen los clientes. El objetivo principal es obtener la mayor productibilidad posible de sus máquinas, disminuyendo la generación de desechos y la separación del mismo por fallas de calidad.

Hemos tomado el caso de una extrusora de doble tornillo en la cual se mantienen bajos rendimientos de producción. Inicialmente se debe revisar las razones por las que la máquina tiene limitado su rendimiento, las cuales pueden ser por: la elaboración del compuesto, el diseño del cabezal, los calibradores y las condiciones de los tornillos. En este trabajo no se han considerado la baja productibilidad por errores de operación, fallas eléctricas, fallas mecánicas y cortes de energía. Para este estudio se realizaron pruebas continuas en la máquina y se definieron las prioridades de solución.

En primer lugar se identificaron cuales son las limitantes del proceso para obtener altos rendimientos considerando los impactos ambientales relacionados a este. Luego se procederá a dar posibles soluciones a los problemas identificados y se estudiarán los beneficios de la aplicación de las mismas tanto del punto de vista ambiental como de una mayor rentabilidad.

# **CAPÍTULO 1**

## **1. FUNDAMENTOS DE EXTRUSIÓN Y LA GESTIÓN AMBIENTAL**

El uso de los plásticos en la actualidad, debido a que sus propiedades en una cierta etapa, pueden ser moldeados o formados a una forma útil. Para la fabricación de tubería se realiza el proceso de extrusión por medio de moldes para su elaboración. El rendimiento de un producto va a depender de la materia prima y condiciones de procesamiento del producto a moldear. A continuación describiremos la obtención del compuesto de PVC y los elementos que se requieren para la elaboración de la tubería de PVC.

### **1.1. Obtención del PVC**

Un polímero es una cadena de moléculas hecha de la unión de moléculas más pequeñas que se encuentran unidas por enlaces

covalentes. La palabra *polímero* significa muchas partes por lo que sus cadenas son generalmente largas.

Las características de las moléculas dependen del arreglo que tengan sus átomos. Los polímeros son hechos a partir de moléculas pequeñas que se encuentran en estado gaseoso. Al momento de tener una unión de moléculas, el conjunto se convierte luego en líquido y finalmente en sólido. Por lo tanto, las cadenas cortas de moléculas tienden a ser líquidas y las cadenas largas a ser líquidos viscosos o sólidos. Cuando un polímero tiene cadenas largas, usualmente de miles de unidades, este se convierte en un material plástico.

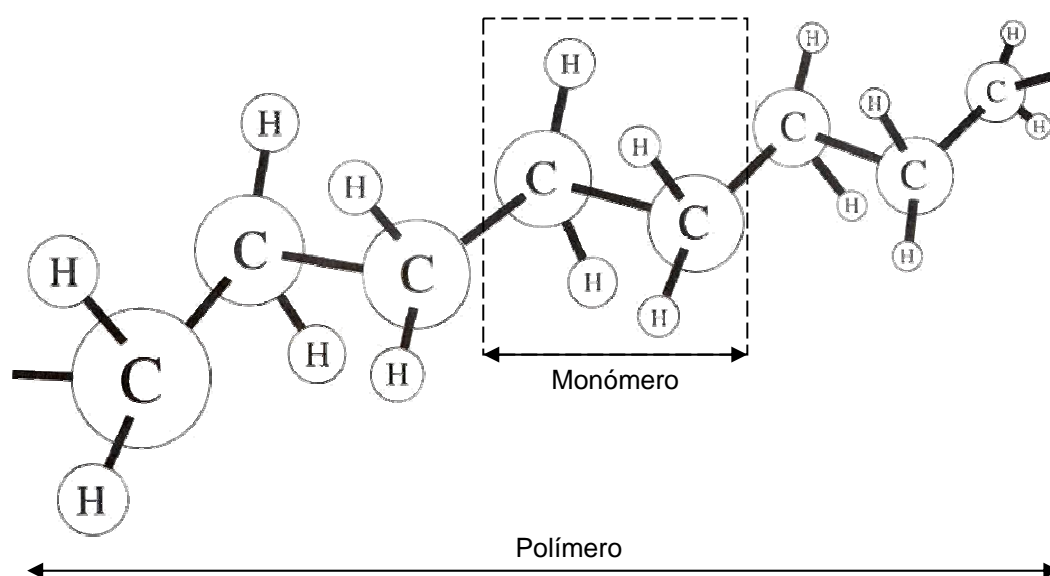


FIGURA 1.1. REPRESENTACIÓN DE UN POLÍMERO

Una definición de la resina es “un polímero al que no se le ha dado una forma útil aún”. Este término más bien utilizado en la industria para denominar físicamente a los polímeros. Cuando el polímero es fabricado, es generalmente viscoso o, si es sólido, en forma de gránulos o polvos.

La resina de PVC (materia prima) es fabricada a partir de la polimerización del monómero del cloruro de vinilo con un peróxido orgánico. Esto es requerido para poder formar las largas cadenas de moléculas (originalmente monómeros) de los que están formados los plásticos. Los polímeros son formados a partir de la unión de monómeros en grandes cadenas moleculares. Principalmente se utilizan dos métodos de polimerizaciones: por adición y por condensación.

La polimerización por adición, o también llamado mecanismo de reacción en cadena, consiste en lo siguiente:

- Para este caso, se debe mantener un recipiente de reacción y se introduce el monómero (un doble enlace de carbono que se encuentra en estado gaseoso) en altas concentraciones, por lo

que para aumentar, se debe incrementar la presión dentro del recipiente (ya que es un gas).

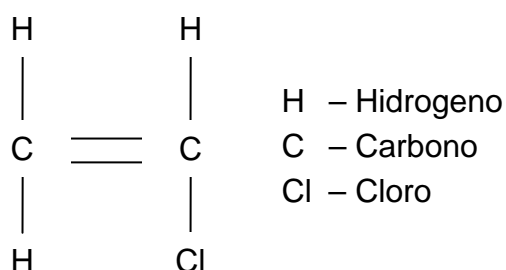


FIGURA 1.2. REPRESENTACIÓN DE UNA MOLÉCULA DEL MONÓMERO DE CLORURO DE VINILO

- Se debe inyectar un “iniciador”, es decir, un elemento o compuesto que inicie una reacción de polimerización, dentro del recipiente de reacción. Al iniciar la reacción, este crea radicales libres (moléculas con electrones libres). Los iniciadores más comunes para su uso son las moléculas de los peróxidos (dos átomos de oxígeno unidos por un enlace y dos “Grupos orgánicos” unidos a cada átomo de oxígeno) debido a que al calentarlas se forman radicales libres ya que primeramente se liberan los átomos de oxígeno. Al formarse los radicales libres (electrones impares) lo primero que buscan son electrones libres para formar uniones covalentes, que en este caso son los del

monómero inyectado inicialmente (el enlace PI del doble enlace de los carbonos del monómero).

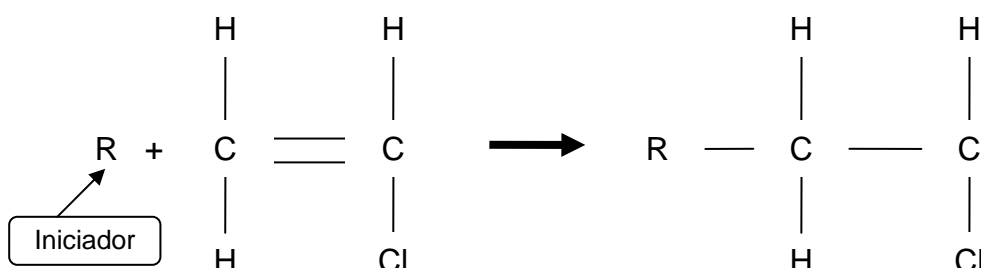


FIGURA 1.3. REPRESENTACIÓN DE LA INSERCIÓN DE UN INICIADOR

- El radical libre del peróxido extrae uno de los electrones del enlace PI, por lo que lo destruye. Ahora el otro electrón del enlace PI existente libre no está parejo, por lo que lo convierte en una radical libre. Este nuevo radical, ahora inestable, se mueve hacia otro carbono que así mismo tenía un enlace PI y tratará de formar un nuevo enlace. Como se mencionó antes, una fuente de electrones libres en este caso sería el de otra molécula del monómero en su enlace PI. Este nuevo radical extrae el electrón del enlace PI por lo que lo destruye y se une con el átomo del monómero creando una cadena. De esta misma manera, se genera otro radical libre para luego unirse con otro monómero al destruir el enlace PI. Esta reacción en cadena es la que genera las largas cadenas, o también llamado polímero.

- Este proceso de creación del polímero ataca al enlace PI, destruyéndolo para poder unir los monómeros, y esta destrucción continua hasta cuando el monómero pueda reaccionar. Esta reacción es bastante larga por lo que la presencia del elemento orgánico del peróxido se vuelve insignificante.

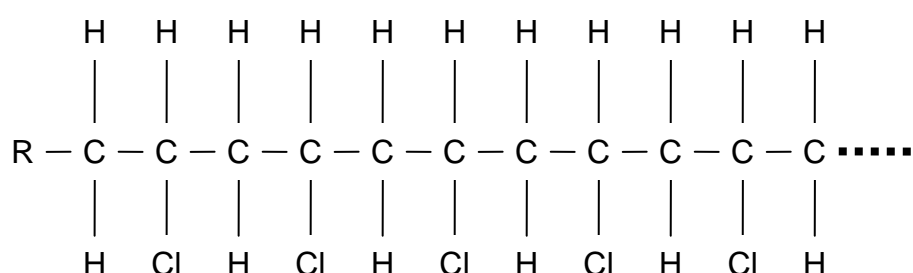


FIGURA 1.4. REPRESENTACIÓN DE UNA CADENA MOLECULAR

- Eventualmente la reacción debe terminar. Algunas reacciones se pueden generar el cual da fin a la polimerización. Una de las más simples es que el radical libre del carbono se encuentra con otro radical libre (sea de peróxido o de otro carbono), por lo que se unen formando una unión covalente (al encontrarse los dos electrones). Otro caso es en el que este radical libre se encuentre con una molécula rica en electrones (que pudo haber por el recipiente contaminado o inducida) y terminar la reacción. De esta manera termina el proceso de polimerización.

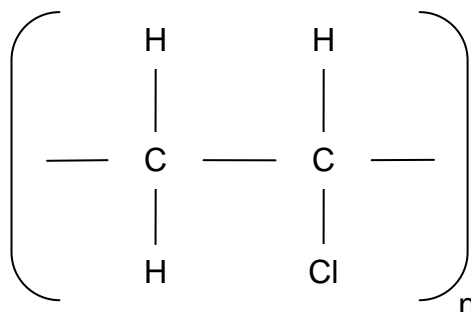


FIGURA 1.5. REPRESENTACIÓN DE UN POLÍMERO

Esta es la forma en que se obtiene la resina del PVC. Sin embargo, no es posible procesar el PVC solo, por lo que este requiere de varios ingredientes para procesarlo como un termoplástico. Por tales motivos se requiere de aditivos que permitan su procesamiento y soporte degradación por las temperaturas de procesamiento. Adicionalmente, para ciertos requerimientos de la industria, se requiere que la tubería tenga una alta resistencia a las presiones y a la deformación. Por este motivo el PVC se lo mezcla con aditivos que brindan características extras al material, como es una mejor resistencia al calor (para prevenir que se degrade), una mayor fluidez (mejores rendimientos) y la obtención de un producto resistente para el caso de presiones.

## 1.2. Materiales viscoelásticos

Un material viscoelástico presenta tanto propiedades viscosas como elásticas. Los polímeros son materiales que presentan viscoelasticidad, es por ello que a los polímeros termoplásticos se los denomina simplemente como plásticos.

La elongación en estos materiales no solo depende del esfuerzo aplicado, sino que también de su tiempo de aplicación. Mientras se aplica un esfuerzo constante, la elongación (deformación) se incrementa lentamente, alcanzando un valor máximo en forma exponencial. La base de la explicación de este fenómeno obedece a fricciones internas en el material.

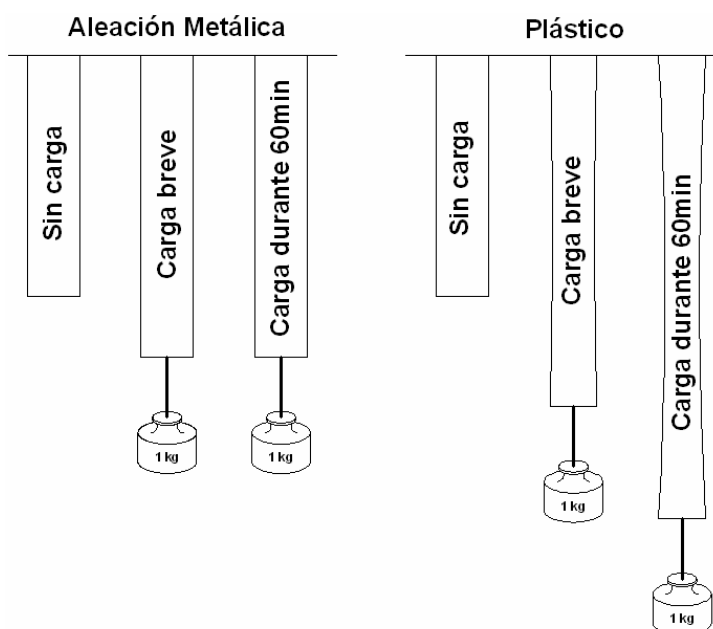


FIGURA 1.6. COMPARACIÓN ENTRE MATERIALES ELÁSTICOS Y VICOELÁSTICOS

### 1.2.1. Viscoelasticidad

Si un peso es suspendido de un filamento polimérico, su deformación no será constante pero se incrementará lentamente conforme pasa el tiempo. El efecto se produce por un cambio en el arreglo inicial de las moléculas en el sólido ocasionado por el esfuerzo aplicado. Al retirar la fuerza que genera el esfuerzo, las moléculas lentamente regresarán a su arreglo molecular inicial y su deformación simultáneamente regresará a cero. Este efecto es denominado creep y es una manifestación de una propiedad general de los sólidos poliméricos conocida como la viscoelasticidad. En otras palabras, el material es elástico por lo que recupera su forma y al mismo tiempo viscoso por que obedece el efecto de deformación creep.

Los polímeros son viscoelásticos a todas las temperaturas. Ellos nunca son sólidos elásticos así es que, considerando que se hay deformaciones durante su uso, es necesario considerar las esfuerzos y su tiempo de aplicación. Las propiedades viscoelásticas se manifiestan a altas temperaturas por lo que siempre se debe conocer su temperatura máxima de trabajo.

Para poder establecer cálculos para la deformación de los sólidos viscoelásticos y poder predecir su comportamiento, se mantiene la teoría de Maxwell de viscoelasticidad lineal. El propósito específico es predecir el comportamiento del polímero bajo ciertas circunstancias mediante la observación de ciertas pruebas.

### 1.2.2. Modelo de Maxwell

La respuesta mecánica de los cuerpos viscoelásticos, como los polímeros, están representada solamente por el resorte o el amortiguador. J. C. Maxwell sugirió una mejor aproximación que resultaría de una serie de combinaciones del resorte y el amortiguador. Este modelo está representado por un modelo de resorte y un modelo de amortiguador (cilindro/pistón). Por este motivo, en parte obedece a la ley de Hooke para sólidos elásticos y a la ley de Newton para fluidos lineales:



FIGURA 1.7. MODELO DE LA LEY DE HOOKE

Ley de Hooke:  $\sigma = E\delta$

en donde,  $\sigma$  es el esfuerzo,  $E$  el módulo de elasticidad del resorte, y  $\delta$  la deformación del resorte.

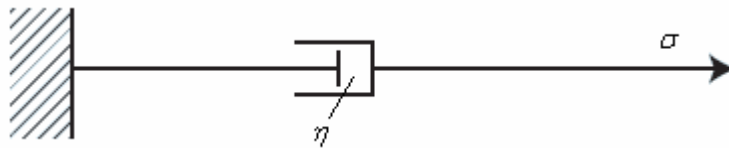


FIGURA 1.8. MODELO DE LA LEY DE NEWTON

$$\text{Ley de Newton: } \sigma = \eta \frac{d\delta}{dt}$$

en donde,  $\sigma$  es el esfuerzo,  $\eta$  la viscosidad del fluido,  $\delta$  la distancia que recorre el pistón en el cilindro y  $t$  el tiempo de la aplicación de la deformación.

No importa que tan rápido  $\sigma$  varíe con el tiempo, la deformación en el resorte siempre está dada por cualquiera de las 2 ecuaciones anteriores.

En el modelo Maxwell,  $E$  (el módulo de elasticidad) se define su comportamiento elástico, mientras que  $\eta$  (la viscosidad del líquido en el cilindro) define su comportamiento viscoso.

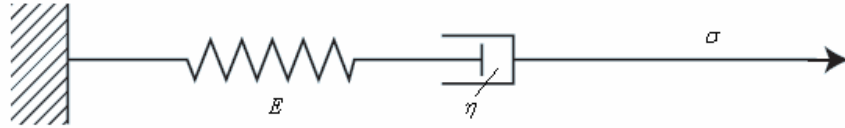


FIGURA 1.9. MODELO DE MAXWELL

Se puede estipular una relación entre el módulo de elasticidad  $E$  y el coeficiente de viscosidad  $\eta$ , la cual resulta:

$$\eta = \tau \cdot E$$

en donde  $\tau$  es la constante proporcional entre  $E$  y  $\eta$ , y es conocida como el tiempo de relajación. La ecuación de movimiento de modelo Maxwell se obtiene de la siguiente manera:

- Se realiza la derivación con respecto al tiempo de la ley de Hooke:

$$\frac{d\sigma}{dt} = E \cdot \frac{d\delta}{dt}$$

- Se despeja  $d\delta/dt$  en ambos modelos y se obtiene:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} \quad \text{y} \quad \frac{d\delta}{dt} = \frac{\sigma}{\eta}$$

Debido a que, de acuerdo al modelo de Maxwell, los modelos de Hooke y Newton se encuentran en serie, por lo tanto se requiere conocer su deformación total, entonces:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} + \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt}$$

Con esta ecuación, procederemos a establecer ecuaciones diferenciales con la finalidad de obtener la relación del hinchamiento del producto (debido a su deformación) con respecto a su la cantidad de esfuerzos internos en función del tiempo de relajación.

Se conoce que la viscosidad es directamente proporcional a la elasticidad del producto plastificado, y que este factor de proporcionalidad es el tiempo de relación  $\tau$ . Por lo tanto, la ecuación anterior se convierte en:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\tau \cdot E}, \quad E \cdot \frac{d\delta}{dt} = \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\tau}, \quad \frac{d\sigma}{dt} = E \cdot \frac{d\delta}{dt} - \frac{\sigma}{\tau}$$

$$d\sigma = E \cdot d\delta + \frac{\sigma}{\tau} dt$$

$$\sigma = E \cdot \delta + \frac{\sigma}{\tau} dt$$

Mediante la aplicación de una tensión constante a un material viscolástico, se estudia el estrés necesario para mantener una deformación constante. Por esto, de acuerdo al modelo establecido, la deformación instantánea será ilustrada por el elemento del resorte y el pistón se “relajará” gradualmente la tensión, de tal manera que este disminuya en función del tiempo.

Por esto, luego de retirar el esfuerzo que genera la deformación,  $d\delta/dt$  es cero, por lo que, de la ecuación anterior se obtiene:

$$0 = \frac{\sigma}{\eta} + \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt}$$

Debido a que  $\eta/E$  es igual a  $\tau$ , se reorganiza la ecuación de la siguiente manera:

$$-\frac{E \cdot dt}{\eta} = \frac{d\sigma}{\sigma}$$

$$-\frac{dt}{\tau} = \frac{d\sigma}{\sigma}$$

Entonces se realiza la integración de la misma de  $\sigma$  desde un tiempo igual a 0 (cero) hasta un tiempo  $t$ , se obtiene:

$$\ln \sigma(t) - \ln \sigma_0 = -\frac{t}{\tau}$$

$$\ln \sigma(t) = \ln \sigma_0 - \frac{t}{\tau}$$

Si se realiza una exponenciación, entonces:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

Es necesario conocer que el tiempo de relajación se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{-\sigma}$$

### **1.3. Materiales / Insumos para la producción**

Existen una gran variedad de materiales termoplásticos que pueden ser formados en tubería, como por ejemplo el Polietileno (PE), Polipropileno (PP) y el Polivinilcloruro (PVC). Para este estudio, se utilizara el PVC con sus respectivos aditivos para el análisis de la fabricación de la tubería. Se considera que para este estudio el PVC se obtuvo por el método de polimerización.

#### **El PVC**

El monómero de cloruro de vinilo consiste en una unión doble de dos átomos de carbono, con tres átomos de hidrógeno y un átomo de cloro. Este monómero se polimeriza por el Método de Polimerización en Adición mencionado previamente. El monómero de cloruro de vinilo es considerado cancerígeno, sin embargo luego de ser polimerizado, no presenta este riesgo. El producto polimerizado (ya que el monómero es un gas) es blanco en estado sólido en forma de polvo o gránulos.

En comparación con las poliolefinas (PE y PP), la presencia del átomo de cloro en el PVC causa cambios significativos en sus propiedades. El cloro previene un empaquetamiento cercano es por

esto que lo vuelve resistente e impermeable a exposición a los solventes.

Una característica del PVC es que es retardante a la llama, esto quiere decir que no se incendia. En el momento que el PVC está expuesto al fuego, al llegar a su temperatura de degradación comienza a liberar gases de HCl (ácido clorhídrico). Al ser este más denso que el aire, desplaza al oxígeno sofocando el fuego. Este tipo de materiales se denominan auto extingüibles.

Otra propiedad del PVC es su descomposición térmica. La tendencia de descomposición es mediante la liberación de HCl, el cual produce que se creen enlaces cruzados. Se puede evidenciar fácilmente cuando hay descomposición del PVC ya que toma un color amarillento y cuando hay mucha descomposición, a un color café oscuro. Esta descomposición también genera átomos libres de H y Cl por lo que aumenta la velocidad de descomposición. Se debe cuidar la cantidad de calor que se utiliza para el procesamiento del PVC y prevenir daños en la producción.

Al considerar el PVC fundido (viscoso), el cual se requiere para dar forma al producto final, se requiere altas temperaturas. Es por esto

que se utilizan aditivos, entre estos, estabilizantes debido a que por si solo, no se puede calentar más al PVC para hacerlo menos viscoso y por ende, tener más facilidad para su procesamiento.

El uso del PVC es usado en muchas aplicaciones en donde el costo es un punto importante, sin embargo la obtención de la materia prima es muy elevada. Para disminuir los mismos se utilizan rellenos. El que trataremos en este caso, y el más común en la industria, es el Carbonato de Calcio. Estos rellenos pueden dar algunos beneficios. Entre estos puede ser una mayor estabilidad térmica y rigidez.

Se debe tener un cuidado especial para evitar corrosión del equipo que se utiliza para la fabricación, en este caso el túnel o barril, tornillos y moldes debido a que el PVC libera HCl, el cual es muy corrosivo.

### **EI RELLENO**

El material de relleno más comúnmente utilizado en la industria plástica es el carbonato de calcio debido a su bajo costo y alta resistencia mecánica que brinda al producto final. Este producto es un natural cretáceo, que se origina de la fosilización de conchas; posee un alto grado de pureza y es poco abrasivo. Al mezclarse con

el polímero, aumenta su rigidez y resistencia mecánica, además de proporcionar un mejor terminado superficial.

## **LOS ADITIVOS**

Con frecuencia se utilizan aditivos químicos para conseguir una propiedad determinada. Por ejemplo, los antioxidantes protegen el polímero de degradaciones químicas causadas por el oxígeno o el ozono. De una forma parecida, los estabilizadores ultravioleta lo protegen de la acción de los rayos UV. Los plastificantes producen un polímero más flexible, los lubricantes reducen la fricción y los pigmentos colorean los plásticos. Algunas sustancias ignífugas y antiestáticas se utilizan también como aditivos.

Muchos plásticos se fabrican en forma de material compuesto, lo que implica la adición de algún material de refuerzo (normalmente fibras de vidrio o de carbono) a la matriz de la resina plástica. Los materiales compuestos tienen la resistencia y la estabilidad de los metales, pero por lo general son más ligeros.

Como se mencionó antes, para poder tener un buen proceso de fabricación de tubería, se requiere que la mezcla tenga una buena resistencia al calor, una buena fluidez y un producto final resistente.

De esta manera se disminuyen los desechos, se aumenta la productividad y se obtiene un buen producto final.

Los aditivos más comunes que se utilizan para la elaboración del compuesto de PVC son para mejorar la fusión de la mezcla con los diferentes elementos, mejorar la resistencia al impacto del producto final, estabilizadores de calor para prevenir la degradación del PVC, lubricantes para prevenir que el material se pegue a las paredes del molde o del túnel y conseguir una mejor fluidez, y pigmentos para darle color a la tubería y resistencia de los rayos UV. A continuación se coloca una tabla con una formulación típica del compuesto:

Tabla 1

## FORMULACIÓN TÍPICA DEL COMPUESTO

Ingredientes	Concentración (phr)	Función	Observaciones
Resina de PVC	100	Materia prima	Su viscosidad relativa debe de ser de 2.25
Ayuda de proceso	0.75 a 1.50	Promueve la fusión permitiendo que el compuesto se derrita a una menor temperatura	Mejora la mezcla
Modificador de impacto	4.50 a 7.00	Brinda mayor resistencia la impacto del producto final	Absorbente de impacto
Estabilizante de estaño	0.75 a 1.50	Estabilizante de calor	Retarda la descomposición térmica
Esterato de Calcio	0.80 a 1.20	Lubricante	No permite que el material se pegue al metal caliente
Ceras	0.60 a 1.20	Lubricante	Permite un mejor flujo de la mezcla por el molde por lo que se disminuye el requerimiento de fuerza de la máquina
Cera polietilénica parcialmente oxidada	0.00 a 0.45	Lubricante	Aumenta el brillo y fricción interna.
Dióxido de Titanio	9.00 a 11.00	Estabilizante UV	Brinda protección UV y color blanco al producto final
Carbonato de calcio	3.00 a 5.00	Relleno	Disminuye el costo de la tubería, aumenta su estabilidad dimensional y rigidez.

## 1.4. Maquinaria que se utiliza

El proceso de extrusión principalmente es empujar material por una cavidad, la cual da la forma del producto final. Para lograr esto, se debe calentar el material para volverlo maleable. Una vez que se obtiene la forma deseada, se procede a enfriar rápidamente el material, con la finalidad que se solidifique. A continuación se describirán los diferentes equipos que se requieren para la producción.

### 1.4.1. Extrusora

La operación normal de una extrusora es la de permitir el paso de material a través de un orificio o molde. En general, su propósito es el de derretir el plástico en forma de polvo y y obligarla a pasar a través de un molde (para darle forma).

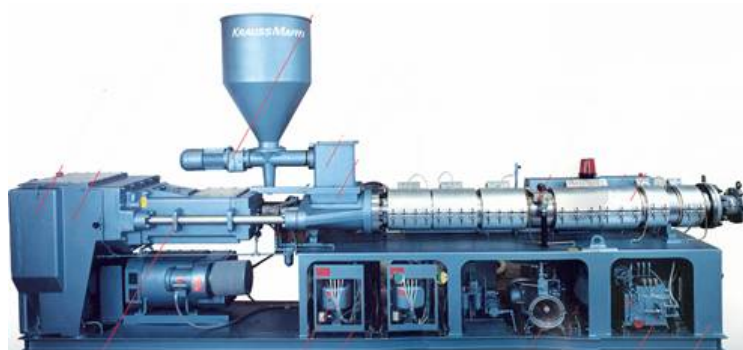


FIGURA 1.10. MÁQUINA EXTRUSORA

A continuación se muestra de lo que se encuentra conformada una extrusora:

Como se muestra en la figura, la extrusora está conformada de: la tolva, el túnel, el tornillo (simple o doble) y las zonas de calentamiento.

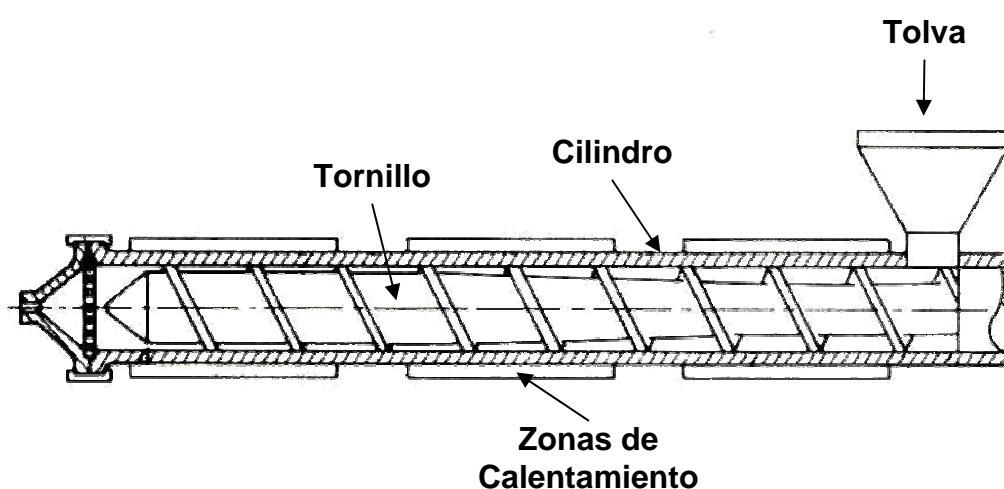


FIGURA 1.11. DIAGRAMA DE UNA EXTRUSORA

### La tolva

Esta parte de la máquina es la que entrega el compuesto elaborado a la máquina. De estas se conocen simples o con aditamentos especiales, como son agitadores, para cuando el material se queda pegado a las paredes y se tapa o se apila el material en la entrada; filtros, para prevenir que impurezas entren a la máquina; imanes, para prevenir que limallas u

objetos metálicos entren dentro del túnel (causaría un gran daño al túnel y tornillo); entre otros.

### **El tornillo**

En una extrusora, es su parte más fundamental, por lo que tiene el propósito de transportar, fundir, homogenizar el material para luego darle forma en el molde. El tornillo se encuentra dividido en tres zonas principales: la zona de alimentación – es en la cual recibe el material e inicia su transporte; la zona de compresión – que como su nombre lo indica, es en donde se comprime el material (el valle del tronillo es cada vez menor) y es calentado (por la fricción interna y calentadores externos); y la zona de plastificado – es en donde el material es homogenizado (tener una buena mezcla) y se lo lleva a una temperatura deseada (sin degradarlo ni afectando sus características ) para que fluya fácilmente por el molde y se pueda obtener la forma deseada.

Un factor importante general para todos lo tipos de tornillos es su relación  $L/D$  – factor obtenido en base a la longitud (L) del tornillo y el diámetro externo del hilo del tornillo. Esto determina su capacidad de plastificado.

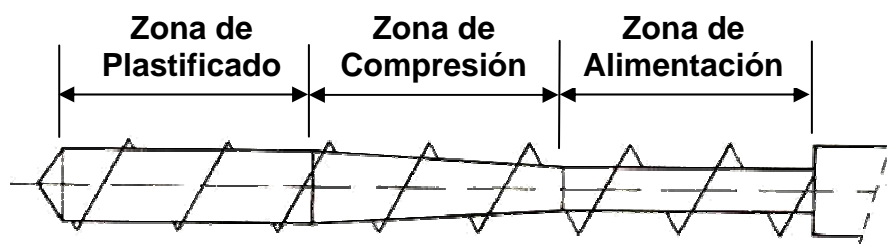


FIGURA 1.12. ZONAS DEL TORNILLO

### El túnel

Para el caso de una extrusora de un solo tornillo, se mantienen los túneles convencional y de alto rendimiento. El túnel convencional tiene la característica de ser liso y se emplea de tal manera que el material es transportado al haber fricción con este y entre su mismo material; y la presión que se genera por causa del paso del material por las cavidades del molde es liberada en la zona de entrega del plastificado. Por otro lado, el tornillo de alto rendimiento está dotado de ranuras longitudinales, las cuales aumentan su velocidad de transporte pero tienen como deficiencia una baja homogenización de la mezcla, y por este motivo se recomienda adicionar zonas de mezcla en el lugar de la dosificación del material para mejorarla.

Por otro lado, tenemos las extrusoras de doble tornillo y tienen dos tipos de túneles: los de giro paralelo y giro contrario. Los de giro paralelo se utilizan principalmente para el procesamiento de poliolefinas y no es el caso; el de giro contrario es para el procesamiento del PVC y da como ventaja una mejor mezcla y por ende se pueden añadir aditivos en la etapa de alimentación para mejorar el proceso. Mediante el uso de este tipo de elementos, el material se funde principalmente por efectos de la fricción y la contrapresión se genera al final del tornillo, en donde los gases son liberados.



FIGURA 1.13 – TÚNEL Y DOBLE TORNILLO

### **Zonas de calentamiento**

Como es nuestro caso, los tornillos dobles permiten que el material tenga la fricción suficiente para permitir que se funda pero de igual manera requieren de un calentamiento externo

para prevenir que, luego de fundido, se adhiera a las paredes frías del túnel por la gran diferencia de temperaturas.

Con lo que hemos visto, el proceso de funcionamiento de la Extrusora se resume en los siguientes pasos:

1. Recepción y transporte del material
2. El material es comprimido y desgasificado (para mantenerlo líquido)
3. Finalmente se procede a homogenizar el material

Cabe indicar que el proceso de fundición (plastificado) del compuesto no siempre es suficiente por lo que se deben colocar “zonas de mezcla” en los tornillos para homogenizarla. A continuación se muestran diferentes tipos de diseños.

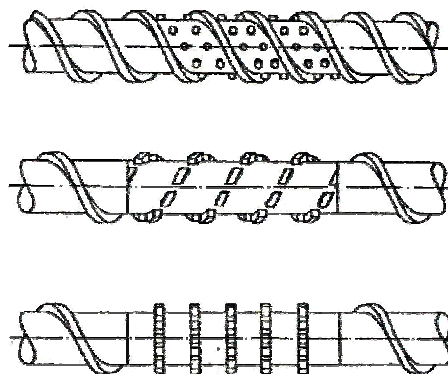


FIGURA 1.14. DISEÑO DE TORNILLOS

### 1.4.2. Moldes

Una vez de mantener el material plastificado de la extrusora, este es enviado al molde, el cual su función principal es la de darle una forma definida. La definición general de un molde (para la fabricación de tubería) es una transición de un agujero circular a una apertura en forma de anillo. Para poder producir productos huecos, el mandril o torpedo debe mantenerse en su sitio. Para una tubería de una sola capa, regularmente se utiliza un molde con patas de araña o un molde helicoidal.

La ventaja de un molde con patas de araña es que hay una alimentación simétrica de la mezcla al molde y también mantiene al molde centrado a la extrusora. Sin embargo, las patas de araña parten al PVC en un cierto número de piezas, pero esto se soluciona mediante una compresión dentro del molde el cual une nuevamente el material. Si esta unión no es hecha correctamente la calidad de la tubería es negativamente influenciada, por ejemplo que el espesor de la tubería en la unión es más bajo que en el resto o que falle en ese punto en la prueba de impacto.

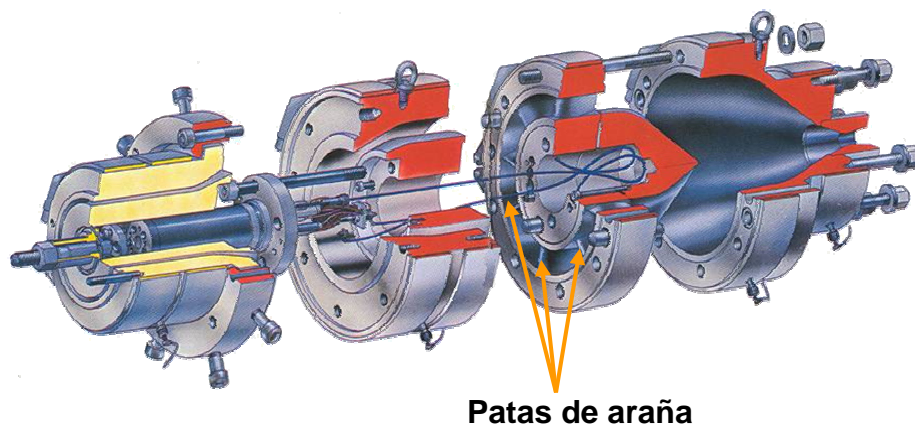


FIGURA 1.15. MOLDE CON PATAS DE ARAÑA

Por otro lado, tenemos los moldes helicoidales, y su acción principal es la de redireccionar el flujo a través de un tornillo para que rodee las paredes internas. Por este motivo, no se requiere de sujeción del mandril ya que el flujo es redistribuido. Este sistema es denominado repartidor helicoidal.

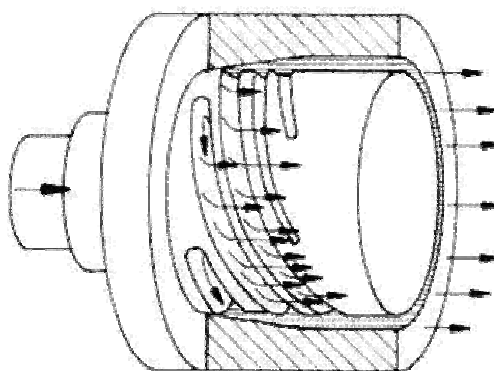


FIGURA 1.16. MOLDE ESPIRAL

La diferencia principal de los dos tipos de moldes es el trato del material antes de entregar su forma final. Si se requieren altos rendimientos, se sugiere utilizar un molde de patas de araña, por lo que el helicoidal tiene muchas restricciones por lo que el material debe cambiar de dirección continuamente y la contrapresión se puede incrementar enormemente. Mediante un buen diseño del molde patas de araña se puede superar el problema de la unión del plastificado.

#### **1.4.3. Tina de enfriamiento**

El propósito de la tina de enfriamiento es el de dar un correcto diámetro externo a la tubería (por medio del calibrador) y solidificarla. El material plastificado es empujado (sistema de presión interna) o succionado (sistema de vacío) hacia las paredes del calibrados. En esta etapa, el material es enfriado rápidamente por boquillas que entregan agua helada (aproximadamente entre 8 °C a 16 °C). A continuación, el plastificado continúa su trayecto en donde la tina entrega agua helada al material hasta salir de ella. Su longitud debe estar acorde con el rendimiento de la extrusora, ya que el plastificado requiere de un cierto tiempo de permanencia para poder solidificarse.

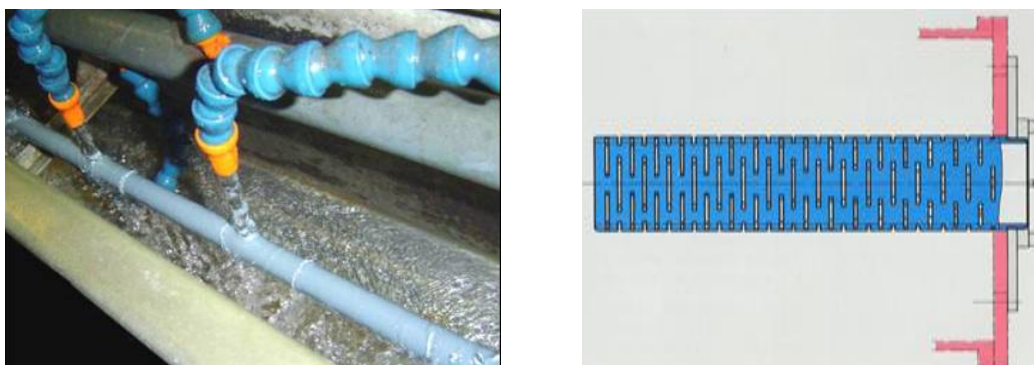


FIGURA 1.17. TINA DE ENFRIAMIENTO Y CALIBRADOR

#### 1.4.4. Jaladora

Para que el material sea transportado o la tubería sea halada a desde el molde por la tina de enfriamiento, no es suficiente el empuje que entrega la extrusora ya que el material simplemente caería al salir de ella. Para esto se tiene la jaladora que siempre debe de estar en sincronía con la extrusora.

#### 1.4.5. Sierra

El proceso de extrusión es continuo, por lo que al procesar el material sería “infinito” por lo que se lo debe cortar en tramos para obtener el producto final, que en este caso sería la tubería. Este equipo cuenta con un equipo de medición para saber en que momento corta la tubería y debe estar en sincronismo con la jaladora.

#### 1.4.6. Acampanadora

Esta es la última etapa del proceso. Es esta máquina se realizan las denominadas “campanas” en el extremo del tubo. Esto es con la finalidad de que se conecte el extremo de una tubería con el extremo de otra tubería.

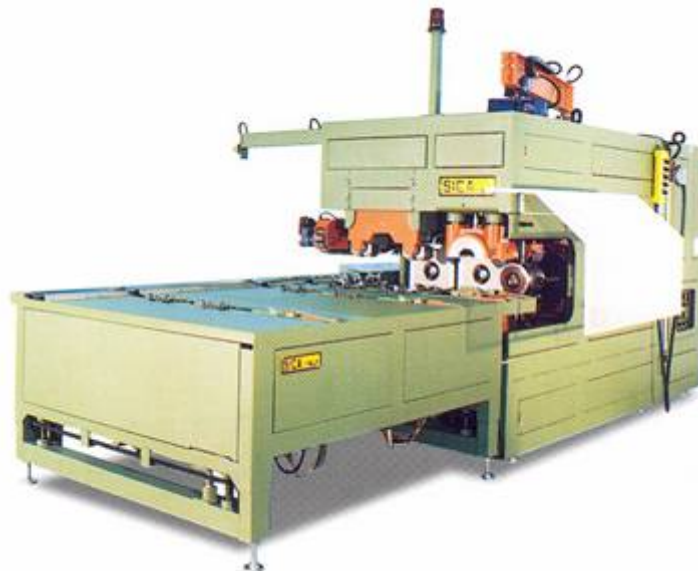


FIGURA 1.18. ACAMPANADORA

#### 1.5. Gestión de Recursos

En la actualidad las empresas, para su desarrollo y manejo, deben velar principalmente por tres resultados que van direccionados hacia: la satisfacción del cliente, el cuidado del medio ambiente y la seguridad y salud de sus colaboradores. Estos parámetros ya rigen

en países del primer mundo (Europa principalmente) y que debido a los factores de globalización que se viven, nos demandan a aplicar estos principios para ser competitivos.

En el Ecuador, ya se están realizando gestiones para realizar este cambio. A partir de Abril del 2003 entró en vigencia una actualización de la legislación ambiental aplicable, pero solo las grandes empresas (principalmente las transnacionales) han iniciado gestiones para su cumplimiento realizando inversiones en pro de la prevención de impactos ambientales. Lamentablemente, la pequeña industria no tiene los recursos ni el apoyo suficiente, o no ha sido informada sobre la importancia ambiental ni su participación en este cambio. Por ende, no se mantiene un control directo sobre las empresas para ejercer su cumplimiento.

Para poder realizar una gestión integral ambiental se debe comenzar con la identificación de aspectos de todas las actividades de los procesos y de esta manera conocer la interacción que esta tiene con el ambiente. Este es un paso importante y, el cual considero, obligatorio para la aplicación de controles de prevención de la contaminación. Es muy importante realizar gestión (establecer controles) a los impactos ambientales que se generan debido a que,

manteniendo la legislación al margen, pueden haber reclamos por parte de las comunidades vecinas, los cuales pueden conllevar a multas de grandes sumas de dinero o hasta la clausura de la organización.

Pero no solo con los controles establecidos se mantiene una gestión integral. También se debe realizar un seguimiento y medición de su cumplimiento, por lo que se establecen indicadores para medir su desempeño.

#### **1.5.1. Sistemas de Gestión Ambiental**

La Gestión Ambiental aplicada a una empresa productiva es una herramienta para el control de sus actividades, siendo de esta manera un canal para realizar mejoras en los procesos productivos enfocándose en el cuidado del medio ambiente. Sin embargo, al aplicar estos controles nos percatamos que se evidencian mejoras en todos los aspectos de calidad y seguridad y salud de los trabajadores. Generalmente en las empresas productivas, existen desechos, desperdicios, emanaciones al ambiente, ruido, entre otros.

Si lo vemos del punto de vista de la calidad, al establecer controles en el uso de insumos de producción, estamos aumentando la productividad ya que tenemos más productos conformes y al mismo tiempo estamos cuidando nuestro entorno. Otro ejemplo evidente es la generación de gases de combustión, el cual puede causar quejas de las comunidades vecinas y por último, el cese de las actividades causando atrasos en despachos, insatisfacción del cliente, y desprestigio. Al considerar el punto de vista ocupacional, prevendríamos enfermedades ocupacionales del personal, mejorar la calidad del ambiente de trabajo, y prevenir la ocurrencia de accidentes laborales.

Un Sistema de Gestión Ambiental aplicado en una industria es implantado en toda la empresa, pero se enfoca en el área de producción ya que su interacción con el medioambiente es más contundente. Estos sistemas nacen a partir de la identificación de la interacción que sus actividades tienen con el medio ambiente, y de esta manera identificar cual o cuales son los más importantes para prevenir impactos adversos sobre el entorno, ya sea mediante controles o modificaciones de los

procesos. Para que se mantenga un sistema, debe haber un compromiso de toda la organización en la protección ambiental.

### **1.5.2. Entradas y salidas del proceso**

Para la fabricación de productos en base al PVC, se deben mantener controles para evitar la contaminación del ambiente. Por esto, se debe conocer que es lo que se requiere para el proceso y cuales son las resultantes del mismo, y de esta manera poder establecer controles operacionales de manera que se pueda fabricar tubería sin perjudicar el punto de vista ambiental, de seguridad y salud ocupacional.

Para conocer todas las resultantes del proceso, se debe realizar la identificación de todas las entradas y salidas del mismo por etapa (subprocesos). Las etapas se subdividen por elemento que se utiliza para la producción. Esto es necesario para la identificación de los aspectos del proceso, así como para conocer cuales son las fuentes principales de las dificultades al producir este tipo de tubería. A continuación se muestra un esquema del análisis de un flujo de proceso:

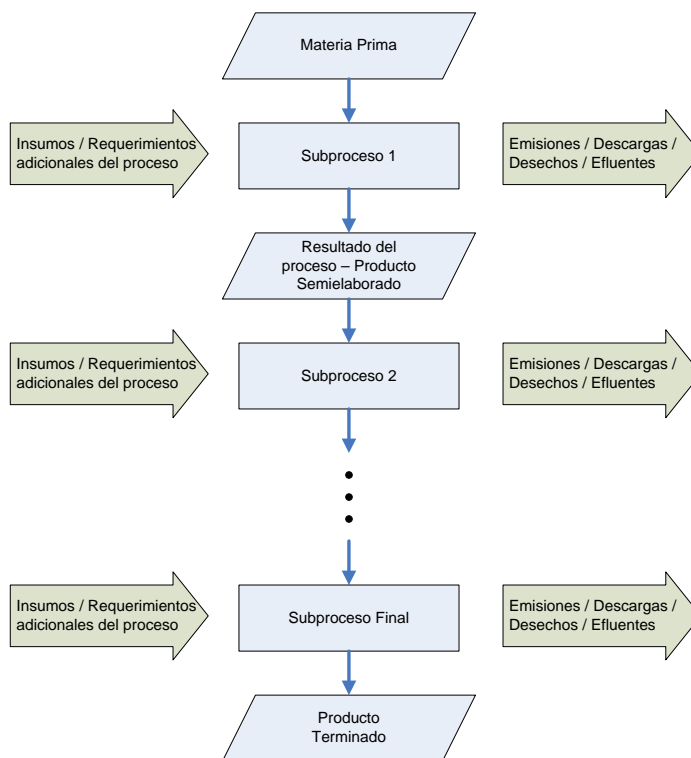


FIGURA 1.19. DIAGRAMA DE UN FLUJO DE PROCESO

### 1.5.3. Aspectos ambientales del proceso

La Norma ISO 14001 se centra en dar lineamientos para la aplicación de sistemas de gestión ambientales pero no es un instructivo del como hacerlo. Adicionalmente, se centra en el control de los impactos ambientales de mayor importancia. Es por esta razón que en este trabajo se indicaran ciertas metodologías para realizar esta verificación y control. Pero primeramente, debemos empezar a comprender lo que son los aspectos e impactos ambientales.

Una definición de lo que son aspectos ambientales son los que se describen en la norma, como se mostró en el numeral precedente, pero una definición mucho más eficaz y comprensible es: Es la interacción que nosotros tenemos con el ambiente. Mediante esta definición nos podemos percatar del sinnúmero de actividades que tiene esta interacción: funcionamiento de un automóvil (combustión), el simple hecho de respirar (generación de monóxido de carbono), la función de las plantas (generación de monóxido de carbono), etc.

#### **1.5.4. Indicadores de Ecoeficiencia**

La Ecoeficiencia es un término que se utiliza desde hace ya muchos años. El término surgió al momento de analizar las mejoras que se deben de hacer a los procesos con la finalidad de ahorrar recursos y mantener un seguimiento de estos. Ya que al momento de aplicarla en los procesos productivos, se obtienen grandes ahorros en lo que respecta la materia prima, los recursos y los insumos para la producción. Por consecuencia, se observa que se mantiene un cuidado en el medio ambiente y un incremento en la productividad de la empresa. Este es el propósito general de la Ecoeficiencia, que

a su vez se le introduce la parte de Seguridad y Salud Ocupacional ya que se considera al trabajador como un recurso crucial para el funcionamiento del proceso. Mediante el uso de estas herramientas, se pueden establecer indicadores para el seguimiento y control del desempeño de la seguridad y salud de los colaboradores.

Por esto, la Ecoeficiencia juega un papel muy importante en temas de seguimiento y prevención. En resumen, la Ecoeficiencia es “Producir más con menos”, es decir: usar los recursos para la producción sin desperdiciar, es mantener controlada la generación de desechos y es crear valor para la empresa. Pero para lograr este objetivo, depende que haya: comunicación interna (con los colaboradores) y externa (con la comunidad) para conocer sus sugerencias y requerimientos; capacitación del personal para concienciar al personal en la importancia de cumplir con las normas y realizar su trabajo correctamente; IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN de los aspectos que genera la organización para establecer controles operativos de prevención de la contaminación; MANTENCIÓN DE LA CALIDAD de nuestros productos para mantener una

buena satisfacción del cliente y no generar daños al medioambiente por falla de estos.

# **CAPÍTULO 2**

## **2. LIMITANTES EN LA FABRICACIÓN ADECUADA DE LA TUBERÍA**

Aparentemente, la fabricación de tubería pareciera que es un proceso sencillo y de fácil control como fue descrito en el capítulo anterior. Sin embargo, esto no es así. Existen muchos factores que pueden generar un producto de mala calidad o una limitante en el rendimiento de la máquina, como lo son: el compuesto, el diseño de los moldes, la capacidad de la tina de enfriamiento, el diseño de los calibradores, la sincronía de la máquina con la jaladora o sierra, el funcionamiento de las bandas de calentamiento, la contrapresión generada por el moldes sobre los tornillos, entre otros. En este capítulo nos enfocaremos en las limitantes del rendimiento de la máquina del punto de vista del compuesto, del molde y del calibrador.

## **2.1. Limitantes comunes del rendimiento de la máquina**

### **2.1.1. Compuesto**

El compuesto juega un papel muy importante al hablar sobre el rendimiento de la máquina, debido a que se requiere que el material pase a través de la máquina y el molde con fluidez evitando que se degrade el material por el calor generado por la fricción interna y con el túnel o el molde.

Para esto se utilizan lubricantes externos para evitar que el material se pegue en las paredes del molde y cause que se pierda el flujo del proceso o genere rayas en la superficie de la tubería. Un material sin lubricantes puede causar que se genere Scrap o que hasta el proceso continuo de fabricación de tubería se detenga debido que pedazos de material quemado pueden quedar dentro del molde y la única manera de limpiarlo es desmontándolo de la máquina.

Adicionalmente, también se requiere de fricción interna del material para mejorar la mezcla del plastificado (homogeneidad) al entrar al cabezal. Pero, al haber mucha fricción, como cuando se incrementa el rendimiento, también se generan altas

temperaturas que puede dar como resultado superficies rugosas en el producto final.

En nuestro caso, se tuvieron algunos inconvenientes en el incremento del rendimiento de la máquina, debido a que el material no fluía con tanta facilidad a través del molde y se presentaba rugosidad del material al salir del mismo. Cabe recalcar que esta se aprecia en el interior del tubo ya que la rugosidad exterior se pierde en el calibrador. Adicionalmente, en ocasiones se observaba que la tubería al salir tenía una raya amarillenta a lo largo de la tubería, señal que se había degradado. Regresando al tema de discusión principal, se observa una contrapresión elevada por la restricción que se genera en el material. Para esto se debe dosificar un lubricante externo para disminuir la fricción con las paredes internas del molde y por tanto, disminuir la contrapresión y poder aumentar el rendimiento. El calor que genera la fricción puede causar un alto hinchamiento de la tubería al salir del cabezal.

El problema citado es el más frecuente en la fabricación de tubería ya que depende de las condiciones climáticas y de la calidad del producto utilizado para la elaboración del

compuesto. En el siguiente capítulo se indica una solución para superar este problema.

### **2.1.2. Moldes**

La limitante en el rendimiento de la máquina puede ser enormemente influenciada por el diseño del molde. En este estudio se utilizó un molde con patas de araña.

El diseño del molde tiene que dar la facilidad de soldar adecuadamente la separación del plastificado efectuado por las patas de araña. Para obtener una buena mezcla del producto luego de pasar por la araña, depende enormemente de la movilidad de las moléculas. Las moléculas están conectadas unas a otras y no completamente separadas como en un fluido. El tiempo promedio para que se unan las paredes de la separación de las patas de araña se define como el “tiempo de relajación” de las moléculas. La movilidad de las moléculas es proporcional al tiempo de relajación. Antes que una molécula pueda ser un puente entre un lado de la brecha al otro, primero tiene que liberarse de las otras moléculas. Entre menor es el tiempo de relajación, la unión se realiza más rápido. Por lo

tanto el tiempo requerido para la unión es proporcional al tiempo de relajación.

Como vimos en el párrafo anterior, para poder hacer una buena unión entre las patas de araña se requerirá que se mantenga un tiempo de residencia dentro de los conos del molde igual o mayor al tiempo de relajación. Por experiencia, el tiempo de residencia aproximado de la mezcla es de 5 segundos en un molde pequeño y hasta 300 segundos en un molde grande. De todas maneras estos tiempos son mucho menores que el tiempo de relajación sin tensión. Por lo tanto, para hacer una buena calidad de la unión, el tiempo de relajación tiene que ser disminuido.

En los conos del molde, esto se logra por medio de la compresión. El área transversal del PVC plastificado dentro del molde está continuamente decreciendo desde la araña hasta la salida del molde por lo que provoca que el PVC sea estirado en una dirección axial. La razón de compresión está definida como la división del área de la mezcla cerca de la araña y el área de la mezcla a la salida. Debido al estiramiento en dirección axial una tensión es aplicada al PVC el cual causa una larga

disminución del tiempo de relajación. Mediante este mecanismo es posible hacer uniones de buena calidad con un corto tiempo de residencia del material en los conos. Esto significa que una mínima razón de compresión es requerida en un molde. Entre más pequeño es el molde más pequeño es el tiempo de residencia y más grande tiene que ser la razón de compresión.

La derivación de la relación de la calidad de la unión, el tiempo de residencia y la razón de compresión es porque se asume que el PVC durante condiciones de proceso no es considerado un fluido sino un material viscoelástico. El tiempo de relajación puede ser conocido ya que disminuye exponencialmente con la tensión aplicada el comportamiento del PVC.

Otra limitante se genera a la salida del molde, ya que para permitir que el material plastificado hinchado (a causa de las altas temperaturas) entre fácilmente dentro del calibrador, este debe ser estirado. Sin embargo, esto ocasiona que se genere un espesor de pared muy bajo provocando que no cumpla con los estándares de calidad establecidos. Adicionalmente, se evidencia que hay problemas de reversión a causa del estiramiento del producto. La alta reversión es un problema que

va de la mano con el estiramiento del material. El ensayo de reversión se fundamenta en que la tubería debe soportar ciertas temperaturas y su deformación longitudinal no debe exceder el 5%. Debido a que la tubería sale muy estirada, y por ende sus moléculas también, a altas temperaturas se pueden obtener resultados mayores al 5% de su longitud inicial.

### **2.1.3. Tina de enfriamiento - Calibradores**

En general se explicó anteriormente que la función de la tina de enfriamiento es la de solidificar la tubería y dar el diámetro externo correcto luego de salir del molde, pero para permitir que el tubo no se contraiga, hay dos maneras para lograr el objetivo: una es que la tina de enfriamiento haga vacío y por lo tanto no permita que el tubo se “chupe” y debe tener un calibrador para dar la forma externa regular; otra es la de colocar un tapón dentro de la tubería y aplicarle una presión de aire dentro de la misma con el fin de empujar las paredes hacia fuera, por lo que también se requiere de un calibrador. Se debe considerar que ambos métodos son validos pero depende su uso de acuerdo al tamaño del diámetro de la tubería a fabricar.

Para nuestro caso, se utiliza una tina de enfriamiento con vacío, que por lo general no representa mayor problema (a menos que los equipos tengan fallas eléctricas o mecánicas). Por esto, nos enfocaremos en el uso del calibrador. Las limitantes que se encontraron fue que se sobrecalentaba el calibrador ya que el tubo al salir del molde, se hinchaba mucho por lo que ocasionaba que la fricción se incremente. Por ende el material se lo estira para ingresar por el calibrador, generándose problemas en los ensayos de reversión.

## **2.2. Aspectos ambientales del proceso**

Para realizar la identificación de los aspectos ambientales del proceso, se debe primeramente establecer una metodología para realizarla. Esta metodología inicia en la identificación de los procesos y termina en establecer los aspectos de mayor importancia a considerar y definir los tipos de controles que se requieran, sean estos cambios en los procesos o adhesión de nuevas actividades.

### **2.2.1. Metodología de identificación**

Primeramente se realiza un levantamiento de todas las actividades del proceso, desde la recepción de la materia prima e insumos hasta la obtención del producto final. En este

levantamiento se debe considerar todas las entradas que el mismo tiene. En el capítulo anterior se estableció una forma para diagramar la identificación del proceso, y al realizarla se obtuvo la información mostrada en la figura de la siguiente página.

La información fue levantada mediante la observación in situ y mediante el estudio de los datos técnicos y de mantenimiento de las máquinas, así como las fallas más comunes que se presentan en las mismas. A partir de la información recopilada, se realiza la identificación de sus aspectos ambientales.

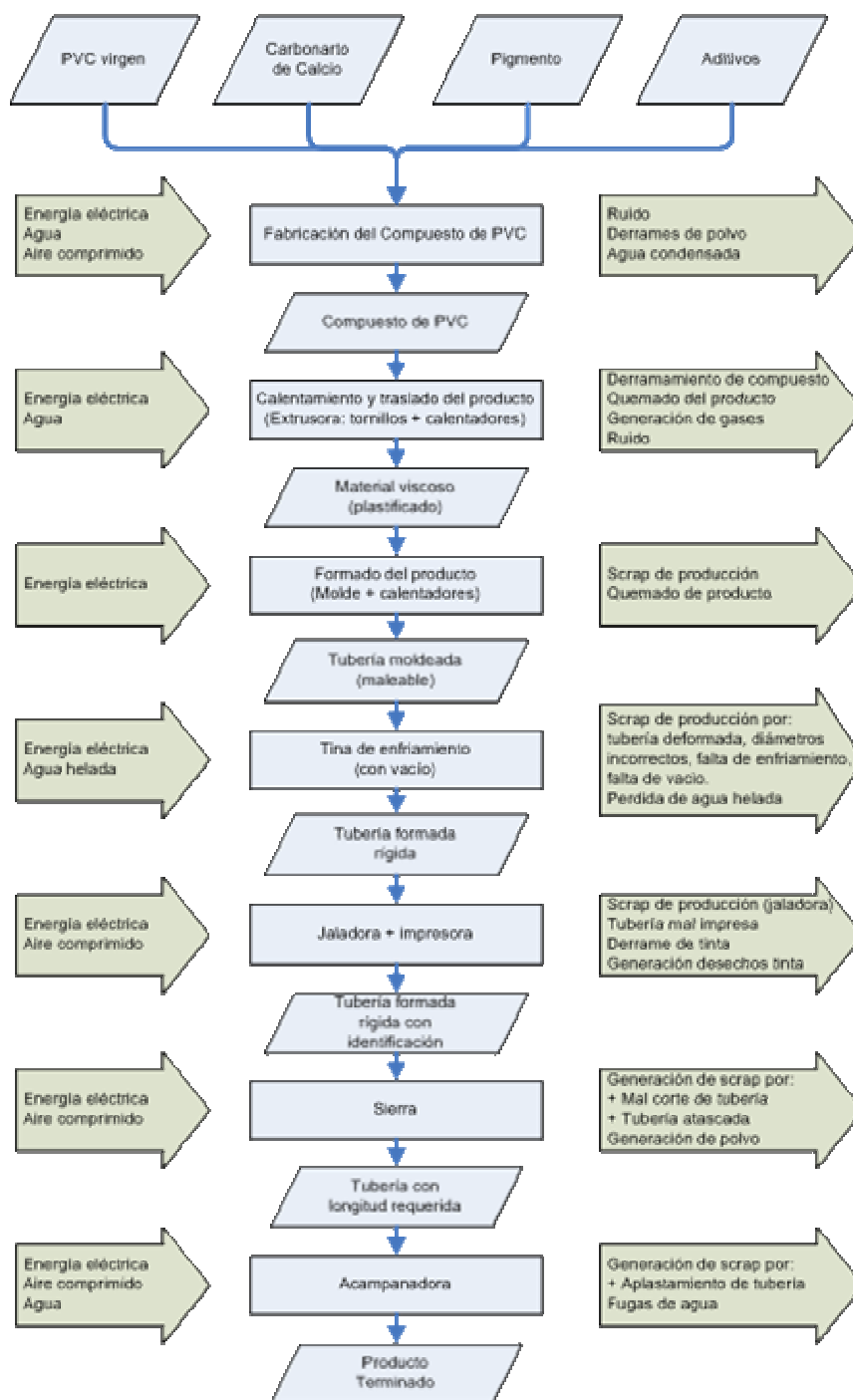


FIGURA 2.1. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN

### **2.2.2. Aspectos que se deben considerar**

De acuerdo a nuestro estudio, se considerarán los aspectos ambientales del proceso de extrusión para la fabricación de una tubería de 110 mm x 0,63 Mpa. Se realizará la identificación y luego la evaluación de los mismos por etapa de producción. No se considerarán aquellos que estén ocasionados por terceros o por daño de la máquina, ya que no está dentro del alcance de esta tesis.

Para la obtención de la información de los aspectos ambientales, se requiere tener pleno conocimiento del funcionamiento de la maquinaria y de que manera tiene su influencia con el medio ambiente. En esta identificación podemos constatar que se la mayoría de los aspectos están alineados a la generación de desechos y el desperdicio de energía pero por diversas causas.

Para la obtención de la información de los aspectos ambientales, se requiere tener pleno conocimiento del funcionamiento de la maquinaria y de que manera tiene su influencia con el medio ambiente. A continuación se realizará

un listado con las actividades y aspectos ambientales generados:

**TABLA 2**  
**IDENTIFICACIÓN DE ASPECTOS AMBIENTALES DEL PROCESO**

<b>Proceso</b>	<b>Aspecto</b>	<b>Observación</b>
Plastificado del producto	Desperdicio de energía eléctrica	Al dejar la máquina sin producción encendida.
	Producto quemado (desecho no aprovechable)	Al dejar mucho tiempo de calentamiento.
	Generación de desechos	Al utilizar material con baja fluidez.
	Generación de ruido	Funcionamiento normal de la máquina.
Formado del producto	Desperdicio de energía eléctrica	Al dejar la máquina sin producción encendida.
	Producto quemado	Al no mantener control sobre los calentadores.
	Desechos no aprovechables	Al haber falta de lubricación al interior del molde.
	Generación de Scrap	Al inicio de producción o al obtener un producto con fallas en sus dimensiones.
Tina de enfriamiento	Generación de Scrap	Al obtener tubería deformada, diámetros externos incorrectos, falta de enfriamiento, falta de vacío.
	Generación de tubería fuera de especificación	Por retensión a la entrada del calibrador.
	Perdida de agua	Debido a que la tubería sale húmeda de la tina, y salpicadura al piso.
Jaladora + impresora	Generación de Scrap	A causa de falta de sincronismo entre la jaladora y la extrusora.
	Generación de desechos de tinta	Son derrames mínimos de tinta.
	Generación de tubería mal impresa	Debido a falta de sincronismo con la jaladora.
Sierra	Generación de Scrap	Falta de agarre de la tubería, mal corte.
	Generación de polvo y virutas	Corte normal de la sierra.
	Generación de ruido	Corte normal de la sierra.
Acampanadora	Generación de Scrap	Aplastamiento de tubería, formador mal instalado.
	Desperdicio de agua	Mangueras mal ajustadas.

Con la información obtenida, se procede a realizar la evaluación de los mismos con la finalidad de determinar los más importantes para su prevención, por lo que se debe establecer un método para la priorización de los mismos.

### **2.2.3. Priorización de los aspectos**

En este inciso, se establecerá una metodología para la evaluación de los aspectos ambientales y se definirá su priorización. Debido a que no se mantienen metodologías universales para esta identificación por ser un concepto relativamente nuevo, se optará por plantear una propia para luego definir la más idónea.

Para esto, se establecerán criterios de valoración para los aspectos identificados, los cuales son: severidad del impacto ambiental, probabilidad de su ocurrencia, parámetro legal establecido (de acuerdo a su proximidad de incumplimiento), y efecto sobre la calidad del producto. Este último parámetro de calidad se lo debe considerar ya que la rentabilidad del negocio siempre va de la mano con el cuidado del medio ambiente, ya que si no hay ingreso económico para la empresa, no hay

presupuesto suficiente para el cuidado ambiental, y por lo tanto, no hay “empresa” sobre la que hay que trabajar.

Conociendo los criterios a utilizar, se debe comenzar a valorar la información obtenida de los aspectos establecidos en el numeral anterior. Para esto se ha generado una matriz, en la cual en sus filas se colocan cada uno de los aspectos, y en sus columnas se valora el criterio para estos. La valoración que se puede colocar para cada uno de los criterios. A continuación se muestra un esquema de la matriz a ser utilizada:

IDENTIFICACIÓN				EVALUACIÓN AMBIENTAL					DEFINICIÓN DE SIGNIFICANCIA
N°	ACTIVIDAD / PROCESO	ASPECTO	IMPACTO	CRITERIO 1	CRITERIO 2	CRITERIO 3	CRITERIO 4	RESULTADO	
1									
2									

FIGURA 2.2. ESQUEMA DE UNA MATRIZ DE IMPACTOS AMBIENTALES.

Los valores a utilizarse para, valga la redundancia, la valoración de los aspectos según los criterios de severidad y probabilidad se indican a continuación:

- **Severidad:** Su valoración se define de acuerdo a las definiciones a continuación:
  - **1** – Si no provoca grandes problemas en el rendimiento de la máquina, y no hay grandes desperdicios de insumos o generación de desechos.
  - **2** – Si provoca parada de la máquina, generación de desechos excesiva, desperdicio de insumos.
  - **3** – Si provoca generación continua de desperdicios, exceso consumo de materia prima, etc.
  
- **Probabilidad:** Su valoración se define de acuerdo a las definiciones a continuación:
  - **1** – Si su ocurrencia es aleatoria y poco frecuente (menor a una vez por programa de producción).
  - **2** – Si el problema persiste e influye en el rendimiento de la máquina en un 50 %.
  - **3** – Si el problema se presenta siempre que hay un nuevo programa de producción de la máquina.

Al realizar esta valoración, se identificarán cuáles son los aspectos ambientales sobre los cuales hay que realizar gestión, pero se requieren de otros factores de evaluación para realizar una priorización de los mismos.

A continuación se establecerán los criterios para la evaluación del cumplimiento legal:

- **1** – Se mantiene un 100% del cumplimiento legal en base al proceso identificado.
- **2** – Se cumple la ley, pero está cerca del límite de cumplimiento.
- **3** – No se cumple con lo establecido en la ley.

De esta manera se podrá obtener un valor referencial con respecto al cumplimiento legal.

Por último, se debe considerar el cumplimiento de las normas que aplican al producto, y por ende, es el criterio de la calidad del producto. Por esto, se define que:

- **1** – Se mantiene un 100% del cumplimiento en base a lo estipulado en las normas técnicas establecidas (INEN).
- **2** – No se cumple con uno de los parámetros de cumplimiento, pero se encuentra dentro del 10% del límite.
- **3** – La diferencia de cumplimiento se encuentra por encima del 10% mencionado anteriormente.

Con la información proporcionada, se procede a definir la importancia del aspecto ambiental. De acuerdo a la metodología propuesta, se han definido rangos a los valores de los resultados para definir su significancia, y es como se muestra a continuación:

- **Trivial** – El resultado se encuentra entre 0 y 4.
- **Moderado** – El resultado se encuentra entre 4 y 8.
- **Importante** – El resultado se encuentra entre 8 y 12.
- **Significativo** – El resultado es mayor a 12.

La operación para la obtención del resultado está definida como se muestra a continuación:

**Resultado = ((severidad x probabilidad) + criterio de calidad ) x cumplimiento legal.**

## **2.3. Identificación y evaluación de los aspectos ambientales**

### **2.3.1. Matriz de identificación y evaluación**

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, se procede a registrar los aspectos identificados y a su evaluación, obedeciendo lo indicado en el numeral anterior. Con los resultados a obtenerse en la matriz, se definirá cuales son los de mayor importancia y a por ende definir el control a establecer. A continuación, se muestran los resultados obtenidos.

**TABLA 3**  
**MATRIZ DE IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE ASPECTOS AMBIENTALES**

N°	ACTIVIDAD / PROCESO	ASPECTO	OBSERVACIONES	CRITERIO DE EVALUACIÓN					DEFINICIÓN DE SIGNIFICANCIA
				SEVERIDAD	PROBABILIDAD	CUMPLIMIENTO LEGAL	CRITERIO DE CALIDAD	RESULTADO	
1	Plastificado del producto	Desperdicio de energía eléctrica	Al dejar la máquina sin producción encendida.	1	2	1	1	3	Trivial
2		Producto quemado (desecho no aprovechable)	Al dejar mucho tiempo de calentamiento.	2	1	1	1	3	Trivial
3		Generación de desechos	Al utilizar material con baja fluidez.	3	2	1	3	9	Importante
4		Generación de ruido	Funcionamiento normal de la máquina.	1	3	1	1	4	Trivial
5	Formado del producto	Desperdicio de energía eléctrica	Al dejar la máquina sin producción encendida.	2	1	1	1	3	Trivial
6		Producto quemado	Al no mantener control sobre los calentadores.	2	1	1	3	5	Moderado
7		Desechos no aprovechables	Al haber falta de lubricación al interior del molde.	3	3	1	3	12	Significativo
8		Generación de Scrap	Al obtener fallas por alto hinchamiento o contrapresión en el molde.	3	3	1	3	12	Significativo
9	Tina de enfriamiento	Generación de Scrap	Al obtener tubería con diámetros externos incorrectos.	2	3	1	3	9	Importante
10		Generación de tubería fuera de especificación	Por retención a la entrada del calibrador.	2	1	1	3	5	Moderado
11		Perdida de agua	Debido a que la tubería sale húmeda de la tina.	1	1	1	1	2	Trivial
12	Jaladora + impresora	Generación de Scrap	A causa de falta de sincronismo entre la jaladora y la extrusora.	1	2	1	1	3	Trivial
13		Generación de desechos de tinta	Son derrames mínimos de tinta.	1	1	1	1	2	Trivial
14		Generación de tubería mal impresa	Debido a falta de sincronismo con la jaladora.	1	1	1	3	4	Trivial
15	Sierra	Generación de Scrap	Falta de agarre de la tubería, mal corte.	2	1	1	1	3	Trivial
16		Generación de polvo y virutas	Corte normal de la sierra.	2	1	2	1	6	Moderado
17		Generación de ruido	Corte normal de la sierra.	1	3	1	1	4	Trivial
18	Acampanadora	Generación de Scrap	Aplastamiento de tubería, formador mal instalado.	2	1	1	3	5	Moderado
19		Desperdicio de agua	Mangueras mal ajustadas.	1	1	2	1	4	Trivial

### 2.3.2. Resultados obtenidos

Luego de realizar la evaluación, se ha definido como prioritario solucionar los siguientes aspectos ambientales de manera que el proceso pueda trabajar controlando la generación de fallas:

- ✓ Dentro del ámbito **Significativo**:
  - Generación de desechos no aprovechables – al existir poco lubricante en el interior del túnel (material quemado); por lo que se debe tomar atención especial a la formulación.
  - Generación de Scrap – al obtener fallas por alto hinchamiento o contrapresión en el molde; se observa que hay restricción de flujo y dificultades en el molde para controlar la memoria del plástico.
  
- ✓ Dentro del ámbito **Importante**:
  - Generación de scrap – debido a baja fluidez de la materia prima; por lo que se evidencia nuevamente un problema con el compuesto, o talvez por falta de control en las zonas de calentamiento.
  - Generación de scrap – al estar mal establecidas las dimensiones del producto; ocasionando en la tina de

enfriamiento, ya que el material no se enfría lo suficiente para poder tomar la forma definida por el calibrador.



Dentro del ámbito **Moderado**:

- Producto quemado – al no haber control sobre los calentadores o al haber falta de lubricante externo; se considera una falta grave el no controlar la temperatura de las zonas, ya que se puede generarse una restricción en el cabezal y se incruste material en el molde, por lo que ocasionaría una para total del proceso.
- Generación de tubería fuera de especificación – al haber retención a la entrada del calibrador; ya que el material sale muy hinchado desde el molde, este tiende a entrar al calibrador con cierta dificultad, que puede causar vibraciones en su superficie o problemas de reversión.
- Generación de polvo y viruta – al realizar el corte normal de la tubería: se genera gran cantidad de polvo si no se establecen controles.
- Generación de scrap – por aplastamiento de la tubería en la acampanadota; principalmente ocurre cuando el formador no se encuentra centrado.

Luego de la identificación, nos podemos percatar que los principales problemas recaen sobre el compuesto (la formulación) y el diseño del molde. Por lo tanto, se procede a estudiar las posibles soluciones y controles a implantarse con la finalidad de prevenir que se generen impactos de los aspectos identificados.

# CAPÍTULO 3

## 3. SOLUCIONES PROPUESTAS

### 3.1. Cambios en formulación del compuesto

Como se describió en el capítulo anterior, la limitante principal en la manipulación del compuesto es debido a que el material no fluye fácilmente a través del túnel y tornillo, y el molde. Por esto se genera una alta contrapresión y por ende limita el rendimiento de la máquina. Adicionalmente, debido a la alta resistencia a fluir normalmente, se genera una gran fricción del material con las paredes del túnel y molde por lo que generan altas temperaturas, que causan que el material tienda a degradarse y expandirse por su memoria al salir del molde.

Como una solución, se añadió un aditivo adicional (un lubricante externo) para disminuir la fricción con las paredes del túnel. Para nuestro caso utilizamos cera polietilénica. Los resultados se

obtuvieron de inmediato ya que se observó que se incrementó el rendimiento de la máquina (kg/hora). El aumento del rendimiento se debió al tener una menor fricción entre el material y el túnel, por lo que se obtuvo un menor esfuerzo de la máquina por empujar el material y también una menor temperatura del material a la salida del cabezal. Esto previene que se degrade el material y también se consigue que se disminuya la hinchazón del mismo que ocurre al querer recuperar su memoria al salir del molde.

La solución propuesta se la realiza en línea durante la fabricación de la tubería. Sin embargo, se puede realizar un compuesto (formulación) con estas características para optimizar el uso de los recursos. A continuación, establezco una posible formulación para el funcionamiento óptimo de la máquina considerado del punto de vista del compuesto. Cabe recalcar que esta formulación es adecuada para este tipo de máquina, sin embargo, se deben realizar pruebas con otras máquinas ya que sus diseños son diferentes (su diseño inicial cuando fue manufacturada no fue el de obtener grandes rendimientos).

**TABLA 4**  
**OPTIMA FORMULACIÓN PARA LA FABRICACIÓN DEL PRODUCTO**

<b>Ingredientes</b>	<b>Concentración (phr)</b>
Resina de PVC	100
Ayuda de proceso	0.75
Modificador de impacto	5.00
Estabilizante	1.00
Esterato de Calcio	1.00
Ceras	0.70
Cera polietilénica parcialmente oxidada	0.30
Dioxido de Titanio	10.00
Carbonato de calcio	2.00
Cera polietilénica	1.00

Cabe recalcar que esta formulación es adecuada para este tipo de máquina, sin embargo, se deben realizar pruebas con otras máquinas ya que sus diseños son diferentes (su diseño inicial cuando fue manufacturada no fue el de obtener grandes rendimientos).

Luego de realizar las pruebas, incrementando el lubricante externo, se obtuvo un aumento de rendimiento considerable, desde un rendimiento de 475 k/h, a un rendimiento de 550 k/h, por lo que se obtiene un 15% de productividad. De esta manera, se obtiene un gran beneficio en efectos del consumo energético, el cual se describirá en capítulos posteriores.

### **3.2. Modificaciones al diseño inicial del molde**

Como se había mencionado, los principales problemas que se pueden presentar durante la producción es que no haya una buena unión de las brechas que se generan a causa de la división de las patas de araña y el hinchamiento del producto (recuperación de memoria) al salir del molde.

Para el caso de las patas de araña, la solución recae en el diseño del molde. Como se había explicado en el capítulo anterior, se requiere de un tiempo de residencia dentro del molde igual o mayor al tiempo de relajación. De esta manera se define la longitud del molde ya que si se requiere de altos rendimientos, al incrementar el mismo se debe mantener una relación con la cantidad de tiempo que el material permanece dentro del molde.

Otra de las limitantes que se presentaron fueron los problemas de espesor de pared causados al estirar el material. Para esto se realizaron modificaciones al molde, tomando en consideración ciertos cálculos básicos de predicción del comportamiento del compuesto de PVC dentro del molde. Las formulas utilizadas provienen de un modelo de Maxwell modificado. Mediante este modelo se puede predecir como será el comportamiento del compuesto en lo referente al hinchamiento y por lo tanto, a su espesor de pared al salir del molde. Con esta información se puede definir de qué manera se debe modificar al molde. A continuación se muestran las formulas a ser utilizadas y un gráfico tipo de un corte de un molde generalizado:

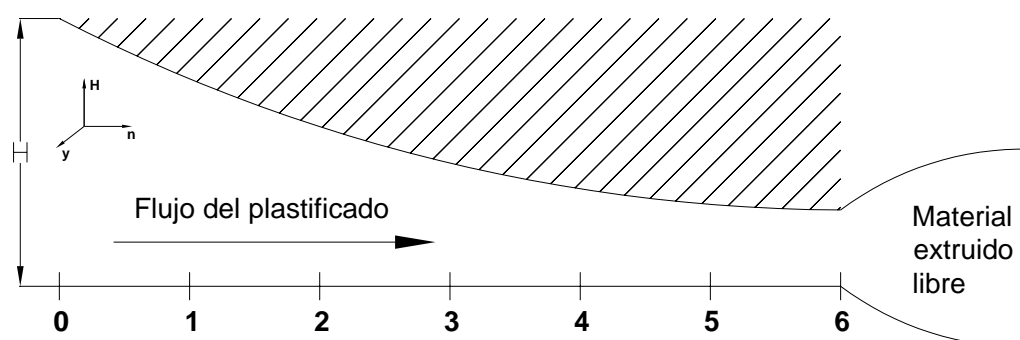


FIGURA 3.1. ESQUEMA DE LA SECCIÓN INTERNA DE UN MOLDE

$$\sigma(n+1) = \sigma(n) + \Delta\sigma(n) - \sigma(n) \cdot \frac{\Delta t(n)}{\tau(n)}$$

$$\Delta\sigma(n) = E \cdot \delta$$

$$\delta = \frac{H(n) - H(n+1)}{H(n)}$$

$$\tau(n) = \tau_0 \cdot e^{-\sigma(n)}$$

$$\Delta t(n) = \frac{H(n) \cdot \Delta y}{\dot{V}}$$

donde  $\sigma$  es el esfuerzo,  $n$  el punto a lo largo del molde en donde se obtienen los datos,  $t$  el tiempo local de residencia del compuesto,  $\tau$  el tiempo local de relajación,  $\tau_0$  el tiempo de relajación en  $n = 0$ ,  $E$  el módulo de elasticidad cuando el compuesto se encuentra caliente,  $\delta$  la deformación del material,  $y$  la distancia en un eje (se indica en la figura 3.1),  $V$  es el flujo volumétrico por unidad de longitud en la dirección  $y$ .

Con las formulas expuestas, se obtiene el hinchamiento del material al salir del molde y de esta manera predecir el comportamiento del material al ingresar al calibrador, ya que se lo debe de estirar para que ingrese y adicionalmente poder obtener un espesor de pared adecuado. Debido a que se mantiene una mayor salida al interior de la tubería, el problema de reversión disminuiría ya que el material tiende a salir más por pared interna de la tubería y no por la externa, el cual causaría problemas con el calibrador, disminuyendo la posibilidad de generar reversión en la tubería.

En primera instancia se realizó la prueba de estirar el material para que entre fácilmente dentro del calibrador, sin embargo esto atrajo un problema de reversión, la cual es una prueba que se realiza al producto que consiste en calentar la muestra del tubo dentro de un horno por aproximadamente una hora y media y observar su dilatación. Si este se ha deformado más del 5% de su tamaño original, no pasa la prueba y se lo considera producto no apto. Adicionalmente, al estirar se obtuvo un espesor de pared muy delgado.

Como solución se consideró reducir 2 mm de diámetro del cono interno en la punta para de esta manera obtener un mayor hinchamiento en la pared interior de la tubería y permitir estirar un poco más sin perder los espesores de pared.

A continuación se establecen los parámetros iniciales para la aplicación de las formulas:

$$H(0) = 1$$

$$\delta = 0.1 = \text{constante escogida} \rightarrow H(1) = 0.9, H(2) = 0.81, \text{ etc.}$$

$\Delta t$  = El tiempo de residencia local cambia en relación directa con la deformación  $\rightarrow \Delta t(1) = 1, \Delta t(2) = 0.9, \Delta t(3) = 0.81, \text{ etc.}$

De acuerdo a la literatura, un tiempo de relajación al entrar al molde de PVC caliente es de 800 segundos. Adicionalmente también se considera el modulo de elasticidad  $E = 20 \text{ MPa}$ .

Mediante el uso de formulas descritas, se realizan los siguientes cálculos:

$$\sigma(0) = 0$$

$$\sigma(1) = 0 + 20 * 0,1 - 0 = 2$$

$$\sigma(2) = 2 + 20 * 0,1 - 2 * \frac{0,9}{800 * e^{-2}} = 4 - \frac{1,8}{108} = 3,984$$

$$\sigma(3) = 3,984 + 20 * 0,1 - 3,984 * \frac{0,81}{800 * e^{-3,984}} = 5,984 - \frac{3,227}{14,889} = 5,767$$

$$\sigma(4) = 5,767 + 20 * 0,1 - 5,767 * \frac{0,72}{800 * e^{-5,767}} = 7,767 - \frac{4,152}{2,503} = 6,108$$

$$\sigma(5) = 6,108 + 20 * 0,1 - 6,108 * \frac{0,63}{800 * e^{-6,108}} = 8,108 - \frac{4,152}{2,503} = 5,946$$

$$\sigma(6) = 5,946 + 20 * 0,1 - 5,946 * \frac{0,54}{800 * e^{-5,946}} = 7,946 - \frac{3,211}{2,093} = 6,412$$

Para cada punto  $n$  tomado, el hinchamiento es definido por:

$$\delta = \frac{\sigma(n)}{E}$$

por tanto, el espesor del extruido libre ( $EL$ ) es:

$$EL = H + \delta * H$$

$$n = 0 : EL = 1$$

$$n = 1 : EL = \frac{2}{20} * 0,9 + 0,9 = 0,99$$

$$n = 2 : EL = \frac{3,984}{20} * 0,81 + 0,81 = 0,97$$

$$n = 3 : EL = \frac{5,767}{20} * 0,72 + 0,72 = 0,90$$

$$n = 4 : EL = \frac{6,108}{20} * 0,63 + 0,63 = 0,82$$

$$n = 5 : EL = \frac{5,946}{20} * 0,54 + 0,54 = 0,7$$

$$n = 6 : EL = \frac{6,412}{20} * 0,45 + 0,45 = 0,5$$

Para el cálculo de la influencia del largo de la última parte del molde en el hinchamiento, se considera que en  $n = 7$  (fuera del molde) la misma altura que en  $n = 6$  y por tanto  $\delta = 0$ .

$$H(7) = H(6) \rightarrow \delta = 0$$

$$\sigma(7) = 6,412 - 6,412 * \frac{0,45}{800 * e^{-6,412}} = 6,412 - \frac{2,885}{1,313} = 4,215$$

$$EL = \frac{4,215}{20} * 0,45 + 0,45 = 0,54$$

Ahora, realizamos el procedimiento para  $n = 8$ :

$$\sigma(8) = 4,215 - 4,215 * \frac{0,45}{800 * e^{-4,215}} = 4,215 - \frac{1,856}{11,818} = 4,058$$

$$EL = \frac{4,058}{20} * 0,45 + 0,45 = 0.50$$

Al comparar los valores  $EL$  para  $n = 7$  y  $n = 8$ , son similares, por lo que se considera que la longitud del molde no influye en el extruido para este caso.

Luego de obtener las pruebas se encontraron resultados favorables ya que el estiramiento para permitir que ingrese la tubería por el calibrador fue menor, y debido a que en el interior había mayor flujo, se obtuvo un espesor dentro de parámetros.

### 3.3. Modificación de los calibradores

Como se expuso anteriormente, al haber mucha fricción entre el calibrador y la masa fundida ocasiona que se genere problemas de reversión en la tubería. Esto era debido a que el material era muy grueso y el agua helada no enfriaba a tiempo el calibrador a la entrada, por lo que se procedió a instalar un calibrador de menor espesor. Al colocar esto, el material entra sin problema por el calibrador ya que el enfriamiento que recibe de la tina de enfriamiento es mayor, y por consecuencia permite reducir el

hinchamiento rápidamente y permitir su paso. Adicionalmente, la modificación que se realizó en el cono interno del molde ayudo en esta tarea al calibrador.

### **3.4. Cambios en el proceso**

Los cambios que se pueden realizar es en los parámetros de temperaturas del proceso. Esto es para evitar que el material se pegue al túnel, molde o tornillo y se degrade. Adicionalmente, la temperatura de la masa influye en la fabricación de una tubería sin rugosidad, debido a que a mayor temperatura, la homogenización de la mezcla requiere un mayor tiempo de relajación, y por lo tanto, un mayor tiempo de residencia en el molde. Por este motivo, al mantener una alta temperatura de la mezcla y tratar de obtener altos rendimientos, se pueden presentar rugosidad interna en la tubería, ya que la externa puede ser corregida con el calibrador.

Debido a que una gran limitante es causada por la temperatura del material (presencia de rugosidad interna), y luego de realizar modificaciones en los moldes, modificación de la formulación, modificación en las temperaturas de trabajo y enfriamiento del material al ingreso al calibrador sin resultados satisfactorios, se decidió revisar el sistema de enfriamiento de los tornillos.

El sistema de enfriamiento de los tornillos consiste en la evaporación en un extremo y condensación en el otro de agua. El interior del tornillo es totalmente cerrado por lo que idealmente no hay escape de agua. A continuación se explica mediante una gráfica el sistema de enfriamiento del tornillo:

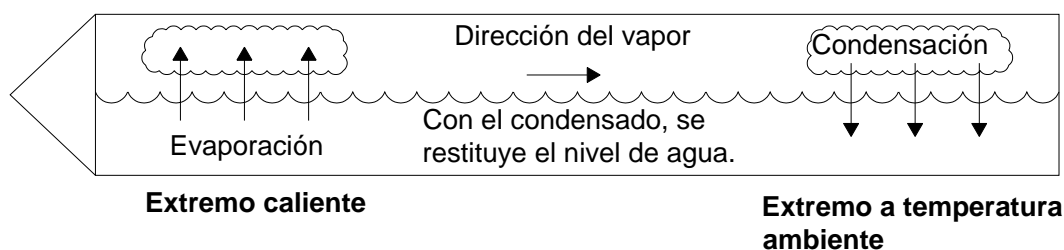
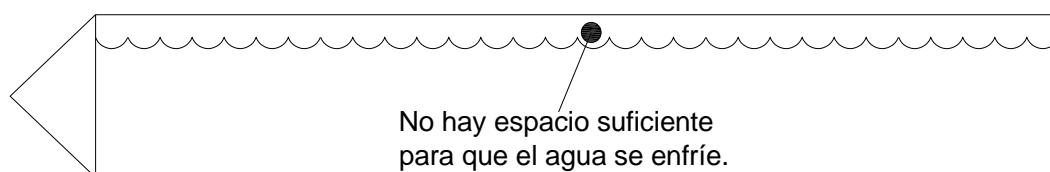


FIGURA 3.2. ENFRIAMIENTO DEL TORNILLO

Inicialmente se verificó el agua en el interior de los tornillos y al parecer les faltaba por lo que se procedió a llenarlos con una cantidad media de su capacidad total. Luego de algún tiempo, decidimos verificar si el agua seguía dentro o si se había evaporado por causa de una posible fuga en el tornillo. Al revisar los tornillos girándolo levemente para que caigase el agua, de este salió muy poca agua. Sin embargo, al colocar aire comprimido dentro del orificio, poco a poco comenzó a salir agua y se pudo verificar que el tornillo se encontraba totalmente lleno de agua. Como se observa en la figura a continuación, esto evita que haya intercambio de calor entre la parte delantera y trasera del tornillo generando altas temperaturas en el extremo en contacto con la masa fundida.



**No hay reducción de la temperatura del tornillo.**

FIGURA 3.3. CALENTAMIENTO DEL TORNILLO

Esto explica el porque la altas temperaturas de la masa y por tanto, la rugosidad que se presentaba a altos rendimientos, convirtiéndose en una gran limitante. Una vez que se colocó la mitad de la cantidad de agua en la cavidad interna del tornillo, se lograron obtener altos rendimientos (aproximadamente un 30% en promedio de mayor productividad entre diferentes medidas).

# **CAPÍTULO 4**

## **4. ANÁLISIS DE LAS SOLUCIONES PROPUESTAS Y RESULTADOS**

### **4.1. Análisis de las soluciones**

Por lo descrito anteriormente, las soluciones para cada uno de los problemas identificados, tienen relación unos a otros, debido a que para obtener un producto de buena calidad, y con una buena productividad, se requiere la aplicación de todos los controles. Por ende, se pudo observar que para la solución del paso del material a través del calibrador, se requería de estirar al mismo, sin embargo, esta solución traía dos problemas: el resultado negativo de las pruebas de reversión y el espesor de pared en los diámetros de la tubería.

Adicionalmente, algo que no habíamos considerado en la repercusión del resto de los subprocesos fue la modificación del

compuesto de PVC. Al momento de realizar la modificación del compuesto, esto generó una reducción en el hinchamiento del material, entregando como consecuencia un espesor de pared más bajo y por ende generando problemas.

Para simplificar las explicaciones, a continuación se muestra un árbol causal de fallas con problemas principales (cuadros grises) que se presentaron durante la investigación y las soluciones propuestas (cuadros celestes).

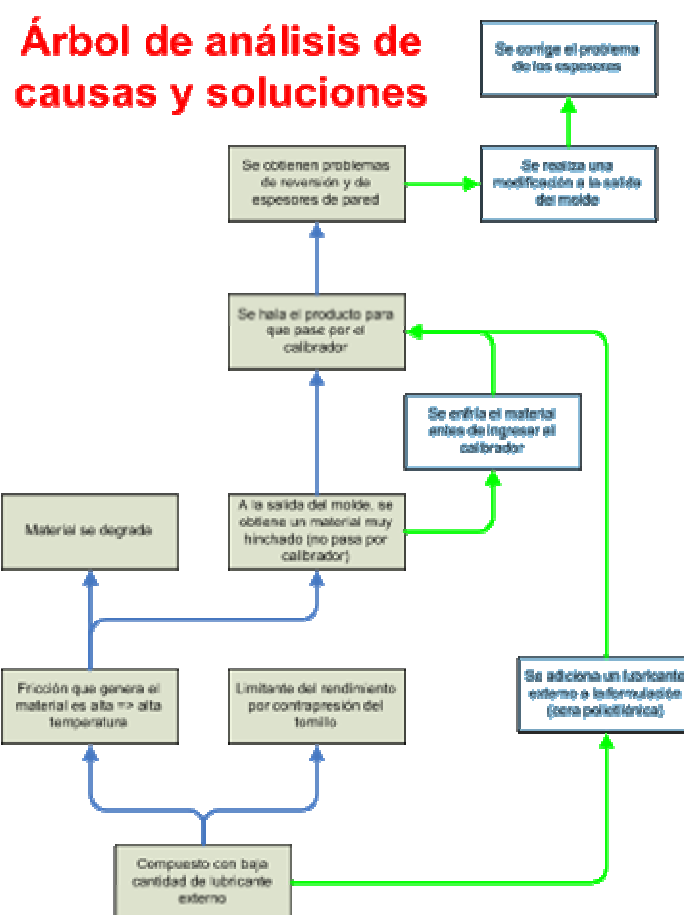


FIGURA 4.1. ANÁLISIS DE CAUSAS Y ACCIONES

## **4.2. Comparación de los resultados obtenidos**

### **4.2.1. Análisis de valores**

Los cambios realizados en los diferentes procesos han aportado enormemente en la obtención de los resultados esperados. Se han observado una gran mejoría en el rendimiento de la máquina, aportando enormemente en el ahorro energético y a la disminución en la generación del Scrap, así como en el aumento de la productividad.

La energía que se consume en la máquina es debido al tiempo en que esta se encuentra encendida para el accionamiento de los calentadores externos, el tornillo, el PLC y el CPU. Al obtener un mejor rendimiento de la máquina se obtiene mayor producto en menor tiempo. Es cierto que se requiere de mayor energía para aumentar el rendimiento, sin embargo la relación no es directamente proporcional, sino que, a mayor producto menor consumo.

También se debe considerar que la cantidad de scrap que se produce en la máquina por falla de la tubería en los ensayos de laboratorio disminuye notablemente al realizar las modificaciones necesarias en el molde y calibradores.

A continuación, se tabularán ciertas condiciones de máquina del rendimiento antes y después de las modificaciones y poder observar su mejoría para la medida de 110 mm x 0,63 Mpa.

**TABLA 5**  
**COMPARACIÓN DE RENDIMIENTOS**

Descripción	Fecha de las pruebas	
	13.01.2006	23.08.2006
Rendimiento	475 k/h	650 k/h
Temperatura del material	195 °C	194 °C
Contrapresión	170 bar	175 bar
Reversión	5,65 / 5,70 %	2,75 / 2,73 %

#### 4.2.2. Comparación de costos

Durante estas pruebas se pudo concertar que el consumo energético de la máquina disminuyó aproximadamente en un 30%. Esto se debe a que al haber un mayor rendimiento se debe disminuir la temperatura generada por los calentadores ya que se genera calor por una mayor fricción en el material y el tornillo.

Para referencia de costos, se esta establece que el costo de energía es de 0,06 USD por kw-h. De acuerdo a la medición

del consumo energético, antes de realizar las mejoras, se mantenía un consumo de 4.153 kw-h, y por tanto generando un costo de 248,18 USD. Al realizar los cambios, se obtuvo un consumo promedio de 3.060 kw-h por día generando un costo de 183,60 USD. Por esto, se generó un ahorro de 64,58 USD diarios.

**TABLA 6**  
**COMPARACIÓN DE CONSUMO ENERGÉTICO**

Descripción	Fecha de las pruebas	
	13.01.2006	23.08.2006
Consumo energético (kw-h)	4.153	3.060
Costo (USD/día)	248,18	183,60

Adicionalmente, se ha obtenido una disminución en la generación de desechos ya que con las modificaciones realizadas tanto a la formulación como el molde, se obtienen productos que cumplen norma y no es necesario enviarlos para el reproceso, ahorrando de esta manera tiempos de parada, tiempos de arranque y consumo de energía en los molinos.

# CAPÍTULO 5

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se puede evidenciar que las razones principales en la falla de elaboración de los productos de tubería se enfocan en el hinchamiento del material a la salida del molde. Por este motivo, este estudio se ha enfocado en el proceso de formado del producto, por lo que se considera el compuesto y el molde.

### 5.1. Conclusiones específicas

- Luego de este estudio, se puede definir que el hinchamiento del producto está íntimamente relacionado con el diseño del molde. Se evidenció que los problemas de rendimiento van siempre acompañados con el espesor de pared y los problemas de reversión, ya que a una mayor velocidad, el tiempo de permanencia dentro del molde disminuye, y por lo tanto el tiempo de relajación es menor, causando un mayor hinchamiento.

Como se había visto antes, la solución más simple es la de estirar el material para obtener el espesor indicado, sin embargo esto ocasiona problemas de reversión. Por esto es importante manejar correctamente el tiempo de permanencia del producto dentro del molde.

- Adicionalmente, se identificaron otros problemas como son los del compuesto, en el que la restricción de este al entrar al molde incrementa la contrapresión sobre el cojinete de los tornillos, provocando una limitante en la velocidad del mismo. Para esto, se debe mejorar las características de fluidez del producto.
- Mediante la aplicación de estos controles, se pueden evitar impactos ambientales significativos. En términos generales, se disminuirá la cantidad de desechos que se genera por malformaciones en el producto final, se tendrá un consumo óptimo de energía eléctrica al mantener altos rendimientos (menor tiempo de uso de la máquina) y mejorar la eficiencia del uso del motor al no sobrecargarlo con altas cargas; y por último, ahorro en el consumo de materia prima por disminución en el sobrepeso de la tubería. Esta es una manera de trabajar ecoeficientemente, obteniendo un valor agregado, es decir,

produciendo más productos de calidad (mayor contribución) con menos desperdicios (mayor ahorro).

## **5.2.Recomendaciones**

- En el proceso de extrusión existen muchos factores para la fabricación de la tubería como son: la forma del tornillo, el diseño del molde, la capacidad de los calentadores, el tipo de material, la capacidad de la tina de enfriamiento, capacidad de la acampanadora, etc. Por esto, las recomendaciones que se establecen a continuación son específicas para esta máquina (o una con características similares) y subjetivas para cualquier otra. Sin embargo, las actividades y tareas que se realizaron para el aumento en rendimiento de la máquina, son aplicables para cualquiera.
- En primera instancia para mejorar la unión de las patas de araña y homogenizar la mezcla (menos hinchamiento), es bueno alargar el cabezal, y de esta manera incrementar el tiempo de residencia en el molde mejorando la unión de las patas de araña y absorbiendo la memoria del material plastificado, pero esto ocasiona altas contrapresiones. Se debe considerar hasta que punto se alarga el cabezal para su óptimo diseño.

- Para contrarrestar las altas contrapresiones, se debe modificar la fórmula del compuesto a utilizar disminuyendo la fricción entre la mezcla y las paredes del túnel. Se recomienda aumentar la cantidad del lubricante externo al compuesto y disminuir la cera parafínica y/o el relleno. De esta manera, habrá un mejor flujo en el interior del molde y por lo tanto se disminuirá la contrapresión.
- Otro factor muy importante a considerar en la homogenización de la mezcla, y que repercute en el acabado superficial de la tubería, es la posición y enfriamiento de los tornillos. En nuestro caso tenemos una extrusora de doble tornillo, por lo que el espacio intersticial entre los filetes de los dos tornillos debe ser igual a lo largo del mismo. Si esto no es así, puede causar que la mezcla no se homogenice en su totalidad y presente fallas en el contorno del tubo mostrando deficiencia en el acabado final. Por otro lado, el exceso de calor en el tornillo causa que se presente rugosidad en la tubería. Esto es porque al existir mucha fricción causada por el material sobre el tornillo, éste incrementa su temperatura y puede causar que el material se degrade y por tanto disminuir el rendimiento de la máquina. Por esto se recomienda al observar un problema similar al planteado revisar

el sistema de enfriamiento de los tornillos. Esto también causa desgaste en los tornillos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Brent Strong, *Plastics: Materials and Processing* (2nd. Edition, Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 2000), pp. 25-65, 211-216.
- [2] N. G. McCrum, C. P. Buckley, C.B. Bucknall, *Principles of Polymer Engineering* (First Edition, New York, Oxford University Press, 1988), pp. 101-159.
- [3] John J. Aklonis, William J. MacKnight, *Introduction to Polymer Viscoelasticity* (Second Edition, Canada, Jhon Wiley & Sons, Inc, 1983) pp, 139-156.
- [4] B. Vergmes & J. S. Agassant, "*Die flow computation : A method to solve industrial problems in Polymer Processing*", *Advance in Polymer Technology* (Centre de Mise en Forme des Materioux), Vol. 6, No. 4 (1986), pp. 441 – 455.
- [5] George E. Mase, PhD, *Shaum`s outline of theory and problems of continuum mechanics* (New York, Mc Graw Hill Book Company, 1970), pp. 196 – 206.

[6] Martin Grohman & Scott Holloway, *Successful extrusion of small diameter CPVC pipe* (Cincinnati, Ohio, Cincinnati Milacron, 1996).

[7] H. Overijnder, *Why is the compression ratio hended in a PVC Die-head?* (Dedemsvaart, The Netherlands, Wavin Research and Development, Rollepaal 20, may 14, 1982).