CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

"MOLDEO POR INYECCIÓN CIENTÍFICO"

CASO DE ESTUDIO

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS

PRESENTA:

MÁRIA CRISTINA IBARRA ALONSO

SALTILLO, COAHUILA **AGOSTO 2008**

CENTRO DE INFORMACIÓN
03 OCT 2008
RECIBIDO

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

"MOLDEO POR INYECCIÓN CIENTÍFICO"

CASO DE ESTUDIO

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS

PRESENTA:

MARÍA CRISTINA IBARRA ALONSO

ASESOR:

M.C. RAFAEL AGUIRRE FLORES

SALTILLO, COAHUILA **AGOSTO 2008**

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

"MOLDEO POR INYECCIÓN CIENTÍFICO"

CASO DE ESTUDIO

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS

PRESENTA:

MARÍA CRISTINA IBARRA ALONSO

EVALUADORES

DR. SAUL SÁNCHEZ VALDEZ | **M.C. PABLO ACUÑA VAZQUEZ**

SALTILLO, COAHUILA | **AGOSTO 2008**

ÍNDICE

1	**INTRODUCCIÓN**	1
1.1	Definición de moldeo por inyección científico	1
1.2	Ventajas y desventajas del proceso de moldeo por inyección científico	2
2	**REVISION BIBLIOGRÁFICA**	4
2.1	Generalidades del proceso de moldeo por inyección convencional	4
2.2	Variables de control de proceso de moldeo por inyección.	5
2.2.1	Presión	5
2.2.2	Temperatura	7
2.2.3	Velocidad	8
2.2.4	Tiempos	9
2.2.5	Efecto de las propiedades en la técnica de moldeo por inyección	9
2.3	Sistemas presentes en el equipo de moldeo por inyección	10
2.3.1	Unidad de cierre	10
2.3.2	Sistema mecánico con palancas acodadas	11
2.3.3	Sistema hidráulico	11
2.4	Unidad de inyección	12
2.4.1	Tornillo	13
2.5	Unidad de potencia	14
2.6	Unidad de control	16
2.6.1	Control del circuito abierto	17
2.6.2	Control del circuito cerrado	19
2.6.3	Control de la temperatura	20
2.6.4	Control de la presión	20
2.6.5	Componentes de la unidad de control	21
2.7	Ciclo de inyección	22
3	**ESTADO DEL ARTE DE MOLDEO POR INYECCIÓN CIENTÍFICO**	26
4	**ÁREAS DE OPORTUNIDAD**	30
5	**CONCLUSIONES**	31
6	**RECOMENDACIONES**	32
7	**NOMENCLATURA**	33
8	**REFERENCIAS**	34

MOLDEO POR INYECCIÓN CIENTÍFICO

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Definición de moldeo por inyección científico

Moldeo de inyección científico es una disciplina, la cual se define como un proceso para estandarizar la formación de piezas plásticas idénticas y constantes durante la producción, teniendo el control de la viscosidad del material plástico y de las variables que interactúan durante el ciclo de moldeo.

El moldeo de inyección científico, pretende acumular información necesaria para crear historiales de comportamiento del proceso. Con la información obtenida del historial, de los equipos y de las distintas zonas de flujo de los materiales plásticos a través del proceso, se puede predecir los problemas que ocurrirían en lotes de producción siguientes y así evitarlos. Esto acorta los procesos de revisión en los prototipos para las fases de preproducción [1].

1.2.- Objetivo del moldeo por inyección científico.

El moldeo por inyección científico tiene como objetivo actualizar el proceso convencional para que sea independiente de la maquina donde se lleva acabo el moldeo y generar repetidamente; la fusión, el traslado, el enfriamiento y la expulsión de una pieza plástica sin que sufra cambios entre ciclo y ciclo. Además ofrecer el control de por lo menos cinco parámetros fundamentales que son:

- *Control del proceso del plástico/fundido;* realizar un monitoreo del fundido mediante un análisis antes y después de la trasferencia al moldeo de inyección.

- *Control de la velocidad de proceso;* inyectar la misma cantidad del material teniendo una velocidad de corte constante y reconocerla.

- *Control de la viscosidad del material*; controlar la viscosidad ya que cuando experimentamos cambios en la viscosidad las propiedades del material cambian debidas a los efectos de la temperatura. Con un mayor control de la viscosidad, con facilidad podemos controlar la calidad de la pieza moldeada.

- *Control de la presión de proceso;* medir y llevar un seguimiento de la presión de inyección, sostenimiento o de mantenimiento, la contrapresión, y las presiones que el sistema tenga a generar.

- *Control del enfriamiento;* realizar un control adecuado del enfriamiento del material dentro y fuera del barril [1].

1.2.- Ventajas y desventajas del proceso de moldeo por inyección científico

Ventajas

Indiscutiblemente la ventaja más importante del moldeo por inyección científico es la obtención de piezas idénticas de mayor calidad a un menor costo de producción.

Desventajas

Como única desventaja se reconoce que el moldeo por inyección científico puede crear inversiones de tiempo importantes en su implementación y por ende costos, por la actualización de instrumental [1].

La información que el proceso de moldeo por inyección científico nos arroja después de la implementación y el reconocimiento de las variables de moldeo son;

- Capacidad de establecer parámetros de proceso en tiempo menores para productos nuevos a moldear.
- Reconocer las áreas de oportunidad de los equipos con los que contamos.
- Minimizar tiempos de ciclo.
- Optimizar recursos humanos de operación en planta.
- Incrementar el estatus de desempeño de la planta.
- La depreciación de los procesos se incrementa por su actualización.
- Se genera un soporte de desempeño del material en el proceso que es útil en el establecimiento de garantías en productos.

2.- REVISION BIBLIOGRÁFICA

2.1.- Generalidades del proceso de moldeo por inyección convencional

El moldeo por inyección de plásticos es un proceso que consiste en trasferir el material plastificado que se encuentra dentro de una máquina inyectora, a la cavidad de molde para después enfriarlo y expulsarlo. El éxito del proceso depende del adecuado funcionamiento de la máquina. El moldeo por inyección tiene hoy en día, una gran variedad de productos, de diversos tamaños y formas.

Este proceso requiere de una máquina de moldeo por inyección, de un molde, y de una unidad que controle la temperatura del molde como se muestra en la Figura 1, para que con ello funcione adecuadamente con la mínima cantidad de datos confiables.

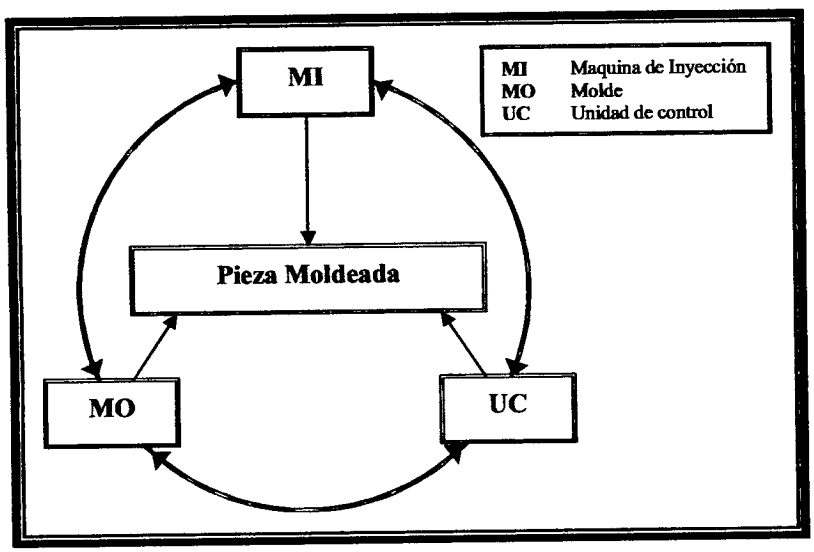

Figura 1. Esquematización de la interacción de sistemas en moldeo por inyección [2].

Estos tres componentes ejercen una influencia directa en el proceso de fabricación y determinan su éxito. Obviamente dentro de ellos se consideran variables como la presión, la temperatura, velocidad y tiempos de aplicación en las distintas etapas, todo ello sin contar la influencia de la naturaleza de la materia prima que se utilizará para la manufactura [2].

2.2.- Variables de control de proceso de moldeo por inyección

Las variables del proceso de moldeo por inyección son cuatro, velocidad, temperatura, presión y tiempo, estas variables deben de ser aplicadas en distintas magnitudes y proporciones durante el ciclo de transformación.

2.2.1.- Presión

Las diferentes clases de presión son de gran importancia durante el proceso del moldeado por inyección, ya que una insuficiente presión puede ocasionar defectos en la pieza.

Presión de inyección; una de las variables que afectan directamente la calidad de la pieza moldeada. Esta se define como la fuerza máxima que puede ejercer el tornillo sobre el material plástico. Dicha presión es la que obliga al material fundido a introducirse en las cavidades del molde. La presión es proporcionada por el sistema de potencia de la maquina para vencer la resistencia al flujo del material en la boquilla, el sistema de corredores y la cavidad. Generalmente la presión de inyección incrementa en un periodo corto de tiempo, de una presión mínima a una magnitud que corresponde con la resistencia al flujo del fundido desde la boquilla hasta la cavidad.
Se recomiendan mediciones de la presión de inyección en su variación con el ciclo de moldeo porque son simples de realizar y nos proporcionan información importante sobre las etapas de plastificación e inyección. La capacidad de controlar realmente la unidad de plastificación durante las etapas importantes del proceso es la recompensa por un esfuerzo pequeño [1].

Presión de la cavidad; el análisis de proceso del moldeo por inyección ha contribuido sustancialmente en el proceso del control del proceso. La presión en la cavidad juega un papel central en este sentido sobre todo para procesos tan susceptibles a cambios como el micromoldeó. El método de registro de la presión ha logrado un mayor nivel con el uso de transductores de presión basados en láminas de tensión o cristales piezoeléctricos. El registro de la presión bajo condiciones de producción severas se ha hecho posible y son conocidos

ciertos requisitos; como el que, todos los sensores en el molde deben ser instalados de tal forma que ningún conector quede fuera del contorno de la línea de partición [1].

En la Figura 2, se muestra información proporcionada por la curva de la presión de la cavidad donde es posible diferenciar tres etapas fundamentales: llenado de la cavidad (etapa de inyección), compresión del fundido (etapa de compresión) y llevar a cabo la solidificación del material bajo presión (etapa de sostenimiento).

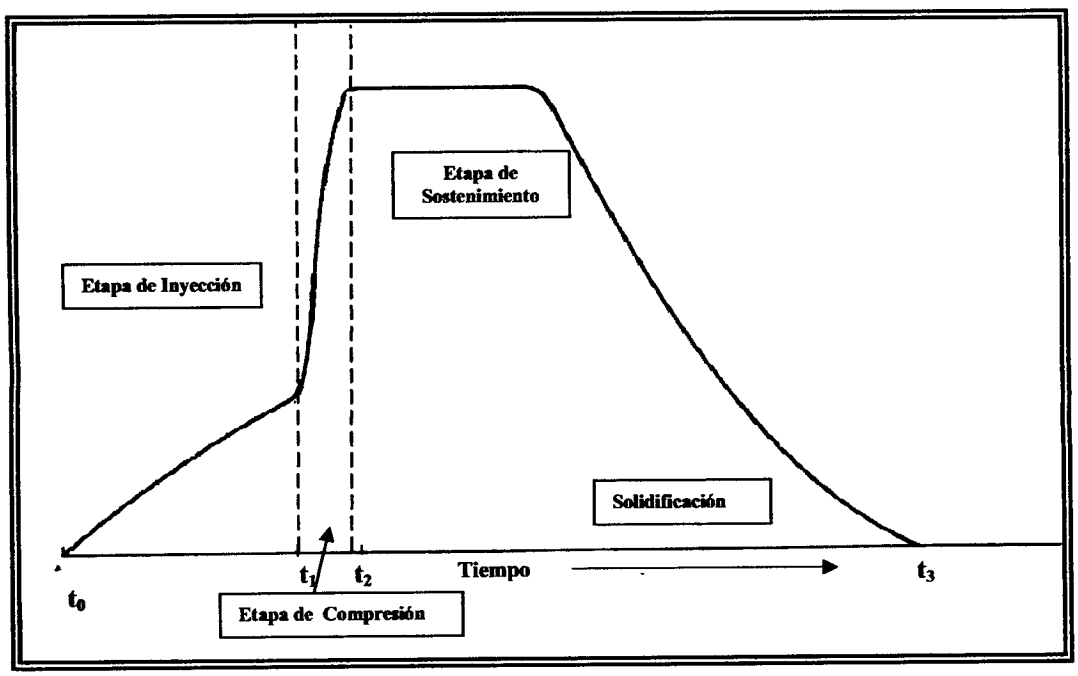

Figura 2. Curva de presión/tiempo en función cualidades del ciclo [1]

Presión de sostenimiento; es la presión ejercida en la pieza moldeada durante una etapa de presión secundaria [1].

2.2.2.- Temperatura

El adecuado control de las temperaturas del plástico fundido, y del líquido hidráulico, sobretodo de la temperatura del molde son de gran importancia para mantener las características y dimensiones constantes para la producción piezas moldeadas.

Temperatura del aceite hidráulico; las pérdidas de energía en válvulas así como eficiencia de la bomba dependen de la viscosidad del aceite hidráulico, por lo tanto, todos los movimientos de la máquina del moldeado por inyección, que no son efectuados por presión, son influenciados por la temperatura de aceite, por lo tanto, es necesario tener un control de la temperatura del aceite si se desea obtener piezas de alta calidad [1].

Temperatura del fundido; Si se aumenta la temperatura del fundido, la presión en el molde disminuye, la solidificación de la entrada cambia a periodos de tiempo mas cortos, esto significa que el tiempo durante el cual la formación de la pieza pude ser influenciada es acortado, obteniendo una reducción en el tiempo de ciclo.

Dependiendo de la viscosidad del fundido se pude dar un incremento en el tiempo de inyección, si esto puede ser evitado, podría ser usado un incremento automático o controlado de la presión hidráulica. Este ejemplo debería soportar la necesidad de una temperatura del fundido constante, aun si solo se puede encontrar un pequeño efecto con plásticos cristalinos.

Temperatura del molde; la temperatura de la pared de la cavidad es importancia para la calidad de la pieza moldeada, la economía del proceso, la exactitud de las dimensiones y la repetibilidad. Es esta temperatura la que, además de las características térmicas del material, determina el tiempo de enfriamiento; cabe mencionar que la temperatura de la superficie de la pared del molde es la que se toma en cuenta cuando se menciona la temperatura del molde. Con piezas delgadas menores a 2.5 mm de espesor de pared, se nota un claro incremento en la presión de forma temprana durante la etapa de inyección, esto se puede atribuir a un incremento en la viscosidad por el efecto del enfriamiento de la pared de la cavidad y la disminución del espesor del núcleo caliente del fundido. La magnitud de la presión máxima de

la cavidad cerca de la entrada es altamente afectada por la temperatura del molde, pero la presión de sostenimiento es como un resultado de los cambios en el proceso de enfriamiento [1].

2.2.3.- Velocidad

La única velocidad que es importante en el proceso de moldeo por inyección es la velocidad de avance del tornillo (el tornillo avanza de forma axial), la cual solo es efectiva durante la etapa de inyección.

Velocidad de avance del tornillo; el tornillo gira para ir llenando el barril con el material fundido necesario para la siguiente inyección. Parte del calor requerido para plastificar el plástico proviene del giro del tornillo. En la Figura 2 donde se presento la curva de presión contra tiempo, a diferentes velocidades del tornillo, se puede observar que el tiempo de inyección es inversamente proporcional a la velocidad del tornillo y también se puede ver que la presión hidráulica incrementa rápidamente con el aumento de la velocidad del tornillo; esto es debido al aumento de la resistencia al flujo en la boquilla y en la entrada. Por otro lado la pérdida de presión al llenar la cavidad, que es medida cerca de la entrada, incrementa con la disminución de la velocidad de inyección, reflejando el efecto del proceso de enfriamiento, esto ultimo causa un incremento en la viscosidad del fundido en la cavidad durante la inyección y una formación más rápida de la superficie sólida, lo que reduce el espesor de canal disponible; esto a su vez impide la transmisión de presión, lo que se refleja por diferentes niveles de presión máxima en la cavidad. Si esto afecta la adaptación de la superficie de la cavidad, entonces la presión de sostenimiento deberá ser aumentada considerablemente para compensar una inyección lenta [1].

2.2.4.- Tiempos

El tiempo es una variable dependiente de las demás variables ya que en función de la calidad del material fundido, las presiones y las velocidades como directrices de distancias serán los tiempos ejercidos en el ciclo de moldeo por inyección [1].

2.2.5.- Efecto de las propiedades en la técnica de moldeo por inyección

Es necesario abordar las propiedades de los materiales plásticos, para poder entender su comportamiento al procesarlos mediante moldeo por inyección.

Propiedades físicas y mecánica; todas las variables mencionadas hasta ahora tienen un efecto directo o indirecto en las características mecánicas y físicas de partes moldeadas. Estas, no sólo dependen de la constitución química del material, si no también influyen otras características tales como fuerza, dureza, distorsión, estabilidad dimensional, y tendencia a agrietarse pueden variar la producción de una pieza moldeada. Esos factores que determinan la calidad de la pieza solo son reflejados en la estructura interna de la pieza moldeada, las características más importantes de los termoplásticos en el proceso son:

- *Orientación molecular.*
- *Tensiones residuales.*
- *Estructura y grado de cristalinidad (de materiales cristalinos o semicrristalinos).*
- *Orientación de llenado (en materiales cristalinos).*

Estos factores dependen del tiempo de residencia en el barril, la temperatura del fundido, y del esfuerzo de corte durante la inyección [1].

2.3.- Principales componentes de una máquina inyectora

En una maquina inyectora se pueden identificar diferentes partes fundamentales, las cuales normalmente se agrupan dentro de las siguientes unidades:

2.3.1.- Unidad de cierre

Este sistema consta de los dispositivos necesarios para la colocación, accionamiento y funcionamiento de las dos mitades del molde. La función principal de este sistema es sujetar el molde de inyección, suministrar el movimiento y la fuerza necesaria para mantener cerradas o abrir las dos mitades del molde. Sus principales partes son las columnas guías, platinas porta-moldes fijas y móviles y el mecanismo para apertura y cierre del molde.

La platina estacionaria frontal se encuentra fija a la base de la máquina normalmente ocupando la parte central de la misma y conectando por un lado, el sistema de inyección y por otro lado, el sistema de cierre.

Esta platina es la que soporta una de las mitades (la parte fija) del molde. La platina móvil soporta la otra mitad del molde. Ésta se mueve axialmente (hacia adelante y hacia atrás) sobre las columnas guía permitiendo que el molde se abra o se cierre dependiendo de la etapa del ciclo de inyección.

Mientras que la platina estacionaria trasera soporta el mecanismo de cierre de esta unidad y es sobre la cual se ejerce la fuerza de cierre para cerrar el molde.

El mecanismo de cierre es el encargado no solo de abrir y cerrar las partes del molde sino de ejercer la fuerza de cierre necesaria para que el molde no abra durante la etapa de inyección. Existen básicamente dos diseños diferentes en los sistemas de cierre utilizados; sistema mecánico con palancas acodadas y Sistema hidráulico [3,4].

2.3.1.1.- Sistema mecánico con palancas acodadas

En los sistemas de cierre mecánico la fuerza de cierre ejercida casi exclusivamente por un sistema de palancas articuladas que generalmente son accionadas hidráulicamente. Este sistema consta de un cilindro hidráulico relativamente pequeño cuyo pistón esta ligado a las barras primarias del sistema articulado. El movimiento para adelantar el pistón provoca a su vez el movimiento de las barras principales del sistema de la articulación dando a lugar al cierre del molde.

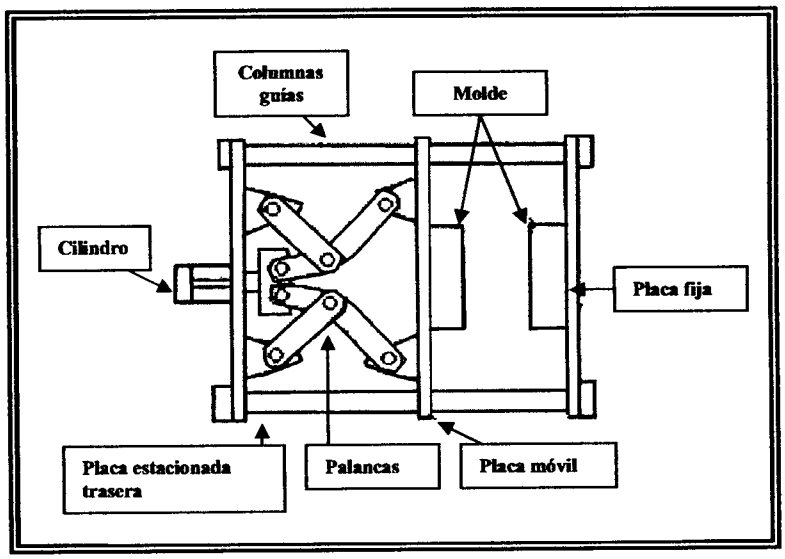

Figura 3. Mecanismo de cierre a base palancas [5].

2.3.1.2.- Sistema hidráulico

Este sistema usa un cilindro hidráulico para ejercer la fuerza de cierre, el cual generalmente se localiza en la parte central del sistema. El cilindro solidamente sujeto al plano móvil es el que ejerce las funciones de apertura y cierre.

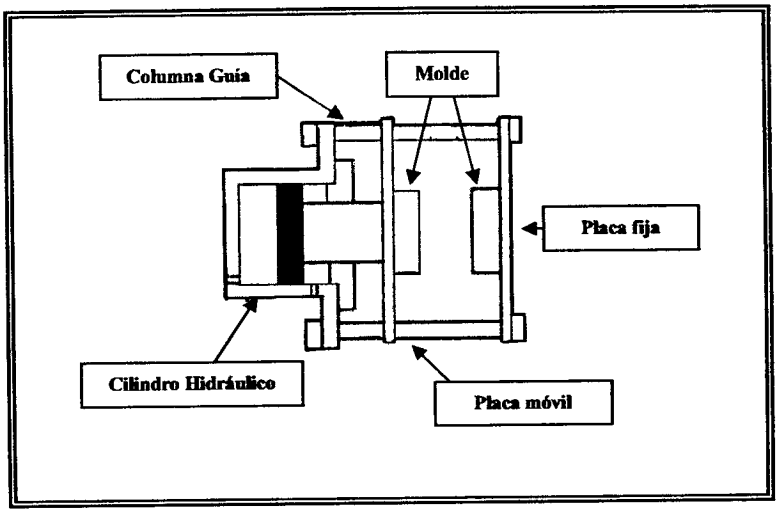

Figura 4.

Mecanismo de cierre hidráulico [5].

2.3.2.- Unidad de inyección

La unidad de inyección comprende las partes de la máquina necesarias para la carga, plastificación (fusión) y la inyección del plástico. La unidad de inyección realiza las funciones de cargar y plastificar el material sólido mediante el giro del tornillo, mover el tornillo axialmente para inyectar el material plastificado hacia las cavidades del molde y mantenerlo bajo presión hasta que sea inyectado. En la Figura 5 se presentas las partes principales que forman la unidad de inyección.

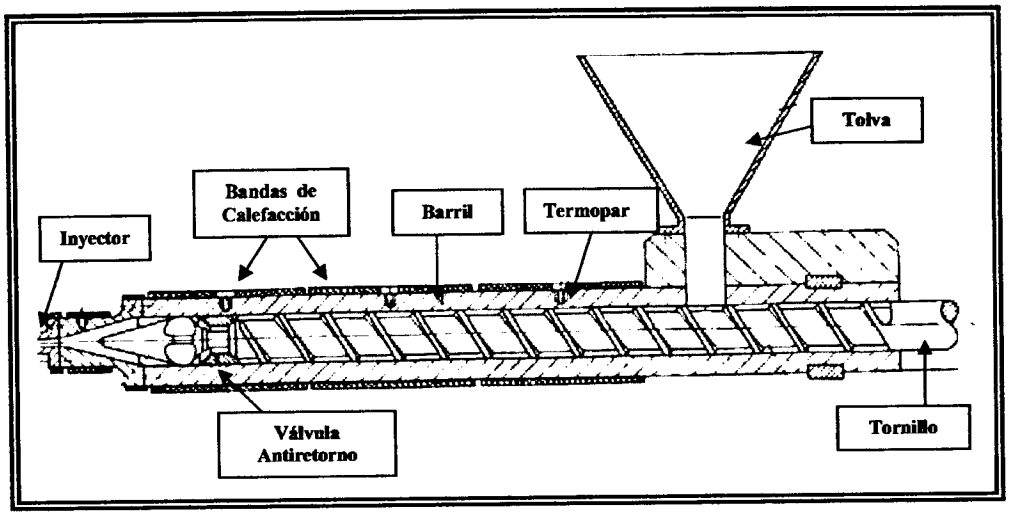

Figura 5. Partes principales de una máquina de inyección [6].

La unidad de inyección consta de un barril (o cilindro) de acero capaz de soportar altas presiones. Este va cubierto con bandas calefactores para calentar y fundir el material mientras avanza por el tornillo. El calentamiento del tornillo se hace por zonas y el número de zonas dependerá del tamaño del barril (normalmente se divide en 3 zonas).

Dentro del barril se encuentra un tornillo de un acero muy duro, el cual normalmente está pulido o cromado para facilitar el movimiento del material en su superficie. Este se encarga de recibir el plástico, fundirlo, mezclarlo y alimentarlo en la parte delantera hasta que se junta la cantidad suficiente para luego inyectarlo hacia el molde [7,8].

2.3.2.1.- Tornillo

El tornillo prevé un intercambio de calor entre el barril que se encuentra "caliente" y el material "frío", este fenómeno es conocido como plastificación, consiste en la fusión de la capa de material directamente en contacto con la superficie del barril, la cual transmite el calor, por convección forzada, al material sólido en las capas inferiores hasta que se plastifica completamente la masa de material.

Generalmente cunado el tornillo es largo, de una relación L/D de 24:1 no proporciona una adecuada homogeneidad en el fundido si no la degradación del plástico, por el largo tiempo de residencia [5]. Por ésta razón es necesario tener conocimientos del plástico o de los plásticos que se utilizan en el moldeo para anticipar su degradación y usar una relación adecuada L/D se recomienda de 22:1 a 26:1 [7].

El funcionamiento del tornillo consiste en separar el material fundido de los gránulos sólidos que aun no funden y ambos avanzan adentro dos canales paralelos posteriormente el canal se restringe para que el material se plastifique. Después de que se haya fundido el material por completo, es mezclado intensamente por esfuerzo de corte y la combinación del mezclador. En la Figura siguiente presentan las partes más importantes del tornillo.

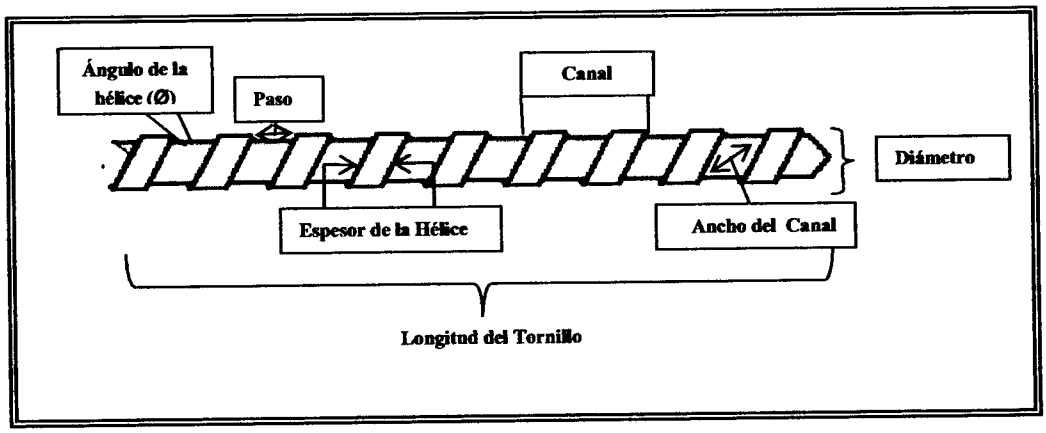

Figura 6. Principales partes del tornillo [7].

2.3.3.- Unidad de potencia

La unidad de potencia comprende el conjunto de dispositivos de la máquina necesarios para transformar y suministrar la fuerza motriz a las unidades de inyección y de cierre. Una gran parte de la energía necesaria para la plastificación del plástico es debida al calor de fricción suministrado hacia el material por el motor del tornillo a través del giro de este.

Por tanto, durante la etapa de alimentación se consume una gran cantidad de energía; requiriendo un motor adecuado para generar el alto torque inicial. Los principales tipos de sistemas de potencia se pueden clasificar como:

Sistema de potencia eléctrico; se utiliza generalmente en máquinas relativamente pequeñas. Se emplea tanto para el giro del tornillo como para la apertura y cierre del molde. La máquina emplea dos sistemas mecánicos de engranajes y palancas acodadas, uno para el cierre del molde y otro para el tornillo. Cada uno accionado por un motor eléctrico independiente. El accionamiento del tornillo cuando realiza la inyección lo ejecuta un cilindro hidráulico. En los sistemas con motor eléctrico, la velocidad puede ajustarse sólo en un determinado número de valores, lo cual puede ocasionar problemas en la reproducción de parámetros de operación y dificultar la obtención de piezas con una calidad constante. Los motores eléctricos generan grandes torques de arranque, por lo que debe tenerse precaución al usar tornillos con diámetros pequeños para evitar que se rompan [8].

Sistema de potencia hidráulico; los motores hidráulicos son los más comúnmente utilizados, su funcionamiento se basa en la transformación de la potencia hidráulica del fluido en potencia mecánica. A diferencia de los sistemas electromecánicos, donde la potencia es transmitida a través de engranajes y palancas, en un sistema con fluidos estos elementos se sustituyen, parcial o totalmente, por tuberías de conducción que llevan el fluido a presión a los pistones de inyección y de cierre del molde.

El fluido que más se utiliza es el aceite debido, principalmente, a sus propiedades lubricantes en aplicaciones que involucran grandes cargas. Las ventajas del motor hidráulico con respecto al eléctrico pueden resumirse principalmente en:

- Fácil variación de velocidades, regulando el volumen de fluido.
- La relación entre el torque y la velocidad es aproximadamente lineal. El límite de torque se determina por la presión limitante y el torque de arranque es aproximadamente igual al de funcionamiento.
- Permite arranques y paradas rápidos debido al pequeño momento de inercia.

- Permite relaciones bajas de peso potencia, lo que posibilita alcanzar altas velocidades de inyección del material [9].

2.3.4.- Unidad de control

La unidad de control de una máquina del moldeo por inyección abarca desde los controles, las temperaturas del barril y del molde, la presión del aceite y índices de corriente de una manera tal que estén generados y disponibles en la magnitud y la dirección requeridas en el tiempo determinado durante la secuencia lógica de un ciclo o de ciclos consecutivos.
Además, el diseño de la unidad de control tiene que tomar en la consideración, todas las funciones principales, tales como la apertura o el cierre del molde. Mientras tanto todos los datos relevantes del proceso del moldeado se registran y se almacenan. Esto también se hace para documentar la calidad de la producción. Por lo tanto, el objetivo de la unidad de control es la supervisión del proceso y de la calidad en el producto final [10].

En la figura 7 se resume los métodos básicos que influyen y determinan el control del proceso de moldeo por inyección. Actualmente los métodos esenciales pueden ser clasificados como:

- *Control manual (mini— máquinas)*
- *Control electromecánico*
- *Control de los circuitos electrónicos y el ajuste manual*
- *Control de programas definidos*
- *Control de algunos parámetros importantes (velocidad y presión)*
- *Control de programación de circuito o lazo abierto*
- *Control del circuito cerrado*

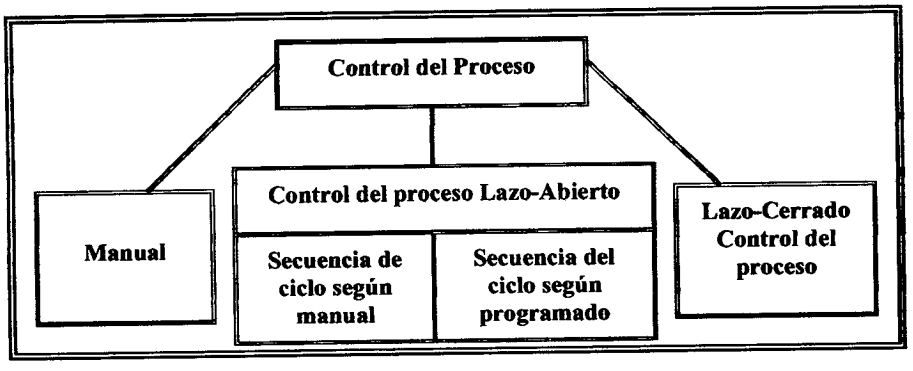

Figura 7. Métodos básicos para el control del moldeo por inyección [11].

El control y la optimización de proceso son registrados por una computadora pequeña de cada máquina o por una computadora central que supervisaba todas las máquinas [12, 13].

2.3.4.1.- Control del circuito abierto

En un control de circuito abierto las señales entradas (de la referencia) se modulan en una señal de la salida (control) de acuerdo con la interrelación del sistema. Es caracterizado por una secuencia abierta de acciones a través de los elementos individuales de la transferencia de la cadena de control [14].

En la Figura 8 se presenta el diseño de control de circuito abierto donde el desplazamiento del tornillo tiene que ser constante además algunas variables como son; la velocidad del giro del tornillo x, esta velocidad es controlado por la válvula en la posición la presión del aceite z_1, la temperatura del aceite z_2, y la fuerza z_3, actuando contra el desplazamiento del tornillo afectando la velocidad.

Aunque la presión del aceite varíe, la velocidad del tornillo con la que desplaza puede mantenerse constante si se ajusta la válvula por consiguiente el mecanismo de control.

Así un control de circuito abierto dará lugar a la inyección de un fundido constante, previniendo la influencia de otras variables como: aceite, la temperatura del molde que afectan la viscosidad del material del moldeado.

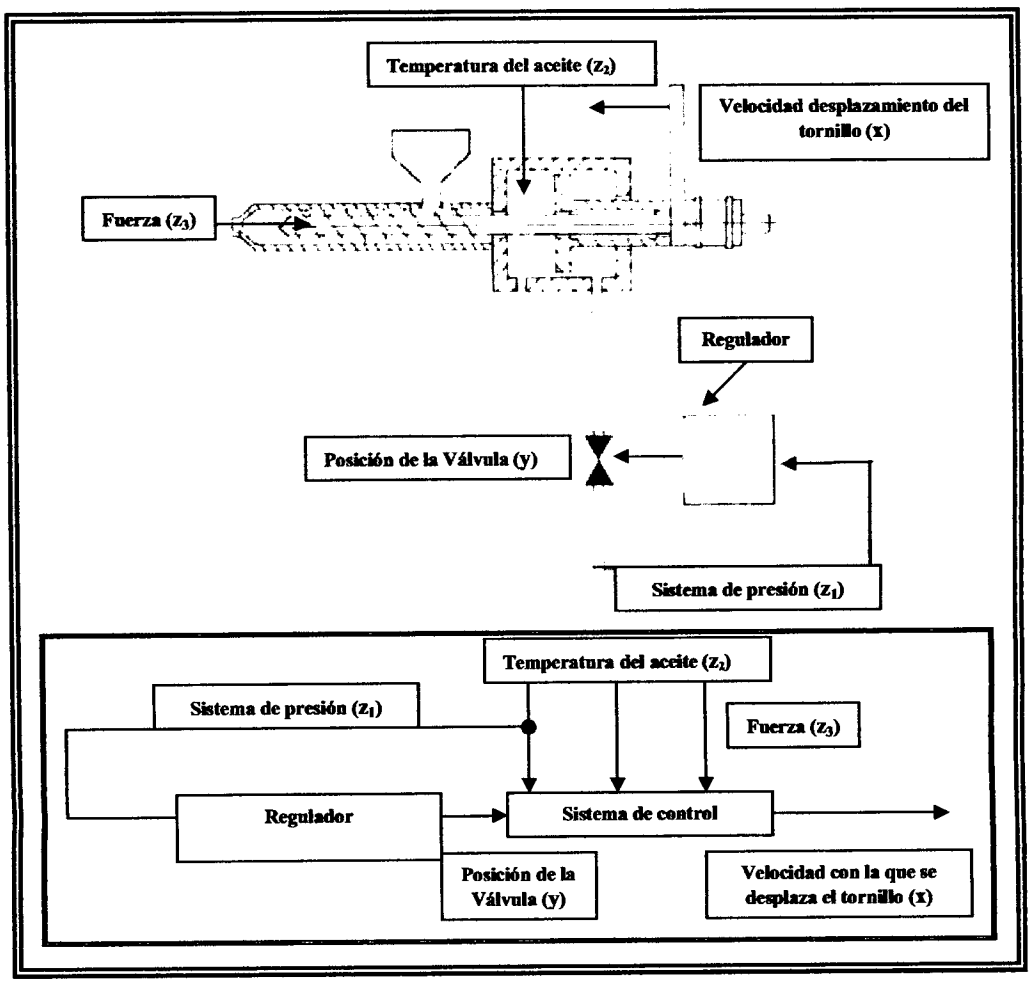

Figura 8. Sistema de abierto [15]

2.3.4.2.- Control del circuito cerrado

Un sistema a circuito cerrado compara la señal de la salida (control), con la señal de la entrada (referencia). Cualquier desviación que resulta del sistema producción se utiliza para controlar y corregir la salida [13]. El movimiento axial del tornillo servirá otra vez como ejemplo para la operación de un control a circuito cerrado. La variable x (velocidad real del desplazamiento del tornillo) se compara que el valor w. En la velocidad del sistema un regulador determina la diferencia entre el punto de ajuste y el valor real efectuando la posición de la válvula de una manera tal que la diferencia se convierta en cero. Así se corrigen y se elimina la influencia de la presión del aceite z1.

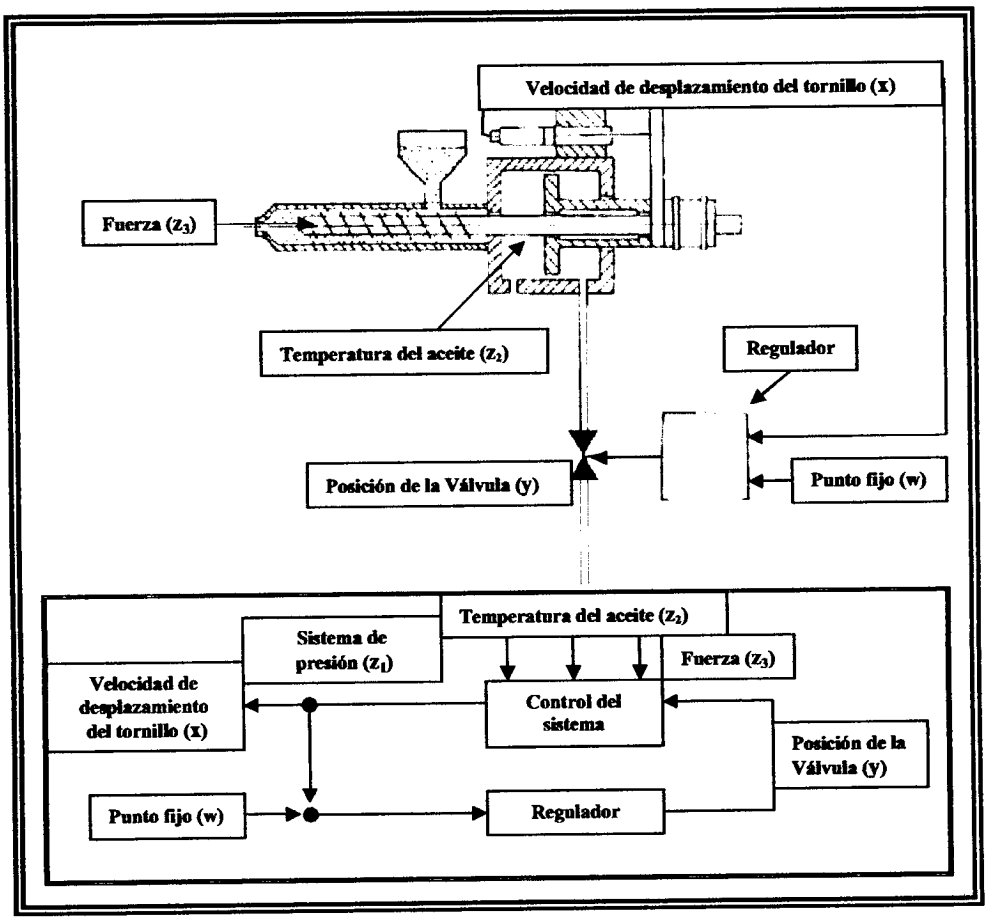

Figura 9. Sistema de cerrado [15]

2.3.4.3.- Control de la temperatura

El material a procesar es fundido dentro del barril, este procedimiento es crítico en el proceso de la inyección y de la calidad del producto final. Es de gran importancia tener un adecuado control de las temperaturas del proceso como:

- *Temperatura del barril.*
- *Temperatura del material fundido.*
- *Temperatura del líquido hidráulico (aceite.)*
- *Temperatura de las piezas.*
- *Temperatura del molde.*
- *Temperatura del sistema del colada-caliente.*
- *En algunos casos la temperatura ambiente puede tener un efecto.*

Todas estas temperaturas son medidas para después ser controladas adecuadamente, dando como resultado una temperatura uniforme y constante en el material fundido aunque existen otras temperaturas que pueden afectar al fundido como; la temperatura del material inicial, la temperatura de la tolva al alimentar el material, y hasta la temperatura del mismo material utilizado [1].

El control de la temperatura es probablemente el punto de partida de desarrollo de automatización en el proceso de los plásticos en la industria.

2.3.4.4.- Control de la presión

Para una buena homogeneización del fundido, es necesario un adecuado control de la temperatura, de la presión trasera y de la velocidad de giro del tornillo. El control de la presión de la cavidad se lleva por un sensor que es insertado cerca de la boquilla, también nos permite una medida indirecta de la presión del fundido.

Otro método de determinar la presión de la cavidad es medir la extensión de las barras durante el llenado del molde.

La etapa de pos-presión o de sostenimiento tiene la finalidad de llenar por completo todo el contorno de acuerdo con la cavidad pero esto también genera rebaba si excede esta presión. El objetivo de controlar esta presión en el proceso es obtener una adecuada y constante pos-presión, hasta el proceso de moldeo por inyección mas antiguo trabaja a inyección y presión constantes, actualmente las máquinas permiten la programación de un adecuado ajuste de la presión [15].

2.3.4.5.- Componentes de la unidad de control

La unidad de control son elementos eléctricos y electrónicos, se compone de interruptores, contadores de tiempo (sincronización análoga y digital), microprocesadores y multiprocesadores, motores eléctricos. Todos estos componentes deben proporcionar la secuencia oportuna y deseada de presiones, y de las velocidades durante el ciclo del moldeado. Esto requiere un control adecuado de las válvulas de la presión, y de los reguladores de corriente del sistema hidráulico o de los elementos de expulsión electromecánicos.

Cada uno de estos controles puede lograr el adecuado funcionamiento de las operaciones del moldeo de inyección. Algunas causas que pueden afectar el control adecuado son:

Naturaleza humana:

- Operación no autorizada en los elementos del control,
- Las acciones correctiva, dan lugar a la desviaciones de datos en sistema (eje. apertura y cierre manual).

Ambiente:

- Variaciones locales de la temperatura (durante el día, estacional),
- Cambios en humedad,
- Contaminación.

Tecnología:

- Sistemas hidráulicos y elementos de control,
- Defectos del molde,
- Temperatura (aceite, barril, molde), temperatura del material fundido.
- Fluidez del material.

Con respecto a las causas, la de naturaleza humana, toma una posición principal y contribuye a un grado considerable a los rechazos o a la calidad del producto por su incapacidad de realizar el control necesario manualmente mientras un inadecuado control de la temperatura dará por resultado imperfecciones en la pieza moldeada. Así, se puede concluir que un paso importante en la mejora continua de la calidad, es eliminando las causas que afectan un adecuado control [1].

2.4.- Ciclo de inyección

El ciclo de inyección es la secuencia de operaciones para la producción de una pieza y comprende las siguientes etapas:

*Primera etapa; s*e cierra el molde vacío, mientras se tiene lista la cantidad de material fundido, que se va a inyectar, dentro del barril de la máquina. El molde normalmente se cierra en varias etapas: primero con alta velocidad y baja presión deteniéndose antes de que hagan contacto las platinas, posteriormente se mueve a baja velocidad y baja presión hasta hacer contacto las platinas y por último a alta presión hasta alcanzar la fuerza de cierre necesaria para que el molde no se abra durante la inyección [16].

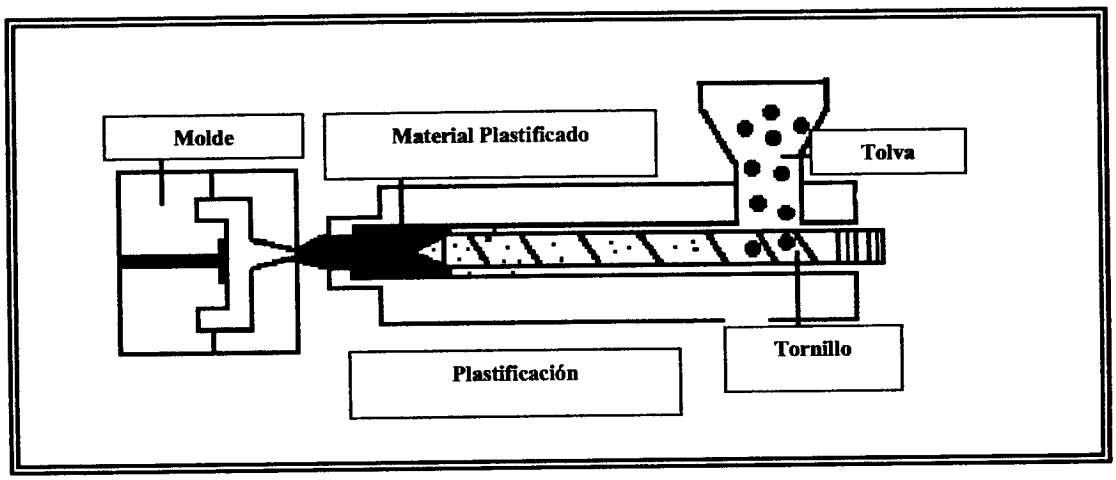

Figura 10. Cierre del molde y comienzo de la inyección [16].

Segunda etapa: en la Figura 11, la inyección del material mediante el tornillo, el cual actúa como un pistón (sin girar) forzando el material a pasar a través de la boquilla, hacia las cavidades del molde, con una determinada velocidad y presión de inyección.

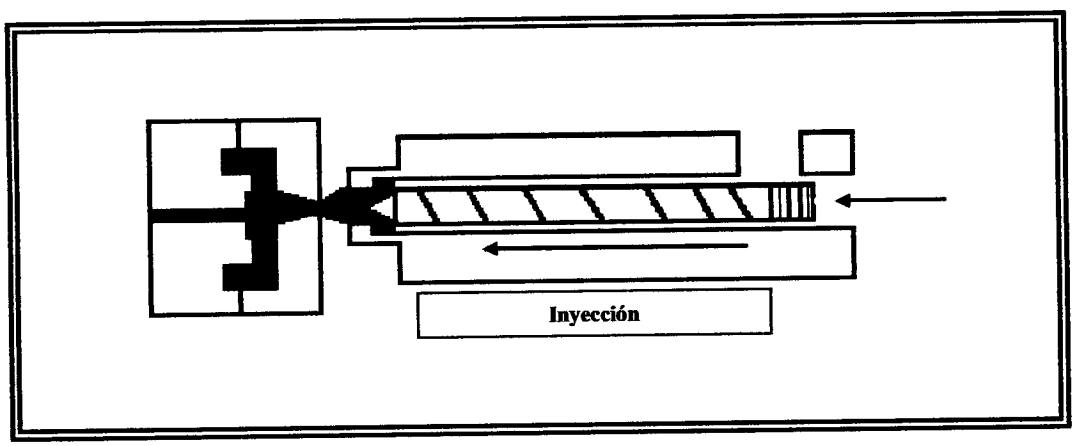

Figura 11. Inyección del material hacia el molde [16].

Tercer etapa; en la Figura 12 una vez terminada la inyección, se mantiene la presión sobre el material inyectado en el molde, antes que solidifique, para contrarrestar la contracción de la pieza durante su enfriamiento, esto se conoce como aplicar la presión de sostenimiento o post-presión (también conocida como presión de compactación o de recalque) y normalmente se aplican valores menores a los de inyección. Una vez que comienza a solidificar la pieza se puede liberar la aplicación de esta presión.

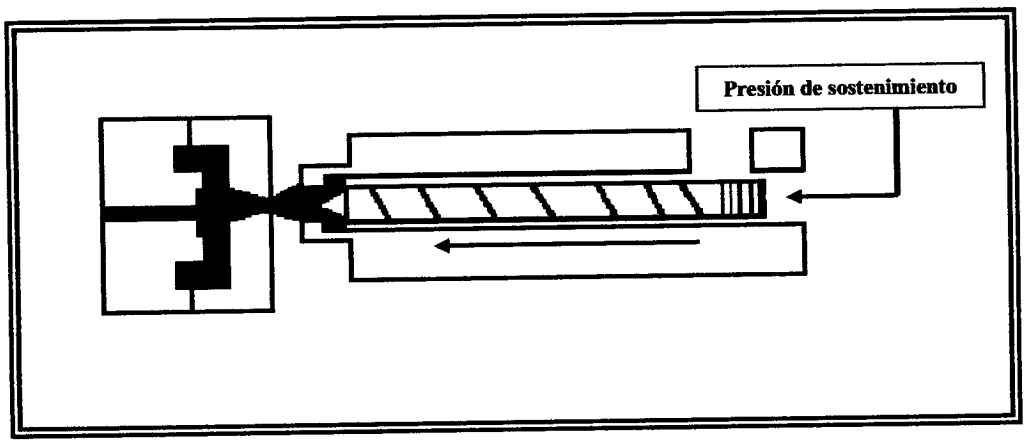

Figura 12. Aplicación de la presión de sostenimiento [16].

Cuarta etapa; en la Figura 13 se inicia el giro del tornillo. Al ir girando va tomando gránulos sólidos de la tolva y los va fundiendo (plastificando) con el calor generado por la fricción al girar el tornillo y por el suministrado por las bandas calefactoras.

Posteriormente hace pasar el material fundido a la parte delantera del tornillo por lo que comienza a desarrollarse presión contra la boquilla cerrada orillando a que el tornillo se retraiga (se mueva hacia atrás) mientras sigue girando hasta acumular (dosificar) en su parte delantera, la cantidad de material fundido necesaria para la siguiente inyección.

Al término de esta dosificación, el material puede descomprimirse retrocediendo ligeramente el tornillo para evitar que el material se tire por la boquilla, antes de ser inyectado [16-21].

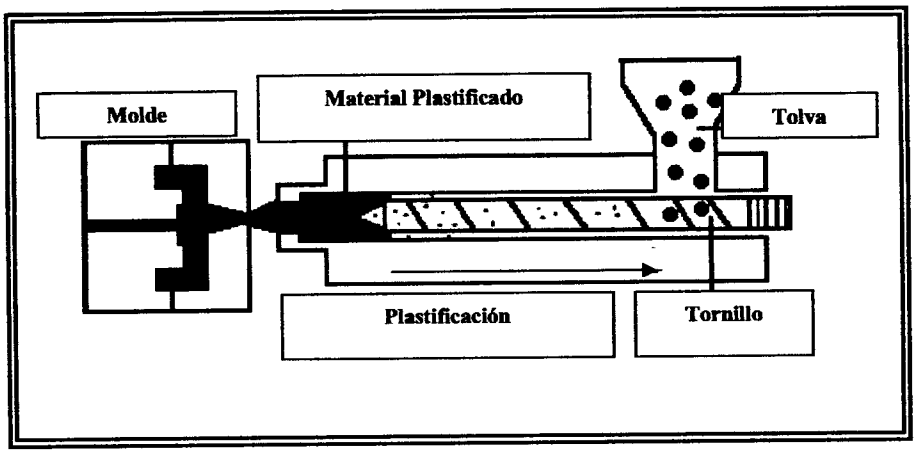

Figura 13. Plastificación del material para la siguiente inyección [16].

Quinta etapa; en la Figura 14 el material dentro del molde continúa enfriando, transfiriendo su calor hacia el molde de donde es disipado por el líquido de enfriamiento. Una vez que ha terminado el tiempo de enfriamiento, se abren las dos partes del molde y el mecanismo de expulsión extrae la pieza.

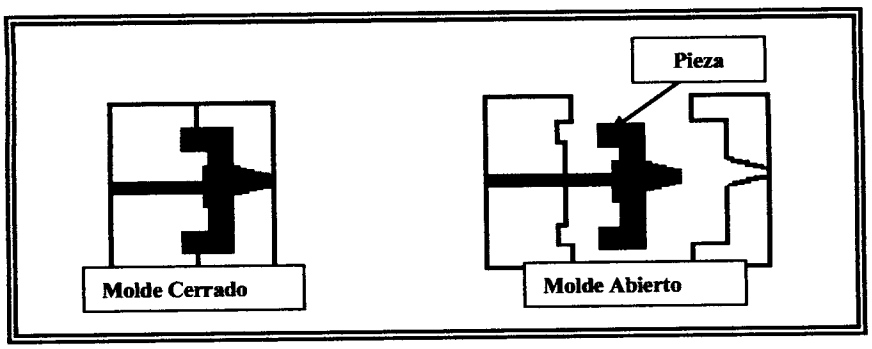

Figura 14. Enfriamiento y extracción de la pieza [16].

*Sexta etapa; e*l molde cierra de nuevo y el ciclo se repite [16-21].

3.- ESTADO DEL ARTE DE MOLDEO POR INYECCIÓN CIENTÍFICO

El moldeo por inyección, es el proceso de transformación más utilizado para la manufactura de piezas plásticas [22]. Durante años las innovaciones en el proceso lo han llevado a ser un proceso de mejores alcances con perspectivas de sustentabilidad mayores. Cada marca de equipo de transformación ofrece distintas mejoras técnicas en el mismo año tras año, podemos decir entonces que en promedio las empresas cuentan con maquinas de moldeo de los 90`s a la fecha con maquinas que tienen un buen control estadístico del proceso. Si las empresas no aprovechan esa tecnología subemplean el equipo.

Desde hace algunos años a nacido el concepto de moldeo por inyección científico y de los precursores de este concepto es el Sr. John Bozzelli, básicamente el concepto se basa en que la maquina debe de ser utilizada en su tecnología al máximo de capacidades, en el supuesto que la maquina no cuente con la tecnología, se le tendrá que adaptar [23].

Todo cambio que suceda en el proceso, maquina-molde-material, deberá de ser soportado por información estadística que permita asegurar al producto ante el cliente.

Otros de los pioneros en el área son RJG Technologies fundado por Rodney J. Groleau [24], que es reconocido con el intrumentador más importante de moldeo por inyección científico en el mundo actual.

Las optimizaciones que han realizado estas empresas en el tema son documentadas por ellos mismos y expuestas en sus servicios WEB, pero nunca por medios de difusión arbitrados o al menos referenciados.

La viabilidad de controlar el proceso con mayor confiabilidad y repetitivilidad es definitivo para el concepto de moldeo por inyección científico, por lo que se aboco a buscar los requerimientos técnicos y técnicas de control y monitoreo del proceso de moldeo por inyección.

Los requisitos técnicos de los componentes moldeados por inyección científico exigen un nivel aumentado de funcionamiento de proceso, y con tecnologías correspondientes del control y del control de procesos operativos.

Para obtener el nivel crítico deseado a las cualidades de la calidad (CTQs) de los productos moldeados, el proceso del moldeo a presión debe ser diseñado concienzudamente en función a las variables de proceso dominantes (KPVs), las cuales son observables y controlables.

La falta de entender y de controlar la compatibilidad entre los KPVs y CTQs puede dar lugar a niveles indeseables de defectos durante la producción, a niveles inalcanzables de precisión exigida, y a la imposibilidad de alcanzar un nivel técnico y/o económico para el uso del moldeo por inyección.

La primera máquina controlada por ordenador moderna del moldeo a presión fue descrita por Carl Ma en 1974 mientras que estaba empleado en Cincinnati Milacron [25]. El trabajo de Carl Ma llevó al desarrollo de los sistemas de control modernos para las máquinas del moldeo a presión y permitió los sistemas de control a circuito cerrado actuales para la velocidad y la presión de la inyección con torqué máximo [26].

Desde entonces, la mayoría de los fabricantes de la máquina han adoptado el uso de los reguladores programables estándar en los cuales los módulos múltiples de entrada análoga y salida digital se utilizan para adquirir o para transmitir señales necesarias de la regeneración y de control. Las señales de control se pueden generar a través del módulo de un CPU en el PLC o alternativamente con el uso de los reguladores de eje para una respuesta más rápida. Cada vez más, las PC industriales se están utilizando como interfaz entre el regulador de proceso y el operador, tal que la PC proporciona facilidad de empleo, los diagnósticos y mantenimiento de proceso, conectividad de la red, incremento y acceso a un mayor numero de personas para el control del proceso [27].

En un esfuerzo para mejorar el funcionamiento del control de máquina, métodos de control más sofisticados que el PID se han investigado. Por ejemplo, Pandelidis y Agrawal demostraron el uso del control de ecuación cuadrática linear a la velocidad de seguimiento del torque máximo del proceso [28]. Tsai y el Lu desarrollaron un regulador predictivo auto ajustable multivariable para mejorar funcionamiento, el factor de ruido en el control de las variables, temperatura y presión, así como la robustez de seguimiento de las variables de partida de un sistema del control de temperatura para un barril de inyección [29].

Los distintos fabricantes de máquinas de moldeo por inyección han propiciado la mejora de sus reguladores, y han incorporado técnicas del control adaptable [30. 31] y algoritmos de auto-adaptación en los reguladores del PID [32, 33]. Como ello, el control de la máquina esta y continúa mejorando.

Las dos variables dominantes que definen el estado del fusión/plastificación son la temperatura y presión. Las estrategias típicas usadas para el control de la temperatura de de fusión/plastificación han sido discutidas por Dubai y por Gomez y colaboradores [34, 35]. Trabajos en los cuales el esfuerzo principal ha sido identificar el método de control con el que se puede alcanzar una mejor temperatura de fusión. Además de definir la carencia de un método sistémico para especificar la temperatura del fusión exacta, el control de la temperatura del fusión sufre de la ausencia de sensores confiables para su medida debido a las perdidas de calor que muestra el material metálico del que estas compuestos los equipos.

Hay limitantes en la mejora de la tecnología como ejemplo, las puntas de prueba de termopar incrustadas en el torrente viscoso se deterioran rápidamente [36], y los pirómetros infrarrojos no calibran automáticamente con los cambios en color de la resina, emisibilidad y saturación [37].

Otra variable de estado fundamental que se debe regular durante el ciclo de moldeo es presión de la cavidad. El control a circuito cerrado de la presión de la cavidad podría compensar automáticamente variaciones en viscosidad del fundido y la presión de inyección hasta alcanzar un sistema constante y uniforme en las cualidades del producto [38].

Mann introdujo uno de los primeros esquemas de control de presión usando las válvulas de descarga de presión moduladas [39], y Abu Fara desarrolló un modelo de control de proceso relacionando la respuesta de presión de la cavidad a las perturbaciones de lazo abierto [40]. Srinivasan utilizó más adelante estos modelos para proponer un regulador inteligente para el control de presión a circuito cerrado de la cavidad [41].

Los métodos de control adaptante también se han propuesto para seguir perfil de la presión de la cavidad generalmente en una localización del moldeo [42-44].

Como se puede observar la cantidad de investigaciones reportadas se enfocan en la mejora del sistema de control con la idea que las empresas tienen la capacidad del uso de ella al 100%.

La idea de moldeo por inyección científico como tal no presenta más que ser una acumulación de información y su análisis adecuado.

4.- ÁREAS DE OPORTUNIDAD

Las referencias demuestran que existe una demanda sobre el análisis total de las variables del proceso en función a la dependencia de las cualidades de las piezas plásticas, para un solo caso, por lo que se presume que conforme evolucione la calidad de estas publicaciones se aproximaran a lo que se define como moldeo por inyección científico. Podemos definir las siguientes áreas de oportunidad:

- Modelos de control predictivo para el proceso.
- Elementos para la obtención de datos del proceso en el torrente de flujo viscoso.
- Analizadores de datos que retroalimenten correcciones al proceso.

5.- CONCLUSIONES

- Moldeo de inyección científico, se define como un proceso en el que se busca estandarizar la formación de piezas plásticas idénticas y constantes, a través del estudio de las variables de control de material plástico en fundido y las cualidades de las piezas a formar.

- El moldeo por inyección científico es un proceso enfocado en el control de viscosidad y fundido del material, por medio del control del proceso como; Temperatura del material, Velocidad Inyección, Presión de la cavidad, enfriamiento.

- La técnica de moldeo científico, exige un aumento en el nivel de funcionamiento del proceso además de un alto nivel de tecnologías del control y del control de procesos operativos. El moldeado científico eficaz requiere los niveles crecientes de capacidad de proceso, condiciones de funcionamiento eficientemente.

6.- RECOMENDACIONES

- Teniendo el proceso moldeo por inyección científico, primero deberá hacerse un análisis de situación en la que se encuentra, para definir el proceso de actualización.

- Definida la situación en la que se encuentra el equipo, analizar las distintas opciones de actualización a las que se pueda recurrir.

- Generar las actualizaciones y buscar eliminar el cambio en parámetros por factor humano.

- Buscar la oportunidad de generar banco de datos para el análisis de la información obtenida de la actualización del proceso.

- Analizar la repetitividad entre distintos equipos de moldeo por inyección que manufacturen la misma parte plástica.

7.- NOMENCLATURA

MI	Maquina inyectora
MO	Molde de inyección
UC	Unidad de control
t	Tiempo
mm	Milímetros
L/D	Relación de la longitud respecto al diámetro de un tornillo
x	Velocidad de giro del tornillo
z_1	Presión del aceite
z_2	Temperatura del aceite
z_3	Fuerza
w	Punto fijo
y	Posición de la válvula
CTQs	Nivel Critico deseado a las Cualidades de la Calidad
KPUs	Variables Dominantes del proceso
CPU	Unidad de Control de Procesamiento
PLC	Computadora Lógica Programable
PC	Computadora
PID	Puerto Paralelo para Datos

8. - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. F. Johannaber.: Injection Molding Machines 1994. **1** p. 22

2. Catic, I.: Kunststoffe - German Plastics 1975. **65** p. 121

3. Steinbüchl, R.: Bestimmung der Verweilzeil beim Spritzgiben technischer Thermoplaste, ATI No. 634 Bayer AG.

4. Eberhard, L.: Swiss Plastics 1990. **12** 6, p.19

5. Langecker, G.: Verbesserte Qualität bei höherer Plastifizierleistung-ein Widersprunch Print. Information Battenfeld, 10/87

6. Rheinfeld, D.: Plastverarbeiter 1978. **29** p.413

7. Renger, M.: Kunststoffe-German Plastics 1989. **79**(11), p.1113

8. Michaeli, W., Breuer, P., Hohenauer, K., Von Oepen, R., Philipp, M., Pötsch, G., Recker, H., Roberts, Th., Vaculik, R.: Kunststoffe-German Plastics 1992 **82** (12) p.1167

9. Wunck, Ch.: Diss. RWTH Aachen, 1991

10. Bürkle, E.: Diss. RWTH Aachen, 1989

11. Gissing, K.: Diss. Motanuniversität Leoben / Aus.

12. Colloquium IKV Aachen, reprint 1992

13. Sitz, S., Hengsbach, H. A.: Plastverarbeiter 1974. **25** p.201

14. Stiz, S., Hengesbach H.A. Pütz, D.: Kunststoffe- German Plastics 1973. **63** p. 777

l

15. Recker, H., Spix, L.: Kunststoffmaschinenführer, 3rd ed. Hanser, Munich, New York, 1992

16. Just, B.: Bosch, Techinical Report 1981. **7** (3), p.104

17. .- Paffrath, H.W., Rupprecht, L.: Plastverarbeiter 1982. **7**, p.416

18. Johannaber, F.: Kunststoffe-German Plastics 1984. **74** (1) p. 2

19. Lampl, A., Gissing, K., Painsith, H.: Plastverarbeiter 1083. **34** p.427

20. Gissing, K., Lampl, A.: Plastverarbeiter 1983. **34** (5), p.427

21. Anders, S., Salewski, K., Steinbüchl, R., Rupprecht, L.: Kunststoffe-German Plastics 1991. **81** p.576

22. Freedonia group, Injection Molding Market 2007 No. 20798.

23. Adopting "Scientific Molding" methodology in a simulation. G.A. Britton., J. of Inj. Molding. Techn. December 2002. p 305

24. Scientific Molding, Part 1. The Filling, Injection Molding Magazine, Jeff Sloan, October 1997. p. 67

25. Ma, C.Y.W., A Design Approach to a Computer-Controlled Injection-Molding Machine. Polymer Engineering and Science, 1974. **11** p. 768-772.

26. O'Bryan, J.E., Injection molding machines meet automated manufacturing demands. Proportional valves, microprocessors, and closed-loop control keep plastics molders competetive. Hydraulics & Pneumatics, 1989. **42** (3) p. 95.

27. Sparer, R.M. and D.P. Werle, Logic controlled plastic molding machine with programmable operator interface. 1991, Cincinnati Milacron, Inc.

28. Pandelidis, I.O. and A.R. Agrawal, Optimal Anticapatory Control of Ram Velocity in Injection Molding. Polymer Engineering and Science, 1988. **28** (3) p. 147-156.

29. Tsai, C.-C. and C.-H. Lu, Multivariable self-tuning temperature control for plastic injection molding process. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998. 34(2): p. 310-318.

30. Yang, Y. and F. Gao, Adaptive control of the filling velocity of thermoplastics injection molding. Control Engineering Practice, 2000. 8(11): p. 1285-1296.

31. Lu, C.-H. and C.-C. Tsai, Adaptive decoupling predictive temperature control for an extrusion barrel in a plastic injection molding process. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001. 48(5): p. 968-975.

32. Zhang, W.D., Y.X. Sun, and X.M. Xu. Modified PID controller based on H infinity theory. in IEEE International Conference on Industrial Technology. 1996.

33. Tan, Y. and R. De Keyser. Auto-tuning PID control using neural predictor to compensate large time-delay. in IEEE Conference on Control Applications. 1994. Glasgow, UK

34. Dubay, R., A.C. Bell, and Y.P. Gupta, Control of plastic melt temperature: A multiple input multiple output model predictive approach. Polymer Engineering and Science, 1997. 37(9): p. 1550-1563.

35. Gomes, V.G., W.I. Patterson, and M.R. Kamal, Injection Molding Study: Evaluation of Alternative Control Strategies For Melt Temperature. Polymer Engineering and Science, 1986. 26(12): p. 867-876.

36. McCullough, T.W. and M.A. Spalding, Predicting actual temperature distributions in a polymer stream using an adjustable-depth, exposed-tip thermocouple assembly. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1997. 16(17): p. 1622-1630.

37. Lai, G.-Y. and J.X. Rietveld, Role of polymer transparency and temperature gradients in the quantitative measurement of process stream temperatures during injection molding via IR pyrometry. Polymer Engineering and Science, 1996. 36(13): p. 1755-1768.

38. Langkamp, U., Pressure and temperature sensors. Kunststoffe Plast Europe, 1996. 86(12): p. 1804-1812 German.

39. Mann, J.W., Process Parameter Control: the Key to Optimization. Plastics Engineering, 1974. 30(1): p. 25-27.

40. Kamal, M.R., et al., Dynamics and Control of Pressure in the Injection Molding of Thermoplastics. Polymer Engineering and Science, 1987. 27(18): p. 1403-1410.

41. Gao, F., I.A.N. Patterson, and M.R. Kamal, Self-tuning cavity pressure control of injection molding filling. Advances in Polymer Technology, 1994. 13(2): p. 111-120. 36. Chiu, C.-P., M.-C. Shih.

42. J.-H. Wei, Dynamic Modeling of the Mold Filling Process in an Injection Molding Machine. Polymer Engineering and Science, 1991. 31(19): p. 1417-1424.

43. 37. Nunn, R.E. and C.P. Grolman, Closed Loop Cavity Pressure Control in Injection Molding. J. Reinforced Plastics and Composites, 1991. 9: p. 2121.

44. Kazmer, D.O. and P. Barkan, Multi-Cavity Pressure Control in the Filling and Packing Stages of the Injection Molding Process. Polymer Engineering and Science, 1997. 37(11): p. 1865-1879.