

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

**ESTUDIO DEL MODELO Y EL CONTROL ACTUAL DE
UNA MAQUINA EXTRUSORA DE P.V.C, DISEÑO Y
SIMULACION DE UNA ALTERNATIVA DE CONTROL**

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE

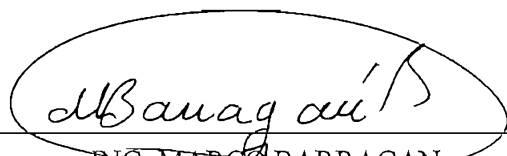
INGENIERO EN ELECTRONICA Y CONTROL

BYRON SANTIAGO MALES GUALLASAMIN

Quito, Diciembre, 1999

CERTIFICACION

CERTIFICO QUE EL PRESENTE TRABAJO DE TESIS HA SIDO DESARROLLADO EN SU TOTALIDAD POR EL SEÑOR BYRON SANTIAGO MALES GUALLASAMIN, BAJO MI DIRECCION.

A handwritten signature in black ink, enclosed within a hand-drawn oval. The signature appears to read "MBarragan".

ING. MARCO BARRAGAN
DIRECTOR DE TESIS

AGRADECIMIENTO

Al Dios Trino y uno, al Padre,
Jesucristo y el Espíritu Santo, a María
Virgen Santísima.

DEDICATORIA

A quien lo dejó todo por inculcarme amor y temor a DIOS PADRE, mi mamita tía Rosita Elvira Guallasamín Tipan.

Byron Santiago

ESTUDIO DEL MODELO Y EL CONTROL ACTUAL DE UNA MAQUINA EXTRUSORA DE P.V.C, DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ALTERNATIVA DE CONTROL

Indice

1.- INTRODUCCIÓN		Pagina
1.1	Importancia del tema	1
1.2	Justificación del tema	2
1.3	Objetivos y alcance	2
1.4	Contenido	3
II.- EXTRUSORES		
2	Introducción	6
2.1	El policloruro de vinilo pvc	6
2.1.2	Propiedades características	7
2.1.3	Propiedades térmicas	8
2.1.4	Estabilidad térmica, dinámica y curva de fusión	9
2.1.5	Gelificación y fusión del PVC	10
2.2	La extrusión	11
2.3	Tipos de extrusores	11
2.3.1	Extrusores monotornillo	12
2.3.2	Extrusores doble tornillo	12
2.3.2.1	Clasificación de los extrusores	13
2.3.2.2	Extrusores doble tornillo cónicos y super cónicos	15
2.3.3	Cabezales para extrusión de tuberías y perfiles	16
2.4	Equipos de Post – extrusión	17
2.4.1	Sistemas de calibración	17
2.4.1.1	Extrusión libre	18
2.4.1.2	Placas calibradoras	18
2.4.2	Baños de enfriamiento	19
2.4.3	Unidades de halado	20
2.4.4	Unidades de corte	21
2.4.5	Unidades de bobinación	21
2.4.6	Unidades de acampanado	22
2.4.7	Otros Equipos de post extrusión	23
2.5	Descripción del proceso de extrusión	23
2.5.1	Principios de la máquina extrusora	25
2.5.1.1	Eficacia de extrusión	28
2.5.1.2	Importancia de la fricción	32
2.5.1.3	Temperatura de la pared del cilindro	33
2.5.2	Funcionamiento de una máquina extrusora	34
2.5.2.1	Zona I	35

2.5.2.2	Zona II	35
2.5.2.3	Zona III	36
2.5.2.4	Zona IV	37
2.5.3	Sistema de calefacción	37
2.5.4	Control de temperatura	39
2.6	Descripción de los componentes de la máquina extrusora utilizada	40
2.6.1	Cilindro y tornillo	41
2.6.2	Sistema de calefacción	41
2.6.3	Tren de mando	42

III.- APLICACION AL CASO DE ESTUDIO

3.1	Obtención del modelo de la planta	44
3.1.1	Acción de control	45
3.1.1.1	Controladores Barber Coman	46
	Tipos de control	47
3.1.2	Elemento final de control	47
	Relé de mercurio	47
3.1.3	Elemento detector	48
3.1.4	Entrada deseada	50
3.1.5	Proceso	50
3.1.6	Perturbaciones	50
3.2	Obtención de la función de transferencia en lazo cerrado	51
3.3	Obtención de la función de transferencia en lazo abierto	63

IV.- COMPENSACIONES

4.1	Modos de control	68
4.1.1	Control ON OFF	68
4.1.2	Control Proporcional	69
4.1.3	Control Proporcional integral PI	71
4.1.4	Control Proporcional derivativo PD	73
4.1.5	Control Proporcional integral derivativo PID	75
4.2	Alternativas de Control	75
4.2.1	Esquemas de alternativas de control PID	75
4.2.1.1	Posicional	75
4.2.1.2	Interactuante	76
4.2.1.3	No Interactuante	77
4.2.1.4	No interactuante con componente derivativa filtrada	78
4.2.2	Compensaciones	79
4.2.2.1	Método convencional de diseño de sistemas	79
4.2.2.2	Compensación serie y paralelo	79
	Efectos de la adición de polos	81
	Efectos de la adición de ceros	81
4.3	Diseño de la compensación utilizando el LGR	82
4.3.1	Diseño de control proporcional integral derivativo PID continuo	84

4.3.2	Compensación utilizando el L G R discreto	88
4.3.2	Diseño de control proporcional integral derivativo PID discreto	90
4.4	Diseño de la compensación por medio de un método de calibración	94
4.4.1	Métodos de Ziegler – Nichols	94
4.4.1.1	Diseño del control proporcional integral derivativo PID	95
4.4.1.2	Diseño del control proporcional integral derivativo PID discreto	97

V.- ESTUDIO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR

5.1	Introducción	101
5.1.1	Control digital directo DDC	102
5.1.2	Ventajas del control digital directo	103
	Flexibilidad	103
	Multiplicidad de funciones	104
	Técnicas avanzadas	104
	Comunicación	104
5.2	Alternativas del control digital	104
5.2.1	Controladores delicados	104
5.2.2	Controladores lógicos programables	105
5.2.3	Controles computarizados	105
	Cantidad de equipos para el proceso	106
	Tipo de ambiente	106
	Señales de entrada y salida	106
	Comunicación	106
5.3	Elección de la alternativa	106
5.3.1	Requerimientos y especificaciones	107
5.3.2	Desarrollo del software de control	110
5.3.2.1	Desarrollo de las ecuaciones de control	110
	Control Proporcional	111
	Control Proporcional Integral	111
	Control Proporcional Derivativo	111
	Control Proporcional Integral Derivativo clásico	111
	Control Proporcional Integral Derivativo Interactuante	112
	Control Proporcional Integral Derivativo no Interactuante	112
	Control PID no Interactuante con componente derivativa filtrada	113
5.3.2.2	Software de control	114
5.3.2.2.1	Alarmas del proceso	116
5.3.2.2.2	Logo	117
5.3.2.2.3	Presentación del Proceso	118
5.3.2.2.4	Gráficas	120
5.3.2.2.5	Controlador digital extrusor	122
5.3.2.2.6	Eventos de extrusión	126
5.3.2.2.7	Login	129
5.3.2.2.8	Función en el tiempo	130

VI.- ANALISIS ECONÓMICO

6.1	Evaluación financiera económica	133
6.1.1	Análisis de costos	133

VII.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES

7.1	Resultados	139
7.2	Conclusiones	157

BIBLIOGRAFÍA.

ANEXOS.

ANEXO A:	Obtención de las funciones de transferencia de la máquina extrusora.
ANEXO B:	Compensación de las zonas de extrusión
ANEXO C:	Manual del usuario
ANEXO D:	Datos del actual controlador de temperatura
ANEXO E:	Datos de relé de mercurio
ANEXO F:	Características de la máquina extrusora
ANEXO G:	Datos de tarjetas de National Instruments
ANEXO H:	Datos de programa BridgeVIEW

I.- INTRODUCCIÓN

Subíndice

		Página.
1.1	Importancia del tema	1
1.2	Justificación del tema	2
1.3	Objetivos y alcance	2
1.4	Contenido	3

1.1- IMPORTANCIA DEL TEMA

Para tener una idea de la importancia del tema, es necesario conocer el procesamiento de tuberías y perfiles de cloruro de polivinilo PVC, que desde su aparición en el mercado, a mediados de los años 40, han experimentado un crecimiento continuo y sostenido, el cual no ha podido ser frenado a pesar de los ataques de otros sectores industriales, en especial, de los productores de tuberías metálicas.

En el Ecuador la producción de productos de PVC genera un total 40'000.000.00 de dólares americanos, siendo un importante rublo para el desarrollo del país; además este negocio genera directa e indirectamente fuentes de trabajo, no sólo a quienes laboran en sus fábricas sino que se enlaza con distribuidores, sub distribuidores, ferreteros, y más personas, los cuales se benefician de dicha producción. Esto se puede ver en la estrecha relación existente entre las industrias que producen tuberías de PVC y las empresas de la construcción. Ya que, el sector de la construcción es un gran generador de plazas de trabajo, ayudando con esto al progreso del país.

Existe un buen número de industrias en el Ecuador dedicadas a la elaboración de productos con polímeros de cloruro de polivinilo, las mismas que fabrican productos, tales como: conductores eléctricos con aislamiento de PVC, juguetes, utensilios de cocina, herramientas, y un sin número de artículos, donde los polímeros de polivinilo van reemplazando a otros materiales, por sus ventajas que estos ofrecen.

El cloruro de polivinilo PVC es un material sólido, cuyas partículas son muy finas, teniendo similitud con una harina de trigo, el PVC presenta una característica especial, al calentarse sus finas partículas forman una masa compacta, la cual es sumamente dúctil y moldeable, propiedades que permiten fácilmente darle la forma deseada, y, al enfriarse el PVC toma la forma obtenida en caliente.

En los procesos de extrusión de PVC, la variable de mayor importancia, es la temperatura ya que una excesiva temperatura puede causar degradación del material (el material se quema), o una temperatura inferior no permitirá que el producto tenga las características necesarias para salir al mercado. El PVC además tiene la facilidad de ser reciclado, a este material para reciclaje se lo denomina industrialmente "scrap", el cual proviene de productos con defectos, pero cuando el PVC se degrada ya no se lo puede reciclar. Tanto el scrap como el material degradado (quemado), generan pérdidas para la industria que procesa PVC

Debido a estos antecedentes, el desarrollo de los controladores de temperatura ha sido grande, ya que en la actualidad se tienen en el mercado controladores digitales de todo tipo, así por ejemplo: PID digitales, de lógica difusa (fuzzy) entre los más avanzados.

Mediante el presente tema, se trata de dar un soporte teórico - práctico, a las condiciones de operación de una máquina extrusora de PVC. Como existe gran cantidad de máquinas extrusoras, de diversos modelos según la necesidad, el análisis se ha reducido una máquina extrusora marca CINNCINATI modelo CM 55.

1.-2 Justificación del tema

En muchos sistemas reales es conveniente tener una descripción matemática del proceso, ya que de esta manera se tendrá un cabal conocimiento de las variables involucradas; se podrá experimentar, analizar y comprender de la mejor manera el proceso físico. Obtener el modelo matemático de la máquina extrusora de PVC, es decir, encontrar las ecuaciones de las curvas características de las zonas de trabajo de la extrusora de PVC, permitirá tener una manera de comprobar y predecir el funcionamiento del proceso ante determinadas condiciones. En el presente trabajo se desarrolla el estudio matemático de las zonas de trabajo de la extrusora de PVC.

El sistema de control es el corazón de todo proceso, ya que de este depende el control de las variables de interés. Al describirse un sistema real en diagrama de bloques se tiene la facilidad de comprensión del proceso, ya que presenta de una manera concisa la variable de interés.

Para el análisis de la respuesta transitoria es conveniente utilizar un modelo matemático representado en la función de transferencia, ya que la misma se caracteriza por relacionar la entrada con la salida del sistema. A partir de este modelo se puede comprobar el funcionamiento en estado transitorio del controlador actual, y a su vez analizar otras compensaciones por medio de acciones de control que puedan garantizar el buen funcionamiento y control de la variable controlada (temperatura), en los puntos fijos de operación.

1.3.- Objetivos y alcance.

El trabajo de tesis que a continuación se desarrolla estudiará el modelo el control actual de una maquina extrusora de PVC, se obtendrá un modelo matemático mediante el cual se diseña y simula de una alternativa de control.

Con la obtención del modelo matemático se podrá optimizar el uso de cualquier controlador instalado en la máquina extrusora, ya que el mismo ayuda a entender los fenómenos que ocurren en el proceso. Permite compensar el sistema al facilitar la aplicación de la teoría de control convencional.

El modelo matemático permite entender el proceso de control de temperatura de la extrusora, prestará ayuda a las personas encargadas en la programación de los controladores, debido a que

en este tiempo, la programación de los parámetros de los controladores es realizada por experiencia de los años de trabajo; con esto se espera eliminar fallas en el control de temperatura del proceso, por lo cual elimina las paradas innecesarias de la producción, esto conlleva a tener un ahorro significativo en material ya que por lo expuesto en lo anterior, las pérdidas generadas por scrap se disminuirían.

Con el modelo obtenido se espera optimizar el proceso; mediante la simulación, se observará los resultados de la compensación del sistema, aplicando la teoría convencional de control.

Se estudiará algunas características de los controladores digitales, que podrían implementarse en este proceso con la ayuda del programa Bridge VIEW, por lo que se desarrollará un software de control sólo para una zona de trabajo, pudiendo este programa ser generalizado.

Mediante este modelo, se deja a criterio de los accionistas de la empresa, la adquisición de un controlador digital, el cual al inicio resulta en una gran inversión, pero con el pasar del tiempo esta se recupera en los beneficios que brinda el control digital.

La implementación física del controlador digital está fuera del alcance de este trabajo, siendo éste un soporte para el mismo.

1.4.- Contenido.

La tesis, en el capítulo I, empieza con una breve introducción acerca de la importancia económica de la producción de tuberías de PVC, justifica la realización de este trabajo, para luego plantear objetivos y alcances de este trabajo de investigación.

En el capítulo II se describe el proceso de fabricación de tuberías de PVC, en primer lugar se enuncia algunas características del Cloruro de polivinilo PVC, para terminar este capítulo con la descripción del proceso de extrusión.

En el capítulo III, desarrolla un modelo matemático en base de lo expuesto en el capítulo anterior, se encuentran las curvas de respuesta de la planta de todas las zonas de trabajo de la máquina extrusora.

En este mismo capítulo se representa el sistema de control en diagrama de bloques, se analiza cada uno de sus componentes, para de esta manera obtener las funciones de transferencias en lazo cerrado de la planta. Luego se procede a encontrar las funciones de transferencia en lazo abierto de la planta.

En el capítulo IV, con los resultados obtenidos en el capítulo anterior se procede a describir ciertas acciones de control para justificar la compensación de la planta.

Para la compensación de la planta se procede a analizar la estabilidad por medio del Lugar geométrico de las raíces, y así diseñar la compensación de la planta, también se utiliza un método pseudo empírico de Ziegler - Nichols.

En el capítulo V se procede con el estudio de un controlador digital, revisando las características más relevantes; se describe la implementación del software de control y demás características para recomendar su implementación.

En el capítulo VI se realiza una análisis financiero económico de la implementación del controlador.

En el capítulo VII se finaliza con los resultados y las conclusiones acerca de este trabajo.

Adicionalmente se presenta los anexos en los que se incluyen la obtención de las funciones de transferencia en lazo cerrado y abierto; el diseño de las compensaciones; las características de máquina extrusora; los datos técnicos del controlador actual; las características del controlador recomendado por este trabajo.

II.- EXTRUSORES

Subíndice

		Página
2	Introducción	6
2.1	El policloruro de vinilo pvc	6
2.1.2	Propiedades características	7
2.1.3	Propiedades térmicas	8
2.1.4	Estabilidad térmica, dinámica y curva de fusión	9
2.1.5	Gelificación y fusión del PVC	10
2.2	La extrusión	11
2.3	Tipos de extrusores	11
2.3.1	Extrusores monotornillo	12
2.3.2	Extrusores doble tornillo	12
2.3.2.1	Clasificación de los extrusores	13
2.3.2.2	Extrusores doble tornillo cónicos y super cónicos	15
2.3.3	Cabezales para extrusión de tuberías y perfiles	16
2.4	Equipos de Post – extrusión	17
2.4.1	Sistemas de calibración	17
2.4.1.1	Extrusión libre	18
2.4.1.2	Placas calibradoras	18
2.4.2	Baños de enfriamiento	19
2.4.3	Unidades de halado	20
2.4.4	Unidades de corte	21
2.4.5	Unidades de bobinación	21
2.4.6	Unidades de acampanado	22
2.4.7	Otros Equipos de post extrusión	23
2.5	Descripción del proceso de extrusión	23
2.5.1	Principios de la máquina extrusora	25
2.5.1.1	Eficacia de extrusión	28
2.5.1.2	Importancia de la fricción	32
2.5.1.3	Temperatura de la pared del cilindro	33
2.5.2	Funcionamiento de una máquina extrusora	34
2.5.2.1	Zona I	35
2.5.2.2	Zona II	35
2.5.2.3	Zona III	36
2.5.2.4	Zona IV	37
2.5.3	Sistema de calefacción	37
2.5.4	Control de temperatura	39
2.6	Descripción de los componentes de la máquina extrusora	40
2.6.1	Cilindro y tornillo	41
2.6.2	Sistema de calefacción	41
2.6.3	Tren de mando	42

II.- INTRODUCCION

Dentro del creciente mundo de la industria de polímeros, el PVC juega un papel importante, ya que contribuye a ampliar las áreas de aplicación de los productos plásticos, destacándose dentro de este grupo, las tuberías y perfiles, tanto rígidos como plastificados.

Las razones que han impulsado el crecimiento del mercado de las tuberías plásticas, destacan su excelente resistencia a la corrosión, inercia química, bajo peso, excelente balance de propiedades, no conductividad, bajo costo y en el caso de las de PVC no inflamabilidad.

Las aplicaciones a las cuales se han destinado las tuberías de PVC son también muchas entre las que se destacan aquellas para:

- Distribución de agua, tanto doméstica como industrial y de irrigación.
- Conducción de compuestos químicos.
- Conducción de cables.
- Gas doméstico.
- Aire comprimido y vacío.
- Drenaje.
- Ventilación y extracción de vapores.

La facilidad de transformar el PVC en una gran variedad de productos de características específicas es inmensa, por lo que a continuación se verá con más detalle.

2.1.- Policloruro de vinilo (PVC)

El policloruro de vinilo (PVC) es uno de los plásticos más antiguos, pero aún uno de los más importantes materiales poliméricos de la actualidad, fue Justus von Liebig en 1835 quien obtuvo el policloruro de vinilo (PVC); se produce a partir de dos recursos naturales, petróleo (43%) y sal común (57%).



Figura 2.1.- Desde el petróleo y la sal hasta la producción del artículo de PVC.

2.1.2.- Propiedades características.

La evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de un material se hace necesaria a fin de conocer lo que se puede esperar de éste durante su procesamiento y desempeño como producto final.

Es prácticamente imposible conocer totalmente las características y propiedades de un material, mas aún en el caso de los polímeros, para los cuales existen muchas variaciones dentro de un mismo producto y cada una con características particulares, de igual manera para el caso del PVC todas sus propiedades dependen en gran medida de la formulación e incluso de las condiciones de procesamiento.

De todas maneras se puede decir que las propiedades medidas sobre la materia prima tienen relación directa sobre el comportamiento posterior del material durante su procesamiento, y estas son de manera general:

- 1 Valor K (peso molecular del material).
- 2 Densidad aparente y tiempo de flujo (tamaño y distribución de partículas).
- 3 Densidad compacta (relación peso/volumen).
- 4 Absorción de DOP (porosidad de la resina de PVC; DOP plastificante).
- 5 Tiempo de mezcla seca (comportamiento del material durante el proceso de mezclado e incorporación de aditivos).

- 6 Distribución de tamaño de partícula.
- 7 Contenido de humedad.
- 8 Contenido de geles u ojos de pescado (partículas de resina que no se han fundido al ser procesadas con determinadas condiciones de operación).
- 9 Propiedades térmicas.
- 10 Estabilidad térmica y dinámica y curva de fusión.

Como este trabajo está centrado en un control de temperatura para el proceso de extrusión de PVC, de las propiedades anteriores se detallará las propiedades que son de más interés para el mismo.

2.1.3.- Propiedades térmicas

El PVC muestra un cambio característico en las propiedades a medida que la temperatura se incrementa; a temperatura ambiente, el PVC es un material vítreo, y, cuando se calienta lo suficiente pasa a través de una temperatura de transición vítrea (T_g) bien definida (figura 2.2), esta transición se caracteriza por una disminución del módulo elástico, un cambio en la capacidad calórica y el coeficiente de expansión térmica, y, está asociada con el inicio del movimiento de segmentos de la cadena del polímero.

La temperatura de transición vítrea T_g del PVC varía con la temperatura de polimerización de la resina, encontrándose la gran mayoría de los productos comerciales con una temperatura de transición vítrea T_g en el rango entre 80° y 85°C ; dado que la temperatura es el principal parámetro para el control del peso molecular de la resina durante su polimerización, entonces la temperatura de transición vítrea T_g está relacionado directamente con el peso molecular del material.

Si continúa calentándose el PVC sobre la temperatura de transición vítrea T_g , y se mantiene sin degradación térmica (explicada en el capítulo I), se puede alcanzar la siguiente transición térmica, que es la temperatura de fusión T_f de los cristales de PVC; debido al polimorfismo de los cristales, esta temperatura no es puntual sino que se determina un rango de fusión.

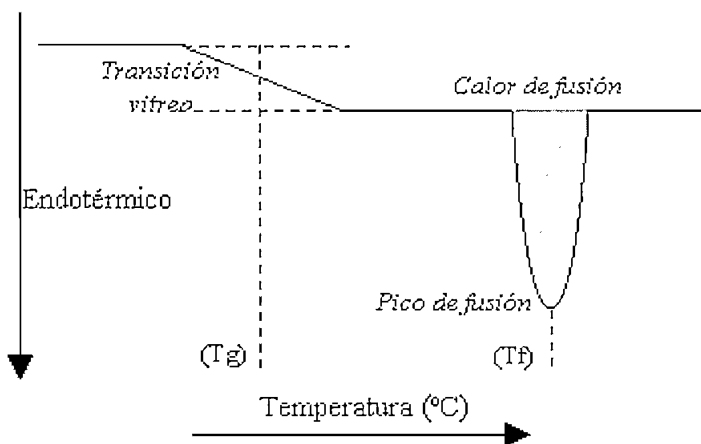


Figura 2.2- Termograma idealizado para el PVC

2.1.4.- Estabilidad Térmica Dinámica (ETD) y Curva de fusión

Mediante la estabilidad térmica dinámica (ETD) se puede determinar la estabilidad del PVC en condiciones de procesamiento que involucran esfuerzo mecánico y temperatura.

En la figura 2.3 se muestra como ocurre inicialmente la compactación del polímero por lo que el torque se incrementa bruscamente (pico de carga); al compactarse el polímero, la energía suministrada al sistema y la temperatura de la cámara favorecen la gelificación y fusión de la resina, por lo que se observa un posterior incremento de torque hasta alcanzar un máximo que indica que el proceso de fusión de las partículas de PVC se ha completado (pico de fusión).

Una vez que el material está fundido, la viscosidad del sistema comienza a disminuir hasta alcanzar la que corresponde al polímero fundido a las condiciones de temperatura (190°C) y velocidad de deformación del ensayo, en ese momento se alcanza una estabilidad que se observa en la gráfica de torque. Cuando el tiempo de residencia a la temperatura de ensayo y el esfuerzo mecánico sobre el material son lo suficientes como para degradarlo, éste experimenta un nuevo incremento de viscosidad debido a la formación de entrecruzamientos entre las cadenas del polímero los cuales limitan la capacidad de flujo del material; el tiempo que transcurre entre la fusión y el entrecruzamiento, se conoce como tiempo de estabilización del material y proporciona indicios a cerca de la capacidad del polímero y la formulación utilizada para soportar esfuerzo mecánico y temperatura sin degradarse.

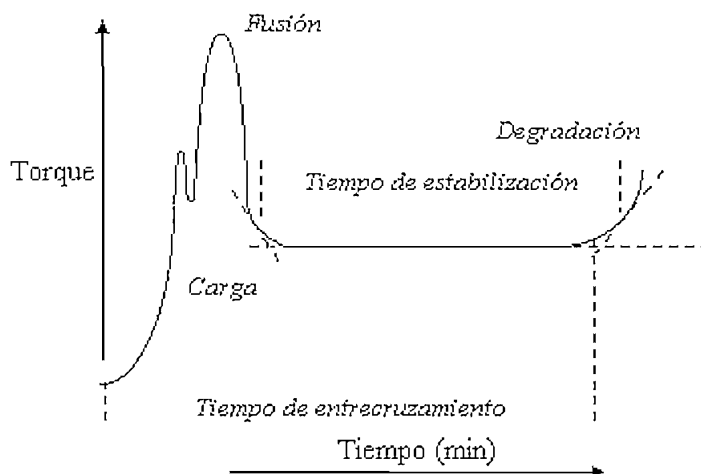


Figura 2.3.- Curva de fusión típica para una formulación de PVC rígido

2.1.5.- Gelificación y Fusión del PVC

La importancia del estudio y la comprensión del proceso de gelificación y fusión del PVC está sustentada en que virtualmente en todo proceso de transformación y procesamiento de PVC rígido, éste pasa por una etapa de gelificación antes de llegar a su forma final de uso.

Cuando se pasa a la etapa de preparación del compuesto, se debe tomar en cuenta el efecto de tres variables fundamentales:

- Temperatura
- Presión
- Esfuerzo mecánico (corte)

Si el polímero en polvo simplemente se calienta, ocurren pocos cambios hasta que la temperatura alcanza los 150 °C, a partir de ese momento ocurre, espontáneamente, una pérdida de la porosidad en el material, siendo más evidente en las regiones superficiales.

Ahora, cuando se aplica simultáneamente presión y temperatura se obtiene un mayor efecto de densificación del material, siendo notorio a partir de la temperatura de transición vítrea T_g del PVC ($\sim 80^\circ\text{C}$), aunque a partir de los 100 °C es cuando su presión tiene su mayor efecto sobre la densificación del material.

Durante la extrusión (a ser explicado en el siguiente numeral) mientras más rápido la mezcla alcance una temperatura superior a los 100° -120° C, menor será la presión requerida para obtener la suficiente compactación para transmitir la transmisión efectiva de los esfuerzos de corte y una vez que la componente de corte es incorporada al sistema, la velocidad de fusión del polímero se incrementa.

El mecanismo de gelificación durante el proceso de extrusión consiste de cuatro etapas que pueden ser definidas como:

- 1 Compactación de los granos de PVC
- 2 Densificación de los granos (disminución de la porosidad)
- 3 Fusión de las partículas que conforman el grano.
- 4 Estiramiento del grano hasta lograr la pérdida de memoria granular.

Este mecanismo se lo conoce como CDFE



Figura 2.4.- Mecanismo de gelificación durante el procesamiento

2.2.- LA EXTRUSIÓN

Brevemente, se puede decir que la extrusión es el proceso aquel mediante el cual se fuerza a un material a través de un orificio o boquilla, para obtener un perfil de sección constante.

Los extrusores son el equipo fundamental en la mayoría de los procesos de transformación de polímeros. Pues existen procesos de extrusión de películas, láminas, filamentos, cables, tuberías y perfiles, y, granulación, así como los de inyección, inyección soplado y extrusión soplado, poseen como unidad fundamental un extrusor. Por lo cual se dará detalles de la máquina extrusora y del proceso de extrusión.

2.3.- TIPOS DE EXTRUSORES

Un extrusor es un tornillo que gira en un cilindro. Hay una tolva que alimenta un extremo del cilindro y un agujero de forma específica (la boquilla, el dado) al otro extremo.

Los extrusores en la industria se diferencian entre sí, de acuerdo con su diseño y funcionamiento. La primera distinción que surge, se fundamenta en el modo de operación, así existen:

- Extrusores continuos.
- Extrusores discontinuos.

La mayoría de los extrusores funcionan en forma continua, pero una parte importante de los equipos, fundamentalmente los de inyección, funcionan en forma discontinua (intermitente)

Existe además otra clasificación fundamentada en el diseño, dentro de la cual se agrupan:

- Extrusores de tornillos
- Extrusores de pistón
- Extrusores de disco.

Siendo la inmensa mayoría de los extrusores en operación hoy en día del tipo de tornillo, ya sea mono o multi tornillo, se ha visto conveniente explicarlos con detalle.

2.3.1.- Extrusores monotornillo

Los extrusores monotornillo son máquinas que trabajan con un solo tornillo, el cual gira dentro del cilindro, su uso se va restringiendo para las aplicaciones específicas, donde el proceso es cíclico, el tornillo típico de este tipo de extrusor lo muestra la figura 2.5



Figura. 2.5.- Tornillo de extrusión

- Los extrusores monotornillo no poseen una amplia difusión en el campo de la extrusión de tuberías y perfiles de PVC, al contrario de los de doble tornillo, que sea por razones económicas y funcionales, son los mas utilizados.

2.3.2.1.- Extrusores doble tornillo

Los extrusores de doble tornillo han establecido una posición sólida en la industria del procesamiento de los polímeros. Las dos principales áreas de aplicación de los extrusores doble tornillo son la extrusión de perfiles, en especial con aquellos materiales sensibles a la degradación térmica, como es el caso del PVC y las operaciones especiales con polímeros, como la preparación de compuestos devolatización, reacciones químicas, etc.

Para comprender con claridad el funcionamiento y aplicabilidad de los extrusores de doble tornillo para una operación específica, es necesario estudiarlos de acuerdo con sus características geométricas particulares, lo cual es el tema tratado a continuación

2.3.2.1.- Clasificación de los extrusores doble tornillo

Se pueden subdividir los extrusores doble tornillo de acuerdo con varios parámetros o características de los mismos. En resumen, la clasificación de un extrusor dependerá de la suma de varias de las siguientes clasificaciones:

1 De acuerdo con el sentido de rotación de los tornillos, se tienen:

- Corrotantes, cuando ambos giran en la misma dirección
- Contracorrotantes, cuando uno gira en sentido contrario al otro

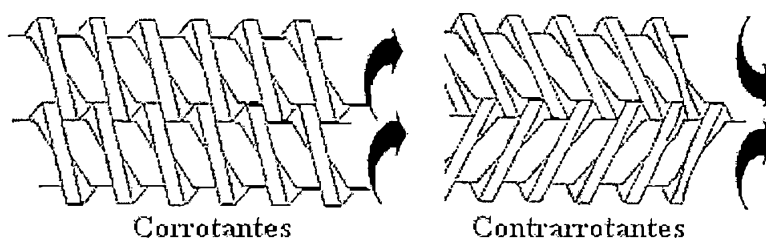


Figura. 2.7.- Tornillos contrarrotantes y corrotantes

Las ventajas que se obtienen al utilizar extrusores contrarrotantes con las características antes expuestas, en la producción de tuberías y perfiles son:

- a Se produce una acción positiva de bombeo, dado que se forman cámaras cerradas entre los canales del tornillo.
- b Al formarse cámaras cerradas, se reduce el tiempo de resistencia del material en el extrusor, así como la distribución del mismo, disminuyendo la posibilidad de degradación del polímero (uno de los puntos débiles del PVC)
- c Se obtienen mayores caudales de producción con menores velocidades de rotación del tornillo, dado que no se produce flujo de retroceso generado por la presión al final del tornillo, frente al cabezal. Paralelamente, se reduce el consumo de potencia por Kg. De resina.
- d Disminución o eliminación total de cualquier problema de alimentación, producto de su extraordinaria acción de bombeo. Este hecho permite la alimentación, sin problemas de mezclas en polvo, con todas las ventajas técnicas y económicas que esto significa.
- e Caudales más uniformes, lo que se refleja directamente en una mayor estabilidad del perfil obtenido, por lo tanto, en una mayor calidad del mismo.

- f Capacidad de trabajar con canales parcialmente llenos, lo que permite, de ser necesario, devolutilizar más eficientemente.
- g Los tornillos engranados conjugados son autolimpiantes, esto hace que su mantenimiento se facilite y se alarga su vida útil.

2 De acuerdo con la posición relativa de los tornillos se tiene:

- Engranados, cuando los filetes de un tornillo penetran en el canal del otro, o lo que es lo mismo, la distancia entre los centros de los tornillos es menor que el diámetro exterior de los mismos
- No engranados, cuando los filetes de un tornillo no penetran en el canal del otro.

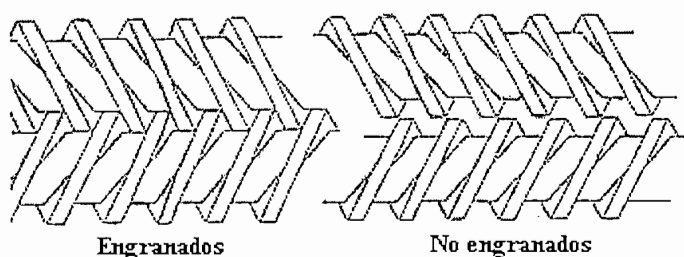


Figura. 2.8.- Tornillos engranados y no engranados (contrarrotantes)

3 De acuerdo con la forma y tamaño relativo de los filetes y los canales, se tiene:

- Conjugados, cuando los filetes de un tornillo, al penetrar en el canal del otro, encajan con una mínima tolerancia, dado que poseen prácticamente las mismas dimensiones recíprocas.
- No conjugados, cuando los filetes de un tornillo dejan una amplia tolerancia al penetrar en el canal del otro tornillo.

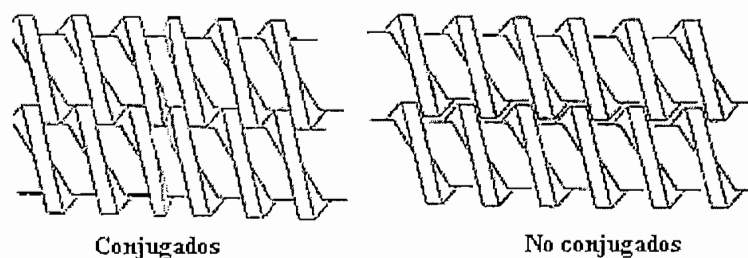


Figura. 2.9.- Tornillos conjugados y no conjugados

- 4 Adicionalmente, se puede incluir otra clasificación que se refiere a la forma de los tornillos, en la cual se puede diferenciar los tornillos rectos y cónicos, de acuerdo con la variación del diámetro externo de los mismos. Para ambos se cumplen las tres clasificaciones anteriores, si se desea describir fiel y completamente un equipo de extrusión doble tornillo, se deberá especificar cada una de las características mencionadas.

De acuerdo con las clasificaciones anteriores, se pueden analizar las características funcionales de cada tipo de tornillo, conociendo en detalle sus capacidades y limitaciones, lo cual puede servir de guía para escoger un sistema adecuado para cada aplicación

Para la extrusión de tuberías y perfiles de PVC, se encuentra ampliamente difundido el uso de los extrusores de doble tornillo contrarrotantes, engranados y conjugados, y se usan en menor grado los extrusores corrotantes de similares características.

2.3.2.2.- Extrusores doble tornillo cónicos y supercónicos.

La mayoría de los extrusores doble tornillo, presentan una configuración paralela. Recientemente se han desarrollado y comercializado extrusores con tornillos cónicos y supercónicos, los cuales presentan como característica, en ambos casos, una disminución gradual del diámetro, tanto del alma del tornillo, como externo de los filetes, lo cual los define como cónicos. En el caso de los supercónicos, se producen también disminución gradual de la profundidad del canal, lo que genera a su vez una compresión aún mayor.



Figura. 2.10.- Tornillos cónicos contrarrotantes

Estas características geométricas brindan una serie de ventajas sobre los extrusores doble tornillo convencionales, entre las que se destacan:

- a Mayor homogeneidad de la temperatura del fundido, dado que se tiene una mayor área de transferencia en la zona de alimentación. Este hecho repercute directamente en una mayor estabilidad y calidad del fundido y por ende en el producto.
- b Un amasado y fusión más gradual y homogéneo, producto de la variación progresiva del diámetro del tornillo (y de la profundidad de canal en los supercónicos). Al igual que en el caso anterior, esto se refleja en un fundido más homogéneo y un perfil de mejor calidad.
- c Permiten trabajar con velocidades de rotación del tornillo muy bajas, a la vez que se obtienen altos caudales de producción, lo que reduce el nivel de esfuerzos impartidos al material, con la subsecuente disminución del riesgo de degradación.
- d Por las especiales características geométricas del sistema, permite un diseño más robusto y eficiente del sistema de transmisión de movimiento, lo que se refleja en una mayor vida útil de las partes mecánicas.

Si aunamos a esta serie de ventajas, las anteriormente evaluadas para los sistemas con tornillos contrarrotantes engranados conjugados, es fácil concluir sobre la importancia y adaptabilidad que este tipo de equipos tienen en el área de extrusión de tuberías y perfiles.

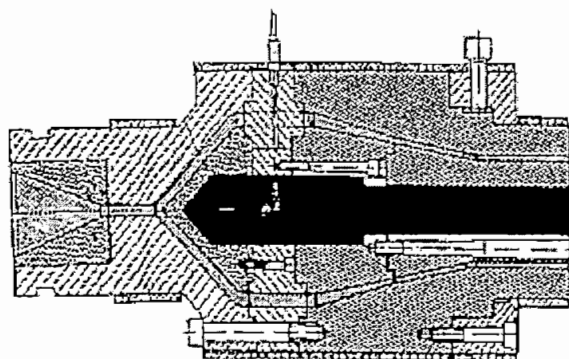
2.3.3.- Cabezales para extrusión de tuberías y perfiles.

El objetivo de un cabezal de extrusión es la distribución del flujo del polímero proveniente del extrusor, en el canal de flujo con la forma del perfil deseado, con una velocidad uniformemente distribuida a su salida. Este requerimiento no siempre es fácil de cumplir, en especial cuando el perfil es anular, como es el caso de las tuberías, o en perfiles de configuración intrincada.

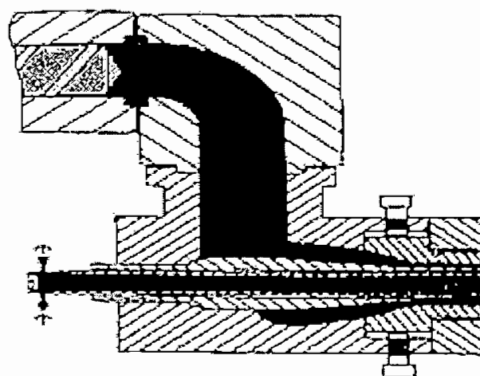
Existe una serie de dificultades en el diseño, las cuales deben ser superadas, entre las que destacan la presencia de líneas de soldadura, inevitables en este tipo de perfiles, Del mismo modo, en la extrusión de perfiles con secciones transversales intrincadas, se presenta la dificultad de transformar el flujo circular proveniente del extrusor, en un flujo distribuido con la forma del perfil extruído debe tener una distribución de espesores tal, que no produzca concentraciones de esfuerzos ni contracciones excesivas.

El diseño del cabezal, debe también actuar como restricción de flujo, de modo de generar suficiente presión de retroceso, lo cual produce una adecuada gelificación y mezclado de la resina, sin que se incrementen excesivamente los tiempos de residencia y los esfuerzos, promotores ambos de la degradación del PVC.

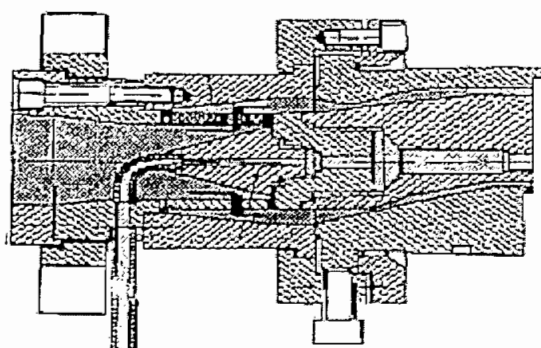
Se ilustra algunos diseños de cabezales de mayor difusión para la extrusión de tuberías.



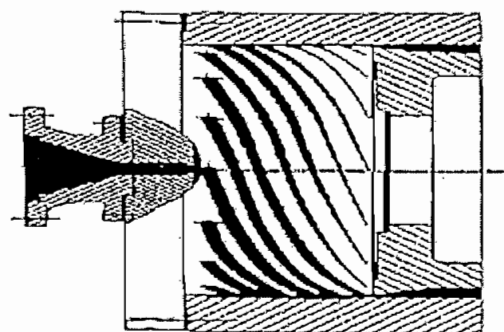
Cabezal de alimentación central



Cabezal de alimentación lateral



Cabezal tipo plato rompedor



Cabezal tipo mandril de flujo en espiral

Figura. 2.11.- Cabezales de extrusión

2.4.- EQUIPOS DE POST-EXTRUSIÓN

En el proceso de extrusión de tuberías y perfiles, los equipos de post-extrusión juegan un papel decisivo en la calidad del producto, ya que en definitiva son quienes definen el acabado final del perfil o tubería. La adecuada elección del equipo idóneo para la aplicación específica, redundará en una mejor calidad del producto, y en el ahorro de gastos innecesarios.

2.4.1.- Sistemas de calibración

El tubo de termoplástico fundido emerge del cabezal, debe ser enfriado y conformado de acuerdo con requerimientos geométricos específicos, los sistemas de calibración son parte esencial y decisiva en toda línea de extrusión de tuberías y perfiles, existen dos grupos de estos sistemas de calibración:

- 1 Sistemas de calibración interna.
- 2 Sistemas de calibración externa.

El uso de uno u otro grupo dependerá de los requerimientos de cada aplicación. Combinar ambos sistemas es impráctico, pero mediante el correcto uso del sistema de calibración idóneo para la aplicación específica, se logra un preciso control y un producto de alta calidad.

Entre los sistemas de calibración de tuberías más utilizados, están:

- Extrusión libre
- Placas calibradoras

2.4.1.1.- Extrusión libre

El sistema de calibración externo más sencillo que existe es el de extrusión libre. La tubería o perfil extruído es halada a través del baño de enfriamiento, donde se establecen las dimensiones finales, para luego ser cortado o bobinado, según sea el caso. Este sistema solo puede ser usado con tuberías de pequeño diámetro, donde los requerimientos de enfriamiento son bajos y por lo tanto se alcanza en forma rápida la estabilidad dimensional del producto.

2.4.1.2.- Placas Calibradoras

Usualmente para tuberías de pequeño diámetro también se usan sistemas de placas calibradoras conjuntamente con el baño de enfriamiento, con las cuales se define un buen acabado superficial y suficiente control dimensional, sin incurrir en gastos significativos.

Este tipo de sistemas de calibración externos, necesita usualmente de una pequeña presión de aire de apoyo interno en la tubería, de modo que el aire “bese” las placas calibradoras a su paso. Es común que las placas estén recubiertas con una capa de un material con bajo coeficiente de fricción, como por ejemplo teflón, el cual debe ser reemplazado periódicamente.

Además, debe considerarse el efecto de la contracción del material a medida que es enfriado, por lo cual el diámetro de los orificios de las placas calibradoras debe ser algo mayor que el diámetro deseado para la tubería, y debe disminuir a lo largo del baño. La figura muestra este sistema de calibración.

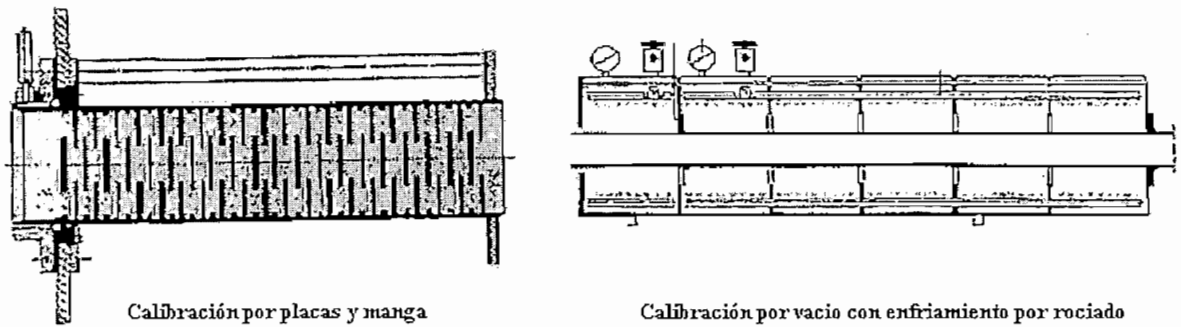


Figura 2.12 Sistema de calibración.

La calibración de la tubería se realiza mediante una extensión del mandril del cabezal de extrusión, el cual puede y debe ser refrigerado. Aunque así se logra una mayor eficiencia de enfriamiento en el sistema, dado que la tubería es paralelamente enfriada externamente, se debe controlar con mucha precisión el enfriamiento, ya que puede producir endurecimiento sobre el mandril de calibración, lo que implicaría realizar altas fuerzas de halado y recogida.

2.4.2.- Baños de enfriamiento.

La tubería extruída debe ser enfriada suficientemente, con el objeto de mantener sus dimensiones de forma estable, y no sea deformada por la acción de las unidades de halado, corte y apilamiento.

Aunque una parte importante de este enfriamiento ocurre normalmente en las unidades de calibración, en términos generales es necesario un baño de enfriamiento para alcanzar la completa estabilidad dimensional, se conocen dos tipos de baños o sistemas de enfriamiento a saber:

- 1 Tubería sumergida.
- 2 Tubería rociada.

Ambos sistemas son eficientes y producen un enfriamiento homogéneo del perfil.

Los baños de enfriamiento se usan para tuberías pequeñas, o sistemas de producción de baja velocidad, ya que de lo contrario, se requerirían longitudes imprácticas para lograr el efecto estabilizador deseado.

Es de vital importancia lograr un enfriamiento uniforme de la tubería, ya que de otro modo, se concentrarán esfuerzos residuales en la nueva tubería, producto de un gradiente significativo de temperaturas a lo largo del espesor de la pared, lo que se reflejará posiblemente, en una

deformación y susceptibilidad ante ciertos esfuerzos; para minimizar en cierta medida este inconveniente se puede usar:

- Sistemas de calibración con mandril interno refrigerado.
- Varios baños de enfriamiento espaciados, de modo que la tubería recorra secciones donde no sea refrigerada, y pueda relajar en lo posible parte de los esfuerzos residuales, mediante la uniformización de su perfil interno de temperaturas.

Para tubería de gran diámetro se prefiere sistemas de enfriamiento por rociado, en el que se sopla agua

2.4.3.- Unidades de halado

Estas unidades tienen la tarea de halar la tubería desde el cabezal de extrusión, a través de los sistemas de calibración y enfriamiento, a velocidad constante, sin producir deformación ni marcas en el producto. A lo largo de este trayecto, deben superar la fricción y frenado de los sistemas auxiliares.

Con el objeto de reducir la presión necesaria para generar la fricción de arrastre de la tubería, los sistemas de halado se diseñan con materiales con altos coeficientes de fricción (ej. Cauchos), y con las mayores superficies de contacto posibles, por lo cual, de acuerdo al sistema de tracción utilizado, se pueden diferenciar dos tipos de unidades de halado que son:

- De oruga (Caterpillar).
- De correa.

Las unidades de halado de correa producen un halado más eficiente y parejo, inclusive a altas velocidades, pero a la larga son más costosos, ya que al dañarse una sección de la correa, esta debe reemplazarse por completo, a diferencia del caso de los sistemas de oruga, donde sólo se reemplaza el taco dañado.

Los sistemas de halado de correa se usan principalmente para el halado de tuberías de pequeño diámetro, a altas velocidades, o cuando se usa en conjunto con sistemas de calibración de extrusión libre, dada la gran estabilidad de la velocidad de halado.

En el caso de tuberías con paredes muy delgadas o poco rígidas, puede ser necesario el uso de más de una unidad de halado, con el objeto de reducir la presión aplicada para lograr la fricción necesaria, y de este modo evitar la deformación del producto.

2.4.4.- Unidades de corte

Existen numerosos diseños para las unidades de corte, producto del desarrollo individual de diversas firmas constructoras de equipos de post-extrusión, Sin embargo las más difundidas son:

- Sierra radial, para tuberías de diámetros pequeños y medios.
- Sierra planetaria, para tubería de gran diámetro.
- Cuchillas sobre plato, sencillas o dobles también para diámetros pequeños.

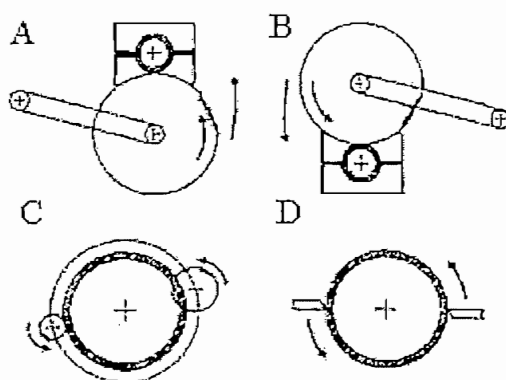


Figura 2.13 Sistema de corte para tuberías: a) sierra radial desde abajo, b) sierra radial desde arriba, c) sierra planetaria con sierra de acabado, d) cuchillas planetarias.

En el primer grupo, es decir de sierra radial, las sierras que producen el corte se desplazan a lo largo del diámetro de la tubería, produciendo de este modo el seccionamiento, se ve que al producirse el movimiento radial de corte por parte de la cuchilla o sierra, se produce un movimiento axial sincronizado con la velocidad de producción

El funcionamiento de las sierras planetarias consiste en el movimiento de una o varias sierras a lo largo de la periferia de la tubería, cortando a través de la pared.

Ambos grupos de sierras pueden, de ser necesario, tener acoplados sistemas de fresado de los bordes cortados, con el objeto de dar un mejor acabado al producto generado.

2.4.5.- Unidades de bobinación

Las unidades de bobinación de tuberías, pueden usarse sólo con productos con la suficiente flexibilidad de modo que no sufran deformaciones permanentes. Dentro de este grupo se pueden incluir los perfiles obtenidos de PVC plastificado (por ejemplo mangueras) así como las tuberías de poliolefinas.

Sin embargo, a pesar de que el producto presente la suficiente flexibilidad, se deben tomar en cuenta los siguientes criterios en el momento de utilizar una unidad de bobinación

- El diámetro central de la bobina debe ser al menos 20 a 25 veces mayor que el diámetro externo de la tubería o perfil a bobinarse.
- Si las velocidades de producción son bajas (< 10 m/min.), puede usarse una bobinadora sencilla, pero de no ser éste el caso, es recomendable el uso de un sistema de bobina doble, preferiblemente automático.

2.4.6.- Unidades de acampanado

El único requisito que debe cumplir una tubería para ser acampanada, es el de poseer la suficiente estabilidad dimensional después de moldeada. Entre los materiales que se presentan favorablemente para este proceso se encuentra el PVC rígido.

Existen líneas de extrusión en las que automáticamente se reduce la velocidad de halado, lo que incrementa el espesor de la pared de la tubería en la sección del acampanado, de modo que no se produzca un debilitamiento excesivo de la tubería.

El proceso se lleva a cabo, ya sea por acción de un mandril interno de conchas externas o la acción combinada de ambos métodos previo calentamiento de la tubería. Al mismo tiempo, el mandril puede expandirse mecánicamente sea por la acción de aire comprimido (modo neumático) o hidráulicamente (normalmente con aceite). La conformación externa puede también apoyarse con vacío.

En cuanto a los tipos de juntas que pueden producirse, se clasifican en:

- Con campana para pegar.
- Con junta mecánica.
- Con junta roscada.

Las figuras siguientes muestran los tipos de acampanado.

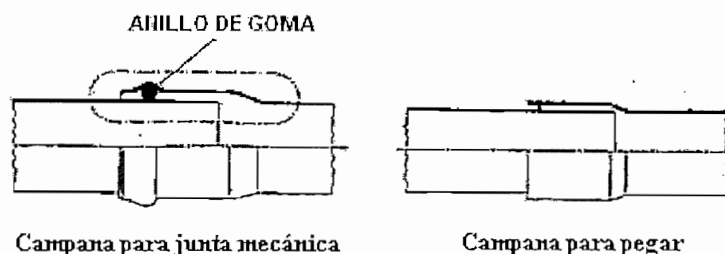


Figura 2.14 Tipos de Campanas

Las tuberías con campana para pegar, se utilizan en los segmentos de tuberías de presión, drenaje, ventilación y conducción de cables. Poseen la desventaja de que la unión es irreversible, es decir, no pueden ser despegadas una vez unidas.

Las tuberías con junta mecánica y con junta roscada, son usadas para el transporte de aguas blancas y de líquidos a presión, ya que en el caso de la junta mecánica con anillo de goma, su eficiencia aumenta a medida que incrementa la presión del fluido que transporta.

2.4.7.- Otros equipos de post-extrusión

Además de los equipos antes descritos, existe una serie de equipos auxiliares, los cuales cumplen variadas funciones complementarias, entre las que se destacan:

- Unidades de identificación, para la impresión de características técnicas, del fabricante, etc., en la tubería
- Unidades de apilamiento y embalaje de tuberías.

2.5.- DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN

Como se indicó el proceso de extrusión es aquel mediante el cual se fuerza a un material a través de un orificio o boquilla, para obtener un perfil de sección transversal constante.

Para procesar el PVC, la resina es primeramente fundida mediante calor y presión dentro del cilindro de un extrusor, y, finalmente forzada a través de una apertura estrecha conocida como cabezal (matriz o troquel). La apertura puede ser una línea recta o tener la forma de anillo. Al salir del extrusor la tubería de PVC es enfriada para solidificarse y finalmente es procesada con los elementos de post - extrusión.

Los plásticos para extrusión son “termoplásticos”; es decir se ablandan con la acción del calor y se endurecen de nuevo cuando se enfrían. Cuando un material de este tipo se alimenta a la tolva, es atrapado por el tornillo y empujado a través del cilindro, donde se plastifica lo suficiente para continuar su viaje hasta la boquilla (ver la figura 2.15).

El calor se genera por fricción, es decir, el tornillo gira y el plástico roza con las superficies del cilindro y del tornillo. De esta manera, la energía para plastificar el material proviene mayormente del motor, el cual hace girar el tornillo (Fig. 2.15). Se suministra más calor mediante calentadores externos o precalentamiento del material. La interacción térmica se visualiza de la mejor manera en la figura 2.17.

En resumen la extrusión se realiza de la siguiente forma. El material es alimentado por la tolva, ya sea en polvo o en gránulos, llega por la acción de la gravedad hasta el cilindro donde está alojado el tornillo, el cual se encuentra en rotación. Este movimiento relativo, en conjunto con la fricción del material tanto con el cilindro como el tornillo, produce el avance de la resina en la dirección de la boquilla.

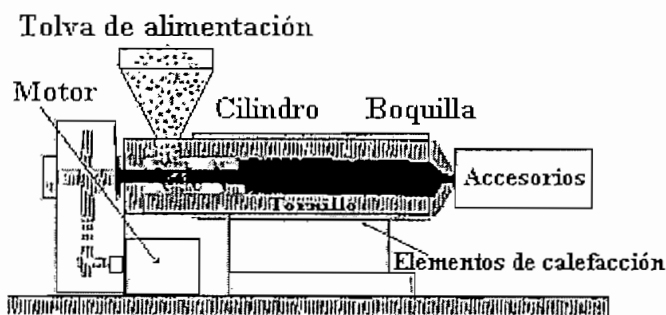


Figura. 2.15.- Diagrama esquemático de un extrusor señalando sus partes

A medida que el material avanza, el calor generado por la fricción y el transmitido por las zonas de calefacción a través del cilindro, producen el calentamiento de la resina. Tan pronto como esta alcanza su punto de fusión, se comienza a formar una película de material fundido entre el lecho sólido del tornillo y el cilindro. Este punto define la transición entre la zona de alimentación y la de fusión

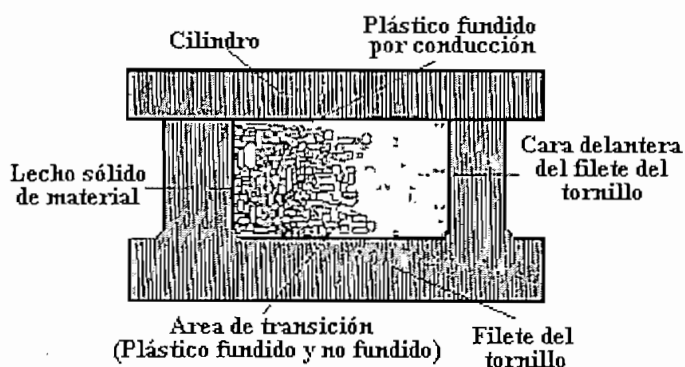


Figura. 2.16.- Diagrama del mecanismo de fusión en el canal del tornillo de extrusión.

Al proseguir el calentamiento, el material continúa su fusión, diferenciándose en el canal del tornillo, una zona con material fundido y una con resina sólida (lechos fundido y sólido, figura 2.16).

Una vez que el polímero se encuentra totalmente fundido, este es bombeado hacia la boquilla, a la vez que va siendo mezclado y homogeneizado, Esta zona funcional se denomina zona de dosificación o bombeo.

Usualmente se coloca, al final del tornillo y antes del cabezal, un grupo de mallas con diferente densidad de orificios, sostenidas por el plato rompedor. Este conjunto tiene como funciones principales, actuar como elemento filtrante de impurezas, aumentar la presión de retroceso del sistema y ayudar al mezclado eliminando las líneas de flujo y disminuyendo el efecto rotacional impartido por el tornillo

2.5.1.- Principios de la máquina de extrusión

La extrusión es un proceso térmico - mecánico, por lo que se requiere al menos de dos instrumentos básicos para el control de la máquina: Uno para la temperatura y otro para la velocidad del tornillo. Como el movimiento por motor tiene una buena autoregulación de velocidad, no suele emplearse un control automático de velocidad de tornillo, pero el control automático efectivo de la temperatura es esencial para la calidad y la economía de la producción. Un método ideal de control para la máquina debería incluir la medida de la presión en su punto más crítico. Por desgracia las propiedades especiales del PVC no permiten esta medida de la presión para que pueda ser transmitida a un indicador. La alternativa práctica consiste en mantener la temperatura y la velocidad constantes por separado, y, ajustar manualmente la relación entre ellas, según los datos de operación para materiales y secciones del cabezal.

El movimiento hacia adelante del PVC a lo largo de un tornillo en una máquina de extrusión puede compararse al movimiento de una tuerca sobre un tornillo en un tubo hexagonal. Cuando el tornillo se mueve la tuerca avanza dentro del tubo

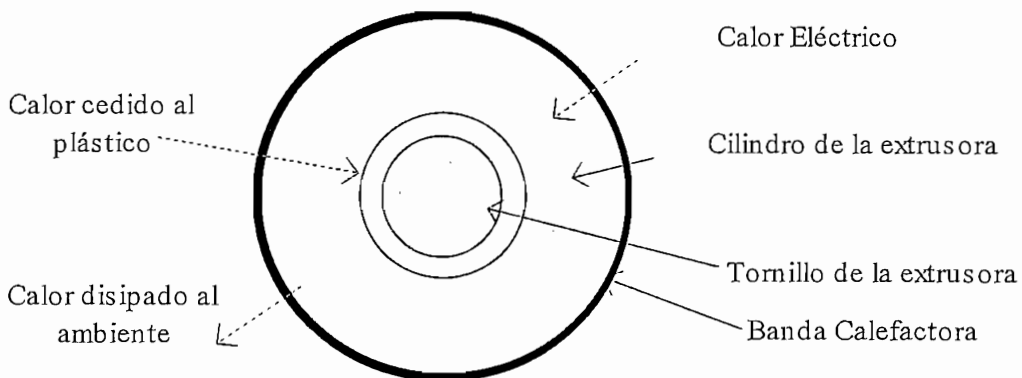


Figura 2.17 Sistema térmico.

En el cilindro el material debe deslizarse a lo largo del tornillo y debe preservarse de un movimiento lateral demasiado grande debido a la fricción contra la pared del cilindro. Esto significa que la fricción total entre el tornillo y el PVC debe ser menor que la fricción entre el PVC y la pared del cilindro. Si se supone que el coeficiente de fricción es el mismo en los dos casos, el área de cada espira del tornillo debe ser menor que el área de la pared del tornillo que le enfrenta. Esta relación de áreas es una de las consideraciones fundamentales para el diseño de tornillos y cilindros. Cuanto mayor sea el espacio entre espiras del tornillo menor será la relación de área de espira a área de pared enfrentada.

A veces el coeficiente de fricción no es el mismo para PVC - cilindro que para PVC - tornillo. Esto no se debe solo a la diferencia de materiales, sino también a la diferencia de temperatura. La variación del coeficiente de fricción del PVC ilustra la figura 2.18

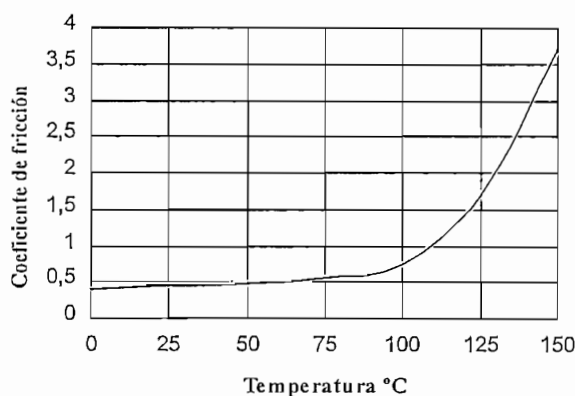


Fig. 2.18 La curva muestra un cambio brusco en el coeficiente de fricción del PVC contra acero, aproximadamente a 100° C.

La relación entre presión de la cámara del cabezal; diámetro del tornillo; la viscosidad de extrusión en unidades cúbicas, puede expresarse en forma de una serie de potencia dimensionalmente homogénea del tipo

$$\rho = \sum (A q^x \mu^y D^z N^w) \quad (2.1)$$

Siendo:

- ρ Presión de la cámara del cabezal
- D Diámetro del tornillo
- μ Viscosidad de extrusión
- N Velocidad de rotación del tornillo
- A Constante sin dimensiones:

Las dimensiones de las unidades de que se trata son:

$$\rho = \frac{M}{LT^2}; \quad \mu = \frac{M}{LT}; \quad D = L; \quad N = \frac{1}{T}; \quad q = \frac{L^3}{T} \quad (2.2)$$

La viscosidad se define como la relación de la fuerza de cizalladura a la velocidad de cizalladura, y un material plástico es uno que no muestra apreciable flujo por debajo de una cierta tensión finita. Debe notarse que la densidad no se ha tenido en cuenta para nada. Puede omitirse cuando la velocidad a la que avanza el material es pequeña y la viscosidad alta.

Como la serie de potencias debe ser dimensionalmente idéntica con ρ , se tiene que:

$$\frac{M}{LT^2} = \left\{ \frac{L^3}{T} \right\}^x \left\{ \frac{M}{LT} \right\}^y L^z \left\{ \frac{1}{T} \right\}^w \quad (2.3)$$

que da:

$$y = 1$$

$$3x - y + z = -1$$

$$x + y + w = 2$$

sistema para el que se obtienen los valores

$$x = -\frac{z}{3}; \quad y = 1; \quad w = 1 + \frac{z}{3} \quad (2.4)$$

La serie de potencias puede escribirse, por tanto:

$$\rho = \mu N \sum A \left(\frac{ND^3}{q} \right)^{\frac{2}{3}} = \mu N \phi \left(\frac{q}{ND^3} \right) \quad (2.5)$$

La función ϕ puede determinarse por consideración de los casos límite. Con la matriz cerrada, $\rho = \mu N \phi(0)$, de forma que si ρ debe tener un valor finito, $\phi(0) = K$, o bien $\rho \propto \mu N$. Cuando la matriz está total o parcialmente abierta, $\frac{\rho}{\mu N}$ es una constante, y las demás condiciones son iguales. Por tanto, ϕ es constante y necesariamente $\rho \propto \mu N^{\frac{2}{3}}$ lo es también.

Si se lleva el análisis un poco más lejos y se aplica al movimiento del plástico entre la cámara de la matriz y la matriz, la presión puede expresarse como una función de D , μ y q solamente.

Teniendo una relación:

$$\rho = K_2 \left(\frac{q\mu}{D^3} \right) \quad (2.6)$$

Se debe recalcar que estas conclusiones son en base a un supuesto de semejanza geométrica. Por consiguiente, cualquier intento de *llevarlas a la práctica sólo puede realizarse variando N y μ , es decir, la temperatura*. La variación de q destruiría la condición de semejanza.

La potencia del motor de la máquina extrusora se la define por la ecuación 2.7

$$P = \mu N^3 D^6 \zeta \left(\frac{q}{N D^3} \right) \quad (2.7)$$

Donde la función ζ no es necesariamente idéntica con la función ϕ de la ecuación 2.5; y de las mismas consideraciones acerca de la descarga.

$$P = K_3 \mu N^2 D^3 \quad (2.8)$$

Donde K_3 es una constante.

Con materiales más viscosos, la capa próxima a la pared del cilindro, que por su fricción contra la pared no puede avanzar con el tornillo, avanza hacia la matriz (cabezal) más rápidamente que las otras capas. Esto reduce la velocidad de descarga. Si a lo largo del tornillo hubiera un deslizamiento pleno y, por tanto, un pleno avance, el volumen total de un paso de rosca se descargaría con cada revolución del tornillo.

2.5.1.1.- Eficacia de extrusión

Para determinar el volumen por paso o por espira, se realiza las siguientes consideraciones, respecto a la figura 2.19.

Si V = volumen por paso, se tiene:

$$V = \pi L (R^2_2 - R^2_1) - 1,507(r^3_1 + r^3_2) - 1,348(r^2_1 + r^2_2) \quad (2.9)$$

Que es el volumen teórico que se utiliza para los tornillos cuando r_1 y r_2 son grandes.

De aquí:

$$V = \pi L (R^2_2 - R^2_1) \quad (2.10)$$

Donde $V =$ es el volumen teórico aproximado que se utiliza cuando r_1 y r_2 son pequeños.

La relación entre el volumen real extruido y el teórico nos da la eficacia o rendimiento.

A medida que el material se va moviendo a lo largo del tornillo, aumenta la temperatura y la presión, el material tiende a hacerse más compacto; es decir, que disminuye su volumen por unida de peso. Los tornillos largos descargan a mayor presión que los pequeños y, por tanto la compactación del material se hace mayor. Por consiguiente, el tornillo debe tener un volumen de paso decreciente. Esto se realiza de diversas formas. Las dos más corrientes son disminuir el paso y la profundidad de la rosca ($R_2 - R_1$ en la figura 2.19)

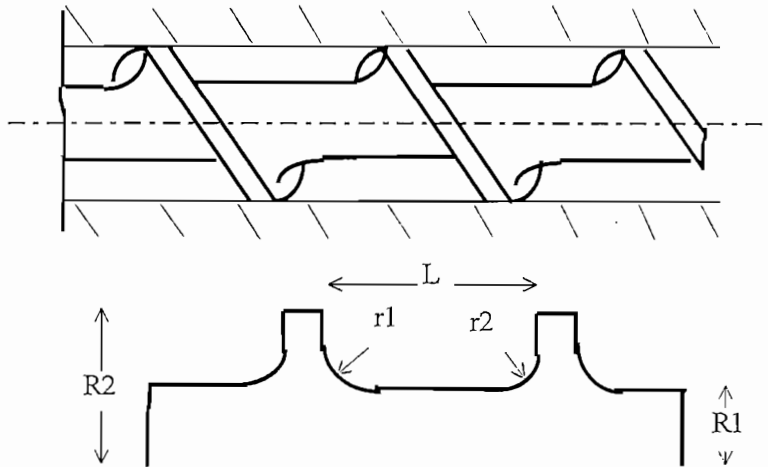


Figura 2.19. Sección del tornillo y de un paso de rosca para determinar el volumen

Para el control de velocidad del tornillo se deben tener en cuenta la potencia que debe transmitirse, la gama de velocidades deseada, la exactitud de la velocidad y su duplicación, y, la aplicabilidad, ya que es un parámetro que controla la producción. Modifica también la acción mezcladora y tiene un efecto sobre la temperatura de fricción creada dentro del material. Los métodos comunes para controlar la velocidad del tornillo son:

- Corriente continua con un reóstato en el circuito de campo
- Motor de velocidad variable y corriente alterna.

A continuación se muestran algunos efectos de variación de producción en la máquina extrusora, al variar algunos de sus parámetros.

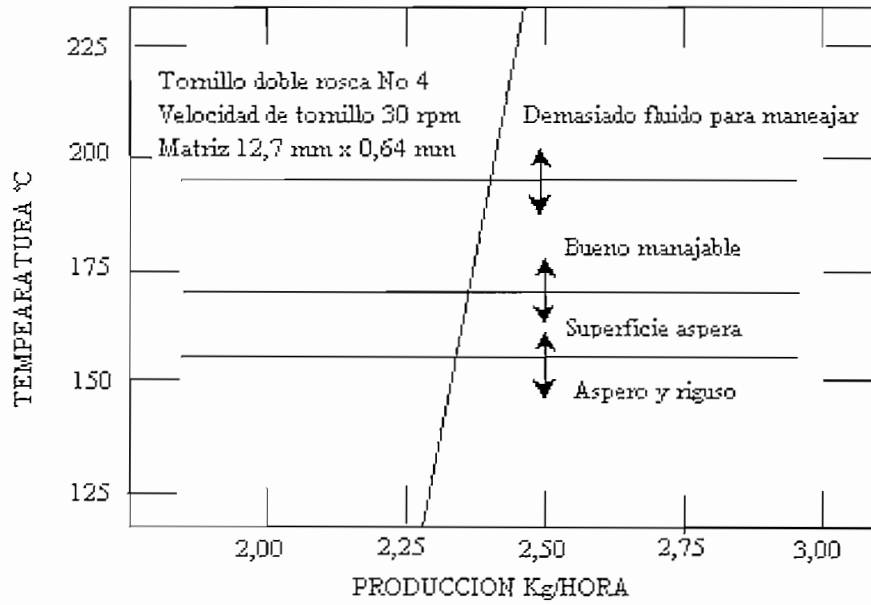


Figura 2.20 Variación de la producción con la temperatura.

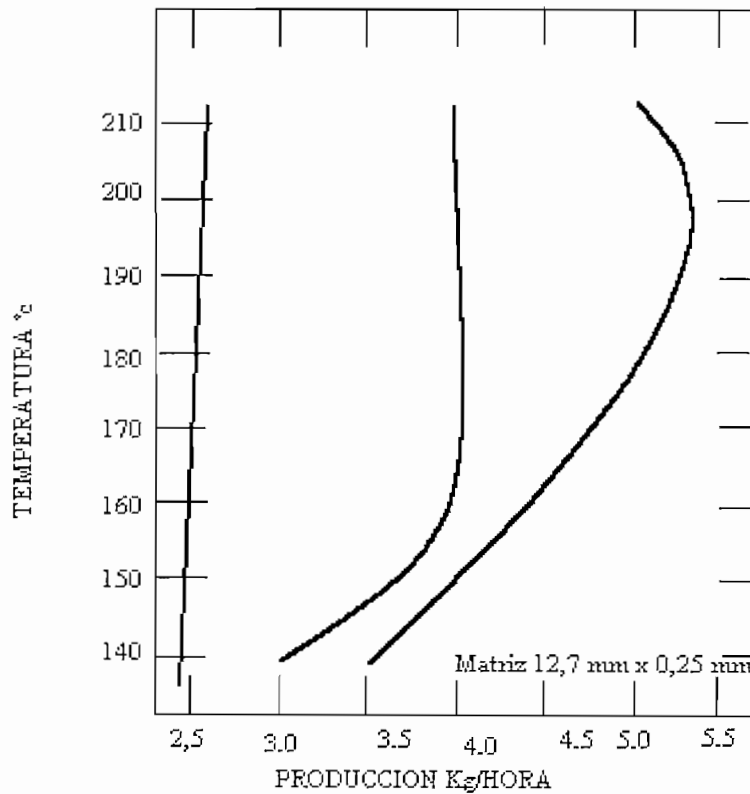


Figura 2.21 Variación de la producción con el tamaño de la matriz y la temperatura.

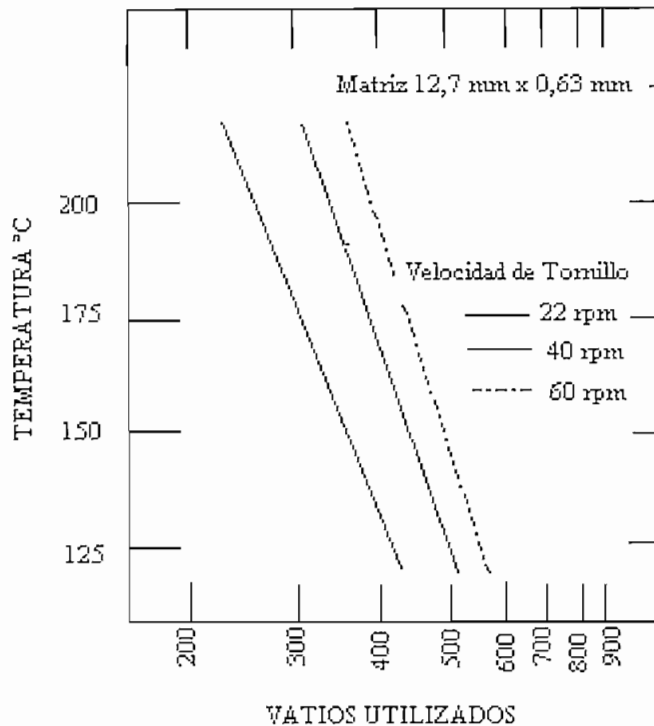


Figura 2.24 Potencia en función de la temperatura.

2.5.1.2.- Importancia de la fricción

Las fuerzas que actúan sobre el compuesto de extrusión se deben a la fricción contra las cuatro áreas de las superficies de confinamiento, es decir:

- Contra la superficie del cilindro entre las partes planas del tornillo
- Contra la parte frontal del tornillo
- Contra la raíz de la rosca
- Contra la parte posterior de la rosca.

La fricción F_a contra el cilindro tiende a hacer que el material no gire con el tornillo. Todas las demás tiene el efecto opuesto. Por tanto, $F_a > F_b + F_c + F_d$, si es que hay movimiento hacia adelante. Está claro que el material tiende a hacer la función de una tuerca sobre un perno, con F_a impidiendo a la tuerca que gire; todas las fuerzas deben expresarse en forma torcional

Para simplificar el problema se supone que p es la presión. Esta es una presión media, que es mucho mayor contra F_b y mucho menor contra F_d , pero es una presión media que puede promediarse sobre todas las superficies del cilindro.

$$\text{Torsión contra cilindro} = \phi \rho 2 \pi R_1^2 l \quad (2.11)$$

$$\text{Torsión contra las dos roscas} = \phi \rho 4/3 (R_1^3 - R_2^3) \quad (2.12)$$

$$\text{Torsión contra la raíz} = \phi \rho 2 \pi R_2^2 l \quad (2.13)$$

De donde:

$$\phi \rho 2 \pi R_1^2 l > \phi \rho 2 \pi 2/3 (R_1^3 - R_2^3) + \phi \rho 2 \pi R_2^2 l \quad (2.14)$$

$$\text{y} \quad R_1^2 l > 2/3 (R_1^3 - R_2^3) + R_2^2 l. \quad (2.15)$$

Una elevación media de la temperatura causada por una caída de presión, y suponiendo que no hay pérdida de calor, lleva a la siguiente relación:

$$\text{Elevación de temperatura } (^{\circ}F) = \frac{\text{caída de presión (PSI)} \times \text{volumen específico (pulgada cúbica)}}{12 \times 778 (\text{pies libra por B.T.U.}) \times \text{calor específico}} \quad (2.16)$$

2.5.1.3.- Temperatura en la pared del cilindro

A continuación se expone en una forma breve la transmisión de calor a través de la pared del cilindro y del método para medir la temperatura de la pared. Un cálculo para este caso particular demuestra que el gradiente de temperatura a través de la pared del cilindro, exigido para proporcionar el flujo térmico para elevar la temperatura del plástico hasta aproximadamente unos 260 °C, es aproximadamente 12 °C. De esta forma, si la temperatura de la superficie exterior de la pared se mantiene en el punto de control y el flujo de material es lo suficientemente constante, este gradiente permanecerá con buena presión en unos 12°C. La temperatura media del material será unos pocos grados inferior, según el diseño del tornillo y las paredes.

Por ejemplo, se supone que el flujo de plástico aumenta de pronto en un 20%, mientras que la temperatura exterior del cilindro se mantiene constante a una temperatura más baja, el flujo de calor a través de la pared será mayor, pero no tanto como el 20%; es decir, el gradiente aumentará unos 2° C. Si la velocidad del tornillo y la presión permanecen aproximadamente constantes, y la temperatura de la pared exterior se mantiene dentro del margen de un grado por encima y por debajo del punto de control, entonces la temperatura media del plástico se estabilizará dentro de un grado y medio de su punto normal más bajo. Esto es suficiente para muchos materiales. Está claro que el elemento sensible (termocupla) se instala para medir la temperatura media de la pared, es decir la temperatura entre las superficies interior y exterior y,

por tanto, el cambio de temperatura debido al cambio de la velocidad del sinfín se obtendrá por la mitad.

El cambio total o fluctuación con el control se mantendrá, por tanto, un poco más que un grado que retiene el controlador. Puede admitirse que a menos que el control automático de temperatura sea excelente, capaz de mantener la temperatura en un margen de medio o un grado, no hay ventajas especiales en la utilización de un elemento muy sensible.

2.5.2.- Funcionamiento de una máquina extrusora.

La figura 2.25 muestra una máquina típica de extrusión.

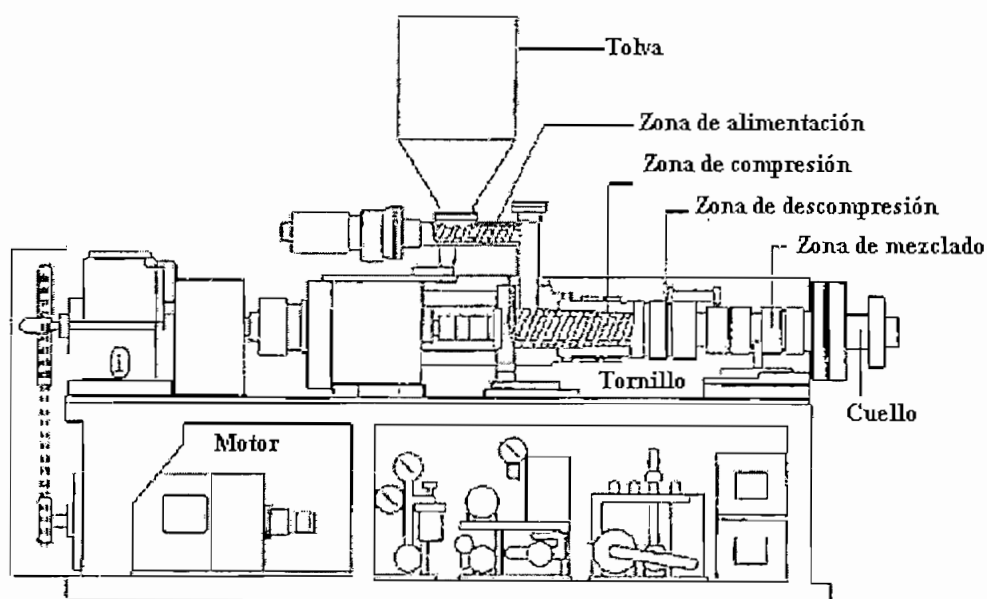


Figura 2.25 Esquema de una máquina extrusora

Para fines de discusión, la máquina se divide en cuatro zonas, siguiendo el orden del paso del material.

	Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV
Plástico	Sólido	Casi sólido	Semi sólido	Flujo plástico
Viscosidad	$N \approx 8$	$N \approx 8$	Cae rápidamente	$N \rightarrow K$
Temperatura del plástico	Frío	Frío	Calor rápido	Por encima de la máquina
Presión	Ninguna	Rápido aumento	Rápido aumento hasta cerca del máximo	Ligero aumento puede bajar
Fuente de presión	Ninguna	Fricción	Fricción y Viscosidad	Viscosidad
Posible análisis	Si	Si	Muy difícil	Si

2.5.2.1.- Zona I

La zona I de alimentación, la tolva tiene un orificio en la parte inferior que aproximadamente es la entrada de la máquina. La tolva es suficientemente grande para permitir que el compuesto se llene con facilidad desde el recipiente a nivel del piso. Tiene una puerta cerca del fondo para detener el flujo cuando se está terminado una serie, y, para aislar el aparato de polvo y humedad, cuenta con un dispositivo de secado del material de extrusión.

El compuesto de extrusión puede introducirse fácilmente si está en forma granular, pero puede causar perturbaciones si es demasiado fino, los materiales muy finos exigen un sistema de agitación en la tolva.

2.5.2.2.- Zona II

En la mayoría de los casos, los gránulos de PVC de la tolva caen por gravedad al tornillo por un agujero en la pared cilíndrica (este pasaje vertical es la garganta figura 2.25). La zona de alimentación ocupa de 3 a 10 pasos del tornillo mientras que la profundidad del canal (altura de la hélice del tornillo) se mantiene constante. Cuando los gránulos de PVC llegan al cilindro, son empujados hacia adelante por las hélices del tornillo.

La capacidad de esta zona de capturar los gránulos de PVC se denomina **la mordida**, esta depende de la forma de las partículas, su lubricidad, y la interacción de temperatura en las superficies de los gránulos de PVC con la temperatura del interior del cilindro. Estas temperaturas controlan la fricción de los gránulos sobre la pared interior del cilindro. Aparentemente, una pared más caliente en esta zona produciría una mayor captura de gránulos

de PVC, esto no es así, ya que para altas temperaturas la capa plastificada sirve como lubricante y se opone a la adherencia. En la literatura de extrusión existe mucha información respecto a la variación de la fricción con la temperatura pero generalmente es más fácil y confiable averiguar cada uno con su propio material, así como probar diferentes temperaturas de la zona de alimentación para observar el efecto en la producción.

Siguiendo con la descripción de las zonas del extrusor, a continuación se tiene la zona de descompresión que sigue a la zona de compresión.

2.5.2.3.- Zona III

Esta parte de la máquina de extrusión se encuentra por debajo del punto de reblandecimiento del plástico. En la zona de alimentación el canal del filete del tornillo tiene profundidad constante. Ahora, en la zona III o de compresión (figura 2.25), el canal del filete del tornillo se hace más pequeño conforme el plástico viaja. Los gránulos de PVC se calientan, principalmente por la fricción entre gránulos de PVC y el metal; el material plastificado se junta en la superficie de la hélice del tornillo que lo empuja. Una parte del plastificado se fuga por la holgura al canal del filete anterior. El aire entre los gránulos no puede moverse hacia el cabezal (no tiene lugar a donde ir) mientras que el material en el canal es comprimido más y más conforme el canal se hace más pequeño, para así de esta forma tener una mejor compactación entre los gránulos de PVC

Las fuerzas de fricción cambian desde ser fuerzas sobre un sólido seco a fuerzas sobre un sólido lubricado, y, el material pasa también, de ser una masa de granos duros y fuertemente unidos a ser un conjunto de granos reblandecidos encuadrados en un plástico fundido. El coeficiente de fricción de los granos fríos secos es bajo, pero se eleva rápido a medida que se alcanza la temperatura crítica en la pared del metal. Como el calor se suministra desde fuera del cilindro, esta temperatura crítica se alcanza en primer lugar en la pared; esto que se manifiesta por un pegado lo cual favorece la acción de la máquina y hace que aumente la fuerza de tracción del plástico, pero poco después la pared metálica y la capa de plástico adyacente se calienta de tal forma que actúa como capas lubricantes. En este momento el tornillo puede estar a la temperatura crítica de pegado, de forma que el resultado final puede ser una fuerza de avance negativa. Es necesario que la suma de todas las fuerzas de avance sea mayor que esta fuerza de retardo si se quiere que la máquina siga funcionando. Por fortuna la fuerza hacia adelante es mucho mayor en las máquinas corrientes, de tal forma que mientras el funcionamiento sea continuo puede prestarse poca atención a la fuerza de retardo.

2.5.2.4.- Zona IV

Al final de la zona de compresión, idealmente el plástico está fundido. Esto nunca pasa realmente y se necesita una zona final de dosificación para obtener uniformidad del material y de la temperatura. Los canales del filete del tornillo de esta zona son de profundidad constante, el material se adhiere a las superficies pero el movimiento del tornillo arrastra el plástico hacia adelante para vencer la resistencia del cabezal.

La fuerza de avance neta en la zona IV es pequeña e incluso puede hacerse negativa en algunos casos, según el diseño del tornillo y la adherencia de los gránulos.

Cuando el material a pasado las tres zonas antes descritas (alimentación – compresión - mezclado), va a entrar en el cabezal, lugar donde recibirá la forma de producto final. La temperatura del plastificado se mide dentro del cabezal. Está normalmente entre 175 - 230° C (350 - 450°F) pero para ciertos plásticos es mayor. Si es demasiado caliente existirán problemas de degradación del material o enfriamiento insuficiente.

La presión del material plastificado también se mide al final del tornillo, y refleja la resistencia del cabezal, La presión esta típicamente entre 35 - 350 Kg/cm² (500 - 5000), y en algunos casos más.

La velocidad del tornillo se selecciona tan alta como lo permita la calidad del producto. Las velocidades típicas están entre 50 - 200 r.p.m. Las máquinas más grandes operan a velocidades más bajas, pero las más pequeñas también giran lento para permitir mayor tiempo de resistencia.

El material plastificado al salir del cabezal, va a pasar por un sistema de calibración y enfriado, en una tina de placas calibradoras y rociado de agua, respectivamente, para luego ser halado mediante un extractor de oruga, para pasar por la sierra y es cortado a las medidas requeridas, si es un tubo acampanado, este deberá pasar a la unidad de acampanado, para luego ser recogido y apilado por el obrero, todo este proceso de extrusión de tubería de PVC, se lo realiza de manera automática.

El sistema de interés en este trabajo es el control de temperatura por lo cual a continuación se describirá el sistema que permite mantener una temperatura estable de trabajo.

2.5.3.- Sistema de calefacción

Los calentadores por resistencias eléctricas se necesitan en toda máquina extrusora durante el arranque. También son útiles en la operación en la primera sección del extrusor para controlar la mordida, para añadir calor cuando se necesite en las otras secciones, y en el cabezal para

compensar las pérdidas por radiación y controlar el espesor. La precalificación de la materia prima es deseada para controlar la mordida, con lo cual se obtiene una temperatura uniforme en la alimentación, con esto se reduce la carga del motor por lo que es común su uso en el secado.

Los calentadores del cilindro y cabezal son bandas de resistencias eléctricas las cuales necesitan una buena superficie de contacto.

Los calentadores son importantes, pero normalmente el motor es la fuente de calor más importante a través de la fricción en el cilindro, con excepción de algunas máquinas pequeñas o de doble tornillo. La precalificación también puede proporcionar hasta el 25% de la energía.

Los calentadores o fuentes externas de calor están ubicados por zonas a lo largo del cilindro donde esta alojado el tornillo y a lo largo del cabezal, para nuestro caso se tiene dividido así:

- **Cilindro o túnel.-** Existen cuatro (4) zonas de calentamiento
- **Cuello.-** Donde se une el cilindro con el cabezal (troquel) una (1)
- **Cabezal o Troquel.-** Existen cuatro (4) zonas de calentamiento.

Cada una de estas zonas actúa por separado es decir tiene un controlador de temperatura independiente para cada una. El valor secuencial esta dado por el operador, el cual programa los valores del Set point a los cuales debe estar cada zona de trabajo y se tiene así por ejemplo:

Ubicación		Set point ° C
Cilindro o túnel	Zona 1	193
	Zona 2	188
	Zona 3	177
	Zona 4	160
Cuello	Zona 1	177
Cabeza o troquel	Zona 2	182
	Zona 3	182
	Zona 4	188
	Zona 5	193

Tabla 2.2 Temperaturas de las zonas del extrusor

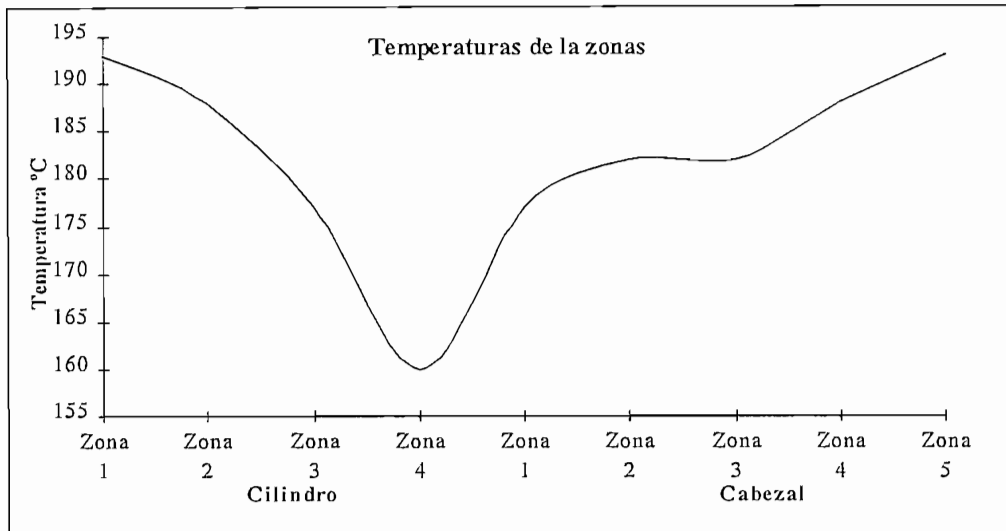


Figura 2.26.- Temperaturas del proceso de acuerdo a las zonas de trabajo, tanto del cilindro (túnel) como del cabezal

La figura 2.26 muestra la variación de temperatura de acuerdo a las zonas de trabajo, se da de tal forma que el PVC alcance el grado óptimo de cocción, una temperatura baja dará como resultado un producto de mala calidad ya que no ha alcanzado el plastificado ideal; un exceso de temperatura dará oportunidad a la degradación del PVC, esta genera ácido hidróclórico en forma gaseosa. El gas HCl es sumamente nocivo a los tejidos humanos así como a las piezas de la extrusora expuestas al mismo; para ambos casos de alta y baja temperatura desemboca en una falla del proceso, por lo cual las industrias de extrusión de pvc recomienda una variación de temperatura máxima de ± 2 °C en todos sus procesos.

2.5.4.- Control de Temperatura.

Los elementos del control de temperatura deben ser tomados en cuenta, para relacionarlos con el problema general del control eficaz. La colocación del elemento sensible a la temperatura, la baja conductividad térmica de los materiales, las masas relativas de la máquina y del material de paso, el calentamiento por presión y por trabajo mecánico, las secciones de material en flujo, la velocidad de flujo y el tiempo de calentamiento por las zonas y las características de viscosidad del material

Las termocuplas deben incorporarse a la pared del cilindro con un contacto térmico lo mejor posible. Si así se hace, la temperatura de la pared interior en el grupo seleccionado no será muy inferior (aproximadamente unos 2 °C) a la marcada por la termocupla, debido a la buena conductividad térmica de la pared de acero; pero podemos esperar que la temperatura del

plástico que fluye sea bastante diferente según las condiciones de la zona, la mezcla y situación del fundido y la sección del plástico que se calienta.

Al controlar la temperatura de esta termocupla en forma automática se controla la temperatura de una gran masa de metal, a través de la cual está fluyendo despacio una masa de plástico. Cualquier cambio en esta temperatura del metal puede derivarse en primer lugar del cambio de consumo de calor para el calentamiento eléctrico, de la temperatura, o del trabajo mecánico del plástico que se convierte en calor. La pérdida de calor varía con la temperatura de la pared exterior o camisa de la máquina de extrusión. Cualquiera que sea el tipo de control utilizado, no se debe permitir amplias fluctuaciones en la fuente térmica o en pérdidas incontroladas, dejando el sistema de control para corregir las pérdidas pequeñas de calor que supongan un pequeño porcentaje.

La experiencia ha demostrado que un solo control de temperatura en una máquina extrusora es inadecuado, especialmente cuando se cambia con frecuencia el material de extrusión, que durante su paso requiere distintas temperaturas de calentamiento y enfriamiento. Por esto se concluye que es adecuada la división en zonas de trabajo, para tener un mejor control de temperatura del proceso de extrusión.

Para una mejor comprensión de este trabajo a continuación se describe los componentes del extrusor utilizado.

2.6.- Descripción de los componentes de la máquina extrusora.

La máquina extrusora motivo de esta investigación es una extrusora marca CINCINNATI MILACRON modelo CM-55 de doble tornillo, cabezal de alimentación central, es una bomba de desplazamiento positivo para el transporte controlado de material a través de un troquel. Los componentes principales de esta unidad son:

- Un cilindro y tornillo para transportar, mezclar y comprimir el material
- Sistema de calentamiento y de enfriamiento para controlar el calor necesario para el procesamiento
- Un tren de mando para accionar los tornillos
- Una estación de control para la operación de la unidad, incluyendo instrumentos para registrar el proceso e indicar posibles problemas

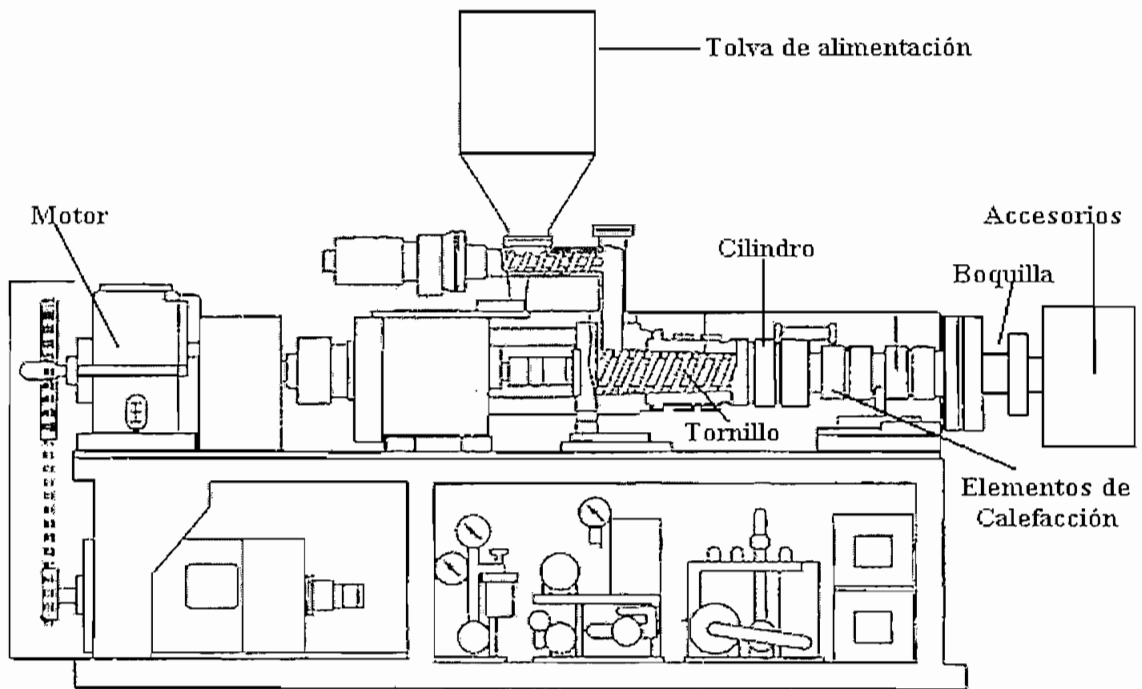


Figura 2.27. Componentes de la extrusora

2.6.1.- Cilindro y tornillo

El conjunto del cilindro tiene un tornillo engranante, dual y cónico. La combinación de conicidad del cilindro y tramo de los tornillos proporciona la compresión apropiada de la resina de PVC.

Las especificaciones técnicas son:

Diámetro menor: 55 mm; mayor 110 mm, longitud 2090 mm.

Máximo torque por tornillo 2188 pies-lbs, torque total 4376 pies-lbs

Velocidad 7 a 36 R.P.M.

Cada uno de los tornillos tiene un núcleo hecho a través del cual circula fluido termo transparente. Esto permite la transferencia de calor indeseable de la zona de dosificación, a la zona de admisión. El sistema de enfriamiento del núcleo de los tornillos y las cuatro zonas de calentamiento del cilindro son independientemente controlados por bandas calentadoras y permutadores térmicos para estabilización precisa de las temperaturas de operación.

2.6.2.- Sistema de calefacción y enfriamiento.

Se aplica calor a las cuatro zonas del cilindro mediante bandas calentadoras eléctricas. El calor es removido del cilindro mediante circulación de aceite a través de serpentines devanados

alrededor del cilindro en las zonas 2, 3 y 4. Este aceite es circulado mediante bombeo a través de un permutador térmico ubicado en la base la extrusora.

Las zonas 2, 3 y 4 incorporan controles de tres posiciones: CALEFACCIÓN, DESCONECTADO Y ENFRIAMIENTO.

La zona 1 del cilindro, el cuello (zona 1 del cabezal) y las zonas 2 a 5 del cabezal son controladas por instrumentos de dos posiciones: CALEFACCIÓN Y DESCONECTADO

Las especificaciones técnicas son:

Rango de control de temperatura:	30°C a 232°C
Potencia total de los calentadores	18KW, 230V, trifásico, 60Hz.

2.6.3.- Tren de mando

El tren de mando comienza con un motor de par constante de velocidad infinitamente variable acoplado a un reductor de velocidad. Desde el reductor de velocidad, el tren de mando se evoluciona a un mando por engranajes con dos ejes de distribución. Puesto que los ejes propulsores están en las mismas líneas centrales que sus correspondientes tornillos cónicos, es posible emplear engranajes grandes para transferencia de par y rodamientos grandes para absorber la fuerza axial (contra presión) generada en la operación de la extrusora.

Las especificaciones técnicas son:

Potencia del motor	22KW, 230V, trifásico, 60Hz.
Máxima velocidad del motor	1750 R.P.M.
Rango de control	1:5
Relación de reducción de velocidad	1:48.6

Luego de revisar los aspectos más generales sobre la extrusión de PVC, a continuación se describe la forma de obtener el modelo matemático

III.- APLICACION AL CASO DE ESTUDIO

Subindice

		Pagina
3.1	Obtención del modelo de la planta	44
3.1.1	Acción de control	45
3.1.1.1	Controladores Barber Coman	46
	Tipos de control	47
3.1.2	Elemento final de control	47
	Relé de mercurio	47
3.1.3	Elemento detector	48
3.1.4	Entrada deseada	50
3.1.5	Proceso	50
3.1.6	Perturbaciones	50
3.2	Obtención de la función de transferencia en lazo cerrado	51
3.3	Obtención de la función de transferencia en lazo abierto	63

III.- APLICACION AL CASO DE ESTUDIO

Para ilustrar de mejor manera el estudio del modelo y control actual de la máquina extrusora analizada, se procederá a obtener un modelo de la planta según se describe a continuación.

3.1.- Obtención del modelo de la planta

Para obtener el modelo de la planta en primer lugar se analiza el funcionamiento del proceso de extrusión, las variables de entrada y salida involucradas permiten describir el sistema de la siguiente forma:

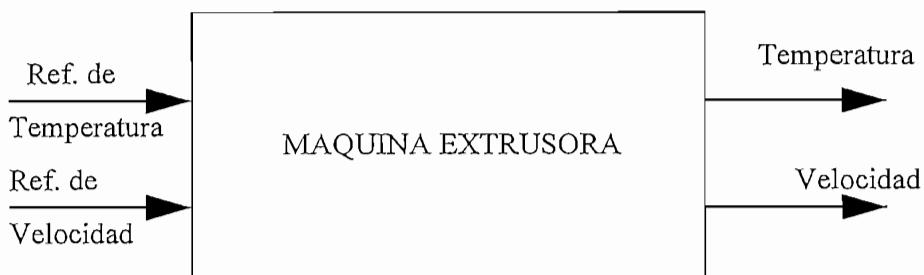


Figura 3.1.- Variables de entrada y salida en el proceso de extrusión

Como el proceso de extrusión es térmico-mecánico, se requerirán de al menos de dos instrumentos básicos para el control de la máquina: uno para la temperatura y el otro para la velocidad del tornillo, Como el movimiento generado por el motor, tiene una buena regulación, en algunas máquinas de extrusión no suele emplearse un control automático de velocidad del tornillo, pero el control de temperatura es esencial para la calidad y la economía de la producción. Un método ideal de control automático para la máquina incluiría la medida de la presión en su punto más crítico. Desafortunadamente las propiedades especiales del PVC no permiten esta medida de presión para ser transmitida a un indicador. La alternativa práctica consiste en mantener la temperatura y velocidad constantes por separado, y, luego ajustar la relación entre ellas según datos de operaciones para materiales y secciones de matriz.

Debido a que este trabajo está centrado en el control de temperatura, luego de correlacionar los elementos existentes en la planta industrial, se determina el lazo de control de temperatura del extrusor, la figura 3.2 ilustra el mismo.

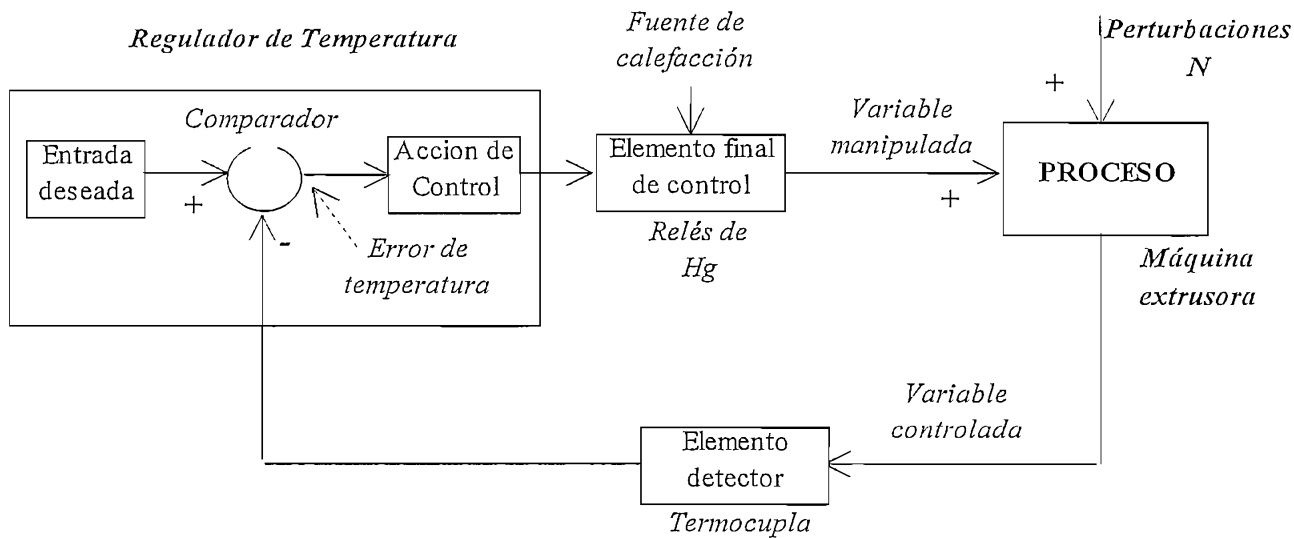


Figura 3.2.- Lazo de control de temperatura de un extrusor

A continuación se describen en forma breve cada uno de los elementos que intervienen en el lazo de control, el análisis se empieza por el controlador.

3.1.1.- Acción de control:

Los controladores, son dispositivos que cumplen dos funciones básicas:

1. Comparar en cada instante el valor de la entrada deseada (set point) con el valor de la variable medida de la realimentación, encontrando así el valor de error E .
2. Ejecutar de acuerdo a los diferentes valores de error E en el tiempo, una acción de control definida por G_c la cual tiende a eliminar el error E en condiciones óptimas de rapidez y estabilidad

Los controladores pueden ser analógicos o digitales. Por lo general se anexan elementos adicionales que permitan comunicar al sistema con el operador (por ejemplo, permiten tener acceso a la lectura de temperaturas, alarmas, mandos de interrupción, etc.).

El tamaño, modularidad y funciones auxiliares varían considerablemente de fabricante a fabricante, en estos últimos años con el desarrollo de los microprocesadores, la demanda de los controladores de temperatura para procesos industriales ha crecido notablemente, y, en el mercado se encuentran varios tipos, con variedad de esquemas, así por ejemplo: difusa (fuzzy), adaptativo, PID, PID con antiwindup, etc. Cabe mencionar que en la planta industrial, los controladores utilizados son analógicos, pero también ya se utilizan controladores (PID) en otras máquinas de extrusión basados en microprocesadores. Los controladores de este estudio son los

que utiliza la máquina extrusora motivo de interés, y estos son los controladores analógicos BARBER COLMAN.

Controladores BARBER COLMAN

El controlador existente es un modelo de la serie 520 de la casa BARBER COLMAN COMPANY y se utiliza para el sistema de control de todas las nueve las zonas de la extrusión, independientemente, es decir, se utiliza un controlador por cada una de las zonas de calentamiento.

Estos controladores tienen salidas de estado sólido las cuales pueden manejar 1A de corriente de trabajo y hasta 20A como máxima. Pueden conmutar voltajes de 24 Vac a 240 Vac, que controlan la calefacción. Tienen control ON/OFF de tiempo proporcional y una relación de ciclo la cual puede ser ajustada de 6 a 60 seg. Por medio del control CYCLE del panel frontal.

La serie 520 acepta como entrada la salida de: una termocupla BC, una RTD o algún otro dispositivo que genere señales en mili voltios al medir. Esto ayuda a monitorear la variables como temperatura y presión

Las características generales de este controlador son:

- Esta diseñado en un circuito analógico.
- Monitorea y controla continuamente un proceso.
- Tiene un display alfanumérico continuo para seleccionar el set point.
- Los parámetros propios del controlador se los puede variar según la necesidad.
- Todos los ajustes se hacen en la parte frontal del controlador. Por lo que no hay la necesidad para el operador de retirar el controlador del panel en el cual esta colocado.
- Posee ganancia ajustable.
- Temperatura ambiente de funcionamiento: (40 - 150 °F).
- Fuente de poder: 120 o 420 V \pm 5% a 50 o 60 Hz.
- Resiste un rango de humedad de 0 -70% RH.

Para información detallada del controlador se adjunta en el anexo D.

Tipos de control.

Los modos de control que se pueden implementar en este controlador son: ON/OFF y las combinaciones del PID standard como muestra la tabla 3.1

ON/OFF	Control ON/OFF
P	Solamente proporcional
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral más derivativo

Tabla 3.1 Modos de control del controlador BARBER COLMAN 520

3.1.2.- Elemento final de control

Este dispositivo es gobernado por el controlador, y es quién actúa directamente sobre la planta, es decir calienta o no las zonas de trabajo de la máquina extrusora.

Así, el elemento final de control o actuador, toma las señales que le entrega el controlador y actúa directamente sobre la planta ejerciendo su acción sobre la variable manipulada para corregir el error E , es decir calienta o no las zonas del túnel o el cabezal de la extrusora, el actuador de la extrusora. El actuador que permite conectar o desconectar la fuente de calefacción de la máquina extrusora es un relé de mercurio, cuyas características son descritas en forma breve a continuación:

Relé de Mercurio

Este relé de mercurio (Hg), recibe una señal del controlador y acciona unos contactos, tiene un tiempo de retardo de 75mseg, como tiempo es muy pequeño comparado con la constante de tiempo menor de todas las zonas (0.248min =14880mseg.) Se lo considera para nuestro análisis como un relé ideal.

Como hoy en día se trata de utilizar elementos en todos los procesos, que de alguna manera no vayan a contaminar el medio ambiente, en el capítulo 5 se procederá con el dimensionamiento adecuado para reemplazar estos relés que causan problemas al medio ambiente y que en países mas industrializados su uso no es permitido.

Las características de este relé se detallan en el anexo E.

3.1.3. - Elemento detector

Dispositivo que sensa el estado de la planta (temperatura de la zona de trabajo de la extrusora) y lo traduce en señal inteligible para el controlador. A este elemento detector se lo conoce también como elemento primario (sensor o transductor) y se caracteriza porque en general recibe energía de un primer sistema (planta) y lo entrega a un segundo sistema (transmisor o acondicionador de señal) de energía que por lo general es de otro tipo.

Para el sensado de la temperatura se dispone de una termocupla tipo J, la cual está ubicada en el cilindro y se encarga de recoger la información. Esta termocupla convierte un cambio de temperatura en un cambio de voltaje (principio de funcionamiento de las termocuplas).

La figura 3.3 presenta la curva característica del convertidor de temperatura a voltaje. Siendo su respuesta mucho más rápida que la del proceso, su función de transferencia se considera constante

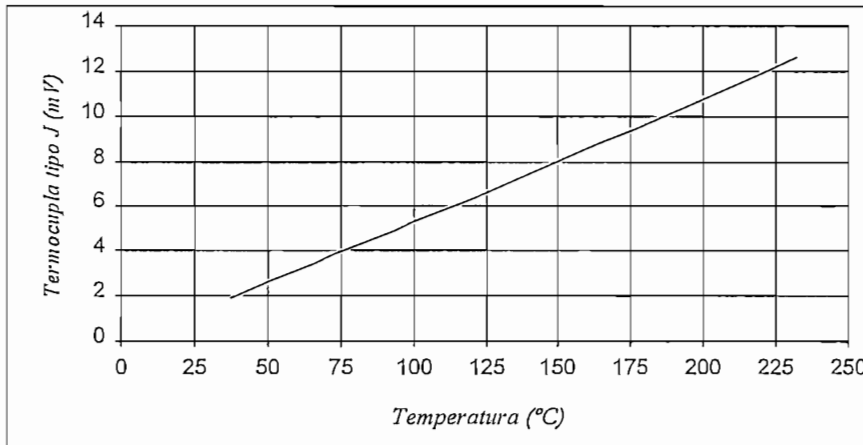


Figura 3.3 Curva característica Temperatura vs. Voltaje en la termocupla

En el proceso de extrusión los valores de temperatura van desde los 38°C hasta los 232°C, en este rango la termocupla J entrega un valor de voltaje de 1,94mV. a 12,57mV. respectivamente. Como el proceso de trabajo normalmente esta se ubica en los 180° C se tiene un valor de voltaje de 9,67mV. Como la adquisición de datos del controlador trabaja con valores normalizados de 0V a 5V, se tendrán que reajustar estos valores de voltaje; esto se lo realiza empleando un transmisor o acondicionador de señal. Si bien con el avance de la tecnología generalmente estos acondicionadores de señal se ubican dentro del mismo controlador.

De los datos que se tiene del controlador se tiene la siguiente tabla:

Temp °F	Temp °C	Acondicionador (V)
100	38	1,686
125	52	1,846
150	66	2,007
175	79	2,17
200	93	2,333
225	107	2,498
250	121	2,664
275	135	2,83
300	149	2,997
325	163	3,165
350	177	3,333
375	191	3,501
400	204	3,669
425	218	3,838
450	232	4,006

Tabla 3.2 Valores del acondicionador de voltaje para el controlador

De lo expuesto anteriormente se obtiene una gráfica de la temperatura sensada y valor de voltaje a la salida del acondicionador de señal, se tiene la siguiente gráfica.

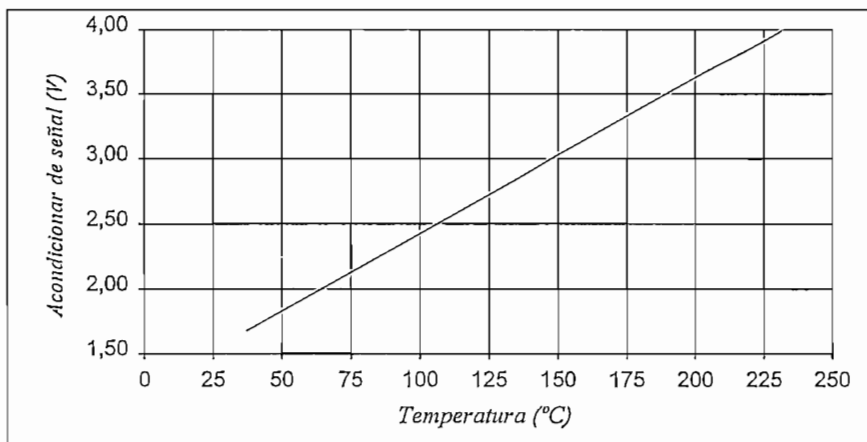


Figura 3.4 Curva de Temperatura del proceso vs. Voltaje a la salida del acondicionador de señal

De la figura 3.4 se puede obtener la relación entre la temperatura medida y el voltaje a los terminales del acondicionador de señal, por lo que se tiene:

$$V = 0,01193 * T + 1,235 \quad (3.1)$$

Donde V: Voltaje del acondicionador

T: Temperatura en °C

Por, lo que se tiene una función de transferencia para el acondicionador de temperatura a voltaje de la forma siguiente:

$$\frac{V(s)}{T(s)} = G_{cn'} = 0.01193 \quad (3.2)$$

El elemento detector constituye también la realimentación del sistema de lazo de control de las zonas de trabajo de la extrusora

3.1.4. - Entrada deseada

Llamada también set point, referencia o valor de consigna permite ingresar el valor de temperatura a la cual se desea que el proceso trabaje. Por lo general el set point esta compuesto por un potenciómetro de fácil manipulación para el operador.

3.1.5.- Proceso

Son las zonas de trabajo de la extrusora, es decir: el túnel y el cabezal de las cuales se controla la temperatura de extrusión del PVC, y que ya fue ampliamente discutido en el capítulo II

3.1.6.- Perturbaciones

Estas existen en todos los procesos. El objetivo del controlador es mantener un valor promedio de la variable controlada acorde con el valor de set point de entrada, despreciando los posibles cambios de perturbación

3.2.- OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRASFERENCIA EN LAZO

CERRADO

Para el análisis del modelo y el sistema real de control se procede a obtener una expresión matemática que describa su comportamiento.

Se recurre a las señales de prueba más utilizadas, como son las funciones: escalón, rampa, impulso, y sinusoidal, ya que, permiten representar las entradas más usuales a que está sujeto un sistema. La figura 3.5 ilustra este tipo de funciones.

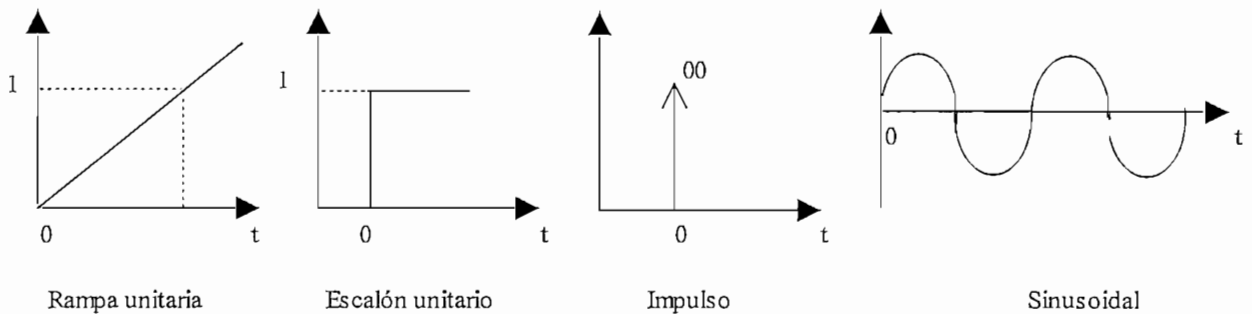


Figura 3.5 Señales de prueba más utilizadas en el análisis de sistemas de control

Luego para identificar el sistema de control de temperatura, se procedió a introducir una función paso a la entrada y se observó a su salida. En primera instancia se realizó la prueba en el encendido de la máquina, pero esta respuesta no era real, con relación al trabajo del extrusor, ya que, este, en condiciones normales de trabajo, sus características son muy diferentes que al iniciarlo, pues como se describió en el proceso de extrusión la fuente neta de calor era el motor al hacer girar el tornillo. Por esta razón la prueba necesariamente debió realizarse en condiciones normales de trabajo, es decir, se hizo un cambio del set point de una magnitud que ayude a obtener datos cuantificables.

La variación que se introdujo al set point fue de 30 °C, una variación mayor hubiese causado problemas de degradación del material y fallas en el proceso de producción, se obtuvo las variaciones de temperatura en función del tiempo, en las respectivas zonas de trabajo, tal como se ilustra en la tabla.3.2:

Tiempo en min.	Δ Temperatura en ° C
0	0
1	0,5
2	2
3	3,5
4	5,5
5	7,5
6	9,5
7	11
8	12
9	13
10	13,5
11	14
12	14,5
14	15

Tabla 3.3 Variación de temperatura en función del tiempo (túnel zonal)

Según la tabla 3.3 la respuesta del sistema es no oscilatoria, es decir, tiene una respuesta sobreamortiguada, por tanto el sistema no tiene polos complejos conjugados. Entonces para la identificación del sistema se utiliza el *método por determinación de las constantes de tiempo*, el cual se desarrolla a continuación.

En el dominio del tiempo la respuesta de un sistema no oscilatorio tiene la siguiente forma:

$$C(t) = A + k_1 e^{-t/\tau_1} + k_2 e^{-t/\tau_2} + k_3 e^{-t/\tau_3} + \dots + k_n e^{-t/\tau_n} \quad (3.3)$$

donde:

A = Amplitud de la variación en la señal de salida.

τ_i = Constantes de tiempo del sistema.

N = Orden del sistema.

k_i = Constantes de proporcionalidad.

Para la mejor comprensión del análisis del modelo matemático de las zonas de trabajo de la extrusora, se entenderá por dominancia de polos de lazo cerrado, estudiando la relación entre las partes reales de dichos polos. Si las relaciones de las partes reales exceden de cinco y no hay ceros cercanos, los polos de lazo cerrado más cercanos al eje $j\omega$ dominan la respuesta transitoria y a estos se los conoce como polos dominantes. Si alguna constante de tiempo τ_i es dominante, para tiempos grandes los términos de la ecuación 3.3 que tienen constantes de tiempo pequeñas

y son despreciables, mientras que el término de la constante de tiempo grande continua siendo de importancia. Entonces la ecuación 3.3 se aproxima a:

$$C(t) \approx A + k_1 e^{-t/\tau_1} + 0 + 0 + 0 + \dots \quad (3.4)$$

$$C(t) - A = k_1 e^{-t/\tau_1} \quad (3.5)$$

Siendo para este caso, $A = 16^\circ \text{C}$, valor que corresponde a la variación asumida al variar el set point de entrada.

Realizando las operaciones en la ecuación 3.5, se obtiene los siguientes valores mostrados en la tabla 3.4.

Tiempo (min.)	A-c(t)
0	16
1	15,5
2	14
3	12,5
4	10,5
5	8,3
6	6,6
7	5,2
8	4
9	3,2
10	2,5
11	2
12	1,6
14	1

Tabla 3.4 Operaciones realizadas según la ecuación 3.5

Si a los valores de $|C(t) - A|$ se los dibuja en escala semilogarítmica, se obtiene la curva representada en la figura 3.6. Para valores grandes de t , se observa que la curva tiende a una recta cuya pendiente es determinada por la constante de tiempo dominante.

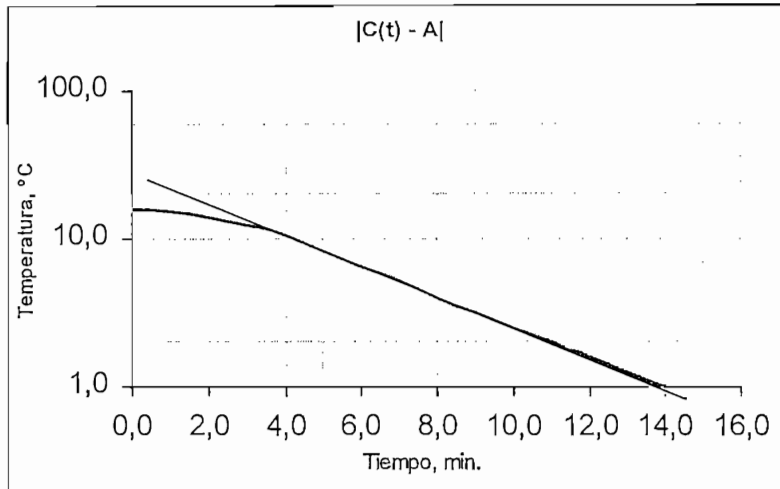


Figura. 3.6 Curva para encontrar la constante K_1 y τ_1

Para encontrar la recta que represente mejor los datos, se utiliza para este caso interpolación mediante el método de mínimos cuadrados; en este método, si la ecuación de una recta es:

$$p_1(x) = a_0 + a_1 \cdot x \quad (3.6)$$

Según el algoritmo de mínimos cuadrados se tiene la siguiente ecuación matricial 3.7 [Ref. 21]

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_i \\ \sum x_i & \sum x_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i \cdot y_i \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Donde:

n = número de puntos tomados.

a_0, a_1 = constantes.

x_i = tiempo (t_i).

y_i = puntos de la variable medida.

Resolviendo el sistema, se obtienen las ecuaciones para encontrar las constantes de la recta definida por la ecuación 3.6

$$a_0 = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \cdot \sum x_i \cdot y_i}{n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (3.8)$$

$$a_1 = \frac{n \cdot \sum x_i \cdot y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i}{n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (3.9)$$

Como la función a interpolar tiene la forma $f(t) = k_1 e^{-t/\tau_1}$, se debe cambiar a una expresión parecida a la ecuación lineal 3.6, de la manera siguiente:

$f(t) = k_1 e^{-t/\tau_1} \Rightarrow \ln [f(t)] = \ln [k_1 e^{-t/\tau_1}] = \ln[k_1] - t/\tau_1$, con esta última relación se reemplaza y se tiene una simple ecuación lineal de la siguiente forma

$y = a_0 + a_1 \cdot t$, los cálculos realizados se presentan en la tabla 3.5.

$X_i = \text{tiempo (min)}$	$f(t) = k_1 \cdot e^{-t/\tau_1}$	$y_i = \ln(F(t))$	$X_i Y_i$	X_i^2
4	10,5	2,3514	9,4055	16
5	8,3	2,1163	10,5813	25
6	6,6	1,8871	11,3224	36
7	5,2	1,6487	11,5406	49
8	4	1,3863	11,0904	64
10	2,5	0,9163	9,16291	100
11	2	0,6931	7,62462	121
12	1,6	0,47	5,64004	144
14	1	0	0	196
$\Sigma X_i = 77$		$\Sigma Y_i = 11,469$	$\Sigma X_i Y_i = 76,3677$	$\Sigma X_i^2 = 751$

Tabla 3.5. Análisis de la regresión

$$a_0 = 3,293 \quad k_1 = e^{(a_0)} \quad k_1 = 26,916$$

$$a_1 = -0,236 \quad \tau_1 = 1/a_1 \quad \tau_1 = 4,238$$

Donde $f(t) = k_1 e^{-t/\tau_1} = 26,916 e^{-t/4,238}$, los cálculos se realizaron sacando el valor absoluto para poder representar los datos en escala semilogaritmica, pero k_1 tiene signo negativo de los datos de la tabla 3.4

La ecuación de $C(t)$ llega a ser:

$$C(t) = 16 - 26,916 e^{-t/4,238} + k_2 e^{-t/\tau_2} + k_3 e^{-t/\tau_3} + \dots + k_n e^{-t/\tau_n}$$

$$C(t) - 16 - 26,916 e^{-t/4,238} = k_2 e^{-t/\tau_2} + k_1 e^{-t/\tau_1} + \dots + k_n e^{-t/\tau_n} \quad (3.10)$$

Para determinar la constante k_2 , se realiza el mismo procedimiento, es decir se representa en escala semilogaritmica $C(t) - 16 - 26,916 e^{-t/4,238}$ (tabla 3.6), luego para tiempos grandes los términos que tienen las constantes de tiempo más pequeñas se vuelven prácticamente cero, y prevalece $k_2 e^{-t/\tau_2}$.

Tiempo (min)	$c(t) - 16 - 26,916 e^{-t/4,238}$
0	10,91654
1	5,759937
2	2,792089
3	0,763174
4	-0,024127
5	-0,025668
6	-0,064547

Tabla 3.6 Datos para encontrar las constantes k_2 y τ_2

De la figura 3.7 en escala semilogaritmica y de la tabla 3.6 se observan que la mejor recta pasa por 2 y 6 minutos.

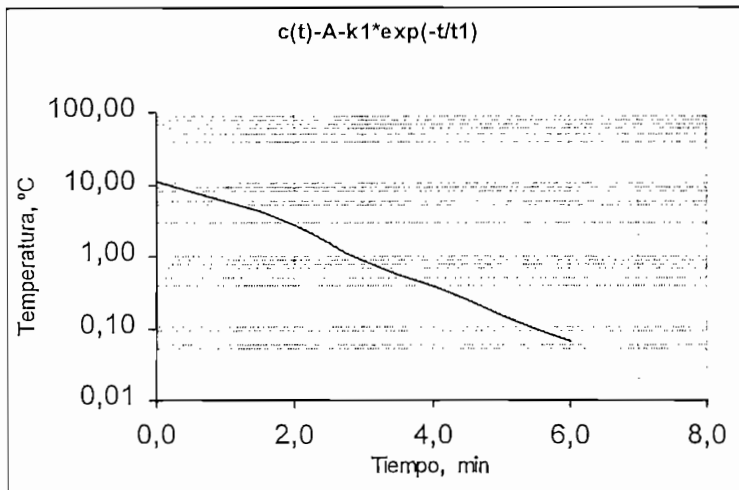


Figura 3.7 Curva para encontrar las constantes k_2 y τ_2

Por lo cual obtiene las siguientes relaciones:

$$\text{Para } t = 2 \text{ min.} \quad \Rightarrow \left| k_2 e^{-t/\tau} \right| = 2,792 \quad (3.11)$$

$$\text{Para } t = 6 \text{ min.} \quad \Rightarrow \left| k_2 e^{-t/\tau} \right| = 0,064 \quad (3.12)$$

Resolviendo las relaciones 3,11 y 3,12, se tiene los valores de $k_2 = 18,363$ y $\tau_2 = 1,062$ min., reemplazando los valores se tiene: $y = k_2 e^{-t/\tau} = 18,363 e^{-t/1,062}$

por lo cual se tiene la ecuación para $c(t)$ como:

$$C(t) = 16 - 26,916 e^{-t/4,238} + 18,363 e^{-t/1,062} + k_3 e^{-t/\tau^3} + k_n e^{-t/\tau^n} \quad (3.13)$$

Realizando las operaciones en la ecuación (3.13) se identifica el término $k_3 e^{-t/\tau^3}$, según la tabla 3.7 y como existen pocos puntos lo más lógico es unir los puntos que tiendan a una línea recta.

Las constantes k_3 y τ_3 se obtienen de la siguiente manera:

De la figura 3.8 en escala semilogarítmica y de la tabla 3.7, los puntos para los cuales pasa la mejor recta de $k_3 e^{-t/\tau_3}$ es para 0 y 1 minuto. Por lo tanto se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\text{Para } t = 0 \text{ min.}, \quad \Rightarrow |k_3 e^{-t/\tau_3}| = 7,447 \quad (3.11)$$

$$\text{Para } t = 1 \text{ min.} \quad \Rightarrow |k_3 e^{-t/\tau_3}| = 1,400 \quad (3.12)$$

Tiempo (min.)	$c(t) - 16 - 26,916 e^{-t/4,238} + 18,363 e^{-t/1,062}$
0	-7,447009
1	-1,400556
2	0
3	-0,325544
4	-0,448651

Tabla 3.7 Datos para encontrar las constantes k_3 y τ_3

Resolviendo las ecuaciones 3.11 y 3.12 simultáneamente se encuentra que $k_3 = 7,447$ y $\tau_3 = 0,598$ min.

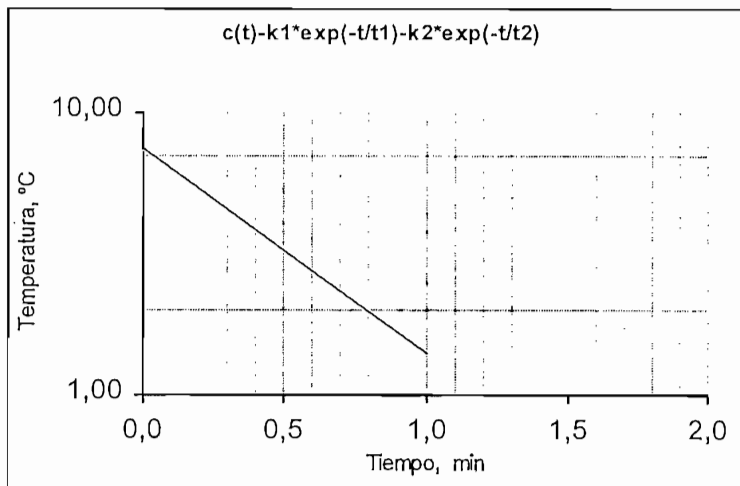


Figura 3.8 Curva para encontrar las constantes k_3 y τ_3

Para representar la recta en la escala semilogarítmica se tomó el valor absoluto de los valores de la tabla 3.7, por tanto k_3 tiene signo negativo, entonces:

$$y = k_3 e^{-t/\tau_3} = -7,447 e^{-t/0,598}$$

Luego la ecuación definitiva de la zona 1 del túnel $c_{TZ1}(t)$ es:

$$C_{TZ1}(t) = 16 - 26,916 e^{-t/4,238} + 18,363 e^{-t/1,062} - 7,447 e^{-t/0,598}. \quad (3.14)$$

La tabla 3.8 muestra los valores de la función $C_{TZ1}(t)$ real, es decir, medidos en el proceso al variar bruscamente el set point y los valores de la función $C_{TZ1}(t)$ identificada, se puede ver que la diferencia entre las dos funciones es mínima.

Tiempo (min)	C(t) = real	C(t) = identificada
0	0	0
1	0,5	0,5
2	2	1,737
3	3,5	3,776
4	5,5	5,939
5	7,5	7,889
6	9,5	9,529
7	11	10,86
8	12	11,93
9	13	12,78
10	14	13,46
11	14	13,99
12	15	14,41
14	15	15,01

Tabla 3.8 Valores de $C_{z1}(t)$ medidos en el proceso y $C_{z1}(t)$ identificada.

La figura 3.9 muestra la respuesta real del túnel zonal ante una entrada escalón.

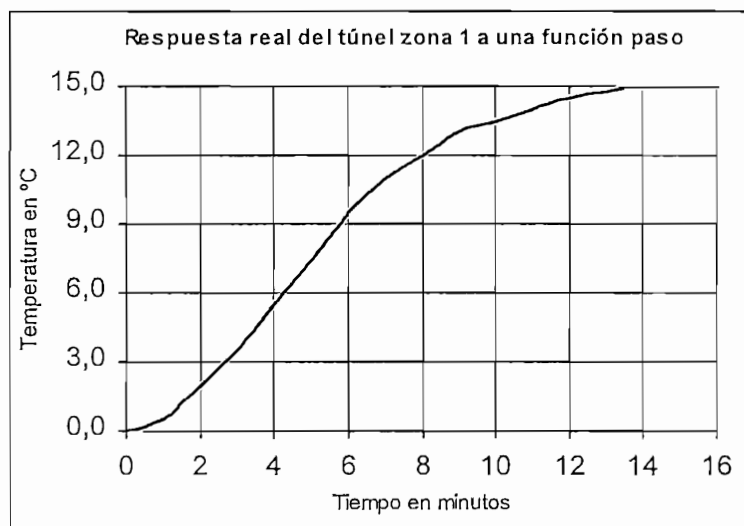


Figura 3.9 Respuesta real en función del tiempo del túnel zona 1 ante un incremento de temperatura(entrada escalón)

La figura 3.10 muestra la respuesta del túnel zona 1 encontrada.

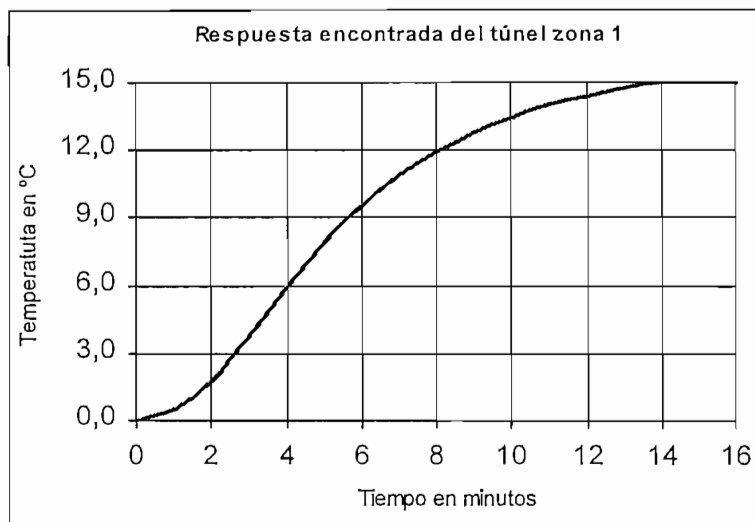


Figura 3.10 Respuesta identificada en función del tiempo del túnel zona 1 ante un incremento de temperatura(entrada escalón)

Para tener un criterio claro de la bondad del modelo identificado, se utiliza el coeficiente de regresión, el mismo que se lo define a continuación:

$$\gamma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (c(t)_{iden} - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (c(t)_{real} - \bar{y})^2} \quad (3.15)$$

Además:

$$\bar{y} = y_{promedio} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c(t)_{real} \quad (3.16)$$

Donde:

γ^2 = Coeficiente de regresión.

N = Número de puntos tomados.

$C(t)_{real}$ = Puntos medidos de la variable controlada.

$C(t)_{iden}$ = Función identificada

Tiempo	C(t) _{real}	C(t) _{ident}	[C(t) _{real} - Y _{promedio}] ²	[C(t) _{ident} - Y _{promedio}] ²
0	0	0	75,32	75,32
1	0,5	0,5	66,89	66,89
2	2	1,737	44,6	48,19
3	3,5	3,776	26,82	24,04
4	5,5	5,939	10,1	7,503
5	7,5	7,889	1,389	0,623
6	9,5	9,529	0,675	0,723
7	11	10,86	5,389	4,772
8	12	11,93	11,03	10,59
9	13	12,78	18,67	16,85
10	14	13,46	23,25	22,84
11	14	13,99	28,32	28,23
12	15	14,41	33,89	32,89
14	15	15,01	39,96	40,09
	Σ = 122	Σ = 121,8	Σ = 386,3	Σ = 379,5

Tabla 3.9 Cálculos para encontrar el coeficiente de regresión.

En la tabla 3.9 se presentan los cálculos realizados para encontrar el coeficiente de regresión, de la misma que se tiene:

$$\bar{y} = y_{promedio} = 8,679$$

$$\gamma^2 = \frac{386,3}{379,5} = 1,018.$$

Con el cálculo del coeficiente de regresión queda más que ratificada que la función identificada es válida.

Para encontrar la función de transferencia se aplica la transformada de Laplace a la ecuación 3.14, y utilizando las relaciones apropiadas se tiene:

$$f(t) = e^{-at} \Rightarrow F(s) = \frac{1}{s+a} \quad \therefore f(t) = e^{-t/\tau} \Rightarrow F(s) = \frac{1}{s + \frac{1}{\tau}} \quad (3.17)$$

$$f(t) = A \Rightarrow F(s) = \frac{A}{s} \quad (3.18)$$

$$C_{z1}(t) = 16 - 26,916 e^{-t/4,238} + 18,363 e^{-t/1,062} - 7,447 e^{-t/0,598}.$$

A continuación se listan las funciones de transferencia de las zonas restantes, en las cuales se utiliza el mismo procedimiento utilizado para obtener la función de transferencia de la zona 1 del túnel, para mayores detalles el anexo A describe la obtención de las mismas

Zona de extrusión	Ecuación en lazo cerrado
Túnel zona 1	$G_{TZ1} = \left(\frac{0,0499s^2 - 0,0577s + 0,198}{s^3 + 2,848s^2 + 2,190s + 0,371} \right)$
Túnel zona 2	$G_{TZ2} = \left(\frac{0,0239s^2 - 0,379s + 0,186}{s^3 + 2,203s^2 + 1,405s + 0,243} \right)$
Túnel zona 3	$G_{TZ3} = \left(\frac{0,00885s^2 - 0,183s + 0,959}{s^3 + 2,796s^2 + 1,990s + 0,287} \right)$
Túnel zona 4	$G_{TZ4} = \left(\frac{0,0289s^2 - 0,167s + 0,569}{s^3 + 5,079s^2 + 4,426s + 0,813} \right)$
Cabezal zona 1	$G_{CZ1} = \left(\frac{0,0528s^2 + 0,059s + 0,095}{s^3 + 2,831s^2 + 1,907s + 0,247} \right)$
Cabezal zona 2	$G_{CZ2} = \left(\frac{0,0298s^2 + 0,018s + 0,044}{s^3 + 2,546s^2 + 1,536s + 0,177} \right)$
Cabezal zona 3	$G_{CZ3} = \left(\frac{0,00815s^2 - 0,013s + 0,037}{s^3 + 1,950s^2 + 1,048s + 0,118} \right)$
Cabezal zona 4	$G_{CZ4} = \left(\frac{0,0369s^2 + 0,009s + 0,046}{s^3 + 2,538s^2 + 1,643s + 0,165} \right)$
Cabezal zona 5	$G_{CZ5} = \left(\frac{0,0623s^2 - 0,058s + 0,181}{s^3 + 4,363s^2 + 4,250s + 0,574} \right)$

Tabla 3.10 Funciones de transferencia en lazo cerrado de la máquina extrusora.

3.3.- OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRASFERENCIA EN LAZO

ABIERTO

La función de transferencia del sistema se la obtiene agrupando y ordenando en un solo bloque el controlador, el actuador, el convertidor de temperatura a voltaje, y la zona de extrusión. Se tendrá la función de transferencia en lazo abierto (figura 3.6).

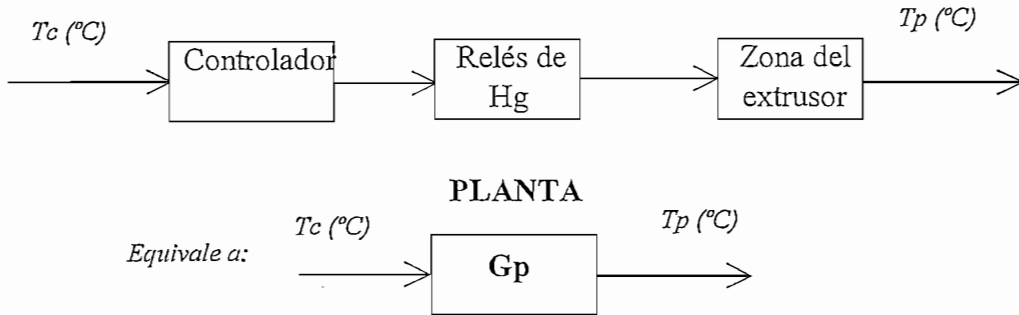


Figura 3.6 Partes de la Planta

Para tener una idea más clara de lo expuesto, se puede ordenar adecuadamente y obtener de mejor manera el modelo del proceso, así:

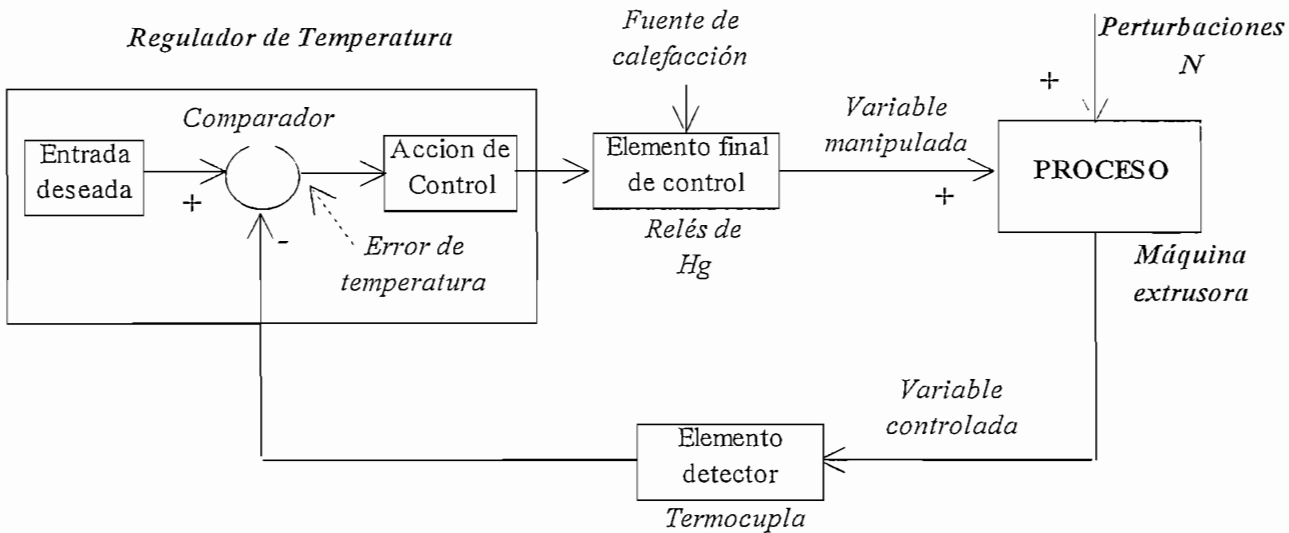


Figura 3.7 Diagrama de bloques del sistema de control del extrusor.

Al sistema que muestra la figura 3.7 se lo puede reducir utilizando el álgebra de diagramas de bloques, para lo cual se utiliza la siguiente relación.

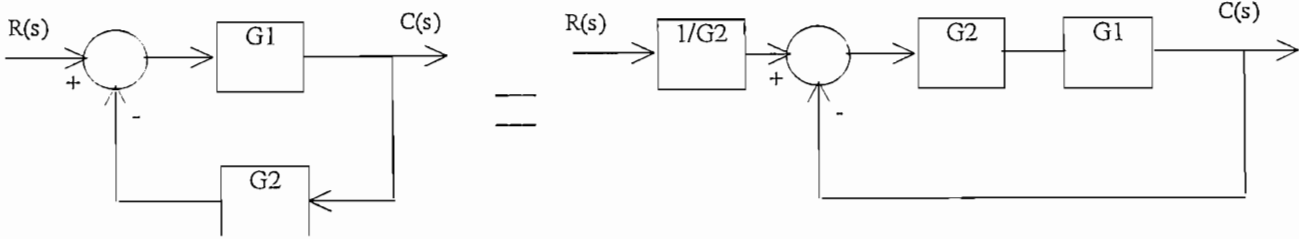


Figura 3.8 Reducción de los diagramas de bloques.

Con lo cual el sistema en diagrama de bloques reducido y simplificado obtenido lo muestra la figura 3.9.

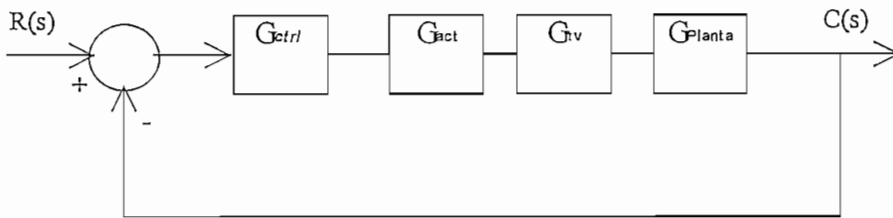


Figura 3.9 Planta en diagrama de bloques simplificado

Con lo mostrado en la figura 3.9, la función de transferencia en lazo cerrado de la planta se la obtiene mediante la siguiente relación:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_{ctrl} \cdot G_{act} \cdot G_{iv} \cdot G_{planta}}{1 + G_{ctrl} \cdot G_{act} \cdot G_{iv} \cdot G_{planta}} \quad (3.22)$$

Para una facilitar el trabajo de deducción de las ecuaciones del proceso, se ha considerado en todo el desarrollo a las perturbaciones despreciables. De la ecuación 3.22 podemos encontrar la función de transferencia en lazo abierto, mediante la expresión 3.23

$$G_{planta} = \frac{\frac{C(s)}{R(s)}}{\left(1 - \frac{C(s)}{R(s)}\right) \cdot G_{ctrl} \cdot G_{act} \cdot G_{iv}} = K^* \frac{\frac{C(s)}{R(s)}}{\left(1 - \frac{C(s)}{R(s)}\right)} \quad (3.23)$$

Donde K^* es:

$$K^* = (G_{ctrl} \cdot G_{act} \cdot G_{iv})^{-1} \quad (3.24)$$

Los datos del controlador para este análisis fueron:

BP = Banda proporcional = 40%

Con lo cual se tiene que:

$$BP = 100/K_c \Rightarrow K_c = 2,5$$

Donde K_c es la ganancia del controlador, por lo cual se tiene que: $G_{ctr} = 2,5$.

$G_{tv} = 0,01193$, $G_{act} = 1$ se considera un relé ideal.

Reemplazando todos los datos en la ecuación 3.24 se tiene:

$$K^* = 2,5 * 0,01193 * 1 = (0,029825)^{-1} = 33,53$$

Con los valores obtenidos en 3.24 se tiene que la función de transferencia en lazo abierto es:

$$G_{planta} = K^* \left(\frac{0,0499s^2 - 0,577s + 0,198}{s^3 + 2,798s^2 + 0,803s + 0,173} \right) \quad ..(3.25)$$

donde $K^* = 33,53$

Para las demás zonas del extrusor se aplica el mismo criterio descrito anteriormente (ver anexo A), los resultados de las funciones de transferencia de lazo abierto se listan a continuación:

Zona de extrusión	Ecuación en lazo abierto
Túnel zona 1	$G_{TZ1} = K^* \left(\frac{0,0499s^2 - 0,0577s + 0,198}{s^3 + 2,798s^2 + 0,803s + 0,173} \right)$
Túnel zona 2	$G_{TZ2} = K^* \left(\frac{0,0239s^2 - 0,379s + 0,186}{s^3 + 2,179s^2 + 0,662s + 0,568} \right)$
Túnel zona 3	$G_{TZ3} = K^* \left(\frac{0,00885s^2 - 0,183s + 0,959}{s^3 + 2,787s^2 + 0,720s + 0,191} \right)$
Túnel zona 4	$G_{TZ4} = K^* \left(\frac{0,0289s^2 - 0,167s + 0,569}{s^3 + 5,050s^2 + 0,909s + 0,244} \right)$
Cabezal zona 1	$G_{CZ1} = K^* \left(\frac{0,0528s^2 + 0,059s + 0,095}{s^3 + 2,779s^2 + 0,665s + 0,153} \right)$
Cabezal zona 2	$G_{CZ2} = K^* \left(\frac{0,0298s^2 + 0,018s + 0,044}{s^3 + 2,516s^2 + 0,603s + 0,132} \right)$
Cabezal zona 3	$G_{CZ3} = K^* \left(\frac{0,00815s^2 - 0,013s + 0,037}{s^3 + 1,942s^2 + 0,546s + 0,081} \right)$
Cabezal zona 4	$G_{CZ4} = K^* \left(\frac{0,0369s^2 + 0,009s + 0,046}{s^3 + 2,501s^2 + 0,653s + 0,118} \right)$
Cabezal zona 5	$G_{CZ5} = K^* \left(\frac{0,0623s^2 - 0,058s + 0,181}{s^3 + 4,301s^2 + 1,001s + 0,392} \right)$

Tabla 3.11 Funciones de transferencia en lazo abierto de la máquina extrusora de pvc

IV.- COMPENSACIONES

Subindice

		Pagina
4.1	Modos de control	68
4.1.1	Control ON OFF	68
4.1.2	Control Proporcional	69
4.1.3	Control Proporcional integral PI	71
4.1.4	Control Proporcional derivativo PD	73
4.1.5	Control Proporcional integral derivativo PID	75
4.2	Alternativas de Control	75
4.2.1	Esquemas de alternativas de control PID	75
4.2.1.1	Posicional	75
4.2.1.2	Interactuante	76
4.2.1.3	No Interactuante	77
4.2.1.4	No interactuante con componente derivativa filtrada	78
4.2.2	Compensaciones	79
4.2.2.1	Método convencional de diseño de sistemas	79
4.2.2.2	Compensación serie y paralelo	79
	Efectos de la adición de polos	81
	Efectos de la adición de ceros	81
4.3	Diseño de la compensación utilizando el LGR	82
4.3.1	Diseño de control proporcional integral derivativo PID continuo	84
4.3.2	Compensación utilizando el L G R discreto	88
4.3.2	Diseño de control proporcional integral derivativo PID discreto	90
4.4	Diseño de la compensación por medio de métodos de calibración	94
4.4.1	Métodos de Ziegler – Nichols	94
4.4.1.1	Diseño del control proporcional integral derivativo PID	95
4.4.1.2	Diseño del control proporcional integral derivativo PID discreto	97

IV.- COMPENSACIONES

En este capítulo se presentan los modos de control y algunos procedimientos para diseñar y compensar el sistema de control de temperatura de la máquina extrusora motivo de este trabajo.

4.1.- Modos de control

Se puede decir que un modo de control es una respuesta particular del controlador para un cambio en la medida del error. Se realiza sólo el estudio de cuatro modos básicos de control, existentes en el controlador; los cuales son:

1. Control on-off (dos posiciones).
2. Control proporcional.
3. Control Integral.
4. Control derivativo.

A continuación se describe los modos básicos y las combinaciones más utilizadas en la industria.

4.1.1.- Control on-off

Este modo de control es la forma más simple, la salida del equipo está encendida (ON) o apagada (OFF) y no existe un estado intermedio. Un controlador on-off activará su salida sólo cuando la variable controlada cruce la referencia a la cual trabaja. Para un control de temperatura (calentamiento), la salida estará activada cuando la temperatura esté abajo de la referencia, y, apagada, arriba de ésta. Desde el momento que la temperatura sobrepasa la referencia, la salida cambia de estado. Para los casos en los cuales los ciclos ocurren demasiado rápido, y para prevenir daños en los contactores y las válvulas, se añade un control on-off diferencial o de histéresis al proceso de control.

La brecha diferencial, histéresis o zona muerta, es una implementación práctica del controlador de dos posiciones, aquí se puede producir un rango para la variación porcentual E_p , incrementándose a través de cero o decrementándose a través de cero. Durante el tiempo que se encuentra en la zona muerta no ocurren cambios en la salida del controlador, a esta zona se la

define como de $2\Delta E_p$, la cual esta diseñada por lo general por arriba de cierta cantidad mínima para prevenir oscilaciones excesivas.

Por lo general la zona de histéresis se establece cerca del 0,5% al 2% del rango total, ya que para rangos más pequeños el controlador se vuelve excesivamente sensible, e introduce una alta inestabilidad en el proceso. La figura 4.1 ilustra el funcionamiento del controlador on-off.

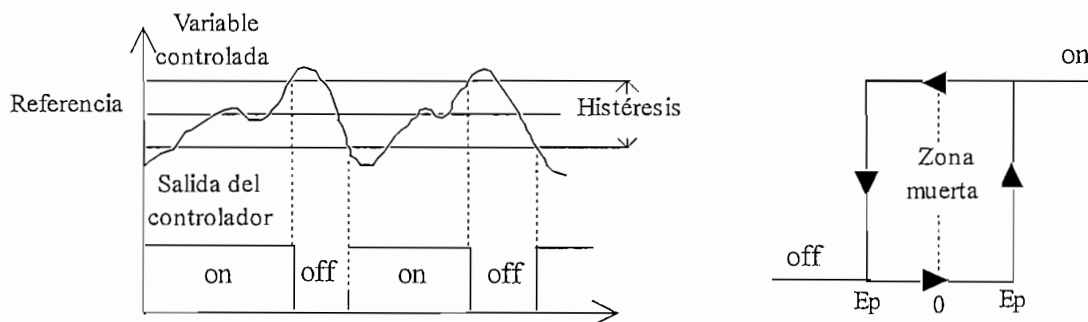


Figura 4.1 Control on-off con histéresis.

Un control on-off es usado donde no es necesario un control preciso de la temperatura, en sistemas en los cuales no se puede manejar energía con constantes encendidos y apagados, donde la masa del sistema es tan grande que los cambios de temperatura son extremadamente lentos, o para tener una alarma de temperatura. La principal ventaja del control on-off es su bajo costo, pero su desventaja es su oscilación permanente.

4.1.2.- Control proporcional P

En este tipo de control la respuesta del controlador es proporcional al error (señal de entrada del controlador), de allí su nombre.

$$U = k_p * e \quad (4.1)$$

Donde:

U = Salida del controlador.

e = Señal de error, entrada al controlador.

k_p = Ganancia proporcional del controlador.

A la ganancia del controlador k_p se la conoce como sensibilidad proporcional o constante proporcional. El mecanismo de ajuste en muchos controladores industriales no se expresa en

términos de k_p sino en términos de banda proporcional (PB). La banda proporcional se define como el porcentaje de cambio en la medida requerida (set point constante) para causar 100% de cambio en la salida. La banda proporcional se relaciona con la ganancia mediante la siguiente relación:

$$PB = \frac{1}{k_p} \times 100 \quad (4.2)$$

En la práctica se puede decir que bandas anchas corresponden a respuestas menos sensitivas (k_p pequeño), y, bandas angostas corresponden a respuestas más sensitivas (k_p grande), la figura 4.2 muestra las definiciones de banda proporcional y sensibilidad proporcional.

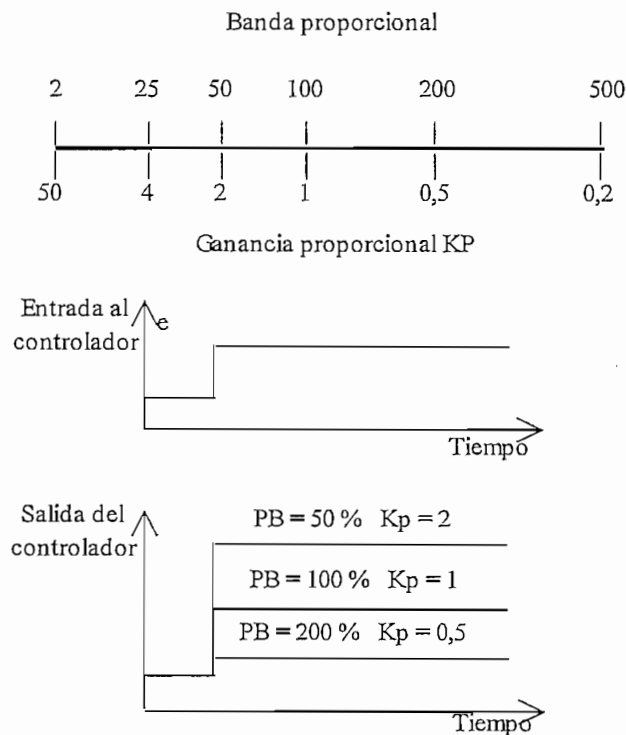


Figura 4.2 Acción de la banda proporcional

El control proporcional confiere una buena estabilidad al proceso controlado, así como una rápida respuesta, pero presenta una desventaja significativa, que no es capaz de corregir una desviación permanente (offset), produciendo una diferencia permanente en el estado estacionario entre el valor deseado y el valor de la variable controlada.

El control proporcional es muy simple y fácil de utilizar ya que existe un solo parámetro para ajustar, el cual es la ganancia.

Las salidas del control proporcional pueden ser analógicas de 4 - 20 mA y/o de 0 a 10 V_{DC} o con relé de estado sólido o electromecánico, lo que determina el modo de operación del controlador.

Cuando se tiene salida a relé, esta acción proporcional puede poner a la salida en estado ON y OFF por cortos intervalos de tiempo, variando la relación de tiempo de encendido y apagado en la función de error.

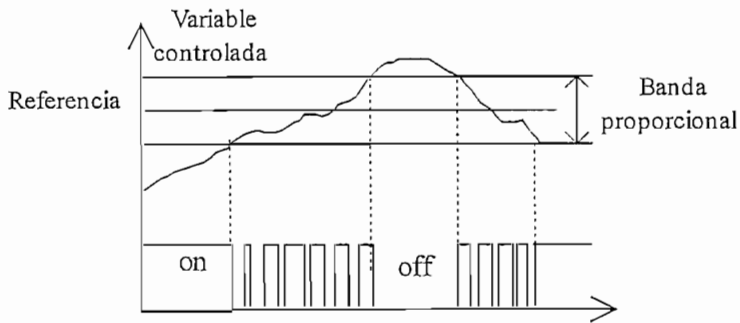


Figura 4.3 Control Proporcional con salida de estado on-off

La acción proporcional ocurre dentro de una banda proporcional alrededor de la referencia de la temperatura, fuera de esta banda se comporta como un control on-off, con la salida totalmente encendida abajo de la banda y completamente apagada arriba de la banda. Por lo tanto el control proporcional aplica toda la potencia al calentamiento, pero en ciclos de encendido y apagado variando los promedios de los tiempos. En la mayoría de unidades de control el ciclo de tiempo y/o banda proporcional son ajustables, razón por la cual el controlador puede tener un mejor funcionamiento en cada proceso en particular.

4.1.3.- Control Proporcional Integral PI

El control proporcional integral está definido por la relación:

$$U = k_p e + k_i \int e dt \quad (4.3)$$

Donde:

U = Salida del controlador.

k_p = Ganancia proporcional.

k_i = Constante integral.

e = Señal de error, entrada al controlador.

La acción integral al ser combinada con la acción proporcional va a reducir a cero el error u offset en estado estable (siempre y cuando el sistema final sea estable, por supuesto). La figura 4.4 representa la respuesta de un sistema de control, en el cual la acción integral se relaciona al error de medición.

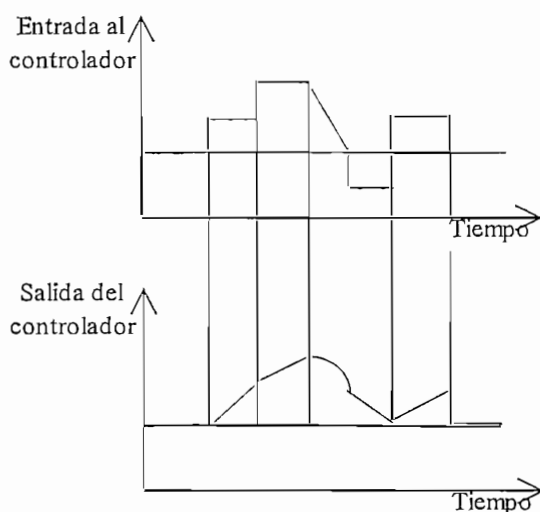


Figura 4.4. Respuesta de la acción integral

La figura 4.5, presenta el diagrama de bloques en lazo abierto de las acciones proporcional e integral combinadas en un controlador.

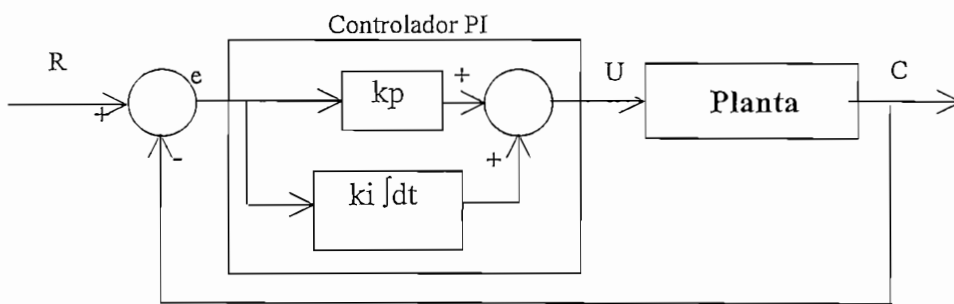


Figura 4.5 Sistema de control realimentado con controlador proporcional integral

La función de transferencia del controlador PI es

$$G_{c(s)} = kp + \frac{ki}{s} \quad (4.4)$$

El controlador PI es equivalente a la adición de un cero en $s = -ki / kp$ y un polo en $s = 0$ a la función de transferencia en lazo abierto.

Para un error constante, la acción integral cambia la tasa que maneja la salida. Esta tasa es cuantificada en términos del tiempo requerido para que el cambio en la salida (debido a la acción integral) sea igual o repita la respuesta causada por la acción proporcional.

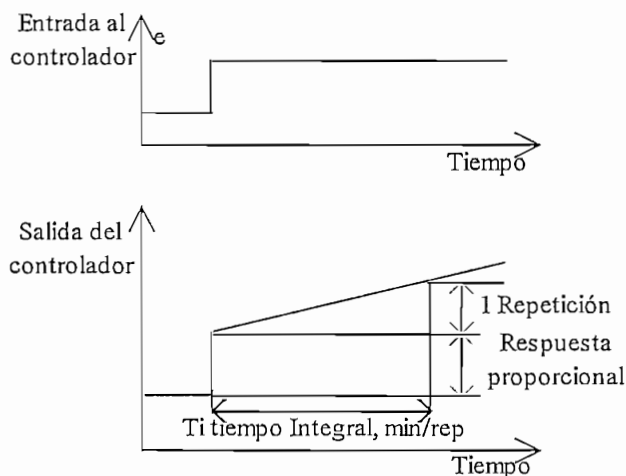


Figura 4.6 Salida de un controlador proporcional integral ante un error paso

Aunque el controlador **PI** mejora en un orden el error en estado estable, permitiendo de manera simultánea una respuesta transitoria con poco o ningún sobrevuel, el tiempo de subida de la respuesta puede ser bastante largo, esto se debe a que crea una respuesta gradual, es decir semejante a un retardo dentro del controlador

4.1.4.- Control derivativo PD

El control proporcional derivativo esta definido por:

$$U = k_p e + k_d \frac{de}{dt} \quad (4.5)$$

Donde:

U = Salida del controlador.

k_p = Ganancia proporcional.

k_d = Constante derivativa.

e = Señal de error, entrada al controlador.

En el dominio de Laplace la función de transferencia del control PD es:

$$G_C(s) = k_p + k_d * s \quad (4.6)$$

Este control es usado principalmente en sistemas con excesivos tiempos de retardo o en sistemas de orden mayor o igual a 3.

4.1.5.- Control proporcional integral derivativo PID.

El control PID une las tres acciones de control: proporcional – integral - derivativo, es uno de los sistemas más difundidos en el ámbito de procesos industriales. Tiene la capacidad de controlar adecuadamente una amplia gama de procesos dando una buena respuesta transitoria y de estado estable, y, es de fácil manipulación. Su implementación puede ser analógica o digital.

4.2.- Alternativas de control

Existen alternativas de control las mismas que tiene algunos tipos de configuraciones de controladores PID, entre los cuales se enuncian las algunos.

4.2.1.- Esquemas de alternativas de control PID

Se enuncian algunos esquemas de controladores PID comúnmente hallados en el mercado.

4.2.1.1.- Posicional

Es la forma más sencilla del controlador PID, su configuración esta en serie tal como muestra la figura.

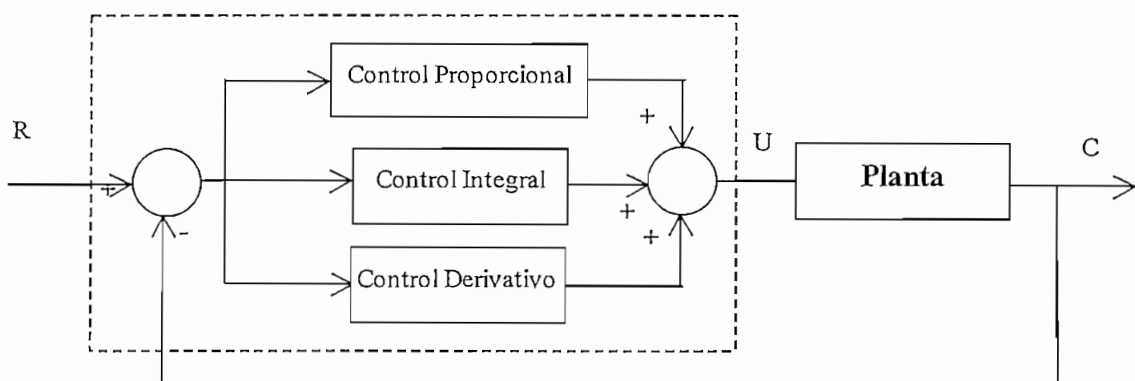


Figura 4.9 Esquema del controlador PID posicional

El control PID posicional esta definido en el dominio de Laplace por la ecuación 4.7.

$$G_{c(s)} = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad (4.7)$$

Donde:

$G_c(s)$ = Función de transferencia del controlador.

k_p = Ganancia proporcional.

k_i = Constante integral.

k_d = Constante derivativa.

4.2.1.2.- Interactuante

Una de sus partes la constituye el control integral PI, el cual consiste de un simple retardo con realimentación positiva tal como se muestra en la figura 4.10.

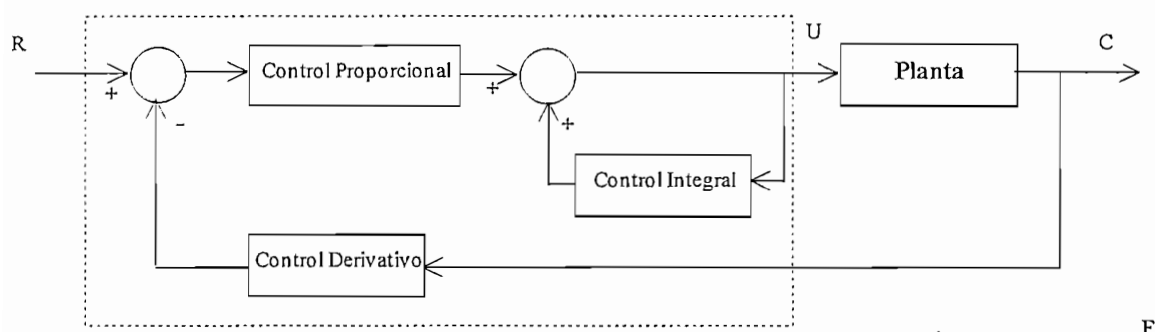


Figura 4.10 Esquema del controlador PID interactuante

Una ventaja del esquema **PID** interactuante es la de evitar el transitorio derivativo, tiene además la propiedad de desaturación integral.

Este controlador es conocido como interactuante ya que los modos integral y derivativo interactúan entre sí.

El control PID interactuante está definido en el dominio de Laplace por la ecuación 4.8.

$$U = k_p \left(1 + \frac{k_i}{s} \right) \left(r - (1 + k_d s) y \right) \quad (4.8)$$

Donde:

U = Salida del controlador.

k_p = Ganancia proporcional.

k_i = Constante integral.

k_d = Constante derivativa.

r = Punto de referencia o set point.

y = Salida del proceso o variable controlada.

4.2.1.3.- No interactuante.

Contrario a lo que sucede en el esquema interactuante, en este esquema no interactuante al ajustar los tiempos de integración y derivación no se modifican los tiempos reales de integración y derivación. Este esquema evita el transitorio derivativo. La figura 4,11 muestra el esquema no interactuante.

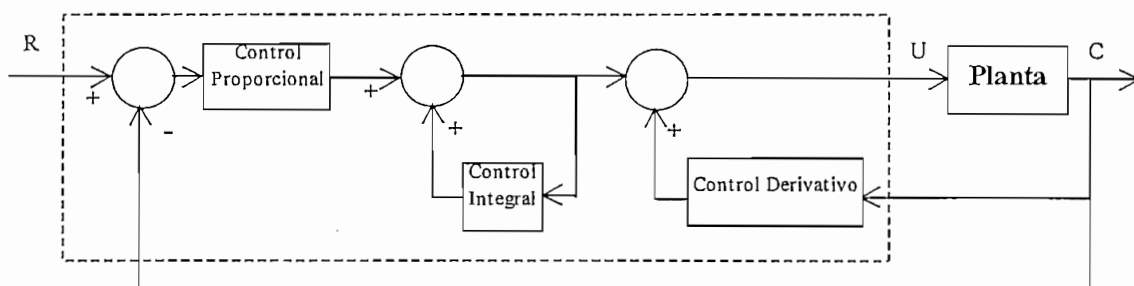


Figura 4.11 Esquema del controlador PID no interactuante.

El control PID no interactuante esta definido en el dominio de Laplace por la ecuación 4.9.

$$U = k_p \left(1 + \frac{k_i}{s} \right) e - k_d s y \quad (4.9)$$

Donde:

U = Salida del controlador.

k_p = Ganancia proporcional.

k_i = Constante intergral.

k_d = Constante derivativa.

e = Señal de error entrada al controlador.

y = Salida del proceso o variable controlada.

4.2.1.4.- No interactuante con componente derivativa filtrada.

La ganancia de la respuesta de frecuencia del término derivativo crece más allá del límite con el incremento de la frecuencia. Por lo cual, es necesario poner una restricción de ganancia derivativa, este valor generalmente va entre 7 a 15. La figura 4,12 muestra el esquema no interactuante con componente derivativa filtrada..

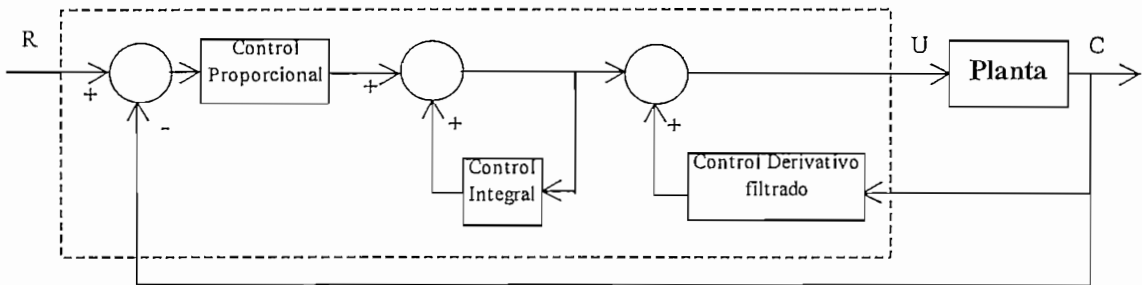


Figura 4.12 Esquema del controlador PID no interactuante con componente derivativa filtrada.

El control PID no interactuante con componente derivativa filtrada esta definido en el dominio de Laplace por la ecuación 4.10.

$$U = k_p \left(1 + \frac{k_i}{s} \right) e - \left(\frac{s k_d}{1 + \frac{s k_d}{N}} \right) y \quad (4.10)$$

Donde:

U = Salida del controlador.

k_p = Ganancia proporcional.

k_i = Constante integral.

k_d = Constante derivativa.

e = Señal de error entrada al controlador.

y = Salida del proceso o variable controlada.

N = Constante para el filtro derivativo.

4.2.2- COMPENSACIONES

Se sabe que “*compensación es la modificación de la dinámica del sistema para satisfacer las especificaciones requeridas*”. En términos generales, se ve que las especificaciones requeridas de funcionamiento de un sistema de control no deben ser más restrictivas de lo necesario para cumplir con las tareas encomendadas. Se debe tener presente que la parte más importante del diseño de un sistema de control consiste en establecer en forma global las especificaciones de funcionamiento, a fin de lograr un sistema de control apropiado para el objetivo previsto.

4.2.2.1.- Método convencional de diseño de sistemas

Debido a que las especificaciones de funcionamiento del sistema estudiado están expresadas en términos de mediciones de comportamiento en el dominio del tiempo, como tiempo de crecimiento o tiempo de establecimiento, una buena posibilidad es la de utilizar el enfoque que consiste en el *método del lugar geométrico de las raíces*.

En términos generales, en este método convencional se ve que el sistema está restringido a ubicarse en un sistema con una entrada y una salida, invariante en el tiempo. Además mediante este diseño de compensación se trata de satisfacer todos los requerimientos con la repetición juiciosa del método de prueba y corrección.

Existen algunas configuraciones de compensación, las cuales pueden ser en serie o en paralelo. A continuación se describe de una forma rápida estas configuraciones.

4.2.2.2- Compensación en serie y compensación en paralelo

La figura 4.13 muestra los esquemas de compensación utilizados comúnmente en sistemas de control. La figura 4.13(a) muestra como el compensador $G_c(s)$ queda colocado en serie con la planta. Este esquema recibe el nombre de compensación en serie.

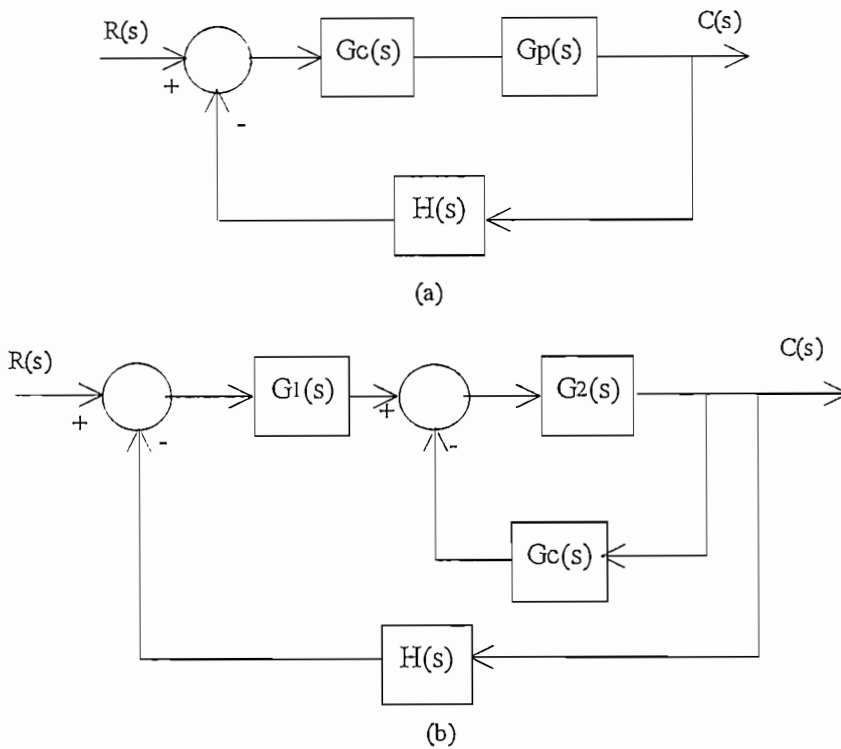


Figura 4.13.(a).- Compensación en serie. (b).- Compensación en paralelo o retroalimentación

Una alternativa a la compensación en serie, consiste en retroalimentar las señales de algunos elementos, y colocar un compensador en el trayecto de retroalimentación interna resultante, como muestra la figura 4.13(b). Tal compensación se denomina compensación en paralelo o compensación de retroalimentación.

Al compensar un sistema de control, por lo general el problema se centra en el diseño adecuado de un compensador en serie o paralelo. La elección entre compensación en serie y compensación en paralelo, depende de la naturaleza de las señales en el sistema, los niveles de potencia en los diversos puntos, consideraciones energéticas, etc.

En general, la compensación en serie puede ser más simple que la retroalimentación; sin embargo, la compensación en serie requiere amplificadores adicionales para incrementar la ganancia y/o brindar separación (para evitar disipación de potencia, el compensador en serie, se inserta en el punto de mínima energía del trayecto directo)

Se enunció que la compensación era la modificación de la dinámica del sistema para satisfacer las especificaciones requeridas, esto se logra al añadir polos o ceros al sistema a compensar, de esta manera se tendrán algunos efectos considerados a continuación:

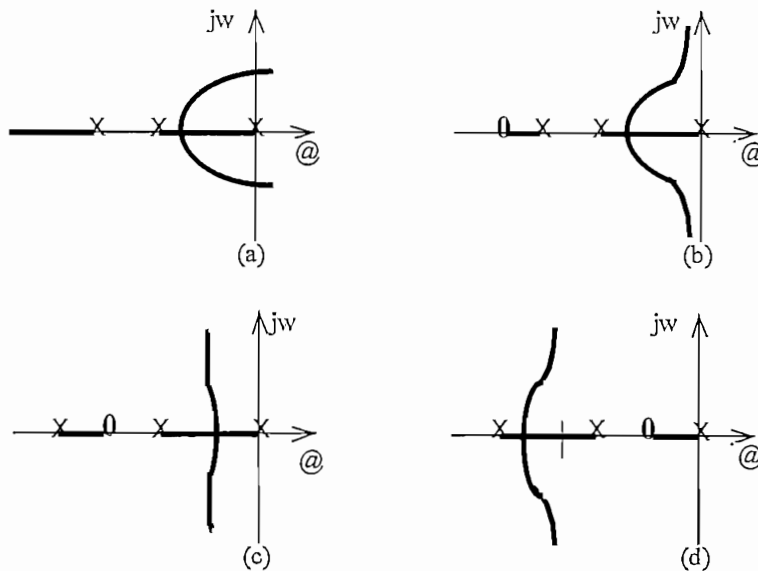


Figura 4.15.- Efecto de añadir un cero al sistema

Una vez enunciados los efectos generales de la compensación y las propiedades de las acciones de control se procede a continuación con el diseño de la compensación. La misma que utilizará el método del lugar geométrico de las raíces, y el método de ganancia límite de Ziegler-Nichols, en la compensación del sistema planteado, tanto en la forma continua, como en la discreta.

4.3.- Diseño de la compensación utilizando el Lugar Geométrico de las Raíces

Para determinar el producto de la función $G(s) \cdot H(s)$, se vuelve al diagrama de bloques simplificado, de la figura 4.16.

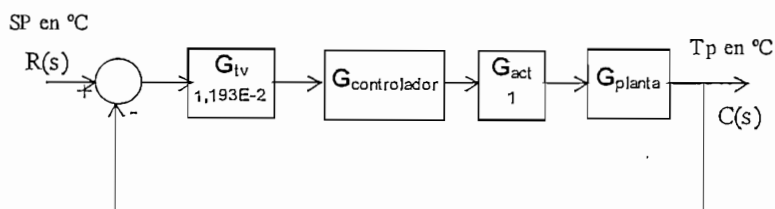


Figura 4.16.- Diagrama de bloques simplificado del lazo de control de la extrusora

Se toma como caso generativo el de una zona de trabajo de la extrusora para desarrollar todo el procedimiento, pues para las otras zonas, el proceso es similar y sólo se presentan los resultados.

$$G_{Planta} = 33,53 \left(\frac{0,0499s^2 - 0,577s + 0,198}{s^3 + 2,798s^2 + 0,803s + 0,173} \right)$$

$$G_{(s)} x H_{(s)} = (0,01193) (1) \left[33,53 \left(\frac{0,0499s^2 - 0,577s + 0,198}{s^3 + 2,798s^2 + 0,803s + 0,173} \right) \right] \quad (4.11)$$

La ecuación 4.11 puede ser generalizada para cualquier valor de ganancia, por lo tanto, esta llega a ser:

$$G_{(s)} H_{(s)} = K \left(\frac{0,0499s^2 - 0,577s + 0,198}{s^3 + 2,798s^2 + 0,803s + 0,173} \right) \quad (4.12)$$

Los polos y ceros de lazo abierto son:

Polos:

$$P_1 = -2.505$$

$$P_2 = -0,146 + j 0,218$$

$$P_3 = -0,146 - j 0,218$$

Ceros:

$$Z_1 = 0,577 + j 1,905$$

$$Z_2 = 0,577 - j 1,905$$

De los resultados obtenidos se tiene que todos los polos (de lazo abierto) están en el semiplano izquierdo de s , pero los ceros (de lazo abierto) se encuentran en el semiplano derecho, por lo que se deduce que el sistema no es completamente estable.

Según el lugar geométrico de las raíces (figura 4.17), se tiene que el sistema es estable en el rango de ganancia de: $0 \leq K \leq 6,15$.

Cuando se realiza un control proporcional en lazo cerrado, K_c tiene que cumplir con la condición de ganancia, esto es:

$$0 \leq (K_c) (1,193E-2) (1) (33,53) \leq 6,15 \Rightarrow 0 \leq K_c \leq 15,37$$

Donde:

K_c : Ganancia del controlador

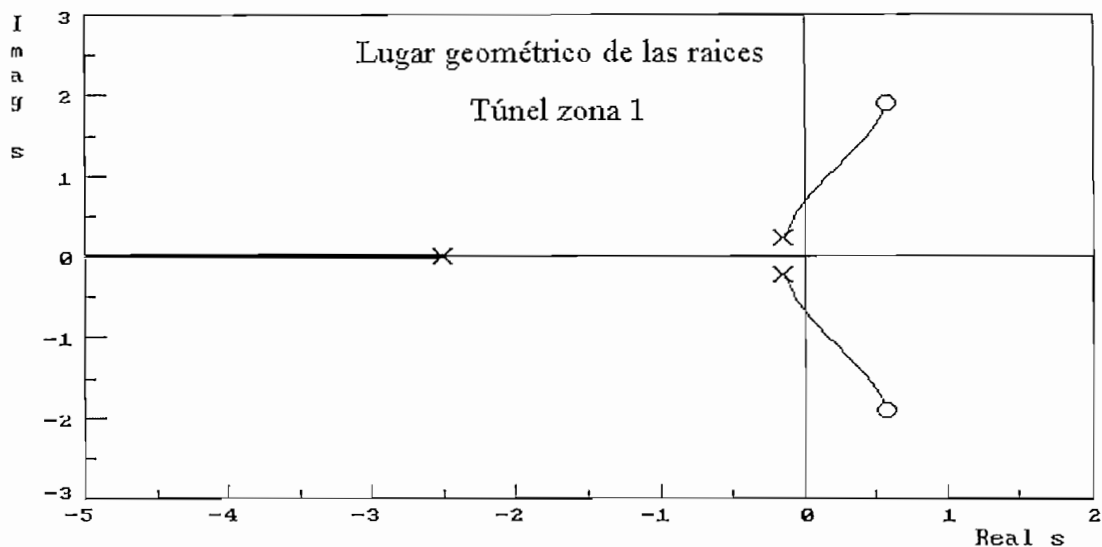


Figura 4.17. Lugar geométrico de las raíces para $G(s)H(s)$ del túnel zona 1 de la extrusora

Según la teoría de control se tiene que para este caso de estudio el control proporcional no es recomendable, ya que se tendría un error en estado estacionario, pues la planta es de tipo cero, y, este error se podría disminuir poniendo grandes ganancias de K lo que ocasionaría que se salga del rango de condición de estabilidad, y se amplifique ruido. Un punto de mayor peso en este caso es que inicialmente al obtener el modelo matemático se despreciaron algunas constantes de tiempo por ser demasiado pequeñas, ya que las mismas aumentarían el orden de la función.

Debido a la ubicación de los polos en el lugar geométrico de las raíces es complicada la compensación mediante un compensador proporcional integral, por lo cual no se diseña para esta opción.

4.3.1.1- Diseño del control proporcional integral derivativo PID continuo

El control proporcional integral derivativo PID es el más utilizado en las industrias, ya que presenta un funcionamiento satisfactorio para una gran cantidad de procesos, la implementación de estos controladores puede ser analógica o digital, siendo hoy en día los controladores PID digitales que ganan cada vez más terreno por sus ventajas, en velocidad, tamaño, y facilidad de manejo.

El algoritmo clásico del control PID tiene la forma siguiente:

$$U(t) = k_p e_{(t)} + k_i \int e_{(t)} dt + k_d \frac{de}{dt} \quad (4.13)$$

en el dominio de Laplace se tiene:

$$U(s) = \left[k_p + \frac{k_i}{s} + s k_d \right] \cdot E(s) \quad (4.14)$$

Donde:

U : Acción de control

E : Error (referencia - salida)

k_p: Ganancia proporcional

k_i: constante integral

k_d: constante derivativa

Al introducir un control PID en un proceso industrial se deben considerar las dificultades que producen cada una de las acciones de control, si no se encuentran ajustados con los rangos apropiados, así por ejemplo: la acción integral tiende a producir saturación en el actuador, la acción derivativa permite amplificar indeseablemente el ruido de la planta o de la medición a altas frecuencias. Estos puntos fueron explicados anteriormente en el literal 4.1.

La función de transferencia de la zona 1 del túnel de la extrusora esta definida por la ecuación 4.15:

$$G_{(s)} \times H_{(s)} = 0,4 \left(\frac{0,0499s^2 - 0,577s + 0,198}{s^3 + 2,798s^2 + 0,803s + 0,173} \right) \quad (4.15)$$

De la ecuación 4.14 se tiene:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \left[k_p + \frac{k_i}{s} + s k_d \right] \quad (4.16)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{1}{s} [s^2 k_d + k_p s + k_i] = \frac{k_d}{s} \left[s^2 + \frac{k_p}{k_d} s + \frac{k_i}{k_d} \right] \quad (4.17)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{k_d}{s} \left[s^2 + \frac{k_p}{k_d} s + \frac{k_i}{k_d} \right] \quad (4.18)$$

La función de transferencia 4.17 muestra un par de polos complejos conjugados, los mismos que se procede a cancelarlos mediante la ecuación 4.16, para la cual de tiene la función de transferencia del túnel zona 1:

$$G_{(s)} \times H_{(s)} = 0,4 \left(\frac{0,0499 s^2 - 0,577 s + 0,198}{(s + 2,505)(s^2 + 0,2929 s + 0,0694)} \right) \quad (4.19)$$

Por lo que se iguala los polos conjugados con el controlador PID, se tiene:

$$s^2 + \frac{kp}{kd} s + \frac{ki}{kd} = s^2 + 0,2929 s + 0,0694 \quad (4.20)$$

Donde se obtiene las siguientes relaciones:

$$\frac{kp}{kd} = 0,2929 \Rightarrow kp = 0,2929 kd \quad (4.21)$$

$$\frac{ki}{kd} = 0,0694 \Rightarrow ki = 0,0694 kd \quad (4.22)$$

Donde las ecuaciones 4.21 y 4.22 dependen del valor de kd, el mismo se obtiene mediante el lugar geométrico de la raíces del sistema compensado, mostrado en la figura

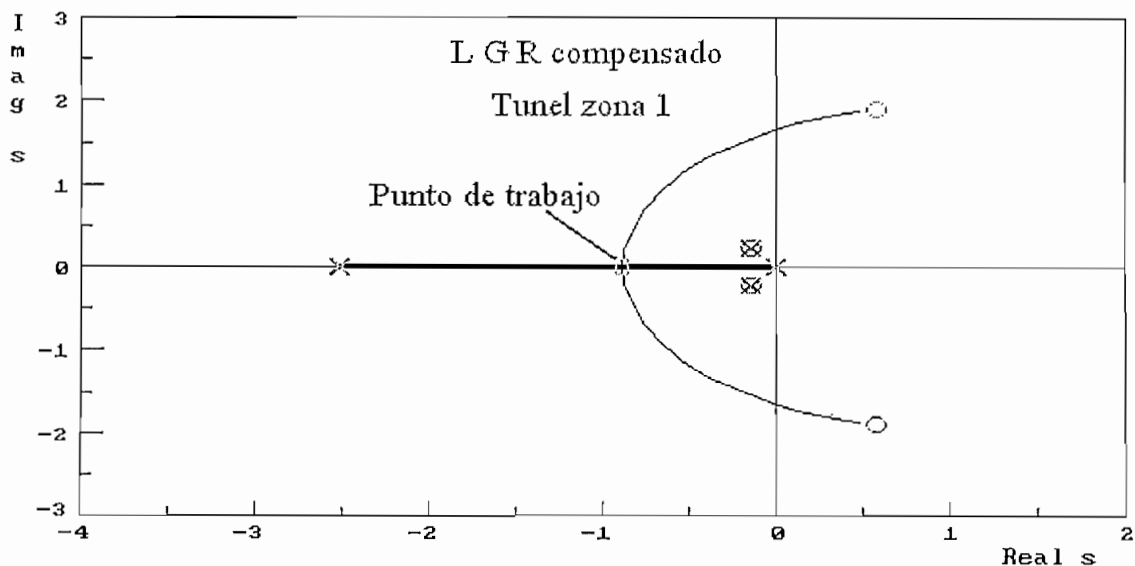


Figura 4.18 Lugar geométrico de las raíces compensado de la zona 1 del túnel con compensación del controlador PID

Mediante el lugar geométrico de las raíces de la figura 4.18, se obtiene el valor de ganancia para el cual el sistema tiene un índice de amortiguamiento (ξ) igual a 1, este valor es medido en el LGR. Por lo que se tiene:

$$K_{\xi=1} = 4,974$$

$$K_{\xi=1} = 0,4 * k_d = 4,974$$

$$k_p = 3,64$$

$$k_i = 0,86$$

$$k_d = 12,43$$

La figura 4.19 muestra la respuesta en el tiempo, con la acción del controlador en la zona 1 del túnel.

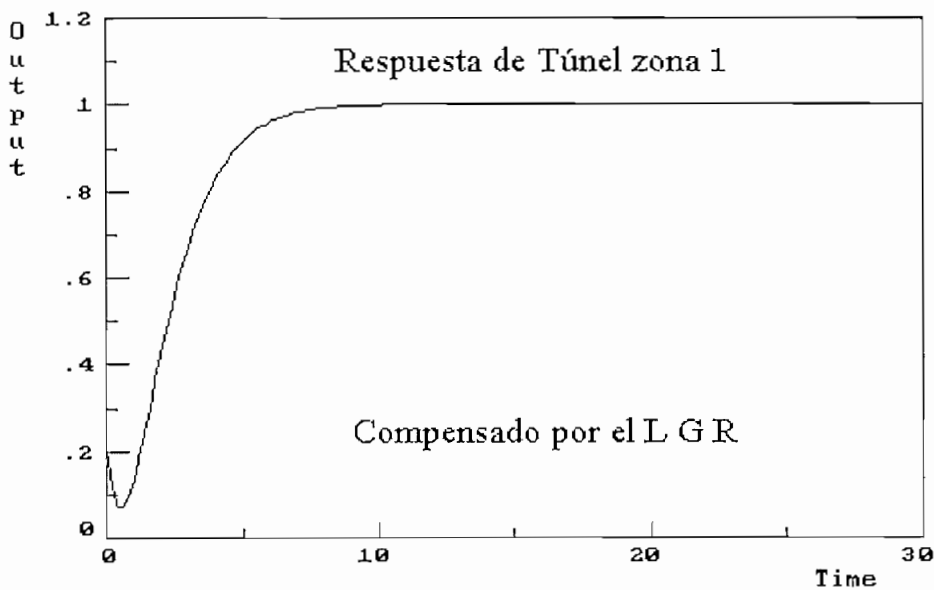


Figura 4.19 Respuesta en el tiempo de la zona 1 del túnel con compensación del controlador PID

La función no inicia en el cruce por las características especiales de la función de transferencia en lazo cerrado, resultando las especificaciones obtenidas:

$$M_p = 0\% \quad (\text{máximo sobrenivel porcentual})$$

$$t_s = 5,7 \text{ min.} \quad (\text{tiempo de establecimiento con criterio del 5\%})$$

$$E_p = 0 \quad (\text{error de posición})$$

De las zonas de trabajo restantes, se analizan de manera similar, y se obtiene los siguientes resultados:

Zona extrusora	kp	ki	kd	Mp (%)	ts (min)	Ep
T Z 1	12,43	0,86	12,43	0	5,78	0
T Z 2	3,06	0,27	8,9	0	6,27	0
T Z 3	7,93	2,36	31,17	0	4,74	0
T Z 4	2,53	0,72	14,37	0	3,14	0
C Z 1	10,44	2,63	43,77	0	4,92	0
C Z 2	14,61	3,56	61,07	0	6,03	0
C Z 3	9,8	1,59	32,3	0	7,63	0
C Z 4	12,34	2,43	45,92	0	6,83	0
C Z 5	5,661	2,45	25,5	0	5	0

Tabla 4.1 Valores de constantes del PID y características obtenidas de las zonas de extrusión

4.3.2- Compensación utilizando el Lugar Geométrico de las Raíces discreto

El método del lugar geométrico de las raíces puede ser extendido sin modificaciones a sistemas en tiempo discreto, excepto por que el límite de estabilidad queda modificado del eje $j\omega$ en el plano s a la circunferencia de radio unitario en el plano z . La razón por la cual el método del lugar geométrico de las raíces puede extenderse a sistemas en tiempo discreto es porque la ecuación característica correspondiente al sistema en tiempo discreto tiene la misma forma que la del sistema en tiempo continuo en el plano s .

Para trabajar en el lugar geométrico de las raíces en primer lugar se procede a discretizar las funciones de transferencia en lazo abierto, anteponiendo un muestreador de primer orden “Zero order Hold”, con un valor de periodo $T=1$. Para la zona 1 del túnel se tiene la ecuación 4.21:

$$G_{planta(z)} = 33,53 \left[0,0197 \left(\frac{z^2 + 0,915z + 1,254}{(z - 0,0816)(z^2 - 1,686z + 0,746)} \right) \right] \quad (4.21)$$

Para determinar el producto de la función $G(z) \cdot H(z)$, se vuelve al diagrama de bloques simplificado, así:

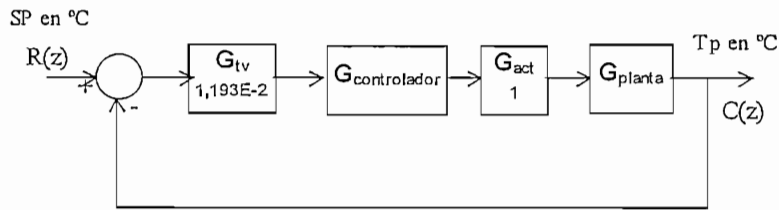


Figura 4.20.- Diagrama de bloques simplificado del lazo de control de la extrusora

Se toma como caso generativo el de una zona de trabajo de la extrusora para desarrollar todo el procedimiento, pues para las otras zonas, el proceso es similar y solo se presentan los resultados.

$$G_{(z)}xH_{(z)} = (0,01193)(33,53)x \left[0,0197 \left(\frac{z^2 + 0,915z + 1,254}{(z - 0,0816)(z^2 - 1,686z + 0,746)} \right) \right] \quad (4.22)$$

La ecuación 4.22 puede ser generalizada para cualquier valor de ganancia, por lo tanto, esta llega a ser:

$$G_{(z)} H_{(z)} = K \left(\frac{z^2 + 0,915z + 1,254}{(z - 0,0816)(z^2 - 1,686z + 0,746)} \right) \quad (4.23)$$

Los polos y ceros de lazo abierto son:

Polos:

$$P_1 = -0.0816$$

$$P_2 = 0,843 + j 0.187$$

$$P_3 = 0,843 - j0.187$$

Ceros:

$$Z_1 = -0,457 + j 1,022$$

$$Z_2 = -0,457 - j 1,022$$

De los resultados obtenidos se tiene que todos los polos (de lazo abierto) están dentro del círculo de radio 1 de z , pero los ceros se encuentran afuera, por lo que se deduce que el sistema no es completamente estable, confirmando lo observado con el modelo continuo.

Según el lugar geométrico de las raíces (figura 4.20), se tiene que el sistema es estable en el rango de ganancia de: $0 \leq K \leq 3,64$.

Cuando se realiza un control proporcional en lazo cerrado, K_c tiene que cumplir con la condición de ganancia, esto es:

$$0 \leq 0,4 * K_c \leq 3,64. \Rightarrow 0 \leq K_c \leq 9,1$$

Donde:

K_c : Ganancia del controlador

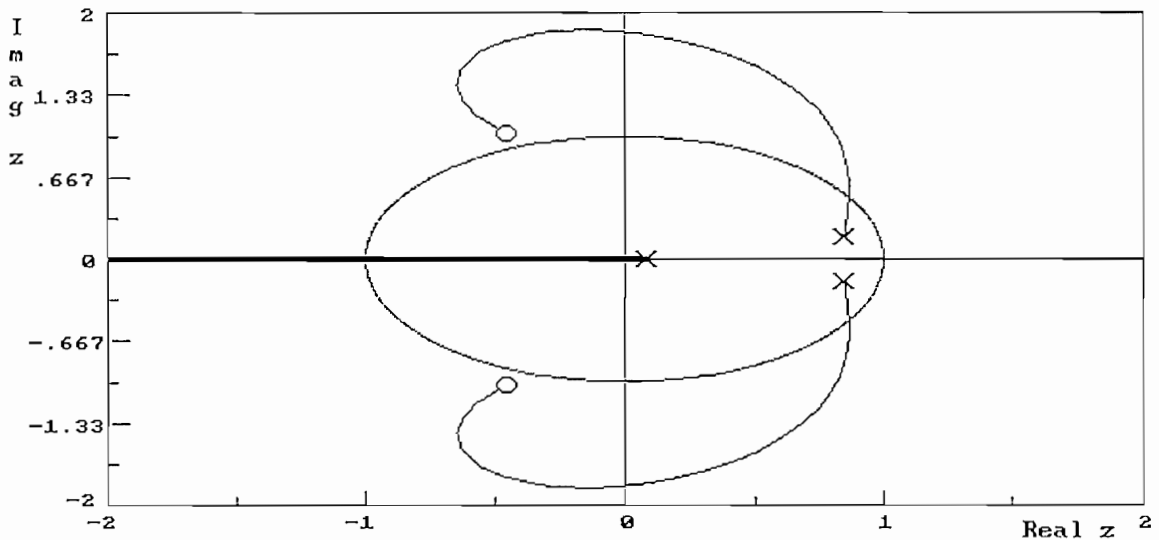


Figura 4.21. Lugar geométrico de las raíces para $G_{(z)} H_{(z)}$ del túnel zona 1 de la extrusora

Como se indico en el apartado 4.3.1 para este caso de estudio el control proporcional no es recomendable, ya que se tendría un error en estado estacionario, pues la planta es de tipo cero, y, este error se podría disminuir poniendo grandes ganancias de K (siempre y cuando se encuentre dentro de la condición de estabilidad), pero esto ocasionaría que se amplifique el ruido entre otras cosas.

4.3.2.1.- Diseño del control proporcional integral PID discreto

El controlador PID discreto tiene la siguiente función de transferencia:

$$G_{PID(z)} = kp + ki \frac{T}{2} \frac{z+1}{z-1} + kd \frac{z-1}{Tz} \quad (4.24)$$

$$G_{PID(z)} = \left(\frac{2kpT + kiT^2 + 2kd}{2T} \right) \left(\frac{z^2 + \frac{kiT^2 - 2kpT - 4kd}{2kpT + kiT^2 + 2kd}z + \frac{2kd}{2kpT + kiT^2 + 2kd}}{z^2 - z} \right) \quad (4.25)$$

Siendo kp = ganancia proporcional

ki = constante integral.

kd = constante derivativa.

De la ecuación 4.25 se tiene la siguiente relación:

$$G_{PID(z)} = K1 \left(\frac{z^2 + K2z + K3}{z^2 - z} \right) \quad (4.26)$$

Donde:

$$K1 = \frac{2kpT + kiT^2 + 2kd}{2T} \quad (4.27)$$

$$K2 = \frac{kiT^2 - 2kpT - 4kd}{2kpT + kiT^2 + 2kd} \quad (4.28)$$

$$K3 = \frac{2kd}{2kpT + kiT^2 + 2kd} \quad (4.29)$$

La función de transferencia de la zona 1 del túnel de la extrusora esta definida por la ecuación 4.22:

$$G_{(z)} H_{(z)} = 0,4 \left[0,0197 \left(\frac{z^2 + 0,915z + 1,254}{(z - 0,0816)(z^2 - 1,686z + 0,746)} \right) \right]$$

Se procede a cancelar un par de polos conjugados mediante la siguiente relación:

$$z^2 + K2z + K3 = z^2 - 1,686z + 0,746 \quad (4.30)$$

donde se tiene:

$$K2 = -1,686$$

$$K3 = 0,746$$

Para encontrar el valor K_1 , se procede a obtener el lugar geométrico de las raíces del sistema compensado.

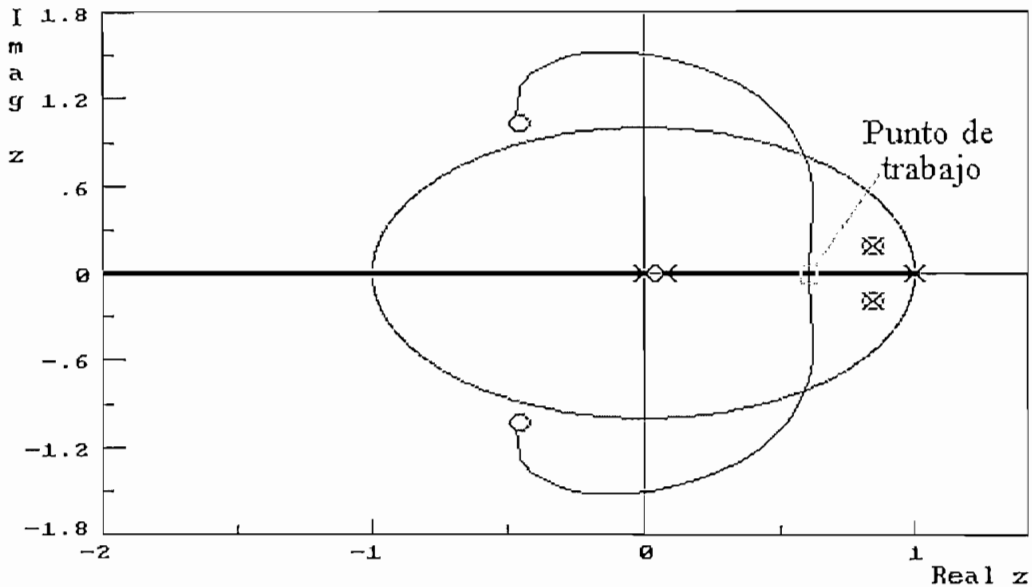


Figura 4.22 Lugar geométrico de las raíces para el sistema compensado de la zona 1 del túnel

Según el análisis del lugar geométrico de las raíces el sistema de control en lazo cerrado proporcional integral derivativo diseñado es condicionalmente estable, este rango de estabilidad de K_c es:

$$0 \leq K \leq 3,645$$

Para determinar el valor de la constante K_1 se debe ubicar donde el índice de amortiguamiento es igual a uno del lugar geométrico de las raíces.

$$K_{\xi=1} = 2,908$$

$$K_{\xi=1} = 0,4 * K_1 = 2,908$$

$$K_1 = 7,27$$

Para obtener los valores de k_p , k_i , k_d se procede a resolver el sistema de ecuaciones (4.27, 4.28, 4.29) y se obtiene los siguientes valores:

$$k_p = 1,63$$

$$k_i = 0,43$$

$$k_d = 5,42$$

La figura 4.23 muestra la respuesta discreta del sistema compensado mediante el lugar geométrico de las raíces.

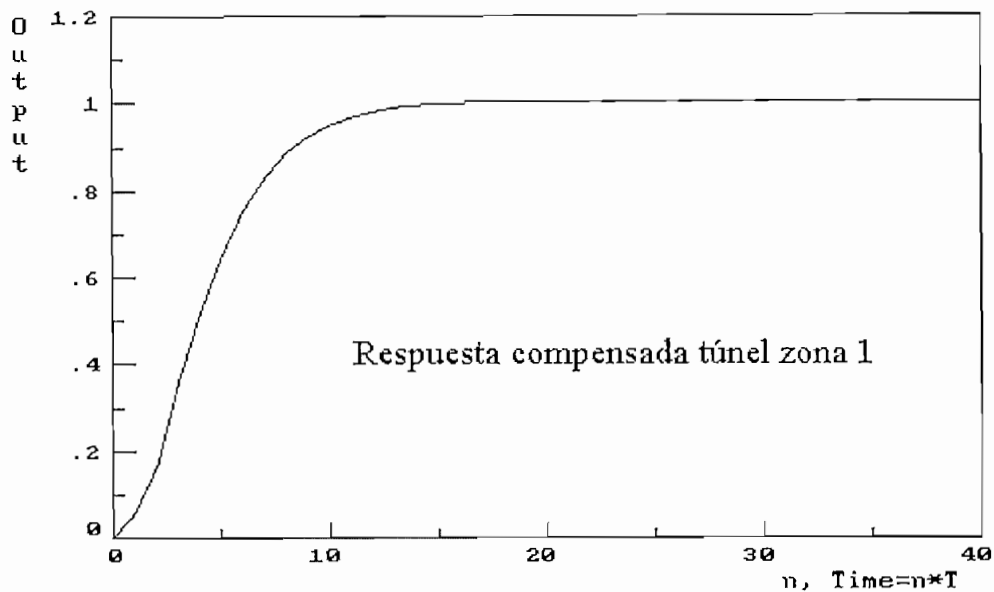


Figura 4.23 Respuesta en el tiempo del lazo cerrado con control PID de la zona 1 del túnel

De la figura 4.23, se ve que presenta una respuesta en lazo cerrado del sistema compensado con G_{PID} a una entrada escalón, obteniéndose los datos listados a continuación:

$$M_p = 0 \%$$

$$t_s = 10 \text{ min.}$$

$$E_p = 0$$

De las zonas de trabajo restantes, se analizan de manera similar, y se obtiene los siguientes resultados:

Zona extrusora	k_p	k_i	k_d	M_p (%)	t_s (min)	E_p
T Z 1	1,6392	0,4369	5,42	0	10,18	0
T Z 2	1,56	0,14	3,89	0	10,37	0
T Z 3	3,11	1,08	12,59	0	9,07	0
T Z 4	0,76	0,25	4,64	0	8,24	0
C Z 1	4,11	1,18	17,51	0	7,68	0
C Z 2	6,58	1,81	27,72	0	9,26	0
C Z 3	5,25	0,92	16,11	0	11,94	0
C Z 4	6,13	1,33	22,04	0	10,37	0
C Z 5	2,06	1,13	10,58	0	9,72	0

Tabla 4.2 Valores de constantes del PID y características obtenidas de las zonas de extrusión

4.4 Diseño de la compensación por medio de un método de calibración.

Para el ajuste de los parámetros de los controladores PID industriales existen otros métodos, y entre ellos se han desarrollado técnicas empleando medidas en lazo abierto y lazo cerrado; los más conocidos son los métodos desarrollados por Ziegler-Nichols, de los cuales sólo se puede emplear el de lazo cerrado para este caso.

4.4.1.- Métodos de Ziegler-Nichols.

Se utiliza el método más popular de Ziegler Nichols de los dos existentes ya que solamente se requiere medir dos parámetros. Consiste en hacer oscilar al sistema en lazo cerrado. La desventaja es que algunos procesos no permiten la oscilación, ni siquiera por tiempos cortos debido a que podría producirse daños de los productos que se están elaborando, o a su vez perturbar todo el sistema. Aunque se podría conseguir la oscilación al introducir una señal mediante un réle, esta oscilación deberá tener una componente continua.

Para provocar que el lazo cerrado de control oscile a una amplitud constante, se realiza el siguiente procedimiento:

1. Hacer que el lazo de control se encuentre en una condición estable.
2. Ajustar los modos integral y derivativo a su mínima acción (sí lo permite el proceso mejor anular su efecto)
3. Hacer un cambio admisible en el set point del controlador y observar la oscilación de la variable de salida.
4. Reducir la banda proporcional (aumentando la ganancia) y además si la medida de la variable controlada tiende hacia un valor en estado estable, debe repetirse el procedimiento del ítem tres, aumentando la ganancia.
5. Medir la distancia recorrida por un graficador, pico a pico de la señal controlada. Convertir esta medida en unidades de tiempo dividiendo la distancia por la velocidad del graficador.
6. Anotar la banda proporcional que produce la oscilación (PB_{cr} = banda proporcional crítica = $1/K_{cr}$) y el periodo natural de oscilación τ_0

Los resultados sugeridos por Ziegler-Nichols se resumen en la tabla 4.2

Tipo de control	Constante proporcional k_p	Tiempo integral T_I	Tiempo derivativo T_D
P	$0,5 * k_{cr}$	∞	0
PI	$0,45 * k_{cr}$	$\tau_0 / 1,2$	0
PID	$0,6 * k_{cr}$	$0,5 * \tau_0$	$0,125 * \tau_0$

Tabla 4.3 Valores de ajuste de los controladores P, PI, PID basadas en la ganancia crítica k_{cr} y el periodo crítico τ_0

4.4.1.1- Diseño del control Proporcional Integral Derivativo, PID

Como se indicó en el apartado 4.1.6 los controladores PID industriales tiene diferentes configuraciones o algoritmos de control, pero para la compensación de la máquina extrusora, se utilizará el esquema clásico del controlador PID, cuya función de transferencia es:

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{s \cdot T_I} + s \cdot T_D \right) \quad (4.32)$$

Al aplicar el método de Ziegler-Nichols, en la simulación de la zona 1 del túnel de la extrusora se tiene la figura 4.24:

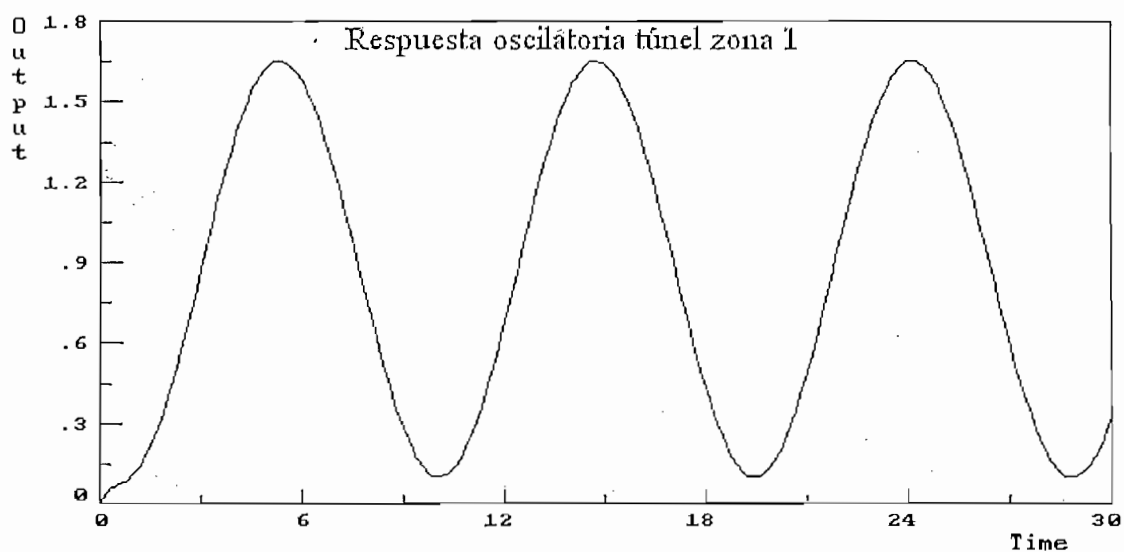


Figura 4.24 Respuesta oscilatoria de la zona 1 del túnel en lazo cerrado cuando la ganancia K_p es crítica

De la figura 4.24 se ve que el período de oscilación natural, τ_0 tiene un valor igual a: 9,5 min., para encontrar los parámetros se despeja la ganancia crítica k_{cr} .

$$K_{cr} = 0,4 * K_{cr} = 6,15 \Rightarrow K_{cr} = 15,37$$

Luego se aplica los valores de la tabla 4.2 para ajustar los parámetros del controlador PID, y se obtiene los siguientes resultados:

$$K_p = 0,6 * K_{cr} = 0,6 * (15,37) = 9,22 \text{ entonces } k_p = 9,22$$

$$T_I = 0,5 * \tau_0 = 0,5 * (9,5) \text{ min./rep} = 4,75 \text{ min./rep}$$

$$T_D = 0,125 * \tau_0 = 0,125 * (9,5) \text{ min.} = 1,18 \text{ min.}$$

Reemplazando estos valores de los parámetros, en la expresión 4.33, se obtiene el algoritmo del controlador PID clásico, así:

$$C(s) = 9,22 \left(1 + \frac{1}{4,72 s} + s \cdot 1,18 \right) \quad (4.33)$$

Donde: $k_p = 9.22$

$$k_i = 1,94$$

$$k_d = 10,8796$$

La respuesta del sistema en lazo cerrado al ser perturbado por un cambio paso del set point, utilizando la ecuación 4.32 como función de compensación, se presenta en la figura 4.25. De esta se observa las características de funcionamiento en estado transitorio y se tiene:

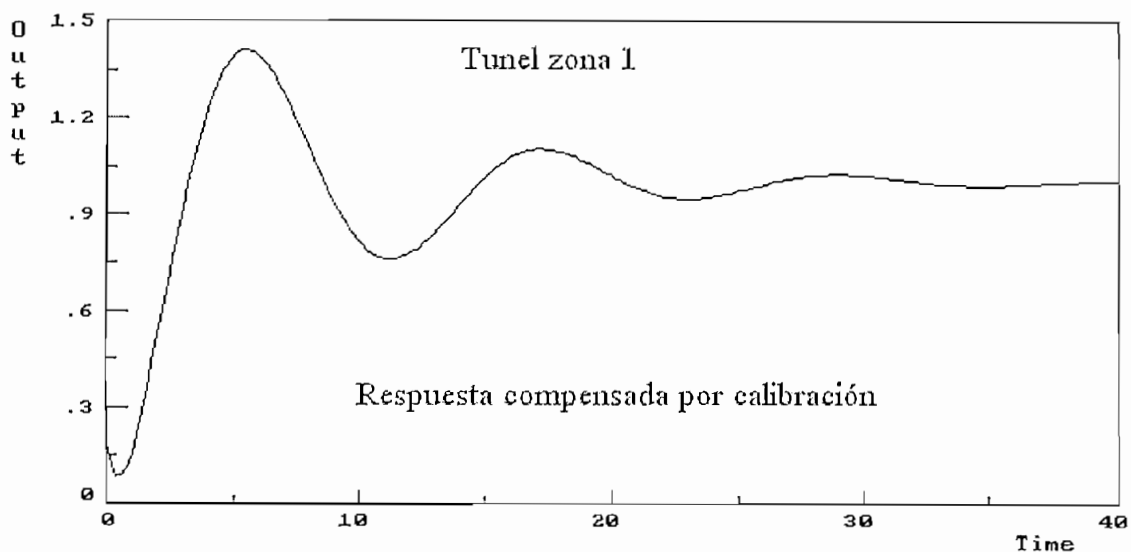


Figura 4.25 Respuesta en lazo cerrado de la zona 1 del túnel de la extrusora, utilizando un control PID

$$M_p = 42 \%$$

$$t_s = 24 \text{ min.}$$

$$E_p = 0$$

De las zonas de trabajo restantes, se analizan de manera similar, y se obtiene los siguientes resultados:

Zona extrusora	kp	ki	kd	Mp (%)	ts (min)	Ep
T Z 1	9,22	1,94	10,9	42,6	24,36	0
T Z 2	8,04	1,73	9,32	52,1	20,07	0
T Z 3	31,8	7,07	35,8	40,9	23,79	0
T Z 4	4,64	0,92	5,8	45,4	32,65	0
C Z 1						
C Z 2						
C Z 3	24,1	4,38	33,0	41,5	22,31	0
C Z 4						
C Z 5	14,4	3,05	17,2	32,5	24,16	0

Tabla 4.4 Valores de constantes del PID y características obtenidas de las zonas de extrusión

4.4.1.2- Diseño del control Proporcional Integral Derivativo, PID discreto

Como se indicó en el apartado 4.3.2 la compensación puede expandirse a los sistemas discretos, y, el método de calibración cumple también estos principios, por lo cual se procede a compensar mediante el mismo método de calibración propuesto por Ziegler-Nichols. Se utiliza el esquema clásico del controlador PID, cuya función de transferencia es:

$$C(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{s.T_I} + s.T_D \right)$$

Discretizando la ecuación 4.33 se obtiene:

$$G_{PID(z)} = k_p \left(1 + \frac{T}{2 T_I} \frac{z+1}{z-1} + T_D \frac{z-1}{T z} \right) \quad (4.34)$$

Donde: $k_p = k_p$

$$k_i = k_p/T_I$$

$$k_d = k_p * T_D$$

Al aplicar el método de Ziegler-Nichols, en la zona 1 del túnel de la extrusora se tiene:

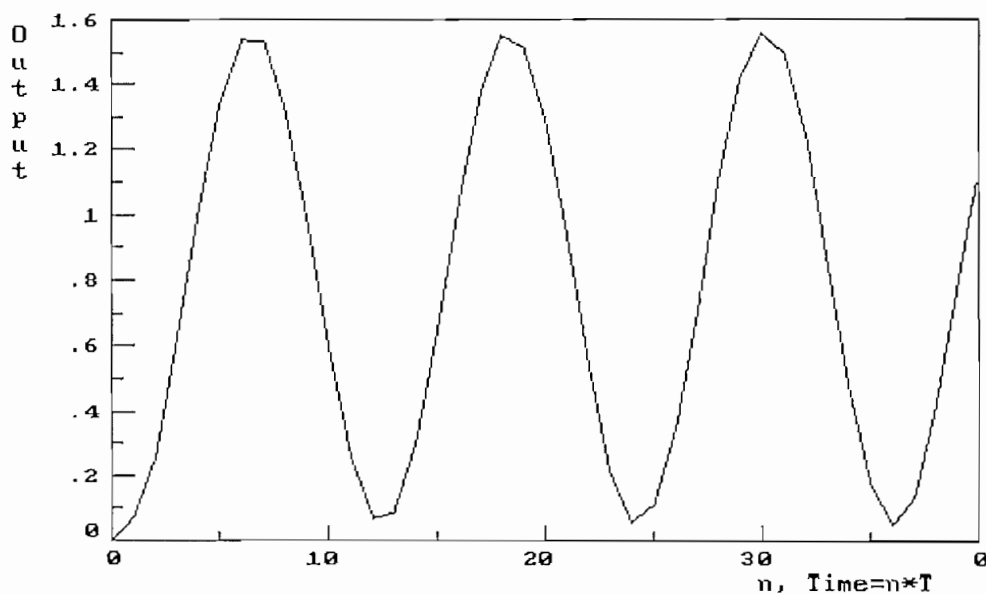


Figura 4.26 Respuesta oscilatoria de la zona 1 del túnel en lazo cerrado cuando la ganancia K_p es crítica

De la figura 4.26 se ve que el período de oscilación natural, τ_0 tiene un valor igual a: 12 min., para encontrar los parámetros se despeja la ganancia crítica k_{cr} .

$$K_{cr} = 0,4 * K_{cr} = 3,64 \Rightarrow K_{cr} = 9,1$$

Luego se aplica los valores de la tabla 4.2 para ajustar los parámetros del controlador PID, y se obtiene los siguientes resultados:

$$K_p = 0,6 * K_{cr} = 0,6 * (9,1) = 5,46 \text{ entonces } k_p = 5,46$$

$$T_I = 0,5 * \tau_0 = 0,5 * (12) \text{ min./rep} = 6 \text{ min./rep}$$

$$T_D = 0,125 * \tau_0 = 0,125 * (12) \text{ min.} = 1,5 \text{ min.}$$

Reemplazando estos valores de los parámetros, en la expresión 4.34, se obtiene el algoritmo del controlador PID clásico, así:

$$G_{PID(z)} = 5,46 \left(1 + \frac{T}{2*6} \frac{z+1}{z-1} + 1,5 \frac{z-1}{T z} \right) \quad (4.35)$$

Donde: $k_p = 5,46$

$$k_i = 0,91$$

$$k_d = 8,19$$

La respuesta del sistema en lazo cerrado al ser perturbado por un cambio de paso del set point, utilizando la ecuación 4.32 como función de compensación, se presenta en la figura 4.27. De esta se observa las características de funcionamiento en estado transitorio y se tiene:

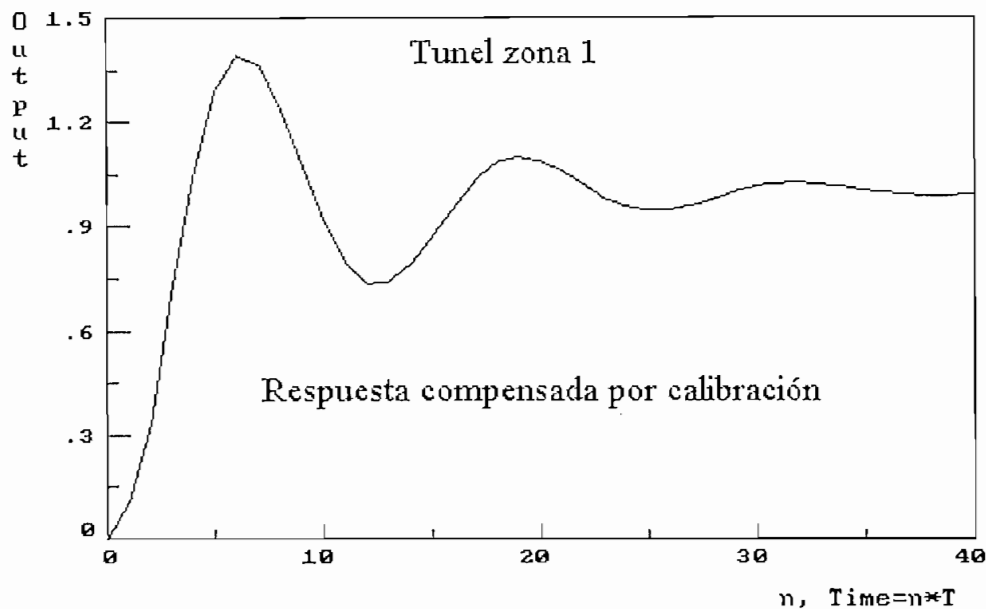


Figura 4.27 Respuesta en lazo cerrado de la zona 1 del túnel de la extrusora, utilizando un control PID

$$M_p = 38,7 \%$$

$$t_s = 26,4 \text{ min.}$$

$$E_p = 0$$

De las zonas de trabajo restantes, se analizan de manera similar, y se obtiene los siguientes resultados:

Zona extrusora	k_p	k_i	k_d	M_p (%)	t_s (min)	E_p
T Z 1	5,46	0,91	8,19	38,720	26,72	0
T Z 2	4,75	0,79	7,12	55,8	22,3	0
T Z 3	10,39	1,73	15,59	35,34	26,85	0
T Z 4	2,37	0,36	3,85	39,85	33,24	0
C Z 1						
C Z 2						
C Z 3	16	2,46	26	43,8	24,25	0
C Z 4						
C Z 5	8,10	1,35	12,15	24,06	27,5	0

Tabla 4.5 Valores de constantes del PID y características obtenidas de las zonas de extrusión

V.- ESTUDIO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR

Subindice

		Pagina
5.1	Introducción	101
5.1.1	Control digital directo DDC	102
5.1.2	Ventajas del control digital directo	103
	Flexibilidad	103
	Multiplicidad de funciones	104
	Técnicas avanzadas	104
	Comunicación	104
5.2	Alternativas del control digital	104
5.2.1	Controladores delicados	104
5.2.2	Controladores lógicos programables	105
5.2.3	Controles computarizados	105
	Cantidad de equipos para el proceso	106
	Tipo de ambiente	106
	Señales de entrada y salida	106
	Comunicación	106
5.3	Elección de la alternativa	106
5.3.1	Requerimientos y especificaciones	107
5.3.2	Desarrollo del software de control	110
5.3.2.1	Desarrollo de las ecuaciones de control	110
	Control Proporcional	111
	Control Proporcional Integral	111
	Control Proporcional Derivativo	111
	Control Proporcional Integral Derivativo clásico	111
	Control Proporcional Integral Derivativo Interactuante	112
	Control Proporcional Integral Derivativo no Interactuante	112
	Control PID no Interactuante con componente derivativa filtrada	113
5.3.2.2	Software de control	114
5.3.2.2.1	Alarmas del proceso	116
5.3.2.2.2	Logo	117
5.3.2.2.3	Presentación del Proceso	118
5.3.2.2.4	Graficas	120
5.3.2.2.5	Controlador digital extrusor	122
5.3.2.2.6	Eventos de extrusión	126
5.3.2.2.7	Login	129
5.3.2.2.8	Función en el tiempo	130

5.- ESTUDIO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR

Una vez realizó el estudio del modelo y el control actual de una máquina extrusora de pvc, y el diseño y simulación de una alternativa de control, a continuación se realiza un análisis acerca de la implementación de un controlador digital para la máquina extrusora.

5.1.- Introducción

En años recientes se ha incrementado tanto el uso de controladores digitales en sistemas de control, que se puede decir que el 100% de los controladores son digitales. Los controladores digitales se utilizan para alcanzar el desempeño óptimo, por ejemplo, en la forma de productividad máxima, beneficio máximo, costo mínimo o la utilización de mínima energía.

Más aún, la aplicación del control por computadora hace posible por ejemplo “el movimiento inteligente” de robots industriales, la optimización de economía de combustibles en automoviles y el refinamiento en la operación de enseres y máquinas de uso doméstico. La capacidad en la toma de decisiones y la flexibilidad en los programas de control son las mayores ventajas de los sistemas de control digital.

Esta tendencia de controlar los sistemas dinámicos en forma digital se debe principalmente a la disponibilidad de computadoras digitales de bajo costo y de reducido tamaño.

Además, se conoce que un controlador digital genera salidas discretas en el tiempo de acuerdo a algún algoritmo de control, éste difiere de un controlador analógico en dos importantes aspectos:

- a) Las entradas al controlador digital deben ser cuantificadas o discretizadas, es decir, se requiere de un conversor análogo digital
- b) Las salidas del controlador digital son actualizadas sólo en intervalos discretos de tiempo, y no continuamente, requiriéndose un dispositivo que suavice la salida, es decir, de un retenedor, que constituye el conversor digital analógico D/A.

En la figura 5.1 se muestra un diagrama de bloques de un sistema básico de control.

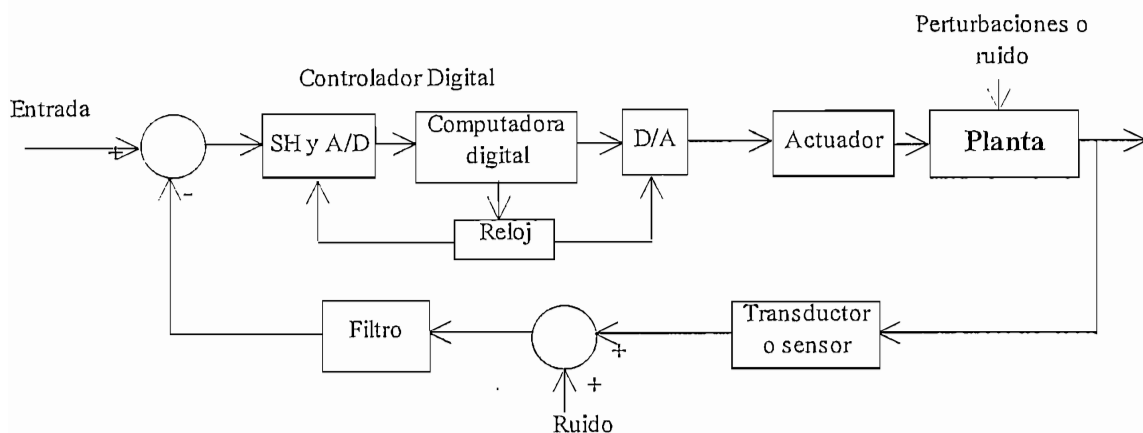


Figura 5.1 Diagrama de bloques de un sistema de control digital.

Para completar las ideas del control digital, se puede decir que los computadores digitales tienen algunos usos comunes en las situaciones de control real:

1. Control supervisor, donde los controladores analógicos originales se mantienen y el computador digital se usa para el monitoreo del proceso y cálculo de algoritmos de control.
2. Control digital directo (DDC), donde el computador digital está realmente en el lazo de control
3. Control secuencial, con fines de maniobra, es decir, típicamente operaciones de arranque y parada, activación y desactivación de alarmas.

Por los motivos antes mencionados, este capítulo se centrará en el control digital directo.

5.1.1.- Control digital directo

El control digital directo o DDC (Direct Digital Control) constituye un sistema de control en el cual, un computador digital determina una acción reguladora en tiempo real, ejecutando un programa almacenado en su memoria interna.

La figura 5.2 muestra el esquema de un DDC en el que se incluye en el computador digital, el comparador y el nivel de referencia.

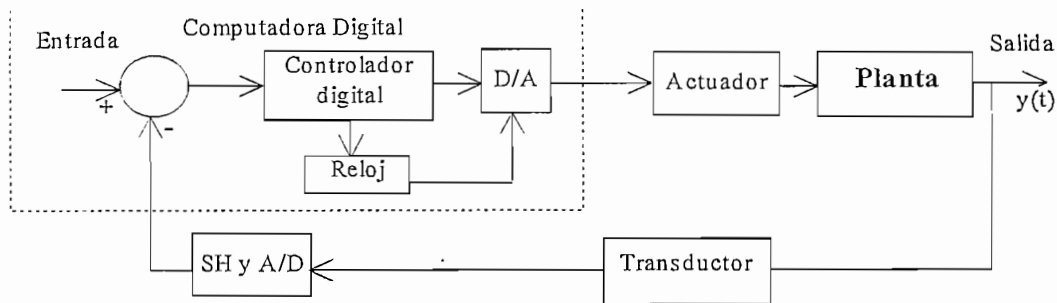


Figura 5.2 Esquema de un control digital directo.

En la figura 5.2 la salida del proceso $y(t)$ es una señal continua en el tiempo. Esta salida es muestreada y convertida en una señal digital usando un conversor análogo digital, y, esta conversión es realizada normalmente a intervalos constantes de tiempo T (periodo de muestreo). La señal muestreada medida es entonces procesada usando un algoritmo digital de control, el mismo que como resultado de su cálculo produce una señal de salida digital que posteriormente será convertida en una señal analógica mediante el uso de un conversor digital análogo. Este tipo de sistemas de control dispone de una señal de reloj para la sincronización de todo el proceso y las operaciones de entrada y salida de datos. Esta es una característica esencial de cualquier sistema de control digital.

5.1.2.- Ventajas del control digital directo

La implementación de controladores mediante el uso de algoritmos de control digital tienen otros beneficios adicionales a los ya mencionados si se los compara con la contraparte analógica para el control de procesos. Estos beneficios pueden ser agrupados de la siguientes manera:

- Flexibilidad
- Multiplicidad de funciones
- Capacidad de hacer uso de técnicas de análisis y diseño avanzadas
- Comunicación con otros dispositivos.

Flexibilidad: En el diseño del sistema de control, pudiendo cambiar fácilmente de una acción de control a otra, diseñando la ecuación de control más conveniente para cada caso.

Hoy en día existen herramientas desarrolladas de programación las mismas que están disponibles y accesibles, por lo que al realizar un control digital es muy sencillo cambiar las

especificaciones del lazo de control. Esta flexibilidad es una característica tanto de los sistemas pequeños como de sistemas complejos.

Con un esquema de control digital, el cambio de una señal o variable es una cuestión de reespecificación de datos, mientras que en un sistema analógico es posible que se requiera de un cambio total en el cableado de la planta, caso que es evidente en el área de relés y los controles secuenciales.

Multiplicidad de funciones: Un controlador digital puede ser usado en muchas otras tareas además de la implementación del algoritmo de control propiamente dicho.

Además esta característica de multiplicidad de funciones radica en el hecho de que el dispositivo digital maneja varios lazos de control simultáneamente.

Técnicas avanzadas: El control digital posee la capacidad de implementar modernas técnicas de control avanzado, las mismas facilitan el control de sistemas donde exista interacción, tiempos de retardo significativos, en sistemas de orden superior donde las técnicas convencionales de control PI, PID no pueden ser utilizadas en forma satisfactoria, o en sistemas con múltiples entradas o salidas.

Comunicación: Una de las ventajas del control digital es la capacidad de intercomunicación con otros dispositivos o computadoras, lo que posibilita el acceso a un sin número de otras actividades propias de estos dispositivos, tales como: almacenamiento, impresión de datos, graficación de las variables del proceso en tiempo real.

Existen otras características de los controladores como la de incrementar la seguridad del sistema o la interconexión de controladores digitales lo cual permite la implementación de un sistema supervisor de datos centralizado.

5.2.- Alternativas del control digital

Entre las alternativas del control digital existen tres tendencias fundamentales:

- a) Dispositivos de control dedicados
- b) Controladores lógicos programables
- c) Controles computarizados

5.2.1.- Controladores dedicados

Estos dispositivos se diseñan y construyen para satisfacer una necesidad específica de un proceso particular. Por lo general están implementados a base de un microcontrolador de programación única, motivo por el cual no permiten la adaptación del programa a distintas situaciones, sino únicamente una limitada calibración de los parámetros de control existentes.

Sin embargo, a pesar de esta inconveniencia, son controladores de tiempo de respuesta muy corto y por ello son extensamente utilizados en la regulación de procesos rápidos. Típicamente son controladores PID.

5.2.2.-Controladores lógicos programables

Los controladores lógicos programables (PLC's), son equipos que se desarrollaron para sustituir paneles secuenciales de control en base de relés, es decir, fueron inicialmente concebidos para recibir entradas binarias, operar sobre ellas funciones booleanas, y, devolver señales del mismo tipo en respuesta. Con el ritmo rápido de la tecnificación, los PLC's se volvieron cada vez más flexibles y fáciles de utilizar. Estos equipos en la actualidad pueden manejar tanto señales analógicas como digitales, y comandar secuencias lógicas, temporizaciones, conteos, operaciones aritméticas e inclusive leyes de control como algoritmos PID. Sin embargo, la real ventaja de estos dispositivos es que permiten programar el conjunto de funciones y rutinas que se desea se cumplan en un determinado proceso, con esto se consigue, que un mismo controlador pueda ser utilizado para el control de distintos procesos, sin necesidad de adaptaciones complicadas, sino con una simple reprogramación de su memoria estática.

La programación de los PLC's se realiza a través de una computadora personal o por medio de un terminal portátil diseñado expresamente para configurar controladores de instalación remota.

Los fabricantes de estos equipos previendo la necesidad de enlazar varios PLC's a una red de comunicaciones y formar una estructura de control más grande, ha desarrollado modelos con canales de comunicación de distinta capacidad y alcance. Esta es una razón más para que sean muy utilizados en los proyectos de automatización.

5.2.3.- Controles computarizados

El tercer grupo de controladores en tiempo real lo conforman los computadores, ya sean de operación individual o de operación coordinada bajo una configuración en red. Estos equipos integran las más sofisticadas técnicas de control y los más amigables entornos de trabajo, pues

5.3.1.- Requerimientos y especificaciones.

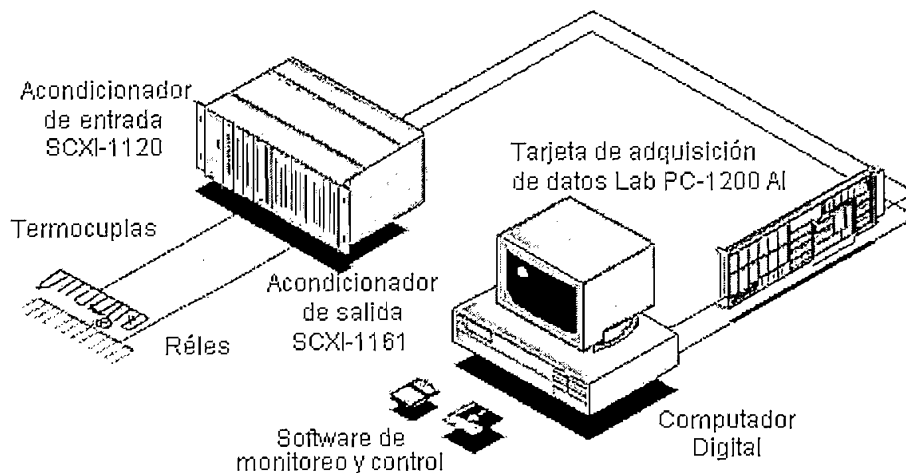


Figura 5.3 Esquema del controlador digital propuesto

La figura 5.3 muestra la propuesta de control digital directo, en la que el computador personal forma parte del lazo de control a implementarse en un futuro en la máquina extrusora, y, será el que comande todas las acciones de adquisición, monitoreo y control, del proceso de extrusión. Se sugiere conectar al equipo a través de la tarjeta Lab PC-1200AI, ésta a su vez irá conectada a un módulo SCXI-1120 (Signal Conditioning eXtensions for Instrumentation), el cual será el encargado de recibir directamente la señal de las termocuplas ubicadas a lo largo del cabezal y el túnel de la extrusora; las señales de control van al actuador a través de un módulo SCXI-1161, que se encargará de controlar directamente los relés de salida para los calentadores por resistencias eléctricas.

Detallando el procedimiento, se puede decir que, el módulo de acondicionamiento de señales analógicas SCXI-1120, tiene entradas donde van conectadas directamente las termocuplas; éste acondiciona la señal y realiza las respectivas compensaciones necesarias en el trabajo con termocuplas. Antes de ingresar al computador personal, las señales de entrada pasan a una tarjeta DAQ Lab PC-1200AI, para en esta realizar los trabajos de digitalizar la señal. La figura 5.4 ilustra la manera como se envían las señales de la tarjeta Lab PC-1200AI al computador.

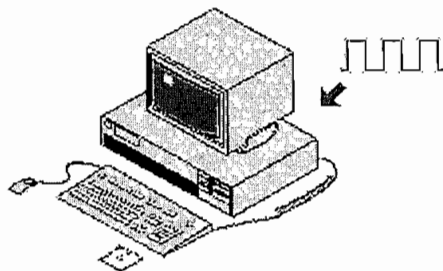


Figura 5.4.- Entrada de la señal digitalizada al computador personal

Las señales digitalizadas que ingresan al computador (figura 5.4), entran como datos al algoritmo de control, a implementarse mediante el programa BridgeVIEW. Con este programa se ha realizado un control PID, para lo se obtuvo el algoritmo de control PID discreto. El controlador toma las respectivas acciones de control necesarias y luego envía una señal al actuador, a través de la tarjeta Lab PC-1200AI, la figura 5.5 muestra como la señal sale del computador personal.

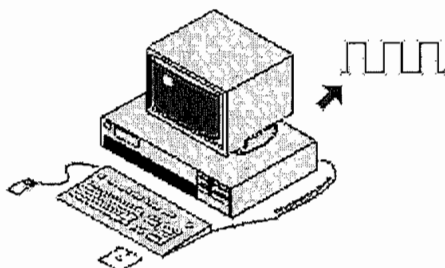


Figura 5.5.- Salida de la señal digitalizada del computador personal

Estas señales enviadas por el computador personal a través de la tarjeta Lab PC-1200AI van al módulo de acondicionamiento de señales digitales SCXI-1161, el cual maneja los réles del citado módulo, que a su vez controlan los calefactores por resistencias eléctricas. Estos réles ubicados en la misma tarjeta tienen capacidad de manejar corrientes de hasta 8 A, a 230 Vrms, razón por la cual se ha proyectado utilizar estas mismas salidas evitando el uso de los réles de mercurio originales, cuyo uso viene restringiéndose por considerarse al mercurio un elemento no ecológico.

Las especificaciones de estos y los demás accesorios a utilizarse, están ubicadas en el anexo D.

Para el Software de control de temperatura de la máquina extrusora, se ha utilizado el paquete computacional Bridge VIEW, que tiene las facilidades de: trabajar en un ambiente de

programación gráfica; ser utilizado en pruebas de medición; adquisición de datos; control y monitoreo de procesos, y, automatización de industrias.

Bridge VIEW trabaja bajo el ambiente Windows, y, permite disponer de elementos que se denominan instrumentos virtuales VI, propios de este software, los cuales cumplen la misma función que un elemento real; así por ejemplo se tiene un potenciómetro (figura 5.6), el cual tiene la figura de este elemento y su función es como el real.

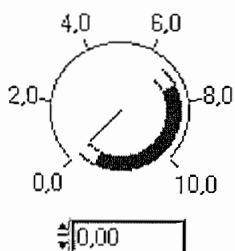


Fig. 5.6 Instrumento virtual VI

El elemento puede ser manipulado fácilmente con las herramientas virtuales de operación

Pero lo mas novedoso es la facilidad que presta el software para trabajar con eventos y alarmas en tiempo real a los cual se los denomina TAGS., como indica la figura:

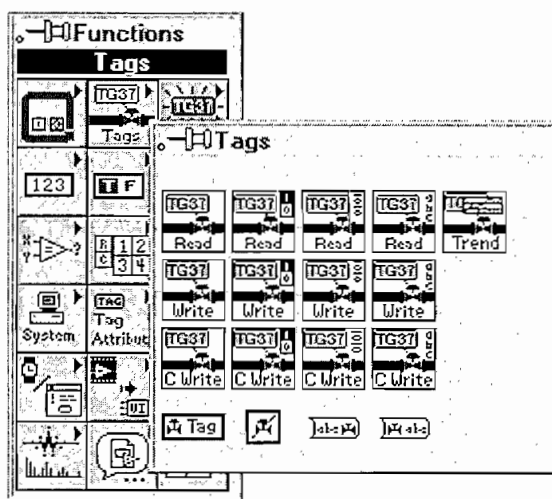


Figura. 5.7 Panel de Funciones de TAGS

No es el objetivo de este trabajo el desarrollar toda la información acerca de este programa, por lo que se adjunta la información respectiva en el anexo H.

La alternativa de control desarrollada en este paquete, simula la respuesta en el tiempo de la función de transferencia de las zonas de trabajo de la máquina extrusora de PVC.

5.3.2- Desarrollo del software de control

Como muestra la figura 5.3, el computador personal forma parte del lazo cerrado del sistema de control; paralelo a esto se ha implementado un software, el mismo que fue desarrollado en Bridge VIEW; este software será el encargado de ejecutar las rutinas de control y monitoreo del proceso de extrusión; además en el computador personal se deben realizar todos los cambios de los parámetros del controlador, y, para esto se dispone de una interfaz de mímicos gráficos para facilitar el trabajo del operador.

Como se dijo en la introducción de este trabajo, la implementación física del controlador queda fuera del alcance de este, pero se propone la configuración de los equipos y sus accesorios para la implementación física del mismo.

5.3.2.1.- Desarrollo de las ecuaciones de control

El software del controlador digital, tiene la capacidad de aceptar las siguientes configuraciones:

Control Proporcional

Control Proporcional Integral

Control Proporcional Derivativo

Control Proporcional Integral Derivativo clásico

Control Proporcional Integral Derivativo interactuante.

Control Proporcional Integral Derivativo no interactuante

Control Proporcional Integral Derivativo no interactuante con componente derivativa filtrada

A continuación se procede ha discretizar las ecuaciones introducidas en el software, cuyo análisis se realizó en el capítulo 4

Donde para todo el conjunto de ecuaciones se tiene que:

k_p constante proporcional

k_i : constante integral

k_d constante derivativa

Control Proporcional

$$\frac{u}{e} = kp$$

$$u_p(k) = kp e(k) \quad (5.1)$$

Control Proporcional Integral

$$\frac{u}{e} = kp \left(1 + \frac{1}{ki s} \right)$$

Usando el método del trapecio, se tiene:

$$u_{PI}(k) = u_{PI}(k-1) + K_1 e(k) + K_2 e(k-1) \quad (5.2)$$

$$\text{Donde: } K_1 = \frac{2k_p + k_i T}{2}; K_2 = K_1 \frac{k_i T - 2k_p}{2k_p + k_i T}$$

Control Proporcional Derivativo

$$\frac{u}{e} = kp(1 + kd s)$$

Usando el método de integración rectangular hacia atrás, se tiene:

$$u_{PD}(k) = K_1 e(k) + K_2 e(k-1) \quad (5.3)$$

$$\text{Donde: } K_1 = \frac{k_p T + k_d}{T}; K_2 = K_1 \frac{k_d}{k_p T + k_d}$$

Control Proporcional Integral Derivativo clásico

$$\frac{u}{e} = kp \left(1 + \frac{1}{ki s} + kd s \right)$$

Usando el método del trapecio para la parte integral y la integración rectangular hacia atrás para la parte derivativa, se tiene:

$$u_{PID}(k) = u_{PID}(k-1) + K_1 e(k) + K_2 e(k-1) + K_3 e(k-2) \quad (5.4)$$

Donde:

$$K_1 = \frac{2k_p T + k_i T^2 + 2k_d}{2T}; \quad K_2 = K_1 \frac{k_i T^2 - 2k_p T + 2k_d}{2k_p T + k_i T^2 + 2k_d}; \quad K_3 = K_1 \frac{2k_d}{2k_p T + k_i T^2 + 2k_d}$$

Control Proporcional Integral Derivativo interactuante.

De la configuración presentada en 4.2.1.2, la ecuación del control interactuante es:

$$u = kp \left(1 + \frac{1}{ki s} \right) (r - (s kd + 1) y) \quad (5.5)$$

Usando el método del trapecio para la parte integral y el rectángulo hacia atrás para la parte derivativa, se tiene:

$$u_{PID_{int}}(k) = u_{1_{int}}(k) + u_{2_{int}}(k) \quad (5.6)$$

$$\text{Donde: } u_{1_{int}}(k) = K_1 e(k) + I(k); \quad I(k) = K_2 I(k-1) + (1 - K_2) u_{1_{int}}(k-1)$$

$$u_2(k) = u_2(k-1) - [K_3 y(k) + K_4 y(k-1) + K_5 y(k-2)]$$

$$K_1 = k_p \left(1 + \frac{T}{2k_i} \right); \quad K_2 = \frac{2k_i - T}{2k_i + T}; \quad K_3 = kp^* T + \frac{ki^*}{2} T + 2kd^*;$$

$$K_4 = \frac{ki^* T^2 - 2kp^* T - 4kd^*}{2kp^* T + ki^* T + 2kd^*}; \quad K_5 = \frac{2kd^*}{2kp^* T + ki^* T + 2kd^*}$$

$$kp^* = kp \left(1 - \frac{kd}{ki} \right); \quad ki^* = \frac{kp^*}{ki + kd}; \quad kd^* = kp^* \left(\frac{ki kd}{ki + kd} \right)$$

Control Proporcional Integral Derivativo no interactuante

De la configuración presentada en 4.1.6.4, la ecuación del control no interactuante es:

$$u = kp \left(1 + \frac{1}{ki s} \right) e - s kd y \quad (5.7)$$

Usando el método del trapecio para la parte integral y el rectángulo hacia atrás para la parte derivativa, se tiene:

$$u_{PID_{int}}(k) = u_{PI}(k) - D(k) \quad (5.8)$$

$$\text{Donde: } u_{pj}(k) = K_1 e(k) + I(k)$$

$$I(k) = K_2 I(k-1) + (1 - K_2) u_{pj}(k-1)$$

$$D(k) = K_3 (Y(k) - Y(k-1))$$

$$K_1 = k_p \left(1 + \frac{T}{2 k_i} \right); K_2 = \frac{2 k_i - T}{2 k_i + T} \quad K_3 = \frac{k_d}{T}$$

Control Proporcional Integral Derivativo no interactuante con componente derivativa filtrada

Tiene la ecuación

$$u = k_p \left(1 + \frac{1}{k_i s} \right) e - \left(\frac{s k_d}{1 + \frac{s k_d}{N}} \right) y \quad (5.9)$$

Donde N es una constante que varia entre 7 y 15, que para este análisis se toma el valor de 10
Ref. [8] Usando el método del trapecio para toda la ecuación, se tiene

$$u_{pID_{mr}}(k) = u_{pj}(k) - D(k) \quad (5.10)$$

$$\text{Donde: } u_{pj}(k) = K_1 e(k) + I(k)$$

$$I(k) = K_2 I(k-1) + (1 - K_2) u_{pj}(k-1)$$

$$K_1 = k_p \left(1 + \frac{T}{k_i} \right); K_2 = \frac{2 k_i - T}{2 k_i + T}$$

$$D(k) = -\frac{\frac{K_3}{N} - 1}{\frac{K_3}{N} + 1} D(k-1) + \frac{K_3}{\frac{K_3}{N} + 1} (Y(k) - Y(k-1))$$

$$K_3 = 2 \frac{k_d}{T}$$

Todo este conjunto de ecuaciones van a constituir el controlador digital propuesto.

5.3.2.2.- Software de control

El software de monitoreo y control empieza en un Instrumento virtual (VI) que se denomina *Panel de control Simulación*, el mismo que se ilustra en la figura 5.6.

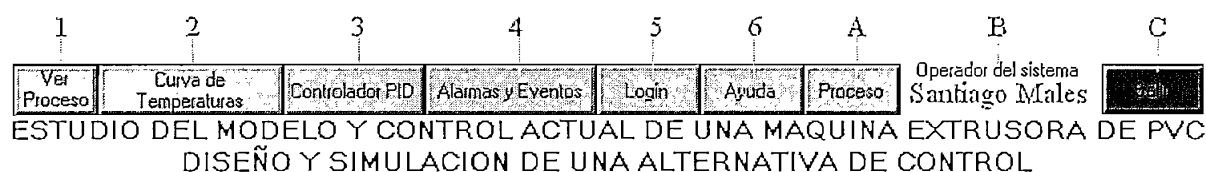


Figura. 5.8 VI Panel de control Simulación, modo Proceso

Este VI es el encargado de inicializar todo el controlador digital, tiene dos modos de operación, proceso y simulación, los mismo que pueden ser elegidos mediante el icono A de la figura 5.8. Cuando el icono esta activo en el modo *Proceso*, aparecen los iconos mostrados en la figura 5.8.

El funcionamiento de cada uno de estos iconos se describe a continuación:

Ver proceso, señalado con el numero 1, al ser este icono pulsado llama al VI *Presentación del proceso*, el cual muestra la pantalla que contiene la representación mímica de la máquina extrusora de pvc.

Curva de temperaturas, señalado con el número 2, al ser este icono pulsado llama al VI *Gráficas*, que muestra la curva de temperaturas del proceso de extrusión de pvc, el set point y la variable del proceso de la zona de trabajo elegida.

Controlador PID, señalado con el número 3, al ser este icono pulsado llama al VI *Controlador digital extrusor* que ilustra la pantalla del controlador digital donde se pueden setear todos los set point; parámetros k_p , k_i , k_d , limite; tipo de configuración y período de discretización del controlador digital; además se puede variar el error admisible el tipo de referencia del proceso de extrusión y el modo de trabajo sea este proceso real o simulación.

Este icono esta activo solo para usuarios autorizados.

Alarmas y eventos señalado con el número 4, al ser este icono pulsado llama al VI *Eventos extrusión* el cual despliega una pantalla de alarmas y eventos del proceso de extrusión en tiempo real

Login señalado con el número 5, al ser este icono pulsado llama una sub pantalla propia del software Bridge VIEW en la cual puede ingresar el nombre del operador y su clave de accesos, la misma que es proporcionada por el administrador del programa.

Ayuda, llama a una rutina de ayuda acerca del software.

Operador del sistema indica la persona que está operando el sistema previamente ingresado mediante el icono de Login, siempre y cuando tenga los accesos concedidos por el administrador del sistema.

Salir permite salir del programa siempre y cuando sea un usuario autorizado para ejecutar dicho icono, caso contrario no realizará ninguna acción en el programa.

Cuando el icono A esta activo en el modo *Simulación*, se tiene la pantalla mostrada en la figura 5.9



Figura. 5.9 Opción del panel de control en modo simulación

El funcionamiento de los iconos mostrados en la figura 5,9 se los describe a continuación:

Respuesta del proceso, al ser ejecutado este icono llama al VI “*Función en el tiempo*”, la misma que muestra en una pantalla las opciones para realizar un análisis de las funciones de transferencia de la máquina extrusora de pvc, ver la respuesta en el tiempo de la zona de extrusión al ir variando los parámetros, configuración y periodo de discretización del controlador digital.

De la misma forma permite ver la ubicación de los polos y ceros de la zona compensada.

Al ejecutarse el VI *Panel de control simulación* aparece la representación gráfica del proceso, y, sobre esta pantalla se muestran por defecto al activarse este VI, dos sub pantallas, las mismas que son, “*Alarmas del proceso*” y “*logo*”, las cuales que siempre están activas y no se interponen a la presentación de otras ventanas cuando se esta ejecutando el programa.

A continuación se describe cada uno de los VI que integran este trabajo.

5.3.2.2.1.- Alarmas del Proceso

Este VI esta siempre activo desde que se inicia el programa, la razón se debe a que como su nombre lo indica se trata de una pantalla que indica las alarmas que ocurren durante el proceso, pues en la práctica cuando se opera cualquier sistema de control, el operador siempre debe disponer de las alarmas, para evitar cualquier contrariedad al proceso normal de trabajo. La gráfica 5.10 ilustra la pantalla de presentación.

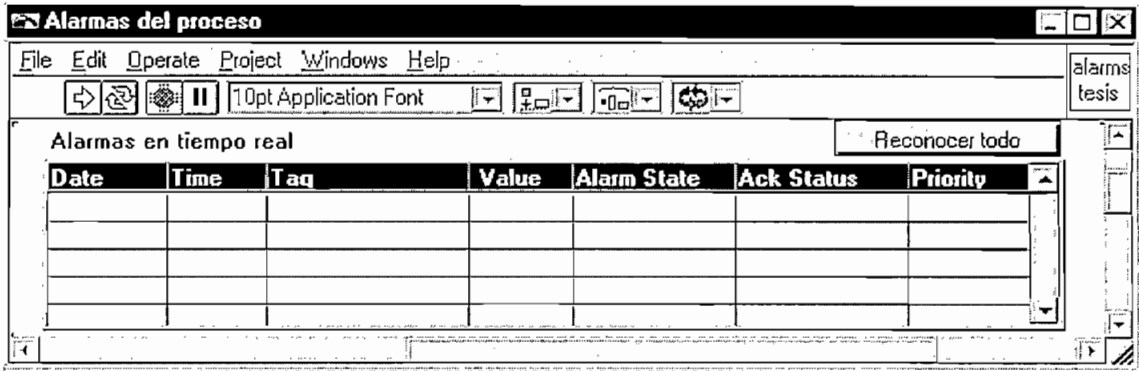


Figura. 5.10 Gráfica de Alarmas del proceso

La pantalla mostrada en la figura 5.10 esta compuesta por dos elementos, una tabla donde se despliegan las alarmas en tiempo real y el icono *Reconocer todo* que permite reconocer las alarmas mostradas en la misma.

La pantalla de diagrama gráfico del VI indicado en la figura 5.11, muestra como se definen en forma casi automática este tipo de eventos ya que para su desarrollo e interrelación se debe ejecutar la propiedad HMI Wizard y se obtiene la generación de eventos.

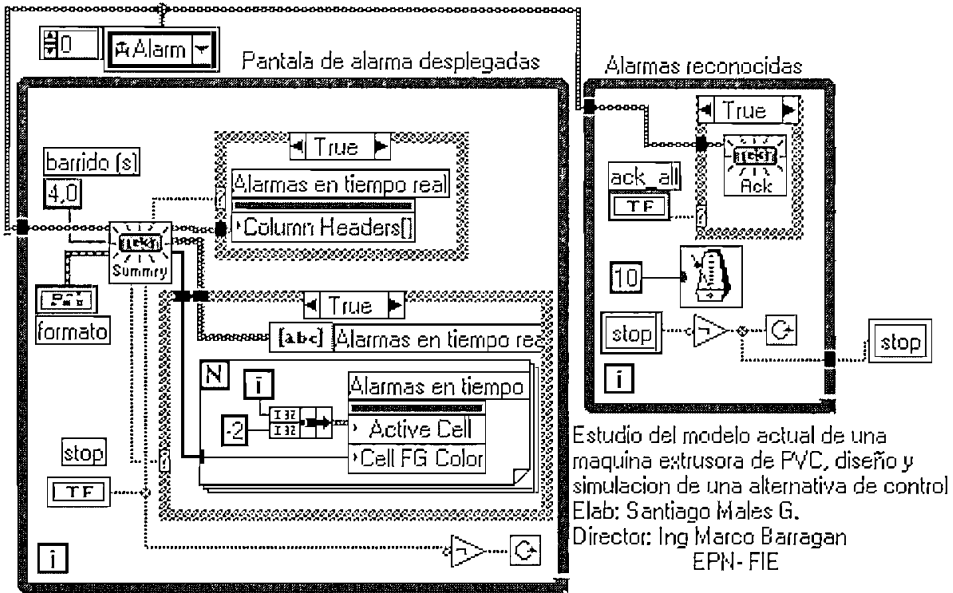


Figura. 5.11 Pantalla de Alarmas del proceso Diagrama.

5.3.2.2.2.- Logo

Este VI aparece siempre en la esquina superior derecha y muestra los mímicos que ilustran los sellos de la facultad de Ingeniería Eléctrica y La Escuela Politécnica Nacional respectivamente. También ilustra la información acerca del director y el autor de este trabajo.



Figura. 5.12 Logo.vi

5.3.2.2.3.- Presentación del proceso

Esta pantalla muestra los mímicos relativos a la máquina extrusora de PVC, y van a ayudar a la comprensión del proceso, la figura 5.9 muestra la pantalla de este VI:

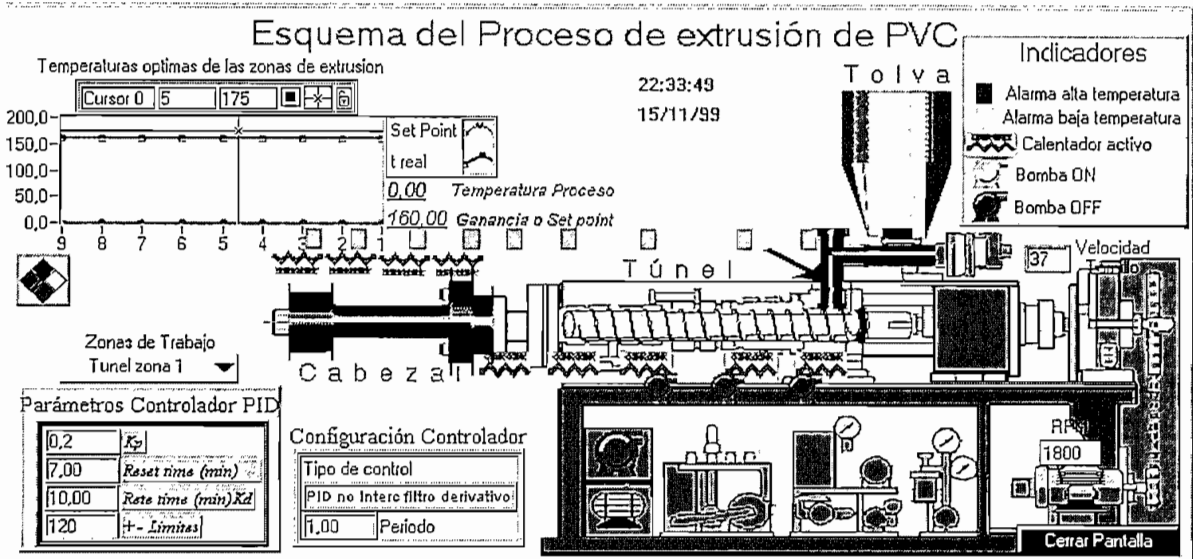


Figura. 5.9 Pantalla del VI Presentación del proceso

A continuación se describe cada uno de los componentes de esta pantalla

- *Temperaturas óptimas de las zonas de extrusión*, ubicado en la esquina superior izquierda muestra como varía el *Set point* y la *t real* (temperatura real) de las zonas de la extrusora; esto permite ilustrar de forma comprensible como varia la curva de temperaturas del proceso. Ubicando el cursor sobre cualquier punto de la curva, se van a leer los parámetros indicados.
- *Zonas de trabajo*, este icono ubicado bajo el mímico anterior, permite escoger la zona requerida y observar sus parámetros tanto del “*Set Point*” como la “*temperatura proceso*”
- *Parámetros Control PID*, ubicado en la parte inferior izquierda, indica los valores de k_p , k_i , k_d a los que está seteado el controlador digital de igual manera se muestra los límites altos y mínimos a los que va ha trabajar el controlador
- *Controlador PID*, indica el tipo de configuración seteado del controlador

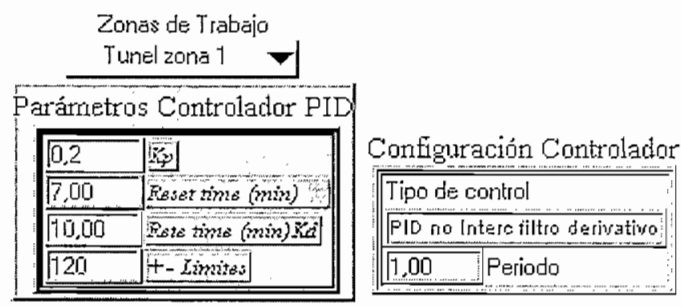


Figura. 5.10 Pantalla del VI Presentación del proceso

A semejanza con los sistemas SCADA, dependiendo del nivel de accesos que se tenga sobre el programa, se puede o no observar el mímico de *Controlador PID*, por lo general el operador no va a tener accesos a este tipo de mímico, ya que no necesita observar este tipo de datos.

- Se ilustra el mímico principal de la máquina extrusora de PVC, en el cual se representan los calentadores eléctricos para las diferentes zonas tanto del túnel como del cabezal. Se indica en este mímico las partes principales de la máquina extrusora como son: el tornillo, el cabezal, el túnel y la tolva
- * Sobre el túnel y el cabezal van los indicadores de alarma, los mismos que se activan tanto para sobre temperatura como para baja temperatura.
- * Para una mejor comprensión y ubicación de las zonas de trabajo, cuando se escoge una zona deseada se indica con una flecha el lugar, ya sea del túnel o cabezal de la extrusora
- * *Velocidad del tornillo*, este icono permite variar la velocidad del tornillo
- * *Control*, este icono permite comandar el encendido y apagado de la máquina extrusora desde el panel de operación
- * *Indicadores*, describe el significado de los iconos, el estado ON OFF cuando cambian de color
- * Se añaden algunos gráficos adicionales para ilustrar el proceso

5.3.2.2.4.- Gráficas

Este VI muestra de manera detallada la curva de temperaturas del proceso de extrusión, y cómo varía en tiempo real la *temperatura del proceso* y el *Set point* (figura 5.13). Tiene dos subpantallas, la una muestra, la curva de la temperatura del proceso de extrusión; y la otra el comportamiento de las temperaturas del Set point, y de la zona de trabajo del proceso, en tiempo real

Tiene el icono *Zona de trabajo*, el cual permite elegir la zona de extrusión y observar en una gráfica la evolución del proceso de la zona elegida, de una manera independiente.

Se puede desplazar en las gráficas con la ayuda de los cursores que poseen y ver el valor exacto de temperatura en el punto deseado.

Esta pantalla es solo para el monitoreo de temperaturas del proceso de extrusión de PVC.

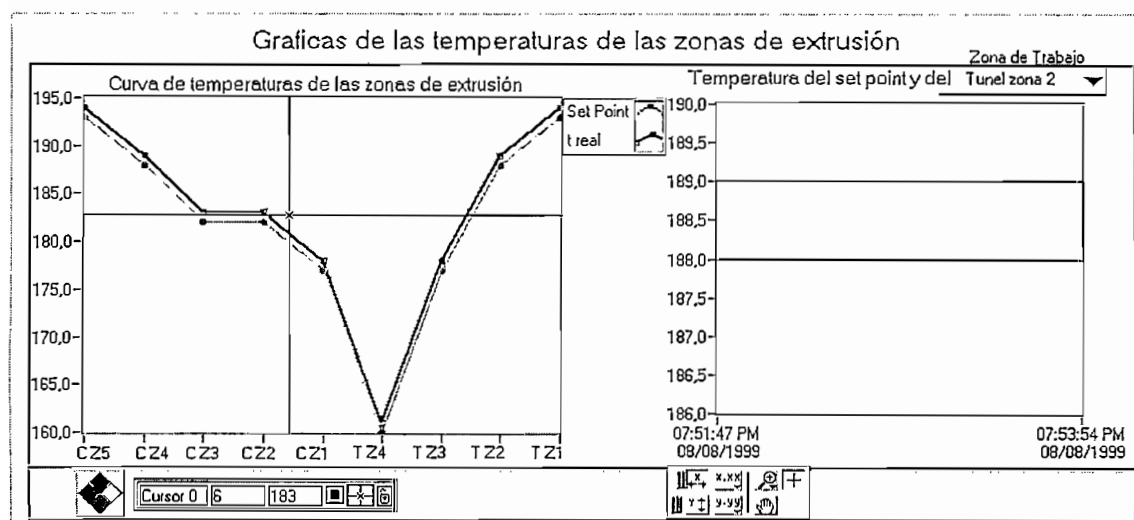


Figura. 5.13 Pantalla de presentación de VI Gráficas

En el desarrollo de este VI (figura 5.14) se utilizan los conceptos de variables globales y TAGS, los mismos que permiten tener ínter relación de los valores que van cambiando en tiempo real, es decir se realiza un VI que desempeña la función de enlace entre los otros VI; así, los valores de temperatura son generados en otro VI denominado *Controlador digital extrusor*. De esta manera se obtiene una actualización de los datos mientras están ejecutándose los VI.

La figura 5.14 ilustra la pantalla del Diagrama de este VI.

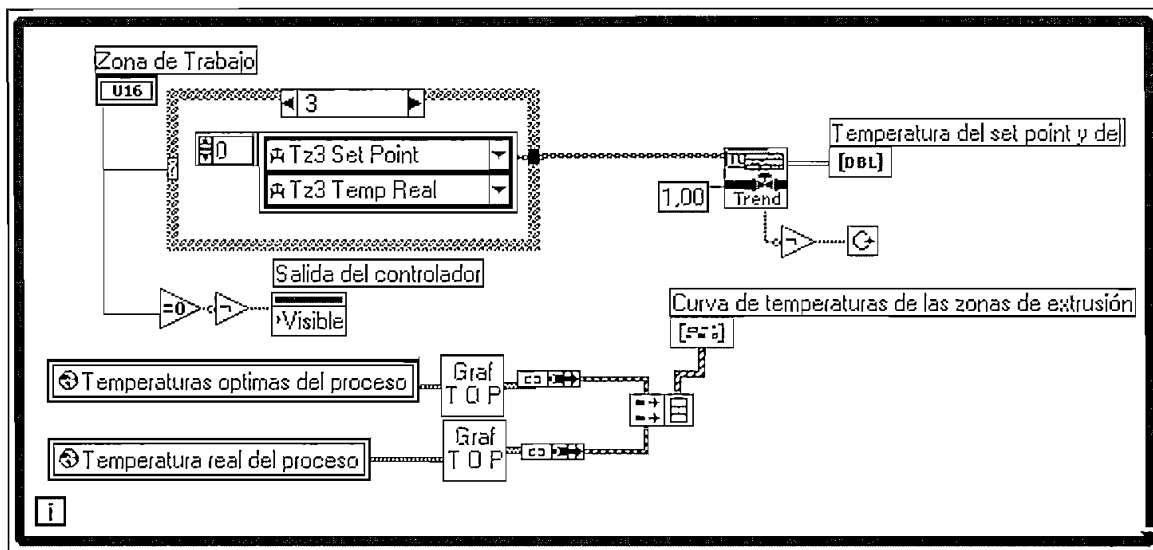


Figura. 5.14.- Pantalla del VI Gráficas

5.3.2.2.5.- Controlador digital extrusor

Este VI mostrado en la figura 5.15 es el corazón de este trabajo, aquí se generan los valores de temperaturas del proceso en el caso de la simulación, o se podría analizar los datos que ingresaren por las respectivas tarjetas de acondicionamientos de señales (el análisis de datos con acondicionadores de señal, esta fuera del alcance de este trabajo). En este VI se pueda cambiar el *Set Point* del proceso e ingresar los valores de las zonas de trabajo (que para esta tesis se simulan).

Esta compuesta de mímicos donde se pueden cambiar todos los parámetros de *Controlador PID*, el tipo de controlador a utilizar, el periodo de discretización del controlador, los valores del error de la simulación.

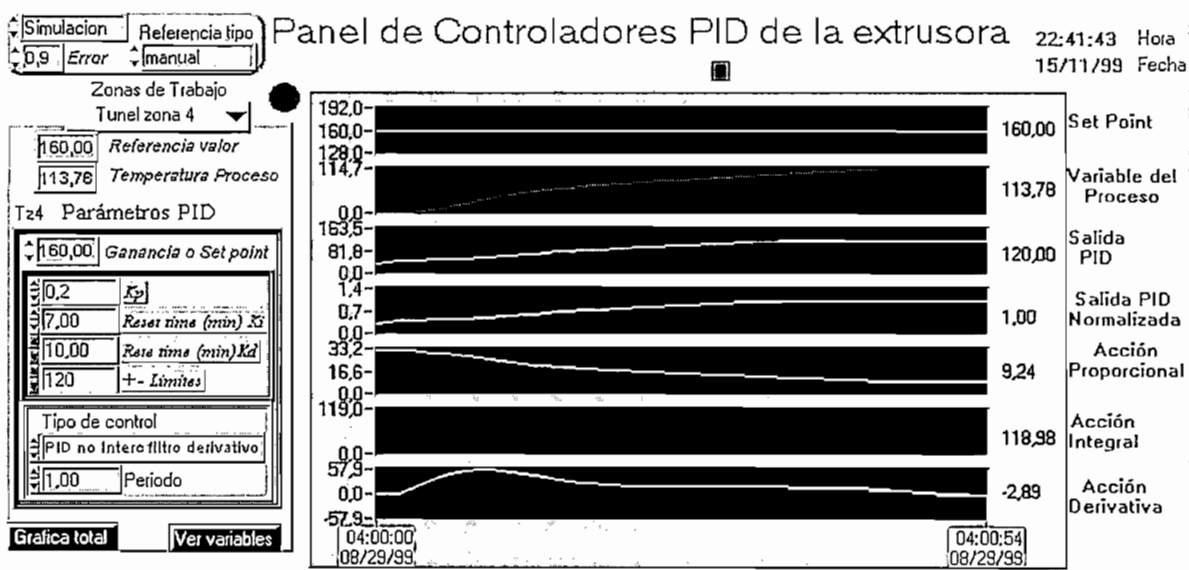


Figura 5.15.- Controlador PID extrusora.VI

A continuación se describe los componentes que integran este VI.

- *Simulación* o *Proceso Real* ubicado en la esquina superior izquierda, permite escoger entre los modos *Simulación* o *Proceso real*.

Al elegir el modo *Simulación* se dispone de un generador de señales que simula el ingreso de una referencia al controlador; para observar la respuesta del controlador se ingresan algunos tipos de señales, como onda sinusoidal, cuadrada, triangular, diente de sierra y randómica. Esto permite ver en tiempo real como reacciona el controlador digital a este tipo de señales, y

concluir como va a responder en el proceso de extrusión, ante los diversos cambios en la referencia.

Al elegir el modo *Proceso real* se podría analizar los datos que ingresaren por las respectivas tarjetas de acondicionamientos de señales (el análisis de datos con acondicionadores de señal, esta fuera del alcance de este trabajo) y observar como el controlador digital trabajaría en el proceso.

- **Error** ubicado en la esquina superior izquierda bajo al icono anterior, permite ingresar el valor del error admisible en el proceso, esto se lo realiza para generar eventos y alarmas del proceso de extrusión

Los eventos y alarmas generados durante el proceso de extrusión de pvc van ha ser mostrados en los VI de *alarmas*, y *eventos del proceso* si los valores sobrepasan los previamente fijados en el icono *Error*, esta interrelación con los VI antes mencionados se realiza mediante la interfaz HMI, propia del software Bridge VIEW la misma que utiliza los TAGS, que recogen las señales en el VI *Controlador digital extrusor*.

- **Referencia tipo** Ubicado en la esquina superior izquierda junto al selector *Simulación*. En este selector se puede elegir la referencia a ser usada en la simulación del proceso de extrusión, lo cual permite observar la respuesta simulada del controlador digital en lazo cerrado ante la referencia elegida.

El selector *Referencia tipo* tiene algunas señales, las mimas que son: onda senoidal, cuadrada, triangular, diente de sierra y randomica,

- **Zonas de trabajo** Ubicado en la parte izquierda bajo los iconos anteriores, permite elegir la zona de trabajo del proceso de extrusión, y, a su vez muestra los parámetros de temperatura del proceso, set point, parámetros del controlador, tipo de configuración del controlador digital y el periodo de discretización de la zona elegida de extrusión.
- **Referencia valor** Muestra el valor de la referencia que tiene la zona de trabajo elegida
- **Temperatura Proceso** Muestra el valor de la temperatura que tiene la zona de trabajo elegida
- **Ganancia o set point** Permite setear el valor de temperatura en la zona de trabajo elegida, a la que el proceso de extrusión en lazo cerrado debe llegar , mediante la acción del controlador digital.

- **Parámetros PID** Ubicado en la parte izquierda, permite setear los parámetros del controlador digital de la zona de trabajo elegida.

En este mímico se ingresan los valores de **kp**, **ki** o **Reset time**, **kd** o **Rate time** , y el **limite** dentro del cual va ha trabajar el controlador digital.

kp es la ganancia proporcional del controlador digital.

ki o **Reset time** es la constante de integración del controlador digital.

kd o **Rate time** es la constante derivativa del controlador digital.

limite es el valor al cual se limita la salida del controlador digital, para evitar su saturación del mismo.

- **Tipo de control** Ubicado en la parte inferior izquierda, permite elegir el tipo de configuración del controlador digital en la zona de trabajo elegida.

Este selector tiene algunas configuraciones para el controlador digital, las mismas que son:

Proporcional P

Proporcional Integral PI

Proporcional Derivativo PD

Proporcional Integral Derivativo PID clásico

PID interactuante.

PID no interactuante.

PID no interactuante con componente derivativa filtrada

En la opción *Periodo* se setea el periodo de discretización con el cual va a trabajar el controlador digital en la zona de extrusión elegida.

- **Gráfica total** Ubicado en la esquina inferior izquierda, es un icono de dos estados; permite observar la evolución del proceso y la respuesta del controlador digital en lazo cerrado en la zona de trabajo elegida. Sus estados son:

Gráfica total permite observar en la pantalla de gráficos la evolución del proceso del control de temperatura de la zona de trabajo elegida, muestra la evolución de:

Set point.

Variable de proceso.

Salida PID.

Salida PID normalizada.

Acción Proporcional.

Acción integral

Acción Derivativa.

Gráfica corta permite observar en la pantalla de gráficos la evolución del proceso del control de temperatura de la zona de trabajo elegida, solo del set point y la variable del proceso

- *Ver variables* Ubicado en la esquina inferior izquierda junto al icono anterior, permite observar las temperaturas y los set point de la mismas de todas las zonas de trabajo.
- En la parte central se tiene una pantalla que gráfica las señales del proceso, en esta se puede observar como varía en el tiempo los siguientes parámetros:

Set point, muestra el valor en la gráfica al cual esta seteado el controlador digital

Variable del proceso muestra el valor en la gráfica de la temperatura del proceso de extrusión en la zona de trabajo elegida

Salida PID muestra el valor en la gráfica de la salida del controlador digital.

Salida PID normalizada muestra el valor en la gráfica de la salida normalizada del controlador digital, esto permite tener un rango apropiado de valores, los mismos que van a los actuadores de la zona de trabajo elegida.

Acción proporcional muestra el valor en la gráfica de la acción proporcional en el controlador digital de la zona de trabajo elegida.

Acción integral muestra el valor en la gráfica de la acción integral en el controlador digital en la zona de trabajo elegida.

Acción derivativa muestra el valor en la gráfica de la acción derivativa en el controlador digital de la zona de trabajo elegida.

Todo este conjunto de iconos y selectores arriba mencionado forman el VI *Controlador PID extrusora*. Para tener una idea de la extensión de este VI, se muestra una pantalla denominada *Show VI Heirarchy* que ilustra el concatenamiento de los sub Instrumentos virtuales con el VI principal.

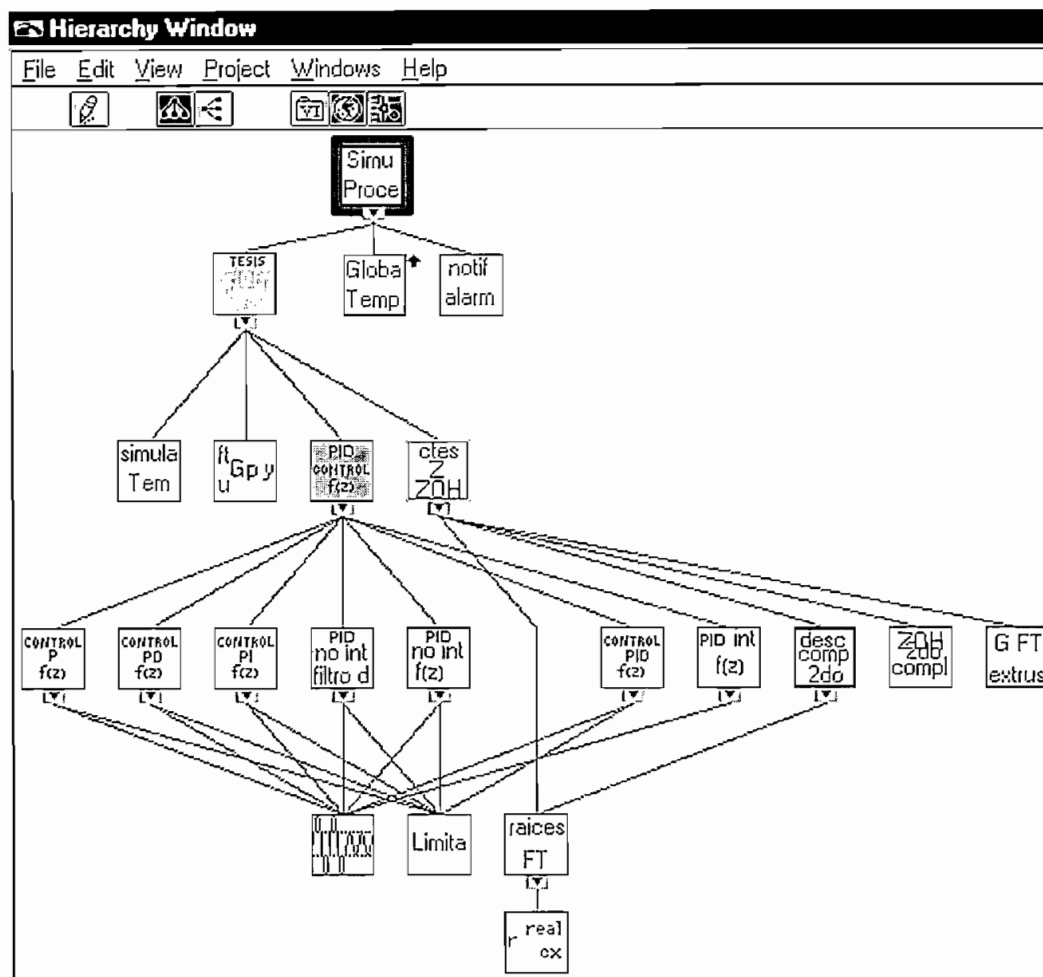


Figura 5.16 Arbol lógico del VI del controlador PID extrusora

5.3.2.2.6.- Eventos extrusión

Este VI muestra en una tabla los eventos y alarmas del proceso en tiempo real, lo que permite el normal desarrollo del proceso, sobre todo presta una gran ayuda al operador para evitar inconvenientes o paradas innecesarias del proceso de extrusión de pvc. Este VI es otra de las

bondades que brinda BridgeVIEW en la automatización de procesos industriales. La figura 5.19 muestra la pantalla de este VI.

Historial de ventos del proceso de extrusión de PVC							
Date	Time	Tag	Event	Value	Alarm State	Ack Status	Operator
08/22/1999	04:07:31 PM	AI TZ-4	ALARM	1.00	DISCRETE	UNACK	s males
08/22/1999	04:07:31 PM	AH TZ-4	ALARM	0.00	NORMAL	ACK	s males
08/22/1999	04:07:30 PM	AI TZ-3	ALARM	1.00	DISCRETE	UNACK	s males
08/22/1999	04:07:30 PM	AH TZ-3	ALARM	0.00	NORMAL	ACK	s males

Historicos Close Panel

Figura 5.19 Pantalla del VI alarmas y eventos.

La pantalla de historial de eventos tiene en la primera fila de la tabla los campos de las alarmas, así: fecha, hora, nombre del TAG, evento, valor, estado de alarma, estado de reconocimiento de alarma y el nombre del operador.

Para una mejor comprensión la tabla de eventos va marcando los mismos con colores que ayudan a distinguir el tipo de alarma o eventos, así, con color rojo son las alarmas no reconocidas, el color verde es para las alarmas reconocidas, el color azul es una normal evolución del proceso.

Este VI tiene un icono ubicado en la parte inferior que se lo denomina *Historicos*, el mismo que al ser ejecutado despliega un programa propio de Bridge VIEW (figura 5.20) que permite realizar un análisis de las variables definidas en el archivo de TAGS y observar su comportamiento en tiempo real, también se puede elegir la fecha que se requiera para analizar el proceso de extrusión de pvc,.

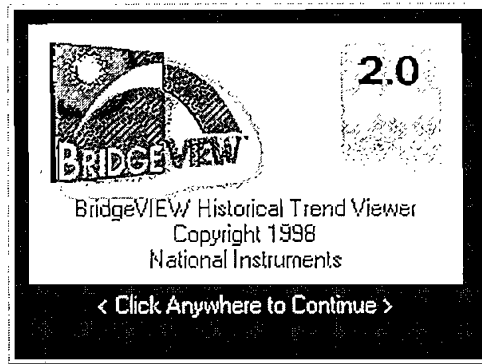


Figura 5.20 Pantalla del programa de históricos.

Con esta opción se puede cuantificar la evolución de la curva de temperaturas del proceso, el tiempo de paradas; si existió percances en el normal desarrollo del mismo; el operador que estuvo a cargo de funcionamiento de la máquina extrusora; con esto gran herramienta de Bridge VIEW permite manejar los procesos de manera mas científica y optimizar los recursos que dispone el proceso. La figura 5.21 muestra la pantalla para el análisis de los datos históricos.

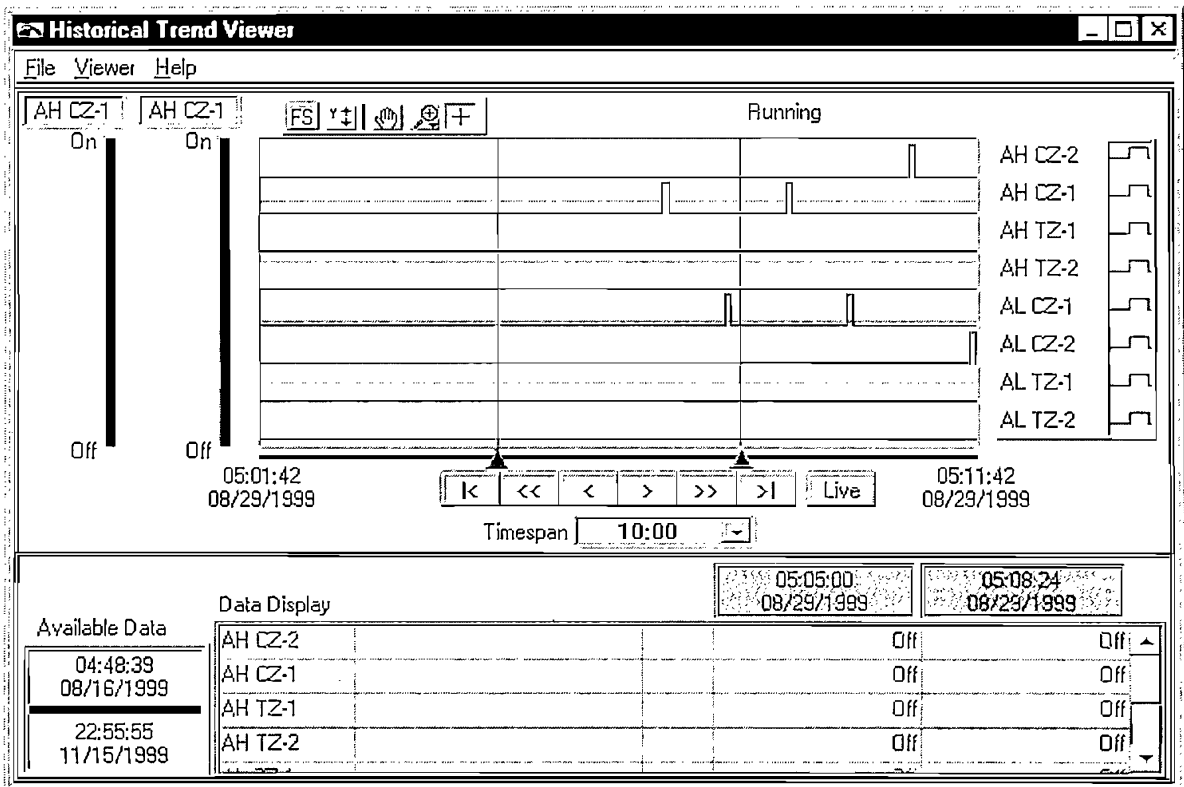


Figura 5.21 Pantalla del Históricos.

5.3.2.2.7.- Login

Este pulsador llama a una ventana que permite tener la seguridad para el programa, así se garantiza que sólo los usuarios autorizados pueden y deban realizar cambios a los parámetros del controlador digital de este software, la designación de usuarios y sus niveles de accesos la realiza quien este encargado de administrar el programa.

La figura muestra esta pantalla donde se ingresan al nombre del usuario y su clave de accesos.

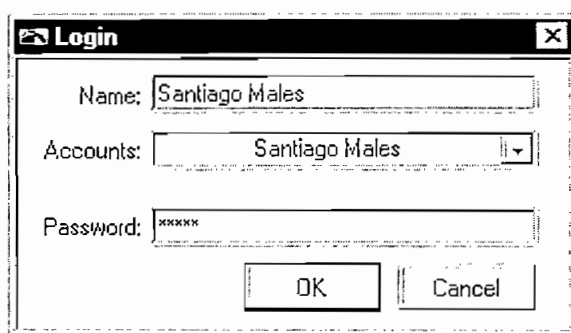


Figura 5.22 Login

Ayuda

Este icono permite llamar a la ayuda del programa en el modo *Proceso*

5.3.2.2.8.- Función en el tiempo

Este VI (figura 5.23) muestra la respuesta en el tiempo y la ubicación de los polos y ceros de las funciones de transferencia de la máquina extrusora del proceso de extrusión las mismas que fueron obtenidas en el capítulo 3, así también se puede observar la repuesta del sistema compensado mediante el controlador digital.

Este VI es solo para análisis del sistema de control, ya que se puede medir el máximo sobre pico porcentual, el tiempo de respuesta y el error de posición de la función de transferencia ante la acción de una función paso unitaria en lazo cerrado.

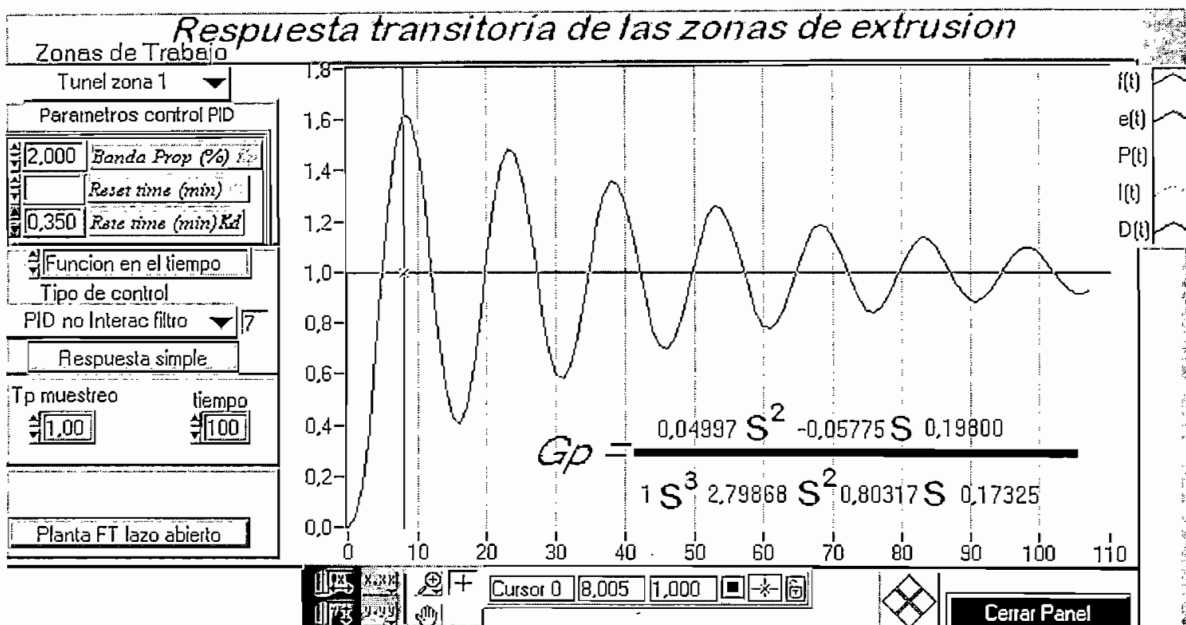


Figura. 5.23 Función en el tiempo.vi

A continuación se describe los componentes que integran este VI.

- **Zona de trabajo** Ubicado en la parte superior izquierda, permite elegir la zona de trabajo del proceso de extrusión ha simular.
- **Parámetros PID** Ubicado en la parte izquierda, permite setear los parámetros del controlador digital de la zona de trabajo.

En este mímico se ingresan los valores de k_p , k_i o **Reset time**, k_d o **Rate time**, con los que ha simular el controlador digital.

k_p es la ganancia proporcional del controlador digital.

k_i o **Reset time** es la constante de integración del controlador digital.

k_d o **Rate time** es la constante derivativa del controlador digital.

- **Función en el tiempo** Ubicado en la parte media izquierda, es un icono de dos estados; permite observar la respuesta del sistema en el tiempo y la ubicación de los polos y ceros del controlador digital en lazo cerrado en la zona de trabajo elegida. Sus estados son:

Función en el tiempo permite observar en la pantalla de gráficos la respuesta del sistema compensado por el controlador digital. Con esta opción se determinan las características del la zona de extrusión ante una entrada unitaria y se miden lazo cerrado el máximo sobre pico porcentual, el tiempo de establecimiento y el error de posición de la función de transferencia, tanto compensada o no compensada.

Polos y ceros ubicación permite observar en la pantalla de gráficos la ubicación de los polos y ceros de la función de transferencia de la zona de extrusión, tanto compensada o no. La figura 5.24 muestra la pantalla con esta opción.

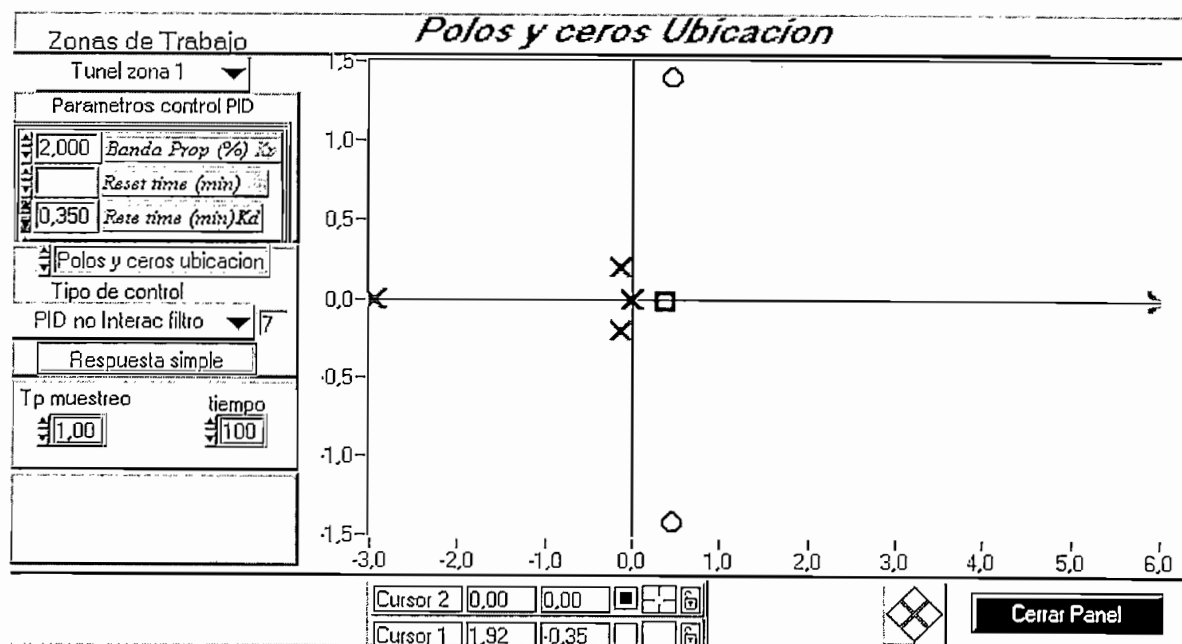


Figura. 5.24 Opción de polos y ceros

- *Tipo de control* Ubicado en la parte media izquierda, permite elegir el tipo de configuración del controlador digital en la zona de trabajo elegida.

Este selector tiene algunas configuraciones para el controlador digital, las mismas que son:

Proporcional P

Proporcional Integral PI

Proporcional Derivativo PD

Proporcional Integral Derivativo PID clásico

PID interactuante.

PID no interactuante.

PID no interactuante con componente derivativa filtrada

- *Periodo* setea el periodo de discretización con el cual va a trabajar el controlador digital en la zona de extrusión elegida
- *Tiempo* Este icono permite seleccionar el tiempo de simulación, el mismo esta mostrado en el eje las abscisas de la gráfica de respuesta en el tiempo.
- En el centro de la pantalla se tiene una gráfica donde van ha ir la respuesta en tiempo o la ubicación de polos y ceros de la función de transferencia y el controlador digital elegido.
- Cerrar Panel Ubicado en la parte inferior derecha, al ser ejecutado este icono permite salir del VI función en el tiempo.
- Se tiene además cursores que ayudan ha determinar la posición y el valor de la respuesta.

Todo este conjunto de iconos descritos conforman este VI.

Ayuda

Los iconos de ayuda tanto en proceso como en simulación muestran las indicaciones de uso de este software.

6.- ANALISIS ECONOMICO

6.1.- Evaluación financiera económica

La evaluación financiera económica comprende el estudio económico del proyecto para verificar la factibilidad y rentabilidad del controlador descrito en el capítulo anterior, en caso de ser implementado.

6.1.1.- Análisis de costos

El análisis de costos se desglosa en la tabla 6.1 y 6.2, donde cada alternativa corresponde a los costos por proveedor

Alternativa I

Componentes	Cantidad	Descripción		Valor unitario	Valor total
Lab PC-1200AI	1	Tarjeta de adquisición de datos.	US \$	655	655
SCXI-1000	1	Chasis de 4 slots para línea de productos SCXI	US \$	765	765
SCXI-1120	2	Módulo de acondicionamiento de señales analógicas.	US \$	1315	2630
SCXI-1161	2	Módulo de acondicionamiento de señales digitales	US \$	545	1090
SCXI-1328	2	Bloque terminal para módulos SCXI-1120	US \$	265	530
SCXI-1341	1	Accesorio cable plano de 1m y conector de 50 pines para conectar el SCXI a la tarjeta Lab PC-1200AI	US \$	105	105
SCXI-1360	2	Tapa frontal para los slots no utilizados	US \$	15	30

SCXI-1361	3	Tapa posterior para slots no usados del chasis	US \$	10	30
Bridge VIEW	1	Software para aplicación de pruebas, medida y control industrial. Licencia Run Time	US \$	995	995
		Sub total de materiales a importarse	US \$		6830
		impuesto IVA	US \$		683
		Transporte	US \$		683
PID	1	Software, desarrollado en Bridge VIEW, para el control de la máquina extrusora	US \$	100	100
PC	1	Computadora personal, con un procesador PENTIUM III, con un espacio en el disco de 10 GB y con 128 MG de memoria RAM	US \$	1200	1200
		Sub total en materiales a instalarse			9496
Varios		Instalación de los equipos 10% del total	US \$	0,10	949
		Total del proyecto	US \$		10445

Tabla 6.1 Alternativa I

Alternativa II

Componentes	Cant	Descripción		Valor unitario	Valor total
Lab PC-1200AI	1	Tarjeta de adquisición de datos.	US \$	655	655
Model 5B37	9	Módulos de acondicionamiento para señales de termocuplas	US \$	165	1485
Backplane 5B	2	Tablero backplane para serie 5B	US \$	250	500
Rack 5B	1	Accesorio de montaje para el blackpalne de la seri 5B	US \$	45	45

SSR-OAC5A	9	Módulos de réles de estado sólido.		15	135
Backplane SSR	2	Backplane para la serie SSR de 8 canales		125	125
Cable NB7	1	Cable plano de 26 hilos		30	30
SC-2057	1	Tablero auxiliar para conectar de la tarjeta Lab-PC-1200AI con el backplane de la serie 5B y con la serie SSR		145	145
Rack de montaje	1	Caja para montar los backplane y el tablero auxiliar de conexión.		165	165
Bridge VIEW	1	Software para aplicación de pruebas, medida y control industrial.Licencia Run Time	US \$	995	995
		Sub total de materiales a importarse	US \$		4280
		impuesto IVA	US \$		428
		Transporte	US \$		428
PID	1	Software, desarrollado en Bridge VIEW, para el control de la máquina extrusora	US \$	100	100
PC	1	Computadora personal, con un procesador PENTIUM II, con un espacio en el disco de 6.4 GB y con 64 MG de memoria RAM	US \$	1200	1200
		Sub total en materiales a instalarse			6436
Varios		Instalación de los equipos 10% del total	US \$	0,10	643
		Total del proyecto	US \$		7079

Tabla 6.2 Alternativa II

La inversión inicial en este tipo de controladores es muy alta, pero su eficiencia logra reducir otros rubros por ejemplo:

Denominación			Rublo
Mantenimiento	Costo por hora	US \$	4
scrap causado por el controlador de temperatura actual	Cada Kg. US \$ 3,5	US \$	35
Paradas por fallas del controlador de temperatura actual	15 kg. de scrap	US \$	52,5
Varios		US \$	5
Sub total de pérdidas por parada de producción		US \$	96,5
Paradas aproximadas por cambio de producción	30	US \$	2895
Total de pérdidas anuales		US \$	2895

Tabla 6.3 Pérdidas económicas del proceso de extrusión actual

Revisando las alternativas de materiales para la implementación del controlador digital en la tabla 6.1 y 6.2, y relacionando con los costos de la tabla 6.3 se puede afirmar que la inversión inicial se va a recuperar en poco tiempo

Alternativa I

$$\text{Tiempos de recuperar la inversión} = \frac{\text{Costo inicial}}{\text{Total pérdidas}} = \frac{10445}{2895} = 3,6 \text{ años}$$

Alternativa II

$$\text{Tiempos de recuperar la inversión} = \frac{\text{Costo inicial}}{\text{Total pérdidas}} = \frac{7079}{2895} = 2,4 \text{ años}$$

La alternativa I presenta un sistema modular el mismo que puede con el tiempo expandirse hasta llegar a las 32 entradas analógicas, esto va a permitir expandir el control digital a otras máquinas de la planta industrial, lo cual no va a requerir de inversiones onerosas (la expansión del control), por lo que esta tesis recomienda la implementación del controlador digital mediante la alternativa de materiales I.

Para tener una relación de valores en moneda nacional se realiza la conversión de costos, así:

El dólar americano hoy día 20 de octubre se cotiza a S/. 17.5000,00, lo cual da

Total del proyecto en dólares	US \$	10445
Cotización del dólar	S/.	17500
Total del proyecto en sucres	S/.	186'787.500.00

Tabla 6.4 Costos de la inversión en sucres

El controlador digital desarrollado en esta tesis tiene la facilidad de adaptarse a cualquier proceso de control, ya que para su implementación se partió de criterio generales de la teoría de control.

Por lo que su adaptación a otros procesos es más sencilla, simplemente para la simulación de otros procesos se requiere la función de transferencia del proceso y así de esta forma realizar el análisis mediante esta tesis.

Por esta razón se deja abierto este trabajo, para la experimentación del controlador digital en otros procesos de control que lo requieran.

VII.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Subindice

7.1	Resultados	Pagina 139
7.2	Conclusiones	157

7.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES

7.1- RESULTADOS

Para evaluar los resultados de este trabajo se procede a realizar una comparación de datos obtenidos usando la respuesta a una entrada paso, mediante la ayuda del programa de control CC, y el controlador desarrollado en este trabajo, para lo cual se obtuvieron los siguientes resultados.

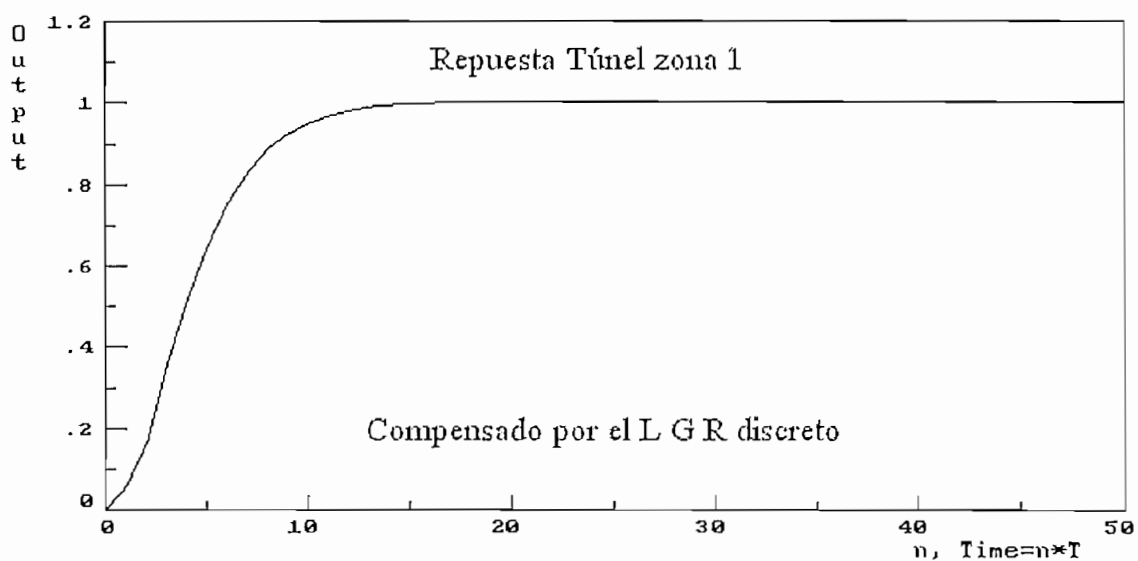


Figura 7.1.a Respuesta discreta del túnel zona 1 compensado por PID, simulado en el CC

Respuesta en el tiempo de las zonas de extrusión

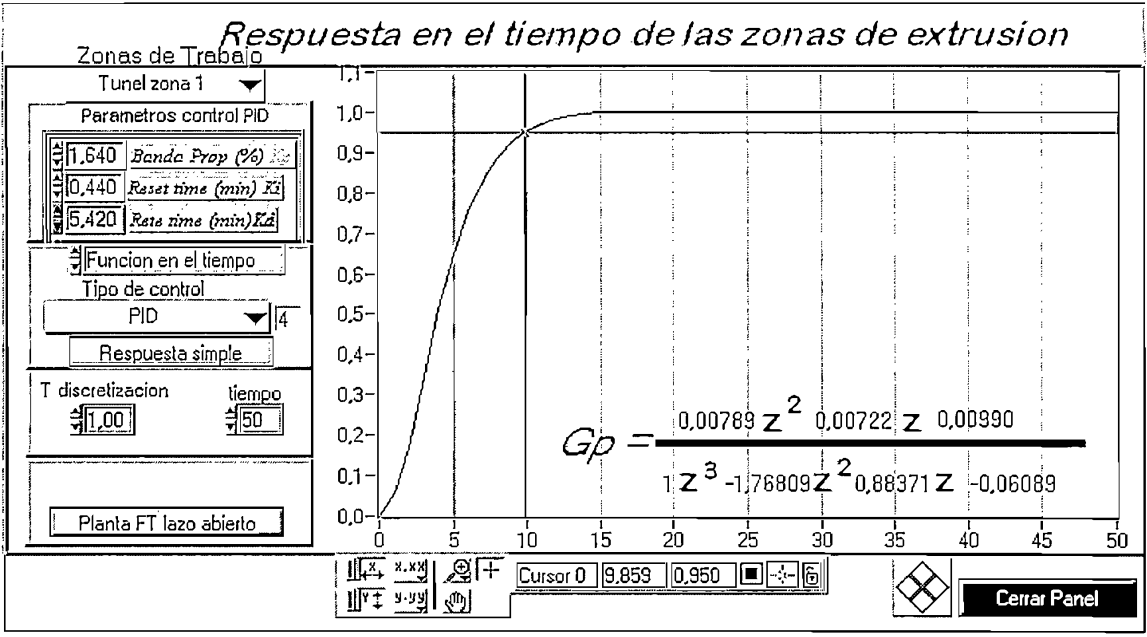


Figura 7.1.b Respuesta discreta del túnel zona 1 compensado por PID, simulado en el software del controlador digital

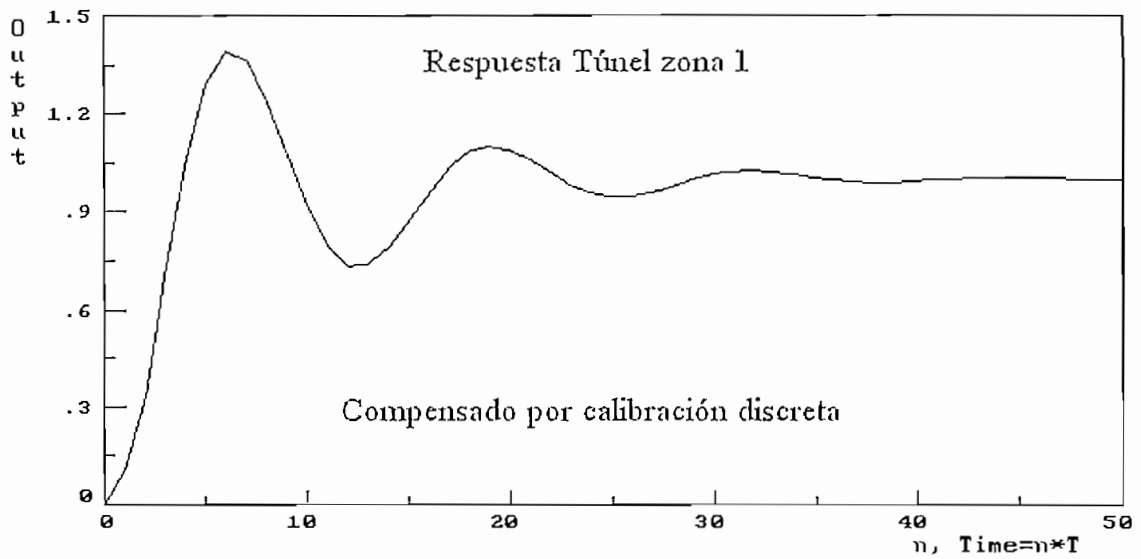


Figura 7.1.c Respuesta discreta del túnel zona 1 compensado por PID, simulado en el CC

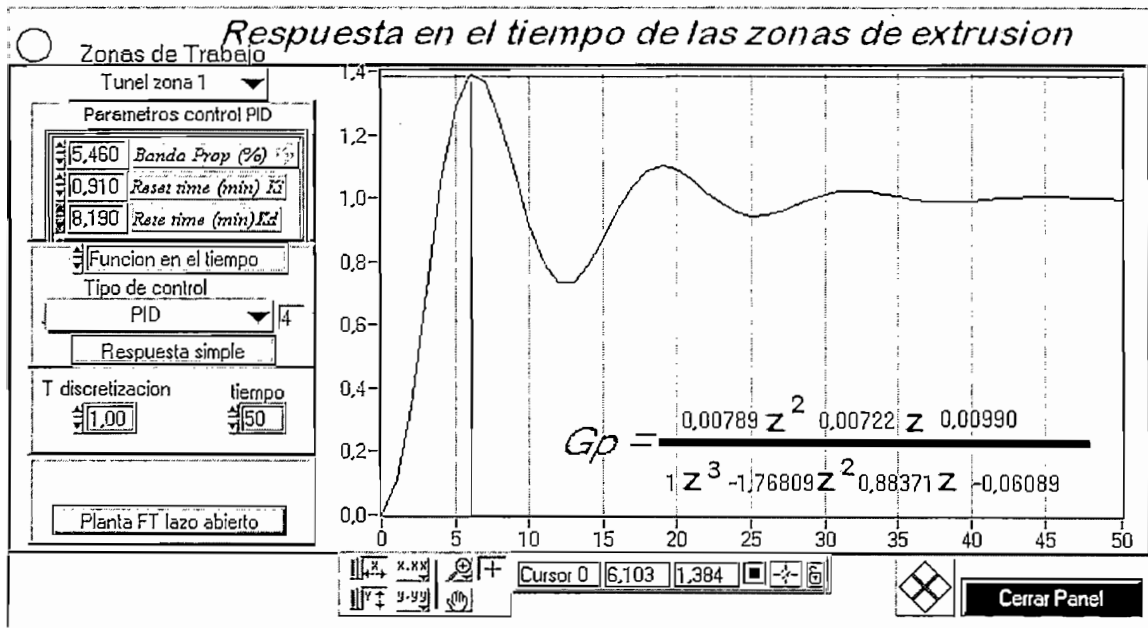


Figura 7.1.d Respuesta discreta del túnel zona 1 compensado por PID, simulado en el software del controlador digital

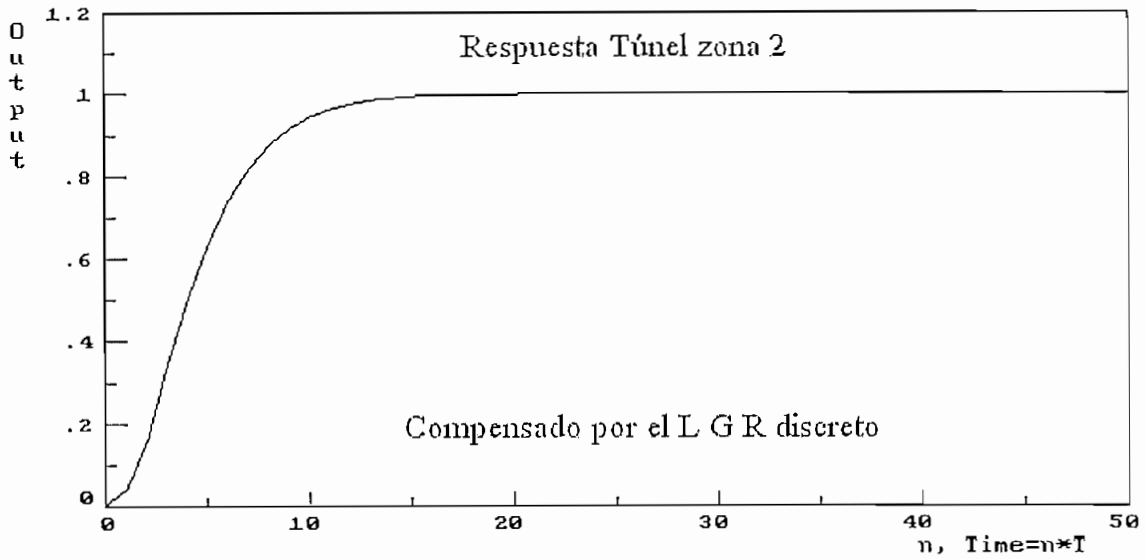


Figura 7.2.a Respuesta discreta del túnel zona 2 compensado por PID, simulado en el CC

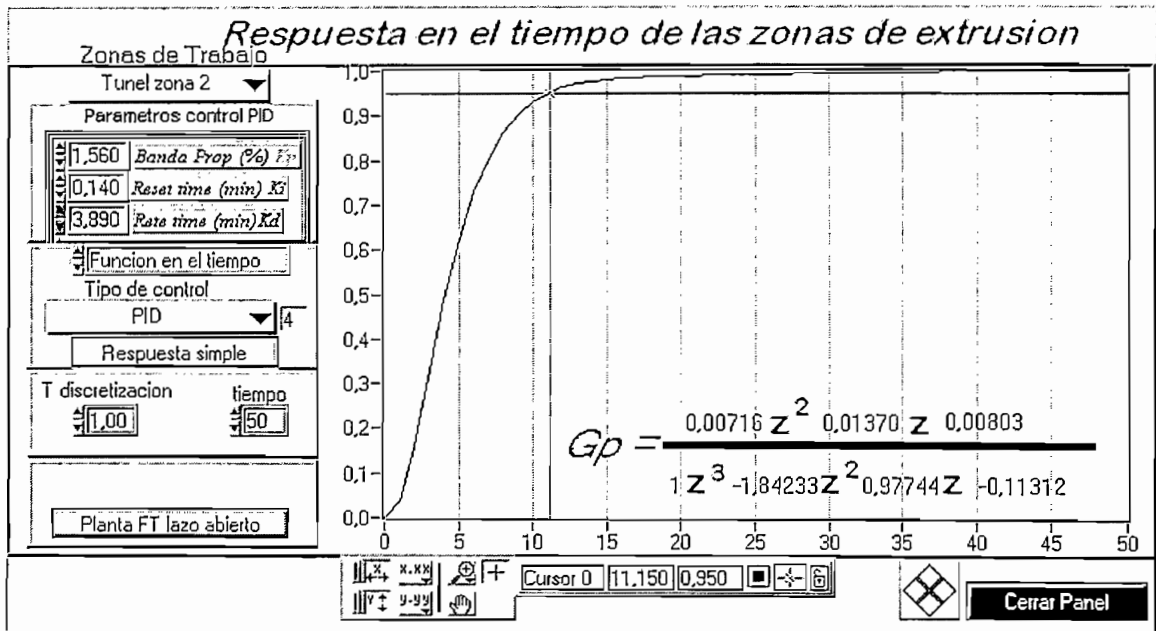


Figura 7.2.b Respuesta discreta del túnel zona 2 compensado por PID, simulado en el software del controlador digital

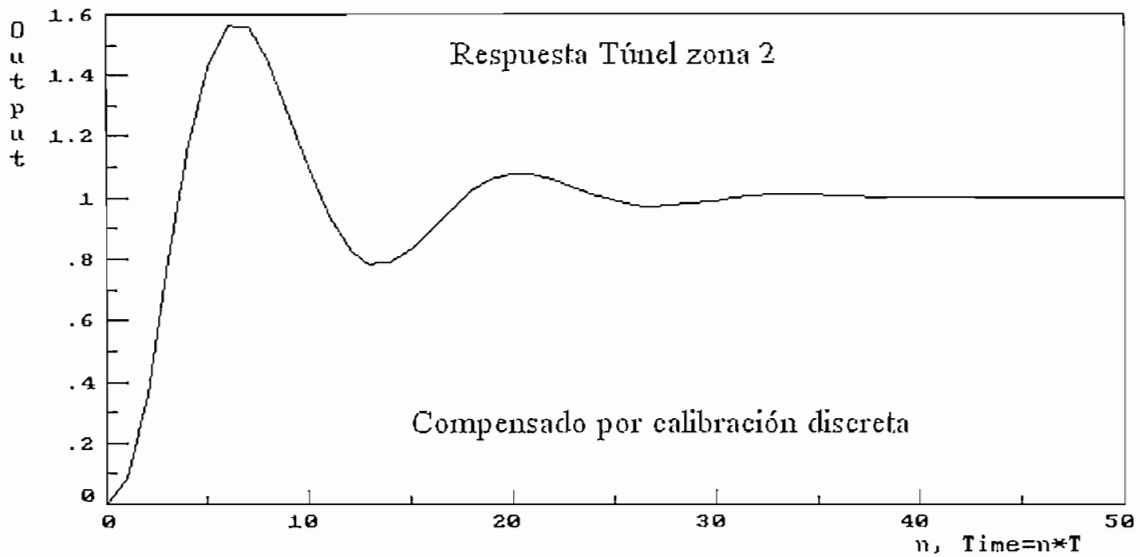


Figura 7.2.c Respuesta discreta del túnel zona 2 compensado por PID, simulado en el CC

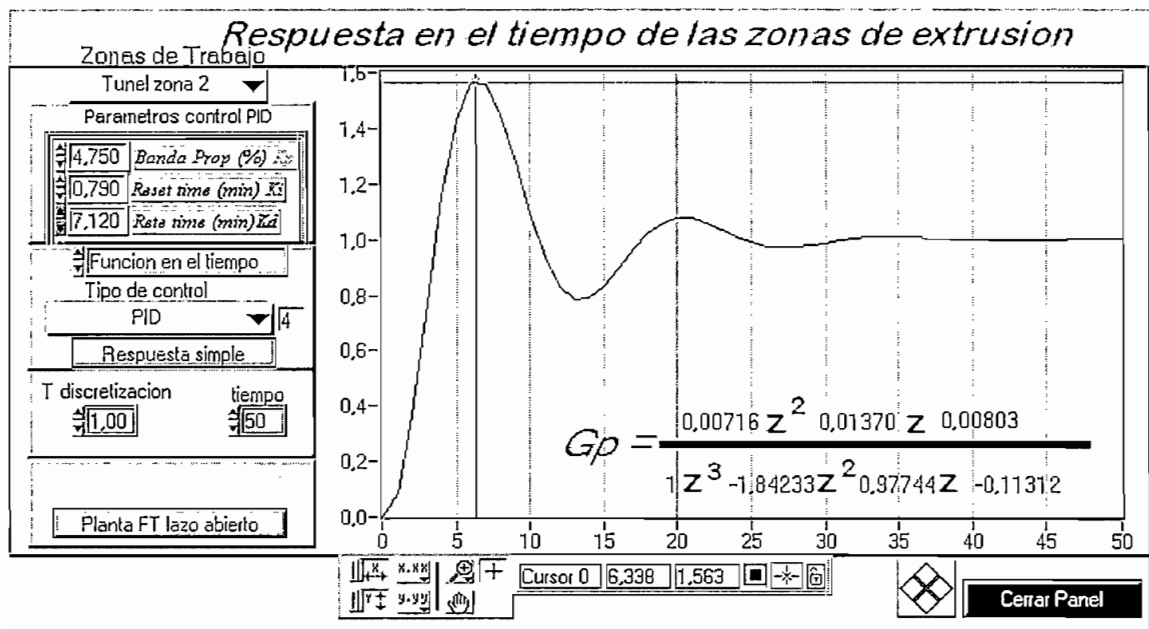


Figura 7.2.d Respuesta discreta del túnel zona 2 compensado por PID, simulado en el software del controlador digital

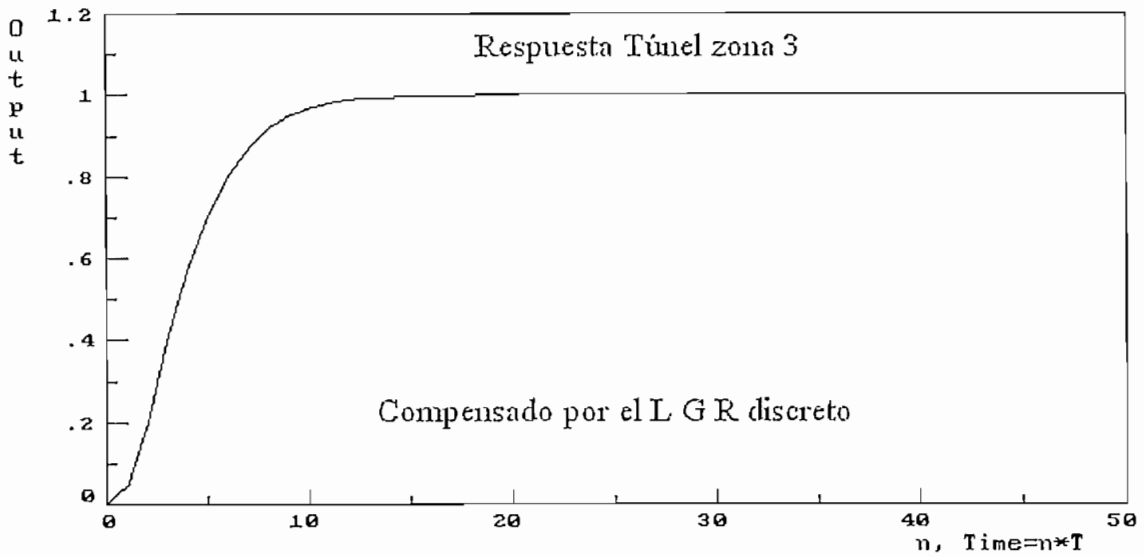


Figura 7.3.a Respuesta discreta del túnel zona 3 compensado por PID, simulado en el CC

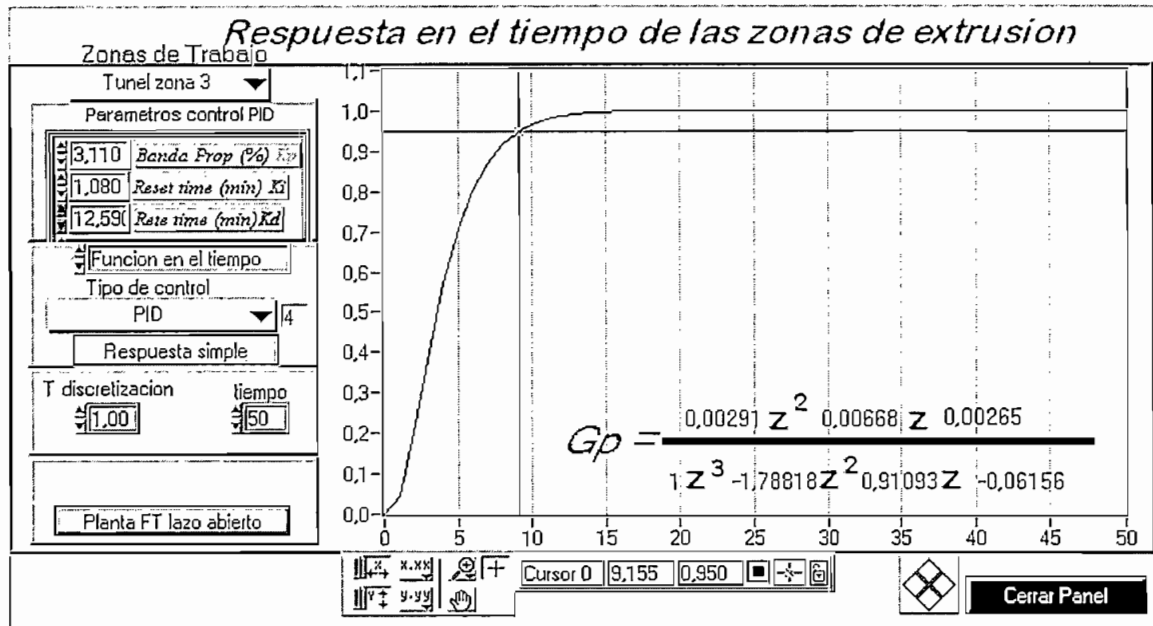


Figura 7.3.b Respuesta discreta del túnel zona 3 compensado por PID, simulado en el software del controlador digital

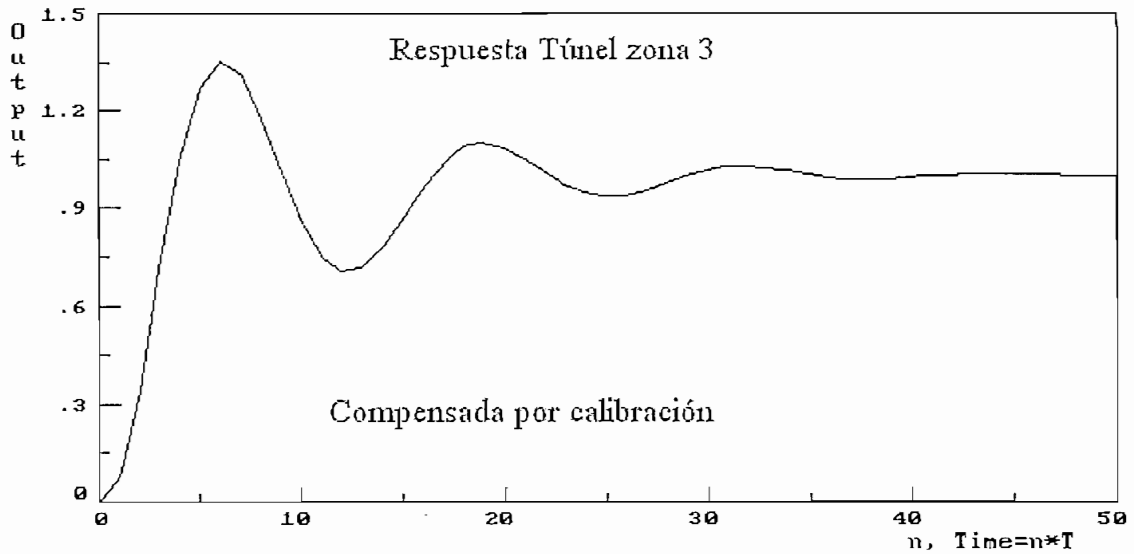


Figura 7.3.c Respuesta discreta del túnel zona 3 compensado por PID, simulado en el CC

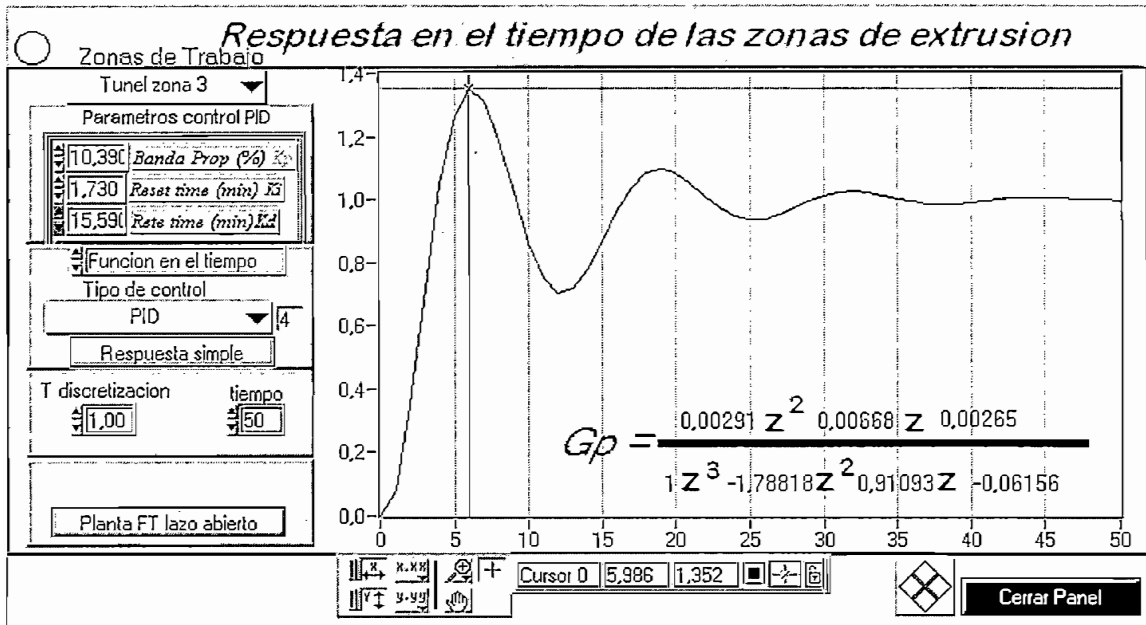


Figura 7.3.d Respuesta discreta del túnel zona 3 compensado por PID, simulado en el software del controlador digital

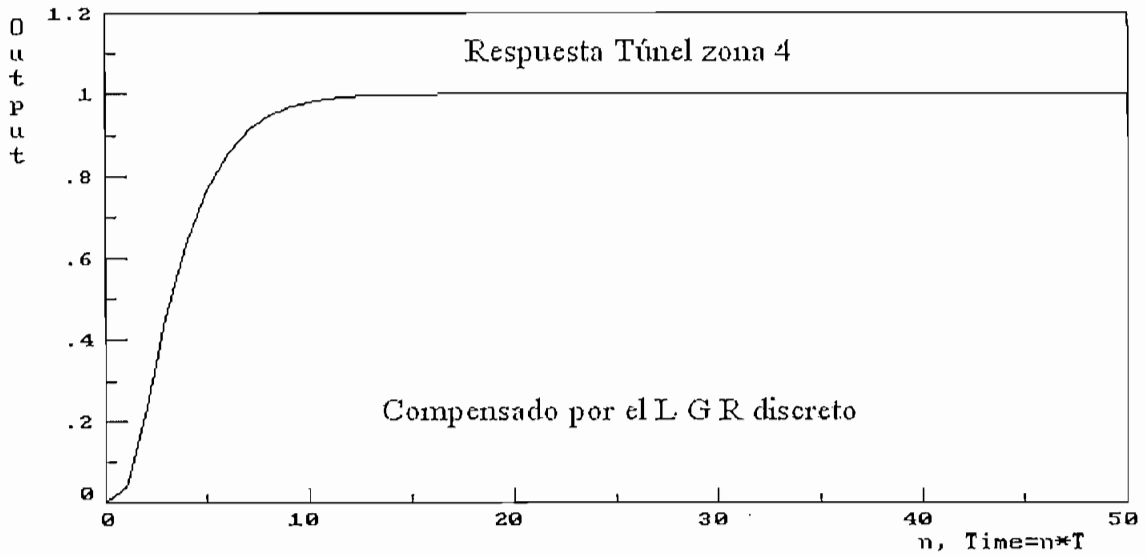


Figura 7.4.a Respuesta discreta del túnel zona 4 compensado por PID, simulado en el CC

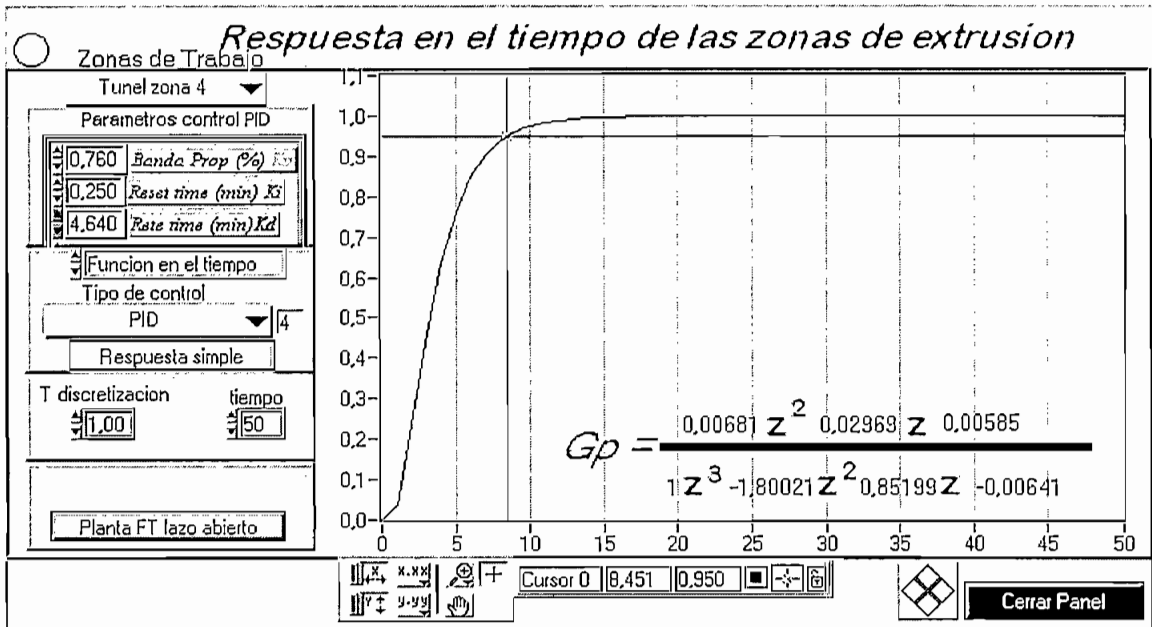


Figura 7.4.b Respuesta discreta del túnel zona 4 compensado por PID, simulado en el software del controlador digital

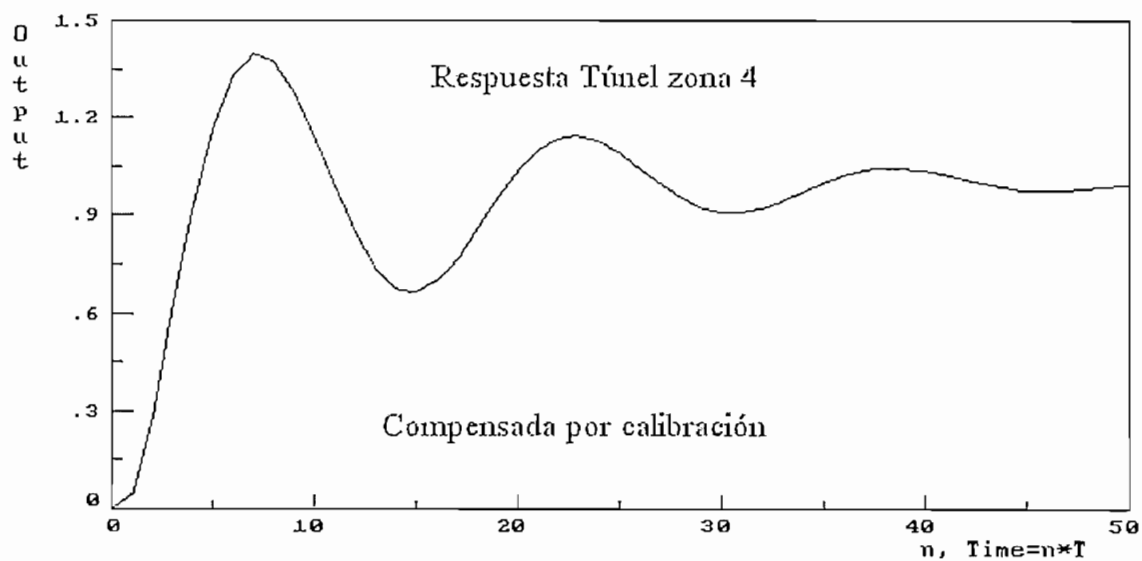


Figura 7.4.c Respuesta discreta del túnel zona 4 compensado por PID, simulado en el CC

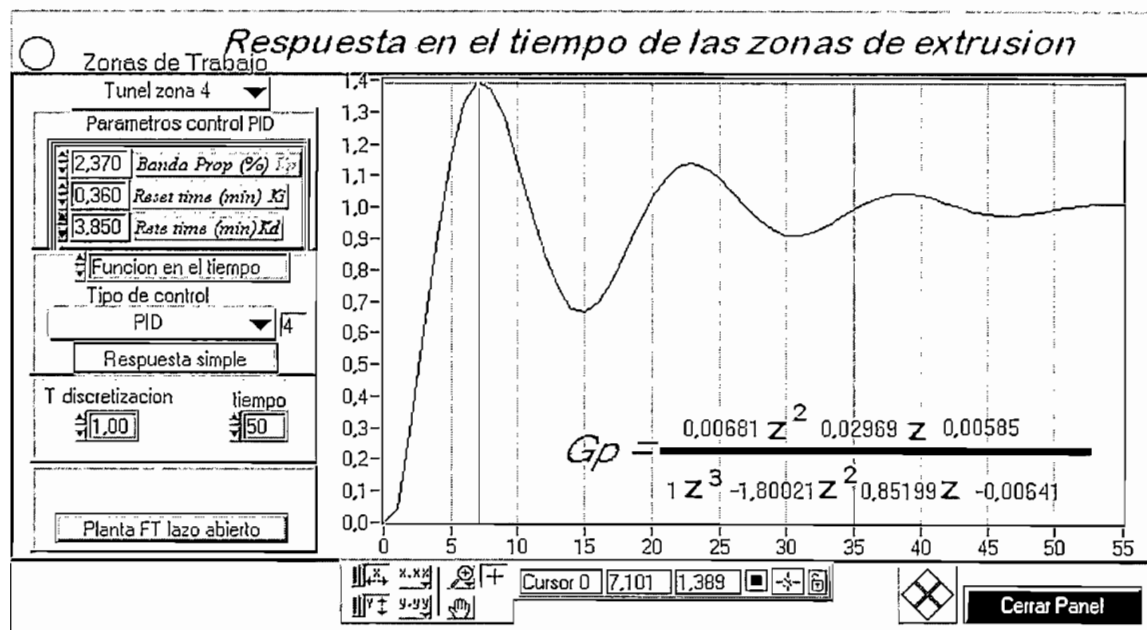


Figura 7.4.d Respuesta discreta del túnel zona 4 compensado por PID, simulado en el software del controlador digital

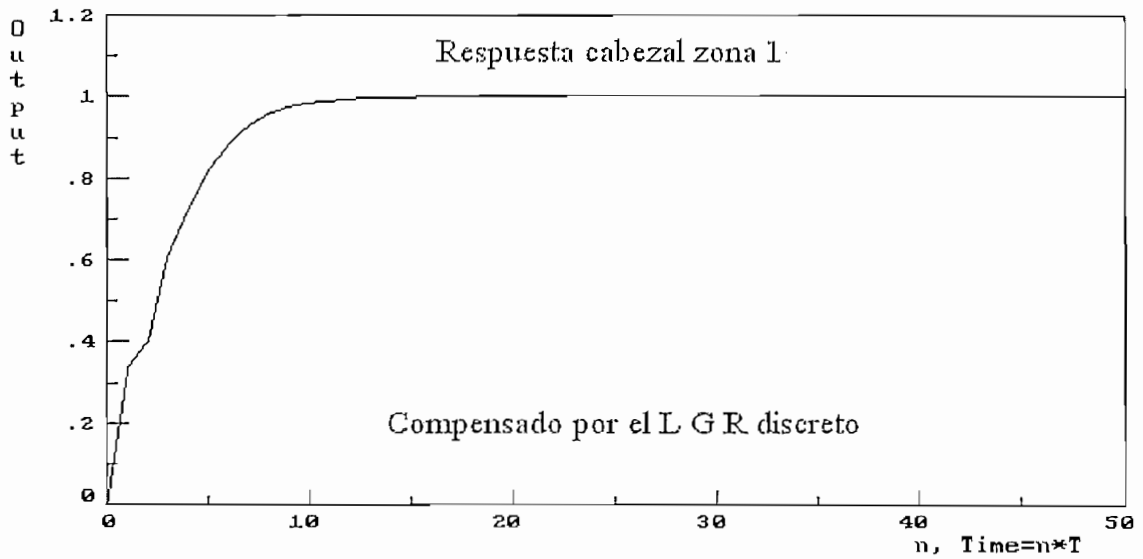


Figura 7.5.a Respuesta discreta del cabezal zona 1 compensado por PID, simulado en el CC

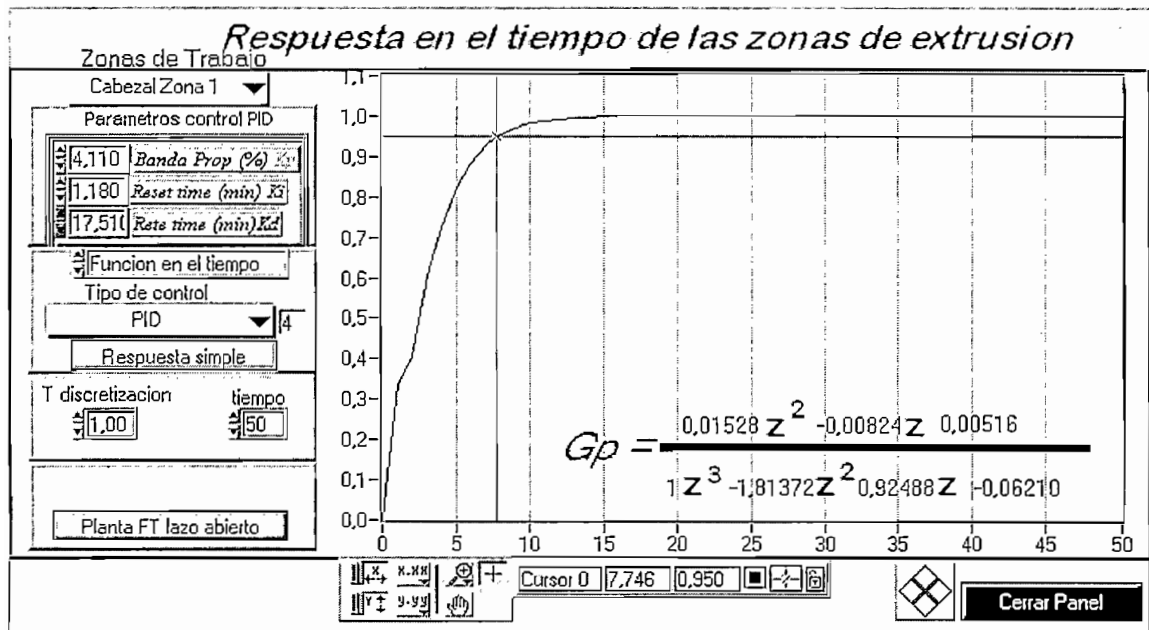


Figura 7.5.b Respuesta discreta del cabezal zona 1 compensado por PID, simulado en el software del controlador digital

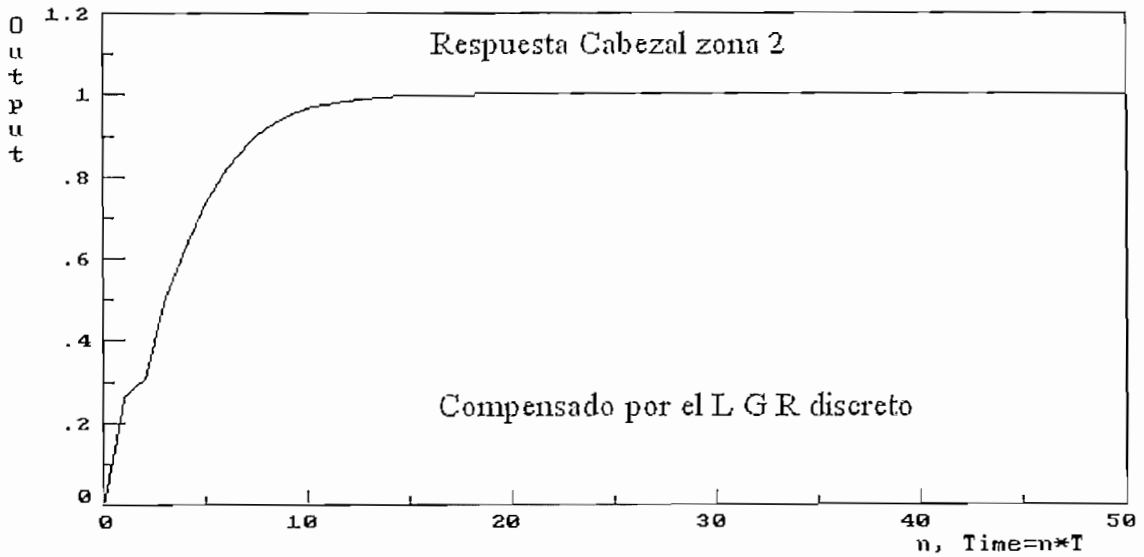


Figura 7.6.a Respuesta discreta del cabezal zona 2 compensado por PID, simulado en el CC

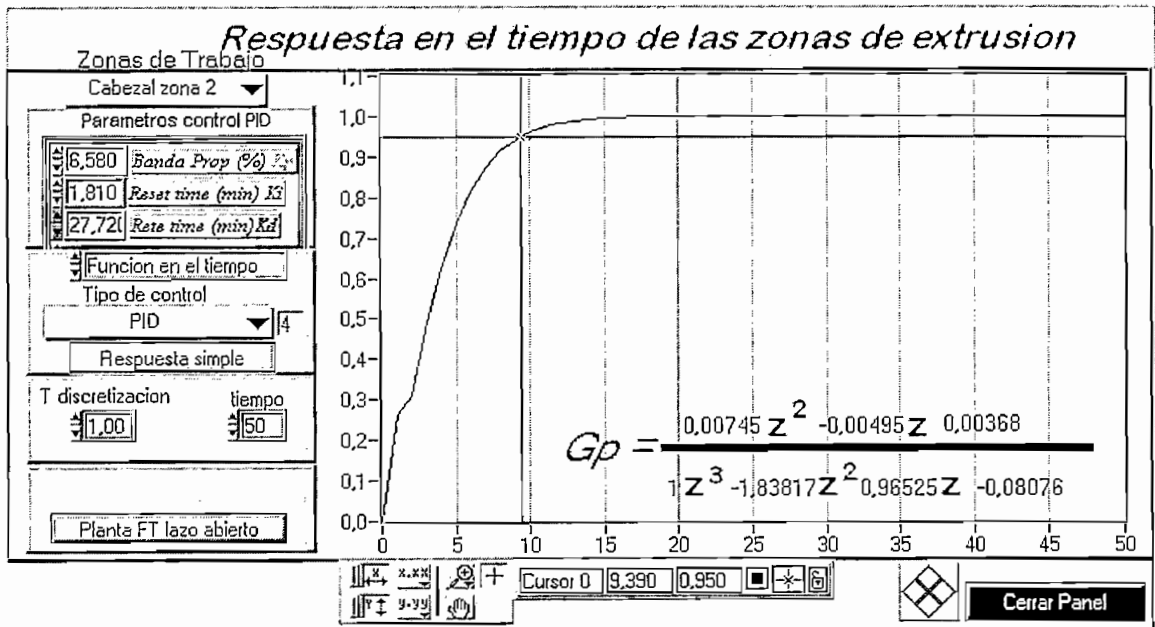


Figura 7.6.b Respuesta discreta del cabezal zona 2 compensado por PID, simulado en el software del controlador digital

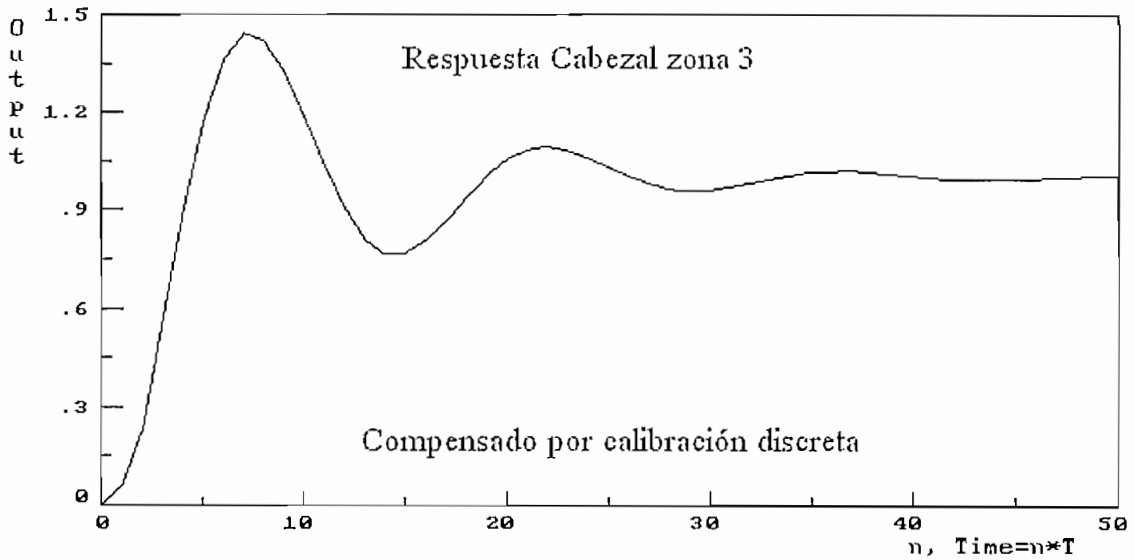


Figura 7.7.c Respuesta discreta del cabezal zona 3 compensado por PID, simulado en el CC

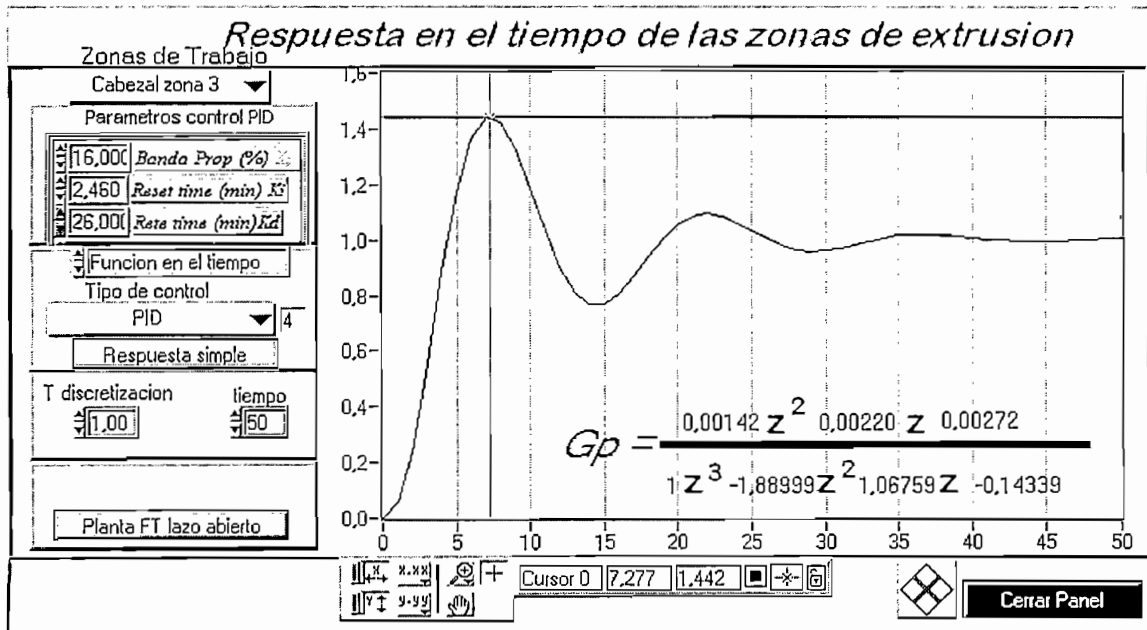


Figura 7.7.d Respuesta discreta del cabezal zona 3 compensado por PID, simulado en el software del controlador digital

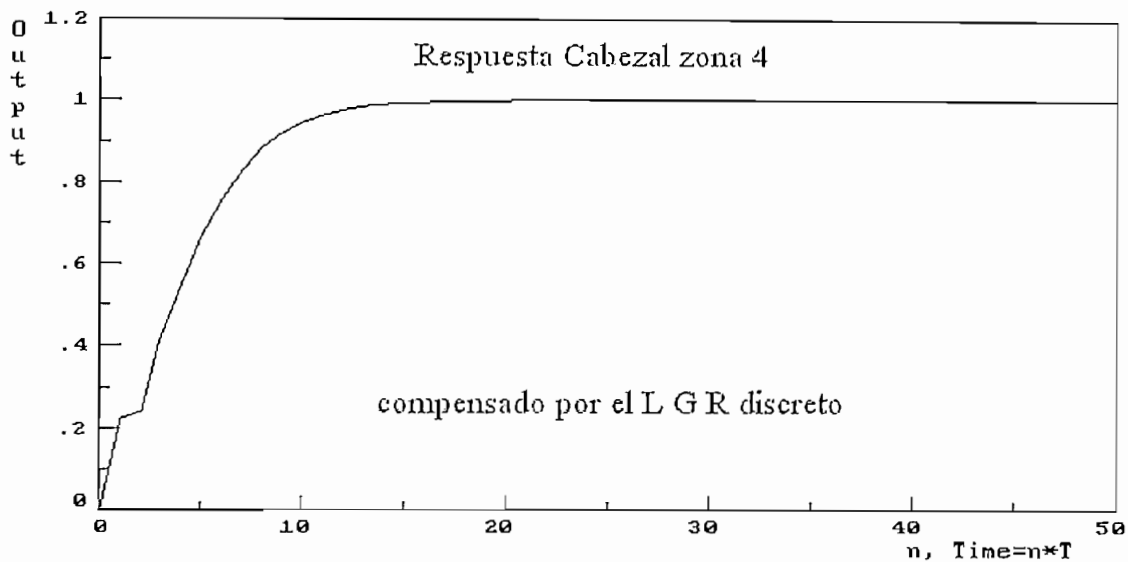


Figura 7.8.a Respuesta discreta del cabezal zona 4 compensado por PID, simulado en el CC

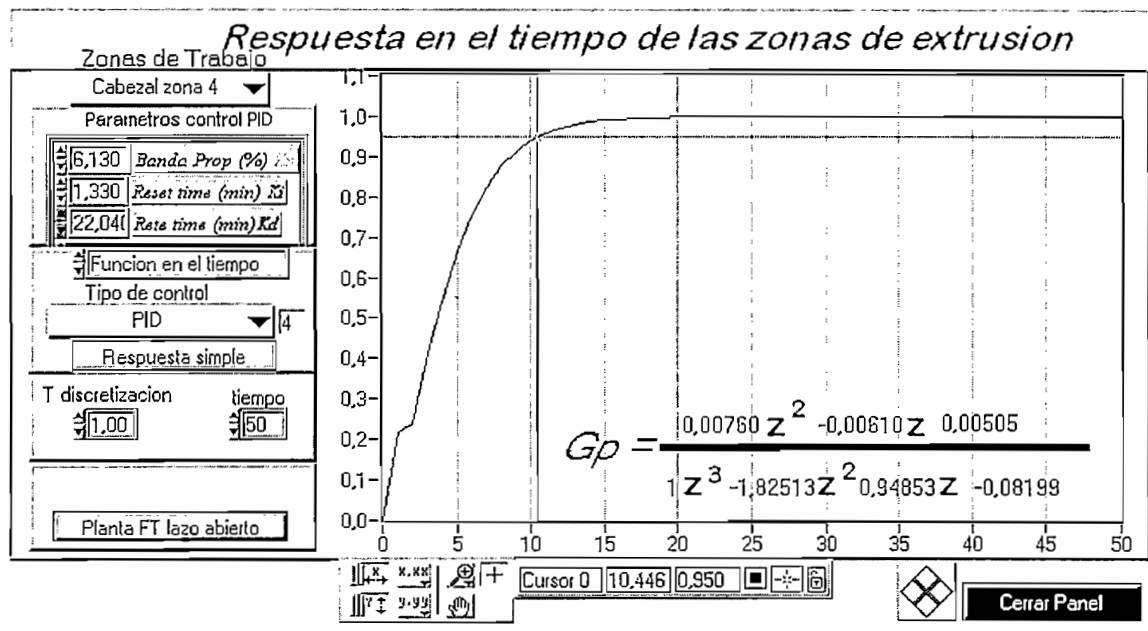


Figura 7.8.b Respuesta discreta del cabezal zona 4 compensado por PID, simulado en el software del controlador digital

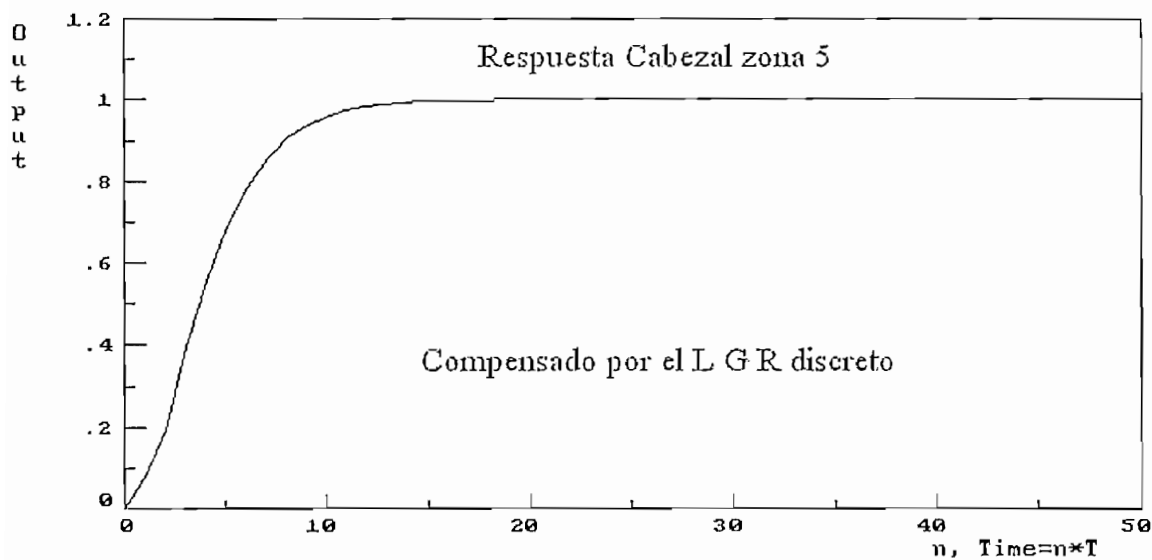


Figura 7.9.a Respuesta discreta del cabezal zona 5 compensado por PID, simulado en el CC

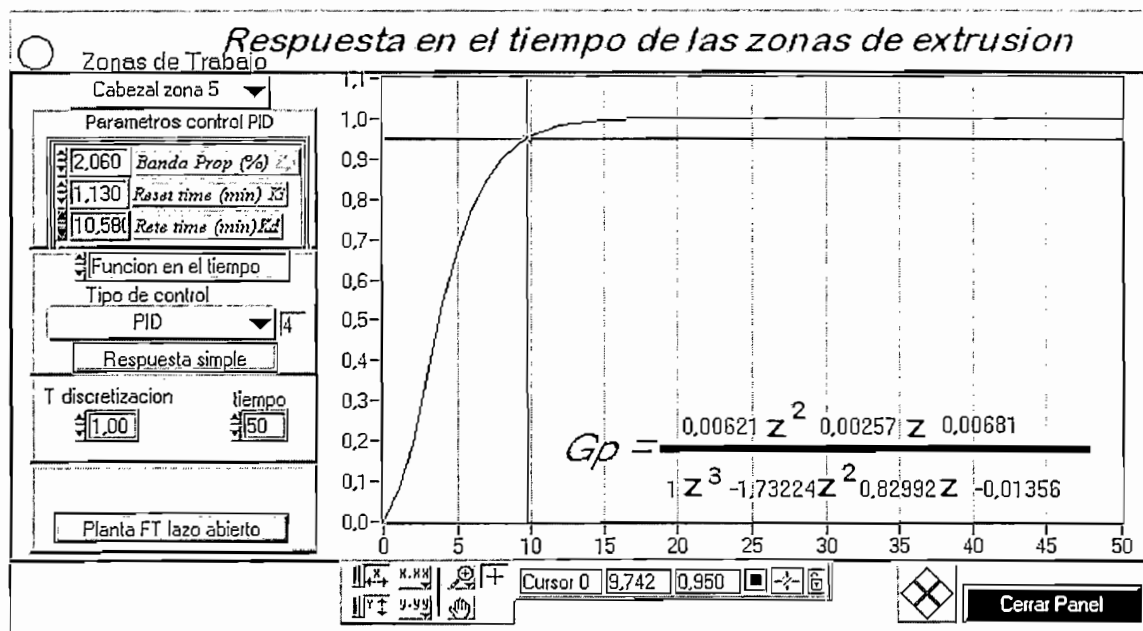


Figura 7.9.b Respuesta discreta del cabezal zona 5 compensado por PID, simulado en el software del controlador digital

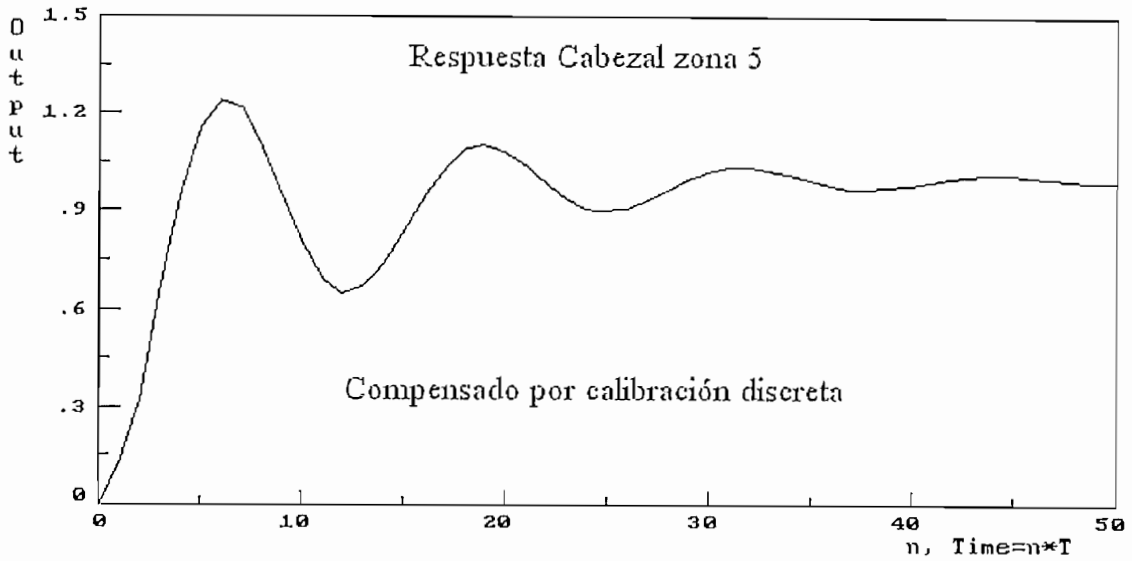


Figura 7.9.c Respuesta discreta del cabezal zona 5 compensado por PID, simulado en el CC

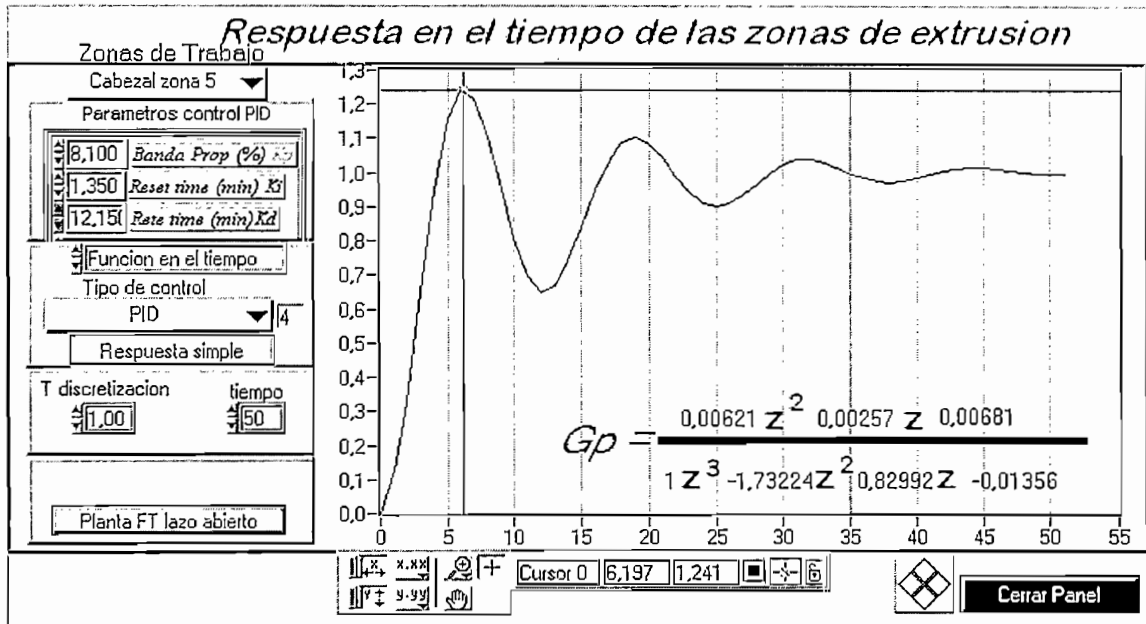


Figura 7.9.d Respuesta discreta del cabezal zona 5 compensado por PID, simulado en el software del controlador digital

Se puede observar en las figura anteriores que la respuesta en estado transitorio y en estado estable tiene las mismas características para el controlador digital como para el programa CC. Por lo cual se concluye que el programa del controlador digital propuesto trabaja a satisfacción.

La compensación de las funciones de transferencia encontradas en el capítulo 3 se las realizó mediante el método del lugar geométrico de las raices y el método de calibración de Ziegler

Nichols tanto para la forma continua como para la forma discreta, encontrándose con las siguientes características:

Zona extrusora	Compensación	kp	ki	kd	Mp (%)	ts (min)	Ep
T Z 1	LGR (s)	12,43	0,86	12,43	0	5,78	0
	LGR (z)	1,64	0,44	5,42	0	10,18	0
	Ganancia crit. (s)	9,22	1,94	10,95	42,6	24,36	0
	Ganancia crit. (z)	5,46	0,91	8,19	38,72	26,72	0
T Z 2	LGR (s)	3,06	0,27	8,9	0	6,27	0
	LGR (z)	1,56	0,14	3,89	0	10,37	0
	Ganancia crit. (s)	8,04	1,73	9,32	52,18	20,07	0
	Ganancia crit. (z)	4,75	0,79	7,12	55,8	22,3	0
T Z 3	LGR (s)	7,93	2,36	31,17	0	4,74	0
	LGR (z)	3,11	1,08	12,59	0	9,07	0
	Ganancia crit. (s)	31,82	7,07	35,8	40,98	23,79	0
	Ganancia crit. (z)	10,39	1,73	15,59	35,34	26,85	0
T Z 4	LGR (s)	2,53	0,72	14,37	0	3,14	0
	LGR (z)	0,76	0,25	4,64	0	8,24	0
	Ganancia crit. (s)	4,64	0,92	5,8	45,49	32,65	0
	Ganancia crit. (z)	2,37	0,36	3,85	39,85	33,24	0
C Z 1	LGR (s)	10,44	2,63	43,77	0	4,92	0
	LGR (z)	4,11	1,18	17,51	0	7,68	0
C Z 2	LGR (s)	14,61	3,56	61,07	0	6,03	0
	LGR (z)	6,58	1,81	27,72	0	9,26	0
C Z 3	LGR (s)	9,8	1,59	32,3	0	7,63	0
	LGR (z)	5,25	0,92	16,11	0	11,94	0
	Ganancia crit. (s)	24,1	4,38	33,01	41,54	22,31	0
	Ganancia crit. (z)	16	2,46	26	43,8	24,25	0
C Z 4	LGR (s)	12,34	2,43	45,92	0	6,83	0
	LGR (z)	6,13	1,33	22,04	0	10,37	0
C Z 5	LGR (s)	5,661	2,45	25,5	0	5	0
	LGR (z)	2,06	1,13	10,58	0	9,72	0
	Ganancia crit. (s)	14,49	3,05	17,2	32,52	24,16	0
	Ganancia crit. (z)	8,1	1,35	12,15	24,06	27,5	0

Tabla 7.1. Resumen de la respuesta del sistema compensado

- De los datos mostrados en la tabla 7.1, se ve que la compensación por el lugar geométrico de las raíces da a todas las zonas del extrusor una respuesta sobreamortiguada, esto e debe a que se eligió una ganancia en el LGR cuando el coeficiente de amortiguamiento ξ tenía un valor igual a uno, se puede elegir otro valor de ganancia en el LGR pero la respuesta va ha cambiar, el coeficiente de amortiguamiento ξ igual a uno ayuda a este tipo de procesos térmicos, ya que por su naturaleza estos procesos son lentos, por lo que al tener respuestas subamortiguadas se puede perder el control de estos procesos.

- Mediante la compensación de las funciones de transferencia se puede tener referencia de las constantes del controlador digital, para así optimizar la compensación mediante las otras configuraciones del controlador digital; esto se puede realizar ya que se puede ir variando los parámetros del controlador y ver la mejor respuesta del sistema compensado.
- En las zonas del cabezal 1,2 y 4 no fue posible realizar la compensación mediante el método de calibración, ya que según sus funciones de transferencia se trata de sistemas con ganancia infinita, pero se compensa mediante el lugar geométrico de las raíces, obteniéndose datos apropiados para dichas zonas.
- La compensación en tiempo continuo permite realizar la misma en el sistema mediante con el controlador actual, conocer de antemano su respuesta, pero lo importante es tener una referencia para el rango de las constantes del controlador en el cual va a trabajar en forma adecuada

A continuación se presenta una tabla resumen con las diferentes configuraciones y sus repuestas.

Zona extrusora	Compensador	kp	ki	kd	Mp (%)	ts (min)	Ep
T Z 1	PID	1,64	0,44	5,42	0	10,18	0
	PID interactuante	1,7	3,5	5,42	0	29,34	0
	PID no int.	2,5	7,3	8,7	0	12,91	0
	PID no int. Der fil	2,1	6,3	3,4	0	11,65	0
T Z 2	PID	1,56	0,14	3,89	0	10,37	0
	PID interactuante	2,1	6,4	3,9	0	13,43	0
	PID no int.	3,1	21,3	8,8	0	9,5	0
	PID no int. Der fil	4,75	0,79	7,12	55,8	22,3	0
T Z 3	PID	3,11	1,08	12,59	0	9,07	0
	PID interactuante	5,2	3,8	6,3	0	28	0
	PID no int.	1,5	2,9	9,6	0	16,9	0
	PID no int. Der fil	1,25	2,4	7	0	17,1	0
T Z 4	PID	0,76	0,25	4,64	0	8,24	0
	PID interactuante	1	3,8	6	0	30	0
	PID no int.	1,7	8,9	7	0	10,07	0
	PID no int. Der fil	1,1	7,3	4,9	0	13,38	0
					0		
C Z 1	PID	4,11	1,18	17,51	0	7,68	0
	PID interactuante	7,1	1,6	5,1	0	16,7	0
	PID no int.	4,1	6,6	18	0	13,6	
	PID no int. Der fil	6,3	8,4	3,7	0	10,8	
C Z 2	PID	6,58	1,81	27,72	0	9,26	0
	PID interactuante	12	3	5,3	0	20,4	
	PID no int.	2,4	3,2	15,3	0	18,7	
	PID no int. Der fil	5,3	5,4	3,8	0	16,43	0
C Z 3	PID	5,25	0,92	16,11	0	11,94	0
	PID interactuante	2,5	3,6	4,2	0	25,6	0

	PID no int.	3	5,7	10,2	0	18,78	0
	PID no int. Der fil	5,8	8,8	3,8	0	16,43	0
C Z 4	PID	6,13	1,33	22,04	0	10,37	0
	PID interactuante	13	6,6	5,2	0	25,6	
	PID no int.	7,5	7,7	26,1	0	12,32	0
	PID no int. Der fil	13,9	11,2	3,2	0	9,4	
C Z 5	PID	2,06	1,13	10,58	0	9,72	0
	PID interactuante	5,3	4,1	6,3	0	30,75	0
	PID no int.	4	4,2	16,3	0	9,39	0
	PID no int. Der fil	3,5	3,9	4,5	0	10,4	0

Tabla 7.2. Resumen de la respuesta del sistema y sus configuraciones

- Los tiempos de establecimientos se los obtiene mediante la prueba y error de cada configuración, con la ayuda de la opción *Respuesta de proceso* en el modo *Simulación*
- El algoritmo PID posicional, da la mejor respuesta a las variaciones del set point, para el proceso de extrusión de pvc.
- Para esta tesis las otras configuraciones no funcionan adecuadamente debido a la característica de las funciones de transferencia del proceso de extrusión, pero se deja abierta la posibilidad de implementar este controlador digital con las otras configuraciones a otros procesos.
- La compensación en tiempo discreto permite conocer el rango que deben tener las constantes del controlador digital para de esta forma optimizar el trabajo del mismo.

7.2 CONCLUSIONES

Respecto a la obtención de las funciones de transferencia del proceso de extrusión, se concluye lo siguiente:

- Las funciones de transferencia se las obtuvo de manera experimental y se toma en cuenta que dicha función es un ente que no tenía relación de dependencia con las otras zonas de extrusión. Esto se debió a la falta de equipo específico ya que este sistema si va a tener características de un sistema multivariable; para este caso se hubiera obtenido una matriz cuadrada de orden 9, es decir con 91 ecuaciones. La consideración inicial se basó en la experimentación del sistema.

- Para medir la respuesta en el tiempo se efectuó una variación del set point de 30°C para todas las zonas de extrusión y se recogió las medidas que transmitían los indicadores de temperatura digital.
- La referencia en la obtención de la función de transferencia identificada en lazo cerrado juega un papel importante, ya que para esta tesis sólo actuó en el controlador del proceso la componente proporcional del mismo y fueron suspendidas las acciones integral y derivativa, lo que generó respuestas que tenían errores de posición altos; esto causó necesariamente que se deba ajustar el valor final al que tienden las respuestas del sistema. Se introdujo una ganancia igual en la banda proporcional de los controladores del proceso, con el objeto de uniformizar las zonas de extrusión
- Para tomar los datos de estos procesos siempre se debe tener la colaboración de otras personas ya que se tienen nueve controladores que están variando en el tiempo y no se alcanza a tomar datos con exactitud de la evolución normal del proceso
- Se debe tomar en cuenta las referencias de la señal identificada y el valor del set point, debido a que dichos valores permiten en buena forma la solución, no se debe confundir con los valores de delta set point con la referencia ya que se puede obtener datos erróneos que a su vez causan confusión.
- En procesos que lo permitan y para evitar que se introduzca algún tipo de configuración del controlador es mejor en lo posible anular las acciones Integral y Derivativa debido a que no se conoce el sistema del proceso y la configuración del controlador; si el proceso no lo permite sólo se deberá implementar la acción PI, esto además ayuda a que el error de posición tienda a cero
- Para evitarse trabajos tediosos siempre en lo que sea posible se debe implementar pequeños algoritmos matemáticos que ayuden a resolver la función de transferencia de la planta.
- Debe quedar claro que las constantes de tiempo de las funciones de transferencia del sistema están en minutos, ya que los datos obtenidos fueron en dichas unidades.

Respecto al programa BridgeVIEW se puede concluir:

- Las facilidades y bondades que brinda el programa BridgeVIEW en la automatización de procesos, especialmente su HMI (Interfaz Hombre – Máquina), lo cual ayuda a realizar un análisis de la evolución de los procesos en tiempo real.

- Este software de monitoreo y control, tiene una ventaja en relación a los otros programas, ya que implementa una opción para analizar los datos históricos almacenados en el computador de monitoreo.
- La gran cantidad de información por parte de la casa fabricante del software permite agilizar la solución de problemas y optimizar los recursos de este software.
- Mediante este programa se puede implementar sistemas SCADA y obtener mejores resultados que con otros paquetes; por ejemplo, la comunicación con otros dispositivos de control se lo realiza de una manera sencilla, ya que posee una buena cantidad de drivers que permiten solucionar estos inconvenientes (exite un grupo de discusión en el INTERNET, en el cual se puede bajar driver, siempre y cuando sea un socio activo, la dirección electrónica es: www.natinst.com).
- Los costos del software BridgeVIEW son relativamente bajos respecto, a los convencionales; es más hoy en día, existen versiones para las industrias que no les interese adquirir el programa de desarrollo; su costo bordea los US 900.00 en la version de Run Time propio de BridgeVIEW.

Respecto al programa desarrollado en esta tesis se puede concluir

- El programa propuesto en esta tesis facilita el monitoreo y control de una máquina extrusora de pvc.
- El análisis de los sistemas de control se lo efectúa de manera sencilla y sobre todo rápida, lo cual permite agilizar el tiempo de trabajo; simplemente se necesita introducir la función de transferencia en lazo abierto y observar la respuesta en estado transitorio y estable del sistema.
- El controlador digital puede trabajar en varias configuraciones, según sea el tipo de planta a implementarse
- El programa del controlador digital se puede implementar en cualquier proceso de control, para lo cual se deberán realizar las respectivas pruebas para obtener las constantes de dichos procesos y maximizar el trabajo del controlador propuesto en esta tesis.
- La implementación física de este controlador digital está abierta a otros procesos.
- Debe quedar claro que las constantes de tiempo de las funciones de transferencia del sistema están en minutos. Ya que los datos obtenidos fueron en dichas unidades.

- Hoy en día se debe aprovechar la información que se tiene disponible en el INTERNET, y es más se debe buscar en los grupos de discusión para encontrar la adecuada. (el grupo para esta tesis fue: FTTP:\\www.plasticsnet.com)

BIBLIOGRAFIA

1. GUASTAFERRO, FRANCO Tuberías y Perfiles de PVC Petroplas
Guayaquil 1996
2. ALLAN I, GRIFF Plastics Extrusión
Edison Technical Services 1996
3. SIMOND, HERBERT R Extrusión de plásticos gomas y metales Index River
Madrid 1972
4. KRAUSS MAFFEI C Training Program for Extrusión Technology 1979
5. SIMOND, HERBERT R Handbook of Plastics Van Nostrand
6. Energy Conservation in Plastic Forming Industry The Energy Conservation Center
(ECO) Japón 1995
7. FLECK, R Plásticos Gustavo Gil Madrid
8. RAYMOND, HANUS Anti-windup, Bumpless, and Conditioned Transfer Techniques
for PID Controllers, Control System Vol 16 num 4 Agosto 1996
9. GHANADAN, R Adaptive PID Control of Nonlinear Systems, U Maryland 1990
10. OGATA, K Introducción a los sistemas de control en tiempo discreto
M-graw-Hill 1994
11. OGATA, K Ingeniería de control moderna M-graw-Hill 1992
12. KUO, B Sistemas de control 1986
13. DIESTEFANO Sistemas de control retroalimentados
M-graw-Hill Schaum 1984
14. SMURRAY Probabilidad y Estadística M-graw-Hill Schaum 1984
15. PUCE Probabilidad y Estadísticas para Ingenieros
16. CUNACHI, M Estudio del sistema de control del SOTE, Tesis
EPN – FIE 1996