

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL CONTROLADOR DE UNA EXTRUSORA DE  
HUSILLO PILOTO PARA UN PROPELENTE SÓLIDO AMATEUR**

**ANDREA CATALINA MADRID**

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA  
BOGOTÁ DC.**

**2006**

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL CONTROLADOR DE UNA EXTRUSORA DE  
HUSILLO PILOTO PARA UN PROPELENTE SÓLIDO AMATEUR**

**ANDREA CATALINA MADRID**

**Proyecto de grado para optar al título de  
Ingeniero Mecatrónico**

**Asesor**

**Carlos Bohórquez**

**Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA  
BOGOTÁ DC.**

**2006**

**Nota de Aceptación:**

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

## CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN  | 3  |
| <b>1</b> PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA                 | 4  |
| 1.1 ANTECEDENTES                                    | 4  |
| 1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA          | 4  |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN                                   | 5  |
| 1.4 OBJETIVOS                                       | 6  |
| 1.4.1 Objetivo general                              | 6  |
| 1.4.2 Objetivos específicos                         | 6  |
| 1.5 ALCANCES Y LÍMITACIONES                         | 6  |
| 1.5.1 Alcances                                      | 6  |
| 1.5.2 Limitaciones                                  | 7  |
| <b>2</b> MARCO DE REFERENCIA                        | 8  |
| 2.1 MARCO CONCEPTUAL                                | 8  |
| 2.1.1 Tipos de extrusoras                           | 8  |
| 2.1.2 Técnica de extrusión con husillo              | 9  |
| 2.1.3 Partes de una máquina de extrusión de husillo | 9  |
| 2.1.4 Extrusora de doble husillo                    | 17 |
| 2.1.5 Flujo de salida del extrusor                  | 19 |
| 2.1.6 Reología del material                         | 20 |
| 2.1.7 Conexiones a tierra                           | 26 |
| 2.1.8 Control del motor                             | 29 |
| 2.1.9 Transmisión de potencia                       | 35 |
| 2.1.10 Sensores de temperatura                      | 36 |
| 2.2 MARCO TEORÍCO                                   | 41 |
| 2.2.1 Características de los controladores PID      | 41 |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 2.2.2    | Sintonización de controladores PID   | 43        |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGÍA</b>   | <b>49</b> |
| 3.1      | ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN  | 49        |
| 3.2      | LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE USB  | 49        |
| 3.3      | TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN                                       | 49        |
| 3.4      | HIPÓTESIS  | 50        |
| 3.5      | VARIABLES  | 50        |
| 3.5.1    | Variables independientes   | 50        |
| 3.5.2    | Variables dependientes   | 50        |
| <b>4</b> | <b>DISEÑO INGENIERIL DEL PROYECTO</b>  | <b>51</b> |
| 4.1      | EXTRUSORA DE HUSILLO PILOTO  | 51        |
| 4.2      | SISTEMA TÉRMICO  | 52        |
| 4.2.1    | Lista de variables   | 53        |
| 4.2.2    | Modelos del sistema térmico  | 53        |
| 4.2.3    | Modelamiento   | 55        |
| 4.2.4    | Zona de alimentación   | 58        |
| 4.2.5    | Zona de fusión   | 63        |
| 4.3      | SENSORES DE TEMPERATURA  | 68        |
| 4.4      | ESTABILIDAD DEL SISTEMA  | 72        |
| 4.5      | DISEÑO DEL CONTROLADOR   | 77        |
| <b>5</b> | <b>PRESENTACIÓN DE RESULTADOS</b>  | <b>81</b> |
|          | CONCLUSIONES_____  | 88        |
|          | BIBLIOGRAFÍA _____   | 89        |
|          | ANEXOS _____   | 91        |
|          | ANEXO A. Ficha internacional de seguridad química para el nitrato de potasio |           |
|          | ANEXO B. Pirómetro serie TZ4   |           |

## LISTA DE TABLAS

**Tabla 1.** Calibre del conductor del electrodo a tierra.

**Tabla 2.** Calibre de los conductores para puesta a tierra de equipos y canalizaciones interiores.

**Tabla 3.** Valores típicos de resistividad de los terrenos.

**Tabla 4.** Sistemas de arranque para motores con rotor Jaula de ardilla.

**Tabla 5.** Tipos de termocuplas

**Tabla 6.** Ajustes de las ganancias del controlador PID

**Tabla 7.** Efecto del incremento en un sistema de lazo cerrado

**Tabla 8.** Sugerencias para la sintonización

**Tabla 9.** Técnicas para sintonización de controladores PID

**Tabla 10.** Materiales del proceso y algunas de sus propiedades físicas.

**Tabla 11.** Características de los materiales en la zona de alimentación

**Tabla 12.** Características de los elementos involucrados en el sistema.

**Tabla 13.** Valor en ohmios de la RTD ante cierto nivel de voltaje.

**Tabla 14.** Valor de las constantes involucradas en el diseño del controlador PID.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Esquema de una extrusora de husillo.
- Figura 2.** Esquema de un tornillo simple de extrusión.
- Figura 3.** Sección de un cabezal circular de extrusión.
- Figura 4.** Deformación de un fluido.
- Figura 5.** Flujo de una partícula sometida a esfuerzo de corte.
- Figura 6.** Comportamiento pseudoplástico.
- Figura 7.** Reómetro de cilindros concéntricos y cono-placa.
- Figura 8.** Partes que constituyen una conexión a tierra.
- Figura 9.** Comportamiento de sensor de temperatura PT100
- Figura 10.** Conexión con 2 hilos para sensor de temperatura PT100
- Figura 11.** Conexión con 3 hilos para sensor de temperatura PT100
- Figura 12.** Conexión con 4 hilos para sensor de temperatura PT100
- Figura 13.** Parámetros del QDR
- Figura 14.** Área de error
- Figura 15.** Extrusora diseñada.
- Figura 16.** Sistema que representa el husillo en general.
- Figura 17.** Respuesta del sistema en la zona de alimentación ante una entrada escalón unitario.
- Figura 18.** Respuesta del sistema en la zona de fusión ante una entrada escalón unitario.
- Figura 19.** Diagrama de bloques del sistema.
- Figura 20.** Divisor de voltaje para obtener el nivel de tensión necesario en la RTD.
- Figura 21.** Comportamiento del voltaje en las terminales de la RTD.

**Figura 22.** Diagrama de bloques del sistema.

**Figura 23.** Primer método de ziegler - Nichols

**Figura 24.** Diagrama de bloques del sistema en la zona de alimentación, con el PID.

**Figura 25.** Respuesta del sistema con la primera aproximación del controlador PID.

**Figura 26.** Respuesta del sistema después de sintonizar el PID.

**Figura 27.** Vista detallada de la respuesta del sistema.

**Figura 28.** Respuesta del sistema en la zona de fusión con los valores de PID obtenidos.

**Figura 29.** Respuesta del sistema en la zona de alimentación tras la sintonización del PID.

**Figura 30.** Vista detallada de la respuesta del sistema en la zona de fusión.

## GLOSARIO

Alezadora: herramienta mecánica, utilizada para bruñir metales.

Amateur: termino utilizado para referirse a una sustancia, con elaboración de tipo no profesional o sea experimental, cuando su proceso no esta estandarizado.

Bruñido: trabajo de la superficie de un metal para darle un aspecto brillante.

Escarpado: línea recta con un ángulo de inclinación pronunciado, entre (70-90°) respecto al eje horizontal.

Husillo: Es básicamente un tornillo de Arquímedes, el cual está fijo por un extremo a un motor que lo hace girar.

Ignición: acción y efecto de estar un cuerpo encendido, para un combustible.

Intersticios: espacio pequeño que media entre dos cuerpos o entre dos partes del mismo cuerpo.

Maquinado: trabajo de materiales, a través de herramientas movidas mecánicamente.

Reograma: grafico de esfuerzo de corte o viscosidad en función de la velocidad de corte de una sustancia.

Reología: ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia.

Fluidos Newtonianos: fluido con viscosidad constante independientemente del esfuerzo de corte al cual esta sometido.

Fluidos No Newtonianos: fluido con viscosidad dependiente del esfuerzo de corte aplicado, esta viscosidad recibe el nombre de 'viscosidad aparente'.

## INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo investigativo de propelentes sólidos amateur es necesario experimentar con diferentes procedimientos de fabricación y obtener la manera eficaz de llevar acabo estos procesos para que finalmente sean estandarizados, para esto se requiere del diseño de una máquina extrusora piloto, adaptada para el proceso de obtención de propelentes sólidos amateur, dicho diseño ya fue realizado por el estudiante de ingeniería mecatrónica de la universidad de San Buenaventura Jefferson Cabrera y con base en este diseño se sintonizará un controlador para las variables necesarias.

En el procedimiento de extrusión el material, se coloca en una tolva; de esta sigue a un cilindro de calefacción a través del cual pasa con la ayuda de un tornillo de alimentación. En el extremo opuesto del cilindro de calentamiento, el material es obligado (la materia prima que se ha calentado y comprimido hasta formar una masa lodosa) a pasar por una boquilla que da forma a la sección extruída. Para que sea realizado el procedimiento de extrusión, es necesario aplicar presión al material fundido, forzándolo a pasar de modo uniforme y constante a través de la matriz. La máquina debe ser acondicionada para fundir inicialmente un material sólido pulverizado, luego que este se encuentre en estado líquido, es mezclado con el oxidante que se trabajará en estado sólido granulado, para que la mezcla finalmente sea extruída a través de un dado con forma cilíndrica hueca y con un orificio concéntrico pasante de diferentes figuras en el núcleo del cilindro.

# 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## 1.1 ANTECEDENTES

Hasta el momento no se encuentra ninguna documentación de que se haya utilizado algún tipo de controlador para las extrusoras de husillo piloto para propelentes sólidos tipo amateur, lo único que se encuentra en este tipo de extrusoras es el diseño mecánico realizado por el estudiante antes mencionado.

## 1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Para obtener el propelente es necesario fundir el combustible inicialmente en estado sólido y agregar paulatinamente los gránulos del oxidante en una proporción tal que se formará una masa lodosa que debe ser mezclada de manera que se logre un contacto muy íntimo entre las partículas de oxidante y la matriz combustible. Después la mezcla será extruída a través de un dado para obtener el propelente sólido en forma tubular. Estos huecos internos podrán tener diferentes formas: cilíndrica, estrella, rómbica entre otras.

¿Cómo sintonizar y simular el controlador de una extrusora de husillo piloto para un propelente sólido tipo amateur, que lleve la temperatura hasta el punto de fusión y la mantenga durante la mezcla los componentes, para que el producto final sea el propelente sólido en forma compacta con la geometría deseada?

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

El equipo de investigación de propelentes sólidos amateur tiene como objetivo específico desarrollar un proceso de manufactura estándar que permita producir barras de propelente amateur cuyo comportamiento sea reproducible.

El tipo de mezcla y forma del propelente sólido determina la viabilidad y eficiencia de vuelo del cohete, para conseguirlo es necesario experimentar con diferentes procesos de fabricación y mezcla de combustible-oxidante; es por eso, que es necesario desarrollar el diseño y simulación de una extrusora de tornillo que permita fundir el combustible, mezclarlo con el oxidante y extruir la mezcla en una matriz de forma cilíndrica con un hueco a través de todo el eje del propelente sólido, este hueco es concéntrico y con la geometría deseada.

Es necesario automatizar este procedimiento para reproducir el comportamiento del producto terminado, objetivo difícil de alcanzar en procesos totalmente manuales, es por eso que se hace necesario controlar el tiempo total de obtención del producto con el fin de cuantificar la producción en un periodo de tiempo a futuro y se implementara un controlador digital de temperatura y presión, como instrumento de medición y corrector de error en el sistema.

La información sobre extrusión de propelentes sólidos amateur es insuficiente, motivo que nos lleva a realizar un estudio detallado de la información existente sobre extrusión de plásticos, campo que ya ha sido bastante explotado; además en el país no existen fabricantes de este tipo de maquinaria.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo general**

Sintonizar y simular el controlador de una extrusora de husillo piloto para un propelente sólido tipo amateur, que lleve la temperatura hasta el punto de fusión y la mantenga durante la mezcla los componentes, para que el producto final sea el propelente sólido en forma compacta con la geometría deseada.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Analizar la estabilidad de la planta.
- Seleccionar el controlador necesario para el sistema.
- Seleccionar el sensor de temperatura apto para el sistema.
- Diseñar un controlador para la extrusora de husillo piloto para propelentes sólido amateur.
- Sintonizar el controlador.
- Simular el controlador seleccionado.

## **1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES**

### **1.5.1 Alcances**

El alcance del proyecto consiste en seleccionar y sintonizar el controlador para el diseño de la extrusora de husillo piloto para un propelente sólido amateur realizado por el estudiante Jefferson Andrés Cabrera Quintero.

### **1.5.2 Limitaciones**

El proyecto no desarrollara el diseño de la extrusora de husillo piloto para propelentes sólidos amateur, debido a que este diseño hace parte del proyecto de grado desarrollado por Jefferson Andrés Cabrera Quintero estudiante de ingeniera mecatrónica, entonces los datos de los cuales partirá el controlador son los obtenidos por este estudiante en su proyecto de grado.

## 2 MARCO DE REFERENCIA

### 2.1 MARCO CONCEPTUAL

#### 2.1.1 Tipos de extrusoras.

Para que sea realizado el proceso de extrusión es necesario, aplicar presión al material fundido, forzándolo a pasar de modo uniforme y constante a través de la matriz; atendiendo a estos requisitos, las máquinas extrusoras se clasifican en: extrusoras de desplazamiento positivo y extrusoras de fricción.

- **Extrusoras de desplazamiento positivo:** en este tipo de máquina se obtiene la acción de transporte mediante el desplazamiento de un elemento de la propia extrusora. En la matriz la reología del material tiene mayor influencia sobre el proceso.
- **Extrusora de pistón (Inyectora):** en esta máquina un pistón cuyo accionamiento puede ser hidráulico o mecánico fuerza al material a pasar a través de la matriz.
- **Extrusoras de fricción:** en esta máquina la acción del transporte es conseguida aprovechándose las características físicas del material y la fricción de éste con las paredes metálicas transportadoras de la máquina, donde ocurre la transformación de energía mecánica en calor que ayuda a la fusión del material. La reología del material tiene influencia sobre todo el proceso.

Los tipos son: extrusora de cilindros y extrusora de tornillo.

La extrusora de cilindros consiste, básicamente, en dos cilindros próximamente dispuestos. El material a ser procesado, pasa entre estos cilindros y es forzado a pasar por una matriz. En cambio, la extrusora de tornillo ó husillo puede estar constituida por uno, dos o más husillos.

### **2.1.2 Técnica de extrusión con husillo.**

Es la técnica de procesamiento bajo la cual la sustancia a ser extruída es alimentada a través de una tolva, posteriormente transportada a lo largo de un husillo, donde lentamente resulta compactada, fundida, mezclada y homogeneizada; para finalmente ser dosificada a través de una boquilla conformadora responsable de proporcionarle, de manera continua, el perfil y/o la geometría deseada al producto final.

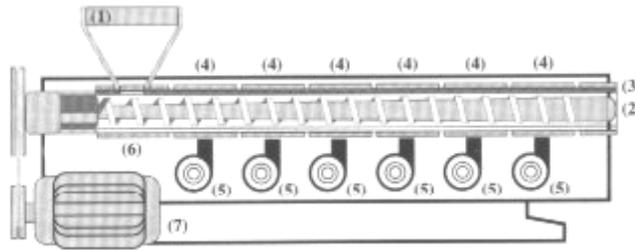
### **2.1.3 Partes de una máquina de extrusión de husillo.**

Las extrusoras de husillo, (extrusoras continuas), se encuentran constituidas por uno o múltiples tornillos, según los requerimientos propios del proceso.

En la (figura 1) se pueden observar los elementos más importantes de una extrusora de husillo.

**Figura 1.** Esquema de una extrusora de husillo.

- 1.-Tolva de alimentación
- 2.-Husillo de extrusión
- 3.-Barril o cilindro
- 4.-Bandas de calefacción
- 5.-Ventiladores
- 6.-Banda de enfriamiento
- 7.-Motor.



Fuente INDESCA. <http://www.indesca.com>. Noviembre 15-2004.

- Tolva de alimentación: es el depósito encargado de la alimentación continua del material a la extrusora. Debe tenerse claro que la fase de alimentación repercute directamente en la efectividad del proceso.

Una alimentación inapropiada puede ocasionar mermas en la productividad de la línea generadas por inestabilidades en el flujo. Generalmente el volumen de la tolva debe ser proporcional a la capacidad de producción de la extrusora.

Como regla práctica el diámetro de salida de la tolva suele tener un ancho equivalente al diámetro del husillo de la extrusora, y un largo de 1.5 a 2.0 veces el diámetro.

- El husillo de extrusión: es el elemento mecánico responsable de las operaciones de transporte, fusión y dosificación del material. Para

realizar cada función más eficiente, es práctica normal dividir el husillo de extrusión, de la siguiente manera (figura 2):

**Figura 2.** Esquema de un tornillo simple de extrusión.



Fuente INDESCA. <http://www.indesca.com>. Noviembre 15-2004.

*Requerimientos de la zona de transporte o alimentación:* buscando maximizar la alimentación de material a la extrusora y con ello su productividad, el diseño de los husillos de extrusión presenta en la zona de transporte la mayor profundidad de canal (mayor volumen).

En esta zona la superficie del husillo debe estar sumamente lisa e incluso pulida, de ser necesario, pues de esta manera se favorece la adhesión del material a la superficie del barril de la extrusora y no al husillo permitiendo así un transporte de material más eficiente. En la medida que el material avanza a lo largo de la zona de alimentación, comienza a ser compactado y calentado. Dos mecanismos son responsables de este calentamiento: 1). La fricción entre el material y la superficie de la máquina. 2). La conducción de calor desde las bandas de calentamiento del barril.

*Requerimientos de la Zona de Fusión:* el inicio de la fusión evidencia el paso del material a la segunda zona del tornillo de extrusión (zona de fusión). Debido a que durante la fusión del material se produce un incremento de su densidad aparente, (producto de la reducción de los intersticios entre partículas sólidas presentes), en la zona de fusión el husillo presenta una progresiva reducción del canal.

En una extrusora bien operada, se desea que la zona de fusión sea lo más corta posible. Ello reducirá el consumo de energía, permitirá un buen mezclado y evitará la presencia de sólidos en la boquilla. Una vez que la masa del material se encuentra 100% en estado líquido o fundido, pasa a la zona de dosificación o bombeo.

Se deben tener en cuenta las siguientes características en la eficiencia de la fusión del material, en esta zona:

- Un canal más profundo transporta más material, pero tarda más en completar la fusión.
- Una operación rápida aumenta la producción, pero, los sólidos persisten a lo largo de tornillo al terminar la operación.
- Un canal menos profundo puede ayudar a una operación rápida para aumentar la producción debido a una fusión más efectiva, pero el peligro está en que el alto esfuerzo de corte que resulta puede conducir a un sobrecalentamiento.
- La mezcla mejora la fusión por la simple agitación del material.

Para obtener un ángulo óptimo de hélice, deben apreciarse las siguientes consideraciones:

- El ángulo escarpado resiste al flujo de presión de retroceso.
- El ángulo de poca profundidad proporciona una ruta menos tortuosa al flujo de arrastre.

*Requerimientos de la Zona de Dosificación:* el diseño del husillo en la zona de bombeo debe garantizar además de un buen mezclado, la generación de la presión necesaria para que la masa fundida pueda atravesar las restricciones del cabezal y la boquilla, a una velocidad constante. Generalmente la zona de dosificación o bombeo tiene un volumen de canal constante.

El husillo debe tener la longitud y el diámetro suficiente para poder acomodar las zonas de alimentación, compresión y dosificación, de modo que la masa fundida se encuentre en las condiciones requeridas para su extrusión a través del dado. Sin embargo, otras dimensiones del husillo como: ángulo de hélice, profundidad y ancho del canal, también son importantes.

- Barril o cilindro: el barril o exterior de la extrusora es un cilindro metálico que conforma junto con el husillo de extrusión la cámara de fusión y bombeo de la extrusora. En pocas palabras es la carcasa que envuelve al husillo. En el diseño de todo barril de extrusión se busca:
  - Máxima durabilidad.
  - Alta transferencia de calor.
  - Mínimo cambio dimensional con la temperatura.

*Sistema de calentamiento y enfriamiento del barril:* el calentamiento del barril se produce, casi exclusivamente, mediante resistencias eléctricas. El calentamiento excesivo del cilindro entorpece considerablemente el proceso de extrusión, debido a la destrucción térmica de las capas del material cercanas a su superficie, por esto, el material del husillo no debe almacenar energía. Para aumentar la eficiencia del conjunto barril y husillo, es indispensable realizar un perfil de temperatura, que permita alcanzar la temperatura de fusión paulatinamente.

Cada zona de calentamiento de la extrusora está acompañada en la mayor parte de un ventilador, el cual permite el control de la temperatura eliminando calor de la extrusora mediante el flujo de aire sobre la superficie requerida. Los ventiladores entran en operación cuando la temperatura de una zona supera el punto prefijado, por efecto de:

- La transferencia excesiva de calor por parte de la resistencia (Por ejemplo: durante el arranque de la máquina).
- La generación excesiva de calor por parte de los elementos de mezclado presentes en el husillo de la extrusora.

La temperatura de extrusión sólo puede ser controlada de manera precisa mediante la acción combinada de las bandas de calentamiento eléctrico y los ventiladores de cada zona.

- El motor: el motor de la extrusora es el componente responsable de suministrar la energía necesaria para producir: la alimentación del

material, parte de su fusión (70 a 80%), su transporte y el bombeo a través del cabezal y la boquilla. Los motores incorporados en las líneas de extrusión son eléctricos y operan con voltajes de 220 y 440 V. La transmisión de movimiento y potencia al husillo puede ser realizada por correas, cadenas o engranajes.

Al final de la extrusora, el cabezal o dado es el responsable de conformar o proporcionar la forma del extrusado. Los principales componentes de un cabezal para la extrusión son:

- *Plato rompedor y filtros:* constituyen el punto de transición entre la extrusora y el dado. A estos componentes les corresponde una parte importante de la calidad del material extrusado. El plato rompedor es el primer elemento del cabezal destinado a romper con el patrón de flujo en espiral que el husillo imparte, además ayuda a aumentar la presión del material fundido.

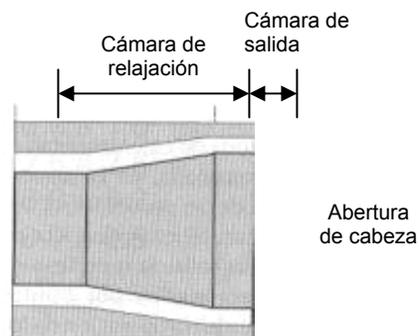
Mientras que la función de los filtros es la de eliminar del extrusado partículas y/o grumos provenientes de impurezas, carbonización, pigmentos y/o aditivos, etc. En lo que respecta a su diseño, el plato rompedor no es más que una placa cilíndrica con orificios pasantes, en la superficie transversal. Por otro lado, las mallas deben ser fabricadas en acero inoxidable puesto que las compuestas con cobre o bronce tienen un efecto catalítico sobre las reacciones termo-oxidativas.

- *Cabezal:* el cabezal de extrusión es el componente del dado encargado de la conformación final del extrusado. Se debe velar por que la sustancia fluya con volumen y velocidad de

flujo uniforme, alrededor de toda la circunferencia del cabezal para lograr espesores uniformes.

Los diseños actuales de cabezales, presentan dos secciones claramente definidas (figura 3). La cámara de relajación tiene como propósito producir la desaceleración del material e incrementar el tiempo de residencia en el cabezal de manera tal que la sustancia relaje los esfuerzos impartidos por el paso a través de los paquetes de filtros y el plato rompedor; mientras que la cámara de salida o descarga, produce el formado del perfil deseado con las dimensiones requeridas.

**Figura 3.** Sección de un cabezal circular de extrusión.



Fuente. Trabajo de grado USB (2005), Diseño y simulación de una extrusora de husillo piloto para un propelente sólido amateur.

Los parámetros básicos para la especificación de un cabezal son: el diámetro y la abertura de la salida.

- *Adaptadores*: son requeridos cuando el dado no es diseñada específicamente para un determinado extrusor. Debido que los fabricantes de extrusoras y dados no siempre son los mismos, el uso de adaptadores suele ser común.

#### **2.1.4 Extrusora de doble husillo.**

En un extrusor monohusillo para que el material sea transportado hacia delante, no debe girar junto con el husillo, o al menos debe hacerlo a menor velocidad. Ya que la única fuerza que puede evitar que el material de vueltas junto con el husillo, y además hace que el material avance a lo largo del barril, es la fuerza de fricción entre el material y la superficie del barril. Para aumentar la superficie de fricción se incrementa la longitud del barril, de esta manera, la relación longitud-diámetro en extrusores monohusillo es importante. Entre mayor sea esta relación, mayor será la propulsión del material hacia delante de la extrusora.

Las extrusoras equipadas con dos husillos de igual longitud, ambos colocados en el interior del mismo barril, se pueden categorizar de acuerdo a la geometría de los husillos, de la siguiente manera:

- Husillos que no engranan: aquí, los husillos están colocados uno junto al otro, pero las hélices de uno no penetran en los canales del otro, es decir, la distancia entre centros es la suma de los radios de los husillos. Operan de manera similar a los extrusores monohusillo.
- Husillos que si engranan: aquí, los husillos están colocados uno al lado del otro, y las hélices de uno penetran en los canales del otro, es decir, la distancia entre centros es menor que la suma de los radios de

los husillos. La sola presencia de las hélices de un husillo en el canal del otro limita el movimiento rotacional del material alrededor del husillo de manera que se obtiene movimiento hacia delante en mayor grado. Estos husillos pueden ser conjugados o no conjugados, dependiendo de un ajuste flojo o perfecto entre ellos relativamente.

Los husillos que engranan, pueden ser subdivididos, según el sentido de giro de cada uno de los husillos. *Corrotatorios*: donde los dos husillos giran en el mismo sentido, a favor o en contra de las manecillas del reloj; *Contrarrotatorios*: aquí, en cambio, los husillos giran en sentido contrario.

Cuando además de engranar, los husillos son conjugados, se impide totalmente el movimiento rotacional del material alrededor de ellos y el material es forzado a desplazarse hacia delante a lo largo del barril. Esta acción de bombeo (flujo de arrastre) es positiva y no depende de las condiciones de operación, tales como: tipo de material, temperatura o presión, si no exclusivamente de la geometría de la máquina y de la velocidad de rotación de los husillos. En este caso, la relación longitud-diámetro no es de importancia significativa para la propulsión del material hacia delante.

El costo de fabricación de una extrusora de doble husillo, fácilmente se incrementa en un 100%, en comparación con las extrusoras de monohusillo. Su diseño es más complejo, lo que requiere de más tiempo para su ejecución.

### **2.1.5 Flujo de salida del extrusor.**

Generalmente la zona de dosificación, es la que determina la producción de la extrusora. En la zona de dosificación existen tres flujos: el directo, inverso (a lo largo del canal helicoidal del husillo) y el correspondiente a las fugas de la masa (que tiene lugar a través de los huelgos radiales existentes entre las crestas del husillo y la superficie interior del barril). Este último flujo, comparado con los otros dos, resulta tan insignificante que en la mayoría de los casos se suele prescindir de él al efectuar los cálculos de producción. La producción o caudal de la zona de dosificación, es igual a la diferencia entre el flujo directo e inverso, sumando a este último las fugas.

El flujo directo comúnmente se denomina el flujo de arrastre y el inverso flujo de presión. El primero constituye un movimiento relativo de la superficie del husillo respecto a la del barril. El material acumulado en el espacio anular formado por el núcleo del husillo y la superficie interior del cilindro, es sometido a deformaciones de cizallamiento que las paredes del canal helicoidal transformaran en movimiento de avance, es decir, en flujo directo. El consumo o caudal volumétrico del flujo directo viene determinado fundamentalmente por la profundidad y anchura del canal, diámetro del husillo y su velocidad de giro.

El flujo inverso, surge como resultado de la presión sobrante acumulada ante el plato rompedor, que obliga a la masa a fluir en dirección contraria. Sin embargo, como el flujo directo es considerablemente mayor se observará sólo la reducción de éste en una magnitud correspondiente al flujo inverso, sin evidenciarse la corriente de material en sentido contrario. La magnitud del flujo inverso depende de la profundidad del canal helicoidal, del diámetro del husillo, de la longitud de la zona de dosificación y la presión ejercida por la

masa sobre el plato rompedor y de la viscosidad de la masa. Cabe anotar que el flujo inverso contribuye con el mezclado tanto distributivo (homogeneización) como el dispersivo (reducción de tamaño de partículas aglomeradas).

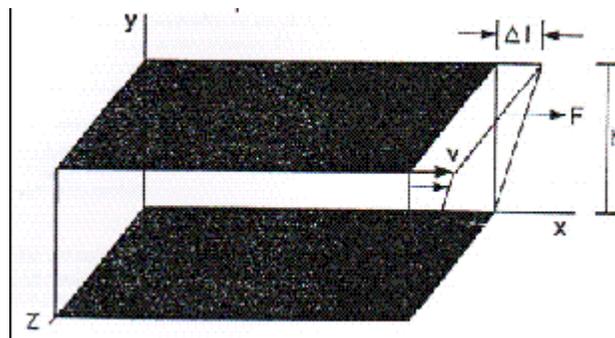
En las extrusoras de doble husillo, conjugados, el flujo de salida esta limitado por el flujo de alimentación, mas que por la velocidad de los husillos.

### 2.1.6 Reología del material.

La reología se define como la ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia, o en otras palabras, como un material responde a una fuerza. Por ejemplo, la miel podrá fluir a través del orificio de un embudo de vidrio, mientras esto no ocurrirá con la mayonesa. Sin embargo la mayonesa es mucho más fácil de esparcir sobre una rodaja de pan que la miel. La reología provee las herramientas para entender estos diferentes comportamientos.

La (figura 4), muestra un fluido sometido a una deformación simple entre dos platos paralelos. El plato inferior es estacionario, mientras que el plato superior se mueve a una velocidad  $v$  como consecuencia de una fuerza  $F$  aplicada al mismo.

**Figura 4.** Deformación de un fluido.



Fuente SOCIEDAD ARGENTINA DE TECNÓLOGOS EN RECUBRIMIENTO SATER. <http://www.sater.org.ar/Art.%20de%20De%20Notta.htm>. 04-02-2005.

El movimiento del plato establece un gradiente de velocidad en el fluido. Esta geometría puede ser usada para definir algunos parámetros reológicos tales como:

- *Esfuerzo de corte ó cizalla:* se define como la fuerza por unidad de área necesaria para alcanzar una deformación.
- *Velocidad de Corte ó Cizalla:* se define como el cambio de velocidad  $v$  a través de la distancia  $h$  entre los dos platos.
- *Viscosidad:* se define como la relación entre el esfuerzo de corte aplicado y la velocidad de corte adoptada por el fluido.

Existen dos tipos diferentes de comportamientos reológicos bien marcados:

*Fluidos Newtonianos y Fluidos No Newtonianos:* en el primero la viscosidad es constante independientemente del esfuerzo de corte al cual se somete el fluido. En el segundo la viscosidad depende del esfuerzo de corte aplicado, esta viscosidad recibe el nombre de viscosidad aparente.

En gran medida la razón para un comportamiento no newtoniano, se debe a la presencia de partículas en la formulación del material. La (figura 5), muestra el flujo de una partícula sometida a un esfuerzo de corte (flechas horizontales). El campo de corte generado en el fluido establece un gradiente de velocidad a través de la partícula. Sin embargo siendo rígida la partícula puede moverse a través del fluido sólo a una única velocidad. Por esta razón,

el gradiente de velocidad generado en el fluido provoca la rotación de la partícula.

**Figura 5.** Flujo de una partícula sometida a esfuerzo de corte.



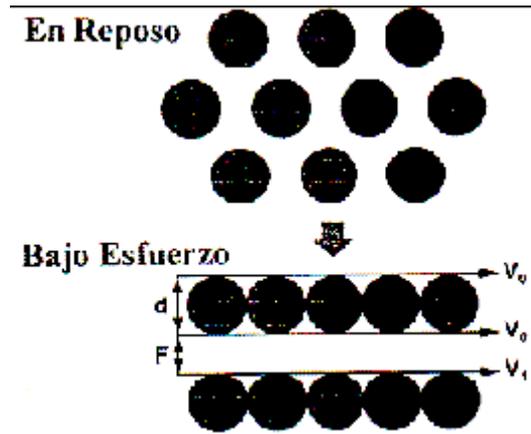
Fuente SOCIEDAD ARGENTINA DE TECNÓLOGOS EN RECUBRIMIENTO SATER. <http://www.sater.org.ar/Art.%20de%20De%20Notta.htm>. 04-02-2005.

La energía usada para rotar la partícula disminuye la energía disponible para la fluencia del líquido. Por lo tanto la presencia de la partícula causa un incremento en la viscosidad del fluido. Lo cual significa que se necesita mayor fuerza para alcanzar la misma fluencia que se alcanzaría en el fluido sin partículas. La viscosidad relativa de una suspensión se define como la relación entre la viscosidad de la suspensión y la viscosidad del medio en el cual se encuentra la suspensión.

Existen varios tipos de comportamientos no Newtoniano, enumerados a continuación:

- *Flujo Pseudoplástico:* aquí, se presenta el caso contrario al de un fluido dilatante, la viscosidad disminuye a medida que aumenta el esfuerzo de corte sobre el fluido. La fuente de comportamiento pseudoplástico de una suspensión se puede ver en la (figura 6):

**Figura 6.** Comportamiento Pseudoplástico.



Fuente SOCIEDAD ARGENTINA DE TECNÓLOGOS EN RECUBRIMIENTO SATER.  
<http://www.sater.org.ar/Art.%20de%20De%20Notta.htm>. Marzo 2005.

Cuando las partículas, son sometidas a un esfuerzo de corte ó cizallamiento, se orientan por si mismas en capas, las cuales pueden fluir muy fácilmente causando una disminución de la viscosidad.

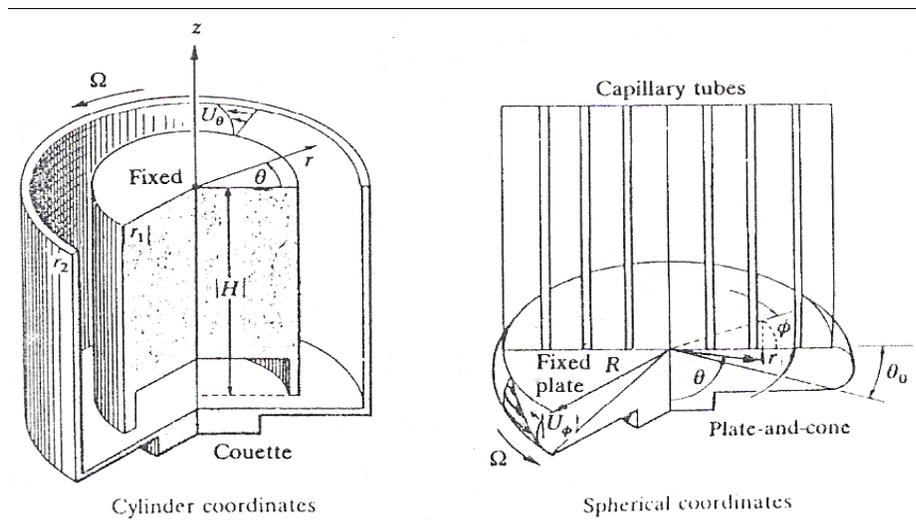
- *Flujo Dilatante*: la dilatancia, es un fenómeno de espesamiento independiente del tiempo, que se da a altas velocidades de deformación. Cuando existe un comportamiento dilatante (opuesto al pseudoplástico), las partículas son sometidas a un esfuerzo de corte y no se orientan, si no que se aglomeran, produciendo un aumento en la fracción de volumen de la suspensión y por lo tanto un aumento en la viscosidad.

- *Flujo tixotropico*: la tixotropía es un ablandamiento dependiente del tiempo. Difiere del comportamiento pseudoplástico, porque el descenso de la viscosidad aparente, no depende exclusivamente de la velocidad de deformación, si no también de la duración (tiempo) de la deformación.
- *Flujo reopexico*: la reopexía es un espesamiento dependiente del tiempo. Este fenómeno es inverso a la tixotropía.

El reograma para un fluido Newtoniano es una línea recta cuya pendiente es la viscosidad.

Los viscosímetros adecuados para efectuar determinaciones con los fluidos no newtonianos son los reómetros de cilindro concéntrico y de cono-placa (figura 7).

**Figura 7.** Reómetro de cilindros concéntricos y cono-placa.



Fuente. Trabajo de grado USB (2005), Diseño y simulación de una extrusora de husillo piloto para un propelente sólido amateur.

En estos reómetros la velocidad de deformación es la misma en toda la muestra, siempre que se minimicen los efectos del extremo; además, permiten modificar la velocidad de deformación tangencial variando la velocidad de giro y el tiempo que a cada una de ellas esta operando. El ajuste de velocidad (ascenso o descenso) y la lectura de los valores correspondientes deben efectuarse sin detener la rotación.

Otro tipo de comportamiento, es el de los materiales viscoelásticos: son aquellos que presentan un comportamiento dual. Esto significa que el material posee una componente elástica (como sí fuera un sólido) y una componente de flujo liquido.

La elasticidad de un material, se refiere a la habilidad del mismo a almacenar la energía de deformación y recuperar su configuración original luego que la fuerza responsable por la deformación sea removida.

Por otra parte, la viscosidad de un material se refiere a la habilidad que posee el mismo para disipar o perder la energía de deformación a través de su fluencia. Cuando un material viscoelástico es sometido a una deformación una porción de la energía de deformación es almacenada, mientras que el resto es perdida en forma de flujo.

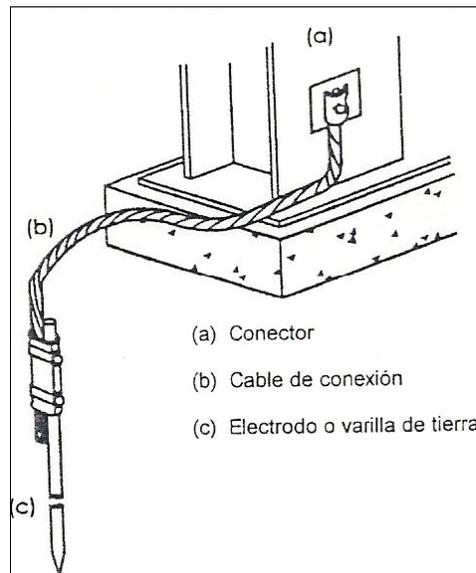
En general las propiedades viscoelásticas (en los polímeros), dependen de la temperatura y de la frecuencia de la deformación. Por lo tanto las propiedades viscoelásticas son frecuentemente determinadas como una función de la temperatura a una frecuencia dada o viceversa.

### 2.1.7 Conexiones a tierra.

Cuando un objeto metálico se conecta a tierra por medio de un conductor aterrizado se fuerza a tener el mismo potencial cero de esta. Además, los sistemas se conectan solidamente para limitar el voltaje durante la operación normal y evitar voltajes excesivos debidos a descargas atmosféricas, ondas de líneas o contactos no intencionales con líneas de voltajes mayores.

Los elementos principales de un sistema de tierra son (figura 8):

**Figura 8.** Partes que constituyen una conexión a tierra.



Fuente ENRÍQUEZ HAPER, Gilberto. Instalaciones y montaje electromecánico. México: Limusa, 2000. p 172.

- *Dispersores y electrodos:* es un cuerpo metálico puesto en contacto directo con el terreno, con el fin de esparcir en él mismo, las corrientes eléctricas canalizadas por los demás elementos del sistema a tierra. Los tipos mas usuales son: electrodos de varilla de acero con recubrimiento de cobre de 13, 16,9 y 19mm de diámetro por 0,35mm

de longitud, electrodos de placa sencilla o de varias placas tipo rehilete, electrodos químicos y electrodos de malla.

- *Conductores:* deben ser cables trenzados de cobre electrolítico semiduro, desnudo o con aislamiento. El tipo y calibre se seleccionan de acuerdo con los requerimientos de cada instalación en particular.
- *Conectores:* estos conectores, unen el conductor con el electrodo entre si. Estos deben ser de tipo soldable o atornillables.

De acuerdo con la norma NOM-001-SEMP-1994 de instalaciones eléctricas, se recomienda que el calibre del conductor del electrodo de tierra, no sea menor al que se indica en la (tabla 1) para conductores de cobre.

**Tabla 1.** Calibre del conductor del electrodo a tierra.

| CALIBRE DEL CONDUCTOR MÁS GRANDE DE LA ACOMETIDA. O DEL ALIMENTADOR GENERAL DE SERVICIO AWG o MCM (COBRE) | CALIBRE DEL CONDUCTOR DEL ELECTRODO DE TIERRA: AWG o MCM (COBRE) |
|---|--|
| 2 ó menor   | 8  |
| 1/0   | 6  |
| 2/0 ò 3/0   | 4  |
| 4/0 a 350 mcm   | 2  |
| 400 a 600 mcm   | 1/0  |
| Mayor de 600 mcm a 1100 mcm   | 2/0  |
| Mas de 1100 mcm   | 3/0  |

Fuente ENRÍQUEZ HAPER, Gilberto. Instalaciones y montaje electromecánico. México : Limusa, 2000. p 195.

Con relación al calibre del conductor de puesta a tierra de equipos, las normas para instalaciones eléctricas establecen que no debe ser menor al indicado en la (tabla 2):

**Tabla 2.** Calibre de los conductores para puesta a tierra de equipos y canalizaciones interiores.

| CAPACIDAD NOMINAL O AJUSTE DEL DISPOSITIVO DE PROTECCION CONTRA SOBRECORRIENTE UBICADO ANTES DEL EQUIPO CONDUCTOR, ETCETERA. | CALIBRE DEL CONDUCTOR DE PUESTA A TIERRA: (AWG o MCM) |          |
|--|---|----------|
|  | VALOR MAYOR DE (AMPERES)                              | COBRE    |
| 15   | 14  | 12       |
| 20   | 14  | 12       |
| 30   | 12  | 10       |
| 40   | 10  | 8        |
| 60   | 10  | 8        |
| 100  | 8   | 6        |
| 200  | 6   | 4        |
| 400  | 4   | 2        |
| 600  | 2   | 2/0      |
| 800  | 1/0   | 3/0      |
| 1000   | 2/0   | 4/0      |
| 1200   | 3/0   | 250 MCM  |
| 1600   | 4/0   | 350 MCM  |
| 2000   | 250 MCM   | 400 MCM  |
| 2500   | 350 MCM   | 500 MCM  |
| 3000   | 400 MCM   | 600 MCM  |
| 4000   | 500 MCM   | 800 MCM  |
| 5000   | 700 MCM   | 1000 MCM |
| 6000   | 800 MCM   | 1200 MCM |

Fuente ENRÍQUEZ HAPER, Gilberto. Instalaciones y montaje electromecánico. México : Limusa, 2000. p 196.

Es importante tener en cuenta la naturaleza del terreno. Cuanto menor sea la resistividad del terreno, mas fácilmente se pueden alcanzar valores bajos para la resistencia de la instalación de los sistemas de tierra. La resistividad del terreno varía con la temperatura y el grado de humedad. Por lo que no es aconsejable efectuar mediciones de resistividad del terreno en condiciones

de altas temperaturas o de lluvias recientes. La unidad de resistividad del suelo es el *ohm-m*.

**Tabla 3.** Valores típicos de resistividad de los terrenos.

| TIPO DE SUELO           | RESISTIVIDAD OHM/M |
|-------------------------|--------------------|
| Húmedo o suelo orgánico | 10 – 50            |
| Cultivo arcilloso       | 100                |
| Arenoso húmedo          | 200                |
| Arenoso seco            | 1000               |
| Con guijarro y cemento  | 1000               |
| Rocoso                  | 3000               |
| Roca compacta           | 10000              |

Fuente ENRÍQUEZ HAPER, Gilberto. Instalaciones y montaje electromecánico. México: Limusa, 2000. p 170.

### 2.1.8 Control del motor.

Para seleccionar e instalar el equipo de control para un motor eléctrico, se deben considerar los siguientes factores, a fin de que este pueda funcionar correctamente junto a la máquina para la que se diseña.

- *Arranque:* el motor se puede arrancar conectándolo directamente a través de la línea. Sin embargo, la máquina impulsada se puede dañar si se arranca con ese esfuerzo giratorio repentino. El arranque debe hacerse lenta y gradualmente, no sólo para proteger la máquina, si no porque la oleada de corriente de la línea durante el arranque puede ser demasiado grande. En la tabla 4), se pueden apreciar las ventajas y desventajas de cada uno de los sistemas de arranque.

**Tabla 4.** Sistemas de arranque para motores con rotor Jaula de Ardilla

| SISTEMA DE ARRANQUE                  | Arranque directo   | Arranque $\lambda - \Delta$   | Arranque resistencias rotóricas  | Arranque por auto-transformador  |
|--------------------------------------|--|---|--|--|
| <b>CORRIENTE INICIAL DE ARRANQUE</b> | (4 a 8) de la corriente de consumo.  | (1.3 a 2.6) de la corriente de consumo.   | (4.5) de la corriente de consumo.  | (1.7 a 4) de la corriente de consumo.  |
| <b>PAR INICIAL DE ARRANQUE</b>       | (0.6 a 1.5) del par útil.  | (0.2 a 0.5) del par útil.   | (0.6 a 0.85) del par útil.   | (0.4 a 0.85) del par útil.   |
| <b>DURACION MEDIA DEL ARRANQUE</b>   | 2 a 3 seg.   | 3 a 7 seg.  | 7 a 12 seg.  | 7 a 12 seg.  |
| <b>VENTAJAS</b>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Buen par de arranque.</li> <li>- Equipo sencillo de arranque.</li> <li>- Arranque muy utilizado.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Arranque suave.</li> <li>- Poca incidencia sobre la carga de la línea.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Posibilidad de regular los valores de arranque.</li> <li>- No hay corte de tensión al pasar de un punto a otro.</li> </ul>              | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Buena relación par intensidad.</li> <li>- Posible regulación de los valores de arranque.</li> <li>- No hay corte de alimentación en el arranque.</li> </ul> |
| <b>DESVENTAJAS</b>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pico elevado de intensidad de carga.</li> <li>- Importante sobrecarga en la línea.</li> <li>- No puede hacerse un arranque lento y progresivo.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Reducido par de arranque.</li> <li>- Costo, mediano, del equipo de arranque.</li> <li>- Corte de tensión al pasar de <math>\lambda - \Delta</math>.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevada punta de arranque.</li> <li>- Es necesario un equipo de resistencias.</li> <li>- Equipo más caro que los anteriores.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Equipo de arranque costoso.</li> <li>- Es necesario un auto-transformador.</li> </ul>   |
| <b>APLICACIONES</b>                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Máquinas de pequeña y mediana potencia que arrancan a plena o media carga.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Máquinas de pequeña y mediana potencia con arranque en vacío.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Máquinas de media y gran potencia, con elevada inercia.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Máquinas de elevada potencia o par de arranque.</li> <li>- Interés en la reducción de los puntos de intensidad.</li> </ul>                                  |

Fuente ROLDÁN VILORIA, José. Motores eléctricos, variación de velocidad. España: Paraninfo, 1993. p 50.

La selección del tipo de arranque, dependerá directamente de la naturaleza de la máquina que será conducida por el motor y de las

condiciones de operación de la misma. Sin olvidar, los cuidados con la alimentación del motor eléctrico.

- *Parada:* los controladores permiten el funcionamiento y la detención de los motores. Además, imprimen una acción de freno cuando se debe detener la máquina rápidamente. La parada rápida, es una función vital del controlador para casos de emergencia. Los controladores ayudan en la acción de parada retardando el movimiento centrífugo de las máquinas.
- *Inversión de la rotación:* se necesitan controladores para cambiar automáticamente la dirección de la rotación de las máquinas mediante el mando de un operador en una estación de control. La acción de inversión de los controladores, es un proceso continuo en muchas aplicaciones industriales.
- *Marcha:* las velocidades y características de operación deseadas son, función y propósito directo de los controladores. Éstos protegen a los motores, operadores, máquinas y materiales, mientras funcionan.
- *Control de velocidad:* los controladores pueden mantener velocidades muy precisas para propósitos de procesos industriales. La variación de velocidad, se puede conseguir con dispositivos mecánicos, que son poco fiables cuando se desea mantener constante el par (troqué) en la máquina o equipos de alta tecnología en electrónica de potencia capaces de mantener el par constante.
- *Seguridad del operador:* muchas salvaguardas mecánicas han dado origen a métodos eléctricos. Los dispositivos piloto de control

eléctrico afectan directamente a los controladores al proteger a los operadores de la máquina contra condiciones inseguras.

- *Protección contra daños:* una parte de la función de una máquina automática es la de protegerse a sí misma contra daños, así como a los materiales manufacturados o elaborados. Por ejemplo, se impiden los atascamientos de los transportadores. Las máquinas se pueden hacer funcionar en reversa, detenerse, trabajar a velocidad lenta o lo que sea necesario para realizar la labor de protección.
- *Protección contra sobrecarga:* la protección durante la marcha y contra sobrecarga, se refieren al mismo caso. La protección contra sobrecarga es una característica esencial de todos los controladores, se diseña para proteger adecuadamente un motor y obtener aun su máxima potencia disponible bajo cierta variedad de condiciones de sobrecarga y temperatura. La sobrecarga puede originarse por un exceso de carga en la máquina impulsada, por un voltaje bajo en la línea, o por una línea abierta en un sistema polifásico, lo que resulta en operación monofásica.
- *Protección contra fase abierta:* la falla de una fase en un circuito trifásico puede producirse por un fusible fundido, una conexión abierta o una línea rota. Si ocurre la falla de una fase cuando el motor se encuentra en reposo, se originarán corrientes en el estator y permanecerán a un valor muy alto, pero el motor continuará estacionario. Como los devanados no están debidamente ventilados mientras el motor está detenido el calentamiento producido por las corrientes altas dañará muy probablemente los embobinados. Un alambre flojo o roto en alguna parte del sistema de conduit, o en una línea de un motor, puede dar por resultado una operación

monofásica. Esto hará que el motor funcione lentamente, con calentamiento excesivo. Algunas veces el motor no arrancará, si no que producirá un zumbido magnético, característico al energizarlo. Esto también es indicio de operación monofásica de un motor trifásico.

- *Protección contra inversión de fase:* si se intercambian dos fases de la línea de alimentación, de un motor trifásico de inducción, éste invertirá su dirección de rotación. Esto se denomina inversión de fase. En la operación de un elevador y en aplicaciones industriales, esto resultaría un daño grave. Los relevadores de falla de fase y de inversión de fase, protegen a los motores, las máquinas y al personal contra riesgos en los casos de fase abierta o inversión de fase.
- *Protección durante el curso:* en los circuitos de control de los arrancadores magnéticos, se utilizan dispositivos piloto para gobernar el arranque, la parada o la inversión de la rotación de los motores eléctricos. Pueden usarse, indistintamente, como dispositivos de control para operación regular o como interruptores de emergencia para impedir funcionamiento incorrecto de la maquinaria. Pueden usarse en sistemas de control automático, a fin de evitar la posibilidad del error humano en la operación de una máquina.
- *Protección mecánica:* una envolvente o carcasa para cualquier aplicación particular, puede contribuir considerablemente a la duración y la operación sin dificultades de un motor y un controlador. Todas las envolventes, como las de propósito general, herméticas, a prueba de polvo, a prueba de explosión y resistentes a la corrosión, tienen aplicaciones e instalaciones específicas. Cada una debe pasar

la aprobación de la división eléctrica del departamento local de construcción y seguridad.

- *Protección contra corto circuito:* los fusibles que se instalan para este propósito y los cortacircuitos, son dispositivos que tratan de proteger los conductores del circuito derivado del motor, los aparatos de control y de potencia, contra sobrecorrientes sostenidas debidas a corto circuitos, escapes a tierra y corrientes prolongadas o excesivas de arranque.

En la actualidad, es común encontrar equipos de alta tecnología y desarrollo en la electrónica de potencia, capaces de realizar el control de velocidad de un motor eléctrico y supervisar variables adicionales, que permiten un mejor control y desempeño de la máquina, claro esta, son de alto costo, pero en casos que se necesiten controladores precisos, el beneficio supera el costo.

Entre las variables, adicionales, supervisadas por un variador de velocidad, encontramos: tensión de alimentación; tensión, corriente, potencia, troqué en el motor; fallos en las líneas de alimentación, estado en las entradas y salidas. Además, poseen control de frenado en el motor, interfase con la CPU del computador, para su configuración (a través del software) o registro de datos.

El control de velocidad realizado por el variador de frecuencia, pueden ser de tipo escalar o vectorial. El control escalar también puede ser utilizado en aplicaciones que no exijan respuesta dinámica rápida, precisión en la regulación de velocidad o alto troqué de arranque. Para la mayoría de las aplicaciones, se recomienda el control vectorial, el cual permite operación en

un rango de variación de velocidad 1:100, precisión en el control de la velocidad de 0,5%, alto troqué de arranque y respuesta dinámica rápida. Otra ventaja de este tipo de control es la mayor robustez contra variaciones súbitas de la tensión de la red de alimentación y de la carga, evitando bloqueos innecesarios por sobrecorriente. Los ajustes necesarios para el buen funcionamiento del control.

### **2.1.9 Transmisión de potencia.**

- *Caja reductora de velocidad.* Las cajas reductoras de velocidad están construidas con engranajes, que pueden ser: tipo helicoidal, sin-fin corona, y cónicos.
  - a. Los engranajes helicoidales, son de gran aplicabilidad en la industria, tienen operación silenciosa, menor vibración y resistencia superior que los engranajes rectos debido al contacto gradual entre los dientes. Cuando se aplican con ejes paralelos, transmiten elevados niveles de potencia, en cambio, con ejes cruzados la transmisión de potencia es poca.
  - b. Los engranajes cónicos, se aplican en mecanismos donde se intercepten los ejes. Son silenciosos y producen baja vibración.
  - c. Los sistemas sin-fin corona pueden ser autobloqueantes, de otra manera, pueden sostener la carga. Son poco eficientes debido al movimiento de deslizamiento relativo entre los dientes y no de rodamiento, como ocurre en los otros engranajes. Este deslizamiento genera calor, significativo en el diseño de máquinas.

- *Acoplamiento para ejes.*
  - a. Rígidos. No permiten movimiento relativo entre los ejes sujetos por este sistema. Son utilizados cuando la precisión y la fidelidad de la transmisión del par de torsión es de especial importancia. Entre este tipo de acoples se conocen, los acoplamientos con prisionero, con cuña y por sujeción.
  - b. Elásticos. A menos de que se tenga cuidado en alinear dos flechas adyacentes, en cualquier tipo de maquinaria puede existir desalineación axial, angular o paralela. La falta de alineación torsional ocurre dinámicamente, cuando una carga impulsada intenta atrasarse o adelantarse al impulsor. Debido a su flexibilidad torsional ofrecen la posibilidad de reducir los choques y las vibraciones torsionales críticas en el sistema, a la vez que compensan deslizamientos de los ejes de transmisión. Entre los acoplamientos elásticos encontramos: acoples de quijadas o cruceta, de disco flexible, engrane y ranuras, helicoidales y en fuelle, por eslabones, clasificados según las desalineaciones permisibles y la potencia transmitida.

### **2.1.10 Sensores de temperatura**

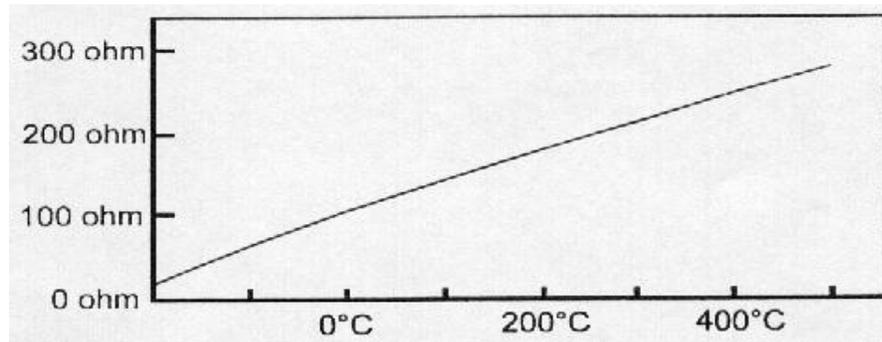
Un sensor es un dispositivo que convierte el valor de una magnitud física (presión, flujo, temperatura, etc.) en una señal eléctrica codificada ya sea en forma analógica o digital. Los sensores, o transductores, analógicos envían, por lo regular, señales normalizadas de 0 a 5 voltios, 0 a 10 voltios ó 4 a 20mA.

Los sensores de temperatura, como las termocuplas J y K junto con los Pt100 son los sensores de temperatura de uso industrial más comunes, económicos y fáciles de reemplazar que existen.

- **PT 100:** Es un sensor de temperatura que consiste en un alambre de platino que a 0 °C tiene 100 ohms y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica.

El incremento de la resistencia no es lineal pero si creciente y característico del platino de tal forma que mediante tablas es posible encontrar la temperatura exacta a la que corresponde.

**Figura 9.** Comportamiento de sensor de temperatura PT100

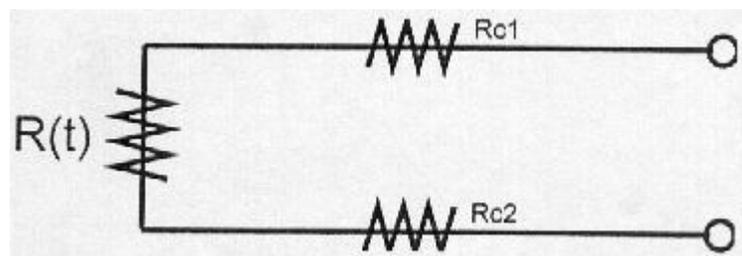


Fuente: <http://www.gmelectronica.com.ar/>

Un Pt100 es un tipo particular de RTD (Dispositivo Termo Resistivo) que normalmente las industriales se consiguen encapsuladas en la misma forma que las termocuplas, es decir dentro de un tubo de acero inoxidable u otro material (vaina), en un extremo está el elemento sensible (alambre de platino) y en el otro está el terminal eléctrico de los cables protegidos dentro de una caja redonda de aluminio (cabezal)

- **Conexión con 2 hilos:** El modo más sencillo de conexión (pero menos recomendado) es con solo dos cables. En este caso las resistencias de los cables  $R_{c1}$  y  $R_{c2}$  que unen la Pt100 al instrumento se suman generando un error inevitable, el lector medirá el total  $R(t)+R_{c1}+R_{c2}$  en vez de  $R(t)$ .

**Figura 10.** Conexión con 2 hilos para sensor de temperatura PT100

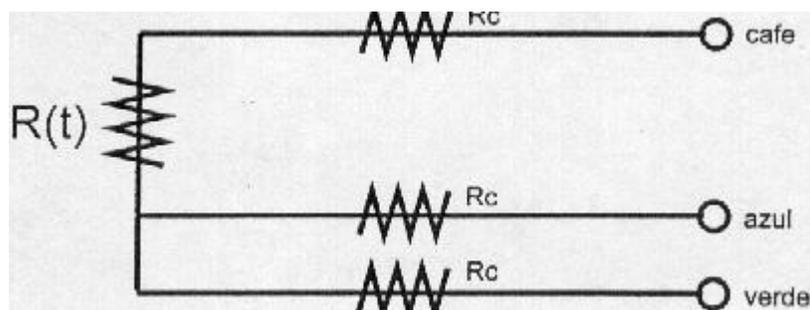


Fuente: <http://www.gmelectronica.com.ar/>

Un cable común razonablemente grueso sería uno de diámetro equivalente a 18 AWG. La resistencia de este cable es 0.0193 ohms por metro.

- **Conexión con 3 hilos:** El modo de conexión de 3 hilos es **el más común** y resuelve bastante bien el problema de error generado por los cables.

**Figura 11.** Conexión con 3 hilos para sensor de temperatura PT100



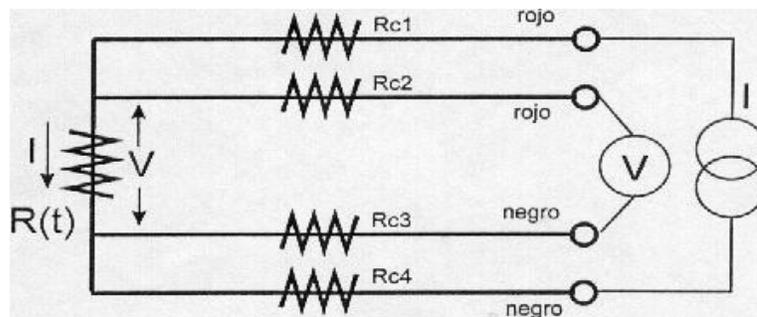
Fuente: <http://www.gmelectronica.com.ar/>

El único requisito es que los tres cables tengan la misma resistencia eléctrica pues el sistema de medición se basa (casi siempre) en el “puente de Wheatstone”. Por supuesto el lector de temperatura debe ser para este tipo de conexión.

En el caso particular de los instrumentos, se hace pasar una corriente conocida a través de los cables azul y verde con lo cual el instrumento mide  $2R_c$ . Luego mide la resistencia por los cables café y azul para finalmente restarle  $2R_c$  al valor medido y obtener  $R(t)$ .

- **Conexión con 4 hilos:** Es el más preciso de todos, los 4 cables pueden ser distintos (distinta resistencia) pero el instrumento lector es el más costoso.

**Figura 12.** Conexión con 4 hilos para sensor de temperatura PT100



Fuente: <http://www.gmelectronica.com.ar/>

Por los cables 1 y 4 se hace circular una corriente  $I$  conocida a través de  $R(t)$  provocando una diferencia de potencial  $V$  en los extremos de  $R(t)$ .

Los cables 2 y 4 están conectados a la entrada de un voltímetro de alta impedancia luego por estos cables no circula corriente y por lo tanto la caída de potencial en los cables  $R_{c2}$  y  $R_{c3}$  será cero ( $dV=I_c \cdot R_c=0 \cdot R_c=0$ ) y el voltímetro medirá exactamente el voltaje  $V$  en los extremos del elemento  $R(t)$

Finalmente el instrumento obtiene  $R(t)$  al dividir  $V$  medido entre la corriente  $I$  conocida.

- **Termocupla:** Las termocuplas son el sensor de temperatura más Común utilizado industrialmente.

Una termocupla se hace con dos alambres de distinto material unidos en un extremo (soldados generalmente). Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño del orden de los milivoltios el cual aumenta con la temperatura.

Normalmente las termocuplas industriales se consiguen encapsuladas dentro de un tubo de acero inoxidable u otro material (Vaina), en un extremo está la unión y en el otro el Terminal eléctrico de los cables, protegidos adentro de una caja redonda de aluminio (cabezal)

Existen una infinidad de tipos de termocuplas, en la Tabla 5 aparecen algunas de las más comunes, pero casi el 90% de las termocuplas utilizadas son de tipo J y del tipo K

**Tabla 5.** Tipos de termocuplas

| Tc<br>Max | Cable +<br>Aleación        | Cable -<br>Aleación      | Rango (Min, Max)<br>°C | Volts<br>mV |
|-----------|----------------------------|--------------------------|------------------------|-------------|
| J         | Hierro                     | Cobre/Nikel              | (-180,750)             | 42.2        |
| K         | Nickel/cromo               | Nickel/aluminio          | (-180,1372)            | 54.8        |
| T         | Cobre                      | Cobre/nickel             | (-250,400)             | 20.8        |
| R         | 87% Platino<br>13% Rhodio  | 100% Platino             | (0,1767)               | 21.09       |
| S         | 90% Platino<br>10% Roído   | 100% Platino             | 0,1767)                | 18.68       |
| B         | 70% Platino<br>30% Platino | 94% Platino<br>6% Rhodio | (0,1820)               | 13.814      |

Fuente: <http://www.gmelectronica.com.ar/>

## 2.2 MARCO TEÓRICO

### 2.2.1 Características de los controladores PID

Se asume un sistema realimentado en forma canónica, es decir, con realimentación unitaria. Una de las estructuras de controladores más populares se denomina Controlador PID en atención a utilizar acciones de tipo Proporcional, Integral y Derivativo.

La relación temporal entre la variable manipulada  $u(t)$  y el error  $e(t)$ , para un controlador PID viene dada por

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

O bien por su equivalente en el plano s

$$U(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) E(s)$$

Todos los métodos de diseño conducen a determinar los valores de  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  que hacen que el sistema de lazo cerrado tenga la respuesta adecuada, medida en términos del cumplimiento de las especificaciones de diseño (error en régimen permanente, velocidad de respuesta permanente  $-t_p$ ,  $t_r$ ,  $t_s$ - y sobreimpulso).

El Método de Ziegler-Nichols indica que inicialmente se deben anular las acciones integral ( $T_i = \infty$ ) y derivativa ( $T_d = 0$ ). Luego incrementar gradualmente  $K_p$  hasta que el sistema justo comience a oscilar. Este punto de inestabilidad es denominado la última ganancia  $P_u$  y último período  $T_u$ . A partir de estos valores, se pueden ajustar las ganancias del controlador PID como se observa en la Tabla 5, para cada una de sus diversas modalidades:

**Tabla 6.** Ajustes de las ganancias del controlador PID

| <b>Acción</b> | <b>Actuación</b>          | <b><math>K_p</math></b> | <b><math>T_i</math></b> | <b><math>T_d</math></b> |
|---------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| P             | Decaimiento $\frac{1}{4}$ | $P_u/2$                 |                         |                         |
| PI            | Decaimiento $\frac{1}{4}$ | $0,45 P_u$              | $T_u/1,2$               |                         |
| PID           | Decaimiento $\frac{1}{4}$ | $0,60 P_u$              | $T_u/2$                 | $T_u/4$                 |
| PID           | Con Sobrepasso            | $P_u/3$                 | $T_u/2$                 | $T_u/3$                 |
| PID           | Sin Sobrepasso            | $P_u/5$                 | $T_u/3$                 | $T_u/2$                 |

Fuente universidad nacional experimental politécnica, Eulogio T. Perez.

El efecto del incremento de las ganancias  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  del controlador PID en un sistema de lazo cerrado se resumen a continuación en la Tabla 6:

**Tabla 7.** Efecto del incremento en un sistema de lazo cerrado

| Parámetro | Tiempo de Crecimiento (Tr) | Sobrepaso (Sp) | Tiempo de Establecimiento (Ts) | Error de Posición (Ep) |
|-----------|----------------------------|----------------|--------------------------------|------------------------|
| $K_p$     | Disminuye                  | Aumenta        | Poco Afectado                  | Disminuye              |
| $T_i$     | Aumenta                    | Disminuye      | Disminuye                      | Eliminado              |
| $T_d$     | Poco Afectado              | Disminuye      | Disminuye                      | Poco Afectado          |

Fuente universidad nacional experimental politécnica, Eulogio T. Perez.

### 2.2.2 Sintonización de controladores PID

Se usará la información que pueda aportar un modelo de proceso para ajustar los parámetros de un PID estándar, para poder sintonizar un controlador se necesita conocer algo del proceso que se desea controlar, ya que mientras mejor sea el conocimiento, mejor será la sintonización. Quizás la forma más elemental de la sintonización parta de la variable de proceso (PV).

**Tabla 8.** Sugerencias para la sintonización

| Tipo de Lazo      | $K_c$    | $T_i$ (min)  | $T_D$ (min) |
|-------------------|----------|--------------|-------------|
| Flujo             | 0.2 - 2  | 0.005 - 0.05 | -           |
| Presión (Líquido) | 0.2 - 2  | 0.005 - 0.05 | -           |
| Presión (Gas)     | 2 - 100  | 1 - 50       | 0.02 - 0.1  |
| Nivel (Líquido)   | 2 - 100  | 1 - 100      | 0.01 - 0.05 |
| Temperatura       | 1 - 50   | 2 - 50       | 0.1 - 20    |
| Cromatógrafo      | 0.05 - 1 | 10 - 120     | 0.1 - 20    |

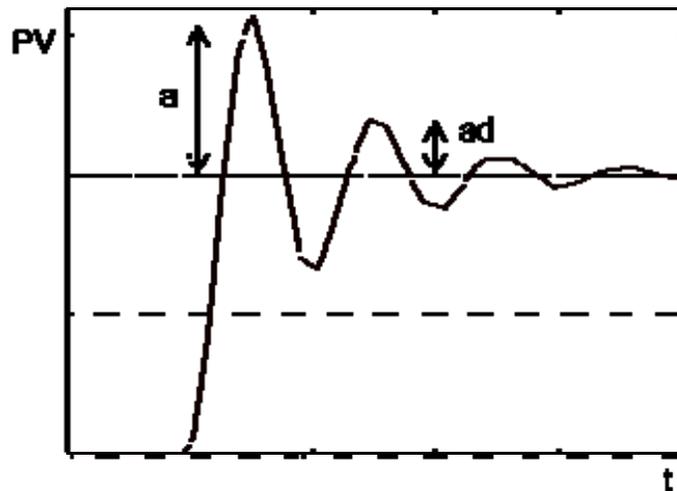
Fuente [www.expertune.com/tutor.html](http://www.expertune.com/tutor.html)

Suponiendo una forma ideal del PID en serie encontrado en la mayoría de los controladores industriales, que tiene la forma:

$$u(s) = K_c \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \left( \frac{T_D s + 1}{0.1 T_D s + 1} \right)$$

Sin lugar a dudas, las estrategias más conocidas para la sintonización de controladores PID son las de Ziegler y Nichols llamadas de Quarter Decay Ratio (QDR) o Reducción en la rata de Elongación y que puede interpretarse como se indica en la Figura 9.

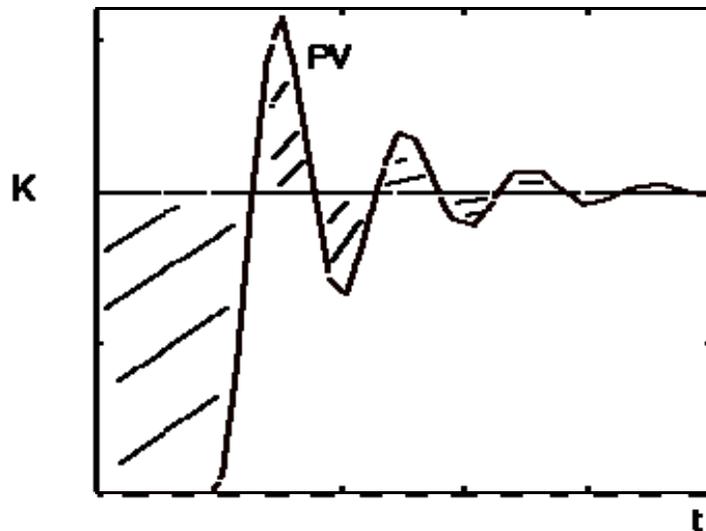
**Figura 13.** Parámetros del QDR



Fuente sintonización de controladores PID, capítulo III.

Otras técnicas de sintonización, utilizan el área del error como parámetro cualitativo, siendo esa área la que se indica en la Figura 14

**Figura 14.** Área de error



Fuente sintonización de controladores PID, capítulo III.

Dentro de las estrategias más comunes que usan el error se tienen:

$$\text{IAE} = \int |e| dt = \text{integral del valor absoluto del error}$$

$$\text{ISE} = \int e^2 dt = \text{integral del cuadrado del error}$$

$$\text{ITAE} = \int t|e| dt = \text{integral del valor absoluto de error por tiempo}$$

$$\text{ITSE} = \int te^2 dt = \text{integral del cuadrado del error por tiempo}$$

En los dos primeros criterios se penalizan grandes errores por los que probablemente se obtendrá un comportamiento lento del sistema para lazos que usan esos procesos de sintonización. En los dos últimos se penaliza el tiempo invertido en llegar al valor final (asumiendo cero off set) y de allí que probablemente se obtendrán respuestas rápidas y con grandes oscilaciones.

En las tablas de sintonización de controladores que siguen, se supone que se tiene un modelo del sistema de la forma FOPDT, esto es:

$$G(s) = \frac{K e^{-T_d s}}{T_s s + 1}$$

O se hará la suposición de que se tienen identificados las ganancias y períodos asociados al último ciclo ( $K_u$ ,  $T_u$ ).

Antes de presentar la tabla de sintonización, se van a introducir dos parámetros de uso común para la identificación de la dificultad de controlar un lazo. Ellos son:

Constante de tiempo normalizada =  $T_N =$

$$\frac{T_d}{T}$$

Que también recibe el nombre de parámetro de controlabilidad.

Radio de ganancia =  $K_R =$

$$\left| \frac{1}{K_u G(0)} \right|$$

Procesos con  $T_N$  y  $K_R$  pequeños son fáciles de controlar.

A continuación en la Tabla 9 se presentarán las técnicas de uso más frecuente para sintonización de controladores PID cuando el sistema es del tipo FOPDT.

Para controladores PID serie:

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \left(\frac{T_D s + 1}{0.1 T_D s + 1}\right)$$

**Tabla 9.** Técnicas para sintonización de controladores PID

| Fórmula   | $K_c$                       | $T_i$                      | $T_D$                      |
|-----------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Z y N     | $1.2/KT_N$                  | $2T_d$                     | $0.5T_d$                   |
| Z y N     | $0.6K_u$                    | $T_d/2$                    | $T_d/8$                    |
| C - C     | -                           | -                          | -                          |
| IMC - PID | $T/[K(T+T_d/2)]$            | $T$                        | $T/2$                      |
| ISE - C   | $1.1907(T_N)^{-0.89711}/K$  | $T(T_N)^{0.9548}/0.7987$   | $0.54766 T(T_N)^{0.87798}$ |
| ISE - R   | $0.71959(T_N)^{-1.03092}/K$ | $T/(1.12666-0.18145 T_N)$  | $0.54568 T(T_N)^{0.86411}$ |
| IAE - C   | $0.98089(T_N)^{-0.76167}/K$ | $T(T_N)^{1.05211}/0.91032$ | $0.59974 T(T_N)^{0.89819}$ |
| IAE - R   | $0.65(T_N)^{-1.04432}/K$    | $T/(0.9895+0.9539 T_N)$    | $0.50814 T(T_N)^{1.08433}$ |
| ITAE - C  | $0.77902(T_N)^{-1.06401}/K$ | $T(T_N)^{0.70949}/1.14311$ | $0.57137 T(T_N)^{1.03826}$ |
| ITAE - R  | $1.12762(T_N)^{-0.80368}/K$ | $T/(0.99783+0.286 T_N)$    | $0.42844 T(T_N)^{1.0081}$  |

Fuente sintonización de controladores PID, capítulo III.

Note que en las tablas se diferencian los parámetros de sintonización para diferentes objetivos de desempeño (a cambios en la referencia o a perturbaciones en la carga).

Los parámetros de sintonización que se muestran en las tablas fueron obtenidos a través de un número importante de simulaciones de casos en los que se buscaba alcanzar los objetivos. En los casos de Ziegler y Nichols el

QDR (o 50% de sobrepico) y en los basados en alguna integral del error, el mínimo de la integral correspondiente.

El criterio de Cohen-Coon está diseñado para un QDR minimizando la integral del error (máximo tiempo integral) para perturbaciones en la carga. El IMC-PID está basada en la teoría de control por modelo interno (IMC) y como se dijo se uso un parámetro de ajuste fino ( $T_{ci}$ ) que es el orden de la constante de tiempo del sistema a lazo cerrado que se espera y se fija a priori.

Todos los parámetros de sintonización funcionan bien cuando la constante de tiempo normalizada (o parámetro de controlabilidad) es menor que 1 ( $T_N < 1$ ).

## **3 METODOLOGIA**

### **3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN**

Empírico – Analítica, ya que la información es extraída de procesos tanto teóricos como analíticos.

### **3.2 LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN DE USB**

Pertenece a tecnologías actuales y sociedad, la cual a su vez hace parte de la sub-línea de facultad de instrumentación y control para la verificación de procesos y esta a su vez hace referencia al campo temático del programa como diseño, instrumentación y control de procesos de manufactura.

### **3.3 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN**

Las técnicas de recolección de información van a ser de fuentes primarias y fuentes secundarias:

- Primarias: Información oral que se ha recopilado de visitas a las industrias de empresas que poseen extrusoras con husillos, dedicadas a la extrusión de propelente sólido amateur.
- Secundarias: Información escrita en documentos, textos o revistas.

### **3.4 HIPÓTESIS**

Se controlará el tiempo total para la obtención del propelente sólido amateur para cuantificar la producción en un periodo de tiempo a futuro y se implementará un controlador digital de temperatura, como instrumento de medición y corrector del error en el sistema.

### **3.5 VARIABLES**

**3.5.1 Variables independientes:** Las variables que son independientes son: la humedad y la cantidad de material.

**3.5.2 Variables dependientes:** La variable que es dependiente es la temperatura.

## 4 DESARROLLO INGENIERIL DEL PROYECTO

### 4.1 EXTRUSORA DE HUSILLO PILOTO

Cuando el propelente alcanza la temperatura de fusión del combustible (aprox. 165°C), se torna sensible a los cambios de temperatura. Cuando es superada o decrementada, en aproximadamente 4°C, se puede presentar quema o acaramelación del material respectivamente. Por esta razón, es importante implementar un control preciso de temperatura.

Para la implementación de este control de temperatura es preciso conocer las dimensiones del husillo, que se extrajeron de la tesis de Jefferson Andrés Cabrera Quintero (figura 15) que son:

$D = 88.8mm$  , diámetro externo en todo el husillo.

$D_r = 50.8mm$  , diámetro de raíz en la zona de fusión.

$\theta = 17^\circ$  , ángulo de la hélice.

$H = 19mm$  , profundidad del canal, en la zona de fusión.

$w = 81.6mm$  , ancho de canal para el husillo.

$P = 85.29mm$  , paso constante de los husillos.

$e = 3.69mm$  , espesor de la hélice,  $e = (P \cos \theta - w)$ .

$N = 6.66rps$  , velocidad rotacional de los husillos.

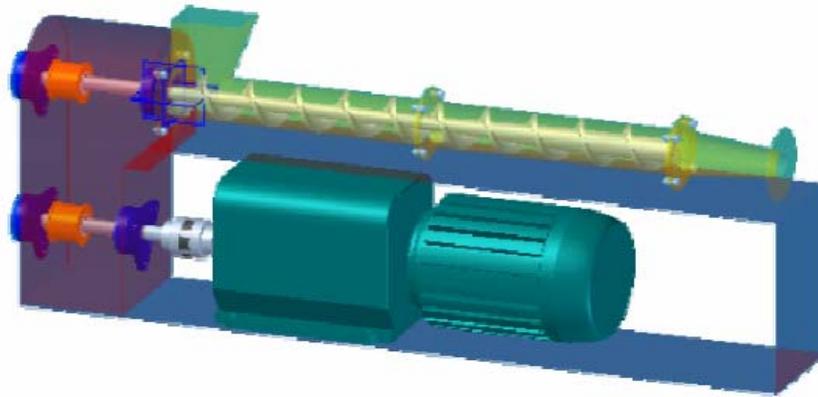
$l_{zd} = 0.1m$  , longitud zona de dosificación.

$\eta = 48 Ns/m^2$  , viscosidad del material.

$P_{r_{max}} = 2524406.83 N/m^2$  , presión en el eje del husillo.

Para facilitar la transferencia de calor en el husillo, este consta de un orificio pasante concéntrico con diámetro ' $d = 15.24mm$ '.

**Figura 15.** Extrusora diseñada.

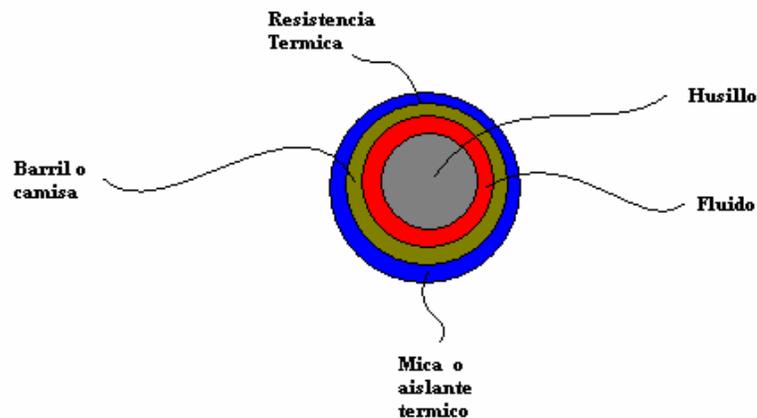


Fuente. Trabajo de grado USB (2005), Diseño y simulación de una extrusora de husillo piloto para un propelente sólido amateur.

#### **4.2 SISTEMA TÉRMICO.**

Se toma como base la extrusora de la figura 15, en la cual en la parte interna tiene un husillo que es donde se controla la temperatura del fluido y se representa como se observa en la figura 16, además la mica es un aislante térmico por lo cual para el análisis del sistema no se tiene en cuenta la transferencia por convección.

**Figura 16.** Sistema que representa el husillo en general.



Fuente autor

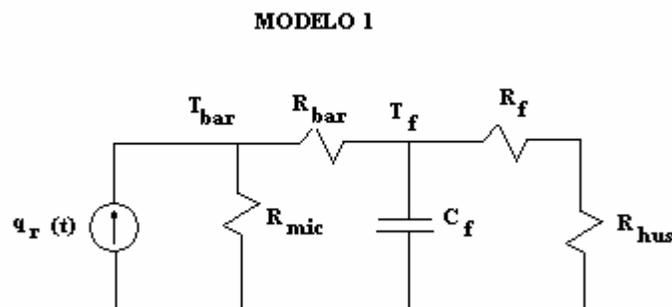
### 4.2.1 Lista de variables

- $q_r$  → Calor que emite la resistencia térmica
- $R_{mic}$  → Resistencia de la mica (aislante térmico)
- $R_{bar}$  → Resistencia del barril.
- $R_f$  → Resistencia del fluido.
- $R_{hus}$  → Resistencia del husillo.
- $C_f$  → Capacitancia del fluido.
- $C_{bar}$  → Capacitancia del barril.
- $C_{hus}$  → Capacitancia del husillo.
- $T_f$  → Temperatura del fluido.
- $T_{bar}$  → Temperatura del barril.
- $T_{hus}$  → Temperatura del husillo.

### 4.2.2 Modelos del sistema térmico

La transferencia de calor para el sistema se da únicamente por conducción y lo rige la ecuación de Fourier<sup>1</sup>, aunque mediante el modelamiento de sistemas térmicos se llega a una aproximación. A continuación se plantean cuatro modelos para el sistema con sus ecuaciones respectivamente:

- Modelo 1 y sistemas de ecuaciones.



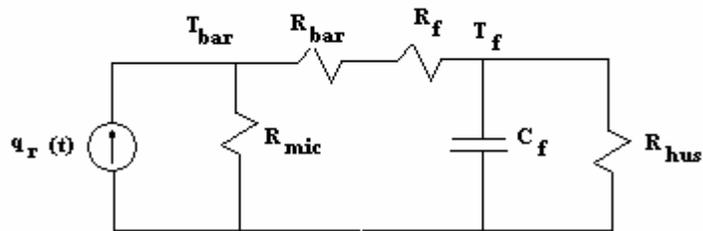
<sup>1</sup> Fundamentos de transferencia de calor, Incropera Frank, 4ª edición

$$q_r(t) = \frac{T_{\text{bar}}}{R_{\text{mic}}} + \frac{T_{\text{bar}} - T_f}{R_{\text{bar}}} \quad \text{Ec.1}$$

$$\frac{T_{\text{bar}} - T_f}{R_{\text{bar}}} = C_f \frac{dT_f}{dt} + \frac{T_f}{R_f + R_{\text{hus}}} \quad \text{Ec.2}$$

- Modelo 2 y sistemas de ecuaciones.

MODELO 2

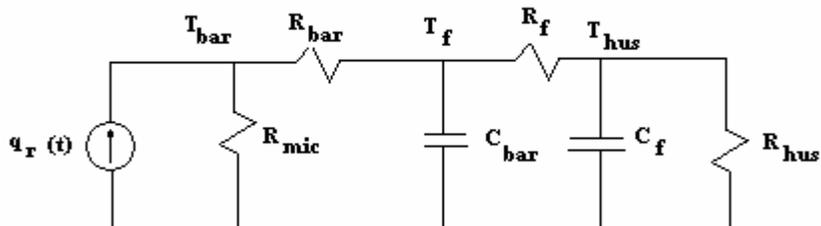


$$q_r(t) = \frac{T_{\text{bar}}}{R_{\text{mic}}} + \frac{T_{\text{bar}} - T_f}{R_{\text{bar}} + R_f} \quad \text{Ec. 1}$$

$$\frac{T_{\text{bar}} - T_f}{R_{\text{bar}} + R_f} = C_f \frac{dT_f}{dt} + \frac{T_f}{R_{\text{hus}}} \quad \text{Ec. 2}$$

- Modelo 3 y sistemas de ecuaciones.

MODELO 3



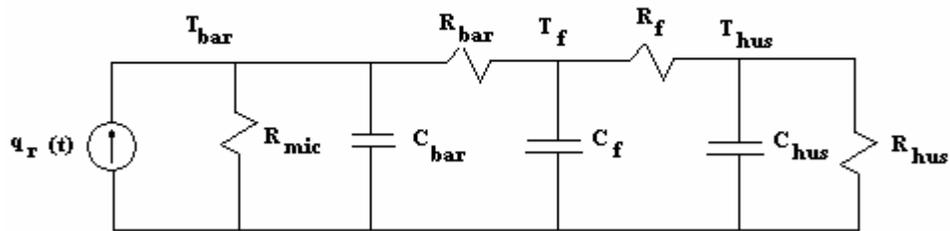
$$q_r(t) = \frac{T_{\text{bar}}}{R_{\text{mic}}} + \frac{T_{\text{bar}} - T_f}{R_{\text{bar}}} \quad \text{Ec. 1}$$

$$\frac{T_{\text{bar}} - T_f}{R_{\text{bar}}} = C_{\text{bar}} \frac{dT_f}{dt} + \frac{T_f - T_{\text{hus}}}{R_f} \quad \text{Ec. 2}$$

$$\frac{T_f - T_{\text{hus}}}{R_f} = C_f \frac{dT_{\text{hus}}}{dt} + \frac{T_{\text{hus}}}{R_{\text{hus}}} \quad \text{Ec. 3}$$

- Modelo 4 y sistemas de ecuaciones.

**MODELO 4**



$$q_r(t) = \frac{T_{\text{bar}}}{R_{\text{mic}}} + C_{\text{bar}} \frac{dT_{\text{bar}}}{dt} + \frac{T_{\text{bar}} - T_f}{R_{\text{bar}}} \quad \text{Ec. 1}$$

$$\frac{T_{\text{bar}} - T_f}{R_{\text{bar}}} = C_f \frac{dT_f}{dt} + \frac{T_f - T_{\text{hus}}}{R_f} \quad \text{Ec. 2}$$

$$\frac{T_f - T_{\text{hus}}}{R_f} = C_{\text{hus}} \frac{dT_{\text{hus}}}{dt} + \frac{T_{\text{hus}}}{R_{\text{hus}}} \quad \text{Ec. 3}$$

### 4.2.3 Modelamiento

El sistema donde se tienen en cuenta la mayoría de variables del proceso es el del modelo No 4, por consiguiente se considera éste como el sistema ideal a manejar:

$$Qr(s) = \frac{T_{bar}(s)}{R_{mic}} + c_{bar} [T_{bar}(s) * s - T_{bar}(0)] + \frac{T_{bar}(s)}{R_{bar}} - \frac{T_f(s)}{R_{bar}}$$

$$0 = \frac{T_{bar}(s)}{R_{bar}} - \frac{T_f(s)}{R_{bar}} - C_f [T_f(s) * s - T_f(0)] - \frac{T_f(s)}{R_f} + \frac{T_{hus}(s)}{R_f}$$

$$0 = \frac{T_f(s)}{R_f} - \frac{T_{hus}(s)}{R_f} - C_{hus}(s) [T_{hus}(s) * s - T_{hus}(0)] - \frac{T_{hus}(s)}{R_{hus}}$$

Teniendo en cuenta las condiciones iniciales como cero, se plantea el sistema de ecuaciones siguiente.

$$Qr(s) = T_{bar}(s) \left[ \frac{1}{R_{mic}} + C_{bar} * s + \frac{1}{R_{bar}} \right] - \frac{T_f(s)}{R_{bar}}$$

$$0 = \frac{T_{bar}(s)}{R_{bar}} - T_f(s) \left[ \frac{1}{R_{bar}} + C_f * s + \frac{1}{R_f} \right] + \frac{T_{hus}(s)}{R_f}$$

$$0 = \frac{T_f(s)}{R_f} - T_{hus}(s) \left[ \frac{1}{R_f} + C_{hus} * s + \frac{1}{R_{hus}} \right]$$

Realizando un arreglo matricial para el sistema, se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \left[ \frac{1}{R_{mic}} + C_{bar} * s + \frac{1}{R_{bar}} \right] & -\frac{1}{R_{bar}} & 0 \\ \frac{1}{R_{bar}} & -\left[ \frac{1}{R_{bar}} + C_f * s + \frac{1}{R_f} \right] & \frac{1}{R_f} \\ 0 & \frac{1}{R_f} & \left[ \frac{1}{R_f} + C_{hus} * s + \frac{1}{R_{hus}} \right] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{bar}(s) \\ T_f(s) \\ T_{hus}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Qr(s) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Desarrollando el sistema, para obtener una función de transferencia en función de la temperatura del fluido y la entrada de calor.

$$\Delta = s^3 (C_{bar} * C_f * C_{hus}) + s^2 \left[ \frac{(R_{hus} + R_f) * C_{bar} * C_f}{R_f * R_{hus}} + \frac{(R_{bar} + R_{mic}) * C_f * C_{hus}}{R_{mic} * R_{bar}} + \frac{(R_f + R_{bar}) * C_{bar} * C_{hus}}{R_{bar} * R_f} \right] + s \left[ \frac{(R_{bar} + R_{mic})(R_{hus} + R_f) * C_f}{R_{mic} * R_{bar} * R_f * R_{hus}} + \frac{(R_f + R_{bar})(R_{hus} + R_f) * C_{bar}}{R_f^2 * R_{bar} * R_{hus}} + \frac{(R_{bar} + R_{mic})(R_f + R_{bar}) * C_{hus}}{R_{bar}^2 * R_{mic} * R_f} - \frac{C_{hus}}{R_{bar}^2} - \frac{C_{bar}}{R_f^2} \right] + \left[ \frac{(R_{bar} + R_{mic})(R_f + R_{bar})(R_{hus} + R_f)}{R_{bar}^2 * R_f^2 * R_{mic} * R_{hus}} - \frac{R_{hus} + R_f}{R_{bar}^2 * R_f * R_{hus}} - \frac{R_{bar} + R_{mic}}{R_f^2 * R_{mic} * R_{bar}} \right]$$

$$\Delta_2 = Qr(s) * \frac{1}{R_{bar}} * \left( \frac{1}{R_f} + C_{hus} * s + \frac{1}{R_{hus}} \right)$$

$$\Delta_2 = \frac{Qr(s)}{R_{bar}} \left( \frac{R_{hus} + R_f}{R_f * R_{hus}} + C_{hus} * s \right)$$

$$\Delta_2 = Qr(s) \left( \frac{R_{hus} + R_f}{R_{bar} * R_f * R_{hus}} + \frac{C_{hus}}{R_{bar}} * s \right)$$

Hallando las constantes involucradas en el proceso:

**Tabla 10.** Materiales del proceso y algunas de sus propiedades físicas.

| Material / Propiedad          | Densidad( $\rho$ )     | Calor Específico( $C_p$ ) | Conductividad Térmica(K) |
|-------------------------------|------------------------|---------------------------|--------------------------|
| <b>Acero AISI 304</b>         | 7900 Kg/m <sup>3</sup> | 515 J / K*Kg              | 16.6 W / m*K             |
| <b>Mica</b>                   | 2900 Kg/m <sup>3</sup> | 50 J / K*Kg               | 0.35 W / m*K             |
| <b>Fluido = Miel de Brezo</b> | 1424 Kg/m <sup>3</sup> | 1960 J / K*Kg             | 0.6 W / m*K              |

Fuente autor

#### 4.2.4 Zona de alimentación

Longitud de la zona de alimentación,  $l = 0.5112 \text{ m}$

*No se ha tenido en cuenta la hélice del husillo pues desde el punto de vista térmico, no contribuye en gran forma a la transferencia de calor ya que el área transversal que esta expuesta al flujo de calor es muy pequeña (ancho de hélice = 3.69 mm)*

- Husillo:

Radio exterior,  $r_{\text{ext}} = 0.015 \text{ m}$

Radio interior,  $r_{\text{int}} = 0.00762 \text{ m}$

Material: Acero AISI 304.

La resistencia del husillo se calcula mediante la siguiente ecuación<sup>2</sup>:

$$R_{\text{hus}} = \frac{\ln(r_{\text{ext}} / r_{\text{int}})}{2 \pi K l}$$
$$R_{\text{hus}} = \frac{\ln(0.015 \text{ m} / 0.00762 \text{ m})}{2 \pi * 16.6 \frac{\text{W}}{\text{m K}} * 0.5112 \text{ m}}$$
$$R_{\text{hus}} = 0.0127 \frac{\text{K}}{\text{W}} \rightarrow \text{zona de alimentación}$$

Con el valor de la resistencia continuamos calculando el volumen y masa del husillo:

$$V = \pi (r_{\text{ext}}^2 - r_{\text{int}}^2) h$$
$$V = \pi [(0.015 \text{ m})^2 - (0.00762 \text{ m})^2] * 0.5112 \text{ m}$$
$$V = 0.000268 \text{ m}^3$$

---

<sup>2</sup> Fundamentos de transferencia de calor, Incropera Frank, 7ª edición

$$m = \rho V$$

$$m = 7900 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0.000268 \text{ m}^3$$

$$m = 2.118 \text{ Kg}$$

Capacitancia del husillo

$$C_{\text{hus}} = Cp * m$$

$$C_{\text{hus}} = 515 \frac{\text{J}}{\text{Kg} * \text{K}} * 2.118 \text{ Kg}$$

$$C_{\text{hus}} = 1090.75 \frac{\text{J}}{\text{Kg}}$$

- Barril

Radio exterior,  $r_{\text{ext}} = 0.0479 \text{ m}$

Radio interior,  $r_{\text{int}} = 0.0449 \text{ m}$

Material: Acero AISI 304.

Resistencia del barril.

$$R_{\text{bar}} = \frac{\ln(r_{\text{ext}} / r_{\text{int}})}{2 \pi K l}$$

$$R_{\text{bar}} = \frac{\ln(0.0479 \text{ m} / 0.0449 \text{ m})}{2 \pi * 16.6 \frac{\text{W}}{\text{m K}} * 0.5112 \text{ m}}$$

$$R_{\text{bar}} = 0.00121 \frac{\text{K}}{\text{W}} \rightarrow \text{zona de alimentación}$$

Volumen y masa del barril.

$$V = \pi(r_{\text{ext}}^2 - r_{\text{int}}^2) h$$

$$V = \pi[(0.0479 \text{ m})^2 - (0.0449 \text{ m})^2] * 0.5112 \text{ m}$$

$$V = 0.0004471 \text{ m}^3$$

$$m = \rho V$$

$$m = 7900 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0.0004471 \text{ m}^3$$

$$m = 3.532 \text{ Kg}$$

Capacitancia del barril

$$C_{\text{bar}} = C_p * m$$

$$C_{\text{bar}} = 515 \frac{\text{J}}{\text{Kg} * \text{K}} * 3.532 \text{ Kg}$$

$$C_{\text{bar}} = 1819.048 \frac{\text{J}}{\text{Kg}}$$

- Fluido (Miel de brezo)

Radio exterior,  $r_{\text{ext}} = 0.0449 \text{ m}$

Radio interior,  $r_{\text{int}} = 0.015 \text{ m}$

Resistencia del fluido.

$$R_f = \frac{\ln(r_{\text{ext}} / r_{\text{int}})}{2 \pi K l}$$

$$R_f = \frac{\ln(0.0449 \text{ m} / 0.015 \text{ m})}{2 \pi * 0.6 \frac{\text{W}}{\text{m K}} * 0.5112 \text{ m}}$$

$$R_f = 0.569 \frac{\text{K}}{\text{W}} \rightarrow \text{zona de alimentación}$$

Volumen y masa del fluido.

$$V = \pi (r_{\text{ext}}^2 - r_{\text{int}}^2) h$$
$$V = \pi [(0.0449 \text{ m})^2 - (0.015 \text{ m})^2] * 0.5112 \text{ m}$$
$$V = 0.00288 \text{ m}^3$$

$$m = \rho V$$

$$m = 1424 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0.00288 \text{ m}^3$$

$$m = 4.096 \text{ Kg}$$

Capacitancia del fluido.

$$C_f = Cp * m$$

$$C_f = 1960 \frac{\text{J}}{\text{Kg} * \text{K}} * 4.096 \text{ Kg}$$

$$C_f = 8027.925 \frac{\text{J}}{\text{Kg}}$$

- Mica (Aislante)

Radio exterior,  $r_{\text{ext}} = 0.0689 \text{ m}$

Radio interior,  $r_{\text{int}} = 0.0489 \text{ m}$

Resistencia de la mica.

$$R_{mica} = \frac{\ln(r_{ext} / r_{int})}{2 \pi K l}$$

$$R_{mica} = \frac{\ln(0.0689 m / 0.0489 m)}{2 \pi * 0.35 \frac{W}{m K} * 0.5112 m}$$

$$R_{mica} = 0.305 \frac{K}{W} \rightarrow \text{zona de alimentación}$$

**Tabla 11.** Características de los materiales en la zona de alimentación

| Material / Variables      | Resistencia | Capacitancia  | Volumen                 | Masa     |
|---------------------------|-------------|---------------|-------------------------|----------|
| Husillo                   | 0.0127 K/W  | 1090.75 J/Kg  | 0.000268 m <sup>3</sup> | 2.118 Kg |
| Barril                    | 0.00121 K/W | 1819.048 J/Kg | 0.000447 m <sup>3</sup> | 3.532 Kg |
| Fluido<br>(Miel de brezo) | 0.569 K/W   | 8027.925 J/Kg | 0.00288 m <sup>3</sup>  | 4.096 Kg |
| Mica                      | 0.305 K/W   | -             | -                       | -        |

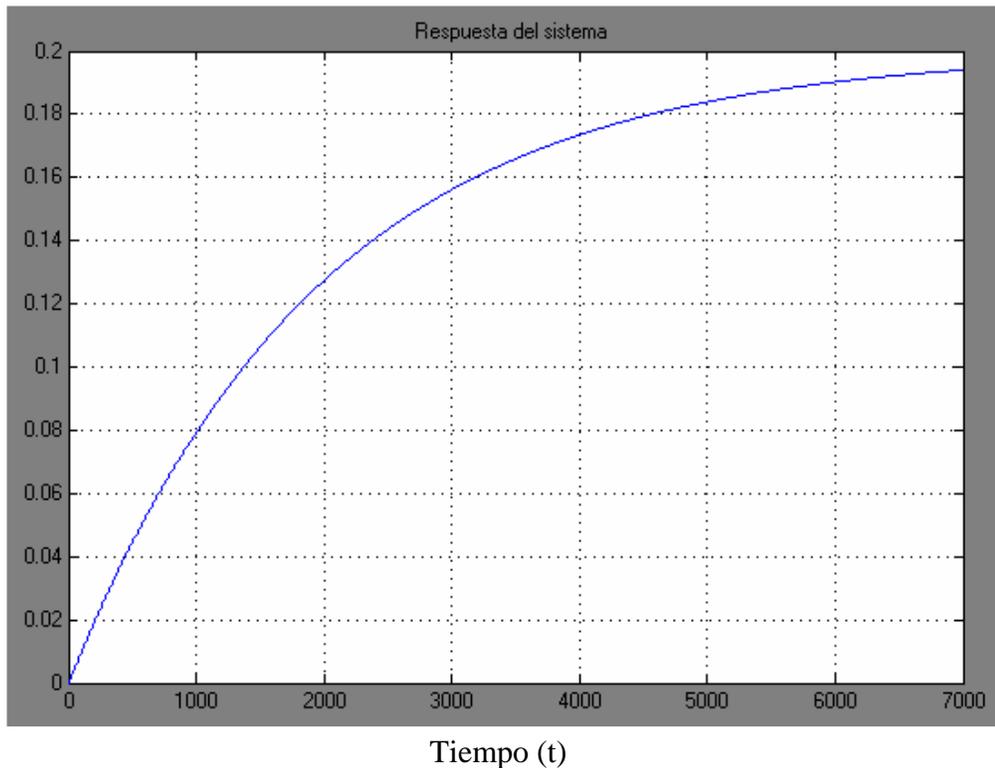
Fuente autor

Reemplazando estos valores en la función de transferencia tenemos que:

$$G(s) = \frac{T_f(s)}{Qr(s)} = \frac{901446.281 * s + 66526.964}{15928.42 * 10^6 * s^3 + 10084.235 * 10^6 * s^2 + 662.0058 * 10^6 * s + 332941.36} * \frac{1}{1 * 10^6}$$

|  |
|--|
| $G(s) = \frac{T_f(s)}{Qr(s)} = \frac{0.90144 * s + 0.06652}{15928.42 * s^3 + 10084.235 * s^2 + 662.0058 * s + 0.332941}$ |
|--|

**Figura 17.** Respuesta del sistema en la zona de alimentación ante una entrada escalón unitario.



Fuente autor

#### 4.2.5 Zona de fusión

Longitud de la zona de fusión,  $l = 0.400$  m

*No se ha tenido en cuenta la hélice del husillo pues desde el punto de vista térmico, no contribuye en gran forma a la transferencia de calor ya que el área transversal que esta expuesta al flujo de calor es muy pequeña (ancho de hélice = 3.69 mm)*

- Husillo.

Radio exterior,  $r_{ext} = 0.015 \text{ m}$

Radio interior,  $r_{int} = 0.00762 \text{ m}$

Material: Acero AISI 304.

Resistencia del husillo.

$$R_{hus} = \frac{\ln(r_{ext} / r_{int})}{2 \pi K l}$$

$$R_{hus} = \frac{\ln(0.015 \text{ m} / 0.00762 \text{ m})}{2 \pi * 16.6 \frac{W}{m K} * 0.400 \text{ m}}$$

$$R_{hus} = 0.0162 \frac{K}{W} \rightarrow \text{zona de fusión}$$

Volumen y masa del husillo.

$$V = \pi (r_{ext}^2 - r_{int}^2) h$$

$$V = \pi [(0.015 \text{ m})^2 - (0.00762 \text{ m})^2] * 0.400 \text{ m}$$

$$V = 0.00021 \text{ m}^3$$

$$m = \rho V$$

$$m = 7900 \frac{Kg}{m^3} * 0.00021 \text{ m}^3$$

$$m = 1.657 \text{ Kg}$$

Capacitancia del husillo

$$C_{hus} = Cp * m$$

$$C_{hus} = 515 \frac{J}{Kg * K} * 1.657 \text{ Kg}$$

$$C_{hus} = 853.480 \frac{J}{Kg}$$

- Barril

Radio exterior,  $r_{ext} = 0.0479 \text{ m}$

Radio interior,  $r_{int} = 0.0449 \text{ m}$

Material: Acero AISI 304.

### Resistencia del barril

$$R_{bar} = \frac{\ln(r_{ext} / r_{int})}{2 \pi K l}$$
$$R_{bar} = \frac{\ln(0.0479 m / 0.0449 m)}{2 \pi * 16.6 \frac{W}{m K} * 0.400 m}$$
$$R_{bar} = 0.00155 \frac{K}{W} \rightarrow \text{zona de fusión}$$

### Volumen y masa del barril

$$V = \pi (r_{ext}^2 - r_{int}^2) h$$
$$V = \pi [(0.0479 m)^2 - (0.0449 m)^2] * 0.400 m$$
$$V = 0.000349 m^3$$
$$m = \rho V$$
$$m = 7900 \frac{Kg}{m^3} * 0.000349 m^3$$
$$m = 2.763 Kg$$

### Capacitancia del barril

$$C_{bar} = Cp * m$$
$$C_{bar} = 515 \frac{J}{Kg * K} * 2.763 Kg$$
$$C_{bar} = 1423.356 \frac{J}{Kg}$$

- Fluido (Miel de brezo)

Radio exterior,  $r_{ext} = 0.0449 m$

Radio interior,  $r_{int} = 0.015 m$

## Resistencia del fluido

$$R_f = \frac{\ln(r_{ext}/r_{int})}{2\pi K l}$$
$$R_f = \frac{\ln(0.0449\text{ m}/0.015\text{ m})}{2\pi * 0.6 \frac{\text{W}}{\text{m K}} * 0.400\text{ m}}$$
$$R_f = 0.727 \frac{\text{K}}{\text{W}} \rightarrow \text{zona de fusión}$$

## Volumen y masa del fluido.

$$V = \pi(r_{ext}^2 - r_{int}^2)h$$
$$V = \pi[(0.0449\text{ m})^2 - (0.015\text{ m})^2] * 0.400\text{ m}$$
$$V = 0.00225\text{ m}^3$$

$$m = \rho V$$

$$m = 1424 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0.00225\text{ m}^3$$

$$m = 3.204\text{ Kg}$$

## Capacitancia del fluido.

$$C_f = Cp * m$$

$$C_f = 1960 \frac{\text{J}}{\text{Kg} * \text{K}} * 3.204\text{ Kg}$$

$$C_f = 6281.652 \frac{\text{J}}{\text{Kg}}$$

- Mica (Aislante)

Radio exterior,  $r_{ext} = 0.0689\text{ m}$

Radio interior,  $r_{int} = 0.0489\text{ m}$

Resistencia de la mica.

$$R_{mica} = \frac{\ln(r_{ext} / r_{int})}{2 \pi K l}$$

$$R_{mica} = \frac{\ln(0.0689 m / 0.0489 m)}{2 \pi * 0.35 \frac{W}{m K} * 0.400 m}$$

$$R_{mica} = 0.390 \frac{K}{W} \rightarrow \text{zona de fusión}$$

**Tabla 12.** Características de los elementos involucrados en el sistema.

| Material / Variables  | Resistencia | Capacitancia  | Volumen                 | Masa     |
|-----------------------|-------------|---------------|-------------------------|----------|
| Husillo               | 0.0127 K/W  | 1090.75 J/Kg  | 0.000268 m <sup>3</sup> | 2.118 Kg |
| Barril                | 0.00121 K/W | 1819.048 J/Kg | 0.000447 m <sup>3</sup> | 3.532 Kg |
| Fluido(Miel de brezo) | 0.569 K/W   | 8027.925 J/Kg | 0.00288 m <sup>3</sup>  | 4.096 Kg |
| Mica                  | 0.390 K/W   | -             | -                       | -        |

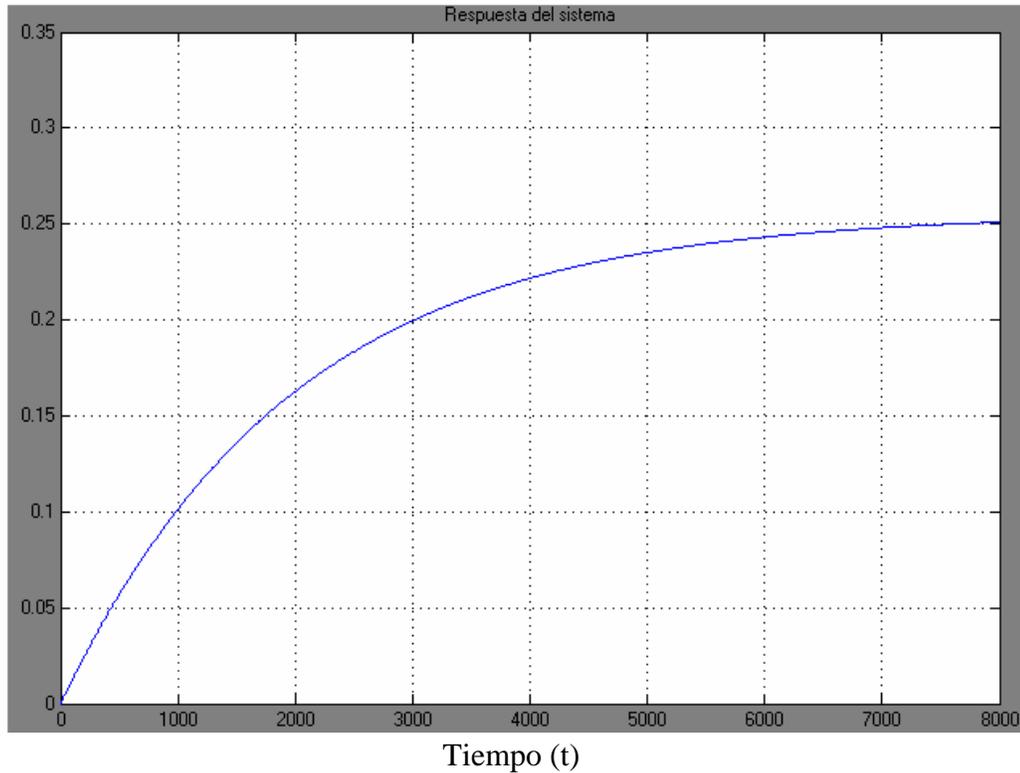
Fuente autor

Al reemplazar en la función de transferencia tenemos que:

$$G(s) = \frac{T_f(s)}{Qf(s)} = \frac{5.5063 * s + 0.4071}{76309.878 * s^3 + 48222.575 * s^2 + 3169.974 * s + 1.594}$$

En la figura mostrada a continuación se puede observar como responde el sistema en lazo abierto ante una entrada escalón unitario.

**Figura 18.** Respuesta del sistema en la zona de fusión ante una entrada escalón unitario.



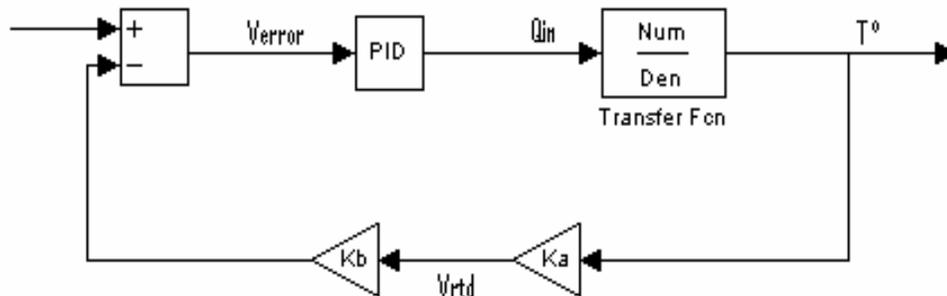
Fuente autor

Teniendo en cuenta que hasta ahora se ha realizado el análisis de la planta que esta conformada por: El elemento actuador (resistencia), planta (el husillo y el aislante), es necesario definir el sensor, y con esto comenzar el diseño del controlador.

### 4.3 SENSORES DE TEMPERATURA

Para el sistema se tiene el diagrama de bloques de la figura 19, ya incluyendo el sensor de temperatura y el controlador

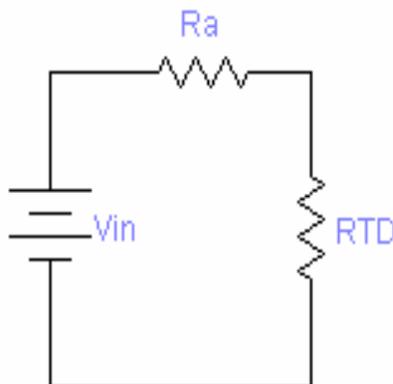
**Figura 19.** Diagrama de bloques del sistema.



Fuente autor

El sensor de temperatura que se utiliza para el diseño es una RTD, ya que su resistencia es lineal a la temperatura con lo que se obtiene una respuesta directa del sistema. Con esto se diseña un divisor de voltaje, para la entrada al controlador PID.

**Figura 20.** Divisor de voltaje para obtener el nivel de tensión necesario en la RTD.



Fuente autor

El voltaje que se tiene en la RTD es:

$$V_{RTD} = \frac{V_{in} \cdot R_{TD}}{R_a + R_{TD}}$$

La RTD que se utiliza es una pt 100 de platino, cuya resistencia a cero grados Celsius es de 100  $\Omega$ , y con un coeficiente de temperatura  $\alpha$  de 0.0035. Con estos datos tenemos la función del valor de resistencia:

$$R_{TD} = R_0(1 + \alpha \cdot t)$$

$$R_{TD} = 0.35 \cdot t + 100$$

Como el objetivo es mantener la temperatura en 165 ° C. Se diseña el divisor para que el diferencial de temperaturas sea de 2.5 V, así vamos a tener que:

$$V_{t(165^\circ C)} - V_{t(0^\circ C)} = 2.5V$$

Utilizando una fuente de 24 Vdc y resolviendo la ecuación se obtienen los siguientes valores de  $R_a$  :

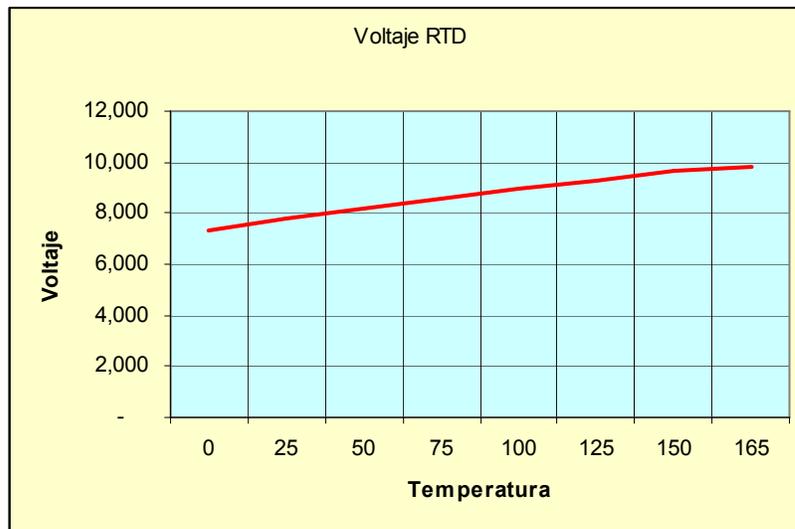
$$\frac{24 \cdot (0.35 \cdot (165) + 100)}{R_a + (0.35 \cdot (165) + 100)} - \frac{24 \cdot (0.35 \cdot (0) + 100)}{R_a + (0.35 \cdot (0) + 100)} = 2.5V$$

$$R_{a1} = 227.22\Omega$$

$$R_{a2} = 69.42\Omega$$

Para obtener a la entrada del controlador de temperatura un diferencial de 0 a 5 Vdc, se tiene que el valor de  $K_b$  debe ser igual a 2, ya que con el divisor se obtuvo un diferencial de 2.5 V. y que el valor de  $K_a$  se obtiene de la gráfica de voltaje vs. Temperatura, representado en la Figura 21.

**Figura 21.** Comportamiento del voltaje en las terminales de la RTD.



Fuente autor

Datos:

**Tabla 13.** Valor en ohmios de la RTD ante cierto nivel de voltaje.

| Temperatura | Voltaje RTD | Resistencia (RTD) $\Omega$ |
|-------------|-------------|----------------------------|
| 0           | 7,335       | 100,000                    |
| 25          | 7,769       | 108,750                    |
| 50          | 8,181       | 117,500                    |
| 75          | 8,572       | 126,250                    |
| 100         | 8,945       | 135,000                    |
| 125         | 9,300       | 143,750                    |
| 150         | 9,639       | 152,500                    |
| 165         | 9,835       | 157,750                    |

Fuente autor

Donde se observa que en la gráfica la función es casi lineal, así que se halla la ecuación de la recta con la que se obtendrá el valor de ganancia  $K_a$ :

$$V_{RTD} = K_a \cdot t + 7.335$$

$$V_{RTD} = 0.015 \cdot t + 7.335$$

$$K_a = 0.015$$

Según el diagrama planteado anteriormente, se puede definir el sensor por la constante 0.03, resultado del producto de  $K_a \cdot K_b$ .

#### 4.4 ESTABILIDAD DEL SISTEMA

La estabilidad del sistema se comprobara utilizando el criterio de estabilidad Routh, con el cual podemos verificar si existen o no raíces inestables en una ecuación polinomial, sin necesidad de obtenerlas en realidad.

“Para evaluar la el polinomio, inicialmente el mismo se escribe de la siguiente manera:

$$a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n = 0$$

Donde los coeficientes son cantidades reales y además  $a_n \neq 0$ , de modo que no exista la posibilidad de cualquier cero.

Si alguno de los coeficientes es cero o negativo, ante la presencia de al menos un coeficiente positivo, hay una raíz, o raíces imaginarias o que tiene partes reales positivas, por lo se puede asegurar en tal caso, que el sistema no es estable.

Si todos los coeficientes del polinomio son positivos, se deben ordenar los mismos en un arreglo de renglones y columnas de la siguiente manera:

$$\begin{array}{rcccc}
 s^n & a_0 & a_2 & a_4 & a_6 \dots \\
 s^{n-1} & a_1 & a_3 & a_5 & a_7 \dots \\
 s^{n-2} & b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \dots \\
 s^{n-3} & c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \dots \\
 s^{n-4} & d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \dots \\
 & \cdot & \cdot & \cdot & \\
 & \cdot & \cdot & \cdot & \\
 & \cdot & \cdot & \cdot & \\
 s^2 & e_1 & e_2 & & \\
 s^1 & f_1 & & & \\
 s^0 & g_1 & & & 
 \end{array}$$

Donde los coeficientes  $b_1, b_2, \text{etc.}$ , se evalúan del modo siguiente:

$$\begin{array}{l}
 b_1 = \frac{a_1 a_2 - a_0 a_3}{a_1} \\
 b_2 = \frac{a_1 a_4 - a_0 a_5}{a_1} \\
 b_3 = \frac{a_1 a_6 - a_0 a_7}{a_1} \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot
 \end{array}$$

Proceso que continua hasta que todas las restantes son cero.

$$\begin{array}{rcl}
c_1 & \frac{b_1 a_3 - a_1 b_2}{b_1} & d_1 \frac{c_1 b_2 - b_1 c_2}{c_1} \\
c_2 & \frac{b_1 a_5 - a_1 b_3}{b_1} & d_2 \frac{c_1 b_3 - b_1 c_3}{c_1} \\
c_3 & \frac{b_1 a_7 - a_1 b_4}{b_1} & \cdot \\
\cdot & & \cdot \\
\cdot & & \cdot \\
\cdot & & \cdot
\end{array}$$

El proceso continua hasta que se completa el n-esimo renglón. El criterio de estabilidad de Routh plantea que el número de raíces del polinomio analizado con partes reales positivas es igual al número de cambios de signo de los coeficientes de la primera columna del arreglo.

Al resumir, las condiciones necesarias y suficientes para que todas las raíces del polinomio se encuentren en el semiplano izquierdo del plano s y por ende la función de transferencia se estable es que, todos los coeficientes de dicho polinomio sean positivos y que todos los términos de la primera columna del arreglo tengan signo positivo.”

- Zona de alimentación.

La función de transferencia obtenida es la siguiente:

$$G(s) = \frac{T_f(s)}{Qr(s)} = \frac{0.90144 * s + 0.06652}{15928.42 * s^3 + 10084.235 * s^2 + 662.0058 * s + 0.332941}$$

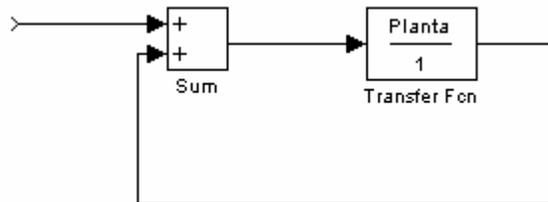
Al tomar el polinomio característico y ordenarlo para realizar el procedimiento descrito tenemos:

|       |           |         |
|-------|-----------|---------|
| $s^3$ | 15928.420 | 662.005 |
| $s^2$ | 10084.235 | 0.333   |
| $s^1$ | 661.479   |         |
| $s^0$ | 0.333     |         |

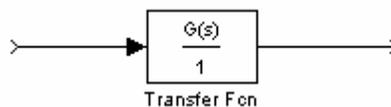
Es fácil notar que las reglas antes explicadas se cumplen a cabalidad, por lo que podemos asegurar que en la zona de alimentación el sistema es estable.

- Zona de alimentación en lazo cerrado

Para calcular la función de transferencia en lazo cerrado utilizamos el algebra de bloques:



$$G(s) = \frac{planta(s)}{1 \pm planta(s)}$$



Con lo que tenemos que la función de transferencia calculada en lazo cerrado es la siguiente:

$$G(s) = \frac{T_f(s)}{Qr(s)} = \frac{0.90144 * s + 0.06652}{15928.42 * s^3 + 10084.235 * s^2 + 662.90724 * s + 0.399461}$$

Al tomar el polinomio característico y ordenarlo para realizar el procedimiento descrito tenemos:

|       |           |           |
|-------|-----------|-----------|
| $s^3$ | 15928.420 | 662.90724 |
| $s^2$ | 10084.235 | 0.399461  |
| $s^1$ | 662.276   |           |
| $s^0$ | 0.399461  |           |

Es fácil notar que las reglas antes explicadas se cumplen a cabalidad, por lo que podemos asegurar que en la zona de alimentación en lazo cerrado para el sistema es estable.

- Zona de fusión

En esta zona la función de transferencia obtenida esta representada por la siguiente expresión:

$$G(s) = \frac{T_f(s)}{Q_r(s)} = \frac{5.5063 * s + 0.4071}{76309.878 * s^3 + 48222.575 * s^2 + 3169.974 * s + 1.594}$$

Al tomar el polinomio característico y ordenarlo para realizar el procedimiento descrito tenemos:

|       |           |          |
|-------|-----------|----------|
| $s^3$ | 76309.878 | 3169.974 |
| $s^2$ | 48222.575 | 1.594    |
| $s^1$ | 3167.451  |          |
| $s^0$ | 1.594     |          |

Según el criterio de Routh el sistema es estable también en su zona de fusión; Una vez se sabe el sistema estable, es posible seguir con el diseño de los controladores.

- Zona de fusión en lazo cerrado

Para la zona de fusión en lazo cerrado la función de transferencia calculada esta representada por la siguiente expresión:

$$G(s) = \frac{T_f(s)}{Qr(s)} = \frac{5.5063 * s + 0.4071}{76309.878 * s^3 + 48222.575 * s^2 + 3175.4803 * s + 2.0011}$$

Al tomar el polinomio característico y ordenarlo para realizar el procedimiento descrito tenemos:

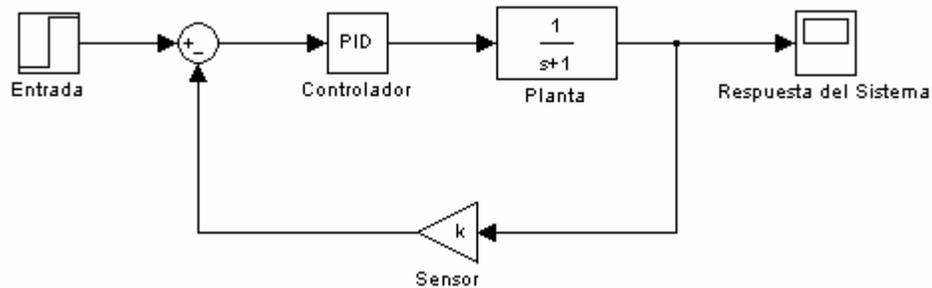
|       |           |           |
|-------|-----------|-----------|
| $s^3$ | 76309.878 | 3175.4803 |
| $s^2$ | 48222.575 | 2.0011    |
| $s^1$ | 3172.3137 |           |
| $s^0$ | 2.0011    |           |

Según el criterio de Routh el sistema es estable en su zona de fusión en lazo cerrado.

#### 4.5 DISEÑO DEL CONTROLADOR

A partir de un estudio en la industria de las extrusoras se observa que se utiliza comúnmente los pirómetros como el del Anexo B, por este motivo se selecciono un controlador PID. Se procede con el diseño del controlador ya que se poseen los elementos necesarios para esto, teniendo en cuenta que se define el sistema de la siguiente forma.

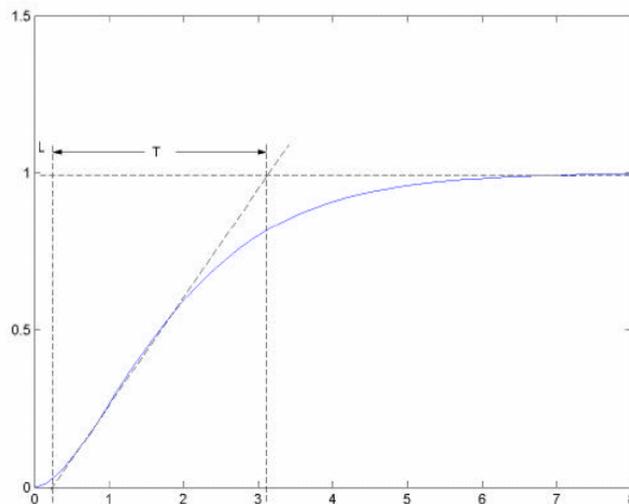
**Figura 22.** Diagrama de bloques del sistema.



Fuente autor

Iniciando con el diseño del controlador de la zona de alimentación, en el cual se debe elevar la temperatura a 165 °C, teniendo en cuenta la tolerancia de  $\pm 4^{\circ}\text{C}$  para mantener las propiedades del fluido, estables y funcionales. Al observar la figura 16 y 17, de la respuesta del sistema (en su zona de alimentación y de fusión) en lazo abierto, se nota un comportamiento de “s”, lo cual se acomoda a un diseño de PID basado en el primer método de Ziegler-Nichols. El cual consiste en trazar una línea tangente al punto de inflexión para encontrar los parámetros L y T definidos por el método según la figura:

**Figura 23.** Primer método de ziegler - Nichols



Fuente. El autor

De este modo a partir de la respuesta a lazo abierto del sistema, se calculan los parámetros  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  mediante la tabla No 14.

**Tabla 14.** Valor de las constantes involucradas en el diseño del controlador PID.

| Tipo de Controlador | $K_p$    | $T_i$    | $T_d$  |
|---------------------|----------|----------|--------|
| <b>P</b>            | $T/L$    | $\infty$ | 0      |
| <b>PI</b>           | $0.9T/L$ | $L/0.3$  | 0      |
| <b>PID</b>          | $1.2T/L$ | $2L$     | $0.5L$ |

Fuente autor

Con esto se tiene que:

$$L = 10$$

$$T = 2295$$

Y la función de transferencia del PID se expresa de la siguiente forma:

$$G_C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Estos valores se reemplazan en la tabla 14 y se define la función de transferencia del controlador.

$$K_p = 275,4$$

$$T_i = 20$$

$$T_d = 5$$

$$G_c(s) = 275.4 \left( 1 + \frac{1}{20s} + 5s \right)$$

En la zona de fusión es importante mantener esta temperatura para lograr que el fluido obtenga las propiedades requeridas. Realizando el mismo proceso que en el diseño anterior y siguiendo las reglas de Ziegler-Nichols, las constantes involucradas en el cálculo L y T son:

$$L = 16$$

$$T = 2046$$

Con apoyo de la Tabla 14 se obtiene:

$$K_p = 153.45$$

$$T_i = 32$$

$$T_d = 8$$

La función de transferencia del PID se expresa de la siguiente forma:

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Reemplazando los valores obtenidos tenemos que:

$$G_c(s) = 153.45 \left( 1 + \frac{1}{32s} + 8s \right)$$

$$G_c(s) = 153.45 + \frac{4.8}{s} + 1227.6s$$

## 5. PRESENTACION DE RESULTADOS

- Zona de alimentación:

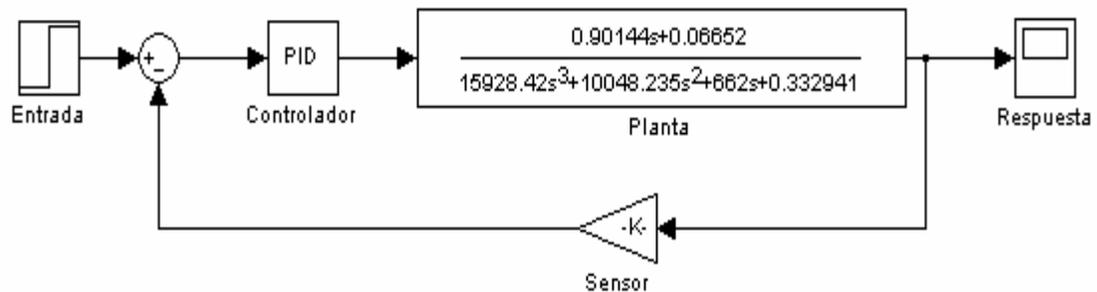
Reemplazando los valores obtenidos se tiene que:

$$G_c(s) = 275.4 \left( 1 + \frac{1}{20s} + 5s \right)$$

$$G_c(s) = 275.4 + \frac{13.77}{s} + 1377s$$

Al reemplazar esta función en el diagrama mostrado en la figura:

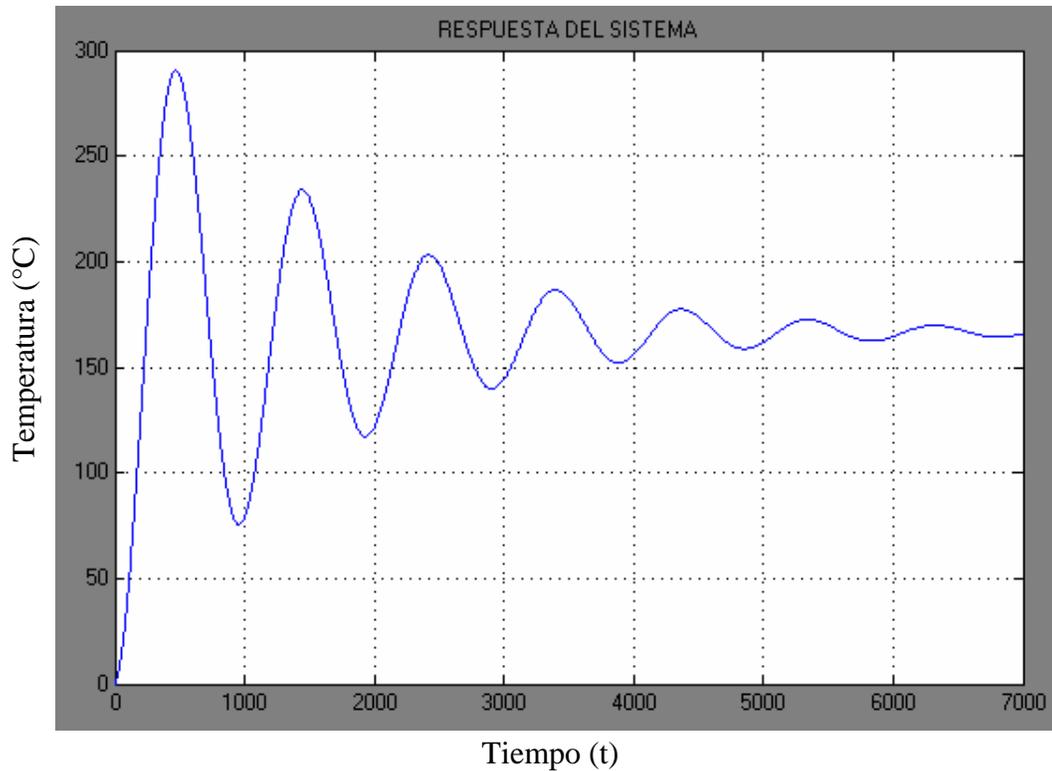
**Figura 24.** Diagrama de bloques del sistema en la zona de alimentación, con el PID.



Fuente autor

Se obtiene la siguiente respuesta del sistema:

**Figura 25.** Respuesta del sistema con la primera aproximación del controlador PID.

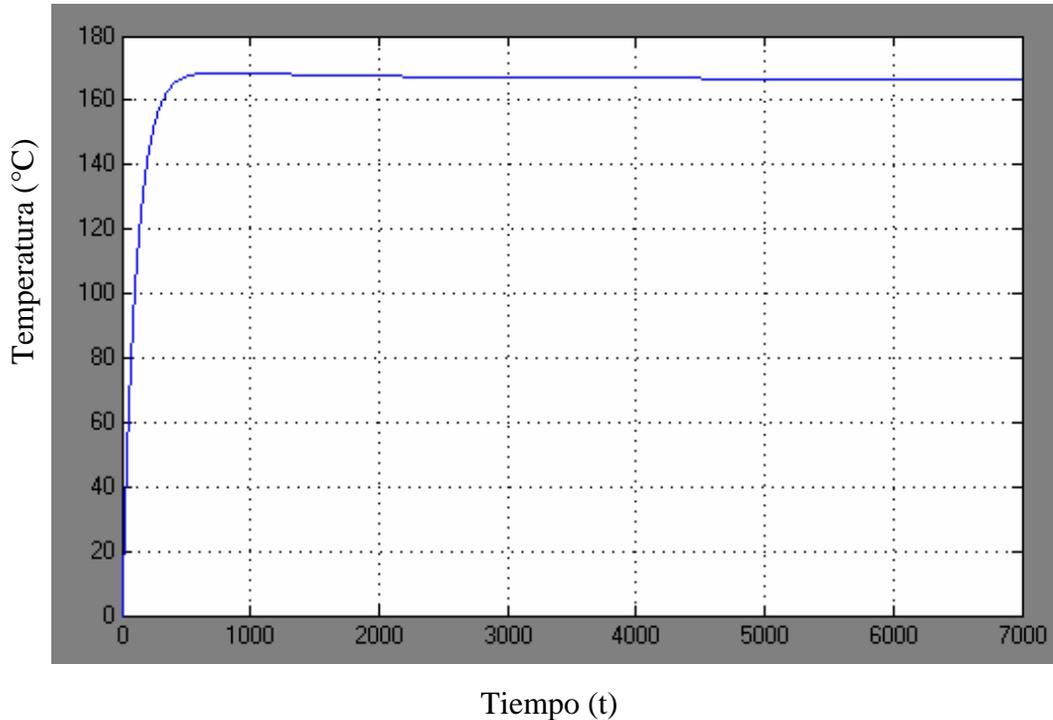


Fuente autor

Se observa que la respuesta transitoria del sistema no es la deseada, pero cabe notar que el primer método de Ziegler-Nichols, es un punto de partida o una aproximación para comenzar a realizar la sintonización del PID.

Después de realizar la sintonización del PID, se obtiene la siguiente respuesta.

**Figura 26.** Respuesta del sistema después de sintonizar el PID.



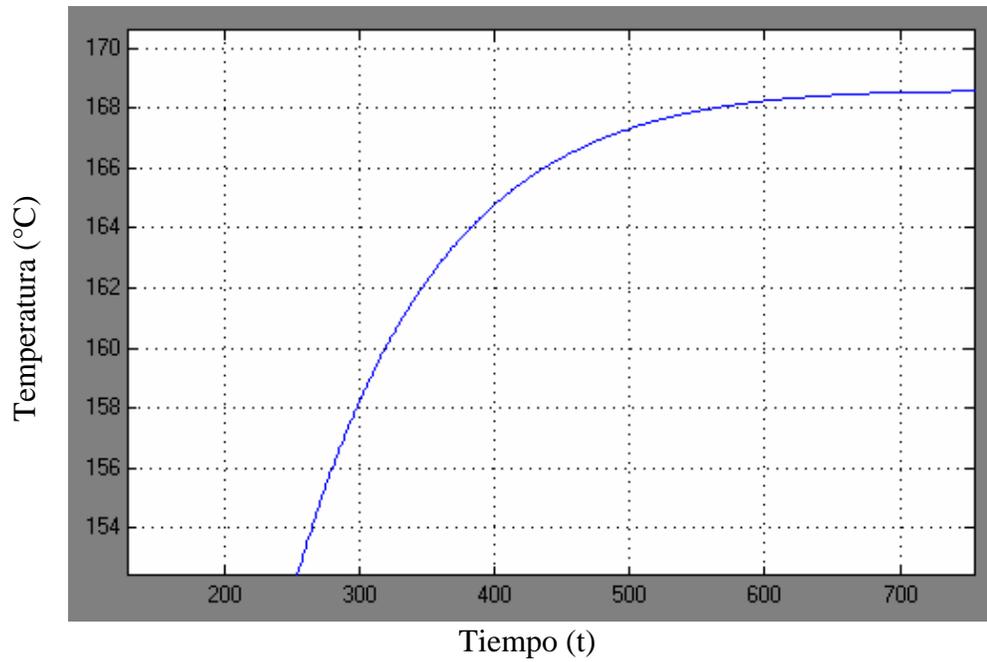
Fuente autor

El PID con el que se obtuvo la respuesta anterior es el siguiente:

$$G_C(s) = 3000 + \frac{2}{s} + 100s$$

Se nota que el sistema se estabiliza en 165 °C, temperatura que se estableció para la zona de alimentación, temperatura que se alcanza en 400 s, es decir aproximadamente 7 minutos. Una de las condiciones iniciales establecidas era que la temperatura no excediera la tolerancia de  $\pm 4^\circ\text{C}$ , objetivo que se cumplió en toda su magnitud afirmación que se puede confirmar en la figura 27.

Figura 27. Vista detallada de la respuesta del sistema.



Fuente autor

- Zona de fusión:

La función de transferencia del PID se expresa de la siguiente forma:

$$G_C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

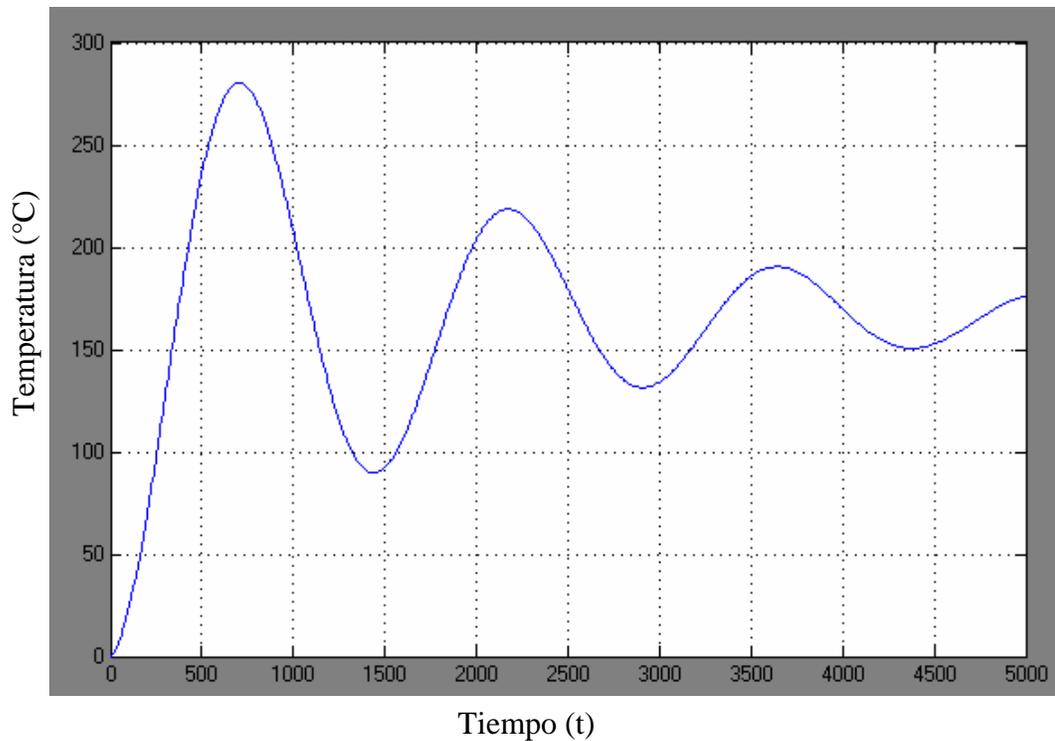
Reemplazando los valores obtenidos tenemos que:

$$G_C(s) = 153.45 \left( 1 + \frac{1}{32s} + 8s \right)$$

$$G_c(s) = 153.45 + \frac{4.8}{s} + 1227.6s$$

Al reemplazar esta función en el diagrama de bloques, se obtiene la respuesta del sistema con la primera aproximación del controlador PID.

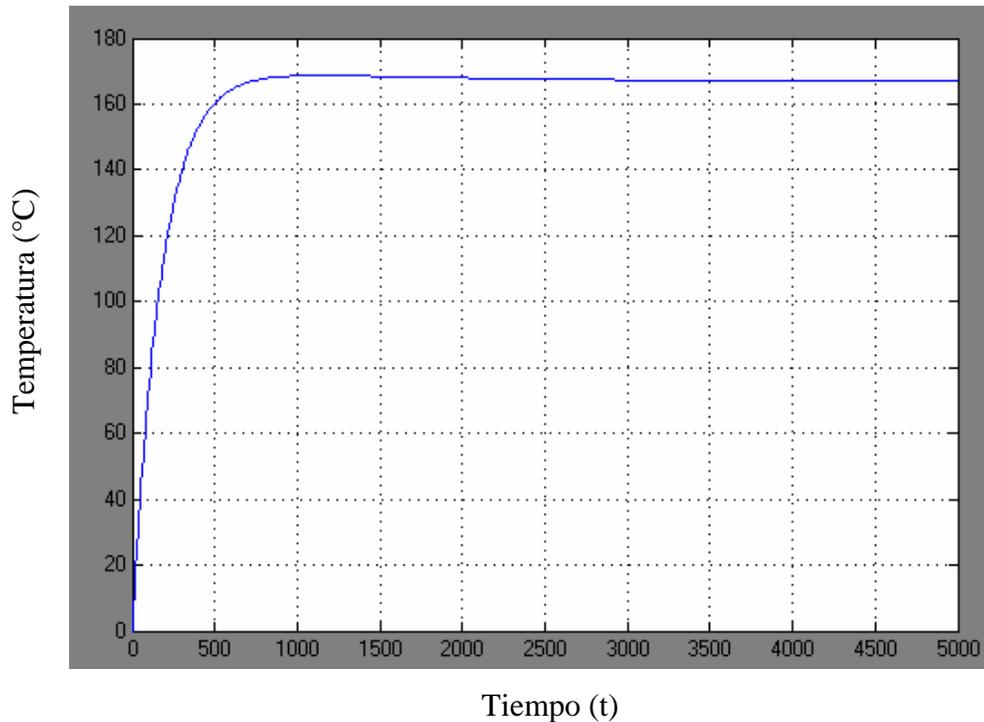
**Figura 28.** Respuesta del sistema en la zona de fusión con los valores de PID obtenidos.



Fuente autor

Tras sintonizar el PID se obtuvo la siguiente respuesta.

**Figura 29.** Respuesta del sistema en la zona de alimentación tras la sintonización del PID.



Fuente autor

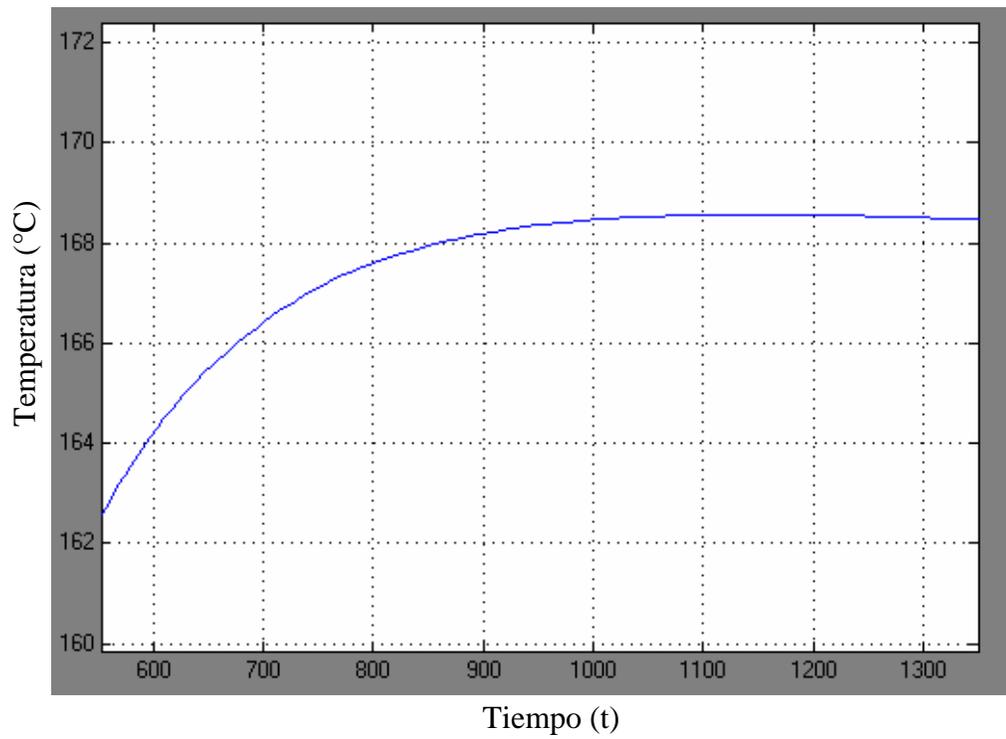
Debido a que en la zona de alimentación la temperatura ya ha alcanzado los 165°C, al llegar el fluido a la zona de fusión, la comparación que realiza el sensor (RTD) con la entrada, arroja un error mínimo y el controlador solo se encargará de mantener la temperatura en dicho valor.

En esta zona es igual de crítico el hecho de poder mantener la temperatura con una tolerancia de  $\pm 4^{\circ}\text{C}$ , siendo esto la prioridad de esta etapa.

Los valores del PID obtenidos con la última sintonización son los siguientes:

$$G_C(s) = 1500 + \frac{0.94}{s} + 150s$$

**Figura 30.** Vista detallada de la respuesta del sistema en la zona de fusión.



Fuente autor

## CONCLUSIONES

- Se pudieron estudiar los modelos para la transferencia de calor propuestos para cada una de las tres formas de transferencia. Se estudió la ley de enfriamiento de Newton, la cual hallada de manera empírica completamente, permite hallar pérdidas por calor entre un objeto caliente y el medio, cuando la diferencia en temperaturas es pequeña. El principal inconveniente de ésta ley proviene del hecho, en que involucra procesos de transferencia de calor por conducción, convección y radiación.
- El estudio de la ley de Fourier mostró ser bastante útil, teniendo en cuenta las propiedades térmicas de cada material, para modelar la transferencia de calor por conducción. También se mostró la conductividad térmica de los materiales y lo relacionado que están con las propiedades de éstos y su geometría, conociendo la dificultad que se puede presentar para determinar la conductividad térmica.
- En la sintonización de los controladores PID, cuando se utiliza el primer método de ziegler – nichols la primera aproximación no siempre es la más apropiada; se recomienda realizar pruebas mediante ensayo y error para obtener la respuesta deseada.
- Cuando se utilizan materiales aislantes para el recubrimiento de las resistencias térmicas, la transferencia de calor no se ve afectada por la temperatura del ambiente.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Asrom K y Hagglund T., "PID Controllers: Theory, Design and Tuning", ISA Press, 1995.
- [2] Corripio A., "Tuning of Industrial Control Systems", ILM, ISA Press, 1990.
- [3] Astrom K y Wittenmark B., "Computer Controlled Systems", Prentice Hall, 1984.
- [4] Kuo B., "Automatic Control", Prentice Hall, 1990.
- [5] Phillips y Harbor, "Feedback Control Systems", Prentice Hall, 1990
- [6] Dormido S y Morilla F., "Autosintonía y Métodos de Antiwindup en los Reguladores PID", Apuntes del XV Curso de Automática en la Industria, AEIA, 1995.
- [7] Stephanopoulous G, "Chemical Process Control. An Introduction to Theory and Practice. Prentice Hall, 1994.
- [8] Ho W., Gan O., Tay E Y Ang E., "Performance and Gain and Phase Margins of Well-Known PID Tuning Formulas", IEEE Control Syst. Tech. No. 4, 1996.
- [9] Ho W., hang C., Zhou J., "Performance and Gain and Phase Margins of Well-Known PI Tuning Formulas", IEEE Control Syst. Tech., No. 2, 1995.
- [10] Khan B. y Lehman B., "Setpoint PI Controllers for Systems with Large Normalized Dead Time", IEEE Control Syst. Tech., No. 4, 1996.
- [11] Ho. W, Hang C y Cao L., "Tuning of PID Controllers Based on Gain and Phase Margin Specifications", Automatica, No. 3, 1995.
- [12] Ho W., Hang C. y Zhou J., "Self-Tuning PID Control of a Plant with Under-Damped Response with Specifications on Gain and Phase Margins", IEEE Control Syst. Tech., No. 5, 1997.

- [13] Astrom K., Hang C., Persson P. y Ho W., "Towards Intelligent PID Control", Automática, No. 1, 1992.
- [14] Zhuang M. y Atherton D., " Automatic Tuning of Optimum PID Controllers", IEE Proceedings-D, No. 3, 1993.

**ANEXO A.** Ficha internacional de seguridad química para el nitrato de potasio

Fichas Internacionales de Seguridad Química

**NITRATO DE POTASIO**

**ICSC: 0184**

| NITRATO DE POTASIO<br>Nitrato potásico<br>$\text{KNO}_3$<br><br>Masa molecular: 101.1, Densidad: $2.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$<br>CAS: 7757-79-1<br>RTECS: TT3700000<br>ICSC: 0184<br>NU: 1486 |  |   |   |
|---|--|---|---|
| TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICIÓN  | PELIGROS/SÍNTOMAS AGUDOS   | PREVENCIÓN  | LUCHA CONTRA INCENDIOS/ PRIMEROS AUXILIOS   |
| <b>INCENDIO</b>   | No combustible, pero facilita la combustión de otras sustancias.   | NO poner en contacto con agentes combustibles o reductores. | En caso de incendio en el entorno: están permitidos todos los agentes extintores. |
| <b>EXPLOSIÓN</b>  | Riesgo de incendio y explosión en contacto con agentes reductores. |   |   |
| <b>EXPOSICIÓN</b>   |  | ¡EVITAR LA DISPERSIÓN DEL POLVO!                            |   |
| • <b>Inhalación</b>   | Tos (véase Ingestión).   | Extracción localizada o protección respiratoria.            | Aire limpio, reposo y proporcionar asistencia médica.                             |

|   |   |   |  |
|---|---|---|--|
| • Piel  | Enrojecimiento.   | Guantes protectores.  | Quitar las ropas contaminadas, aclarar y lavar la piel con agua y jabón.   |
| • Ojos  | Enrojecimiento, dolor.  | Gafas de protección de seguridad.   | Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto, si puede hacerse con facilidad) y proporcionar asistencia médica. |
| • Ingestión   | Dolor abdominal, labios o uñas azuladas, piel azulada, vértigo, dificultad respiratoria.                                  | No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.<br>Lavarse las manos antes de comer. | Enjuagar la boca.  |
| <b>DERRAMES Y FUGAS</b>   | <b>ALMACENAMIENTO</b>   | <b>ENVASADO Y ETIQUETADO</b>  |  |
| Barrer la sustancia derramada e introducirla en un recipiente de plástico o vidrio. Eliminar el residuo con agua abundante. | Separado de sustancias combustibles y reductoras.   | Clasificación de Peligros NU:<br>5.1<br>Grupo de Envasado NU: III                     |  |
| <b>INFORMACIÓN IMPORTANTE</b>   |   |   |  |
| <b>ICSC: 0184</b>   | Preparada en colaboración entre el IPCS y la CCE. © CCE, IPCS, 1991.<br>Versión española traducida y editada por el INSHT |   |  |

Fichas Internacionales de Seguridad Química

NITRATO DE POTASIO

ICSC: 0184

D  
A  
T  
O  
S  
  
I  
M  
P  
O  
R  
T  
A  
N  
T  
E

**ESTADO FÍSICO; ASPECTO**

Polvo cristalino, inodoro, entre incoloro y blanco.

**PELIGROS QUÍMICOS**

La sustancia se descompone al calentarla intensamente o al arder, produciendo óxidos de nitrógeno y oxígeno, que aumenta el peligro de incendio.

La sustancia es un oxidante fuerte y reacciona con materiales combustibles y reductores.

**LIMITES DE EXPOSICIÓN**

TLV no establecido.

**VÍAS DE EXPOSICIÓN**

La sustancia se puede absorber por inhalación del aerosol y por ingestión.

**RIESGO DE INHALACIÓN**

La evaporación a 20°C es despreciable; sin embargo, se puede alcanzar rápidamente una concentración nociva de partículas en el aire cuando se dispersa.

**EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN**

La sustancia irrita los ojos, la piel y el tracto respiratorio.

La sustancia puede causar efectos en la sangre, dando lugar a la formación de metahemoglobina.

Los efectos pueden aparecer de forma no inmediata. Se recomienda vigilancia médica.

**PROPIEDADES FÍSICAS**

Se descompone por debajo del punto de ebullición a 400°C con formación de oxígeno.

Punto de fusión: 333-334°C

Densidad relativa (agua = 1): 2.1

Solubilidad en agua, g/100 ml a 25°C: 35.7

## ANEXO B. Pirómetro serie TZ4

### Serie TZ4 CONTROLADORES DE TEMPERATURA PID

# Autonics

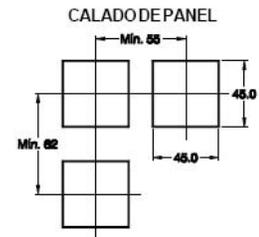
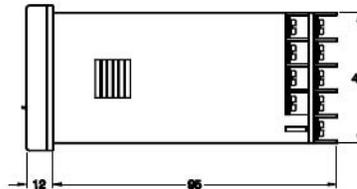
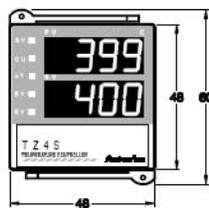
#### CARACTERISTICAS

- Acepta 15 tipos de entradas (Pt100, Termocupla, Tensión o Corriente)
- Fuente de alimentación conmutada 100 a 240 V CA o V CC
- Dos tipos de control PID, rápido (PIDF) o lento (PIDS)
- Autosintonía de los parámetros PID
- Salida de control a relé, capacidad 3A 250VCA, opcional, salida para SSR o salida 4-20mA
- Salida de alarma a relé, capacidad 1A 250VCA, opcional 2 salidas de alarma
- Display doble de cuatro dígitos
- Tamaño 1/16DIN (48x48 mm) ó 1/8 DIN (96x48 mm)
- Segundo set point seleccionable por contacto externo
- Rampas independientes de subida y bajada del valor deseado
- Indicadores luminosos de estado de salidas y modos de control



#### DIMENSIONES

##### TZ4ST



##### TZ4H

