

1.2 MOTIVACION

Las investigaciones sobre combustibles sintéticos, conversión de energía solar y el desarrollo de nuevas máquinas son algunas de las disciplinas que están creciendo, respondiendo al estado de disminución de los recursos naturales. Como todas las industrias ponen mucho énfasis en la eficiencia de la energía, la medición fundamental de temperatura asume una nueva importancia.

Una gran mayoría del equipo industrial que utiliza instrumentos de medición de temperatura para controlar el proceso son de operación continua, sin embargo, estos deben de ser calibrados periódicamente para asegurar su buen funcionamiento. Las plantas necesitan interrumpir la producción en sus equipos para verificar estas calibraciones, afectando esto el rendimiento productivo del equipo. En muchos de los procesos, el hecho de interrumpirlos, no solamente afecta en la continuidad de la operación, sino también en la estabilización del mismo al tiempo de ponerlos en operación de nuevo.

Debido a estas razones, la disponibilidad de un método indirecto que permita determinar el correcto funcionamiento de los equipos de medición, en este caso de temperatura, sería de gran importancia, ya que los procedimientos de revisión y recalibración de estos equipos se realizarían solo en caso necesario.

En la actualidad, las industrias que han obtenido un Certificado de Calidad o que desean obtenerlo, se ven en la necesidad de calibrar sus equipos rigurosamente, por lo cual esta herramienta podrá ser de gran utilidad.

1.3 LIMITACIONES

La aplicación de observadores de estado para verificar las mediciones de temperatura en un proceso de extrusión, persigue evitar interrupciones innecesarias de operación del equipo y por consecuencia, aumentar la productividad.

Este trabajo representa un primer paso hacia el establecimiento de un método para validar las lecturas de los sensores de temperatura, razón por la cual se restringió el alcance de la investigación. Este trabajo presenta dos limitaciones básicas; primero, no se realizó una extensa búsqueda bibliográfica para identificar todos los posibles modelos matemáticos de extrusión; tomando en cuenta que las características de estos modelos varían en dependencia de las dimensiones del extrusor, y el tipo de materia prima, se decidió adecuar el modelo desarrollado por el Dr. Carlos A. Guerrero Salazar [2], destacado profesor investigador de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

La segunda limitación de este trabajo es que los resultados obtenidos, que demuestran el excelente desempeño del observador de estado para estimar las temperaturas del proceso, son en base a simulaciones en computadora digital. Aún falta validar su desempeño en tiempo real, donde se podrán evaluar los posibles errores originados por las simplificaciones del método utilizado.

No obstante estas limitaciones, la aplicación de este método en ambientes industriales puede llegar a proporcionar resultados satisfactorios una vez que sea implementado.

1.4 ESTRUCTURA

La APLICACION DE OBSERVADORES DE ESTADO PARA VERIFICAR LAS MEDICIONES DE TEMPERATURA EN UN PROCESO DE EXTRUSION consiste en simular una serie de señales a un modelo de extrusión, para obtener un resultado y comportamiento del mismo y posteriormente hacer lo mismo con el observador de estado, para después analizar estos resultados y poder llegar a una conclusión del estado del instrumento de medición.

Para esto primeramente se describen las características y el comportamiento de los sensores de temperatura, así como también algunos conceptos de exactitud y errores de medición. Después se describe el funcionamiento de un extrusor de plásticos, las características básicas, las partes principales que lo componen y se utiliza o adecua un modelo matemático que caracteriza el comportamiento dinámico de las temperaturas en cada zona del proceso. Posteriormente se analizan los conceptos de controlabilidad y observabilidad, se describe el procedimiento para el diseño de un observador de estado de orden completo y se diseña éste en base a un modelo simplificado del proceso de extrusión. Finalmente se analizan los resultados de las simulaciones, donde se verifica la adaptación del extrusor para esta aplicación, así como el comportamiento del observador de estado propuesto en esta tesis como un método indirecto para la verificación de los registros de temperatura de los equipos de medición asociados y se describen las principales conclusiones, así como las aportaciones y las recomendaciones para trabajos de investigación futuros en este tema.

CAPITULO 2

INSTRUMENTO DE MEDICION

2.1 INTRODUCCION

La medición de temperatura en cualquier proceso de fabricación es de vital importancia para asegurar la calidad del producto, por lo cual es necesario reducir al máximo los errores de medición y la necesidad de detectar mediciones erróneas en estos equipos; debido a esto es necesario contar con un método para verificar la medición de temperatura sin parar el proceso, evitando así pérdidas del producto y reduciendo costos de operación.

Los transductores de temperatura mas comunes son cuatro: el termopar, el RTD (detector de temperatura por resistencia), el termistor y el sensor de circuito integrado (ver Fig. 2.1), [7]. A pesar de la gran popularidad del termopar, éste es frecuentemente sustituido por un RTD, como en la aplicación que describiremos mas adelante; por esta razón nos concentraremos en las técnicas de medición del RTD.


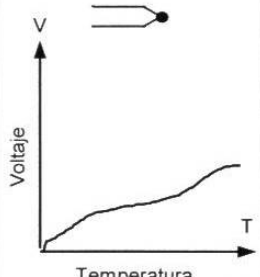

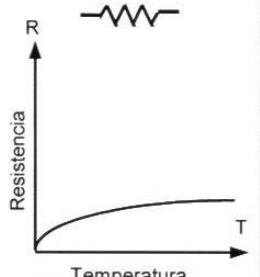

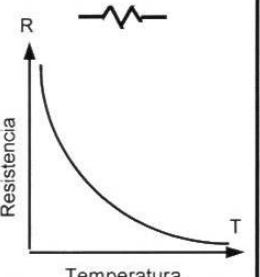

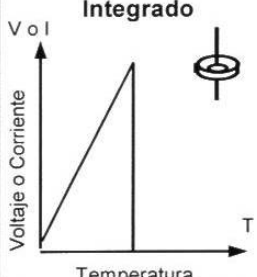
	Termopar  	RTD  	Termistor  	Sensor de Circuito Integrado  
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Autoalimentado. • Simple. • De uso rudo. • Barato. • Amplia variedad. • Amplios rangos de temperatura. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mas estable. • Mas preciso. • Mas lineal que el termopar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta salida. • Rápido. • Medición de resistencia de dos cables. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mas lineal. • La mas alta salida. • Barato.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • No lineal. • Bajo voltaje. • Requiere referencia. • Menos estable. • Menos sensible. 	<ul style="list-style-type: none"> • Caro. • Requiere una fuente de corriente. • Pequeño delta R. • Baja resistencia absoluta. • Se autocalienta. 	<ul style="list-style-type: none"> • No lineal. • Limitado rango de temperatura. • Frágil. • Requiere una fuente de corriente. • Se autocalienta. 	<ul style="list-style-type: none"> • $T < 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ • Requiere una fuente de voltaje. • Lento. • Se autocalienta. • Configuraciones limitadas.

Fig. 2.1. Listado comparativo de ventajas y desventajas de los sensores de temperatura mas comunes.

2.2 CARACTERISTICAS DE UN RTD

Los elementos de resistencia son las unidades sensoras de temperatura, y vienen en muchas formas, conformando los diferentes estándares, capaces de medir diferentes rangos de temperatura con varios tamaños y exactitudes disponibles. Pero todos funcionan de la misma manera: cada uno tiene un valor de resistencia prespecificada a una temperatura conocida, la cual cambia de una manera predicable. De esta manera, midiendo la resistencia del elemento, la temperatura del elemento puede ser determinada

de tablas, cálculos o instrumentación. Existen dos tipos de elementos: de alambre enrollado y de película delgada.

Elementos de alambre enrollado.- Los elementos de los RTD's estándar están hechos de alambre de Platino con una pureza de 99.99% enrollados en un núcleo de cerámica o vidrio y herméticamente sellados en una cápsula de cerámica o vidrio. El alambre de platino fue seleccionado debido a que reunía las necesidades de precisión termométrica. Este resiste la contaminación, puede ser altamente refinado y es estable eléctrica y mecánicamente.

Los elementos están disponibles de acuerdo a las siguientes dos curvas [7]:

Europea $\alpha = 0.00385 \text{ ohms / ohm / } ^\circ\text{C}$

Americana $\alpha = 0.00392 \text{ ohms / ohm / } ^\circ\text{C}$

Los elementos cumplen con el 0.1 % de tolerancia del estándar DIN y cumplen con el estándar DIN 43760.

Elementos de película delgada.- Están hechos de Platino depositado como una película en una base y encapsulado. Este método permite la producción de pequeños sensores, de rápida respuesta y precisos.

Estos elementos de resistencia son el corazón del RTD. Generalmente un elemento de resistencia desnudo es demasiado frágil y sensible para ser usado de esta manera, así que tiene que ser protegido dentro de un RTD. Un detector de temperatura por resistencia es un término general para cualquier dispositivo que sensa temperatura por medio de la medición del cambio de la resistencia de un material; en la Fig. 2.2 se muestran algunos elementos de resistencia. Los RTD's vienen en muchas formas, pero usualmente vienen con una funda. Una sonda RTD es un ensamble compuesto de un elemento de resistencia, una funda, cables de extensión y una terminación o conexión. La funda, un tubo con terminación cerrada, inmoviliza el elemento, protegiéndolo

contra humedad y el medio a ser medido. La funda además da protección y estabilidad a los cables de extensión de los frágiles alambres del elemento.

Algunas sondas RTD pueden ser combinadas con termopozos para protección adicional. En este tipo de aplicaciones, el termopozo no solamente agregará protección al RTD, además sellará cualquier sistema que el RTD mida (un tanque o boiler, por ejemplo) del contacto con éste. Esto llega a ser una gran ayuda en el reemplazo del RTD sin tener que drenar el tanque o sistema.

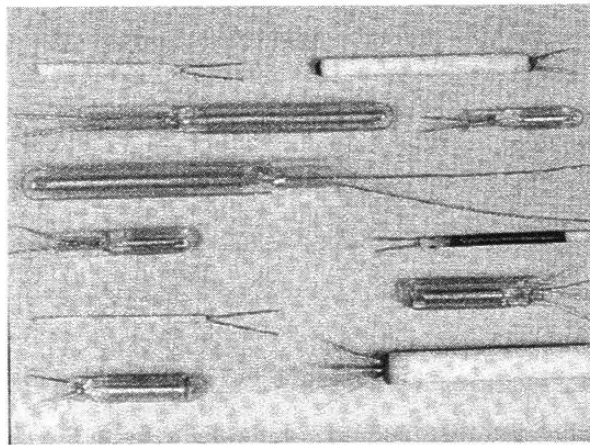


Fig. 2.2. Elementos de resistencia.

Los termopares son un viejo intento y método verdadero de medición de temperatura eléctricamente. Estos funcionan muy diferente que los RTD's, pero generalmente aparecen en la misma configuración, frecuentemente con funda y posiblemente en un termopozo. Básicamente estos operan con el efecto de Seebeck, el cual resulta en un cambio en la fem termoeléctrica inducida por un cambio de temperatura. Muchas aplicaciones se prestan tanto para RTD's o termopares. Los termopares tienden a ser mas robustos, libres de errores de autocalentamiento y pueden usar un gran surtido de instrumentación. Sin embargo, los RTD's especialmente los de platino, son mas estables y exactos.

2.3 CONFIGURACION DE LAS PUNTAS DE CONEXION

Como se mencionó anteriormente, el elemento de un Detector de Temperatura por Resistencia (RTD) generalmente viene en una funda. Obviamente, todos los criterios aplicables a los elementos de resistencia también se aplican aquí, pero además deberán ser considerados el tamaño del elemento, la construcción y las dimensiones del ensamble completo del RTD. Ya que las puntas de conexión usadas entre el elemento de resistencia y el instrumento de medición tienen una propia resistencia, se tienen que proporcionar recursos para compensar esta inexactitud [7]. En la Fig. 2.3 se describe la configuración de dos puntas (Estilo 1).

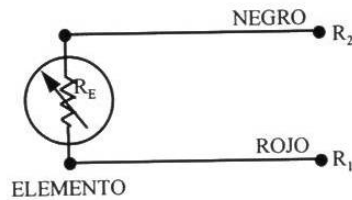


Fig. 2.3. Configuración de dos puntas (Estilo 1).

El círculo representa los límites del elemento de resistencia del punto de calibración. Una configuración de 2, 3 ó 4 puntas tendrá que extenderse del punto de calibración de tal manera que todas las resistencias fuera del punto de calibración serán compensadas.

El elemento de resistencia proporciona una cierta precisión a la medición de temperatura. Desafortunadamente, cuando se toma la lectura de resistencia, el instrumento indica R_{TOTAL} :

$$\text{Donde } R_T = R_1 + R_2 + R_E$$

Esto produce una lectura de temperatura más alta que la que está siendo medida actualmente. Muchos sistemas pueden ser calibrados para eliminar este problema.

Muchos RTD's incorporan una tercera punta con resistencia R_3 . Esta punta es conectada a uno de los lados del elemento de resistencia junto con la punta 2, como se muestra en la Fig. 2.4.

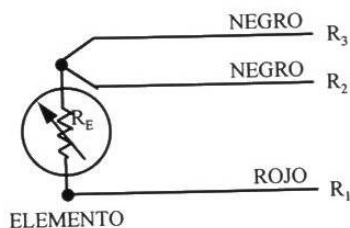


Fig. 2.4. Configuración de tres puntas (Estilo 2).

Esta configuración tiene una conexión a una de las puntas del sensor y dos conexiones a la otra punta del sensor. Conectadas a un instrumento diseñado para aceptar una señal de entrada de tres conexiones, se obtiene la compensación de resistencia de las puntas y del cambio de resistencia en las puntas, debido a la temperatura. Esta es la configuración mas comúnmente usada.

Si los tres cables usados en las puntas de conexión son idénticos y de igual longitud, entonces $R_1 = R_2 = R_3$. Midiendo la resistencia a través de las puntas 1, 2 y el elemento de resistencia, se obtendrá la resistencia total del sistema ($R_1 + R_2 + R_E$). Además es medida la resistencia a través de las puntas 2 y 3 ($R_2 + R_3$), con esto se obtiene la resistencia solo de los cables de la puntas de conexión, y ya que la resistencia de todos los cables son iguales, restando este valor ($R_2 + R_3$) de la resistencia total del sistema ($R_1 + R_2 + R_E$) da como resultado R_E , obteniendo una medición precisa de temperatura.

Una configuración de cuatro puntas de conexión es también usada (ver Fig. 2.5). Se suministran dos conexiones a cada lado del sensor. Esta construcción es usada para mediciones de más alta precisión.

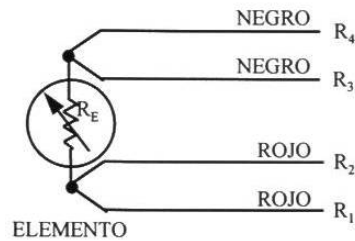


Fig. 2.5. Configuración de cuatro puntas (Estilo 3).

En esta configuración de cuatro puntas, circula una corriente constante a través de las puntas externas 1 y 4, y la caída de voltaje es medida a través de las puntas internas 2 y 3. De esta forma se determina el valor de resistencia del elemento, sin efectos de la resistencia de los cables de las puntas de conexión. Esto ofrece una ventaja sobre la configuración de tres puntas, sólo si se usan cables diferentes y este es un caso muy raro.

Existe otra configuración, ahora poco común, que consiste en dos puntas estándar con un lazo cerrado de cable a un costado (Fig. 2.6). Esta funciona de igual forma que la configuración de tres puntas, pero usa un cable extra para hacerlo. Un par de cables separados se suministran en forma de lazo para obtener la compensación de resistencia de las puntas y de los cambios ambientales en la resistencia de las puntas.

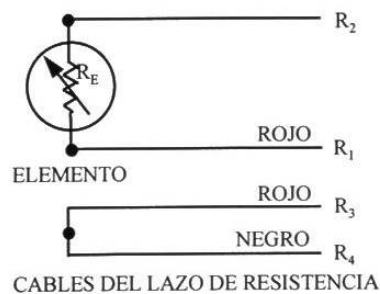


Fig. 2.6. Configuración de dos puntas mas lazo (Estilo 4).

2.4 MEDICION DE RESISTENCIA

Los valores comunes de resistencia para un RTD de platino son desde 10 ohms para los modelos de construcción normal hasta varios miles de ohms para RTD's de película. El valor más común es de 100 ohms a 0 °C. En el estándar DIN 43760, el coeficiente de temperatura del cable de platino es $\alpha = 0.00385$. Para un cable de 100 ohms, este corresponde a + 0.385 ohms / °C a 0 °C. Este valor de α es actualmente el promedio de la pendiente de 0 a 100 °C. El cable de platino químicamente más puro usado en estándares de resistencias de platino tiene un α de + 0.00392 ohms / ohm / °C.

Ambos valores, la pendiente y el absoluto son números pequeños, especialmente cuando consideramos el hecho de que desde la punta de los cables de medición hacia el sensor pueden tener varios ohms o inclusive decenas de ohms. Un cable de pequeña impedancia puede contribuir con error significativo a nuestra medición de temperatura.

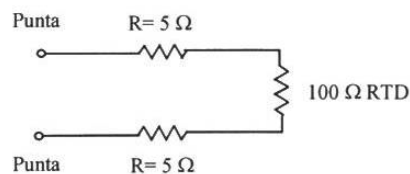


Fig. 2.7. Efecto de la resistencia de los cables de las puntas de conexión.

Un alambre de 10 ohms de impedancia implica $10/0.385 \approx 26$ °C de error en la medición (ver Fig. 2.7). Inclusive el coeficiente de temperatura del alambre de las puntas puede contribuir al error de medición. El método clásico para evitar este problema ha sido el uso de un puente (ver Fig. 2.8).

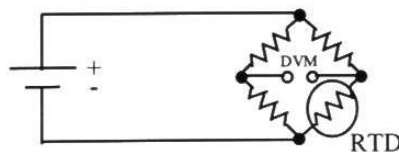


Fig. 2.8. Puente de Wheatstone.

La salida de voltaje del puente es una indicación indirecta de la resistencia del RTD. El puente requiere cuatro cables de conexión, una fuente externa y tres resistencias que tengan un coeficiente de temperatura de cero. Para evitar someter las tres resistencias del puente a la misma temperatura que el RTD, éste es separado del puente por medio de un par de cables de extensión (ver Fig. 2.9).

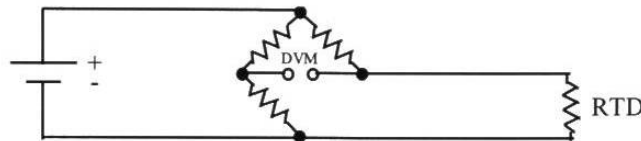


Fig. 2.9. Puente de Wheatstone con RTD separado.

Esos cables de extensión reviven el problema que se tenía inicialmente: la impedancia de los cables de extensión afecta la lectura de temperatura. Este efecto puede ser minimizado usando una configuración del puente de tres cables (ver Fig. 2.10). Si los cables A y B son perfectamente iguales en longitud, sus efectos de impedancia se cancelarán, debido a que cada uno está en una punta opuesta del puente. El cable C no lleva corriente y actúa como un cable sensor.

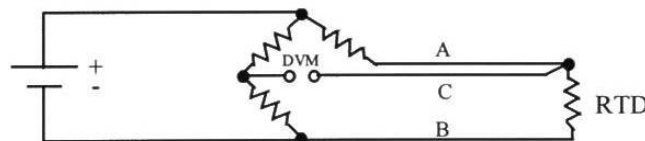


Fig. 2.10. Puente de Wheatstone de tres cables.

El puente de Wheatstone mostrado en la Fig. 2.10 crea una relación no lineal entre el cambio de resistencia y el cambio de la salida de voltaje del puente. Esta característica no lineal de temperatura contra resistencia del RTD requiere de una conversión de la salida de voltaje del puente a una impedancia equivalente del RTD.

La técnica de resistencia de cuatro cables, usando una fuente de corriente con un voltímetro digital (DVM) remoto, soluciona muchos problemas asociados con el uso del puente (ver Fig. 2.11).

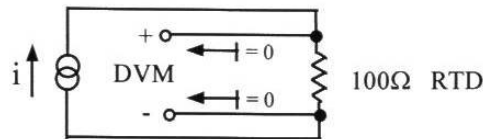


Fig. 2.11. Medición de resistencia de cuatro cables.

La salida de voltaje obtenida por el voltímetro digital es directamente proporcional a la resistencia del RTD, por lo que solo es necesario una única conversión. Las tres resistencias del puente son reemplazadas por una resistencia de referencia. El voltímetro digital mide solamente la caída de voltaje a través del RTD y es insensible a la longitud de los cables.

La única desventaja de usar una resistencia de cuatro cables es que se necesita un cable de extensión más que el puente de tres cables. Este es un pequeño precio que hay que pagar tomando en cuenta el requerimiento en la exactitud de la medición de temperatura.

2.5 CONVERSION DE RESISTENCIA A TEMPERATURA

El RTD es un dispositivo más lineal que el termopar, pero aún así requiere de una curva de adecuación para la determinación de la temperatura a partir de la medición de resistencia. La ecuación de Callendar-Van Dusen [7] ha sido usada por años para aproximar la curva del RTD. Esta se expresa como:

$$R_T = R_o + R_o \alpha \left[T - \delta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T}{100} \right) - \beta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T^3}{100} \right) \right]$$

donde:

R_T = Resistencia a temperatura T

R_0 = Resistencia a 0 °C

α = Coeficiente de temperatura a 0 °C (típicamente + 0.00392 $\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$)

δ = 1.49 (para el platino $\alpha = 0.00392$)

$\beta = 0$ $T > 0$

$\beta = 0.11$ (típico) $T < 0$

Los valores exactos para los coeficientes α , β , y δ son determinados mediante pruebas al RTD a cuatro diferentes temperaturas y resolviendo las ecuaciones resultantes. Estas ecuaciones fueron reemplazadas en 1968 por un polinomio de orden 20 con la finalidad de obtener una curva de adecuación más exacta. La gráfica de esta ecuación (ver Fig. 2.15) muestra que el RTD es un dispositivo más lineal que un termopar.

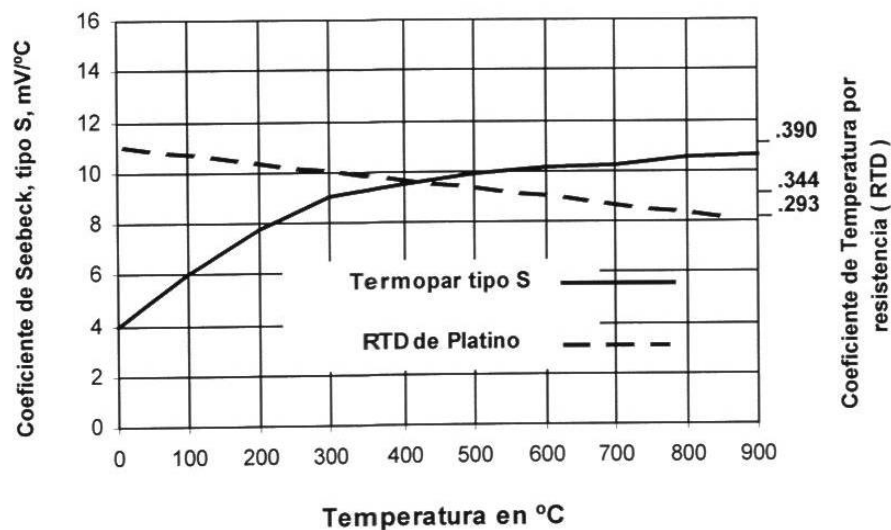


Fig. 2.12. Curva de adecuación de un termopar tipo S con respecto a un RTD.

2.6 CONCLUSIONES DEL CAPITULO

Los transductores de temperatura más comunes son cuatro: el termopar, el RTD (detector de temperatura por resistencia), el termistor y el sensor de circuito integrado [7]. A pesar de la gran popularidad del termopar, éste es frecuentemente sustituido por un RTD.

Una sonda RTD es un ensamble compuesto de un elemento de resistencia, una funda, cables de extensión y una terminación o conexión. El platino es usado como el elemento primario en todos los termómetros de resistencia de alta precisión; éste es especialmente conveniente para este propósito, debido a que puede resistir altas temperaturas mientras mantiene una excelente estabilidad y linealidad con la temperatura. Los elementos de resistencia son la parte más importante del RTD ya que son las unidades sensoras de temperatura; estas vienen en muchas formas, conformando los diferentes estándares, capaces de medir diferentes rangos de temperatura con varios tamaños y exactitudes disponibles; en general cada uno tiene un valor de resistencia preespecificada a una temperatura conocida, la cual cambia de una manera predecible con los cambios de temperatura. De esta manera, midiendo la resistencia del elemento, la temperatura del elemento puede ser determinada por tablas [7], cálculos o instrumentación.

Los elementos de resistencia están disponibles de acuerdo a dos curvas [7]: la Europea ($\alpha = 0.00385 \text{ ohms / ohm / }^\circ\text{C}$) y la Americana ($\alpha = 0.00392 \text{ ohms / ohm / }^\circ\text{C}$).

Debido a que las dos puntas de conexión usadas entre el elemento de resistencia y el instrumento de medición tienen una resistencia propia, se tienen que proporcionar recursos para compensar esta inexactitud [7]. Muchos RTD's incorporan una tercera punta, que se conecta a uno de los lados del elemento de resistencia. Esta configuración tiene una conexión a una de las puntas del sensor y dos conexiones a la otra punta del

sensor. De esta forma, captando una señal de entrada de tres conexiones, se obtiene la compensación de resistencia de las puntas y del cambio de resistencia en las puntas, debido a la temperatura; esta es la configuración mas comúnmente usada.

CAPITULO 3

MODELO DEL PROCESO DE EXTRUSION DE PLASTICOS

3.1 INTRODUCCION

El proceso de extrusión es uno de los más importantes en la industria de transformación de plásticos. Entre los productos que se pueden manufacturar se encuentran: tubería, manguera, fibras, película y un número ilimitado de productos. El proceso de extrusión se utiliza además para “compounding”, es decir, para mezclar y formular compuestos de plástico, y producir materia prima como por ejemplo, gránulos de concentrado o de compuesto.

En este capítulo se mencionan algunos puntos importantes del proceso de extrusión de plásticos y las partes básicas que compone un extrusor. Se recalca el hecho de que un inadecuado control de temperatura en las zonas del proceso provocará variaciones de temperatura que se verán reflejadas en una mala calidad del producto de salida. Este aspecto pone de manifiesto la importancia de contar con una medición confiable de temperatura de los equipos de medición correspondientes. Finalmente, se describe el modelo matemático de un extrusor con cinco zonas de calentamiento, el cual será utilizado en el siguiente capítulo para el diseño de un observador de estado que