

---

# Capítulo 1: Introducción

En el presente capítulo se proporcionará una breve reseña de los antecedentes históricos del experimento de Franck-Hertz, así como una descripción general de los elementos que conforman el sistema de control de temperatura.

## 1.1 ANTECEDENTES DEL EXPERIMENTO DE FRANCK-HERTZ

En los últimos 20 años del siglo XIX y en los primeros 30 años del siglo XX, muchos descubrimientos innovadores, tanto experimentales como teóricos, demostraron que las leyes de la física clásica dejan de cumplirse:

- Cuando se aplican a sistemas microscópicos, como las partículas que constituyen los átomos.
- Cuando se aplican a objetos que se mueven a velocidades que son comparables con la velocidad de la luz.

En este contexto, el interior del átomo sólo puede describirse en función de la teoría cuántica. Esta teoría es ahora la base de nuestra comprensión del mundo microscópico.

Los orígenes de la teoría cuántica tuvieron lugar en la investigación acerca del espectro de radiación del cuerpo negro; Max Planck, en 1900, dedujo una función  $P$  (potencia radiada por un cuerpo negro) en función de la longitud de onda y la temperatura, encontró que podía deducir dicha función  $P$  si realizaba la sorprendente hipótesis de que la energía emitida y absorbida por el cuerpo negro no era continua, sino que por el contrario, era emitida o absorbida en paquetes discretos o cuantos.

Planck determinó que el tamaño de un cuanto de energía era proporcional a la frecuencia de la radiación.

En 1905, Albert Einstein utilizó la idea de Planck de la cuantización de la energía para explicar el efecto fotoeléctrico, el cual consiste en la emisión de electrones cuando la luz incide en alguna superficie.

Einstein demostró que la energía luminosa no está distribuida continuamente en el espacio, sino cuantizada en paquetes pequeños llamados fotones y dedujo que cuando se aumenta la intensidad de la luz de una frecuencia determinada, inciden más fotones sobre la superficie en una unidad de tiempo, pero la energía absorbida por cada electrón resulta inalterada.

El trabajo de Einstein señaló el principio de la teoría cuántica, afirmando que la cuantización es una propiedad fundamental de la energía electromagnética.

Posteriormente, las ideas de la cuantización de la energía fueron aplicadas a las energías atómicas por Niels Bohr en la primera explicación satisfactoria de los espectros atómicos.

---

Bohr propuso en 1913 un modelo del átomo de hidrógeno, al calcular las longitudes de onda de las líneas del espectro conocido del hidrógeno y al predecir nuevas líneas en el espectro infrarrojo y ultravioleta.

Al final del siglo XIX se habían reunido muchos datos sobre la emisión de la luz por los átomos de un gas al ser excitados por una descarga eléctrica; fue posible entonces determinar las longitudes de onda de las líneas del espectro del hidrógeno con exactitud. Resultado de sus análisis, Bohr dedujo los siguientes postulados:

Postulado 1: El electrón del átomo de hidrógeno puede moverse únicamente en ciertas órbitas circulares denominadas estados estacionarios.

Postulado 2: El átomo radia un fotón cuando el electrón realiza una transición desde una órbita estacionaria a otra.

La confirmación directa de que los estados de energía del átomo están cuantizados provino de un experimento realizado en el año de 1914 por James Franck y Gustav Hertz, las consecuencias que se derivan de este hecho son innumerables, y van desde un conocimiento más profundo de las propiedades químicas y físicas que distinguen unos elementos de otros (distintos niveles energéticos para distintos elementos), hasta las propiedades eléctricas de aislantes, semiconductores y conductores, por ejemplo, la teoría de bandas.

Durante los primeros años del siglo XX, había sido descubierto el hecho de que átomos aislados podían emitir y absorber radiación electromagnética a frecuencias características, el modelo atómico de Bohr sugería que dicha emisión o absorción era debida a una cuantización inherente a la energía contenida en los electrones de los átomos.

Franck y Hertz bombardearon átomos aislados con electrones y mostraron que los electrones perdían cantidades discretas de energía características de cada elemento, es decir, el bombardeo de electrones con una magnitud de energía apropiada conducía a emisiones de luz a la frecuencia espectral conocida correspondiente con tal nivel de energía.

El experimento de Frank-Hertz puso en evidencia el carácter discreto de los niveles energéticos internos de un átomo, proporcionando una medida de la diferencia de energía entre el nivel fundamental y el primer nivel excitado (transición de una orbita estacionaria a otra).

El experimento de Franck-Hertz demostró que los electrones pueden moverse solamente en órbitas discretas alrededor del núcleo del átomo y que la energía correspondiente a los electrones más alejados es del orden de magnitud de 4.9 eV.

---

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como parte primordial de los requerimientos para poder llevar a cabo la reproducción del experimento de Franck-Hertz, se requiere mantener la temperatura del recinto térmico (horno eléctrico) que contiene el tubo de Franck-Hertz a cierto valor determinado (temperatura de operación).

El tubo de Franck-Hertz (tubo de colisión de electrones) consiste de un tubo aislado al vacío construido con tres electrodos (triodo), el cual contiene además una pequeña cantidad de mercurio (Hg).

El horno eléctrico tiene como función principal elevar la temperatura del mercurio contenido dentro del tubo a una magnitud cercana a los 170 °C, para posteriormente energizar las terminales del triodo.

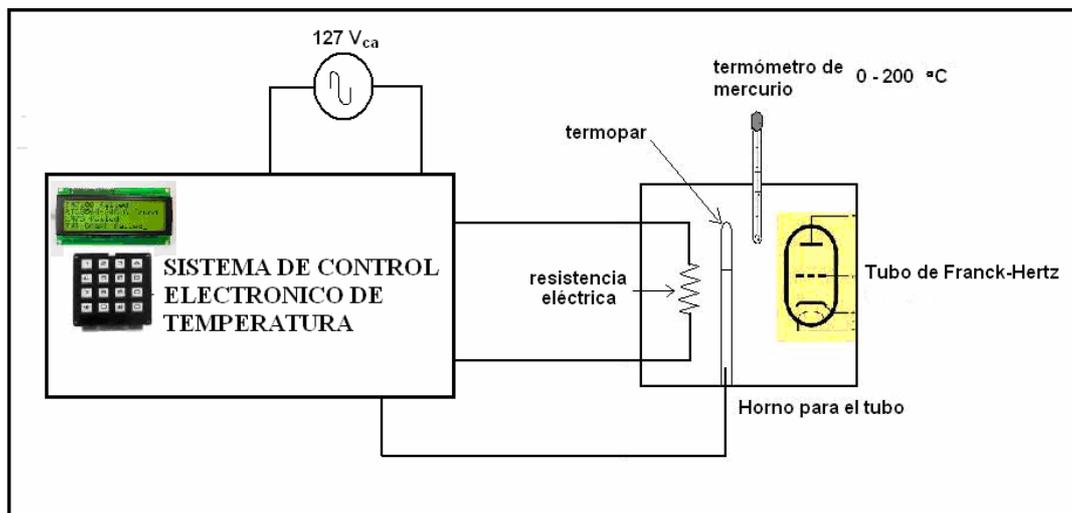
Una vez alcanzada la temperatura de operación, si la polarización del voltaje del tubo es correcta, los electrones emitidos por el cátodo son acelerados por un campo eléctrico y colectados posteriormente en el ánodo.

Al elevar la temperatura del triodo, la presión del vapor de mercurio contenido se incrementa, asegurando así una probabilidad elevada para las colisiones entre los electrones y los átomos del gas.

Por lo descrito anteriormente, es de vital importancia implementar un sistema de control de temperatura, a fin de evitar la variación de la misma dentro del gabinete metálico que contiene el tubo de Franck-Hertz, y así poder dar cabal cumplimiento a los objetivos del experimento.

El sistema de control se muestra en la figura 1.1, donde se observa que los elementos principales que componen el sistema son:

- El sistema de control electrónico de temperatura.
- El horno eléctrico, energizado por la línea de corriente alterna (127 V<sub>ca</sub>).



**Figura 1.1** Diagrama del proceso a controlar

---

## Descripción de los componentes principales:

El sistema consta de los siguientes elementos:

- Un gabinete metálico de base rectangular, cuyas dimensiones son: 24 cm de largo, 18.5 cm de ancho y 24 cm de altura.
- Tubo de Franck-Hertz, el cual consiste en un triodo compuesto por:
  - a) El cátodo con cubierta antioxidante de calentamiento indirecto.
  - b) El ánodo o placa.
  - c) Rejilla de control.
    - Una resistencia eléctrica con una potencia nominal de 850 W.
    - Un termómetro de mercurio con un intervalo de operación de 0-200 °C.
    - Como elemento sensor/transductor de temperatura se emplea un termopar tipo J.
    - Un gabinete de plástico, el cual contiene la parte electrónica del sistema de control, bornes de conexiones, además de un teclado matricial y un LCD como interfaz con el usuario.

## 1.3 OBJETIVO Y METAS

El objetivo es diseñar y construir un sistema de control de temperatura cuya característica principal es la de mantener una temperatura de 170 °C con la menor variabilidad posible en un pequeño horno o recinto donde operará el tubo de Franck-Hertz.

### METAS

- Obtener el modelo matemático de la planta empleando uno de los métodos propuestos por Ziegler-Nichols.
- Completar el modelo matemático del proceso con la implementación de un sistema de control PID.
- Obtener la respuesta del modelo matemático a varios tipos de señal de entrada (escalón unitario, rampa, e impulso unitario).
- Diseñar un controlador electrónico analógico PID.
- Sintonizar el controlador PID con base en la caracterización del proceso.
- Diseñar e implementar físicamente todas las etapas que constituyen el sistema de control de temperatura del experimento de Franck-Hertz.
- Compensar las problemáticas que conlleven las no idealidades de los componentes electrónicos empleados en el sistema.
- Obtener un control de temperatura en un intervalo de 170 °C con una tolerancia de 2%.

---

## 1.4 INTRODUCCIÓN AL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA DEL EXPERIMENTO DE FRANCK-HERTZ

En años recientes, los sistemas de control han asumido un papel cada vez más importante en el desarrollo y avance de la civilización moderna y la tecnología, se encuentran en gran cantidad en todos los sectores de la industria, tales como control de calidad de los productos manufacturados, líneas de ensamble automático, control de máquinas-herramienta, control por computadora, sistemas de potencia, control de robots y muchos otros.

Las cuatro razones principales por las cuales se requiere implementar un sistema de control para algún proceso determinado son:

- Amplificación de potencia
- Control Remoto
- Compensación a perturbaciones
- Modificación de la forma de la señal de entrada

Un sistema de control consiste de subsistemas y procesos (o plantas) interconectados con el propósito de controlar las salidas del proceso.

Los cuatro componentes básicos de todo sistema de control son:

1. Sensor, que también se conoce como elemento primario.
2. Transmisor, el cual se conoce como elemento secundario.
3. Controlador, que es el cerebro del sistema de control.
4. Elemento final de control, o actuador, el cual se encarga de regular el suministro de energía al sistema.

La importancia de estos componentes estriba en que realizan las tres operaciones básicas que deben estar presentes en todo sistema de control, estas operaciones son:

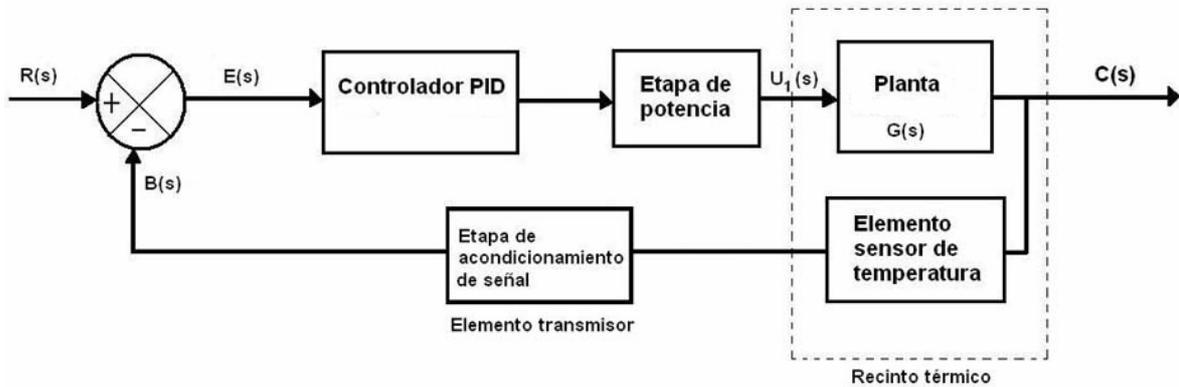
- **Medición:** La medición de la variable que se controla se realiza generalmente mediante la combinación de sensor y transmisor.
- **Decisión:** Con base en la medición, el controlador decide qué hacer para mantener la variable en el valor que se desea.
- **Acción:** Como resultado de la decisión del controlador, se debe efectuar una acción en el sistema, generalmente es realizada por el elemento final de control.

Los sistemas de control realimentados, se denominan también sistemas de control en lazo cerrado. En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación, a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente.

Una ventaja del sistema de control en lazo cerrado es que el uso de la realimentación vuelve la respuesta del sistema relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas en los parámetros del sistema.

---

El diagrama de bloques del sistema de control realimentado de temperatura para el experimento de Franck-Hertz se muestra en la figura 1.2.



**Figura 1.2** Diagrama de bloques del sistema de control de temperatura del experimento de Franck-Hertz

Donde:

$R(s)$  es la señal de referencia (set-point)

$C(s)$  es la salida (variable controlada)

$B(s)$  es la señal de realimentación

$U_1(s)$  es la señal actuante

$G(s)$  es la función de transferencia de la planta

Los bloques básicos que componen el sistema de control son:

- Planta de Temperatura: Consiste del recinto térmico cuya temperatura se desea controlar.
- Etapa de Potencia: Se encarga de regular el número de semiciclos de voltaje de línea que le son aplicados al elemento actuador (resistencia eléctrica).
- Etapa de acondicionamiento de Señal  
Esta etapa acopla la señal de salida del sensor y la convierte en una señal del mismo tipo que la proporcionada por el set point (señal de referencia), lo suficientemente intensa como para transmitirla al controlador.
- Controlador Electrónico Analógico Proporcional-Integral-Derivativo (PID):  
El controlador recibe la señal que está en relación con la temperatura, la compara con el valor que se desea y, según el resultado de la comparación, decide que hacer para mantener la temperatura en el valor deseado. Con base en la decisión, el controlador envía otra señal a la etapa de potencia, a su vez esta etapa procesa la señal y la envía al elemento actuador.

En el capítulo 5 se analizarán con más detalle cada una de las etapas que forman parte del sistema de control de temperatura para el experimento de Franck-Hertz.

---