



**BENEMÉRITA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA
COMPUTACIÓN**

**Simulación de MEMS utilizando
Interfaces Gráficas**

**Tesis que para obtener el título de:
Ingeniero en Ciencias de la computación**

**Presenta:
Erika Patricia Tapia Zambrano**

**Asesor de Tesis:
Dr. Alejandro Rangel Huerta**

**Coasesor de Tesis:
M.C. José Fernando Rojas Rodríguez**

Puebla, Marzo de 2009

Simulación de MEMS utilizando Interfaces Gráficas

Agradecimientos

Quiero agradecer:

A Dios por permitirme concluir mi licenciatura y por darme la oportunidad de finalizar este trabajo.

A mis padres y hermanos por enseñarme que la perseverancia y esfuerzo son el camino para lograr objetivos.

A todos mis profesores de la Facultad de Ciencias de la Computación, por compartir conmigo sus conocimientos y experiencia.

A mi asesor de Tesis, Dr. Alejandro Rangel Huerta, por haberme brindado la oportunidad de recurrir a sus conocimientos y experiencia para el desarrollo de este trabajo.

A mis tíos y tías por el apoyo que me brindaron durante mis estudios, y que me enseñaron a no desfallecer cuando el trabajo es arduo.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1.....	3
RESUMEN	3
1.1 TECNOLOGÍA MEMS	5
CAPITULO 2.....	11
RESUMEN	11
2.1 CLASES DE MEMS	13
2.1.1 <i>SENSORES</i>	13
2.1.1.1 <i>Sensor de Conductividad Térmica</i>	14
2.1.2 <i>ACTUADORES</i>	15
2.1.3 <i>OPTOELECTRÓNICOS</i>	15
2.1.3.1 <i>Usos</i>	15
2.1.4 <i>COMPONENTES PASIVOS</i>	16
CAPITULO 3.....	17
RESUMEN	17
3.1 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.....	19
3.2 ORIGEN MOLECULAR DE LA CONDUCTIVIDAD	19
3.3 CONDUCTIVIDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES	19
3.4 TERMOELECTRICIDAD	20
3.4.1 PRINCIPIOS FUNDAMENTALES.....	21
3.4.1.1 COEFICIENTE SEEBECK	21
3.4.1.2 COEFICIENTE PELTIER	21
3.4.1.3 COEFICIENTE THOMSON.....	21
3.4.2 RELACIONES ENTRE LOS COEFICIENTES SEEBECK, PELTIER Y THOMSON	22
3.4.3 PRINCIPIOS DE LA CONVERSIÓN DE ENERGÍA POR EFECTO TERMOELÉCTRICO.....	22
3.5 RENDIMIENTO DE LA CONVERSIÓN Y PARÁMETROS IMPORTANTES.....	23
3.5.1 <i>Cálculo del rendimiento de la conversión en un sistema termoeléctrico</i>	23
3.5.2 <i>Parámetros importantes para obtener un buen rendimiento</i>	24
3.6 EFECTOS TERMOELÉCTRICOS.....	25
3.6.1 EL EFECTO JOULE	26
3.6.2 EL EFECTO SEEBECK	27
3.6.3 EL EFECTO PELTIER.....	27
3.6.4 EL EFECTO THOMPSON.....	28
3.7 MEM TÉRMICO	29
<i>Descripción</i>	29
3.7.1 <i>Modelo Matemático</i>	31
3.7.2 <i>Análisis de la solución</i>	34

CAPITULO 4.....	37
RESUMEN	37
4.1 INTRODUCCIÓN	39
4.2 METODOLOGÍA.....	39
4.2.1 <i>Modelo Matemático</i>	39
4.2.2 <i>Interfaz Gráfica</i>	46
 CAPITULO 5.....	 57
RESUMEN	57
5.1 RESULTADOS.....	59
5.1.1 <i>Númericos</i>	59
5.1.2 <i>Interfaz Gráfica</i>	63
 CONCLUSIONES.....	 65
BIBLIOGRAFÍAS.....	67

INTRODUCCIÓN

Los MEMS mejor conocidos como Micro-electro-mechanical Systems (Sistemas Micro-electro.mecánicos) se refieren a la tecnología electromecánica micrométrica y sus productos. Los MEMS tienen comúnmente dimensiones que van desde el micrómetro hasta el milímetro. Los MEMS son fabricados utilizando modificaciones a la tecnología de silicio utilizada para fabricar dispositivos micro-electrónicos (chips) y otras tecnologías capaces de manufacturar dispositivos muy pequeños.

La tecnología MEMS se ha desarrollado desde hace ya varios años, y ha aportado a la tecnología y a la ciencia grandes avances, uno de los mejores ejemplos vistos actualmente, es el desarrollo de las PC's; la evolución que se ha tenido ha sido muy rápida, debido a la tecnología (MEMS); pasaron de ser máquinas del tamaño de un cuarto, con procesos de tiempo extenso, a ser equipos portátiles con gran capacidad de almacenamiento y con procesos de tiempos muy cortos, esto es, pasaron de ser de grandes dimensiones que producían gran cantidad de calor a pequeñas dimensiones que producen menos calor o bien temperaturas más bajas.

El modelo matemático usado en este proyecto es el efecto de Peltier y Seebeck, con ella se puede resolver la diferencia de temperatura y corriente. El modelo exponencial que se usa para la simulación de MEMS utilizando interfaces gráficas es el modelo de potencias, temperatura y corriente, para poder obtener las gráficas y poder visualizar el comportamiento de la temperatura contra la distancia y/o de la corriente contra la distancia y/o corriente contra temperatura.

Dentro del modelo exponencial se utiliza el efecto termoeléctrico de Seebeck y Peltier, en el cual un circuito formado por dos metales distintos homogéneos y con dos uniones a diferente temperatura, aparecerá una corriente eléctrica.

Existen otros efectos Termoeléctricos que nos llevan a la conducción de corriente dentro del circuito, pero en el desarrollo de este proyecto se elabora un circuito con dos resistencias separadas, una de ellas al conectarse al voltaje se calentará, y el objeto que se moverá sobre de ella provocando que la segunda resistencia se caliente y cierre el circuito obteniendo una corriente eléctrica.

La interfaz que se utiliza es para que personas ajenas al área puedan interactuar de manera muy fácil y observar los cambios que ocurren cuando se aleja o se acerca un objeto de un área de calor, que a su vez es capaz de producir calor a otro espacio, provocando una corriente y temperatura.

CAPITULO 1

RESUMEN

Aquí se explicará a gran detalle que son los sistemas micro-electro-mecánicos MEMS (MEMS Micro-Electro-Mechanical-Systems), el desarrollo que han tenido desde la aparición de esta tecnología, hasta los últimos avances que se ha tenido de esta tecnología, de igual manera se menciona la elaboración de los MEMS, en donde se esta ocupando esta tecnología, su función principal y las grandes ventajas que se tienen y se tendrán con esta tecnología.

De igual forma se mencionan algunos de los avances científicos que se han tenido con la aparición de los Sistemas micro-electro-mecánicos, los resultados que se han logrado obtener y los diferentes usos que se les están dando a los Sistemas micro-electro-mecánicos, para facilitar las tareas diario que el hombre realiza día a día.

1.1 TECNOLOGÍA MEMS

Los sistemas micro-electro-mecánicos MEMS (MEMS Micro-Electro-Mechanical-Systems) son dispositivos electro-mecánicos muy pequeños (de 10-1000 μm) que incluyen sensores, válvulas, engranajes y actuadores fabricados sobre superficies de silicio policristalino, usando los mismos procesos fotolitográficos empleados en la fabricación de dispositivos micro-electrónicos.

Los Sistemas micro-electromecánicos (MEMS), mejor conocidos como Micro-electro-mechanical-Systems. MEMS se refieren a la tecnología electromecánica micrométrica y sus productos; a escalas relativamente más pequeñas se mezcla con los Sistemas nano-electromecánicos (NEMS), mejor conocidos por su denominación en inglés "*Nanoelectromechanical Systems*" (NEMS) y con la nano-tecnología.

Los MEMS son sistemas que consisten en la integración de elementos mecánicos operadores y electrónicos, así sensores en un sustrato de baja dimensión. Mediante la tecnología de fabricación, los componentes micro-mecánicos se acoplan al silicio, gracias al proceso de "micro-maquinado" que sitúa selectivamente los elementos en la superficie del circuito integrado o que añaden a estas nuevas capas estructurales.

Los MEMS son una tecnología destinada a permitir el desarrollo de productos inteligentes y aumentar la capacidad computacional de la microelectrónica, puesto que posibilitan un mayor control de los micro-sensores y de los micro-operadores, aumentando su funcionalidad en aplicaciones completas.

Un ejemplo es el almacenamiento masivo basado en MEMS es una tecnología muy joven, se podría decir que está en su infancia, y por tanto existen muchas posibilidades para investigar modelado, diseño y técnicas de control que se puedan aplicar a estos dispositivos.

El modelado de MEMS es una mezcla de 4 ingredientes:

1. Descripción de los dispositivos
2. Modelado matemático
3. Métodos matemáticos
4. Métodos computacionales de simulación

En 1964 H.C. Nathanson y su colega Westinghouse producen el primer dispositivo MEMS, esto abre las puertas al auge de los futuros MEMS modernos. El modelado matemático juega un rol importante en el desarrollo de sistemas. En 1979 el primer MEMS fue desarrollado por los investigadores de la universidad de Stanford.

La comercialización masiva del dispositivo basado en tecnología MEMS es muy joven. Se podría decir que esta en su infancia, y por tanto existen muchas posibilidades para investigar modelado, diseños y técnicas de control que se puedan aplicar a estos dispositivos. Las memorias basadas en MEMS representan una tecnología de almacenamiento no volátil que involucra un medio magnético y miles de cabezas de

lectura, con la capacidad de incorporar almacenamiento y procesamiento de datos en un mismo chip.

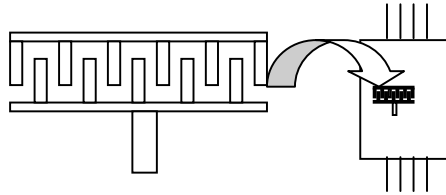


Figura 1.1 Modelado de MEMS, dispositivo introducido a un circuito integrado reduciendo su tamaño, y aumentando sus funciones.

En la figura 1.1 se muestra un dispositivo que va de algo grande y al introducirse dentro de un circuito integrado se reduce su tamaño, pero no sus funciones, sino que aumenta sus capacidades. El modelado de un MEMS se puede llevar de algo grande a algo pequeño con las mismas funciones tal y como lo menciona Richard P. Feinman en 1959 en su conferencia llamada “Hay mucho espacio en una dimensión pequeña”. Lo que se intenta desarrollar es que por medio de los MEMS se puede realizar tecnología de punta con pequeños circuitos con grandes capacidades.

En 1964 H.C. Nathanson y Westinghouse producen el transistor resonante, el primer dispositivo de MEMS fabricado en masa. En 1970 se inventa el microprocesador, aumentando la demanda de circuitos integrales. Para el año 2000 aumenta el número de dispositivos de MEMS y sus aplicaciones.

Actualmente en Europa se conoce a los MEMS más comúnmente como tecnología de microsistemas (MST, por sus siglas en inglés). También se le conoce en diversas partes del mundo como micromáquinas. Esto no debe confundirse con la visión hipotética de la nano-tecnología molecular o la electrónica molecular.

Por lo general, los MEMS tienen comúnmente dimensiones que van desde el micrómetro hasta el milímetro. A estas escalas, el comportamiento físico intuitivo e inherente del hombre no necesariamente es el correcto, debido al incremento en la razón entre el área de superficie y el volumen de los MEMS; algunos efectos de superficie como los electrostáticos y térmicos dominan los efectos volumétricos tales como la inercia o la masa térmica.

Los MEMS son fabricados utilizando modificaciones a la tecnología de silicio utilizada para fabricar dispositivos micro-electrónicos (chips), moldeando y *plating*, *wet etching* (Hidróxido de potasio, TMAH) y *dry etching* (RIE y DRIE), maquinado eléctrico de descarga (EDM), y otras tecnologías capaces de manufacturar dispositivos muy pequeños.

Algunas de las aplicaciones más comunes son:

- Impresoras de inyección de tinta, las cuales usan un piezoeléctrico o burbuja de eyección para depositar la tinta en el papel.
- Acelerómetros utilizados en automóviles modernos para activación de la bolsa de aire al sufrir una colisión.
- Giroscopio MEMS, es usado también en autos modernos y otras aplicaciones para detectar giros; en un control de estabilidad dinámico.
- Sensores de presión para los neumáticos de los autos y sensores desechables de la presión sanguínea.
- Tecnología óptica de conmutación, utilizada para comunicación de datos, la cual es parte de la tecnología emergente.
- Microscopia de fuerza atómica o AFM: Los sensores de fuerza (micro-palancas) usados en AFM son en sí sistemas micro-electromecánicos producidos con técnicas de micro-fabricación. Con estos pueden obtenerse medidas de fuerzas en el rango de pN (pico-newton) a nN (nano-newton), así como levantar topografías de superficies a escala atómica.

El análisis por elemento finito es una parte importante en el diseño de los MEMS.

Para fijar ideas podemos decir que en el microprocesador de una computadora actual tenemos unos 50 millones de transistores por cm^2 , lo que implica una dimensión típica de $1\mu\text{m}^2$ por transistor, con un detalle de los contornos del orden de los 100 nm. Esta miniaturización ha permitido reducir componentes electrónicos voluminosos dando a lugar a equipos portátiles, que de otra manera no se emplearían (radios personales, notebooks, teléfonos celulares, etc.) con un panorama de aplicaciones increíble.

La miniaturización de sistemas electromecánicos o MEMS ya es una realidad de nuestros días. Efectivamente, estos micro-dispositivos ya se emplean para la realización de acelerómetros, presentes en los airbag de los autos para determinar el momento justo en que se produce un choque y disparar así el mecanismo de inflado de las bolsas. Este mismo tipo de MEMS se emplean como elementos de navegación, particularmente en la industria aeroespacial, pero también se prevén aplicaciones como sensores de presión, temperatura y humedad.

En el área de la salud se ha incorporado en marcapasos, para sensar la actividad física del paciente y modificar su ritmo cardíaco.

Para evitar falsificaciones de firmas, se ha pensado incorporar estos acelerómetros en lapiceras. De esta manera, no sólo estaría registrado el trazo particular de la firma sino también las velocidades y aceleraciones que le imprimió la mano a la lapicera mientras se firmaba, lo cual haría mucho más difícil su falsificación.

También se emplean MEMS en los cabezales de las impresoras de chorro de tinta, produciendo la evaporación controlada de la tinta en el momento justo, y gracias a la entrega localizada de calor.

Además de la ventaja del tamaño de estos dispositivos está el hecho de que se pueden fabricar en serie abaratando notablemente su costo de fabricación.

Los MEMS, como toda nueva tecnología, han tenido un impacto importante a la hora de favorecer el acceso a nuevo conocimiento científico. Este es el caso de la llamada óptica adaptable. La luz de los objetos astronómicos que llega a los telescopios terrestres pasa necesariamente a través de la atmósfera, variando su camino óptico por las variaciones de densidad del aire y de temperatura. Como resultado se obtiene una imagen borrosa, con mala resolución angular.

Para evitar este problema, una solución costosa es la de ubicar los telescopios en el espacio (como es el caso del **Hubble**). Otra solución menos costosa e interesante por su capacidad de emplear telescopios grandes, no limitados por las dimensiones que se pueden manejar en los transportes espaciales, es la que aportó el desarrollo de espejos cuya superficie se deforma mediante MEMS, corrigiendo las distorsiones que produce la atmósfera terrestre.

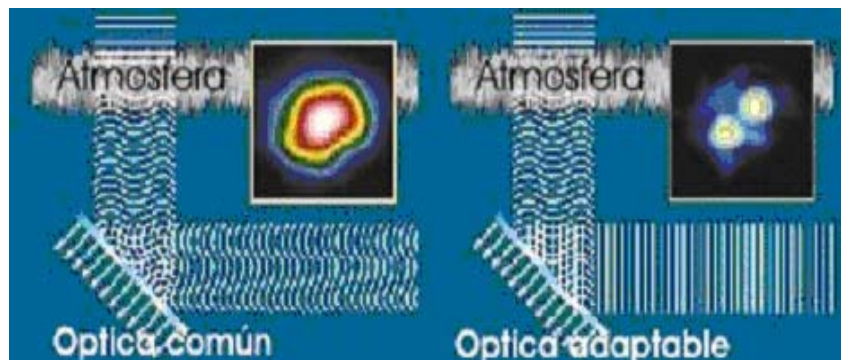


Figura 1.2.

Esquema del dispositivo que corrige las deformaciones de la imagen producidas por la turbulencia de la atmósfera terrestre. La óptica adaptable, realizada mediante *MEMS*, permite neutralizar este efecto y obtener una resolución angular adecuada como para distinguir objetos estelares que de otra manera se encontrarían confundidos en una imagen borrosa.

Otra aplicación científica de los MEMS fue la realización de instrumentos de medición de fuerzas entre dos objetos cuyas superficies se encuentran a distancias submicrométricas ($< 1\mu\text{m}$). Uno de los objetivos era poner en evidencia posibles desviaciones de la ley de gravitación universal respecto de la ley establecida por **Newton**, como predicen algunos modelos teóricos. Según estos modelos, estas desviaciones se podrían hacer más evidentes cuanto menor sea la distancia entre los objetos. El problema es que a cortas distancias también aparecen otras interacciones, como la que surge del llamado efecto Casimir.

Este efecto, ligado a la aparición de una fuerza atractiva entre objetos conductores, cuyo origen se relaciona con una propiedad cuántica (oscilaciones de punto cero), se manifiesta principalmente a distancias nanométricas y depende de la geometría de los objetos en cuestión.

Los MEMS han aportado las herramientas para evaluar estas fuerzas y corroborar las leyes y sus desviaciones en un rango de distancias hasta ahora no explorado.

CAPITULO 2

RESUMEN

Como se ha mencionado en el capítulo anterior, los MEMS son sistemas que consisten en la integración de elementos mecánicos operadores y electrónicos. Existen 4 tipos de MEMS, los cuales mencionaré sin profundizar en ellos y me enfocaré en un sensor térmico, donde describiré el funcionamiento del sistema MEMS, además se elegirá el sensor térmico con el cual se trabajara con el resto de la tesis.

2.1 Clases de MEMS

Existen 4 clases distintas de MEMS, y cada una de ellas contiene las diferentes áreas en las que se utilizan los MEMS.

Clases de dispositivos MEMS:

2.1.1 SENSORES

Un sensor es un dispositivo que detecta manifestaciones de cualidades o fenómenos físicos o químicos, llamadas variables de instrumentación, como la temperatura, la intensidad luminosa, la distancia, la aceleración, la inclinación, el desplazamiento, la presión, la fuerza, la torsión, la humedad, el pH, etc. y convierte estos fenómenos físicos o químicos en un cambio de alguna de las siguientes variables, por ejemplo: resistencia eléctrica (como una RTD), capacidad eléctrica (como un sensor de humedad), tensión eléctrica (como un termopar), corriente eléctrica (como un fototransistor), etc. La diferencia de un sensor respecto a un transductor, es que el sensor esta siempre en contacto con la variable a medir o a controlar. Recordando que la señal que nos entrega el sensor no solo sirve para medir la variable, si no también para convertirla mediante circuitos electrónicos en una señal estándar (4 a 20 mA, o 1 a 5VDC) para tener una relación lineal con los cambios de la variable sensada dentro de un rango (span), para fines de control de dicha variable en un proceso.

Puede decirse también que es un dispositivo que aprovecha una de sus propiedades con el fin de adaptar la señal que mide para que la pueda interpretar otro dispositivo. Como por ejemplo el termómetro de mercurio que aprovecha la propiedad que posee el mercurio de dilatarse o contraerse por la acción de la temperatura.

Muchos de los sensores son eléctricos o electrónicos, aunque existen otros tipos. Un sensor es un tipo de transductor que transforma la magnitud que se quiere medir o controlar, en otra, que facilita su medida. Pueden ser de indicación directa (e.g. un termómetro de mercurio) o pueden estar conectados a un indicador (posiblemente a través de un convertidor analógico a digital, un computador y un display) de modo que los valores detectados puedan ser leídos por un humano.

Junto con los sensores electrónicos, uno de los más importantes debido a sus campos de aplicación están los sensores químicos. Estos se han utilizado con éxito en el medio ambiente, la medicina, los procesos industriales. etc.

Los tipos de sensores son:

A. Sensores Mecánicos

- a) Sensor de Presión
- b) Sensor de Aceleración
- c) Sensor de Vibración

- d) Sensor de Taza Angular
- e) Sensor de Angulo de Inclinación
- f) Micrófono
- g) Sensor de Ultra Sonido
- h) Sensor de Flujo

B. Sensores Térmicos

- a) Sensor de Radiación Infrarroja
- b) Detector de arreglo Infrarrojo
- c) Sensor de Conductividad Térmica

2.1.1.1 Sensor de Conductividad Térmica

En el siguiente capítulo definiré más ampliamente cada término utilizado, por el momento solo definiré que el sensor de conductividad térmica es una resistencia eléctrica lineal y un termopar. Para determinar la conductividad térmica de un material, se aplica una corriente a una resistencia y se coloca un objeto de tal manera que este objeto pase calor a la resistencia la cual registra la temperatura alcanzada por el termopar.

Un Sensor Térmico es aquel que sensa la temperatura de un objeto; al decir “Sensor de Conductividad Térmica” se está refiriendo a sensar la capacidad de conductividad térmica que tiene un objeto para poder conducir calor.

Así que ahora que sabemos que es un sensor de conductividad térmica se elegirá un sensor térmico para poder realizar el proyecto, el cual se describirá, se realizará el modelo matemático, se obtendrá una solución analítica aproximada; además de que se observará el tipo de funcionamiento y curvas características, es decir, su geometría, su perfil de temperatura y la eficiencia del MEMS.

C. Sensor Magnético

- a) Película delgada magnética con cabeza de lectura y escritura

D. Sensor Químico

- a) Sensor de Gas Combustible
- b) Sensor de Oxígeno Disuelto
- c) Sensor Químico FPW

E. Biosensores

- a) MEM basado en el Sensor Glucosa
- b) MEM basado en el Sensor del ADN

c) MEM basado en el Sensor de Proteínas

2.1.2 ACTUADORES

Se denominan actuadores a aquellos elementos que pueden provocar un efecto sobre un proceso automatizado. Los más usuales son:

- *Cilindros neumáticos e hidráulicos*. Realizan movimientos lineales.
- *Motores (actuadores de giro) neumáticos e hidráulicos*. Realizan movimientos de giro por medio de energía hidráulica o neumática.
- *Válvulas*. Las hay de mando directo, motorizadas, electro-neumáticas, etc. Se emplean para regular el caudal de gases y líquidos.
- *Resistencias calefactoras*. Se emplean para calentar.
- *Motores eléctricos*. Los más usados son de inducción, de continua, brushless y paso a paso.
- *Bombas, compresores y ventiladores*. Movidos generalmente por motores eléctricos de inducción

Los tipos de MEMS Actuadores son:

- a) Electrostática lineal de la línea de transferencia
- b) Micro-válvula Electrostática
- c) Sistema Micro-Posicionador
- d) Micro-Motores
- e) Micro Pinzas

2.1.3 OPTOELECTRÓNICOS

La opto/electrónica es el nexo de unión entre los sistemas ópticos y los sistemas electrónicos. Los componentes opto/electrónicos son aquellos cuyo funcionamiento está relacionado directamente con la luz.

2.1.3.1 Usos

Los sistemas opto-electrónicos están cada vez más de moda. Hoy en día parece imposible mirar cualquier aparato eléctrico y no ver un panel lleno de luces o de dígitos más o menos espectaculares. Por ejemplo, la mayoría de los walkman disponen de un piloto rojo (LED) que nos avisa, siempre en el momento más inoportuno, que las pilas se han agotado y que deben cambiarse. Los tubos de rayos catódicos con los que funcionan los osciloscopios analógicos y los televisores, las pantallas de cristal líquido, los sistemas modernos de comunicaciones mediante fibra óptica. Los dispositivos opto-electrónicos se denominan opto aisladores o dispositivos de acoplamiento óptico.

Los tipos de MEMS Opto-electrónicos son:

- a) Elementos de acoplamiento de onda
- b) Micro interruptor bi-direccional de onda
- c) Espejo Desfocable
- d) Semiconductor sintonizador láser
- e) Micro-Espejo
- f) Espectrómetro
- g) Micro-pantalla de Elementos
- h) Ópticos de fase de Rallado
- i) Micro-Velocidad
- j) Micro-lente

2.1.4 COMPONENTES PASIVOS

Podemos definir los componentes pasivos como aquellos que no producen amplificación y que sirven para controlar la electricidad colaborando al mejor funcionamiento de los elementos activos (los cuales son llamados genéricamente semiconductores). Los componentes pasivos están formados por elementos de diversas clases que tendremos que considerar independientemente, ya que son diferentes sus objetivos, construcción y resultados, de modo que vamos a dividirlos en tres grandes grupos:

- 1· Resistencias
- 2· Condensadores
- 3· Bobinados

Los tipos de MEMS Componentes Pasivos son:

- a) Capacitor Variable
- b) Alta inductancia
- c) Antenas

Estos son los 4 tipos distintos de MEMS y cada uno en las diferentes áreas en las que se utilizan. Como se mencionó con anterioridad, el MEMS en el que me enfocaré será el Sensor de Conductividad Térmica.

CAPITULO 3

RESUMEN

En este capítulo se hablara de la conducción térmica que tienen los objetos, enfocándose a los objetos sólidos. Se darán conceptos generales de conducción.

Se elegirá el MEMS (Sensor de conductividad Térmica) el cual se describirá, se realizará el modelo matemático, se obtendrá una solución analítica aproximada; además de que se observará el tipo de funcionamiento y curvas características, es decir, su geometría, su perfil de temperatura y la eficiencia del MEMS.

3.1 Conductividad Térmica

La conductividad térmica es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. La conductividad térmica es también la capacidad que tiene una sustancia de transferir el movimiento cinético de sus moléculas a sus propias moléculas adyacentes o a otras sustancias con las que está en contacto.

3.2 Origen Molecular de la Conductividad

Cuando se calienta la materia la energía cinética promedio de sus moléculas aumenta, incrementándose su movimiento. La conducción de calor, a nivel molecular se debe a la interacción entre las moléculas que intercambian energía cinética sin producir movimientos globales de materia. Por tanto la conducción térmica difiere de la convección¹ térmica en el hecho de que en la primera no existen movimientos macroscópicos de materia, que si ocurren en el segundo mecanismo. Todas las formas de materia condensada tienen la posibilidad de transferir calor mediante conducción térmica, mientras que la convección térmica en general sólo resulta posible en líquidos y gases. De hecho los sólidos transfieren calor básicamente por conducción térmica, mientras que para gradientes de temperatura importante los líquidos y los gases transfieren la mayor parte del calor por convección.

3.3 Conductividades Térmicas de los Materiales

La conductividad térmica es una propiedad de los materiales que valora la capacidad de conducir el calor a través de ellos. Es elevada en metales y en general en cuerpos continuos, y es baja en los gases (a pesar de que en ellos la transferencia puede hacerse a través de electrones libres) y en materiales iónicos y covalentes, siendo muy baja en algunos materiales especiales como la fibra de vidrio, que se denominan por eso aislantes térmicos. Para que exista conducción térmica hace falta una sustancia, de ahí que es nula en el vacío ideal, y muy baja en ambientes donde se ha practicado un vacío elevado.

¹ La convección térmica es una de las tres formas de transferencia de calor y se caracteriza porque se produce por intermedio de un fluido (aire, agua) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas; por tanto es el transporte de calor por medio de las corrientes ascendente y descendente del fluido.

Leyenda

Material	λ	Material	λ	Material	λ
Acero	47-58	Corcho	0,04-0,30	Mercurio	83,7
Agua	0,58	Estaño	64,0	Mica	0,35
Aire	0,02	Fibra de vidrio	0,03-0,07	Níquel	52,3
Alcohol	0,16	Glicerina	0,29	Oro	308,2
Alpaca	29,1	Hierro	80,2	Parafina	0,21
Aluminio	209,3	Ladrillo	0,80	Plata	406,1-418,7
Amianto	0,04	Ladrillo refractario	0,47-1,05	Plomo	35,0
Bronce	116-186	Latón	81-116	Vidrio	0,6-1,0
Cinc	106-140	Litio	301,2		
Cobre	372,1-385,2	Madera	0,13		

Tabla 3.1² Capacidad de los materiales para transmitir el calor.

El coeficiente de conductividad térmica (λ) caracteriza la cantidad de calor necesario por m^2 , para que atravesando durante la unidad de tiempo, 1 m de material homogéneo obtenga una diferencia de $1^\circ C$ de temperatura entre las dos caras. La conductividad térmica se expresa en unidades de $W/(m \cdot K)$ ($J/(s \cdot m \cdot ^\circ C)$); es una propiedad intrínseca de cada material que varía en función de la temperatura a la que se efectúa la medida, por lo que suelen hacerse las mediciones a 300 K con el objeto de poder comparar unos elementos con otros. Es un mecanismo molecular de transferencia de calor que ocurre por la excitación de las moléculas. Se presenta en todos los estados de la materia pero predomina en los sólidos.

3.4 Termoelectricidad

El efecto termoeléctrico en un material, relaciona el flujo de calor que lo recorre con la corriente eléctrica que lo atraviesa. Este efecto es la base de las aplicaciones de refrigeración y de generación de electricidad: un material termoeléctrico permite transformar directamente el calor en electricidad, o bien generar frío cuando se le aplica una corriente eléctrica.

Una de las tantas aplicaciones de la termoelectricidad, es la posibilidad de convertir un flujo de calor en corriente eléctrica permite aplicaciones de generación eléctrica mediante el efecto termoeléctrico, sobre todo a partir de fuentes de calor residual como los tubos de escape de los automóviles, las chimeneas de los incineradores, los circuitos de refrigeración de las centrales nucleares. El uso de esta tecnología supondría en estos casos una mejora en el rendimiento energético del sistema completo de manera limpia.

El calor residual es aprovechado para obtener un mayor aprovechamiento de la energía. Por ejemplo, el empleo de la termoelectricidad en los automóviles permitiría suplir parcialmente el trabajo del alternador, reduciendo así aproximadamente en un 10% el consumo de combustible.

² Serway. Physics for Scientists and Engineers
Sears, Z & Y. Física Universitaria

3.4.1 Principios Fundamentales

La conversión de energía por efecto termoeléctrico, se basa a su vez en los efectos Seebeck, Peltier y Thomson.

3.4.1.1 Coeficiente Seebeck

Una diferencia de temperatura dT entre las uniones de dos materiales distintos a y b implica una diferencia de potencial eléctrico dV según la ecuación:

$$S_{ab} = \frac{dV}{dT} \quad (3.1)$$

El coeficiente Seebeck, también llamado "Poder Termoeléctrico" se mide en $V.K^{-1}$ (o más frecuentemente en $\mu V.K^{-1}$ dado los valores de este coeficiente en los materiales más usuales).

Los coeficientes Seebeck de ambos materiales por separado se relacionan con el coeficiente Seebeck del par según:

$$S_{ab} = S_a - S_b \quad (3.2)$$

3.4.1.2 Coeficiente Peltier

En el efecto Peltier, una corriente eléctrica I recorre un circuito formado por los dos materiales, lo que conlleva una liberación de calor Q en uno de los materiales y una absorción en el otro, según la ecuación:

$$\Pi_{ab} = \frac{Q}{I} \quad (3.3)$$

3.4.1.3 Coeficiente Thomson

Al contrario que los coeficientes Seebeck y Peltier, el coeficiente Thomson puede definirse directamente para un único material. Cuando existen simultáneamente un gradiente de temperatura y una corriente eléctrica, hay una generación o absorción de calor en cada segmento del material considerado individualmente. El gradiente del flujo térmico en el seno del material viene dado por:

$$\frac{dQ}{dx} = I \frac{dT}{dx} \tau \quad (3.4)$$

donde x es la coordenada espacial y τ es el coeficiente Thomson del material.

3.4.2 Relaciones entre los coeficientes Seebeck, Peltier y Thomson

Kelvin demostró que los tres coeficientes Seebeck, Peltier y Thomson no eran independientes entre sí, estando relacionados por las ecuaciones:

$$\Pi_{ab} = S_{ab}T, \quad T_a - T_b = T \frac{dS_{ab}}{dT} \quad (3.5)$$

3.4.3 Principios de la conversión de energía por efecto termoeléctrico

Para la refrigeración o la generación de electricidad por efecto termoeléctrico, un "módulo" está constituido por "pares" conectados eléctricamente. Cada uno de estos pares está formado por un material semiconductor de tipo P ($S > 0$) y de un material tipo N ($S < 0$). Ambos materiales están unidos por un material conductor cuyo poder termoeléctrico se supone que es nulo. Las dos ramas (P y N) del par y todas las de los otros pares que componen el módulo se conectan eléctricamente en serie, y en paralelo desde el punto de vista térmico. Esta disposición permite optimizar el flujo térmico que atraviesa el módulo y su resistencia eléctrica. Para simplificar, todo el desarrollo que sigue se realizará para un único par formado por materiales de sección constante.

El esquema básico de un par P-N se utiliza para la refrigeración termoeléctrica. La corriente eléctrica es impuesta de tal manera que los portadores de carga eléctrica (electrones y huecos) se desplazan de la fuente fría a la caliente (en el sentido termodinámico) en las ramas del par. Al hacer esto, contribuyen a una transferencia de entropía de la fuente fría a la caliente, y por tanto a un flujo térmico que se opone al de la conducción térmica. Si los materiales utilizados tienen buenas propiedades termoeléctricas, este flujo térmico creado por el movimiento de los portadores de carga será más importante que el debido a la conductividad térmica. El sistema permitirá entonces evacuar el calor de la fuente fría hacia la fuente caliente, actuando entonces como un refrigerador.

En el caso de la generación de electricidad, es el flujo de calor el que implica un desplazamiento de los portadores de carga y por lo tanto, la aparición de una corriente eléctrica.

3.5 Rendimiento de la conversión y parámetros importantes

3.5.1 Cálculo del rendimiento de la conversión en un sistema termoelectrico

El cálculo del rendimiento de la conversión que realiza un sistema termoelectrico se efectúa determinando la relación entre el flujo de calor y la corriente eléctrica en el material. Para ello se utilizan las relaciones de Seebeck, Peltier y Thomson (véase más arriba), pero también las leyes de transferencia de calor y de la corriente eléctrica.

El siguiente ejemplo presenta el cálculo del rendimiento de la conversión en el caso de la refrigeración (el caso de generación eléctrica puede realizarse haciendo razonamientos análogos).

Retomemos el esquema precedente. En cada una de las ramas del par, el flujo de calor generado por el efecto Peltier se opone a la conductividad térmica. El flujo total en las ramas P y N será:

$$Q_p = S_p IT - \lambda_p A_p \frac{dT}{dx} \quad \text{y} \quad Q_n = -S_n IT - \lambda_n A_n \frac{dT}{dx} \quad (3.6)$$

siendo x la coordenada espacial, λ_p y λ_n las conductividades térmicas de los materiales y A_p y A_n sus secciones.

El calor se extrae de la fuente de frío con un flujo Q_f :

$$Q_f = (Q_n + Q_p)_{x=0} \quad (3.7)$$

Al mismo tiempo, la corriente que recorre las dos ramas es inicialmente el resultado del calor por efecto Joule $I^2\rho/A$ por unidad de longitud de las ramas. Suponiendo que el coeficiente Thomson es nulo (esto hace suponer que S es independiente de la temperatura, ver la relación de Thomson), la conservación de la energía en el sistema se escribe en las dos ramas:

$$-\lambda_p A_p \frac{d^2T}{dx^2} = \frac{I^2 \rho_p}{A_p} \quad \text{y} \quad -\lambda_n A_n \frac{d^2T}{dx^2} = \frac{I^2 \rho_n}{A_n} \quad (3.8)$$

Considerando las condiciones en los límites, $T=T_f$ en $x=0$ y $T=T_c$ en $x=L_p$ o $x=L_n$ con L_p y L_n las longitudes de las ramas P y N, T_f y T_c las temperaturas son las de las fuentes de frío y calor, Q_f se escribe:

$$Q_f = (S_p - S_n)IT_f - K\Delta T - \frac{1}{2}I^2R \quad (3.9)$$

con K y R las conductividad térmica y la resistencia eléctrica totales de cada una de las ramas del par.

$$K = \frac{\lambda_p A_p}{L_p} + \frac{\lambda_n A_n}{L_n} \quad \text{y} \quad R = \frac{L_p \rho_p}{A_p} + \frac{L_n \rho_n}{A_n} \quad (3.10)$$

La potencia eléctrica W disipada en el par debida al efecto Joule y al efecto Seebeck es:

$$W = I[(S_p - S_n)\Delta T + IR] \quad (3.11)$$

El rendimiento del sistema termoelectrico de refrigeración corresponde al cociente entre el calor extraído de la fuente fría y la potencia eléctrica disipada, es decir:

$$\eta = \frac{Q_f}{W} = \frac{(S_p - S_n)IT_f - K\Delta T - \frac{1}{2}RI^2}{I[(S_p - S_n)\Delta T + IR]} \quad (3.12)$$

Para una ΔT dada, el rendimiento depende de la corriente eléctrica que circula. Dos valores particulares de corriente permiten maximizar bien el rendimiento de la conversión η o el calor extraído de la fuente fría Q_f .

Por un razonamiento similar, el rendimiento de un par P-N usado para generar electricidad vendrá dado por la potencia eléctrica útil consumida por una resistencia de carga R (Resistencia térmica) con un flujo térmico atravesando el material:

$$\eta = \frac{P_u}{Q_c} = \frac{I[(S_p - S_n)\Delta T + IR]}{(S_p - S_n)IT_c + K\Delta T - \frac{1}{2}(R+r)I^2} \quad (3.13)$$

En este caso también existen dos valores particulares de I que maximizan el rendimiento de la conversión o bien la potencia eléctrica entregada por el sistema.

3.5.2 Parámetros importantes para obtener un buen rendimiento

Maximizando estos dos rendimientos de conversión, se puede demostrar que dependen únicamente de las temperaturas T_f y T_c y de un número adimensional (sin unidades) $Z_{pn}T_M$ llamado "factor de mérito" (T_M es la temperatura media del sistema, $T_M=(T_f+T_c)/2$) cuya expresión es:

$$Z_{pn} = \frac{(S_p - S_n)^2}{RK} \quad (3.14)$$

Hay que remarcar que para un par termoeléctrico cualquiera, el valor de Z_{pn} no es una propiedad intrínseca del material, sino que depende de las dimensiones relativas del módulo, dada la relación existente entre las dimensiones y R y K (resistencia eléctrica y la conductividad térmica). El rendimiento de conversión del sistema (funcionando como generador eléctrico o como dispositivo de refrigeración) es máximo cuando Z_{pn} es máximo, es decir, cuando el producto RK es mínimo, lo que sucede cuando:

$$\frac{L_n A_p}{L_p A_n} = \left(\frac{\rho_p \lambda_n}{\rho_n \lambda_p} \right)^2 \quad (3.15)$$

En este caso, el factor de mérito Z_{pn} se convierte en una función exclusiva de los parámetros intrínsecos de los materiales:

$$Z_{pn} = \frac{(S_p - S_n)^2}{\left(\sqrt{\lambda_p \rho_p} + \sqrt{\lambda_n \rho_n} \right)^2} \quad (3.16)$$

Así, para conseguir un óptimo rendimiento de la conversión conviene elegir los materiales que forman el par de forma que se maximice Z_{pn} . Como regla general, esto no se limita simplemente a optimizar los factores de mérito individuales de cada material que forma el par $Z=S^2/(\rho\lambda)$. En la mayoría de temperaturas utilizadas en la práctica, y sobre todo en aquellas empleadas para la generación de electricidad, las propiedades termoeléctricas de los mejores materiales de tipo P y N son similares. En estos casos, el factor de mérito del par es próximo al valor medio de los factores de mérito individuales, y es razonable el optimizar los factores de mérito de cada uno de los materiales de forma independiente.

La optimización de los materiales para su empleo en la conversión de energía mediante efecto termoeléctrico pasa pues necesariamente por la optimización de sus propiedades de conducción eléctrica y térmica, de manera que se maximice el factor de mérito:

$$ZT = \frac{S^2}{\rho\lambda} \quad (3.17)$$

3.6 Efectos Termoeléctricos Introducción

La interacción entre un fenómeno eléctrico y térmico se conoce desde el siglo XIX, cuando Joule observó que la materia ofrece cierta resistencia al movimiento de los electrones, los cuales ceden energía cinética al entorno en los sucesivos choques. Esta energía proporcionada por los electrones se disipa en forma de calor. Sin embargo, no es éste el único fenómeno de interacción termoeléctrica. Otros efectos son los denominados Seebeck, Peltier y Thomson.

El efecto Peltier descubierto en el año 1834 por el físico francés Peltier J. C. A. surgió sobre la base del descubrimiento del físico alemán Seebeck T.J. en 1821, quien observó que en un circuito formado por dos conductores distintos, cuyas uniones soldadas se encuentran en medios con temperaturas distintas, aparece entre ambos una diferencia de potencial. Esta diferencia de potencial es función de la naturaleza de los conductores y de la diferencia de temperaturas. Este dispositivo se conoce como termopar. La esencia del efecto Peltier, que básicamente es el contrario del efecto Seebeck, consiste en hacer pasar una corriente procedente de una fuente de energía eléctrica continua, a través de un circuito formado por dos conductores de distinta naturaleza, obteniéndose que una de sus uniones absorbe calor y la otra lo cede. El calor que cede el foco caliente será la suma de la energía eléctrica aportada al termo elemento y el calor que absorbe el foco frío. Estos termo elementos, configurados de este modo, constituyen una máquina frigorífica.

El efecto Thomson, descubierto en 1857 por Thompson W., consiste en la absorción o liberación de calor por parte de un conductor eléctrico, con un gradiente de temperaturas, por el cual circula una corriente eléctrica.

Ya en 1885 el físico inglés Rayleigh J.W. planteó la posibilidad del uso de dispositivos termoeléctricos como generadores de corriente eléctrica. Sin embargo, pese a que los fenómenos termoeléctricos son bien conocidos desde hace ya más de cien años, su desarrollo, tanto como generador de corriente o como refrigeración, estuvo totalmente frenado debido a los escasos rendimientos que se obtenían. Como consecuencia, la mayor parte de las aplicaciones termoeléctricas, que han ido desarrollándose desde hace más de 30 años han sido para campo militar, donde es más importante la robustez y precisión que la eficiencia o el coste. En el mercado civil actual, la refrigeración termoeléctrica tiene un sitio en aplicaciones de medicina, aparatos científicos y en dispositivos en los cuales la potencia de refrigeración es muy pequeña y de puntual aplicación.

Se describirán brevemente las ecuaciones que gobiernan los fenómenos termoeléctricos. Efecto:

- 1 Seebeck
- 2 Peltier
- 3 Joule
- 4 Thomson.

3.6.1 El efecto Joule

La más conocida interacción entre un fenómeno eléctrico, la conducción de corriente eléctrica, y su fenómeno térmico asociado, el calentamiento del conductor por el que circula la corriente, es el Efecto Joule. La materia ofrece cierta "resistencia" al movimiento de los electrones, los cuales ceden energía cinética al entorno en los sucesivos choques. Esta energía proporcionada por los electrones se disipa en forma de calor. Sin embargo, no es éste el único fenómeno de interacción termoeléctrica. Otros efectos, que resumimos brevemente aquí, son los denominados Seebeck, Peltier y Thomson.

3.6.2 El efecto Seebeck

Thomas J. Seebeck descubrió que en un circuito formado por dos metales distintos homogéneos, A y B, con dos uniones a diferente temperatura, T y T+DT, aparece una corriente eléctrica J, o bien, si se abre el circuito una fuerza termo electromotriz (f.t.e.m.) E_{AB} que depende de los metales utilizados en la unión y de la diferencia de temperatura entre las dos uniones. Ver Figura 3.1

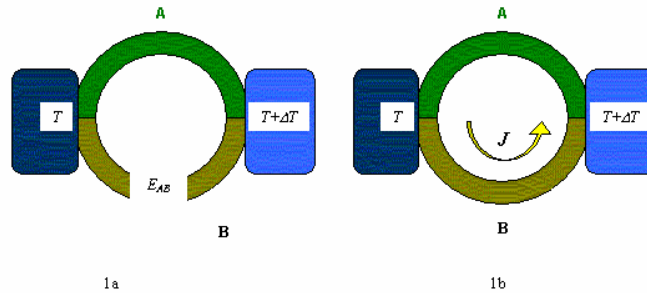


Figura 3.1 Al unir dos materiales distintos a diferentes temperaturas, se observa el cambio de temperatura

La relación entre la f.t.e.m., E_{AB}, y la diferencia de temperaturas entre las uniones, DT, define el coeficiente Seebeck, α_{AB} [Rowe, D. M. 1995]:

$$\alpha_{AB} = \frac{dE_{AB}}{dT} = \alpha_A - \alpha_B \quad (3.18)$$

α_A(T) y α_B(T) son respectivamente las potencias termoeléctricas absolutas de A y B y son características de cada metal. En general, α_{AB} no es constante, sino que depende de la temperatura T.

3.6.3 El efecto Peltier

El efecto Peltier consiste en el enfriamiento o calentamiento de una unión entre dos conductores distintos al pasar una corriente eléctrica por ella y que depende exclusivamente de la composición y temperatura de la unión.

La potencia calorífica intercambiada en la unión entre A y B es:

$$Q_p = \pm \pi_{AB} J = \pm JT(\alpha_B - \alpha_A) \quad (3.19)$$

donde π_{AB} es el llamado coeficiente Peltier, que se define como el calor intercambiado en la unión por unidad de tiempo y de corriente que circula a través de la misma:

$$\pi_{AB} \equiv \frac{Q_p}{\int_S J ds} = T(\alpha_B - \alpha_A) \quad (3.20)$$

J: flujo de corriente eléctrica

S: superficie

T: temperatura absoluta (K)

α_A, α_B : coeficiente Seebeck de los materiales A y B respectivamente

3.6.4 El efecto Thomson

El efecto Thomson consiste en la absorción o liberación de calor por parte de un conductor eléctrico homogéneo, con una distribución de temperaturas no homogénea, por el que circula una corriente.

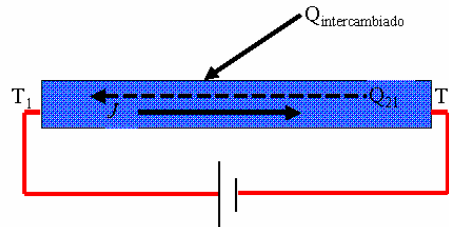


Figura 3.2 Conductor eléctrico homogéneo

El flujo neto de potencia calorífica por unidad de volumen, en un conductor de resistividad r , con un gradiente longitudinal de temperatura, por el que circula una densidad de corriente J será:

$$q = \frac{J^2}{\rho} + \sigma \nabla T J \quad (3.21)$$

donde σ es el coeficiente Thomson. El primer término corresponde al efecto Joule, irreversible, mientras que el segundo expresa el efecto Thomson, reversible. Desarrollando esta expresión para obtener la relación entre el coeficiente Thomson y Seebeck y teniendo en cuenta las ecuaciones que rigen los efectos Peltier y Seebeck, se llega a la ecuación:

$$\sigma \equiv \frac{q_\sigma}{\nabla T \cdot J} = T \frac{\partial \alpha}{\partial T} \quad (3.22)$$

Quedando para la unión:

$$\sigma_A - \sigma_B = T \frac{\partial \alpha_A}{\partial T} - T \frac{\partial \alpha_B}{\partial T} = T \frac{\partial}{\partial T} (\alpha_A - \alpha_B) \quad (3.23)$$

3.7 MEM Térmico

El MEM térmico que se ha elegido para la elaboración de este proyecto es un sensor térmico “sensor de conductividad térmica”.

Descripción

El sensor de conductividad térmica funciona observando el cambio de resistencias del sensor, en respuesta a una entrada del filamento del calentador. Cuando no está en contacto con un objeto, la única ruta para la entrada de calor del calentador para alcanzar la resistencia del sensor es por el sustrato del aire circundante. Cuando un objeto se acerca o se pone en contacto con el sensor, la baja eficacia de calor viaja por el aire reemplazando la conducción sólida, que cambia el carácter de la señal moderada en la resistencia de sensor, con una entrada de voltaje de onda cuadrada al calentador. La constante de tiempo de la temperatura de la resistencia del sensor es encontrada para ser una función al contacto con el objeto de la conductividad térmica.

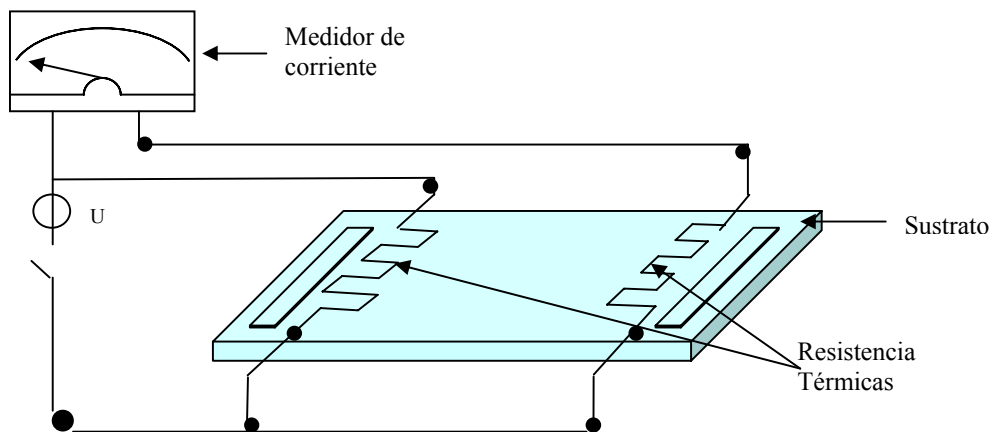


Figura 3.3 Sensor de conductividad térmica

En la figura 3.3 se observa el circuito abierto, no existe corriente alguna, por tanto ambas resistencias no conducen calor.

En la Figura 3.4 se muestra el circuito cerrado y un objeto separado de las resistencias. Al encontrarse cerrado el circuito la primera resistencia se calienta sin generar corriente, debido a que solo se encuentra cerrada la primera parte del circuito. En la figura 3.5 se observa que el objeto se encuentra cerca de las resistencias, donde el calor se transmite de la primera resistencia térmica al objeto, disipándose el calor a lo largo del objeto, el cual a su vez transmite ese calor a la segunda resistencia que se encuentra en el sustrato, resistencia que se calienta cerrando el circuito, mostrando el valor obtenido de la corriente.

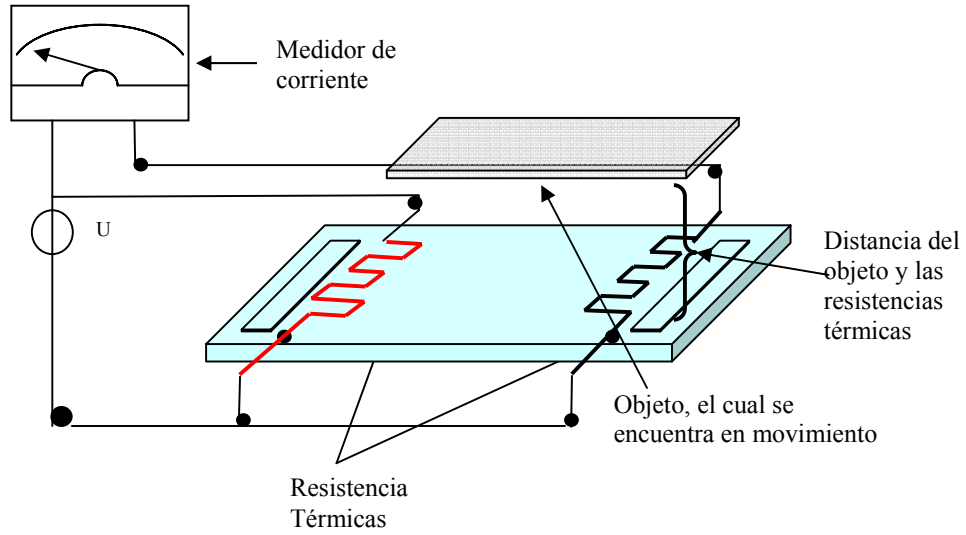


Figura 3.4 Sensor de conductividad térmica con objeto a una distancia donde no se conduce calor

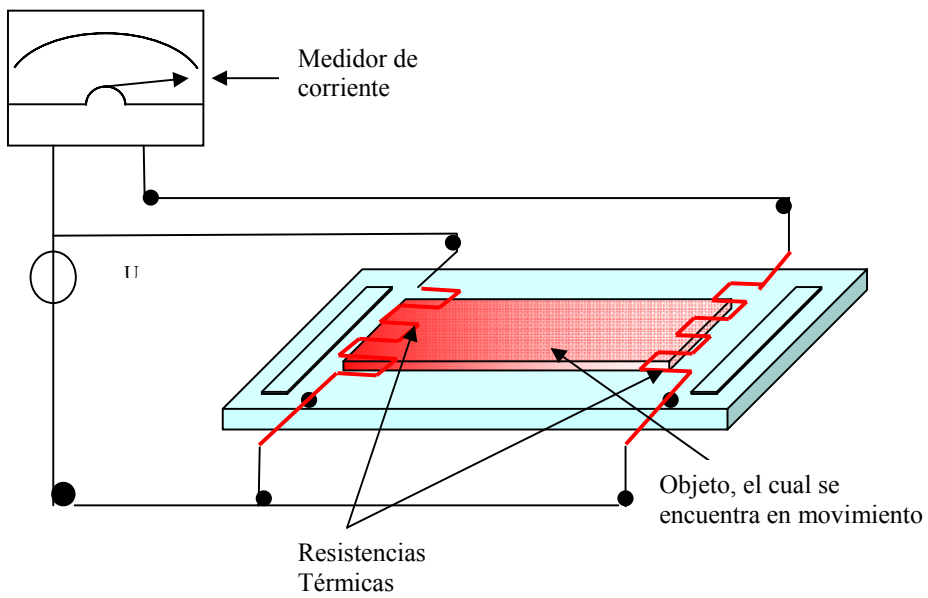


Figura 3.5 Sensor de conductividad térmica con objeto a una distancia mínima donde existe la conducción de calor

3.7.1 Modelo Matemático

El modelo matemático para el sensor de conductividad térmica es:

Se suponen dos objetos, uno de metal (quizá de acero) y otro de madera, los cuales, se acercaran o alejaran una cierta distancia del sensor de conductividad térmica, y se podrá observar que al acercar el objeto metálico existe un cambio de temperaturas, es decir que se tiene una mejor conducción con el metal que con un objeto de madera.

Supondremos que:

L = Espesor del objeto

T_1 = Temperatura del ambiente ($27^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$)

T_0 = Temperatura constante (20°C) del Sensor de Conductividad Térmica

$T_0 = 0$; En el momento en que el objeto se acerca al Sensor de Conductividad Térmica

r = Distancia a la superficie superior

t = Tiempo

Sea $T(t, r)$ = Temperatura del objeto en la posición r y en el momento t

$T(t, r)$ satisface la ecuación de la transmisión del calor

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = K^2 \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \quad (3.24)$$

Donde:

p = Densidad

c = Calor específico

K^2 = Conductividad del material

Dividiendo la ecuación anterior entre pc :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K^2 \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \quad (3.25)$$

K^2 = Coeficiente de transmisión del calor

Cuando $t = 0$:

$$T(0, r) = T_0 = 20^{\circ}\text{C} \quad \text{c.i.} \quad (3.26)$$

Como T_0 es la temperatura del ambiente al acercar el objeto al sensor de conductividad térmica en el instante $t=0$ obtendremos, para $t>0$ condiciones de frontera.

$$\begin{aligned} T(t, 0) &= T_1; \text{ Temperatura del ambiente } (20^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}) \\ T(t, L) &= T_0; \text{ Temperatura del objeto } (20^{\circ}\text{C}) \end{aligned} \quad (3.27)$$

Con esto supondremos que tanto la temperatura del ambiente como del Sensor de Conductividad Térmica no cambian a lo largo del experimento.

Resolviendo la ecuación diferencial (3.25) de acuerdo a la condición inicial (3.26) y bajo las condiciones de frontera (3.27):

$$\begin{aligned} \Rightarrow \quad \frac{\partial T}{\partial t} &= K^2 \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \\ T(t, r) &= K^2 r + S(t, r) \\ T(t, r) &= P_e - \frac{P_e - T_0}{L} \cdot r + S(t, r) \end{aligned} \tag{3.28}$$

De (3.24), S(t, r) satisface la ecuación:

$$\Rightarrow \quad \frac{\partial S}{\partial t} = K^2 \cdot \frac{\partial^2 S}{\partial r^2} \tag{3.29}$$

S(t, r) satisface la ecuación:

$$\Rightarrow \quad S(t, 0) = S(t, L) = 0 \quad \text{para } t > 0 \quad (\text{condición de frontera}) \tag{3.30}$$

$$\Rightarrow \quad S(0, r) = \frac{P_e - T_0}{L} \cdot (r - L) \quad (\text{Condición Inicial}) \tag{3.31}$$

Por el método de separación de variables, S (t, r) es un producto de 2 fracciones $\theta(t)$ y R(r), entonces:

$$\Rightarrow \quad S(t, r) = \theta(t) \cdot R(r) \tag{3.32}$$

Reemplazando (3.32) en (3.28)

$$\theta'(t) \cdot R(r) = k^2 \cdot \theta(t) \cdot R''(r)$$

Dividiendo por $\theta(t) \cdot R(r)$ se obtiene

$$\frac{\theta'(t)}{\theta(t)} = k^2 \cdot \frac{R''(r)}{R(r)} = -\lambda^2$$

Donde λ es una constante de separación

$$\theta'(t) = -\lambda^2 \cdot \theta(t) \quad R''(r) + \frac{\lambda^2}{k^2} \cdot R(r) = 0$$

Por tanto:

$$\theta(t) = \exp(-\lambda^2 t), \quad R(r) = \text{sen}\left(\frac{\lambda}{k} r\right) \quad \text{ó} \quad \cos\left(\frac{\lambda}{k} r\right)$$

De acuerdo con las condiciones de frontera (3.30) tenemos que escoger la solución seno, λ debe satisfacer:

$$\text{sen}\left(\frac{\lambda}{k} L\right) = 0$$

$$\text{Es decir, } \frac{\lambda}{k} = \frac{n\pi}{L} \quad (i=1,2,3,\dots)$$

Por ser una ecuación diferencial lineal (3.29) tenemos la siguiente solución general que satisface la condición de frontera (3.30)

$$\Rightarrow S(t, r) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \text{sen}\left(\frac{i\pi r}{L}\right) \cdot \exp\left(\frac{-i^2 \pi^2 k^2}{L^2} \cdot t\right) \quad (3.33)$$

$b_n (1,2,3,\dots)$ se determinan de acuerdo a la condición inicial (3.31)

$$\sum_{i=1}^{\infty} b_i \cdot \text{sen}\left(\frac{i\pi k}{L}\right) = \frac{P_e - T_0}{L} \cdot (r - L)$$

De la ortogonalidad de $\text{sen}\left(\frac{i\pi R}{L}\right)$, $i=1,2,3,\dots$ en $[0,L]$ se deduce:

$$b_i = \frac{P_e - T_0}{L} \cdot \frac{\int_0^L (r - L) \cdot \text{sen}\left(\frac{i\pi k}{L}\right) dr}{\int_0^L \text{sen}^2\left(\frac{i\pi k}{L}\right) dx} = -\frac{2}{i\pi} (P_e - T_0) \quad , \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

De (3.28) obtenemos la ecuación diferencial parcial de (3.25) que satisface las condiciones (3.26) y (3.27):

$$T(t, x) = P_e - (P_e - T_0) \cdot \left[\frac{r}{L} + \frac{2}{\pi} \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i} \cdot \text{sen}\left(\frac{i\pi r}{L}\right) \cdot \exp\left(\frac{-i^2 \pi^2 k^2}{L^2} \cdot t\right) \right] \quad (3.34)$$

3.7.2 Análisis de la solución

Para poder resolver correctamente este problema, debemos solucionarlo usando 3 métodos, uno de ellos es usando la transformada de Laplace, otro es usando la transformada de Fourier, y la última un análisis de la solución, la cual en esta ocasión utilizaremos.

Lo que se intenta calcular es la cantidad de calor que se transmite por el objeto; a la cantidad de calor la llamaremos A, que atraviesa la superficie superior (x = 0) por unidad de área y en el intervalo de tiempo entre t = 0 y t = Δt. Sabemos que el calor atraviesa perpendicularmente la superficie x = 0.

$$-k \cdot \left(\frac{\partial T(t, r)}{\partial r} \right)_{r=0}$$

Por lo que tenemos que:

$$A = - \int_0^{\Delta t} K \cdot \left(\frac{\partial T(t, r)}{\partial r} \right)_{r=0} dt \quad (\text{Por unidad de área})$$

Si tomamos Δt = 1 segundo y reemplazamos la solución dada en (3.34) obtenemos la cantidad A como sigue:

$$A = \frac{K \cdot (P_e - T_0)}{L} \cdot \left[1 + \frac{2L^2}{\pi^2 k^2} \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i^2} \left(1 - \exp\left(\frac{-i^2 \pi^2 k^2}{L^2} \right) \right) \right] \quad (3.35)$$

El valor de A

En la práctica, $\frac{\pi^2 k^2}{L^2}$ es pequeño (para L relativamente grande). Si n es grande entonces

$$\frac{i^2 \pi^2 k^2}{L^2} \text{ es grande, así que } \exp\left(\frac{-i^2 \pi^2 k^2}{L^2} \right) \approx 0 \quad \text{por lo tanto:}$$

$$1 - \exp\left(\frac{-i^2 \pi^2 k^2}{L^2} \right) \approx 1$$

La serie que aparece en (3.35) converge, entonces si calculamos el valor de la suma con N-1 términos, el error de cálculo es:

$$"error" = \sum_{i=N}^{\infty} \frac{1}{i^2} \left(1 - \exp\left(\frac{-i^2 \pi^2 k^2}{L^2} \right) \right) \sim \sum_{i=N}^{\infty} \frac{1}{i^2} \sim \frac{1}{I}$$

Si se quiere calcular el error menor a 0.001 se debe calcular la serie hasta el milésimo

término. Teniendo en cuenta $\sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i^2} = \frac{\pi^2}{6}$, tenemos que:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i^2} \left(1 - \exp\left(\frac{-i^2 \pi^2 k^2}{L^2}\right) \right) = \frac{\pi^2}{6} - \sum_{i=1}^{l-1} \frac{1}{i^2} \cdot \exp\left(\frac{-i^2 \pi^2 k^2}{L^2}\right) - \sum_{i=l}^{\infty} \frac{1}{i^2} \cdot \exp\left(\frac{-i^2 \pi^2 k^2}{L^2}\right)$$

Si aproximamos la serie infinita por la suma finita, tenemos:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i^2} \left(1 - \exp\left(\frac{-i^2 \pi^2 k^2}{L^2}\right) \right) \sim \frac{\pi^2}{6} - \sum_{i=1}^{l-1} \frac{1}{i^2} \cdot \exp\left(\frac{-i^2 \pi^2 k^2}{L^2}\right) \tag{3.36}$$

Entonces el error del cálculo sería:

$$"error" = \sum_{i=l}^{\infty} \frac{1}{i^2} \cdot \exp\left(\frac{-i^2 \pi^2 k^2}{L^2}\right) < \sum_{i=l}^{\infty} \frac{1}{i^2} \cdot \exp\left(\frac{l^2 \pi^2 k^2}{L^2}\right) \sim \frac{1}{l} \cdot \exp\left(\frac{-l^2 \pi^2 k^2}{L^2}\right)$$

Ejemplo:

Tomando L=5cm, se tiene que $\frac{\pi^2 k^2}{L^2} = 0.00076$ para el caso de la madera (ver tabla 3.2). Si l=61, entonces:

$$"error" < \frac{1}{61} * \exp(-2.82) \sim 9.8 \times 10^{-4} < 0.001$$

Es decir, basta calcular 60 términos de la suma finita dada en 12 para que el error de cálculo sea menor que 0.001.

En la tabla siguiente se muestra el valor de A(cal/cm²) para L= 1 y L= 5cm

	p	C	K	K ²	A(1)	A(2)
Acero	7.86	0.11	0.151	0.175	6.521	6.512
Madera	0.52	0.33	0.33 x 10 ⁻³	0.00192	0.137	0.135
Vidrio	2.20	0.20	3.04 x 10 ⁻³	0.00773	0.698	0.699

Tabla 3.2 Valores de A de acuerdo al análisis de la solución

Si observamos el valor de A es, para el acero 50 veces mayor que el valor de A para la madera, y el valor de A para el vidrio es 5 veces mayor que el valor de A para la madera.

La formula aproximada para el valor de A, aproximando la serie de (3.34) por una integral impropia en la forma:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i^2} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-i^2 \pi^2 k^2}{L^2}\right) \right) \sim \int_0^{\infty} \frac{1}{t^2} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-\pi^2 k^2}{L^2} \cdot t^2\right) \right) dt = \sqrt{\pi} \cdot \frac{\pi k}{L} \quad (3.37)$$

Reemplazando (3.37) en (3.35) e ignorando el 1 dentro del corchete tenemos:

$$A \sim \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\rho c K} \cdot (P_e - T_0) \quad (3.38)$$

Con esto se muestra la independencia de L para los valores relativamente grandes de L. En la siguiente tabla se muestran los valores de A:

1. Para L= 1cm (tabla 3.2)
2. Para L= 5cm (tabla 3.2)
3. Dados por la formula (3.38)

	A(1)	A(2)	A(3)
Acero	6.521	6.512	6.518
Madera	0.137	0.135	0.135
Vidrio	0.698	0.699	0.699

Tabla 3.3 Valores obtenidos de acuerdo a la tabla 3.2 y usando la ecuación (3.38)

CAPITULO 4

RESUMEN

En este capítulo se habla de las diferentes etapas en las que se desarrollo el programa, como el software que se eligió para el desarrollo del sensor de conductividad térmica, también se explica a detalle los fragmentos de código que se codificaron.

De igual manera, en este capitulo se realiza la simulación del sensor de conductividad térmica programando bajo Java, haciendo que la simulación sea dinámica, es decir, que el usuario pueda distinguir la diferencia de corriente que existe tanto al cerrar el circuito como al acercar o alejar un objeto de la resistencia de entrada, para poder producir calor y transmitirlo a la segunda resistencia y poder obtener de esta manera la corriente.

4.1 Introducción

Para el desarrollo del programa para la ejecución del proyecto se eligió trabajar bajo el software de MATLAB, software que se utiliza para programar y desarrollar ecuaciones matemáticas. Se eligió este software puesto que MATLAB es una de las aplicaciones más útiles que existen para poner a punto métodos numéricos en distintas asignaturas de ingeniería. Por ser una herramienta de alto nivel, el desarrollo de programas numéricos con MATLAB puede requerir hasta un orden de magnitud menos de esfuerzo que con lenguajes de programación convencionales, como Fortran, Pascal, C/C++, Java o Visual Basic.

Para la simulación del circuito se eligió el software de Microsoft Visual J++, puesto que este software es un lenguaje de programación creado con la intención de que se pueda usar sus conocimientos actuales para crear aplicaciones en la plataforma .NET de Microsoft. J++ se supone compatible con Java, tanto a nivel código fuente, como binario; además de que es un lenguaje donde se pueden desarrollar aplicaciones HTML y/o Applets.

4.2 Metodología

4.2.1 Modelo Matemático

El desarrollo del programa del modelo matemático se describe a continuación:

1. En la primera etapa se piden los valores de entrada, como lo es el valor de L, valor del espesor del objeto por el cual se conducirá el calor, al igual que el valor de conductividad que tiene el objeto valor que se le asigna a la variable K.

```
disp('Proporcione valor del espesor del cubo ')
L = input ('Espesor = '); %sirve para conducir el calor
disp('Proporcione el valor de la conductividad de calor del objeto')
K = input ('Conductividad = ');
```

2. En la segunda etapa de la programación se asignan valores a las variables que son constantes tal como es el valor de las resistencias, valor que es asignado a la variable R; también se asigna el valor del voltaje de entrada a la variable ve, igualmente se asigna el valor de la longitud del objeto en este caso se considera que es un lamina de 5cm, dicho valor es asignado a la variable Lc. Como parte del modelo matemático se ha considerado el valor de la temperatura ambiente, que es esencialmente importante para poder desarrollar el modelo matemático. Por último se asigna un tiempo estimado en el cual la lamina u objeto tardará en tocar las resistencias del circuito, dicho valor es asignado a la variable t₀, dándole un valor constante de 5seg.

```
R = 2; %Valor de la resistencia en kilo ohms
ve = 12; %Valor del voltaje de entrada al circuito
Lc = 7; %Valor constante de la longitud de la lamina en
%centímetros
T0 = 20; %Temperatura ambiente
t0 = 5; %Tiempo en que el objeto tarda en tocar la
%resistencia.
Sum = 0; %Variable donde se guardará el valor de la sumatoria
```

3. Se obtiene el valor del área transversal de la lamina, para poder verificar cual será el valor de la conducción térmica en la lamina. Este valor se asigna a la variable ArT, en esta ecuación se multiplica el valor de la variable Lc por 3, que es el ancho de la lamina por el valor de L

```
%Área Transversal
ArT = Lc*0.5*L;      %Volumen de la lamina, donde Lc es la longitud
                    %de la lámina, L el espesor y 0.5 el ancho
```

4. Se calcula la potencia de la primera parte del circuito, (tenemos que recordar que el circuito consta de 2 partes, la primera que es a la que se le transmite corriente; la segunda parte del circuito consta de la segunda resistencia la cual es alimentada por el calor transmitido de la lámina) es decir, se divide el valor del voltaje de entrada entre el valor de la primera resistencia. El valor que se obtiene de esta operación es asignado a la variable P.

```
%LEY DE OHM
P = ve^2 / R      %Potencia de la primera resistencia
```

5. En la siguiente línea se declara la variable “cont”, variable que se utilizara para poder posicionar los valores a los arreglos para poder graficar los datos; de igual manera se activan 2 variable tipo boolean.

```
cont = 0;  %Índice que se ocupara para los arreglos APe y Ar
           %para poder graficar
band = 1;  %Bandera utilizada para verificar la distancia
           %máxima para calcular la corriente
band1 = 1; %Bandera utilizada para graficar
```

6. La siguiente etapa del programa consta de llevar acabo el modelo exponencial, el cual consta de diversas etapas de desarrollo, las cuales se describen paso a paso una por una.

- 6.1. Para la realización del sensor de conductividad térmica evaluando la condición inicial y la ecuación

$$T(t, x) = P_e - (P_e - T_0) * \left[\frac{r}{L} + \frac{2}{\pi} * \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i} * \text{sen}\left(\frac{i\pi r}{L}\right) * \exp\left(\frac{-i^2 \pi^2 k^2}{L^2}\right) * t \right] \quad (4.1)$$

esta ecuación se desglosa en las siguientes líneas de código realizando un modelo exponencial.

Se realiza un ciclo for, esto debido a que se tiene que evaluar los diferentes valores que toma la distancia que existe entre la lamina y las resistencias, estos valores se toman de 0.1 a 1.5 aumentando este valor en 0.1, es decir cada que el ciclo se complete aumenta el valor de 0.1 a 0.2, de 0.2 a 0.3 y así sucesivamente hasta completar el ciclo en 1.5; estos valores son asignados a una variable r, la cual es evaluada para realizar el ciclo. Estos valores son considerados en milímetros (mm).

También se realiza una condición en la cual se evalúa la variable r, si esta variable es menor o igual a 1.5 (distancia máxima entre la lámina y la resistencia) entonces incrementara la variable “cont” para poder asignar los valores obtenidos los arreglos, utilizados para poder graficar.

```
%MODELO EXPONENCIAL
for r=0.1:0.1:1.5 %r distancia en la que se encuentra separada
                  %la lamina de la resistencia (mm)
    if r >= 0.1
        cont = cont + 1;
    end
    Pe = P * exp(-r/Lc); %Potencia de entrada a la lámina.
    ...
    ...
    ...
end
```

6.2. En la siguiente línea de código se obtiene la potencia de entrada a la lámina para poder así poder calcular el calor que se disipara a través del resto de la lámina.

```
Pe = P * exp (-r/ Lc); %Potencia de entrada a la lámina
```

6.3. Una vez obtenido este valor se obtiene el valor de la temperatura disipada en la lámina, multiplicando el valor de la temperatura del área de la cara transversal de la lámina por el volumen de la lámina; en la siguiente línea de código obtenemos la condición inicial que se necesita para que nuestra ecuación se empiece a evaluar.

```
%Pe termino multiplicado por el área transversal de la lámina
Pe1 = Pe * ArT; %Calor de entrada que se disipa en la lamina
S = ((Pe-T0) /L) *(r-L); %Condición inicial
```

6.4 Para que la ecuación I pueda ser evaluada, la condición inicial que obtenemos debe ser mayor o igual a 1, de lo contrario no se llevara acabo ninguna de las líneas siguientes y mandara un mensaje de aviso “NO SE PUEDE CALCULAR TEMPERATURA A LA DISTANCIA DE: ” y visualizaremos el valor de r (distancia) a la que no se ha podido calcular la temperatura y corriente.

En caso de que la condición inicial sea mayor o igual a 1 entonces se apaga la bandera para en caso de que no se pueda realizar el calculo desde la primera iteración nos pueda salir el mensaje de: “NO SE HA PODIDO CALCULAR CORRIENTE”

```

...
...
...
if S >= 1
    band = 0;      %Bandera Apagada
    %calculo de la sumatoria
    for i=1:S
        ...
        ...
        ...
elseif r >= 0.1 && band == 0
    %SI NO SE CUMPLE CON LA CONDICIÓN INICIAL (S >= 1)
    disp('NO SE PUEDE CALCULAR TEMPERATURA A LA
        DISTANCIA DE: ')
    disp(r)
    disp('EL CALOR QUE SALE DE LA LÁMINA ES: ')
    disp(calor)
    disp('LA CORRIENTE QUE SE GENERA EN EL CIRCUITO ES DE: ')
    disp(I2)
    break;      %Se realiza el break con el fin de que se rompa el
                %ciclo a la distancia en la que ya no se cumpla
                %la condición (S >= 1)
end
...
...
...

```

De lo contrario se la condición inicial es mayor a 1 entonces el proceso continuara entrando a un nuevo ciclo donde se llevará acabo la evaluación de la ecuación I. Dicho ciclo se efectuará desde 1 hasta el valor obtenido en la condición inicial.

Al finalizar este ciclo obtenemos el valor del calor que sale da la lamina, calor que entra a la segunda resistencia. Finalmente obtenemos el valor del calor que sale de la segunda resistencia dividiendo el calor de entrada a la resistencia entre el volumen de la lámina.

```

...
...
...
for i=1:S
    %sum es el calculo de la sumatoria
    ex = exp((-i)^2*pi^2*k^2/L^2);
    sum = sum + ((1/i)*sind(i*pi*r)/L)*ex*t0;
end
Ps= Pe-(Pe-T0)* (r/L + 2/pi * sum);

%Este termino se divide por el área transversal
s1 = Ps/Art;      %Calor de salida de la lamina a la 2da
                  %resistencia del circuito
...
...
...

```

6.5 En las siguientes líneas calculamos el calor que sale de la lámina y la corriente que se obtiene de la segunda resistencia del circuito. El calculo se efectúa con la ecuación:

$$P_{SL} e^{-r/LC} = P_{eR2}, \text{ donde } P_{eR2} = I^2 / R_2 \text{ por tanto: } I = \sqrt{P_{SL} * R_2 e^{-r/LC}}$$

```

calor = Ps * exp (-r/Lc);      %Se calcula el calor que sale del
                                %objeto

%Con sqrt se calcula la raiz cuadrada
I2 = ((s1*R)*(exp(-r/Lc)))* -1; %Calculo de la corriente que
                                %sale de la segunda
                                %resistencia del circuito

```

Para realizar el cálculo de la temperatura resolvemos la ecuación:

$$T = [(P_e * Lc) / \mu] e^{-r/Lc}, \text{ donde } \mu \text{ es el coeficiente de conductividad en este caso la variable k}$$

```

%Se calcula la temperatura
T = ((Pe*Lc)/k)*exp(-r/Lc);

```

6.6 Los resultados obtenidos de la Potencia de Entrada (Pe) son asignados a la posición de acuerdo al valor que contenga cont del arreglo APe; los resultados obtenidos de la Potencia de Salida (Ps) son asignados a la posición de acuerdo al valor que contenga cont del arreglo APs; los resultados obtenidos de la Corriente de la segunda resistencia del circuito (I2) son asignados a la posición de acuerdo al valor que contenga cont del arreglo AI2; los resultados obtenidos de la distancia a la que se encuentra la lámina de la resistencia (r) son asignados a la posición de acuerdo al valor que contenga cont del arreglo Ar;

```

%SE CREAN LOS ARREGLOS PARA QUE SE PUEDA GRAFICAR
%LOS VALORES QUE SE OBTIENEN DE LA POTENCIA O CALOR %DE ENTRADA Y
LOS VALORES DE LA DISTNCIA ENTRE LA %LÁMINA Y LA RESISTENCIA
    AT(cont) = T;          %Arreglo de temperatura
    Ar(cont) = r;         %Arreglo de la distancia entre la lámina
                          %y la resistencia
    AI2(cont) = I2;       %Arreglo de Corriente

```

6.7 Una vez obtenido todos los valores y llenados los arreglos se realiza una comparación con la variable band1 la cual debe tener como valor 0 para poder graficar los valores que se encuentran en el arreglo, esto porque si no se llevo a cabo ninguna iteración no podrá graficar a función plot, función que grafica los valores que contienen dos variables.

```

if band1 == 0
    plot(Ar,AI2)
    title('CORRIENTE CONTRA DISTANCIA')
    plot(Ar,AT)
    title('TEMPERATURA CONTRA DISTANCIA')
    plot(AI2,AT)
    title('TEMPERATURA CONTRA CORRIENTE')
else
    disp('NO SE HA PODIDO OBTENER GRAFICA')
end

```

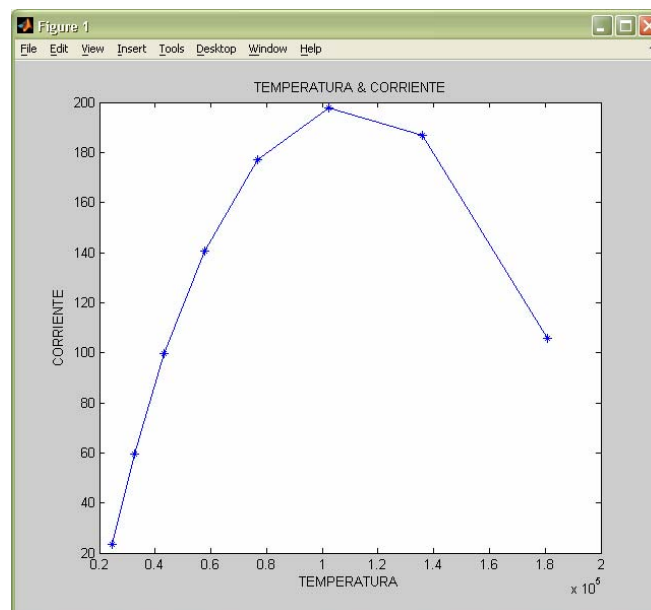
7. Para la ejecución del programa los valores tanto de Espesor como de Conductividad del material deben ser muy pequeños, puesto que de lo contrario resultan números infinitos o imaginarios que no pueden graficarse. Los datos que se dan para la ejecución del programa son los más grandes que se pueden dar para que se pueda obtener resultados reales.

La ejecución del programa es la siguiente:

```
>> Modelomatematico
Proporcione valor del espesor del cubo
Espesor = 0.05
Proporcione el valor de la conductividad de calor del objeto
Conductividad = 0.002093
"NO SE PUEDE CALCULAR TEMPERATURA A LA DISTANCIA DE: "
9

EL CALOR QUE SALE DE LA LÁMINA ES:
-20.3771
LA CORRIENTE QUE SE GENERA EN EL CIRCUITO ES DE:
23.2881
>>
```

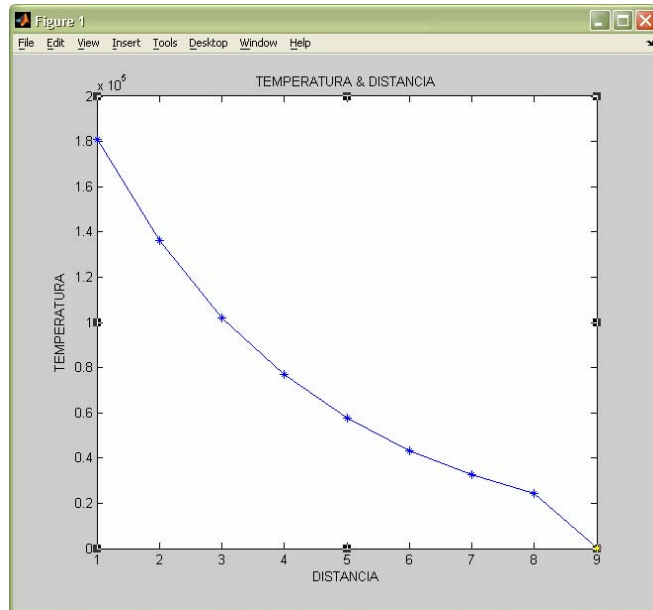
Las gráficas¹ obtenidas de acuerdo a los valores proporcionados en la ejecución del programa se muestran. En la Gráfica 4.1 se compara la temperatura contra la corriente, y mientras la temperatura aumenta la corriente también.



Gráfica 4.1 Temperatura contra Corriente

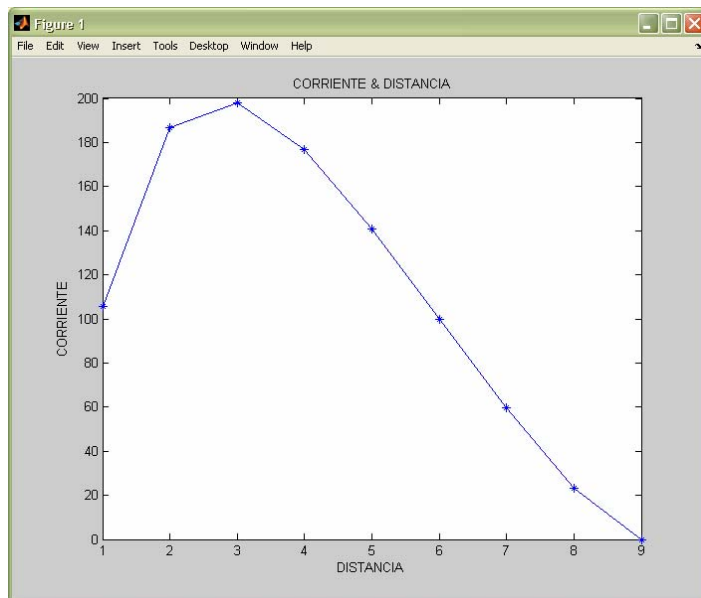
En la Gráfica 4.2 observamos que cuando la distancia entre el objeto y las resistencias aumenta, la temperatura disminuye.

¹ Información detallada en Capítulo 5



Gráfica 4.2 Distancia contra Temperatura

En la Gráfica 4.3 sucede lo mismo que en la gráfica anterior cuando existe mayor distancia entre el objeto y las resistencias, la corriente es menor; y viceversa, cuando la distancia disminuye la corriente aumenta.



Gráfica 4.3 Distancia contra Corriente

4.2.2 Interfaz Gráfica

La realización de la simulación del Sensor de Conductividad Térmica se llevo a cabo programando bajo Java. La simulación se realizo con el fin de que el usuario pudiera manipular y observar lo que ocurre con el circuito, es decir, el usuario puede cerrar o abrir el circuito para poder calentar la primera resistencia (Ver Figura 4.4a y Figura 4.4b)² o bien dejar el circuito abierto, y no pasara nada (ver Figura 4.4b). Si el circuito se cierra, entonces el usuario puede manipular un objeto, entre más se acerque este objeto a la resistencia que se encuentra activa, es decir, que se encuentra disipando calor, se calentara este objeto, disipándose calor a través de él, provocando que la segunda resistencia se caliente por causa del calor del objeto marcando una corriente que sale del circuito (Ver Figura 4.5)³.

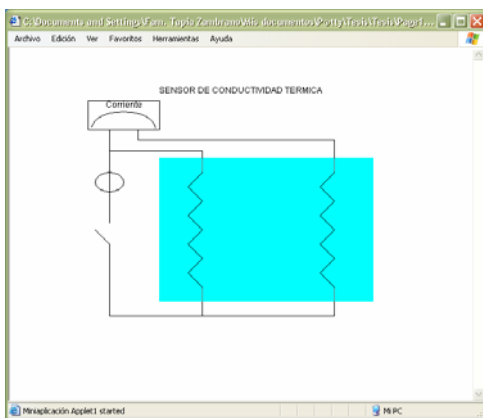


Figura 4.4a Muestra el circuito abierto

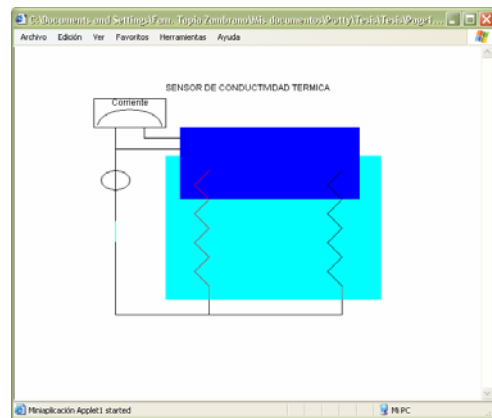


Figura 4.4b Muestra circuito cerrado con objeto colocado

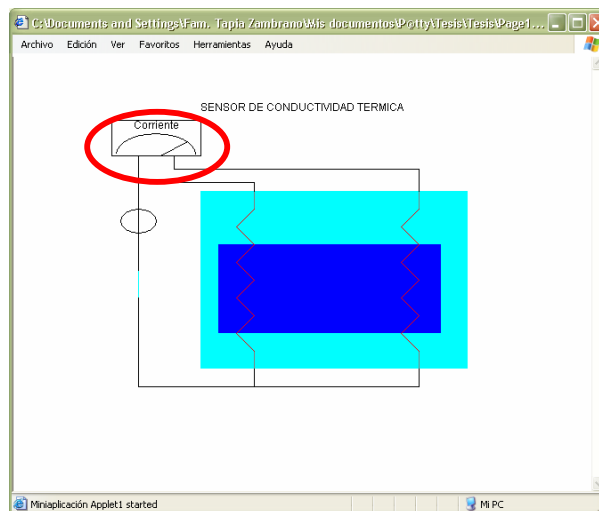


Figura 4.5 Muestra la corriente que se genera cuando el objeto disipa calor a la segunda resistencia del circuito.

² Explicación detallada en página 49

³ Explicación detallada en página 50

El código del desarrollo de la interfaz se describe a continuación:

1. En Java a diferencia de MatLab, se tienen que importar librerías para poder realizar las diferentes aplicaciones. Las librerías que se ocupan son las de Event y Point para poder utilizar el mouse y la de Graphics librería que se utiliza para poder realizar gráficos.

```
import java.awt.*;
import java.awt.Event;
import java.awt.Point;
import java.awt.Graphics;
```

2. La interfaz que se está realizando es un applet, y para llevar a cabo este applet se debe realizar una clase de tipo Applet, y dentro de esta clase realizar todas las subclases necesarias para poder llevar a cabo todas las acciones que se desea se tenga la interfaz; en este caso como lo es el abrir o cerrar el circuito, y/o manipular el objeto para poder medir la corriente.

```
public class Applet1 extends java.applet.Applet
{
    ...
    ...
    ...
}
```

3. Dentro de la clase Applet, se declaran las variables que se ocuparán como lo es:

Variable	Descripción
<code>boolean band = false;</code>	Bandera que se usa para poder simular el circuito abierto o cerrado
<code>boolean bandCC = false;</code>	Bandera que se utiliza para verificar si el circuito se encuentra abierto o cerrado, si la bandera está apagada (false) entonces el circuito está cerrado, de lo contrario (true) el circuito se encuentra abierto.
<code>Point coorIni[] = new Point[1];</code> <code>Point coorFin[] = new Point[1];</code> <code>Point coorObj[] = new Point[1];</code>	Arreglos de tipo punto, cada uno guarda las coordenadas donde se ha dado clic con el mouse, para poder abrir, cerrar o mover el objeto respectivamente.
<code>Point corx;</code>	Variable de tipo Point, para cerrar/abrir el circuito y/o mover el objeto
<code>int cerrado = 0;</code>	Variable que se utiliza para ubicar las coordenadas en los arreglos anteriores de tipo punto.
<code>int cont = 1;</code>	Variable que se utiliza para poder simular la distancia a la que se encuentra el objeto del circuito.

4. La función `public void init()` pone en color blanco el área en la que aparecerá el applet.

```
public void init ()
{
    setBackground(Color.white);
}
```

5. Después se programan las funciones de mouse. La función cuando el botón del mouse se encuentra presionado “public boolean mouseDown(Event evt, int x, int y)”, en la cual se verifica que el estado del circuito, si se encuentra abierto (band = false), se asignan las coordenadas de donde se encuentre posicionado el mouse a la variable corx; y a la variable bandCC se le asigna un true indicando que el circuito se encuentra abierto, regresando la función un valor verdadero. De lo contrario, si band = true, se mandara un mensaje de error de que el circuito no se pudo cerrar, se asignaran las coordenadas en las cuales se encuentra posicionado el mouse se asignar un valor falso a la variable bandCC y la función regresara un valor falso.

```
public boolean mouseDown(Event evt, int x, int y)
{
    if(band == false)
    {
        corx = new Point(x,y);
        bandCC = true;           //si la bandera esta prendida el
                                //circuito esta abierto de
                                //lo contrario esta cerrado

        return true;
    }
    else
    {
        System.out.println("No se ha podido cerrar
                            circuito...");
        corx = new Point(x,y);
        bandCC = false;
        return false;
    }
}
```

6. En la función mouseUp se mandan a llamar a las funciones Movimientos (x, y), y AbreCircuito (x, y), (funciones que se explicaran más adelante). Si la variable cont es mayor o igual a uno, se manda a llamar a la función Movimientos (x, y), y la función retorna un valor verdadero. Si cont es menor a uno entonces se manda a llamar a la función AbreCircuito (x, y).

```
public boolean mouseUp(Event evt, int x, int y)
{
    if(cont >= 1)
    {
        //Se manda a cerrar el circuito
        Movimientos(x,y);
        return true;
    }
    else
    {
        //Se manda a Abrir el circuito
        AbreCircuito(x,y);
        return false;
    }
}
```

7. La función Movimientos (x, y), la cual realiza todos los movimientos del circuito, como lo es abrir, cerrar circuito y/o mover objeto; lo primero que realiza la función es asignar al arreglo de tipo punto las coordenadas del evento de mouse, se compara si la

coordenada 'x' es menor o igual a 130 y mayor o igual a 110, o que la coordenada 'y' es menor o igual a 220 y mayor o igual a 190, de ser así se verifica que si la variable bandCC sea verdadera, comprobando que el circuito se encuentra abierto, si esto es verdadero se manda a llamar a la función CierraCircuito, de lo contrario se llama a la función AbreCircuito, asignando a la variable cont uno, para poder simulara el circuito abierto.

```
void Movimientos(int x, int y)
{
    coorIni[cerrado] = corx;

    //MANDA A LLAMAR A LA FUNCION PARA CERRAR CIRCUITO
    if(((coorIni[cerrado].x <= 130) && (coorIni[cerrado].x >= 110)) ||
        ((coorIni[cerrado].y <= 220) && (coorIni[cerrado].y >=190)))
    {
        if (bandCC == true)
            CierraCircuito();

        //SI NO MANDA A LLAMAR A FUNCIÓN ABRE CIRCUITO
        else
        {
            AbreCircuito(x,y);
            cont = 1;
        }
    }

    ...
    ...
    ...
}
```

8. Si la coordenada 'x' no es menor o igual a 130 y tampoco es mayor o igual a 110, o que la coordenada 'y' no es menor o igual a 220 y tampoco mayor o igual a 190, entonces quiere decir que el circuito se encuentra cerrado y no se intenta abrir el circuito sino que se intenta mover el circuirto, es por ello que se pregunta se bandRO es falso el objeto puede moverse acercándose al circuito , y se verifica que la coordenada de 'x' sea mayor o igual a 220 y menor o igual a 445, o que la coordenada 'y' es mayor o igual a 100 y menor o igual a 220, para llamar a la función MueveObjeto; si bandRO es verdadero entonces el objeto se regresa, es decir se aleja del circuito y se llama a la función RegresaObjeto.

```
void Movimientos(int x, int y)
{
    ...
    ...
    ...
    //MANDA A LLAMAR A LA FUNCION PARA MOVER OBJETO O
    //REGRESAR OBJETO

    else if(bandRO == false) //Si la bandera esta apagada (false) el
        //objeto se mueve
    {
        //MANDA A LLAMAR A LA FUNCIÓN DE MUEVE OBJETO
        if(((coorIni[cerrado].x >= 220) && (coorIni[cerrado].x
            <= 445)) || ((coorIni[cerrado].y >= 100) &&
            (coorIni[cerrado].y <=220)))

            MueveObjeto(x,y);
    }
```

```

    }
    else //Si la bandera esta prendida (true) el objeto se regresa
        RegresaObjeto(x,y);
}

```

9. La función `CierraCircuito` cierra el circuito (ver figura 4.4a y 4.4b), asignando a las variables `band` y `bandCC` valores verdadero y falso respectivamente, y llama a la función `repaint`, función que se explicara con detalle mas adelante.

```

void CierraCircuito()
{
    band = true;
    bandCC = false; //indica que el circuito esta cerrado
    repaint();
}

```

10. La función `AbreCircuito`, abre el circuito (ver figura 4a y 4b), asignando las coordenadas del evento de mause al arreglo de tipo punto `coorFin`, verificando que la coordenada 'x' sea menor o igual a 130 y mayor o igual a 110, además de que la coordenada 'y' debe ser menor o igual a 220 y mayor o igual a 190, de ser así a la variable `band` se le asigna un valor falso, a la variable `bandCC` se le asigna un valor verdadero, a `cont` se le asigna un cero y se llama a la función `repaint`, función que se explicara más adelante con detalle.

```

void AbreCircuito(int x, int y)
{
    coorFin[cerrado] = corx;
    if(((coorFin[cerrado].x <= 130) && (coorFin[cerrado].x >=
        110)) && ((coorFin[cerrado].y <= 220) &&
        (coorFin[cerrado].y >=190)))
    {
        band = false;
        bandCC = true; //Indica que el circuito esta Abierto
        cont = 0;
        repaint();
    }
}

```

11. La función `MueveObjeto`, mueve el objeto de tal manera que el usuario pueda interactuar con el, acercándolo hasta el tope o bien alejándolo. Esto se logra incrementando la variable `cont`, que es la que nos ayudara a colocar el objeto en una cierta coordenada en la función `repaint`. Se verifica que `cont` sea mayor o igual a 2 pero sea menor o igual a 5, puesto que 5 es el tope de acercamiento del objeto, además de que `bandRO` sea falso.

```

void MueveObjeto(int x, int y)
{
    cont++;
    if((cont >= 2) && (cont <= 5) && (bandRO == false))
        repaint();
    ...
    ...
    ...
}

```

Si la variable `cont` no cumple con la condición entonces a `bandRO` se le asigna un valor verdadero y se llama a la función `RegresaObjeto`.

```

...
...
...
else
{
    bandRO = true;
    RegresaObjeto(x,y);
}
}

```

12. La función `RegresaObjeto` asigna las coordenada del evento de mause al arreglo de tipo punto `coorObj`, si la coordenada 'x' es mayor o igual a 220 y menor o igual a 445 o la coordenada 'y' es mayor o igual a 100 y menor o igual a 220, entonces se decrementa la variable `cont`, se realiza una comparación si `cont` es mayor o igual a 2 y menor o igual a 5 y `bandRO` es verdadera entonces se llama a la función `repaint`; de lo contrario se asigna a `bandRO` verdadero y se llama a la función `MueveObjeto`.

```

void RegresaObjeto(int x, int y)
{
    coorObj[cerrado] = corx;

    if(((coorObj[cerrado].x >= 220) && (coorObj[cerrado].x <= 445)) ||
        ((coorObj[cerrado].y >= 100) && (coorObj[cerrado].y <=220)))
    {
        cont--;
        if((cont >= 2) && (cont <= 5) && (bandRO == true))
        {
            repaint();
        }
        else
        {
            bandRO = false;
            MueveObjeto(x,y);
        }
    }
}
}

```

13. La función `paint` es un componente importante para la realización del applet; esta función dibuja lo que se le programe, es decir que puede dibujar desde líneas hasta polígonos, sin importar su tamaño o dimensión, colores y texturas. La función `paint` requiere de un parámetro de la clase `Graphics`, la cual da acceso a dibujar líneas o polígonos, colores y texturas. Desde esta función se manda a imprimir en las coordenadas `x = 200` y `y = 10` "SENSOR DE CONDUCTIVIDAD TERMICA".

```

public void paint(Graphics g)
{
    g.drawString("SENSOR DE CONDUCTIVIDAD TERMICA",200,10);
    ...
    ...
}

```

Dentro de esta función se dibujar un rectángulo que simula la placa del circuito, el amperímetro y los cables que se conectan del circuito al amperímetro, además de las líneas que marcan el inicio y final de las resistencias.

```
public void paint(Graphics g)
{
    //COLOR DE LA BASE O PLACA DEL CIRCUITO
    g.setColor(Color.cyan);
    ...
    ...
    ...
}
```

El color de la placa que simula el circuito el color asignado es verde agua como se muestra en la Figura (4.5)

```
//RECTANGULO DIBUJADO PARA LA PLACA DEL CIRCUITO
g.fillRect(200,100,300,200);
```

La función `g.fillRect` dibuja un rectángulo con las dimensiones que el programador asigne. La función `g.drawLine`, dibuja líneas con las coordenadas (X_1, Y_1, X_2, Y_2)

Las siguientes líneas de código simulan la placa del circuito, el amperímetro y las líneas de cableado del circuito al amperímetro, de igual manera se simulan las resistencias cuando el circuito se encuentra abierto (ver Figura 4.4a)

```
public void paint(Graphics g)
{
    g.drawString("SENSOR DE CONDUCTIVIDAD TERMICA",200,10);
    //COLOR DE LA BASE O PLACA DEL CIRCUITO
    g.setColor(Color.cyan);

    //RECTANGULO DIBUJADO PARA LA PLACA DEL CIRCUITO
    g.fillRect(200,100,300,200);

    //LINEA DE INICIO 1ra RESISTENCIA
    g.setColor(Color.gray);
    g.drawLine(260,100,260,120);

    //LINEA FINAL DE 1ra RESISTENCIA
    g.setColor(Color.gray);
    g.drawLine(260,280,260,300);

    //LINEA DE INICIO 2da RESISTENCIA
    g.setColor(Color.gray);
    g.drawLine(445,100,445,120);

    //LINEA FINAL DE 2da RESISTENCIA
    g.setColor(Color.gray);
    g.drawLine(445,280,445,300);

    //SE DIBUJA CABLE PARA UNIR RESISTNCIAS DE LA PARTE
    //INFERIOR AL AMPERIMETRO CABLE QUE SALE DE LA PARTE
    //INFERIOR DE LA 1ra RESISTENCIA
    g.setColor(Color.black);
    g.drawLine(260,300,260,320);

    //CABLE QUE SALE DE LA PARTE INFERIOR DE LA 2da RESISTENCIA
```

```

g.setColor(Color.black);
g.drawLine(445,300,445,320);

//CABLE QUE UNE A LOS DOS CABLES ANTERIORES
g.setColor(Color.black);
g.drawLine(130,320,445,320);

//FUENTE DE PODER
g.drawArc(110,120,40,27,0,360);

//CABLE QUE UNE AL CABLE ANTERIOR PARA REALIZAR EL CIRCUITO
//CERRADO
g.setColor(Color.black);
g.drawLine(130,220,130,320);
g.setColor(Color.black);
g.drawLine(130,60,130,190);

//SE DIBUJA CABLE PARA UNIR RESISTENCIAS DE LA PARTE
//SUPERIOR AL AMPERIMETRO CABLE QUE SALE DE LA PARTE
//SUPERIOR DE LA 1ra RESISTENCIA
g.setColor(Color.black);
g.drawLine(260,90,260,100);
g.setColor(Color.black);
g.drawLine(130,90,260,90);

//CABLE QUE SALE DE LA PARTE SUPERIOR DE LA 2da
//RESISTENCIA
g.setColor(Color.black);
g.drawLine(445,75,445,100);
g.setColor(Color.black);
g.drawLine(170,75,445,75);
g.setColor(Color.black);
g.drawLine(170,60,170,75); //LINEA QUE SE CONECTA AL
//AMPERIMETRO

//SE DIBUJA AMPERIMETRO
g.drawRect(100,20,100,40);
g.drawString("Corriente",125,30);
g.setColor(Color.black);
g.drawArc(105,35,89,47,0,180);

```

Si la variable `band` trae un valor falso quiere decir que el circuito se encuentra abierto, por tanto al finalizar la simulación de las líneas de código anteriores se evaluará `band`, y como el circuito se encuentra abierto ambas resistencias se dibujan de color negro.

```

public void paint(Graphics g)
{
    ...
    ...
    ...

    //SE INICIA CODIGO SI EL CIRCUITO ESTA ABIERTO

    if(band == false)
    {
        //LINEAS QUE REPRESENTAN LA 1ra RESISTENCIA
        //CABLE DE CIRCUITO ABIERTO/CERRADO
        g.setColor(Color.black);
        g.drawLine(110,200,130,220);

        g.setColor(Color.black);
        g.drawLine(260,120,240,140);
    }
}

```

```

        g.setColor(Color.black);
        g.drawLine(240,140,260,160);
        g.setColor(Color.black);
        g.drawLine(260,160,240,180);
        g.setColor(Color.black);
        g.drawLine(240,180,260,200);
        g.setColor(Color.black);
        g.drawLine(260,200,240,220);
        g.setColor(Color.black);
        g.drawLine(240,220,260,240);
        g.setColor(Color.black);
        g.drawLine(260,240,240,260);
        g.setColor(Color.black);
        g.drawLine(240,260,260,280);
        ...
        ...
        ...
    }//TERMINA CODIGO SI EL CIRCUITO ESTA ABIERTO
    ...
    ...
    ...
}

```

Si la variable `band` tiene valor verdadero entonces, la simulación del circuito indicara que este se encuentra cerrado, por tanto se simula el cierre del circuito con una línea del mismo color de la placa que simula el circuito.

```

public void paint(Graphics g)
{
    ...
    ...
    ...

    //INICIA CODIGO SI EL CIRCUITO ESTA CERRADO
    else if(band == true)
    {
        //CABLE QUE HACE LA FUNCIÓN DE CIRCUITO CERRADO
        g.setColor(Color.cyan);
        g.drawLine(130,190,130,220);
        ...
        ...
        ...
    }
}

```

Cuando el circuito se cierra, en la simulación aparece el objeto a mover, un rectángulo de color azul con coordenadas $y = 60$ y $x = 220$ con dimensiones de 250×130 pixeles.

```

public void paint(Graphics g)
{
    ...
    ...
    ...
    g.setColor(Color.blue);
    g.fillRect(220,60,250,130);
    ...
    ...
    ...
}

```

La primera resistencia se dibuja de color rojo, indicando que existe paso de voltaje, y que se encuentra transmitiendo calor a esta primera resistencia.

```
public void paint(Graphics g)
{
    ...
    ...
    //SE INICIA CODIGO SI EL CIRCUITO ESTA ABIERTO
    //LINEAS QUE REPRESENTAN LA 1ra RESISTENCIA
    g.setColor(Color.red);
    g.drawLine(260,120,240,140);
    g.setColor(Color.red);
    g.drawLine(240,140,260,160);
    g.setColor(Color.red);
    g.drawLine(260,160,240,180);
    g.setColor(Color.red);
    g.drawLine(240,180,260,200);
    g.setColor(Color.red);
    g.drawLine(260,200,240,220);
    g.setColor(Color.red);
    g.drawLine(240,220,260,240);
    g.setColor(Color.red);
    g.drawLine(260,240,240,260);
    g.setColor(Color.red);
    g.drawLine(240,260,260,280);
    ...
    ...
    ...
}
```

Recordemos que en el capítulo 3 se explica que la segunda resistencia del circuito es calentada por el objeto que se acerca, pues el objeto al ser acercado a la primera resistencia recibe calor, calor que se disipa a través del objeto y este a su vez transmite calor a la segunda resistencia. Como la segunda resistencia no tiene entrada de voltaje ni tampoco de calor no tiene cambio alguno, debido a que el objeto no ha tenido cambio alguno en su posición actual, por tanto se simula de color negro

También recordemos que el circuito puede abrirse si se encuentra cerrado sin importar que el objeto se encuentre ya en movimiento, o bien puede cerrarse si se encuentra abierto. Como el circuito se encuentra cerrado entonces band tiene valor verdadero, por tanto se evalúa si la variable cont es igual a 2, quiere decir que el objeto se encuentra a una distancia lejana de las resistencias, el objeto no recibe el calor total de la primera resistencia y el calor que se disipa en el objeto es mínimo; conforme se acerca el objeto a las resistencias, este va transmitiendo el calor obtenido de la 1ra resistencia a la 2da resistencia, cambiando esta última de color.

Los colores que se simulan en son: Gris, Amarillo, Naranja y Rojo.

La línea de código que cambia de color para la 2da resistencia en la simulación de la disipación de calor es:

```
g.setColor(Color."Color deseado");
```

A continuación se muestra parte del código de esta simulación

```

public void paint(Graphics g)
{
    ...
    ...
    ...
    /***INICIA CODIGO SI EL CIRCUITO ESTA CERRADO***/
    // SI SE MUEVE EL OBJETO PINTA DE COLOR ROJO 2da RESISTENCIA
    else if((cont == 5) && (band == true))
    {
        ...
        ...
        ...
        //SE INICIA CODIGO SI EL CIRCUITO ESTA ABIERTO
        //LINEAS QUE REPRESENTAN LA 2da RESISTENCIA
        g.setColor(Color.red);
        g.drawLine(445,120,425,140);
        g.setColor(Color.red);
        g.drawLine(425,140,445,160);
        g.setColor(Color.red);
        g.drawLine(445,160,425,180);
        g.setColor(Color.red);
        g.drawLine(425,180,445,200);
        g.setColor(Color.red);
        g.drawLine(445,200,425,220);
        g.setColor(Color.red);
        g.drawLine(425,220,445,240);
        g.setColor(Color.red);
        g.drawLine(445,240,425,260);
        g.setColor(Color.red);
        g.drawLine(425,260,445,280);
        ...
        ...
        ...
    }
}

```

La distancia del objeto más cercana al circuito es con la variable cont igual a 5, y la más lejana es con la variable cont igual a 2. Si cont es igual a 5, la segunda resistencia se simula de color rojo, por tanto la corriente es más grande y se puede ver en el amperímetro de la simulación.

Si la variable band tiene valor verdadero y cont no tiene ningún valor anterior, por consecuencia el circuito se encuentra cerrado, y el objeto no tiene movimiento, por tanto la 1ra resistencia se encuentra recibiendo voltaje entonces se simula de color rojo, pero la segunda resistencia no se le transmite calor y se simula de color negro.

CAPITULO 5

RESUMEN

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en el software utilizado (MatLab); se mostraran los resultados obtenidos en el modelo matemático (resultados numéricos), hasta las graficas que se obtiene con estos resultados.

También se mostrara el desarrollo de la interfaz así como los resultados que se obtienen utilizando la interfaz del circuito de conductividad térmica realizada bajo Visual J++.

5.1 Resultados

5.1.1 Numéricos

Para obtener resultados reales, visibles y no finitos, los valores que se tiene que proporcionar al correr el programa deben ser muy pequeños, de lo contrario los resultados que se obtienen serán infinitos o imaginarios y las graficas que obtienen no mostraran nada, puesto que valores imaginarios o infinitos no pueden graficarse.

Se mostraran algunos ejemplos reales y otros imaginarios y/o infinitos.

Corrida 1

```
>> Modelomatematico
Proporcione valor del espesor del cubo
Espesor = 0.5
Proporcione el valor de la conductividad de calor del objeto
Conductividad = 0.002093
"NO SE PUEDE CALCULAR TEMPERATURA A LA DISTANCIA DE: "
9

EL CALOR QUE SALE DE LA LÁMINA ES:
-20.3771
LA CORRIENTE QUE SE GENERA EN EL CIRCUITO ES DE:
23.2881
>>
```

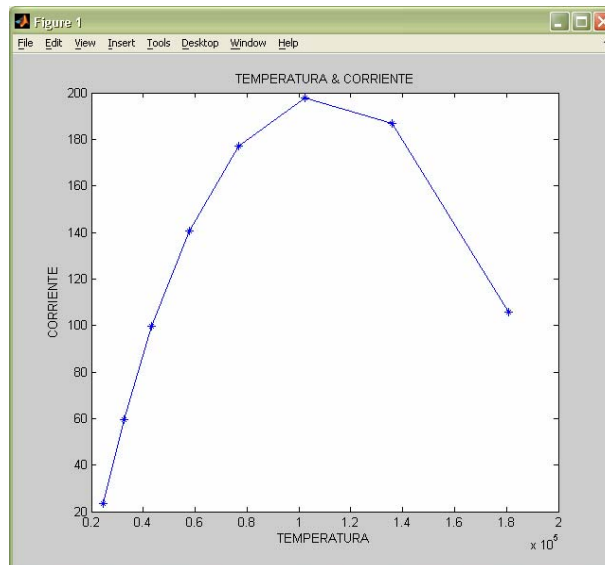


Figura 5.1 Temperatura contra Corriente

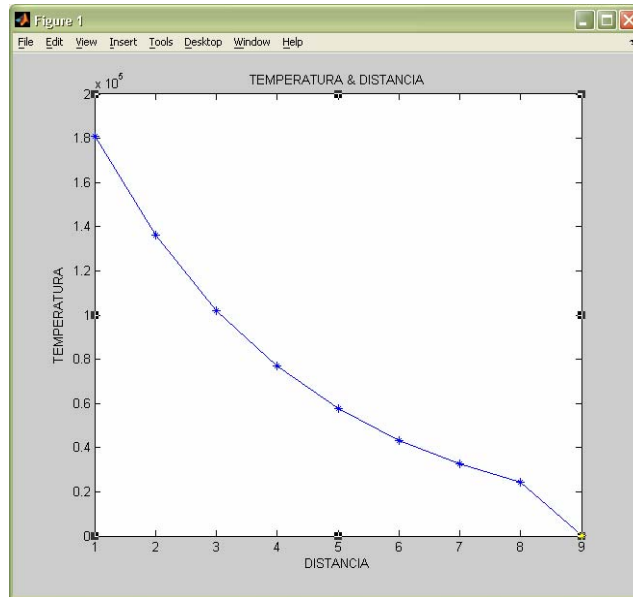


Figura 5.2 Temperatura contra Distancia

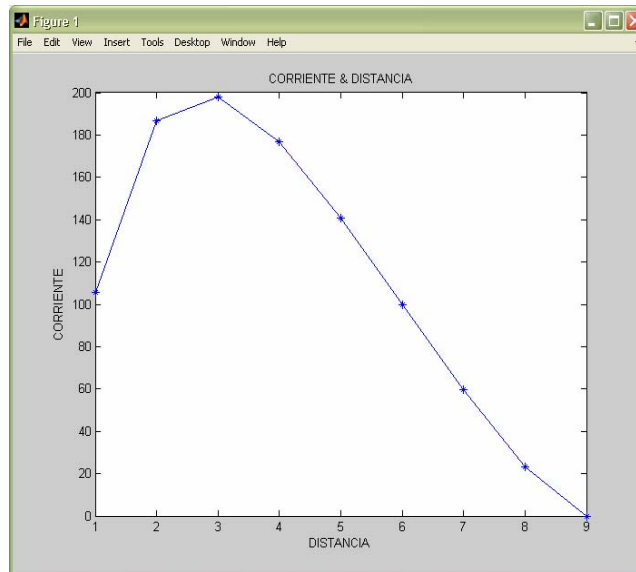


Figura 5.3 Distancia contra Corriente

Corrida 2

```
>> >> Modelomatematico
Proporcione valor del espesor de la lámina
Espesor = 0.5
Proporcione el valor de la conductividad de calor de la lámina
Conductividad = 0.001032
"NO SE PUEDE CALCULAR TEMPERATURA A LA DISTANCIA DE: "
9
```

```
EL CALOR QUE SALE DE LA LÁMINA ES:
-20.5470
```

LA CORRIENTE QUE SE GENERA EN EL CIRCUITO ES DE:
23.4823

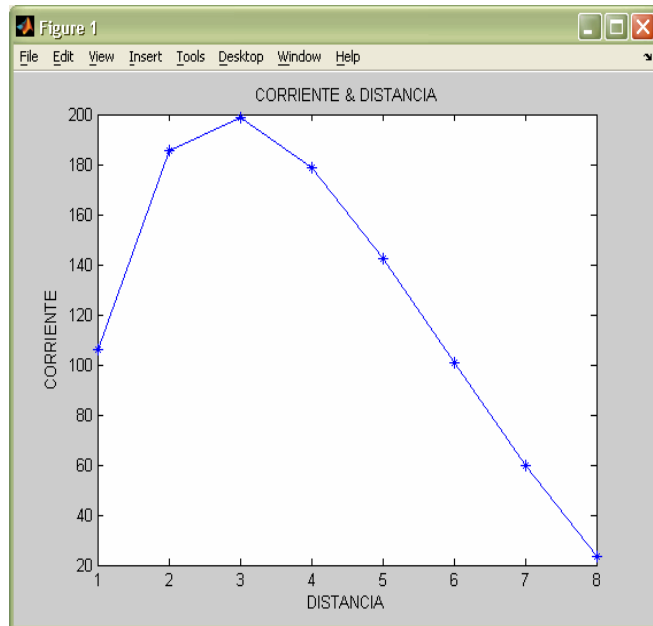


Figura 5.4 Distancia & Corriente

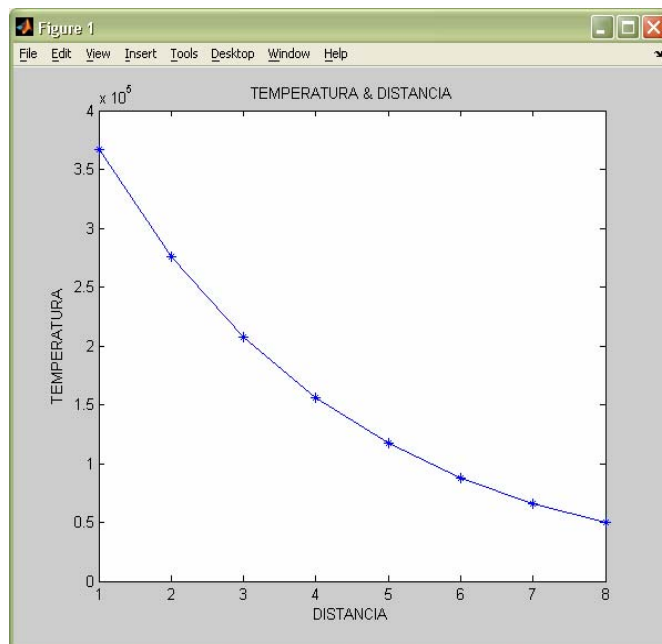


Figura 5.5 Distancia & Temperatura

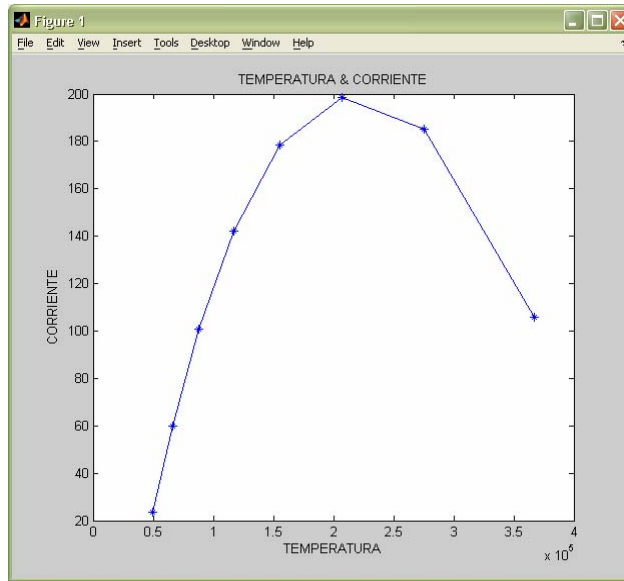


Figura 5.6 Corriente & Temperatura

Como puede observarse cuando la conductividad es mayor a 0.21 los valores que se obtienen no son números. Esto se debe en ocasiones a que la cantidad es tan pequeña que se puede evaluar en el modelo matemático establecido, es decir, que los resultados que se obtienen en el modelo matemático son tan pequeños que al obtener una raíz cuadrada, se vuelven más pequeños y por tanto no se pueden graficar estos valores, a excepción de la temperatura contra distancia, puesto que la temperatura si se obtiene se cual sea el valor que se le de a la conductividad del material.

5.1.2 Interfaz Gráfica

Los resultados que se obtienen de la interfaz programada bajo J++ son los que se muestran en la Figura 5.1, Figura 5.2 y Figura 5.3.

En todas las fases de la interfaz en la parte superior se muestra el título del circuito (Sensor de Conductividad Térmica). En la Figura 5.1 se puede observar la primera fase de la interfaz, es decir el circuito se encuentra abierto, ambas resistencias se encuentran inactivas, puesto que no pasa voltaje; el amperímetro no muestra ningún valor o resultado por la misma razón anterior.

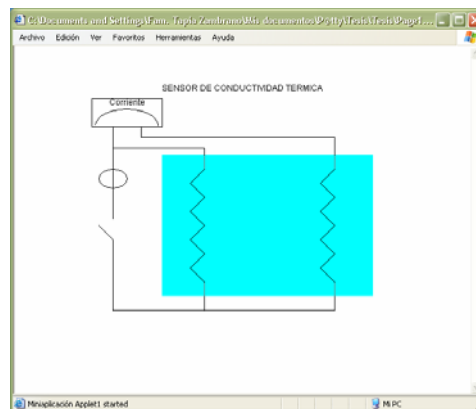


Figura 5.1 Muestra el circuito abierto

En la Figura 5.2 se puede observar el circuito cerrado, simulado con una línea del mismo color de la placa del circuito sobre la línea que se conecta al amperímetro; poniendo de color rojo la 1ra resistencia, indicando que el voltaje esta circulando solamente por la 1ra resistencia. También se observa un rectángulo de color azul, que representa la lámina que se encontrará disipando calor a la 2da resistencia.

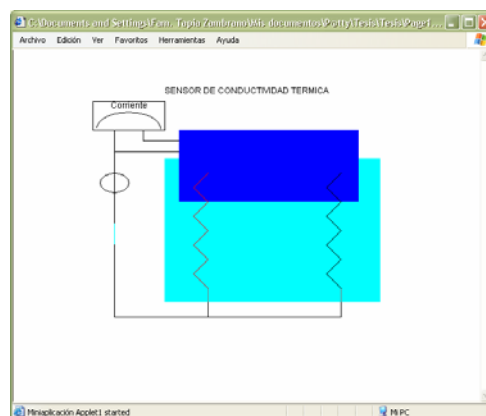


Figura 5.2 Muestra circuito cerrado con objeto colocado

En la Figura 5.3, se observa que una vez que la representación de la lámina (cuadro azul) se encuentra a una distancia considerable de las resistencias, la 2da resistencia se pinta de color rojo; y en el amperímetro se muestra la corriente que existe a la distancia en

que se encuentra la lámina. Si a la distancia a la que se encuentra la lámina de las resistencias es una distancia a la cual no se puede calcular la corriente, debido a que no existe número o bien que sea un número infinito el resultado que se obtiene en el modelo matemático, se mostrar en pantalla NaN en caso de que no exista número o sea infinito el resultado (Ver Figura 5.4).

Como puede observarse en la Figura 5.3 ambas resistencias estas de color rojo, y en la Figura 5.4 la 1ra resistencia esta de color rojo y la 2da resistencia esta de color naranja, esta implica que el objeto se encuentra a una distancia muy grande donde el calor no puede ser transmitido por completo y la resistencia no es calentada en su totalidad, por tanto la corriente es pequeña.

En el modelo matemático por el cual se calcula la disipación de calor y corriente, no existe tal número que representa la interfaz, porque la operación del modelo matemático no puede llevarse a cabo debido a que uno de los resultados es cero, y no puede dividirse un valor entre cero.

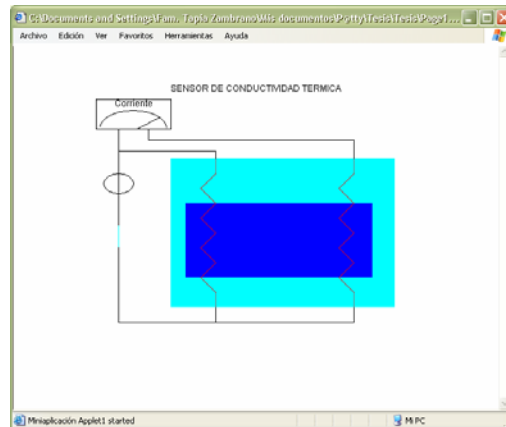


Figura 5.3 Corriente máxima alcanzada

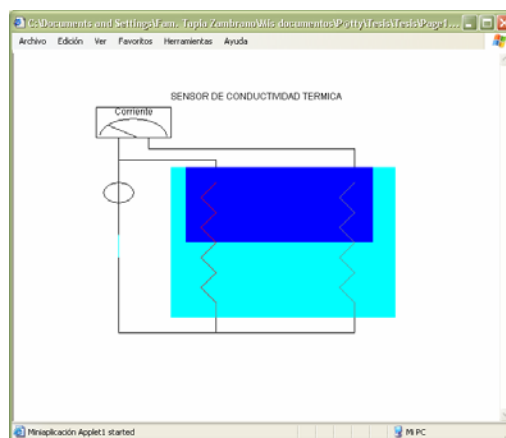


Figura 5.4 Corriente mínima alcanzada

Conclusiones

El desarrollo de la tecnología MEMS Microelectromechanical Systems (Sistemas Micro-electro-mecánicos) en los últimos años ha ido avanzado, y ha dado a la tecnología gran avance para las tareas diarias del hombre.

El desarrollo de este trabajo empieza al analizar que si se tiene dos materiales, uno de ellos a una temperatura y el otro que por medio de un objeto conductor entre los material materiales, se pueda generar transmisión de calor, obteniendo como resultado una corriente.

Para desarrollar el modelo matemático del proyecto, se empleo el efecto Peltier, el cual describe que existe una liberación de calor y una absorción de otro y el efecto de Seebeck, que nos dice que al estar 2 metales distintos homogéneos con dos uniones a distintas temperaturas se puede obtener corriente eléctrica.

El modelo matemático se desarrolla en MatLab, puesto que es un software diseñado para realizar operaciones matemáticas.

La interfaz se desarrolla en Visual Java, puesto que es una de las herramientas que nos facilita la visualizaron de dicha interfaz.

La tecnología MEMS es de gran importancia, pues con ella se han desarrollado avances tecnológicos como la PC's, los celulares, maquinaria industrial, entre otras. En este proyecto se intento demostrar que un Sensor de Conductividad Térmica transmite una señal de corriente, calor o temperatura, mediante un objeto que puede transmitir calor y así al calentarse este objeto por medio de un transmisor de calor, puede calentar otro transmisor, este ultimo dará la señal de la corriente que se esta generando en el sensor de conductividad térmica.

El sensor de conductividad térmica que se maneja en el proyecto es un ejemplo de un MEMS, puesto que se maneja escalas grandes del sensor produciendo pequeñas cantidades de calor, que al reducir su tamaño aumentamos sus capacidades, sin alterar sus resultados; el MEM que se maneja es un MEM de conductividad térmica.

No se logro desarrollar el MEM de conductividad térmica físicamente, puesto que nuestro país aun no cuenta con la tecnología par poder desarrollar este tipo de tecnología, además de que su desarrollo es sumamente costoso.

Bibliografía

1. “Modelado de MEMS y NEMS” John A. Pelesko, David H. Bernstein, CHAPMAN & HALL/CRC, 2003, Pág. 1-2
2. [1] Kinetic approach for the calculation of the thermopower coefficients in semiconductor heterostructures, M. A. Rodríguez-Meza, J.L. Carrillo, A. Rangel-Huerta, Physica A 328 (2003)154-166.
3. [2] Kinetic theory of thermotransport in degenerate polar semiconductors, A. Rangel-Huerta M. A. Rodríguez-Meza, R. M. Velasco. (Enviado Physica A 2004).
4. “Como programar sobre C/C++ y Java” Deitel, Harvey M. y Deitel, Paul J. 4ª edición; Pearson Educación, Mexico, 2004.
5. http://209.85.165.104/search?q=cache:RD7DP2xILeAJ:es.wikipedia.org/wiki/Sistemas_microelectromec%C3%A1nicos+MEMS&hl=es&ct=clnk&cd=10&gl=mx&lr=lang_es
6. http://aportes.educ.ar/fisica/nucleo-teorico/estado-del-arte/nuevas-herramientas/dispositivos_mecanicos_ultra_p.php
7. [www.unavarra.es/ets02/Introduccion%20a%20TE\(c\).htm](http://www.unavarra.es/ets02/Introduccion%20a%20TE(c).htm)
8. http://es.wikipedia.org/wiki/Serie_de_Fourier
9. www.ett.bme.hu/memsedu/
10. Manual de MatLab 7
11. Manual de J++