



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**DESARROLLO DE UN LABORATORIO VIRTUAL PARA EL ESTUDIO DE  
LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN**

**Tutor académico:** Ing. Nilo Espinoza

**Tesista:** Germán Ibarra



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**DESARROLLO DE UN LABORATORIO VIRTUAL PARA EL ESTUDIO DE  
LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE  
UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO**

**Tutor académico:** Ing. Nilo Espinoza

**Tesista:** Germán Ibarra

**VALENCIA, OCTUBRE 2012**



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



### CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado para evaluar el Trabajo Especial de grado titulado **“Desarrollo de un Laboratorio Virtual para el Estudio de la Transferencia de Calor por Conducción”**, realizado por el bachiller: Germán Ibarra, cédula de identidad 18.612.285, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

---

Prof. Nilo Espinoza  
Tutor

---

Prof. Damelys Zabala  
Jurado

---

Prof. Aquiles Vera  
Jurado

VALENCIA, OCTUBRE 2012

## DESARROLLO DE UN LABORATORIO VIRTUAL PARA EL ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN

*German J., Ibarra F.*

**Palabras clave:** calor, conducción, software, laboratorio.

Actualmente la comunidad estudiantil de la Escuela de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Carabobo, no cuentan con un laboratorio de transferencia de calor totalmente activo que afiance los conocimientos teóricos adquiridos en horas de clase. Ante esta situación problemática se propone como buena alternativa, el desarrollo de un laboratorio virtual para el estudio de la transferencia de calor por conducción, para el que se contempla como banco de ensayo modelo el “Medidor de Conductividad Térmica” que hasta los momentos se encuentra inactivo para la realización de prácticas de laboratorio. Adicionalmente se propuso un módulo llamado “Radio Crítico de Aislamiento” con la finalidad de visualizar y concientizar aún más al estudiantado, sobre las aplicaciones que tiene conductividad térmica en el campo laboral de acuerdo con los criterios teóricos de radio crítico de aislamiento. Este desarrollo planteado mediante un programa computacional tiene la finalidad tanto de cumplir la situación problemática planteada como proporcionar una herramienta didáctica y visual que estimule el interés por el aprendizaje de la asignatura “transferencia de calor”, también proporcionara un ahorro inmenso de tiempo y espacio, tomando en cuenta la duración que tiene realizar este tipo de ensayos. Este programa se pretende desarrollar bajo el lenguaje computacional Java a fin de aprovecharlo en cualquier sistema operativo.

## NOMENCLATURA

| Símbolo                     | Descripción                                                  | Unidad en SI        |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------|
| <b>A</b>                    | Área                                                         | m <sup>2</sup>      |
| <b>D,d</b>                  | Diámetro                                                     | m                   |
| <b><i>Dt/dx</i></b>         | Gradiente de temperatura                                     | K/m                 |
| <b><i>Dt/dr</i></b>         | Gradiente de temperatura en coordenadas cilíndricas          | K/m                 |
| <b><i>h</i></b>             | Coeficiente de transferencia de calor por convección         | W/ m <sup>2</sup> K |
| <b><i>hi</i></b>            | Coeficiente de transferencia de calor por convección interno | W/ m <sup>2</sup> K |
| <b><i>h</i><sub>∞</sub></b> | Coeficiente de transferencia de calor por convección externo | W/ m <sup>2</sup> K |
| <b><i>h</i><sub>v</sub></b> | Entalpía del vapor de agua en el aire                        | Kj/kg               |
| <b><i>h</i><sub>g</sub></b> | Entalpía del vapor saturado                                  | Kj/kg               |
| <b><i>I</i></b>             | Intensidad de corriente                                      | A                   |
| <b><i>k</i></b>             | Conductividad térmica                                        | W/m K               |
| <b><i>KT</i></b>            | Conductividad térmica teórica del material                   | W/m K               |
| <b><i>Kexp</i></b>          | Conductividad térmica obtenida experimentalmente             | W/m K               |
| <b><i>ka</i></b>            | Conductividad térmica del aislante                           | W/m K               |
| <b><i>k<sub>T</sub></i></b> | Conductividad térmica de la tubería                          | W/m K               |
| <b><i>L</i></b>             | Longitud (de la probeta entre T1 y T2)                       | m                   |
| <b><i>P</i></b>             | Presión total                                                | kPa                 |
| <b><i>P<sub>a</sub></i></b> | Presión parcial del aire seco                                | kPa                 |
| <b><i>P<sub>v</sub></i></b> | Presión parcial del vapor de agua                            | kPa                 |

| <b>Símbolo</b> | <b>Descripción</b>                                                                                      | <b>Unidad en SI</b> |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| $q$            | Tasa de transferencia de calor                                                                          | W                   |
| $q_{cond}$     | Tasa de transferencia de calor por conducción                                                           | W                   |
| $q_{conv}$     | Tasa de transferencia de calor por convección                                                           | W                   |
| $q_r$          | Tasa de transferencia de calor por radiación                                                            | W                   |
| $r$            | Radio                                                                                                   | m                   |
| $r_{critico}$  | Radio crítico de aislamiento                                                                            | m                   |
| $T$            | Temperatura                                                                                             | °C                  |
| $T_{pr}$       | Temperatura del punto de rocío                                                                          | °C                  |
| $T_{se}$       | Temperatura en la superficie                                                                            | °C                  |
| $T_v$          | Temperatura interna de la tubería                                                                       | °C                  |
| $T_{\infty}$   | Temperatura externa                                                                                     | °C                  |
| $\Delta T1$    | Diferencia de temperatura en la probeta(entre T1 y T2)                                                  | °C                  |
| $\Delta T2$    | Diferencia de temperatura entre la resistencia tipo cartucho y la resistencia tipo abrazadera (T3 y T4) | °C                  |
| $V$            | Voltaje                                                                                                 | V                   |

## ÍNDICE GENERAL

|                                                                                                                          | <i>Pág.</i> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>INTRODUCCION.....</b>                                                                                                 | <b>01</b>   |
| <b>CAPITULO I: EL PROBLEMA</b>                                                                                           |             |
| 1.1. Planteamiento del Problema .....                                                                                    | 04          |
| 1.2. Formulación el Problema .....                                                                                       | 05          |
| 1.3. Objetivos.....                                                                                                      | 05          |
| 1.3.1. Objetivo General .....                                                                                            | 05          |
| 1.3.2. Objetivos Específicos.....                                                                                        | 05          |
| 1.4. Justificación.....                                                                                                  | 06          |
| 1.5. Limitaciones.....                                                                                                   | 08          |
| 1.6. Alcance.....                                                                                                        | 08          |
| <b>CAPITULO II: MARCO TEÓRICO</b>                                                                                        |             |
| 2.1 Antecedentes de la Investigación.....                                                                                | 9           |
| 2.2 Bases Teóricas.....                                                                                                  | 12          |
| 2.2.1 Transferencia de calor.....                                                                                        | 12          |
| 2.2.2 Mecanismos de Transferencia de calor.....                                                                          | 15          |
| 2.2.2.1 Convección.....                                                                                                  | 15          |
| 2.2.2.2 Radiación.....                                                                                                   | 17          |
| 2.2.2.3 Conducción.....                                                                                                  | 20          |
| 2.2.2.4 Transferencias de calor por conducción en<br>régimen estacionario y flujo unidireccional.<br>Ley de Fourier..... | 22          |
| 2.2.3 Conductividad térmica.....                                                                                         | 32          |
| 2.3 Mezclas Gas-Vapor.....                                                                                               | 41          |
| 2.3.1 Humedad Específica y Relativa del Aire.....                                                                        | 43          |
| 2.3.2 Temperatura de punto de rocío.....                                                                                 | 44          |
| 2.3.3 Temperaturas de saturación adiabática y de bulbo húmedo....                                                        | 44          |
| 2.3.4 La carta psicrométrica.....                                                                                        | 45          |
| 2.4 Resolución aproximada de ecuaciones: Método de Newton-Raphson...                                                     | 47          |
| <b>CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO</b>                                                                                  |             |
| 3.1 Nivel de la Investigación. ....                                                                                      | 50          |
| 3.2 Naturaleza de la Investigación.....                                                                                  | 50          |
| 3.3 Tipo de Estudio.....                                                                                                 | 50          |
| 3.4 Diseño de la Investigación.....                                                                                      | 51          |
| 3.4.1 Revisión y síntesis de la bibliografía.....                                                                        | 52          |
| 3.4.2. Estudio del funcionamiento del banco de pruebas de<br>transferencia de calor por conducción.....                  | 52          |
| 3.4.3. Desarrollo de los algoritmos de cálculo.....                                                                      | 54          |
| 3.4.4. Codificación de los algoritmos en un lenguaje visual.....                                                         | 64          |
| 3.4.5. Elaboración de la interfaz gráfica para el usuario.....                                                           | 64          |
| 3.4.6. Validación de los resultados obtenidos con el programa.....                                                       | 64          |

|                                                                                                                        |         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 3.4.7. Elaboración del manual del usuario.....                                                                         | 65      |
| 3.5. Factibilidad del Proyecto.....                                                                                    | 65      |
| 3.5.1. Recursos materiales.....                                                                                        | 65      |
| 3.5.2. Recursos humanos.....                                                                                           | 65      |
| <br><b>CAPITULO IV: PROYECTO DE UN LABORATORIO VIRTUAL PARA EL ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCION</b> |         |
| 4.1. Identificación del banco de ensayo.....                                                                           | 66      |
| 4.1.1. Descripción del banco de ensayo.....                                                                            | 66      |
| 4.2. Diseño de la interfaz gráfica del programa.....                                                                   | 72      |
| 4.2.1. Presentación del programa.....                                                                                  | 72      |
| 4.2.2. Menú principal.....                                                                                             | 72      |
| 4.2.3. Medidor de Conductividad Térmica.....                                                                           | 73      |
| 4.2.4. Radio Crítico de Aislamiento.....                                                                               | 82      |
| 4.2.4.1 Conductor Eléctrico.....                                                                                       | 83      |
| 4.2.4.2 Tubería con Fluido Caliente.....                                                                               | 84      |
| 4.2.4.3 Tubería con Fluido Frío.....                                                                                   | 86      |
| 4.3. Desarrollo de los algoritmos de cálculo.....                                                                      | 90      |
| 4.3.1 Medidor de Conductividad Térmica.....                                                                            | 90      |
| 4.3.2 Radio Crítico de Aislamiento.....                                                                                | 92      |
| 4.3.2.1 Para un conductor eléctrico.....                                                                               | 93      |
| 4.3.2.2 Para una tubería con fluido caliente.....                                                                      | 94      |
| 4.3.2.3 Para una tubería con fluido frío.....                                                                          | 97      |
| 4.4. Desarrollo de la Base de Datos.....                                                                               | 99      |
| <br><b>CAPITULO V: VALIDACIONES</b>                                                                                    |         |
| 5.1. Resultados Experimentales.....                                                                                    | 101     |
| 5.1.1 Datos de Ensayos Realizados.....                                                                                 | 101     |
| 5.1.2 Ensayos Experimentales.....                                                                                      | 107     |
| 5.2. Análisis de Resultados.....                                                                                       | 112     |
| <br><b>CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>                                                                 |         |
| Conclusiones.....                                                                                                      | 114     |
| Recomendaciones.....                                                                                                   | 116     |
| <br><b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>                                                                                           | <br>118 |
| <br><b>ANEXOS.....</b>                                                                                                 | <br>120 |



## ÍNDICE DE FIGURAS

| <b>Figura</b> | <b>Descripción</b>                                                                                                                                            | <b>Pág.</b> |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>2.1</b>    | Transferencia de calor por convección desde una superficie a un fluido en movimiento                                                                          | 17          |
| <b>2.2</b>    | Representación de un cuerpo negro                                                                                                                             | 20          |
| <b>2.3</b>    | Asociación de la transferencia                                                                                                                                | 22          |
| <b>2.4</b>    | Convenio de signos para la transmisión del calor por conducción                                                                                               | 23          |
| <b>2.5</b>    | Pared plana                                                                                                                                                   | 25          |
| <b>2.6</b>    | Pared compuesta                                                                                                                                               | 26          |
| <b>2.7</b>    | Bloque formado por dos materiales de áreas $A_1$ y $A_2$ en paralelo externo                                                                                  | 26          |
| <b>2.8</b>    | Circuito térmico en serie-paralelo-serie                                                                                                                      | 28          |
| <b>2.9</b>    | Cilindro hueco con condiciones convectivas en la superficie                                                                                                   | 29          |
| <b>2.10</b>   | Conducción en una esfera hueca                                                                                                                                | 31          |
| <b>2.11</b>   | Variación de la conductividad térmica de diversos sólidos, líquidos y gases con relación a la temperatura                                                     | 33          |
| <b>2.12</b>   | Conductividad térmica en metales y aleaciones                                                                                                                 | 35          |
| <b>2.13</b>   | Conductividad térmica en líquidos, gases y vapores                                                                                                            | 35          |
| <b>2.14</b>   | Conductividad térmica del hierro puro                                                                                                                         | 37          |
| <b>2.15</b>   | Factores de corrección de la conductividad térmica de los aceros aleados                                                                                      | 38          |
| <b>2.16</b>   | Distribución de la temperatura y líneas de flujo de calor a lo largo de dos placas solidas comprimidas entre sí para el caso de contacto térmico ideal y real | 40          |
| <b>2.17</b>   | Diagrama T-s del agua                                                                                                                                         | 42          |
| <b>2.18</b>   | Enfriamiento a presión constante del aire húmedo y temperatura de punto de rocío en el diagrama T-s                                                           | 44          |
| <b>2.19</b>   | Proceso de saturación adiabática superficie                                                                                                                   | 45          |
| <b>2.20</b>   | Esquema de la carta psicrométrica                                                                                                                             | 47          |

|             |                                                                                                           |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>2.21</b> | Interpretación gráfica del método de Newton-Raphson                                                       | 48 |
| <b>3.1</b>  | Circuito térmico para un conductor eléctrico                                                              | 55 |
| <b>3.2</b>  | Circuito térmico para una tubería con fluido caliente                                                     | 57 |
| <b>3.3</b>  | Circuito térmico para una tubería con fluido frío                                                         | 61 |
| <b>4.1</b>  | Esquema del montaje                                                                                       | 67 |
| <b>4.2</b>  | Recolector de datos                                                                                       | 70 |
| <b>4.3</b>  | Medidor de conductividad térmica                                                                          | 71 |
| <b>4.4</b>  | Ventana inicial                                                                                           | 72 |
| <b>4.5</b>  | Ventana inicial del laboratorio virtual de transferencia de calor por conducción                          | 73 |
| <b>4.6</b>  | Medidor de conductividad Térmica                                                                          | 75 |
| <b>4.7</b>  | Señal para iniciar el ensayo en el Medidor de conductividad Térmica                                       | 77 |
| <b>4.8</b>  | Medidor de conductividad Térmica (vista inicial)                                                          | 78 |
| <b>4.9</b>  | Medidor de conductividad Térmica                                                                          | 79 |
| <b>4.10</b> | Grafica resultante del ensayo                                                                             | 81 |
| <b>4.11</b> | Radio crítico de aislamiento                                                                              | 82 |
| <b>4.12</b> | Radio crítico de aislamiento para un conductor eléctrico                                                  | 84 |
| <b>4.13</b> | Radio crítico de aislamiento para una tubería con fluido caliente                                         | 86 |
| <b>4.14</b> | Radio crítico de aislamiento para una tubería con fluido frío                                             | 88 |
| <b>4.15</b> | Carta Psicrométrica                                                                                       | 89 |
| <b>4.16</b> | Carta Psicrométrica (introducción de parámetros)                                                          | 90 |
| <b>4.17</b> | Algoritmo de cálculo del subprograma del Medidor de Conductividad Térmica                                 | 92 |
| <b>4.18</b> | Algoritmo de cálculo del subprograma de Radio crítico de aislamiento para un conductor eléctrico          | 94 |
| <b>4.19</b> | Algoritmo de cálculo del subprograma de Radio crítico de aislamiento para una tubería con fluido caliente | 96 |
| <b>4.20</b> | Algoritmo de cálculo del subprograma de Radio crítico                                                     | 98 |

|             |                                                 |     |
|-------------|-------------------------------------------------|-----|
|             | de aislamiento para una tubería con fluido frío |     |
| <b>4.21</b> | Datos del ensayo                                | 100 |
| <b>5.1</b>  | Ensayo Experimental N°1                         | 108 |
| <b>5.2</b>  | Ensayo Experimental N°2                         | 109 |
| <b>5.3</b>  | Ensayo Experimental N°3                         | 110 |
| <b>5.4</b>  | Ensayo Experimental N°4                         | 111 |
| <b>5.5</b>  | Ensayo Experimental N°5                         | 112 |

## ÍNDICE DE TABLAS

| <b>Tabla</b> | <b>Descripción</b>                                                      | <b>Pág.</b> |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 2.1          | Conductividad térmica de algunos materiales                             | 34          |
| 2.2          | Conductancias interfaciales de algunos materiales a presiones moderadas | 41          |
| 5.1          | Para el Ensayo experimental N°1                                         | 102         |
| 5.2          | Para el Ensayo experimental N°2                                         | 103         |
| 5.3          | Para el Ensayo experimental N°3                                         | 104         |
| 5.4          | Para el Ensayo experimental N°4                                         | 106         |
| 5.5          | Para el Ensayo experimental N°5                                         | 106         |

## INTRODUCCION

La transferencia de calor y masa es una ciencia básica que trata sobre la rapidez de transferencia de energía térmica; por lo cual tiene una amplia área de aplicación que va desde los sistemas biológicos hasta los aparatos domésticos, procesos industriales, aparatos electrónicos, en fin; prácticamente donde exista una diferencia de temperatura entre dos medios en contacto existe la transferencia de calor; de tal manera que la asignatura sobre “transferencia de calor” posee un amplio contenido y campo de estudio, lo cual podría resultar para los estudiantes de la misma, un tanto compleja, a pesar del enfoque teórico-práctico que se le da a la hora de su enseñanza.

De allí, que en búsqueda de una posible solución a dicha problemática, se propone la realización de un laboratorio virtual, el cual podría hacer valiosas aportaciones metodológicas, para ser utilizadas en la enseñanza de la asignatura «*Transferencia de calor*»; presentando un nuevo enfoque, más dinámico, interactivo y demostrativo, el cual redundará en beneficio del aprendizaje del estudiante, pues le proporcionaría una herramienta más que contribuye en su entendimiento y estudio, demostrando los fenómenos presentes durante el intercambio de calor y hasta sus aplicaciones.

El estudio de la transferencia de calor por conducción, mediante un laboratorio virtual sería un gran inicio para la implementación de prácticas de laboratorio de la mano de una metodología teórico-práctico diferente a las que se tiene en el momento; también sería una buena y económica alternativa de un laboratorio de transferencia de calor, tanto en los equipos como en su mantenimiento, lo que en el caso de la Universidad de Carabobo, serían aún más grave, si se toma en cuenta la

constante problemática presupuestaria, lo cual sería una limitante para este tipo de proyecto.

Es así como, la propuesta del presente trabajo especial de grado, permite a través del *“Desarrollo de un Laboratorio Virtual para el Estudio de la Transferencia de Calor por Conducción”*, ayudar tanto en el área económica, como ya se explicó en el párrafo anterior, como en el estudio y profundización de la teoría de conducción, demostrando el comportamiento de la temperatura dentro del sólido a determinadas coordenadas para visualizarlo así en geometrías cilíndricas, en sólidos de diferentes materiales, ya que la constante K de conductividad térmica depende del material, todo esto para el estudio de la conducción de calor en estado estacionario.

De igual forma, es necesario señalar que, esta propuesta será diseñada tomando en consideración las necesidades reales, el rápido avance tecnológico en esta área, el departamento de térmica y energética, la cátedra que dicta la asignatura transferencia de calor, los próximos estudiantes, y el país; dejando un útil legado dentro de la Universidad de Carabobo, aporte que sin dudas será de provecho para la población estudiantil, y en especial la población de la Facultad de ingeniería.

Este Trabajo especial de Grado, será presentando en un informe estructurado en seis (06) capítulos, distribuidos de la siguiente manera: Capítulo I: El Problema, el cual consta del Planteamiento del Problema, la Formulación, Objetivos, Justificación, Limitaciones y el Alcance; el Capítulo II: Marco Teórico, donde se ubican: Los Antecedentes de la Investigación y las Bases Teóricas; el Capítulo III: o Marco Metodológico, donde está la Naturaleza de la Investigación, Tipo de Estudio, Diseño de la Investigación, y la Factibilidad del Proyecto; El Capítulo IV: donde se presenta el *“Proyecto de un Laboratorio Virtual para el Estudio de la Transferencia de Calor por Conducción”*; donde se ubican: a) Identificación del banco de ensayo, b) Diseño

de la interfaz gráfica del programa, c) Desarrollo de los algoritmos de cálculo, y d) Desarrollo de la Base de Datos; el Capítulo V: Validaciones, donde se presentan los Resultados Experimentales; y el Capítulo VI, de las Conclusiones y Recomendaciones, finalizando con la Bibliografía.

## **CAPITULO I**

### **EL PROBLEMA**

#### **1.1. Planteamiento del Problema**

Para todo ingeniero mecánico es de vital importancia poseer conocimientos básicos en el área de transferencia de calor y masa, y así cumplir con las crecientes exigencias dentro del campo laboral y científico. Por ello la asignatura “transferencia de calor” es parte esencial de los programas de estudios en ingeniería, en todo el mundo, de lo que se desprende que ésta sea de vital importancia, pues posee un amplio contenido y campo de estudio; y es precisamente esa amplitud y complejidad, lo que resulta de igual forma una gran carga académica para los estudiantes de ingeniería en la Universidad de Carabobo.

Es así, como a pesar del enfoque teórico-práctico que se le da a la hora de su enseñanza, y los esfuerzos de los profesores para hacerla más comprensible y motivante, la situación reviste cierta dificultad, pues hoy en día no se cuentan con un laboratorio de transferencia de calor totalmente activo que afiance los conocimientos teóricos-prácticos, y en este momento sólo se abarca el estudio teórico, mediante demostraciones matemáticas y problemas que se asemejan a la realidad, en cambio el laboratorio virtual propuesto permitirá la visualización y demostración de los fenómenos presentes en este campo de estudio, mejorando la fijación de dichos conocimiento en cualquier momento y desde cualquier lugar según disponga la cátedra de transferencia de calor.



El estudio de la transferencia de calor por conducción mediante un laboratorio virtual sería un gran inicio para la implementación de prácticas de laboratorio de la mano con una metodología dinámica y holística, teórico-práctico que no se tiene hasta el momento; también sería una propuesta viable económica, metodológica, y educativamente interesante, pues es un laboratorio de transferencia de calor que comúnmente necesitaría de equipos de envergadura con un alto costo tanto en su adquisición como en su mantenimiento; lo cual en este caso, no sería viable para la Universidad de Carabobo, tomando en cuenta su problema presupuestario; con esta propuesta sería sumamente económico, educativamente motivante y metodológicamente útil.

## **1.2 Formulación el Problema**

Desarrollo de un laboratorio virtual para el estudio de la transferencia de calor por conducción, a fin de ser utilizado en el Laboratorio de Transferencia de Calor de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Desarrollar un laboratorio virtual para el estudio de la transferencia de calor por conducción.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Revisar los trabajos hechos previamente, referentes o relacionadas a este trabajo.
2. Estudiar el funcionamiento del banco de pruebas de transferencia de calor por conducción existente en el laboratorio de transferencia de calor.

3. Desarrollar algoritmos de cálculos que permita la simulación y el estudio de la transferencia de calor por conducción.
4. Elaborar una metodología para complementar los datos obtenidos del banco de ensayo existente con el programa del laboratorio virtual.
5. Desarrollar la codificación de los algoritmos en un lenguaje virtual de programación.
6. Validar los resultados obtenidos en el banco de ensayo existente con el programa del laboratorio virtual.

#### **1.4 Justificación**

Tomando en consideración, el amplio contenido y campo de estudio de la asignatura “transferencia de calor”; y lo complejo que resulta para algunos estudiantes de ingeniería en la Universidad de Carabobo; se hacen imprescindibles todos aquellos proyectos que se diseñen en función de mejorar tanto la metodología de enseñanza, como el proceso de enseñanza-aprendizaje; y es precisamente, éste uno de los aspectos que justifican el proyecto que aquí se propone, tal es la realización de un “Laboratorio virtual para el estudio de la transferencia de calor por conducción”, para ser utilizado en el Laboratorio de Transferencia de Calor de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.

Otro elementos que le da importancia a este tipo de proyectos, es la utilización de una metodología para la enseñanza de la materia (transferencia de calor), basada en un enfoque mucho más dinámico, interactivo y demostrativo, lo cual contribuya en beneficio del aprendizaje del estudiante, ya que proporcionaría una herramienta visual, didáctica y holística que permitiría una mayor asimilación del aprendizaje, y un aporte a la Universidad de Carabobo, especialmente a la Facultad de Ingeniería;

demostrando, así los fenómenos presentes durante el intercambio de calor y hasta sus aplicaciones.

Así mismo, es necesario señalar que debido a que la materia transferencia de calor posee un amplio contenido y campo de estudio, requiere del estudiante tiempo y dedicación para su aprendizaje; por lo que se hace necesario un proyecto didáctico que le facilite este aprendizaje, de allí que el diseño y desarrollo de un laboratorio de transferencia de calor, motivará al estudio de la materia de forma más continua y versátil, organizando y fraccionando el contenido programático, ayudando así al estudiante a mantener un buen ritmo de estudio.

Adicionalmente esta herramienta sería un buen sustento para el profesor ya que le brindaría un buen apoyo al momento de dictar la materia, en horas de teoría o práctica de laboratorio, debido a que esta simularía los fenómenos presentes en la transferencia de calor por conducción y trabajaría de la mano con el banco de prueba de conductividad térmica existente en el laboratorio de transferencia de calor de manera de introducir los datos obtenidos en un ensayo para luego introducirlos en la tabla de compilación de datos del software, y así simularlos en clase.

Así mismo, este método ahorrará mucho tiempo, ya que cada ensayo dura al menos dos horas en la que se recolectan los datos continuamente, y para realizar un nuevo ensayo es necesario esperar más de cinco horas para que la probeta regrese a las condiciones de temperaturas iniciales (aproximadamente dos horas y media para las resistencias presentes en el banco de ensayo); lo cual justifica aún más, la presente propuesta.

### **1.5 Limitaciones:**

Tomando en consideración que las limitaciones son todas aquellas dificultades que se presentan a la hora de realizar la investigación; éstas son:

- Obtención de recursos para el aprendizaje del software con la que se creará y codificará el programa de la práctica transferencia de calor por conducción.
- Recuperación del banco de ensayo (Medidor de conductividad térmica) a fin de que funcione plena y confiablemente para la recolección de datos experimentales.
- Dotación del laboratorio con un mayor número probetas y así generar una completa base de datos.
- Dotación del laboratorio con un hardware necesario para la instalación del software requerido.

### **1.6 Alcance**

El presente trabajo de grado, tendrá un alcance educativo, al presentar una estrategia didáctica de enseñanza-aprendizaje; así mismo tendrá un alcance investigativo, pues presentará el diseño de un laboratorio virtual con las siguientes características:

- La ecuación general que rige la conducción de calor será dominante en una dirección y despreciables en las demás, también se establecerá en régimen estacionario (no hay cambio de transferencia de calor en el tiempo en cualquier punto dentro del medio).
- Se analizará la transferencia de calor exclusivamente a probetas cilíndricas con sección transversal constantes.

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de la Investigación

Todo trabajo investigativo requiere de fundamentos teóricos-conceptuales, de otros investigadores, que le permitan ir transitando, con pasos seguros, hacia su propio proceso investigativo, y no cometer errores de otros; de allí que esta sea una parte insoslayable de toda investigación; por lo cual a continuación se presentan una serie de aspectos teóricos-conceptuales a considerar al momento de diseñar un laboratorio virtual de transferencia de calor por conducción, y otros aspectos de relevancia, como es el funcionamiento de la transferencia de calor por conducción, los lineamientos teóricos bajo la cual se rige y elementos necesarios de medición presentes para un banco de ensayo.

Leal y Zeis, (1974) en su trabajo de grado titulado *“Medición de la conductividad térmica en aislantes”*, presentado en la Universidad Central de Venezuela, utilizaron el método de placas resguardadas en estado estable, en el cual se tiene la muestra entre dos placas planas de metal a diferentes temperaturas, usando un calentador de resguardo con la finalidad de garantizar un flujo de calor unidireccional a través de la muestra. Los resultados logrados por Leal y Zeis se compararon con los tabulados por investigadores de la materia, obteniéndose valores semejantes para el mismo tipo de muestra.

Tejada y Alejos, (1974) presentaron su trabajo especial de grado en la Universidad Central de Venezuela titulado *“Diseño y construcción de un aparato para la medición de la conductividad térmica en metales”*. El método elegido para la

determinación de la conductividad térmica fue el de estado estable y flujo longitudinal de calor, habiendo obtenido en la mediciones de conductividad un rango de precisión aproximado al 5%.

González y Ramírez, (2003) presentaron su trabajo especial de grado en la Universidad de Carabobo titulado "*Diseño y construcción de un dispositivo para medir la conductividad térmica materiales sólidos*". El método seleccionado fue medición en estado estable, el cual tiene la Ley de Fourier como principio fundamental de transferencia de calor además su distribución de temperatura es constante en el tiempo a través del material. Este método fue aplicado a través del arreglo lineal que consiste en hacer pasar un flujo de calor generado en una resistencia por medio de una barra de sección circular constante desde una fuente de calor regulable a una fuente fría.

Fernández Rojas, et al., (2008) estudiaron la física de la conductividad térmica y sus aspectos más importantes en una variedad de materiales. La conductividad térmica es influenciada por diferentes mecanismos de dispersión de fonones o electrones, los cuales limitan el transporte de energía térmica en el sólido. La conductividad térmica a una temperatura cercana al 80% de la temperatura de fundición es elevada en metales ( $\sim 300$  W/mK) y en semiconductores ( $\sim 22$  W/mK); es baja en dieléctricos ( $\sim 6$  W/mK) y es muy baja en materiales amorfos ( $\sim 1,5$  W/mK). En particular, en materiales amorfos la muy baja conductividad térmica es consecuencia del desorden atómico y de la ocurrencia de procesos de dispersión asociados a la existencia de potenciales pozo doble asimétricos y a la presencia de modos vibracionales localizados.

El propósito de este estudio es revisar las teorías existentes para explicar la conductividad térmica en sólidos y así identificar aspectos o procesos físicos

relevantes en el régimen de muy altas temperaturas y antes de la temperatura de fundición, que permita articular las conclusiones en un referencial, que sirva de guía para la especificación y preparación de materiales que puedan ser usados en la elaboración de la nueva generación de barreras térmicas. El interés se restringe al estudio de la conductividad térmica en sólidos dieléctricos a muy altas temperaturas, en donde se encontró que la contribución de los fonones con un camino libre medio, del orden de las dimensiones de las constantes en la red atómica de los sólidos, es muy importante y en algunos casos también se logra identificar una contribución relevante por parte de los electrones y/o fonones localizados (fractones localizados).

Barreto y Leo, (2009) presentaron su trabajo especial de grado en la Universidad De Carabobo titulado "*Desarrollo de un laboratorio virtual para la cátedra de mecánica de los fluidos*" describen que en la actualidad la población estudiantil de la Universidad de Carabobo que ha recibido formación en el área de la mecánica de los fluidos, posee deficiencias respecto a las aplicaciones prácticas de dicha área, esto se debe a la escasez de equipos y a la gran cantidad de estudiantes. Ante esta problemática se plantea la necesidad de crear un software donde existan simulaciones que permitan de una manera cómoda y didáctica el desarrollo de prácticas semejantes a las realizables en diferentes bancos de ensayo, con la finalidad de preparar y familiarizar al estudiante con dichas experiencias comprobables.

Para lograr estas simulaciones se identifican los bancos de ensayos, haciendo una revisión de los respectivos manuales descriptivos; se desarrollan los algoritmos de cálculo considerando los objetivos de cada uno de los ensayos, en función a los cuales se establecen los objetivos de programación; de igual forma considerando estos objetivos, en base al aspecto real de los bancos de ensayo y aspectos pedagógicos, se diseña la interfaz gráfica de las simulaciones, donde cada elemento será codificado según su función a desempeñar dentro de la simulación, y a fin de

depurar errores se realiza la validación del programa, haciendo los debidos cálculos y comparando estos con los valores mostrados en el programa computacional desarrollado.

La realización secuencial de lo anterior descrito permite la creación de *FluLab*, un programa que simula experiencias de hidrostática, principio de Bernoulli, pérdidas de carga, regímenes de flujo, medición de flujo, cavitación, turbina Pelton, bomba centrífuga y mallas en tuberías, en un entorno agradable al usuario, sencillo y didáctico. Este programa computacional está destinado a personas con conocimientos teóricos básicos relacionados a la mecánica de los fluidos, su ejecución está restringida a la preinstalación de *Java-Sun Microsystem*, descargable gratuitamente de internet, y para un óptimo aprovechamiento es necesaria la lectura previa del manual del usuario.

## **2.2. Bases Teóricas**

### **2.2.1 Transferencia de calor**

La temperatura es una magnitud física que se refiere a la sensación de frío o caliente al tocar alguna sustancia. En cambio el calor es una transferencia de energía de una parte a otra de un cuerpo, o entre diferentes cuerpos, producida por una diferencia de temperatura. El calor es energía en tránsito; siempre fluye de una zona de mayor temperatura a otra de menor temperatura, con lo que eleva la temperatura de la zona más fría y reduce la de la zona más cálida, siempre que el volumen de los cuerpos se mantenga constante. La energía no fluye desde un objeto de temperatura baja a otro de temperatura alta si no se realiza trabajo. La materia está formada por átomos o moléculas que están en constante movimiento, por lo tanto tienen energía de posición o potencial y energía de movimiento o cinética. Los continuos choques entre



los átomos o moléculas transforman parte de la energía cinética en calor, cambiando la temperatura del cuerpo.

En la termodinámica se puede definir como la ciencia de la energía, ya que trata de la cantidad de transferencia de calor a medida que un sistema pasa por un proceso de un estado de equilibrio a otro pero no hace referencia a cuanto durará ese proceso; que para el ámbito de la ingeniería es de gran interés. Constantemente se requiere estudiar la rapidez o razón de dicha transferencia, la cual constituye el tema que da el nacimiento a la ciencia de la transferencia de calor. (Fuente: Cengel, Y. 2007)

El calor es la forma de la energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de una diferencia de temperatura, por ende la ciencia que trata de la determinación de las razones de esa transferencia es la Transferencia de Calor. Un análisis termodinámico sencillamente nos dice cuánto calor debe transferirse para que se realice un cambio de estado específico con el fin de satisfacer el principio de la conservación de la energía. Para la ingeniería tiene mayor interés la razón de la transferencia de calor (transferencia de calor por unidad de tiempo) debido a que tiene gran aplicación dentro del campo del diseño ingenieril.

La razón de la transferencia de calor es un fenómeno manipulable que se acopla a necesidades y requerimientos en infinitos procesos industriales hasta equipos electrodomésticos de la vida cotidiana. La termodinámica con el principio de la ley de la conservación de la energía, proporciona la cantidad de calor en un estado de equilibrio a otro pero para el diseño conviene conocer en cuanto tiempo transcurrirá esa transferencia de calor; un ejemplo claro es que para el diseño de aislantes o cavas térmicas el diseñador de ésta necesita conocer en cuanto tiempo ocurre la transferencia de calor entre el medio aislado y el exterior, y así garantizar la funcionabilidad que tienen este diseño.

La transferencia de calor se define como la energía en tránsito debido a una diferencia de temperatura. El universo se encuentra inmerso en una constante transferencia de calor puesto a que entre cada partícula existe una diferencia infinitesimal de temperatura, lo que demuestra el amplio contenido de la transferencia de calor y su infinito campo de estudio. Los problemas de esta ciencia que se encuentran en la práctica se pueden considerar en dos tipos; de capacidad nominal y de dimensionamiento. Los problemas de capacidad nominal tratan de la determinación de la razón de la transferencia de calor por un sistema existente a una diferencia específica de temperatura. Los problemas de dimensionamiento tratan con de la determinación del tamaño de un sistema con el fin de transferir calor a una razón determinada para una diferencia específica de temperatura.

En ingeniería los fenómenos de la transferencia de calor presentes en procesos industriales, equipos o aparatos pueden estudiarse de dos maneras: en forma experimental realizando pruebas y tomas de mediciones o en forma analítica mediante el análisis o la elaboración de cálculos. El procedimiento experimental tiene la ventaja de que se trabaja en un sistema físico real, y la cantidad deseada se puede determinar por medición, dentro de los límites del error experimental. Sin embargo, este procedimiento es caro, lento, lo que frecuentemente no es muy práctico para determinada ocasión.

Además, el sistema que se esté analizando puede incluso no existir. Por ejemplo, por lo regular, los sistemas completos de calefacción y de plomería de un edificio deben dimensionarse a partir de las especificaciones dadas antes de que el edificio se construya en realidad. El procedimiento analítico (que incluye el procedimiento numérico) tiene la ventaja que es rápido y barato, pero los resultados obtenidos están sujetos a la exactitud de las suposiciones, de las aproximaciones y de

las idealizaciones establecidas en el análisis. En los estudios de ingeniería, es frecuente que se logre un buen término medio al reducir los posibles diseños a unos cuantos, por medio del análisis, y verificando después en forma experimental los hallazgos obtenidos en este análisis.

Finalmente la transferencia de calor se puede definir como un fenómeno de transporte de energía entre uno o varios sistemas, como resultado de una diferencia o gradiente de temperatura presente entre ellos, donde se produce este flujo de calor que va desde una mayor temperatura a una menor temperatura, buscando un equilibrio térmico entre el sistema o los sistemas en contacto.

### **2.2.2 Mecanismos de Transferencia de calor:**

El calor se transfiere básicamente mediante tres mecanismos distintos; *conducción*, *convección* y *radiación*. En la naturaleza, todos los mecanismos de transmisión intervienen simultáneamente con distintos grados de importancia. Desde luego, diseñando los experimentos adecuadamente, es posible lograr que sólo uno de ellos sea el dominante.

#### **2.2.2.1 Convección:**

La convección es el mecanismo de transferencia de calor por movimiento de masa o circulación dentro de la sustancia. Puede ser natural producida sólo por las diferencias de densidades de la materia; o forzada, cuando la materia es obligada a moverse de un lugar a otro, por ejemplo el aire con un ventilador o el agua con una bomba. Sólo se produce en líquidos y gases donde los átomos y moléculas son libres de moverse en el medio.

En la ***convección natural***, la fuerza motriz procede de la variación de densidad en el fluido como consecuencia del contacto con una superficie a diferente

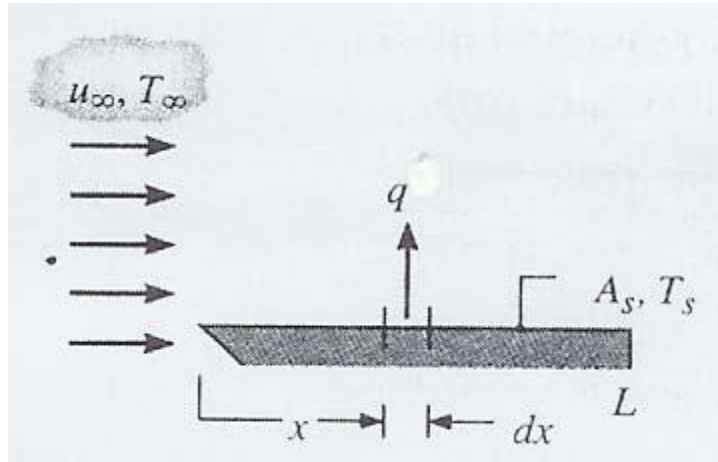
temperatura, lo que da lugar a fuerzas ascensoriales. El fluido próximo a la superficie adquiere una velocidad debida únicamente a esta diferencia de densidades, sin ninguna influencia de fuerza motriz exterior. Ejemplos típicos son la transmisión de calor al exterior desde la pared o el tejado de una casa en un día soleado sin viento, la convección en un tanque que contiene un líquido en reposo en el que se encuentra sumergida una bobina de calefacción, el calor transferido desde la superficie de un colector solar en un día en calma, etc.

La **convección forzada** tiene lugar cuando una fuerza motriz exterior mueve un fluido sobre una superficie que se encuentra a una temperatura mayor o menor que la del fluido. Esa fuerza motriz exterior puede ser un ventilador, una bomba, el viento, etc. Como la velocidad del fluido en la convección forzada es mayor que en la convección natural, se transfiere, por lo tanto, una mayor cantidad de calor para una determinada temperatura.

Considere la condición de flujo de la figura 2.1. Un fluido con velocidad  $u_\infty$  y temperatura  $T_\infty$  fluye sobre una superficie de forma arbitraria y de área  $A_s$ . Se supone que la superficie está a una temperatura uniforme,  $T_s$ , y si  $T_s \neq T_\infty$ , tomando en cuenta que ocurrirá una transferencia de calor por convección, y el flujo local de calor se expresará utilizando la *ley de enfriamiento de Newton* que se puede enunciar como:

*La tasa de transferencia de calor por convección entre una superficie y un fluido que esté en contacto con ella, en dirección normal a la misma, para pequeñas diferencias de temperaturas, es proporcional a dicha diferencia de temperatura.*

$$q_{conv} = \bar{h} \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2.1)$$



**Figura 2.1** Transferencia de calor por convección desde una superficie a un fluido en movimiento

(Fuente: Incropera, y De Witt 1999)

En la que:  $\bar{h}$  es el coeficiente promedio de transmisión del calor por convección, en  $W/m^2K$ ,  $T_s$  es la temperatura de la superficie y  $T_\infty$  es la temperatura del fluido no perturbado. La ecuación anterior, independientemente que la convección sea natural o forzada, sirve como definición del coeficiente de convección  $\bar{h}$ . Su valor numérico se tiene que determinar analítica o experimentalmente.

### 2.2.2.2 Radiación

La radiación térmica es energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura dada, se produce directamente desde la fuente hacia afuera en todas las direcciones. Esta energía es producida por los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivas y transportada por ondas electromagnéticas o fotones, por lo que recibe el nombre de **radiación electromagnética**. La masa en reposo de un fotón (que significa luz) es idénticamente nula. Por lo tanto, atendiendo a relatividad especial, un fotón viaja a la velocidad de la luz y no se puede mantener en reposo. (La trayectoria descrita por un fotón se llama rayo). La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos

y magnéticos oscilantes y perpendiculares entre sí, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro.

Todos los objetos emiten energía radiante, cualquiera sea su temperatura, por ejemplo el Sol, la Tierra, la atmósfera, los Polos, las personas, etc. La energía radiada por el Sol a diario afecta nuestra existencia en diferentes formas. Esta influye en la temperatura promedio de la tierra, las corrientes oceánicas, la agricultura, el comportamiento de la lluvia, etc.

Considerar la transferencia de radiación por una superficie de área  $A$ , que se encuentra a una temperatura  $T$ . La radiación que emite la superficie, se produce a partir de la energía térmica de la materia limitada por la superficie. La rapidez a la cual se libera energía se llama potencia de radiación  $q_r$ , su valor es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta. Esto se conoce como la **ley de Stefan** (Joseph Stefan, austriaco, 1835-1893), que se escribe como:

$$q_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (2.2)$$

Donde  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4\text{)}$  se llama constante de **Stefan-Boltzmann** (Ludwing Boltzmann, austriaco, 1844-1906), y  $\varepsilon$  es una propiedad de la superficie llamada emisividad, sus valores varían en el rango  $0 < \varepsilon < 1$  (cuerpos grises), es una medida de la eficiencia con que la superficie emite energía radiante, depende del material.

Un cuerpo emite energía radiante con una rapidez dada por la ecuación 2.2, pero al mismo tiempo absorbe radiación; si esto no ocurriera, el cuerpo en algún momento irradiaría toda su energía y su temperatura llegaría al cero absoluto.

Cuando una superficie de emisividad  $\varepsilon$  y de área superficial  $A_s$ , a una temperatura  $T_s$ , está encerrada por completo en una superficie mucho más grande, que está a una temperatura  $T_{alred}$  y separada por un gas (como el aire) que no interfiere en la radiación, entonces la tasa de transferencia de calor por radiación entre estas dos superficies es:

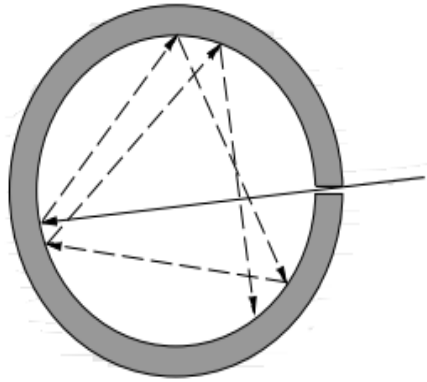
$$q_r = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{alred}^4) \quad (2.3)$$

Cuando el cuerpo está en equilibrio con los alrededores, irradia y absorbe la misma cantidad de energía, por lo tanto su temperatura permanece constante. Cuando el cuerpo está más caliente que el ambiente, irradia más energía de la que absorbe, y por lo tanto se enfría.

Un absorbedor perfecto se llama **cuerpo negro** (no significa que sea de color negro), que se define como un objeto ideal que absorbe toda la radiación que llega a su superficie y su emisividad es igual a uno. No se conoce ningún objeto así, aunque una superficie de negro de carbono puede llegar a absorber aproximadamente un 97% de la radiación incidente. El Sol, la Tierra, la nieve, etc. bajo ciertas condiciones se comportan como un cuerpo negro. En teoría, un cuerpo negro sería también un emisor perfecto de radiación, y emitiría a cualquier temperatura la máxima cantidad de energía disponible. A una temperatura dada, emitiría una cantidad definida de energía en cada longitud de onda. En contraste, un cuerpo cuya emisividad sea igual a cero, no absorbe la energía incidente sobre él, sino que la refleja toda, es un reflector perfecto.

Una buena aproximación de un cuerpo negro es el interior de un objeto hueco, como se muestra en la figura 2.2. La naturaleza de la radiación emitida por un cuerpo

hueco a través de un pequeño agujero sólo depende de la temperatura de las paredes de la cavidad.



**Figura 2.2** Representación de un cuerpo negro  
(Fuente: Holman, J. 1998)

Considerando la transferencia de calor por radiación entre dos superficies negras A1 y A2 en la que se considera que solo una fracción de la radiación emitida por la superficie 1 es interceptada por la superficie 2 y viceversa. Por lo que se define factor de forma  $F_{12}$  como la fracción de energía que sale de A1 y es interceptada por A2; igualmente para el caso contrario donde el factor de forma sería  $F_{21}$ . Los factores de forma dependen de la geometría, y esta relación es válida cuando las superficies se encuentran a diferentes temperaturas.

$$q_{r(1 \rightarrow 2)} = F_{12} \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{Siendo } T_1 > T_2 \quad (2.4)$$

### 2.2.2.3 Conducción

La conducción es el mecanismo de transferencia de calor en escala atómica a través de la materia por actividad molecular, por el choque de unas moléculas con

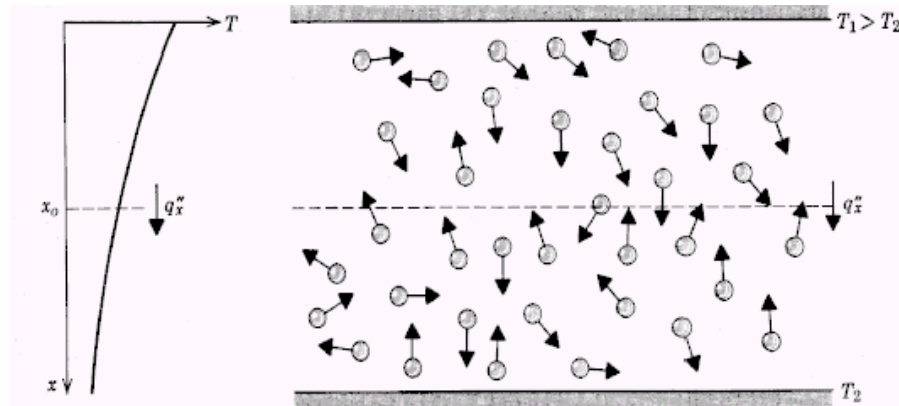


otras, donde las partículas más energéticas le entregan energía a las menos energéticas, produciéndose un flujo de calor desde las temperaturas más altas a las más bajas. Los mejores conductores de calor son los metales. El aire es un mal conductor del calor. Los objetos malos conductores como el aire o plásticos se llaman aislantes. La transmisión de calor por conducción puede realizarse en cualquiera de los tres estados de la materia: sólido líquido y gaseoso.

Se puede explicar el mecanismo físico de la conducción, pensando en un gas en el que existe un gradiente de temperaturas y no hay movimiento global. El gas ocupa todo el espacio entre las dos superficies como se muestra en la figura 2.3. Se asocia la temperatura del gas en cualquier punto con la energía que poseen sus moléculas en las proximidades de dicho punto. Cuando las moléculas vecinas chocan ocurre una transferencia de energía desde las moléculas más energéticas a las menos energéticas. En presencia de un gradiente de temperaturas la transferencia de calor por conducción debe ocurrir en el sentido de la temperatura decreciente, esto es en la dirección positiva del eje de las  $x$ .

En los líquidos la situación es muy similar que en los gases, aunque las moléculas están menos espaciadas y las interacciones son más fuertes y frecuentes. En los sólidos la conducción se produce por *cesión de energía entre partículas contiguas (vibraciones reticulares)*. En un sólido no conductor la transferencia de energía ocurre solamente por estas vibraciones reticulares, en cambio en los sólidos conductores se debe también al movimiento de traslación de los electrones libres.

La conducción en un medio material, goza pues de un soporte, que son sus propias moléculas y se puede decir que macroscópicamente no involucra transporte de materia.



**Figura 2.3** Asociación de la transferencia  
(Fuente: Incropera, y De Witt 1999)

#### 2.2.2.4 Transferencias de calor por conducción en régimen estacionario y flujo unidireccional. Ley de Fourier

La conducción es el único mecanismo de transmisión del calor posible en los medios sólidos opacos. Cuando en estos cuerpos existe un gradiente de temperatura en la dirección  $x$ , el calor se transmite de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura, siendo el calor transmitido por conducción  $q_{cond}$ , proporcional al gradiente de temperatura  $dT/dx$ , y a la superficie  $A$ , a través de la cual se transfiere, esto es:

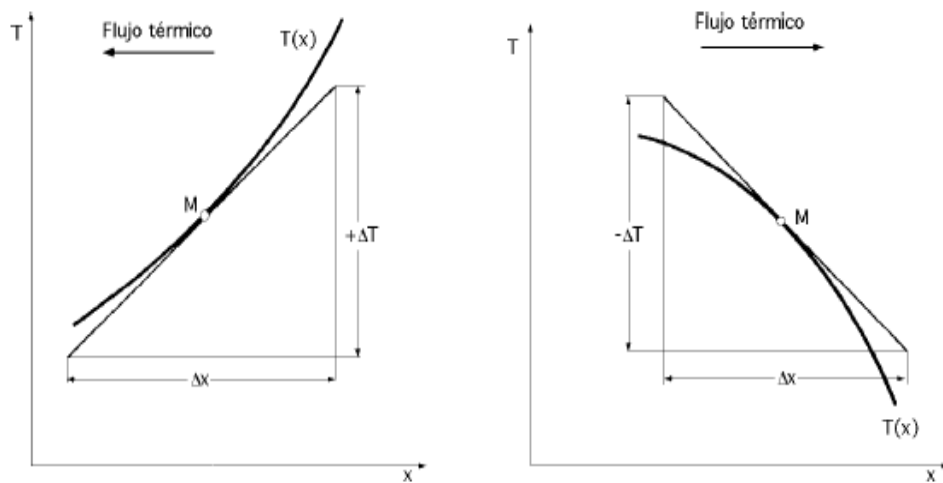
$$q_{cond} \propto A \frac{dT}{dx} \quad (2.5)$$

Donde  $T$  es la temperatura y  $x$  la dirección del flujo de calor (no el sentido).

La tasa de transferencia de calor depende de la conductividad térmica  $k$ , que es una propiedad física del cuerpo, por lo que la ecuación anterior se puede expresar en la forma:

$$q_{cond} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.6)$$

Donde la superficie  $A$  de intercambio térmico se expresa en  $m^2$ , la temperatura en Kelvin ( $K$ ), la distancia  $x$  en metros y la tasa transmisión del calor en  $W$ , las unidades de  $k$  serán  $W / m K$ . La ecuación 2.6 se conoce como Ley de Fourier.



**Figura 2.4** Convenio de signos para la transmisión del calor por conducción

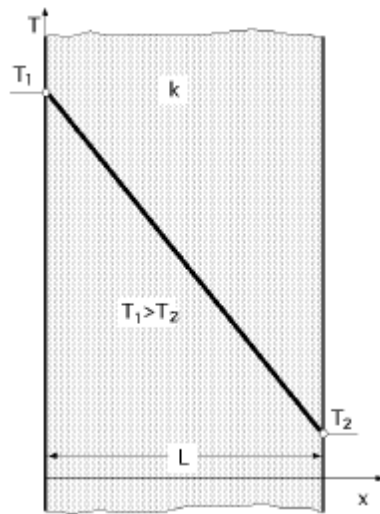
(Fuente: Fernández P. 2009)

El signo menos (-) es consecuencia del Segundo Principio de la Termodinámica, según el cual, el calor debe fluir hacia la zona de temperatura más baja (figura 2.4). El gradiente de temperaturas es negativo si la temperatura disminuye para valores crecientes de  $x$ , por lo que si el calor transferido en la dirección positiva debe ser una magnitud positiva, en el segundo miembro de la ecuación anterior hay que introducir un signo negativo.

Una aplicación inmediata de la ley de Fourier corresponde al caso de la transmisión del calor a través de una pared plana, figura 2.5. Cuando las superficies

de la pared se encuentran a temperaturas diferentes, el calor fluye sólo en dirección perpendicular a las superficies. Si la conductividad térmica es uniforme, la integración de la ecuación (2.6) proporciona:

$$q_{cond} = -\frac{k \cdot A}{L} \cdot (T_2 - T_1) = \frac{k \cdot A}{L} \cdot (T_1 - T_2) = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{L}{k \cdot A}} \quad (2.7)$$



**Figura 2.5** Pared plana

Donde la que  $L$  es el espesor de la pared,  $T_1$  es la temperatura de la superficie de la izquierda en  $x = 0$  y  $T_2$  es la temperatura de la superficie de la derecha  $x = L$ .

**Analogía Eléctrica de la Conducción:** La analogía entre la tasa de transferencia de calor y la electricidad, permite ampliar el problema de la transmisión de calor por conducción a sistemas más complejos, utilizando conceptos desarrollados en la teoría de circuitos eléctricos. Si la transmisión de calor se considera análoga al flujo de electricidad, la expresión  $(\frac{L}{k \cdot A})$  (de la ecuación 2.7)

equivale a una resistencia y la diferencia de temperaturas a una diferencia de potencial  $(T_1 - T_2)$ , por lo que la ecuación anterior se puede escribir en forma semejante a la ley de Ohm:

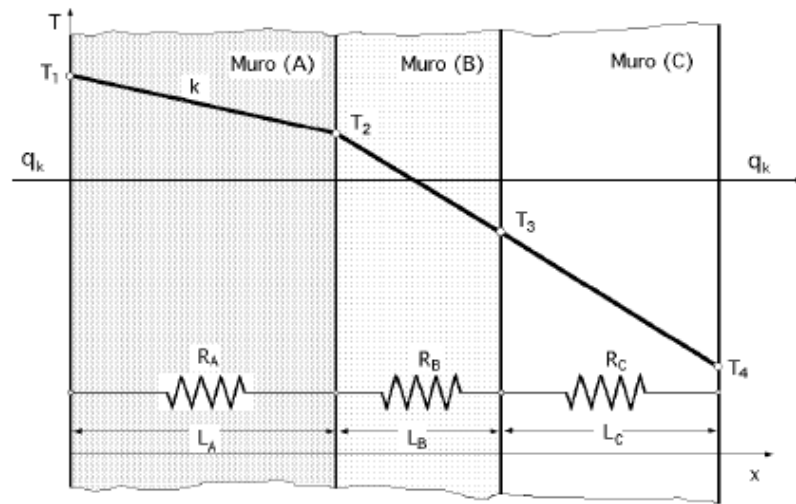
$$q_{cond} = \frac{\Delta T}{R_k}, \text{ siendo } \left\{ \begin{array}{l} \text{Potencial térmico; } \Delta T \\ \text{Resistencia térmica; } R_k \end{array} \right.$$

La inversa de la resistencia térmica es la conductividad térmica (W / mK), o conductancia térmica unitaria de la tasa de transferencia de calor por conducción.

**Paredes Planas en Serie:** Si el calor se propaga a través de varias paredes en buen contacto térmico, capas múltiples, el análisis de la tasa de transferencia de calor en estado estacionario a través de todas las secciones tiene que ser el mismo. Sin embargo y tal como se indica en la figura 2.6 en un sistema de tres capas, los gradientes de temperatura en éstas son distintos. El calor transmitido se puede expresar para cada sección y como es el mismo para todas las secciones, se puede escribir:

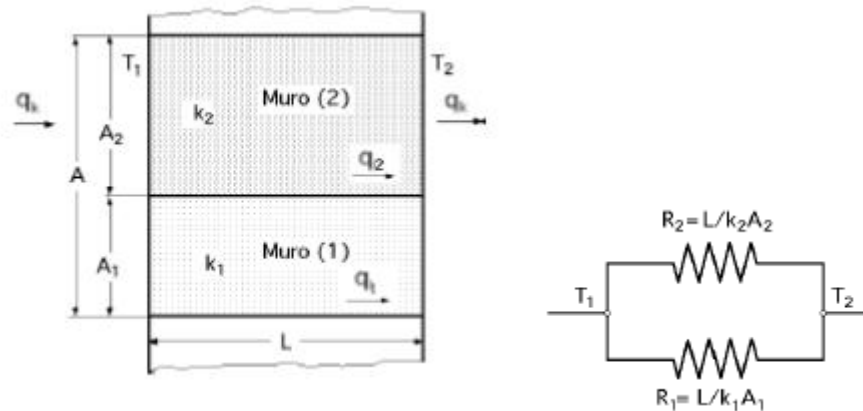
$$q_{cond} = \frac{(T_1 - T_2)}{\left(\frac{L}{k \cdot A}\right)_A} = \frac{(T_2 - T_3)}{\left(\frac{L}{k \cdot A}\right)_B} = \frac{(T_3 - T_4)}{\left(\frac{L}{k \cdot A}\right)_C} \quad (2.8)$$

$$q_{cond} = \frac{(T_1 - T_4)}{\left(\frac{L}{k \cdot A}\right)_A + \left(\frac{L}{k \cdot A}\right)_B + \left(\frac{L}{k \cdot A}\right)_C} \quad (2.9)$$



**Figura 2.6** Pared compuesta

**Paredes en Paralelo:** Las ecuaciones anteriores se pueden utilizar en la resolución de problemas más complejos, en los que la conducción tiene lugar en paredes dispuestas en paralelo.



**Figura 2.7** Bloque formado por dos materiales de áreas  $A_1$  y  $A_2$  en paralelo.

En este caso hay que tener en cuenta que para una determinada diferencia de temperaturas a través del bloque, cada capa del conjunto se puede analizar por separado, teniendo presentes las condiciones impuestas para el flujo unidimensional a través de cada una de las dos secciones.

Si la diferencia de temperaturas entre los materiales en contacto es pequeña, la tasa de transferencia de calor paralelo a las capas dominará sobre cualquier otro flujo normal a éstas, por lo que el problema se puede tratar como unidireccional sin pérdida importante de exactitud.

Como el calor fluye a través de los dos materiales según trayectorias separadas, la tasa de transferencia de calor  $q_{cond}$  será la sumatoria de ambas:

$$q_{cond} = q_1 + q_2 = \frac{(T_1 - T_2)}{\left(\frac{L}{kA}\right)_1} + \frac{(T_1 - T_2)}{\left(\frac{L}{kA}\right)_2} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)(T_1 - T_2) \quad (2.10)$$

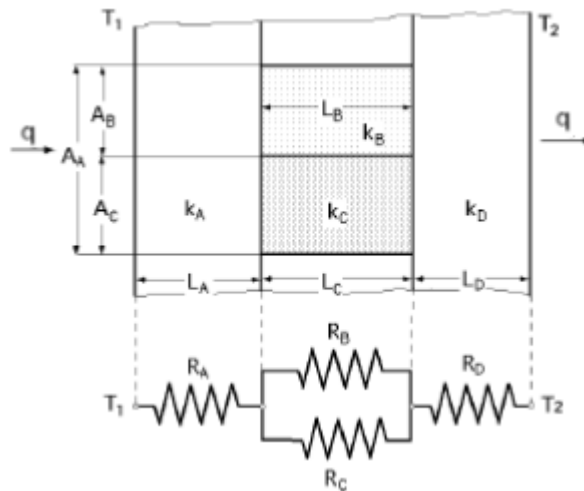
Donde el área total de transmisión del calor es la suma de las dos áreas individuales y la inversa de la resistencia total es igual a la suma de las inversas de todas las resistencias individuales.

**Paredes Compuestas:** Una aplicación más compleja del enfoque del circuito térmico sería la indicada en la figura 2.8, en la cual el calor se transfiere a través de una estructura formada por una resistencia térmica en serie, otra en paralelo y una tercera en serie.

Para este sistema, el flujo térmico por unidad de superficie es:

$$q_{cond} = \frac{\Delta T_{global}}{\sum_{i=1}^n R_i} = \frac{\Delta T_{global}}{R_A + R_2 + R_D} = \frac{\Delta T_{global}}{R_A + \frac{R_B R_C}{R_B + R_C} + R_D} \quad (2.11)$$

Donde  $n$  es el número de capas en serie,  $R_i$  es la resistencia térmica de la capa  $i$ , y  $global \Delta T$  es la diferencia de temperaturas entre las dos superficies exteriores. El análisis del circuito precedente supone flujo unidimensional. Si las resistencias  $R_B$  y  $R_C$  son muy diferentes, los efectos bidimensionales pueden ser importantes.



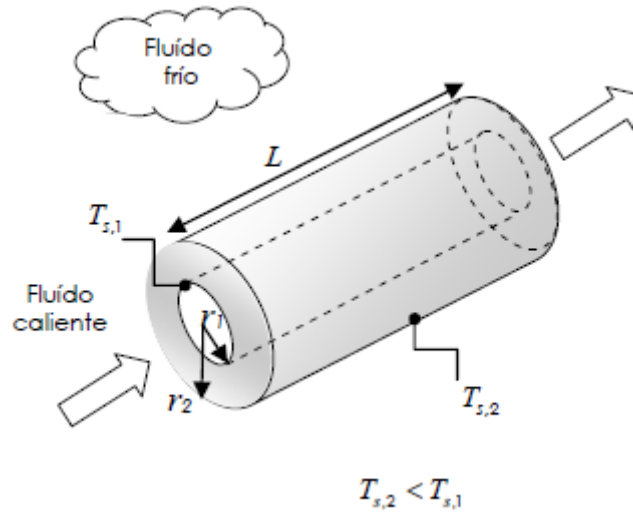
**Figura 2.8** Circuito térmico en serie-paralelo-serie

**Sistemas Radiales:** Los sistemas cilíndricos y esféricos a menudo experimentan gradientes de temperatura sólo en la dirección radial, y por consiguiente se tratan como unidireccionales. Además bajo condiciones de estado estacionario, sin generación de calor estos sistemas se pueden analizar usando la expresión de la Ley de Fourier en las coordenadas adecuadas.



**Paredes cilíndricas** Considere el cilindro hueco de la figura 2.9, cuyas superficie externa e interna se exponen a fluidos de diferente temperaturas. Para condiciones de estado estacionario, sin generación interna de calor, la ley de Fourier en coordenadas cilíndricas se expresa como:

$$q_{cond} = -k \cdot A_r \cdot \frac{dT}{dr} \quad (2.12)$$



**Figura 2.9.** Cilindro hueco con condiciones convectivas en la superficie.

Siendo  $q_{cond}$  una constante en la dirección radial. Considerando también la forma del área de transferencia para esta geometría, queda de la siguiente forma:

$$q_{cond} = -k \cdot (2\pi r L) \cdot \frac{dT}{dr} \quad (2.13)$$

Donde  $A = 2\pi r L$  es el área normal a la dirección de transferencia de calor. Escribiendo la ecuación anterior en término de integrales con las condiciones de frontera,  $T(r_1) = T_{s,1}$  y  $T(r_2) = T_{s,2}$ , se obtiene:

$$\frac{q_{cond}}{2\pi L} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = - \int_{T_{s,1}}^{T_{s,2}} k \cdot dT \quad (2.14)$$

Si considerando  $k = \text{constante}$ , resolviendo, queda entonces:

$$q_{cond} = 2\pi L k \frac{(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln(r_2/r_1)} \quad (2.15)$$

También es posible obtener la distribución de temperaturas en la dirección radial en el cilindro, esto es:

$$T(r) = \frac{(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln(r_2/r_1)} \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) + T_{s,2} \quad (2.16)$$

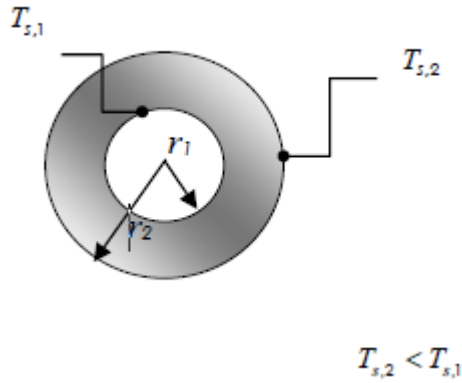
En el caso de la pared cilíndrica, la distribución de temperaturas ya no es lineal, sino logarítmica.

De este resultado, es evidente que la resistencia térmica para la conducción radial es de la forma:

$$R_{cond} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k} \quad (2.17)$$

**Paredes esféricas** Considere la esfera hueca de la figura 2.10. Para el estado estacionario y condiciones unidimensionales,  $q_{cond}$  es constante y la forma apropiada para la ley de Fourier es:

$$q_{cond} = -k \cdot A_r \cdot \frac{dT}{dr} = -k \cdot (4\pi r^2) \cdot \frac{dT}{dr} \quad (2.18)$$



**Figura 2.10** Conducción en una esfera hueca

Donde  $Ar = 4\pi r^2$  es el área normal a la dirección de transferencia de calor, luego la ecuación anterior se puede expresar en forma integral como:

$$\frac{q_{cond}}{4\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = - \int_{T_{s,1}}^{T_{s,2}} k \cdot dT \quad (2.19)$$

Resolviendo bajo la suposición que la conductividad térmica es constante, se obtiene:

$$q_{cond} = 4\pi k \frac{(T_{s,1} - T_{s,2})}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} \quad (2.20)$$

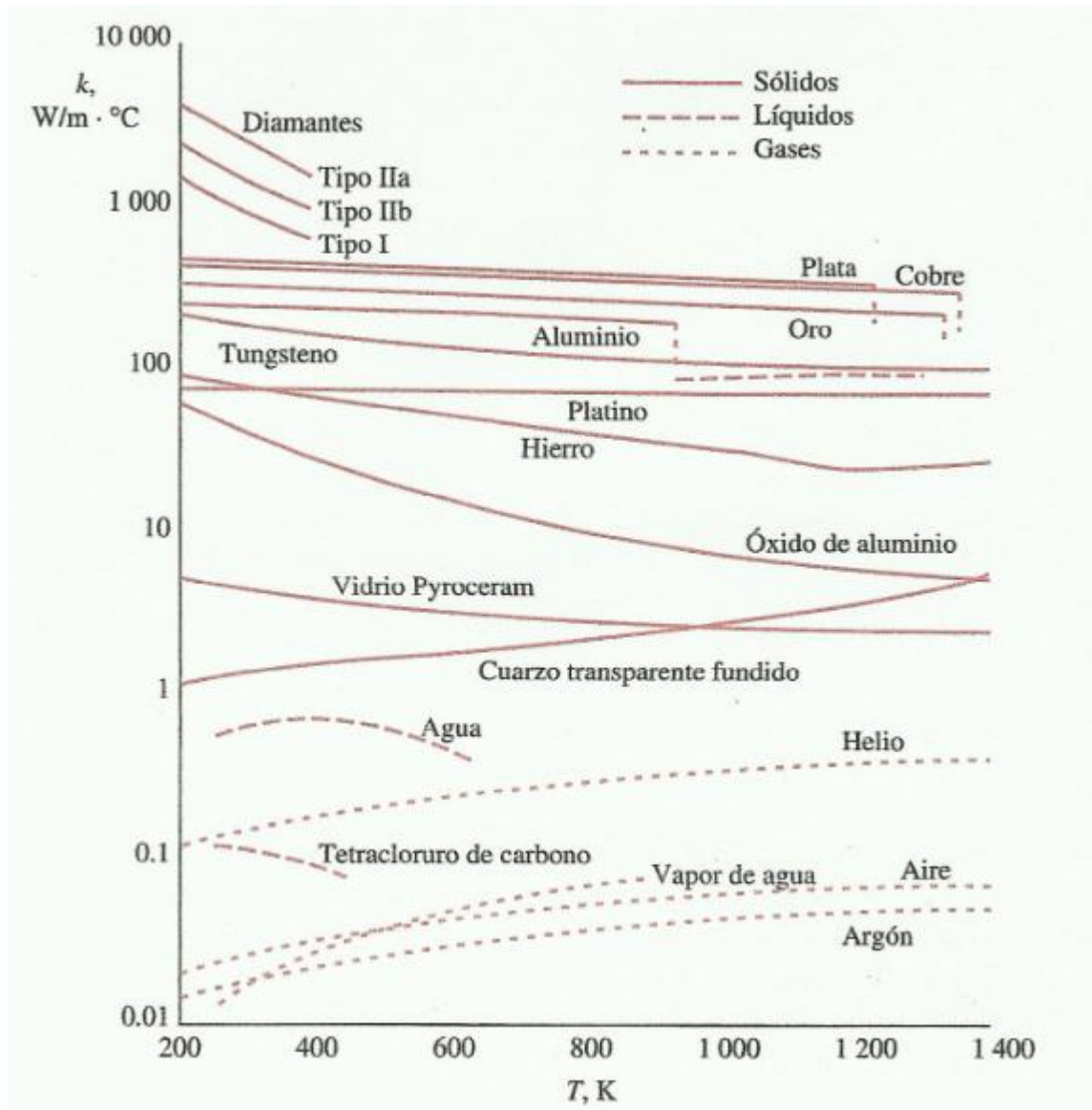
y la distribución de temperaturas en la esfera vendrá dada por:

$$T(r) = \frac{(T_{s,1} - T_{s,2})}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)} \left[ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] + T_{s,2} \quad (2.21)$$

### 2.2.3 Conductividad térmica

La conductividad térmica  $k$  es una propiedad de los materiales que, excepto en el caso de los gases a bajas temperaturas, no es posible predecir analíticamente. La información disponible está basada en medidas experimentales. En general, la conductividad térmica de un material varía con la temperatura como se muestra en la figura 2.11, pero en muchas situaciones prácticas, si el sistema tiene una temperatura media, se puede considerar con un valor medio constante, lo que proporciona resultados bastante satisfactorios. Por tanto es prácticamente común evaluar la conductividad térmica  $k$  a la temperatura promedio y tratarla como *constante* en cálculos.

En el análisis de la transferencia de calor normalmente se supone que un material es isotrópico; es decir, tiene propiedades uniformes en todas las direcciones. Esta suposición es realista para la mayor parte de los materiales, excepto para aquellos que exhiben características estructurales diferentes en direcciones diferentes, como materiales compuestos y la madera. De hecho la conductividad térmica de la madera a través de la fibra es diferente a la que tiene sentido paralelo a esta fibra.



**Figura 2.11** Variación de la conductividad térmica de diversos sólidos, líquidos y gases con relación a la temperatura. (Fuente: Cengel, Y. 2007)

En la Tabla 1, se relacionan los valores típicos de la conductividad térmica de algunos metales, sólidos no metálicos, líquidos y gases, que nos dan una idea del orden de magnitud con que se presenta en la práctica, mientras que en la figura 2.12,

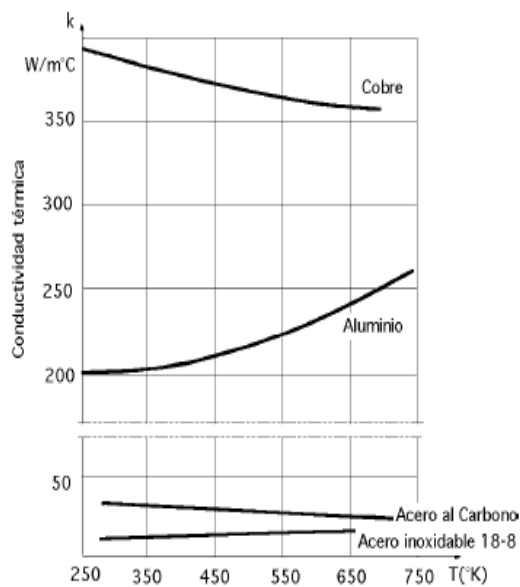
se presenta una gráfica de conductividades térmicas, entre 0 y 450  $W/m K$  para metales y aleaciones (buenos conductores térmicos).

**Tabla 2.1** Conductividad térmica de algunos materiales

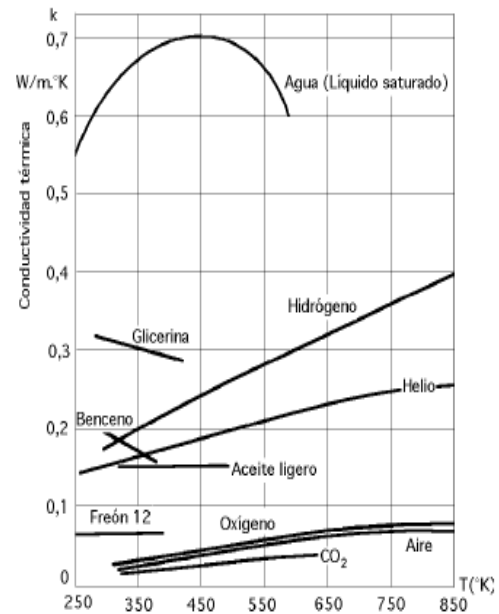
| <b>Material</b> | <b>k (<math>W/m\ ^\circ C</math>)</b> |
|-----------------|---------------------------------------|
| Diamante        | 2300                                  |
| Plata           | 429                                   |
| Cobre           | 401                                   |
| Oro             | 317                                   |
| Aluminio        | 237                                   |
| Cobalto         | 99.2                                  |
| Cromo           | 93.7                                  |
| Hierro          | 80.2                                  |
| Plomo           | 35.3                                  |

Fuente: Cengel, Y. 2007

En la figura 2.13, se muestra que el rango de conductividades térmicas para algunos gases y líquidos es entre 0 y 0,8  $W/m K$ , observándose la gran diferencia existente entre sus coeficientes de conductividad  $k$ .



**Figura 2.12** Conductividad térmica  
en metales y aleaciones



**Figura 2.13** Conductividad térmica  
en líquidos, gases y vapores

(Fuente: Fernández P. 2009)

En los *materiales conductores* el mecanismo de la transmisión de calor por conducción está asociado a las vibraciones de la *estructura reticular* y al movimiento de los electrones libres, (metales y aleaciones), al igual que en los conductores eléctricos, por lo que materiales buenos conductores de la electricidad son también, en general, buenos conductores del calor, (cobre, plata, aluminio, etc).

Los *aislantes térmicos* (vidrio, plásticos, etc) que requieren de una *estructura porosa* y un gas atrapado en la misma, son también buenos aislantes eléctricos. En estos materiales, la transferencia de calor puede tener lugar de diversas formas:

- Conducción a través de la estructura sólida porosa o fibrosa
- Conducción y/o convección a través del aire atrapado en los espacios vacíos
- Radiación entre porciones de la estructura sólida, lo cual es especialmente importante a temperaturas elevadas o en recintos vacíos.

Se han desarrollado materiales súper-aislantes para aplicaciones criogénicas, que constan de varias capas de materiales altamente reflectantes separados por espacios vacíos, que minimizan la conducción y la convección, alcanzándose conductividades térmicas del orden de 0,02 W/mK.

En muchos materiales el valor de  $k$  no es constante, sino que varía con la temperatura y con la composición química de los mismos. Cuando sólo depende de la temperatura, se puede poner el valor de  $k$  en la forma:

$$k = k(T) = k_0(1 + \beta T) \quad (2.22)$$

Siendo  $k_0$  el valor de la conductividad a la temperatura de referencia, y  $\beta$  una constante, (coeficiente de dilatación). En tal caso la integración de la ecuación de Fourier proporciona:

$$q_{cond} = - \int_{T_1}^{T_2} A k_0 (1 + \beta T) dT = \frac{A k_0}{L} \left\{ T_1 - T_2 + \frac{\beta}{2} (T_1^2 - T_2^2) \right\} \quad (2.23)$$

$$q_{cond} = \frac{k_m A}{L} (T_1 - T_2) \quad (2.24)$$

en la que  $k_m$  es el valor de  $k$  a la temperatura  $\frac{(T_1 + T_2)}{2}$ .

### **Coeficientes de conductividad térmica para las aleaciones.**

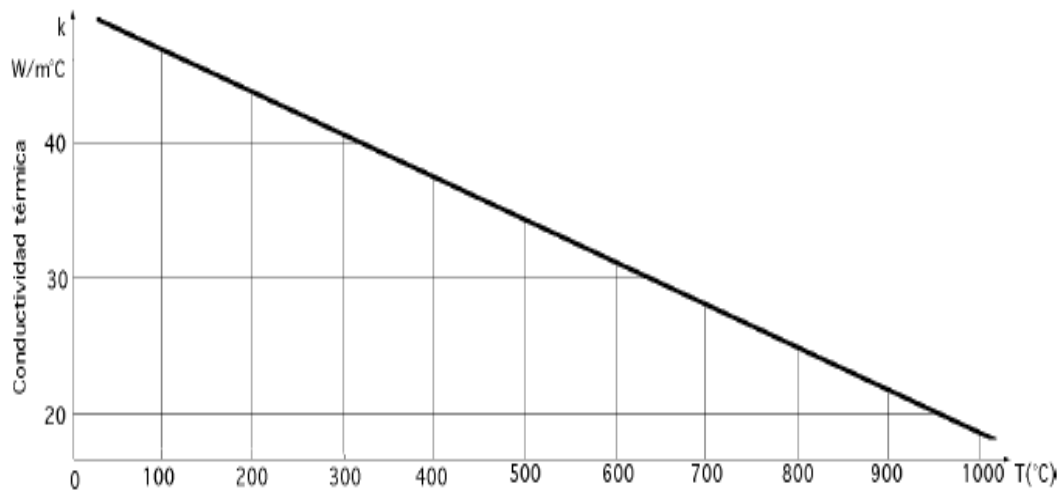
En la figura 2.11 se muestra el comportamiento de la conductividad térmica de algunos metales y aleaciones, (cobre, aluminio, acero al carbono, acero inoxidable 18-8, etc), con la temperatura.



La conductividad térmica de las aleaciones, en general, y de los aceros en particular, se puede determinar mediante la relación:

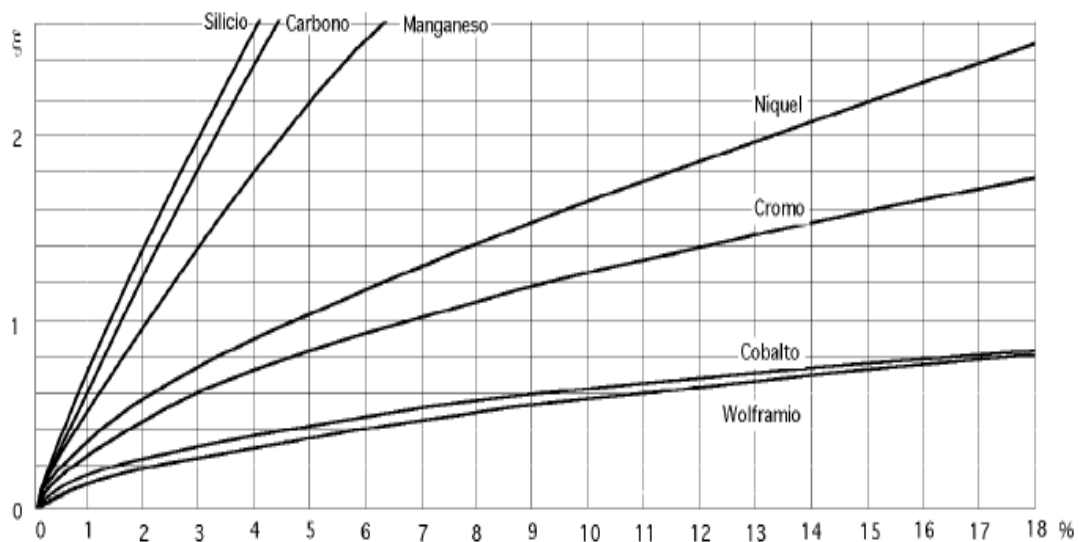
$$k = \frac{k_0}{1 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \dots \varepsilon_n} \quad (2.25)$$

Donde,  $k_0$  es la conductividad térmica del metal base, y  $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 \dots \varepsilon_n$ , son unos factores de corrección de dicha conductividad, propios de cada metal que la caracterizan. La conductividad térmica del hierro puro viene representada en la figura 2.14, mientras que los factores característicos de los metales adicionales que entran en la composición de un acero aleado, y  $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 \dots \varepsilon_n$ , en la figura 2.15.



**Figura 2.14** Conductividad térmica del hierro puro

(Fuente: Fernández P. 2009)



**Figura 2.15** Factores de corrección de la conductividad térmica de los aceros aleados.

(Fuente: Fernández P. 2009)

### Resistencia de Contacto:

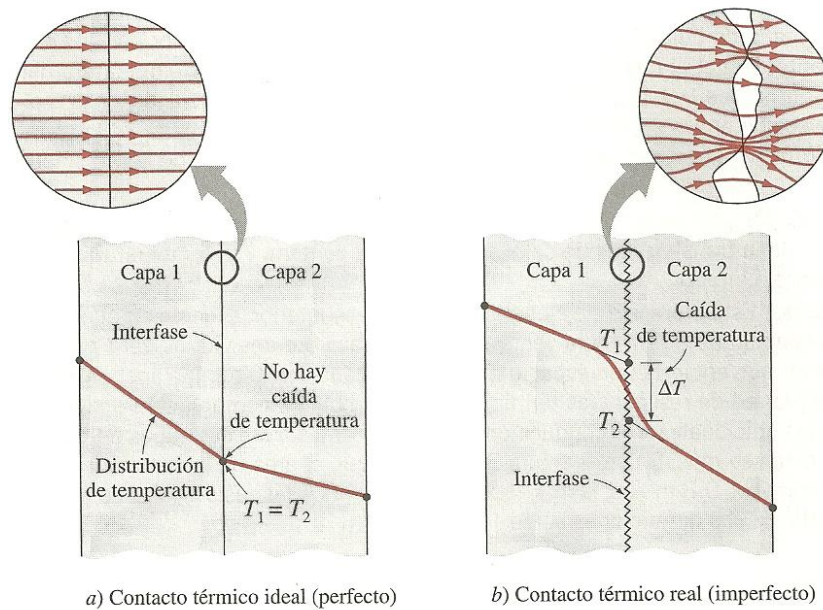
Cuando superficies a distintas temperaturas se ponen en contacto, aparece una resistencia térmica en la interfase de los sólidos, que se conoce como *resistencia de contacto*, y que se desarrolla cuando los dos materiales no ajustan exactamente, por lo que entre ambos puede quedar atrapada una delgada capa de fluido. Una vista ampliada del contacto entre las dos superficies mostraría que los sólidos se tocan sólo en picos superficiales, mientras que los huecos estarían ocupados por un fluido, o el vacío. La resistencia de la interfase depende de:

- La rugosidad superficial
- La presión que mantiene en contacto las dos superficies
- Del fluido de la interface
- De su temperatura

En la interfase, el mecanismo de la transmisión del calor, y su determinación, es complejo, la conducción del calor tiene lugar a través de los puntos de contacto del sólido en forma tridimensional por cuanto el calor se transmite por las áreas de contacto a través del fluido de la interfase por convección, y entre las superficies por radiación. Si el calor a través de las superficies sólidas en contacto es  $q$ , la diferencia de temperaturas a través del fluido que separa los dos sólidos es  $\Delta T_i$  y la resistencia de contacto  $R_c$  se puede expresarse de manera análoga a la ley de enfriamiento de newton en función de una conductancia interfacial  $h_i$ ,  $W/m^2K$ , se tiene:

$$q = h_i \cdot A \cdot \Delta T_i = \frac{\Delta T_i}{R_c} \quad (2.26)$$

Cuando las dos superficies están en contacto térmico perfecto, la diferencia de temperaturas a través de la interface es nula, por lo que su resistencia térmica es cero ( $T_1=T_2$ ) como se muestra en la figura 2.16. Un contacto térmico imperfecto tiene lugar cuando existe una diferencia de temperaturas en la interface. La resistencia por contacto depende de la presión con que se mantiene el contacto, y muestra un descenso notable cuando se alcanza el límite elástico de alguno de los materiales.



**Figura 2.16:** Distribución de la temperatura y líneas de flujo de calor a lo largo de dos placas sólidas comprimidas entre sí para el caso de contacto térmico ideal y real.

(Fuente: Cengel, Y. 2007)

En los sólidos mecánicamente unidos no se suele considerar la resistencia de la contacto, a pesar de que siempre está presente como se muestra en la figura 2.16. Sin embargo hay que conocer la existencia de la resistencia de la interface y la diferencia de temperaturas resultante a través de la misma. En superficies rugosas y bajas presiones de unión, la caída de temperatura a través de la interface puede ser importante, incluso dominante, y hay que tenerla en cuenta. La problemática de la resistencia de la interface es compleja y no existe ninguna teoría, o base de datos empíricos, que la describa exactamente para situaciones de interés industrial. A continuación se muestra en la tabla 4 conductancias interfaciales de algunos materiales a presiones moderadas.

**Tabla 2.2** Conductancias interfaciales de algunos materiales a presiones moderadas

| Interfase                           | $h_i \left( \frac{W}{m^2 K} \right)$ |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Cerámica - Cerámica                 | 500 - 3000                           |
| Cerámica - Metal                    | 1500 - 8500                          |
| Grafito - Metal                     | 3000 - 6000                          |
| Acero inoxidable - Acero inoxidable | 1700 - 3700                          |
| Aluminio - Aluminio                 | 2200 - 12000                         |
| Acero inoxidable - Aluminio         | 3000 - 4500                          |
| Cobre - Cobre                       | 10000 - 25000                        |
| Hierro - Aluminio                   | 4000 - 40000                         |

**Fuente:** Fernández P. 2009

### 2.3 Mezclas Gas-Vapor

El aire es una mezcla de nitrógeno oxígeno y argón, más vestigios de otros gases. Normalmente, el aire en la atmósfera contiene cierta cantidad de vapor de agua (o humedad) y se le conoce como aire atmosférico. Por otra parte, el aire que no contiene vapor de agua se le denomina como aire seco. Es conveniente tratar al aire como una mezcla de vapor de agua y aire seco, porque la composición del aire seco permanece relativamente constante, pero la cantidad de vapor de agua varía por la condensación y evaporación de los océanos, lagos y ríos. A pesar de que la cantidad de vapor de agua en el aire sea pequeña, ésta influye en la comodidad del ser humano, y por ello siempre es tomada en cuenta en los dispositivos de acondicionamiento de aire.

A una temperatura atmosférica moderadamente baja el aire seco puede tratarse como un gas ideal con capacidades térmicas específicas constantes. También es posible tratar el vapor de agua en el aire como un gas ideal, aun cuando el vapor de agua esté como vapor saturado. Por tanto, el aire atmosférico se va a considerar como

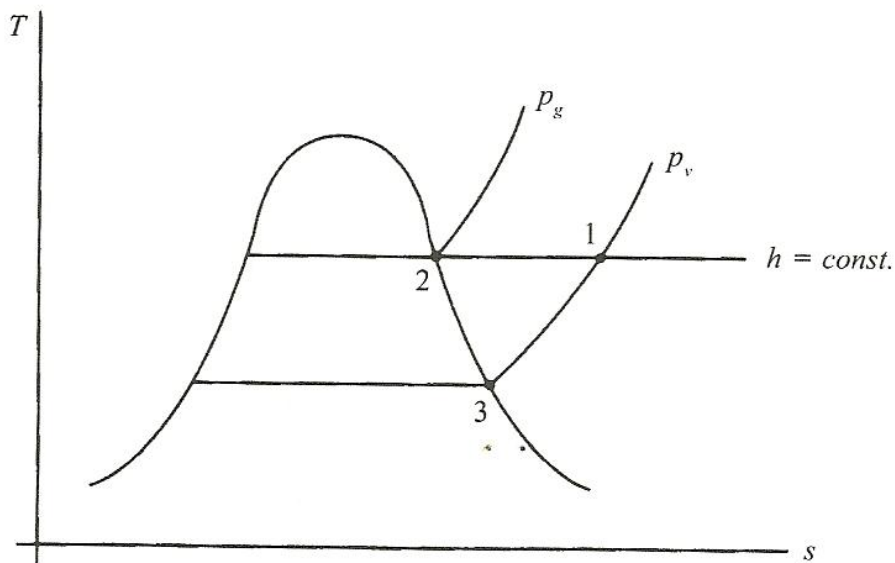
una mezcla de dos gases y la presión total sería la suma de la presión parcial del aire seco  $P_a$  y de la presión parcial del vapor de agua  $P_v$  (llamada presión de vapor).

$$P = P_a + P_v \text{ (kPa)} \quad (2.27)$$

Como se ha supuesto comportamiento de gas ideal para el vapor de agua, su entalpía depende sólo de la temperatura. Por ello, la entalpía del vapor de agua en el aire puede considerarse igual a la entalpía del vapor saturado a la misma temperatura.

$$h_v(T) \cong h_g(T) \quad (2.28)$$

Esto significa, de acuerdo a la figura 2.16, que  $h_1=h_2$  donde  $h_2= h_g$ , leída esta última de las tablas de agua a  $T=T_1$ . Esto es aceptable en situaciones donde la presión sea relativamente baja o próximas a la presión atmosférica y la temperatura esté por debajo aproximadamente de 60 °C(140 °F).



**Figura 2.17:** Diagrama T-s del agua

### 2.3.1 Humedad específica y Relativa del aire

Se denomina humedad específica o absoluta a la masa de vapor de agua presente en una unidad de masa de aire seco (también conocida como relación de humedad) y está expresada en la ecuación 2.33.

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (\text{kg vapor de agua/ kg aire seco}) \quad (2.29)$$

También se puede expresar con la ecuación 2.34:

$$\omega = \frac{0.622P_v}{P-P_v} \quad (\text{kg vapor de agua/ kg aire seco}) \quad (2.30)$$

La cantidad de vapor de agua en el aire está relacionada con la humedad relativa y con la humedad. La humedad relativa  $\phi$  se define como el cociente de la masa de vapor de agua  $m_v$  y de la máxima cantidad de vapor de agua  $m_g$  que el aire puede contener a la misma temperatura.

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} \quad (2.31)$$

También se puede expresar como:

$$\phi = \frac{P_v}{P_g} \quad (2.32)$$

Combinando ambas expresiones de la humedad específica y relativa se pueden expresar como:

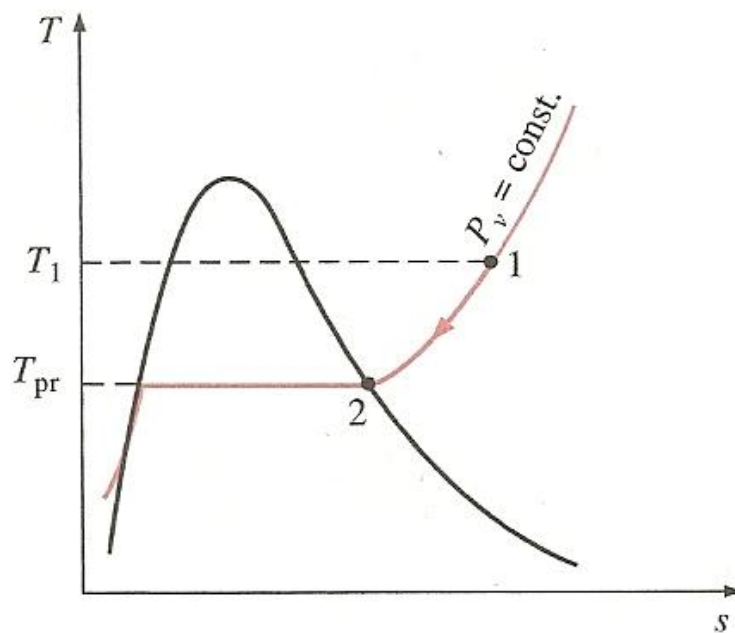
$$\phi = \frac{\omega P}{(0.622 + \omega)P_g} \quad (2.33)$$

$$\omega = \frac{0.622\phi P_g}{P - \phi P_g} \quad (2.34)$$

### 2.3.2 Temperatura de punto de rocío

La temperatura de punto de rocío  $T_{pr}$  se define como la temperatura a la que se inicia la condensación si el aire se enfría a presión constante. Es decir; es la temperatura de saturación del agua correspondiente a la presión de vapor:

$$T_{pr} = T_{sat} @ P_v \quad (2.35)$$

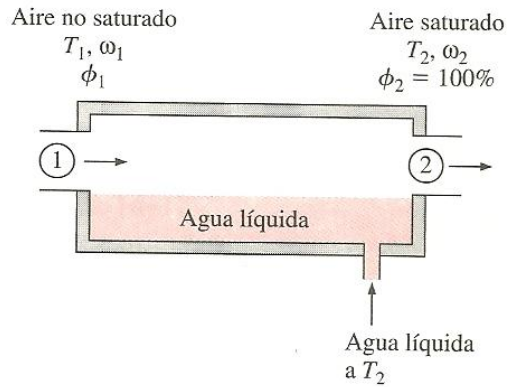


**Figura 2.18:** Enfriamiento a presión constante del aire húmedo y temperatura de punto de rocío en el diagrama T-s.

### 2.3.3 Temperaturas de saturación adiabática y de bulbo húmedo

La humedad relativa y la humedad específica del aire pueden determinarse al medir la temperatura de saturación adiabática del aire, que es la temperatura que el aire alcanza después de fluir sobre agua en un canal largo hasta que se satura.





**Figura 2.19:** Proceso de saturación adiabática

$$\omega_1 = \frac{c_p(T_2 - T_1) + \omega_2 h_{fg2}}{h_{g1} - h_{f2}} \quad (2.36)$$

$$\omega_2 = \frac{0.622 P_{g2}}{P_2 - P_{g2}} \quad (2.37)$$

Siendo  $T_2$  la temperatura de saturación adiabática.

Un enfoque más práctico dentro de los objetivos de acondicionamiento de aire es emplear un termómetro cuyo bulbo se cubre con una mecha de algodón saturada con agua y soplar el aire sobre la mecha. La temperatura medida de esta manera se llama *temperatura de bulbo húmedo*  $T_{bh}$  y se emplea en lugar de la temperatura de saturación adiabática. En contraste, a la temperatura normal del aire atmosférico se le conoce como *temperatura de bulbo seco* para diferenciarla así de otras formas de temperatura.

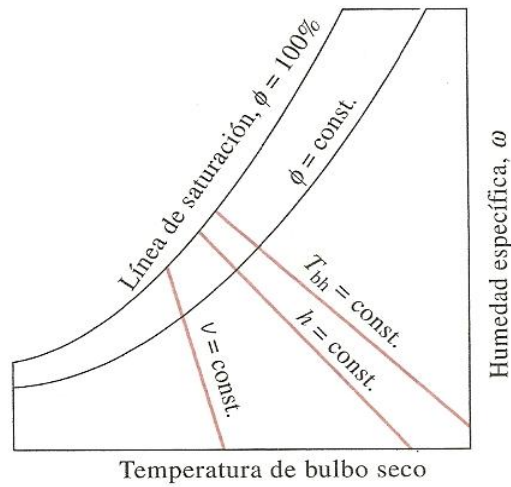
### 2.3.4 La carta psicrométrica

Una forma cómoda de relacionar las distintas propiedades asociadas con la mezcla vapor de agua-aire es dibujar esas magnitudes en un diagrama psicrométrico, también conocida como carta psicrométrica, y se utiliza en trabajos de acondicionamiento de aire. Una carta psicrométrica para una presión de 1 atm

(101.325 kPa o 14.696 psia) se emplea en aplicaciones de acondicionamiento a nivel del mar. También están disponibles cartas psicométricas a otras presiones para emplearse en elevaciones bastantes más altas que el nivel del mar.

Las características más importantes de la carta psicrométrica se representan en la figura 2.19. Las temperaturas de bulbo seco se muestran en el eje horizontal y la humedad específica sobre el eje vertical. En algunas cartas también se muestran la presión de vapor  $P_v$  sobre el eje vertical ya que para una presión fija  $P$  existe una correspondencia de uno a uno entre la humedad específica  $\omega$  y la presión de vapor  $P_v$ . En el extremo izquierdo de la carta se observa una curva llamada línea de saturación. Todos los estados del aire saturado se encuentran en esta curva, por lo tanto, es también la curva de un 100% de humedad relativa.

Las líneas de temperatura de bulbo húmedo constante tienen una apariencia descendente hacia la derecha. Las líneas de volumen específico constante (en  $\text{m}^3/\text{kg}$  de aire seco) son similares, salvo que están más inclinadas. Las líneas de entalpía constante están casi paralelas a las líneas de temperaturas de bulbo húmedo constante. Es por ello que en algunas cartas psicrométricas las líneas de bulbo húmedo constante se emplean como líneas de entalpía constante.



**Figura 2.20:** Esquema de la carta psicrométrica.

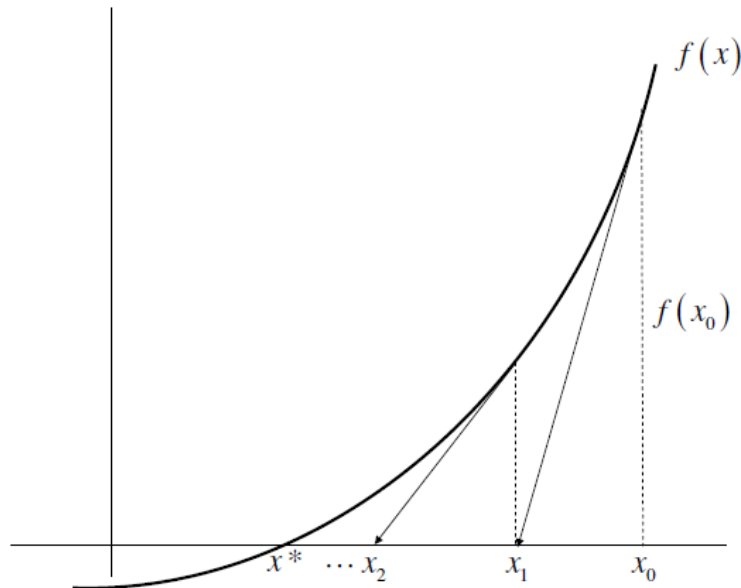
## 2.4 Resolución aproximada de ecuaciones: Método de Newton-Raphson

El método de Newton-Raphson es un método iterativo que permite aproximar la solución de una ecuación del tipo  $f(x) = 0$ .

Partiendo de una estimación inicial de la solución  $x_0$ , se construye una sucesión de aproximaciones de forma recurrente mediante la fórmula.

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x)}{\hat{f}(x)} \quad (2.38)$$

Las condiciones que garantizan la convergencia global del método pueden ser sustituidas por otras que garantizan su convergencia local (esto es si el punto  $x_0$  con el que se inicializa el método es suficientemente cercano a la solución buscada). Con ello se pueden rebajar las “exigencias” sobre la función que garanticen el correcto funcionamiento del método.



**Figura 2.21:** Interpretación gráfica del método de Newton-Raphson

El método de Newton-Raphson es un método abierto, en el sentido de que su convergencia global no está garantizada. La única manera de alcanzar la convergencia es seleccionar un valor inicial lo suficientemente cercano a la raíz buscada. Así, se ha de comenzar la iteración con un número que de un valor  $f(x)$  cercano al cero (denominado punto de arranque o valor supuesto).

La relativa cercanía del punto inicial a la raíz depende mucho de la naturaleza de la propia función; si ésta presenta múltiples puntos de inflexión o pendientes grandes en el entorno de la raíz, entonces las probabilidades de que el algoritmo diverja aumentan, lo cual exige seleccionar un valor supuesto cercano a la raíz. Una vez que se ha hecho esto, el método linealiza la función por la recta tangente en ese valor supuesto. La abscisa en el origen de dicha recta será, según el método, una mejor aproximación de la raíz que el valor anterior. Se realizarán sucesivas iteraciones hasta que el método haya convergido lo suficiente,  $f(x) = 0$  Sea  $f$  :

$[a, b] \rightarrow \mathbf{R}$  función derivable definida en el intervalo real  $[a, b]$ . Empezando con un valor inicial  $x_0$  y definimos para cada número natural  $n$ .

## 2.5 Una Estrategia virtual y educativa

Ahora bien, tomando en cuenta que el mundo en general, y Venezuela en particular se encuentran inmersos en una era digital, no se puede estar al margen del desarrollo tecnológico, por lo cual la misma dinámica social llama a adoptar las últimas tendencias en el aprovechamiento de la humanidad; es por ello que el proyecto que aquí se defiende, toma en consideración una estrategia educativa donde se unen estos dos elementos, por un lado la tecnología y por la otra la educación.

Ello es de suma importancia; pues se conjugan los avances tecnológicos del laboratorio virtual, y las técnicas que pueda aportar la educación; siempre en la búsqueda de una mejor aprehensión del conocimiento, a partir de la utilización de las mejores estrategias para afianzar el aprendizaje en los estudiantes y buscando la manera de incorporar estos nuevos recursos a los planes de formación.

Es así como, diferentes autores han coincidido en señalar que los laboratorios virtuales contribuyen a fortalecer el proceso de aprendizaje y a la vez facilita la realización de las experiencias las cuales pueden ser reproducidas con recursos informáticos en cualquier momento. (Amaya, 2009; Alejandro y Perdomo, 2009; Rosado y Herreros, 2005).

## **CAPITULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1 Nivel de la Investigación:**

El nivel de esta investigación puede definirse como experimental, dado que se estudian los fenómenos físicos que determinan la tasa de transferencia de calor por conducción de forma teórica y son representados virtualmente mediante simulaciones computarizadas provenientes de datos experimentales obtenidos en el banco de ensayo respectivo, todo a fin de visualizar dicho comportamiento teórico y compararlo con estos resultados obtenidos en diversos ensayos experimentales realizados.

#### **3.2. Naturaleza de la Investigación:**

En cuanto a este aspecto se considera como de naturaleza de campo, ello debido a que los datos se obtienen directamente de la realidad (Sabino. 1994).

#### **3.3 Tipo de Estudio:**

Así mismo, se puede afirmar que es del tipo Descriptivo, ya que a través de ella se estudiarán y señalarán las características esenciales del proyecto a realizar, el cual consiste en un laboratorio virtual para el estudio de la transferencia de calor por conducción, para ser utilizado en el Laboratorio de Transferencia de Calor de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo; ello sustentado en lo señalado por Hernández y otros (2006) en cuanto a que estos “son útiles `para mostrar con precisión los ángulos o dimensiones de un fenómeno, suceso, comunidad, contexto o situación” (p.103).

### **3.4 Diseño de la Investigación:**

El diseño de ingeniería puede describirse, según Norton (1999), como el proceso de utilizar las muchas técnicas y principios científicos con el objeto de precisar un dispositivo, un proceso o un sistema con suficiente detalle para permitir su realización, agregando que tal y como lo señala la UPEL (1998); y Spotts y Shoup (1999), es un proceso que debe ir encaminado a cubrir una cierta necesidad; el diseño, por lo tanto, es un ejercicio de creatividad e innovación aplicadas en el que se integran numerosas disciplinas. Por lo tanto la modalidad del presente estudio, es de Proyecto Factible, en consonancia con lo señalado por la UPEL (2006), en cuanto a que “consiste en la investigación, elaboración y desarrollo de una propuesta de un modelo operativo viable para solucionar problemas requerimientos o necesidades de organizaciones o grupos sociales; puede referirse a la formulación de políticas, programas, tecnológicas, métodos o procesos” (p.7).

**Fases del Proyecto:** en cuanto a este aspecto, es de señalar que existen variadas concreciones de etapas, y ellas irán en estrecha correspondencia con los objetivos de la investigación; de tal manera que, en esta oportunidad se asumirán una variación de las propuestas por Polya (1981) y podrían sintetizarse en cinco (05) etapas:

**Tabla 3.1** Fases del proyecto.

| <b>POLYA (1981)</b>       | <b>IBARRA (2012)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                | <b>OBSERVACIONES</b>                               |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| <b>ETAPAS</b>             | <b>ETAPAS</b>                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>VARIACIONES</b>                                 |
| 1. Comprender el problema | 1. Enunciado del Problema                                                                                                                                                                                                                                                           | Es comprender el problema y explicar la necesidad. |
| 2. Concebir un plan       | 2. Diagnóstico de la Necesidad de este tipo de Proyectos: Bibliográfica, Educativa, ingenieril                                                                                                                                                                                      | No hay variaciones                                 |
| 3. Ejecutar el plan       | 3. Diseño de la Propuesta                                                                                                                                                                                                                                                           | Sólo variaciones de tipo instrumental              |
| 4. Examinar la solución   | 4. Validar el funcionamiento de:<br>a) banco de pruebas de transferencia de calor por conducción.<br>b) Codificación de los algoritmos en un lenguaje visual.<br>c) Elaboración de la interfaz gráfica para el usuario<br>d) Validación de los resultados obtenidos con el programa | variaciones de tipo instrumental                   |
| 5.                        | 5. Factibilidad del Proyecto                                                                                                                                                                                                                                                        | Recursos necesarios                                |

### **3.4.1 Revisión y síntesis de la bibliografía.**

Esta etapa consistente en el arqueo bibliográfico de toda la literatura referida al problema en cuestión permitió conocer más acerca del problema; e indagar sobre la necesidad de este tipo de proyectos, de tal manera que inicialmente se buscó toda la información bibliográfica de primera y segunda fuente, a partir de centros de investigación y otros medios de información; para también estudiar el funcionamiento del banco de pruebas y así desarrollar el software para el laboratorio virtual.

### **3.4.2. Estudiar el funcionamiento del banco de pruebas de transferencia de calor por conducción.**

Se realiza un estudio detallado del funcionamiento del banco de ensayo de transferencia de calor por conducción, en el que definirán cada una de sus partes y su funcionamiento tanto individual como colectivo, a fin de generar un programa computacional ilustrativo que defina cada uno de los elementos presentes en el banco



de ensayo y que demuestre de una forma didáctica el funcionamiento y los fenómenos presentes en cada uno de los ensayos.

Este banco de ensayo conocido con el nombre de “medidor de conductividad térmica” está estructurado mediante un arreglo lineal, que consiste en aplicar un flujo de calor constante a lo largo de una barra (probeta) de sección circular constante desde una fuente de calor eléctrica regulable, esta genera una cantidad de calor ( $I \cdot V$ ), donde  $I$  y  $V$  son la intensidad de corriente y la caída de tensión aplicada respectivamente. Las mediciones de la temperatura se efectúan a lo largo de la probeta mediante la utilización de termopares, considerando que la toma de temperatura se efectúa a una distancia determinada para así valorizar la conductividad térmica para diferentes gradientes de temperatura. La ecuación 2.6 utilizada en este arreglo viene dada según la Ley de Fourier (transferencia de calor por conducción en régimen estacionario y flujo unidireccional).

Siendo esta una probeta cilíndrica de sección constante, en donde la transferencia de calor va en dirección normal a la sección transversal de la probeta ( $Area = constante = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ ); entonces se plantea el problema como de pared plana tomando en cuenta el sentido del flujo de calor, según la ecuación 3.1.

$$q_{cond} = k \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{L} \quad (3.1)$$

Ahora bien sabiendo que  $q_{cond} = I \cdot V$  y despejando la conductividad térmica, la ecuación para determinar la conductividad térmica:

$$k = \frac{4 \cdot L \cdot I \cdot V}{\pi \cdot d^2 \cdot (T_1 - T_2)} \quad (3.2)$$

Con la ecuación 3.2 se determina la conductividad térmica de forma experimental, ya que todas sus variables son obtenidas con el banco de ensayo y con las dimensiones de la probeta utilizada.

### **3.4.3. Desarrollo de los algoritmos de cálculo.**

Se realiza el desarrollo de los distintos algoritmos a partir de los modelos teóricos, los cuales se van a complementar con los resultados obtenidos en el banco de ensayo y así generar los resultados provenientes del estudio experimental, a fin de comparar los valores involucrados con sus homólogos los teóricos. Para ello se consideran los objetivos de cada uno de los ensayos planteados y a partir de ellos se establecen los objetivos de la programación, estos se relacionan directamente con los requerimientos del usuario para alcanzar los objetivos de dichos ensayos experimentales.

#### **3.4.3.1 Medidor de conductividad térmica**

Con la deducción obtenida anteriormente en la que se determina la conductividad térmica obtenida experimentalmente (ecuación 3.2), con la misma se desarrolla el algoritmo de cálculo y se representa mediante el diagrama de flujo mostrado en la figura 4.17.

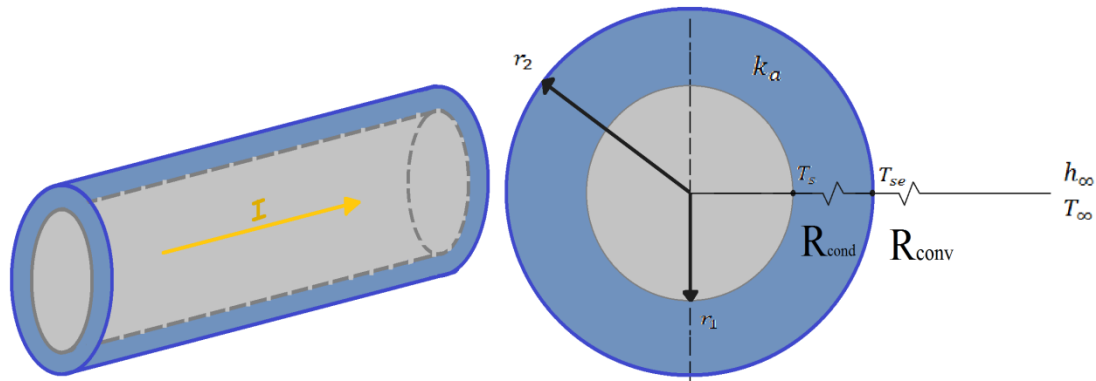
#### **3.4.3.2 Radio critico de aislamiento**

Para profundizar el estudio practico de la transferencia de calor por conducción, se agregó un módulo adicional llamando “Radio critico de aislamiento” con el que se pretende proporcionar una herramienta de calculo que contribuya con el aprendizaje del estudiante, mostrando la aplicación real que tiene este tema, por lo que se plantean criterios de diseño necesarios para lograr los objetivos de una determinada aplicación. Las principales aplicaciones de radio crítico de aislamiento son para “Un

Conductor Eléctrico”, para “Tubería con Fluido Caliente” y “Tubería con Fluido Frio”.

#### 3.4.3.2.1 Para un conductor eléctrico

Para generar el algoritmo respectivo en el caso de conductor eléctrico, inicialmente se define el circuito térmico (figura 3.1) de donde nacen las ecuaciones de cálculo y de ahí buscar el radio crítico mínimo que permita la mayor disipación de calor pero con un aislante necesario para evitar contactos externos que ocasionen inconvenientes de diversos tipos.



**Figura 3.1:** Circuito Térmico para un conductor eléctrico

Como el conductor está sometido a una carga eléctrica, ésta se iguala teóricamente a una carga calórica  $q_{total}$ , tomando en cuenta que la carga calórica total es igual a la carga por conducción que pasa por el aislante, así como también a la de convección al salir al ambiente como se muestra en la figura 3.1. La ecuación sería de la siguiente manera:

$$q_{total} = q_{cond} = q_{conv} \quad (3.3)$$

Siguiendo con el desarrollo el calor también se puede expresar como:

$$q_{total} = \frac{\Delta T}{R_{total}} \quad (3.4)$$

$$q_{total} = \frac{(T_s - T_\infty)}{R_{cond} + R_{conv}} \quad (3.5)$$

$$q_{total} = \frac{(T_s - T_\infty)}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_a L} + \frac{k_a}{2\pi L r_2 h_\infty}} \quad (3.6)$$

$$q_{total} = \frac{2\pi k_a L (\Delta T)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{k_a}{r_2 h_\infty}} \quad (3.7)$$

De la ecuación 3.7 se sabe ahora que la tasa de transferencia de calor es una función de  $r_2$  tal que  $q_{total} = f(r_2)$  entonces como la función ya considera una resistencia conductiva la cual debido al aislante, ahora derivando e igualando a cero para determinar el punto crítico cuando el flujo de calor es máximo y de ahí despejando el valor de  $r_2$  que vendría siendo el radio crítico, de la siguiente manera:

$$\frac{dq_{total}}{dr_2} = \left[ \frac{1}{r_2} - \frac{k_a}{r_2^2 h_\infty} \right] = 0 \quad (3.8)$$

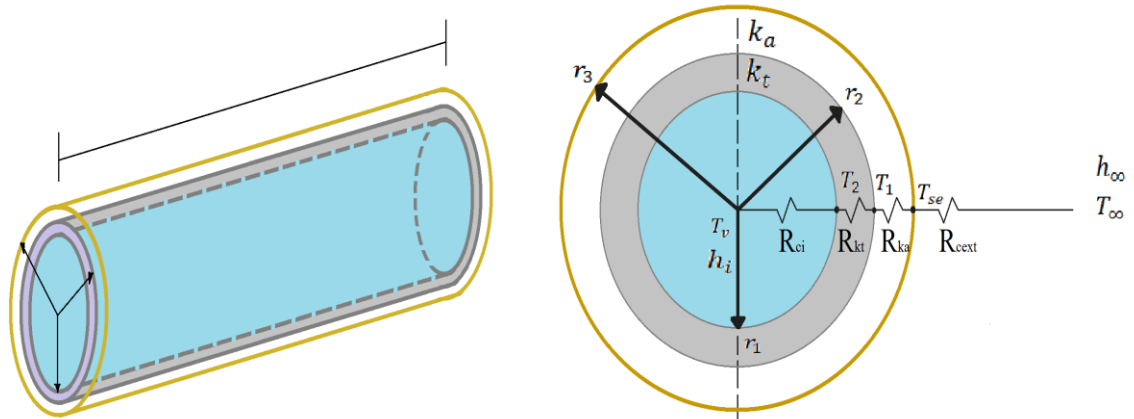
$$\frac{1}{r_2} = \frac{k_a}{r_2^2 h_\infty} \quad (3.9)$$

$$r_2 = r_{critico} = \frac{k_a}{h_{\infty}} \quad (3.10)$$

Ahora bien con esta deducción se desarrolla el algoritmo de cálculo y se representa mediante el diagrama de flujo mostrado en la figura 4.18.

### 3.4.3.2 Para una tubería con fluido caliente

Para generar el algoritmo respectivo en el caso de una tubería con fluido caliente se define el circuito térmico (figura 3.2) de donde nacen las ecuaciones de cálculo y de ahí buscar el radio crítico mínimo que mantenga la superficie del aislante a una temperatura adecuada, esto para evitar lesiones de contacto ya que la tubería podría estar expuesta en un entorno laboral.



**Figura 3.2:** Circuito Térmico para una tubería con fluido caliente.

Sabiendo que el flujo de calor va de mayor a menor temperatura, entonces el flujo de calor constante va desde el interior de la tubería hacia el exterior, por lo que ahora es conveniente plantear dos ecuaciones de flujo de calor para así poder determinar el valor de  $r_3$  que vendría siendo el radio crítico mínimo para mantener la

superficie del aislante a una temperatura (40°C precargada inicialmente aunque es modificable) adecuada.

$$Tv - Tse = q_{total}(R_{ci} + R_{kt} + R_{ka}) \quad (3.11)$$

$$Tse - T_{\infty} = q_{total}(R_{cext}) \quad (3.12)$$

Despejando  $q_{total}$  e igualando las ecuaciones (3.11) y (3.12) se genera la siguiente ecuación:

$$\left( \frac{Tv - Tse}{R_{ci} + R_{kt} + R_{ka}} \right) = \frac{(Tse - T_{\infty})}{(R_{cext})} \quad (3.13)$$

$$\left( \frac{Tv - Tse}{Tse - T_{\infty}} \right) = \frac{(R_{ci} + R_{kt} + R_{ka})}{(R_{cext})} \quad (3.14)$$

$$\left( \frac{Tv - Tse}{Tse - T_{\infty}} \right) = \frac{(R_{ci} + R_{kt} + R_{ka})}{(R_{cext})} \quad (3.15)$$

Donde  $R_{ka} = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi k_a L}$ ,  $R_{kt} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_t L}$ ,  $R_{ci} = \frac{1}{A_i h_i}$ ,  $R_{cext} = \frac{1}{A_e h_{\infty}}$

Siendo  $A_e = 2\pi r_3 L$  y  $A_i = 2\pi r_1 L$ , sustituyendo y simplificando:

$$\left( \frac{Tv - Tse}{Tse - T_{\infty}} \right) = A_e h_{\infty} \left( \frac{1}{A_i h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_t L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi k_a L} \right) \quad (3.16)$$

$$\left(\frac{T_v - T_{se}}{T_{se} - T_\infty}\right) = 2\pi r_3 L h_\infty \left( \frac{1}{2\pi r_1 L h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_t L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi k_a L} \right) \quad (3.17)$$

$$\left(\frac{T_v - T_{se}}{T_{se} - T_\infty}\right) = r_3 h_\infty \left( \frac{1}{r_1 h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_t} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{k_a} \right) \quad (3.18)$$

Como se muestra en la ecuación 3.18 el radio crítico ( $r_3$ ) no se puede despejar de simple forma, por lo que es conveniente utilizar el método de Método de Newton-Raphson de iteraciones sucesivas y aproximar al máximo hasta valor de  $r_3$  para obtener la solución. Tal como dice el método se aproxima a la solución de una ecuación del tipo  $f(x) = 0$ . Entonces:

$$0 = r_3 h_\infty \left( \frac{1}{r_1 h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_t} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{k_a} \right) - \left( \frac{T_v - T_{se}}{T_{se} - T_\infty} \right) \quad (3.19)$$

$$f(x) = x h_\infty \left( \frac{1}{r_1 h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_t} + \frac{\ln\left(\frac{x}{r_2}\right)}{k_a} \right) - \left( \frac{T_v - T_{se}}{T_{se} - T_\infty} \right) \quad (3.20)$$

Partiendo de una estimación inicial de la solución  $x_0$  y construyendo una sucesión de aproximaciones de forma recurrente mediante la fórmula (2.42).

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x)}{f'(x)} \quad (2.42)$$

Esta estimación inicial es un valor aproximadamente cercano a  $r_3$  por lo que es prudente partir entonces con el valor de  $r_2$ , tal que  $x_0 = r_2$ .

Derivando  $f(x)$  queda entonces  $\dot{f}(x)$  igual a:

$$\hat{f}(x) = h_{\infty} \left( \frac{1}{r_1 h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_t} + \frac{1}{k_a} [\ln(x) - \ln(r_2) + 1] \right) \quad (3.21)$$

Entonces se realiza con la fórmula genérica para la sucesión, la sucesión mostrada para ecuación 3.22 se hace hasta un número de veces aproximado que entregue al menos cuatro decimales de precisión.

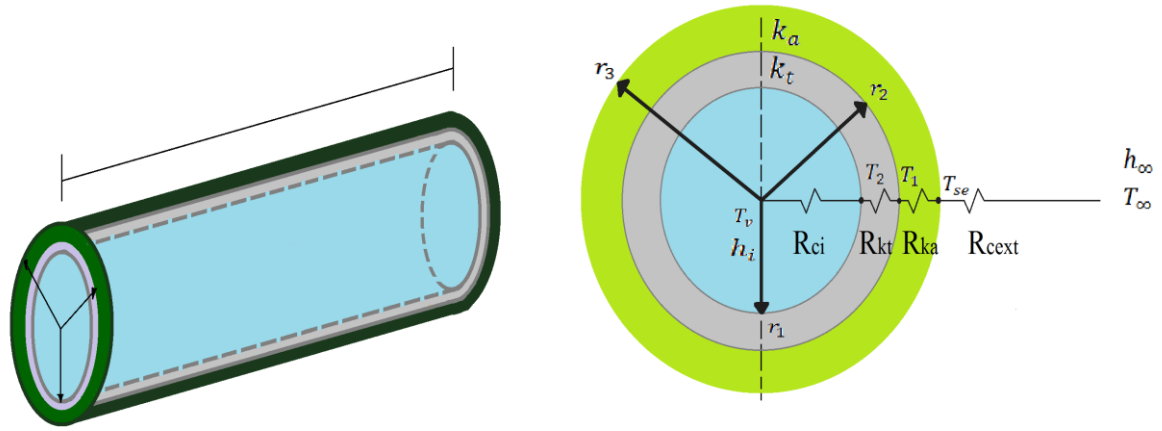
$$X_{n+1} = X_n - \frac{X_n \cdot h_{\infty} \left[ \frac{1}{r_1 \cdot h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{Kt} + \frac{\ln\left(\frac{X_n}{r_2}\right)}{Ka} \right] - \left( \frac{T_v - T_{se}}{T_{se} - T_{\infty}} \right)}{h_{\infty} \left[ \frac{1}{r_1 \cdot h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{Kt} + \frac{1}{Ka} (\ln(X_n) - \ln(r_2) + 1) \right]} \quad (3.22)$$

Ahora bien mediante esta deducción se desarrolla el algoritmo de cálculo y se representa mediante el diagrama de flujo mostrado en la figura 4.19.

#### 3.4.3.3 Para una tubería con fluido frío

Para generar el algoritmo respectivo en el caso de una tubería con fluido caliente se define el circuito térmico (figura 3.3) de donde nacen las ecuaciones de cálculo y de ahí buscar el radio crítico mínimo que mantenga la superficie del aislante a una temperatura adecuada, esto para evitar lesiones de contacto ya que la tubería podría estar expuesta en un entorno laboral.





**Figura 3.3:** Circuito Térmico para una tubería con fluido frío

Sabiendo que el flujo de calor va de mayor a menor temperatura, entonces el flujo de calor constante va desde el exterior hasta el interior de la tubería, por lo que ahora es conveniente plantear dos ecuaciones de flujo de calor para así poder determinar el valor de  $r_3$  que vendría siendo el radio crítico mínimo para mantener la superficie del aislante a una temperatura igual o superior a la temperatura de punto de rocío correspondiente al ambiente presente, y así evitar la condensación del aire en la superficie del aislante.

$$T_{pr} - T_v = q_{total}(R_{ci} + R_{kt} + R_{ka}) \quad (3.23)$$

$$T_{\infty} - T_{pr} = q_{total}(R_{cext}) \quad (3.24)$$

Despejando  $q_{total}$  e igualando las ecuaciones (3.23) y (3.24) se genera la siguiente ecuación:

$$\left( \frac{T_{pr} - T_v}{R_{ci} + R_{kt} + R_{ka}} \right) = \frac{(T_{\infty} - T_{pr})}{(R_{cext})} \quad (3.25)$$

$$\left(\frac{T_{pr}-T_v}{T_{\infty}-T_{pr}}\right) = \frac{(R_{ci}+R_{kt}+R_{ka})}{(R_{cext})} \quad (3.26)$$

$$\left(\frac{T_{pr}-T_v}{T_{\infty}-T_{pr}}\right) = \frac{(R_{ci}+R_{kt}+R_{ka})}{(R_{cext})} \quad (3.27)$$

Donde  $R_{ka} = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi k_a L}$ ,  $R_{kt} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_t L}$ ,  $R_{ci} = \frac{1}{A_i h_i}$ ,  $R_{cext} = \frac{1}{A_e h_{\infty}}$

Siendo  $A_e = 2\pi r_3 L$  y  $A_i = 2\pi r_1 L$ , sustituyendo y simplificando:

$$\left(\frac{T_{pr}-T_v}{T_{\infty}-T_{pr}}\right) = A_e h_{\infty} \left( \frac{1}{A_i h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_t L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi k_a L} \right) \quad (3.28)$$

$$\left(\frac{T_{pr}-T_v}{T_{\infty}-T_{pr}}\right) = 2\pi r_3 L h_{\infty} \left( \frac{1}{2\pi r_1 L h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_t L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi k_a L} \right) \quad (3.29)$$

$$\left(\frac{T_{pr}-T_v}{T_{\infty}-T_{pr}}\right) = r_3 h_{\infty} \left( \frac{1}{r_1 h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_t} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{k_a} \right) \quad (3.30)$$

Como se muestra en la ecuación 3.30 el radio crítico ( $r_3$ ) no se puede despejar de simple forma, por lo que es conveniente utilizar el método de Método de Newton-Raphson de iteraciones sucesivas y aproximar al máximo hasta valor de  $r_3$  para obtener la solución. Tal como dice el método se aproxima a la solución de una ecuación del tipo  $f(x) = 0$ . Entonces:

$$0 = r_3 h_\infty \left( \frac{1}{r_1 h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_t} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{k_a} \right) - \left( \frac{T_{pr} - T_v}{T_\infty - T_{pr}} \right) \quad (3.31)$$

$$f(x) = x h_\infty \left( \frac{1}{r_1 h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_t} + \frac{\ln\left(\frac{x}{r_2}\right)}{k_a} \right) - \left( \frac{T_{pr} - T_v}{T_\infty - T_{pr}} \right) \quad (3.32)$$

Partiendo de una estimación inicial de la solución  $x_0$  y construyendo una sucesión de aproximaciones de forma recurrente mediante la fórmula (2.42).

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x)}{\hat{f}(x)} \quad (2.42)$$

Esta estimación inicial es un valor aproximadamente cercano a  $r_3$  por lo que es prudente partir entonces con el valor de  $r_2$ , tal que  $x_0 = r_2$ .

Derivando  $f(x)$  nos queda entonces  $\hat{f}(x)$  igual a:

$$\hat{f}(x) = h_\infty \left( \frac{1}{r_1 h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_t} + \frac{1}{k_a} [\ln(x) - \ln(r_2) + 1] \right)$$

Entonces se realiza con la siguiente fórmula genérica para la sucesión, esta sucesión se hace hasta un número de veces aproximado que entregue al menos cuatro decimales de precisión.

$$X_{n+1} = X_n - \frac{X_n \cdot h_\infty \left[ \frac{1}{r_1 \cdot h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{Kt} + \frac{\ln\left(\frac{X_n}{r_2}\right)}{Ka} \right] - \left( \frac{T_{pr} - T_v}{T_\infty - T_{pr}} \right)}{h_\infty \left[ \frac{1}{r_1 \cdot h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{Kt} + \frac{1}{Ka} (\ln(X_n) - \ln(r_2) + 1) \right]} \quad (3.33)$$

Ahora bien con esta deducción se desarrolla el algoritmo de cálculo y que se representa mediante el diagrama de flujo mostrado en la figura 4.20.

#### **3.4.4. Codificación de los algoritmos en un lenguaje virtual de programación.**

Consecuentemente se realiza la codificación de los algoritmos desarrollados anteriormente con el lenguaje de programación Java, luego serán asignados según su determinada función en contraste con los elementos que conformarán la interfaz gráfica, permitiendo así finalmente la simulación virtual del banco de ensayo. El lenguaje de programación Java fue seleccionado porque éste opera en diversas plataformas, es decir éste funciona de independientemente del sistema operativo que se tenga instalado en cualquier el equipo donde se pretenda ejecutar el software.

#### **3.4.5. Elaboración de la interfaz gráfica para el usuario.**

En este tramo se busca desarrollar una interfaz gráfica amigable para el usuario y así contribuir con el aprendizaje del mismo, todo con lenguaje de programación usado para elaborar el módulo de cálculo. Para el diseño de esta interfaz se consideran diferentes programas comerciales con el objetivo de realizar un entorno más práctico, dinámico que resulte familiar para el manejo del usuario. La interfaz gráfica se considera como parte física del programa, por lo cual para su diseño es necesario considerar que se trata de un programa destinado al aprendizaje, donde las formas y colores tienen una definida relación con el objetivo del ensayo, desempeñando un rol importante.

#### **3.4.6. Validación de los resultados obtenidos con el programa**

El programa recopilará los datos obtenidos en los ensayos experimentales para simular y reproducir lo acontecido durante estos ensayos, en un tiempo mucho más óptimo para la ilustración de la práctica de laboratorio. Una vez reproducido el

ensayo; el programa utiliza cierta información del mismo y el usuario tendrá la oportunidad de extraer esa información de acuerdo a su criterio (basado en la teoría aprendida) y complementará los campos requeridos en el programa y éste a su vez determinar la conductividad térmica obtenida de un determinado material utilizado en el ensayo realizado.

#### **3.4.7. Elaboración del manual del usuario.**

Adicionalmente se llevará a cabo la realización de un manual de usuario para así aportar toda la información necesaria acerca del funcionamiento del software, en cada una de sus etapas y los procedimientos necesarios para realizar la práctica de laboratorio. Este manual estará a la mano del profesor o ilustrador que lleve a cabo el ensayo realizado.

### **3.5. Factibilidad del Proyecto.** *Recursos necesarios para la elaboración del programa computarizado.*

Esta parte también evidencia la necesidad de este tipo de proyectos y su factibilidad.

#### **3.5.1. Recursos materiales.**

- Un computador.
- Bibliografía relacionada.
- Manuales Técnicos de los equipos.

#### **3.5.2. Recursos humanos.**

- Autores del presente trabajo.
- Tutor académico.
- Asesor técnico de programación

## **CAPITULO IV**

### **DESARROLLO DEL TRABAJO**

En este capítulo se detallan todas las etapas y procedimientos que permitieron desarrollar del laboratorio virtual de transferencia de calor por conducción, esto incluye una descripción de cada una de las ventanas que constituyen el programa y los procedimientos utilizados; tales como el desarrollo de las ecuaciones características con las que se generaron los algoritmos de la programación, los ensayos realizados para el mismo.

#### **4.1. Identificación del banco de ensayo.**

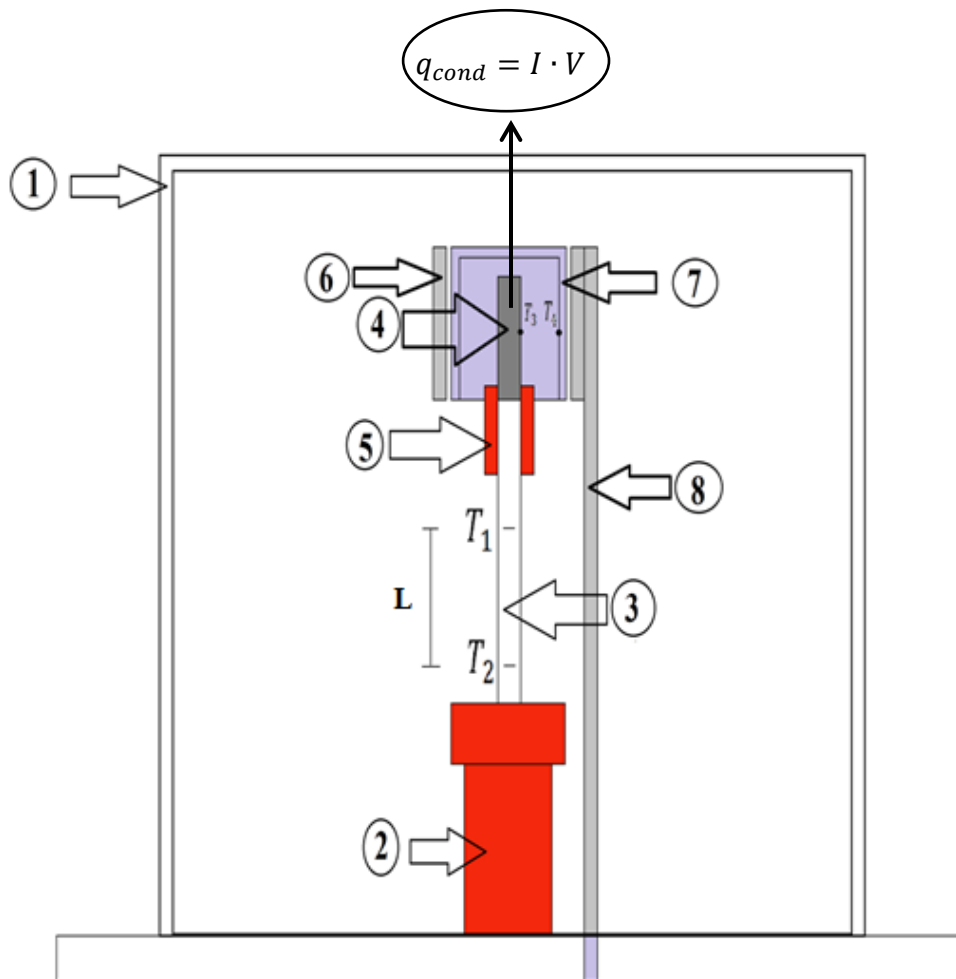
A continuación se exponen las descripciones respectivas al banco de ensayo seleccionado, este será el modelo para la creación de las experiencias presentadas en los módulos respectivos del programa.

##### **4.1.1. Descripción del banco de ensayo.**

El banco de ensayo seleccionado según lo sugerido por la cátedra de Transferencia de Calor de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo es:

##### **Medidor de Conductividad Térmica:**

Este banco de ensayo del Laboratorio de Transferencia de Calor tiene la finalidad de medir la conductividad térmica de probetas cilíndricas de determinadas dimensiones. A continuación se muestra un esquema en la figura 4.1 donde se puede apreciar en detalle el montaje utilizado en banco de ensayo.



**Figura 4. 1:** Esquema del montaje

El banco de ensayo consta de las siguientes partes:

- 1) **Recinto de lámina acrílica con su base;** evita la absorción de aire al realizar el vacío interno, donde alberga el montaje del ensayo (Figura 4.1: Esquema del montaje).
- 2) **Portamuestra;** fabricado en cobre con el que se aprovecha su alta conductividad y buscando garantizar la tasa de transferencia de calor en dirección axial. Posee también un sistema de agarre regulable y así

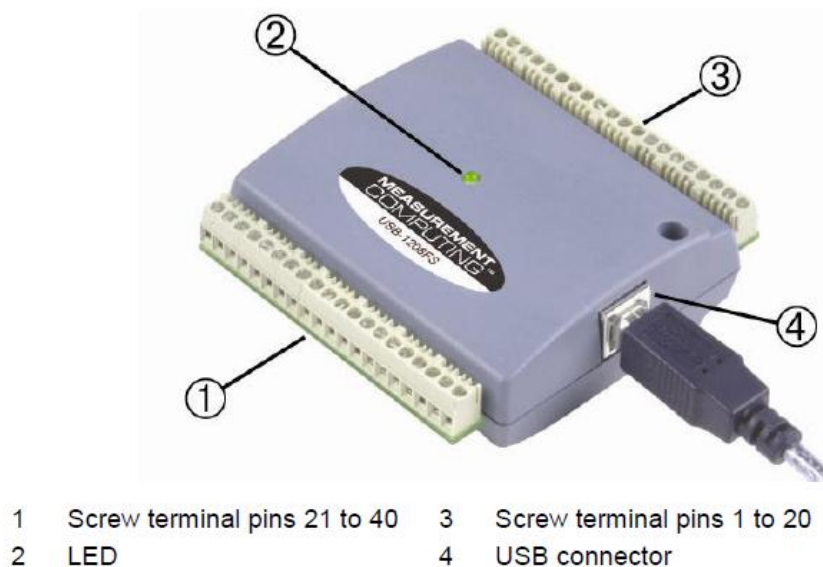
mantiene un perfil de temperatura constante al contacto entre ambas. El porta muestra está fijado a la base proporcionando un montaje bastante rígido.

- 3) **La muestra;** del material a estudiar, soporta un rango de dimensiones establecidas; para materiales metálicos diámetros de 1 cm y longitud entre 2 y 10 cm. Esta se coloca en el portamuestras a través de un sistema de agarre.
- 4) **Resistencia tipo cartucho;** esta es la que genera el calor ( $q_{\text{cond}} = I \cdot V$ ) necesario para realizar las mediciones en distintos materiales, es una fuente que proporciona calor constante y es posible regular dicha intensidad.
- 5) **Pieza de unión;** ella mantiene el contacto entre la probeta a estudiar y la resistencia tipo cartucho, está hecha de un material de cobre a fin de aprovechar su alta conductividad y mantener el flujo de calor en dirección axial.
- 6) **Resistencia tipo abrazadera;** transmite un flujo de calor constante y regulable a una pantalla de aluminio con la finalidad de igualar la temperatura de la pantalla con la de la resistencia tipo cartucho y así disminuir las pérdidas por radiación.
- 7) **Pantalla de aluminio;** se encuentra alrededor de la **resistencia tipo cartucho**, dicha pantalla está sujeta a una **resistencia tipo abrazadera** esta a su vez transmite un flujo de calor constante y regulable a la pantalla de aluminio con la finalidad de igualar la temperatura de la pantalla con la de la resistencia tipo cartucho y así disminuir las pérdidas por radiación.



- 8) **Seguidor;** es el que sostiene la pantalla de aluminio y la resistencia tipo abrazadera sobre la resistencia tipo cartucho, también es posible regular la altura a fin de cubrir la resistencia tipo cartucho.
- 9) **Termocuplas;** estas son las que miden la temperatura en todos los puntos de interés, ya sean sobre la probeta a una distancia establecida, en la pantalla de aluminio y en la resistencia tipo cartucho.
- 10) **Bomba de vacío;** que genera la presión vacuométrica necesaria para que el coeficiente convectivo dentro del recinto sea  $h \cong 0$ , esta presión debe ser al menos 26 inHg y es necesario dejar la bomba encendida para que esta no pierda esta presión. La bomba encendida durante todo el ensayo mantiene una presión mínima de 27 inHg. Esta presión es leída por un vacuometro anexo a la tubería que va desde la bomba a la cámara de vacío.
- 11) **Reguladores de voltaje;** con los cuales se regula la potencia eléctrica que es administrada tanto para la resistencia tipo cartucho como para la resistencia tipo abrazadera, esta potencia eléctrica es equivalente a la calórica del sistema en ambas resistencias, son reguladas independientemente y esta regulación depende de la diferencia de temperatura entre la resistencia tipo cartucho y la pantalla de aluminio (calentada por la resistencia tipo abrazadera).
- 12) **Instrumentos de medición;** así como existe un vacuometro para medir la presión de vacío dentro del recinto acrílico o la cámara de vacío, también existen dos voltímetros que miden el voltaje aplicado tanto para la

resistencia tipo cartucho como para la resistencia tipo abrazadera, un amperímetro que mide la intensidad de corriente eléctrica que pasa por la resistencia tipo cartucho, con la corriente eléctrica y con el voltaje es calculada la potencia aplicada al sistema (calor aplicado a la probeta). Por otra parte los termopares del sistema entregan sus medidas de temperaturas a un recolector de datos (Figura 4. 2), en este van conectados los terminales de los termopares simultáneamente y en cualesquiera de los 20 terminales del recolector, este toma las medidas de las 4 temperaturas relevantes en el sistema y conectado a un computador vía USB que a través su software (Instacal) muestra en tiempo real estas medidas de temperaturas.



**Figura 4.2:** Recolector de Datos



**Figura 4.3:** Medidor de conductividad térmica.

## 4.2. Diseño de la interfaz gráfica del programa.

### 4.2.1. Presentación del programa.

Inicialmente para ejecutar el programa del laboratorio virtual se hace doble clic sobre el enlace del programa, así inicia la debida presentación del mismo, con su respectivo título y autores del programa tal como se muestra en la Figura 4. 4 (Presentación del programa).

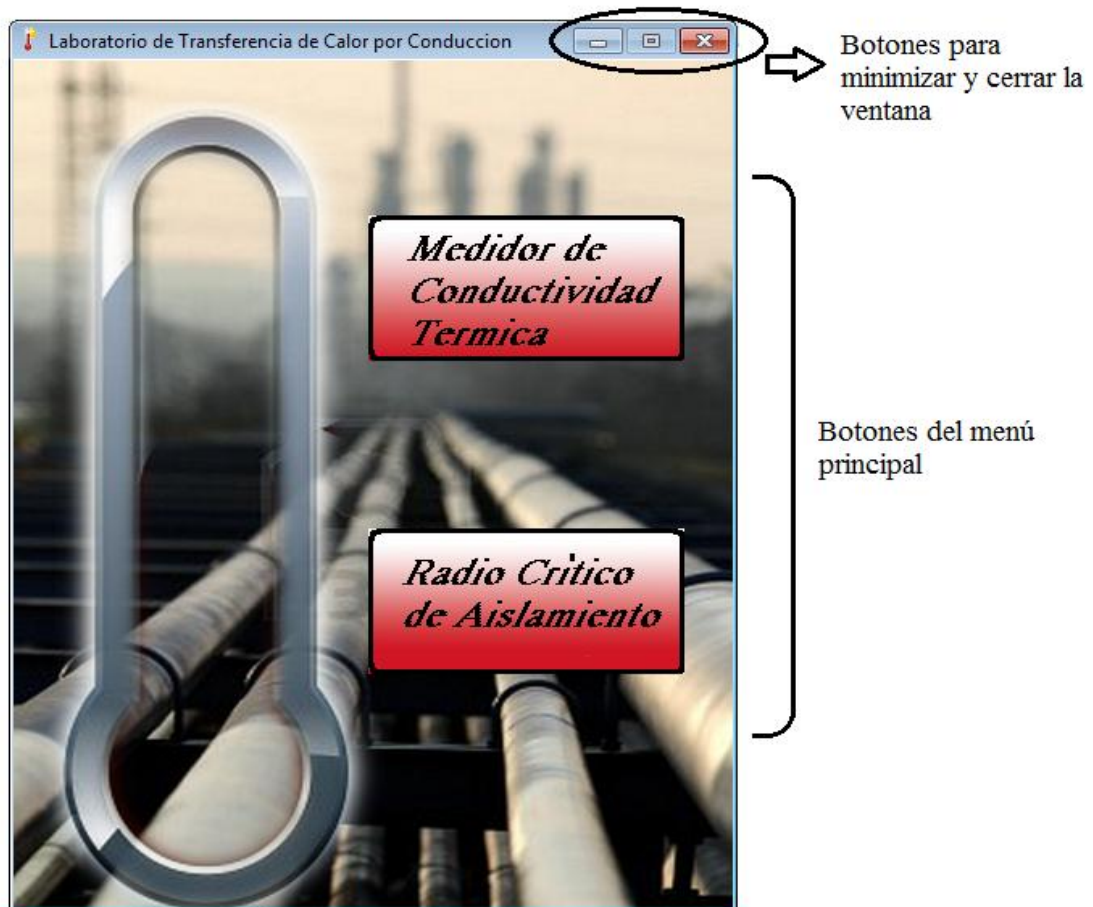


Figura 4. 4: Ventana inicial

### 4.2.2. Menú principal.

El menú principal se encuentra luego de la presentación del programa, en la siguiente figura (Figura 4.5: Ventana inicial del laboratorio virtual de transferencia de calor por conducción) podemos observar cada detalle; los botones clásicos de minimizar y cerrar el programa, el nombre del programa acompañado por el icono del laboratorio virtual, con un fondo que da imagen de la aplicación industrial que tiene la asignatura.

En esta ventana aparecen dos botones para ingresar dentro del banco de ensayo “Medidor de Conductividad Térmica” y otro para ingresar a una herramienta de cálculo adicional del laboratorio de transferencia de calor por conducción conocida como “Radio Crítico de Aislamiento”.



**Figura 4.5:** Ventana inicial del laboratorio virtual de transferencia de calor por conducción

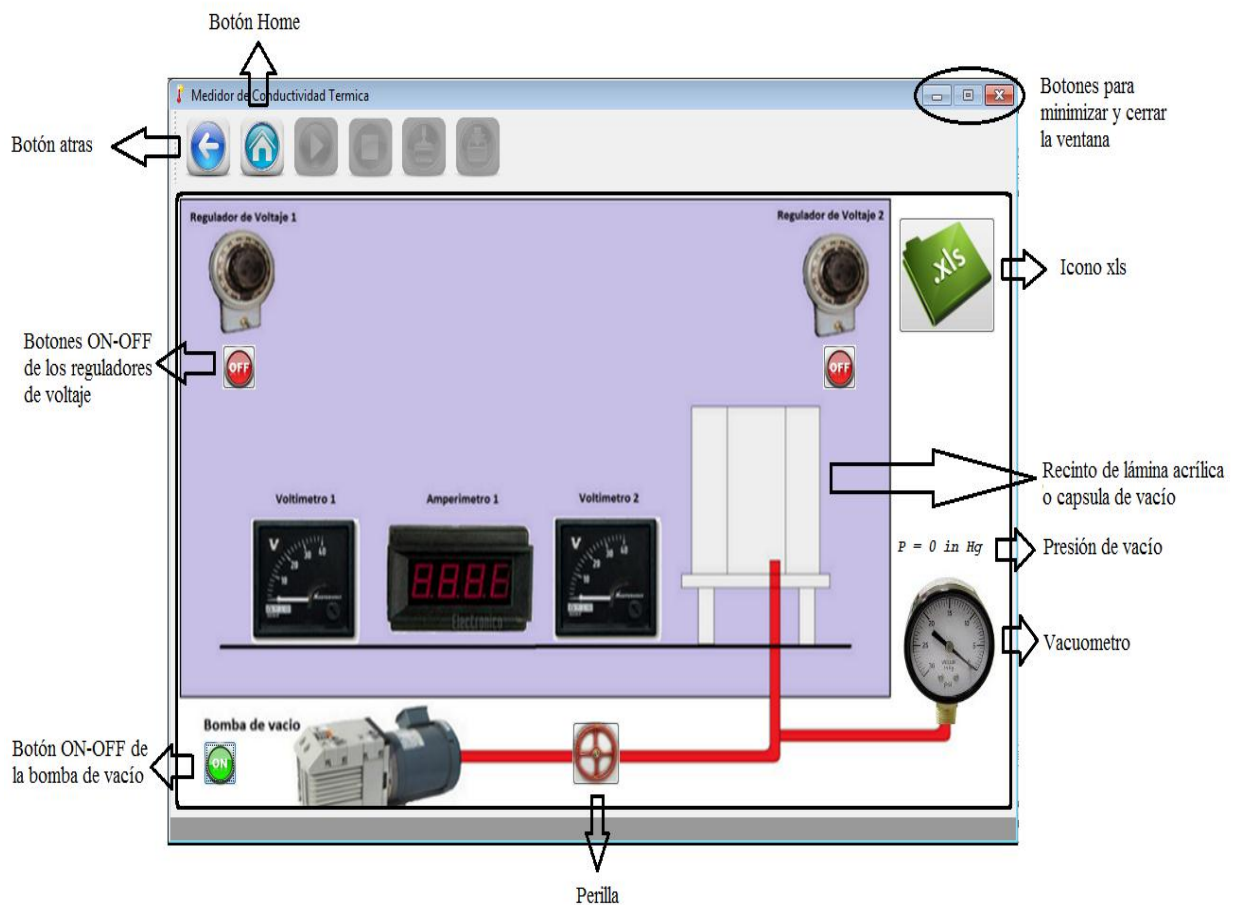
#### 4.2.3. Medidor de Conductividad Térmica.

La interfaz de este módulo, mostrado en la figura 4.6, muestra esquemáticamente cada uno de los elementos que existen en el banco de ensayo real

del laboratorio de transferencia de calor, banco de ensayo conocido como el “Medidor de Conductividad Térmica” antes explicado. Este esquema que basa en una ventana que muestra cada uno de los elementos que conforman el banco de ensayo, en el lugar exacto donde se encuentran en el laboratorio, tanto así que para proceder a realizar un ensayo es necesario realizar el mismo proceso que se necesita en el laboratorio pero de forma virtual en la interfaz del programa.

Los elementos que conforman esta primera interfaz del Medidor de Conductividad Térmica son los que se ven en primera instancia o al primer contacto visual con el banco de ensayo real, con un elemento adicional, dicho elemento esta mostrado en la figura 4.6, estos son:

- Regulador de voltaje 1
- Regulador de voltaje 2
- Voltímetro 1
- Voltímetro 2
- Amperímetro 1
- Bomba de vacío
- Recinto de lámina acrílica o capsula de vacío
- Vacuometro
- Perilla
- Icono xls



**Figura 4.6:** Medidor de conductividad Térmica

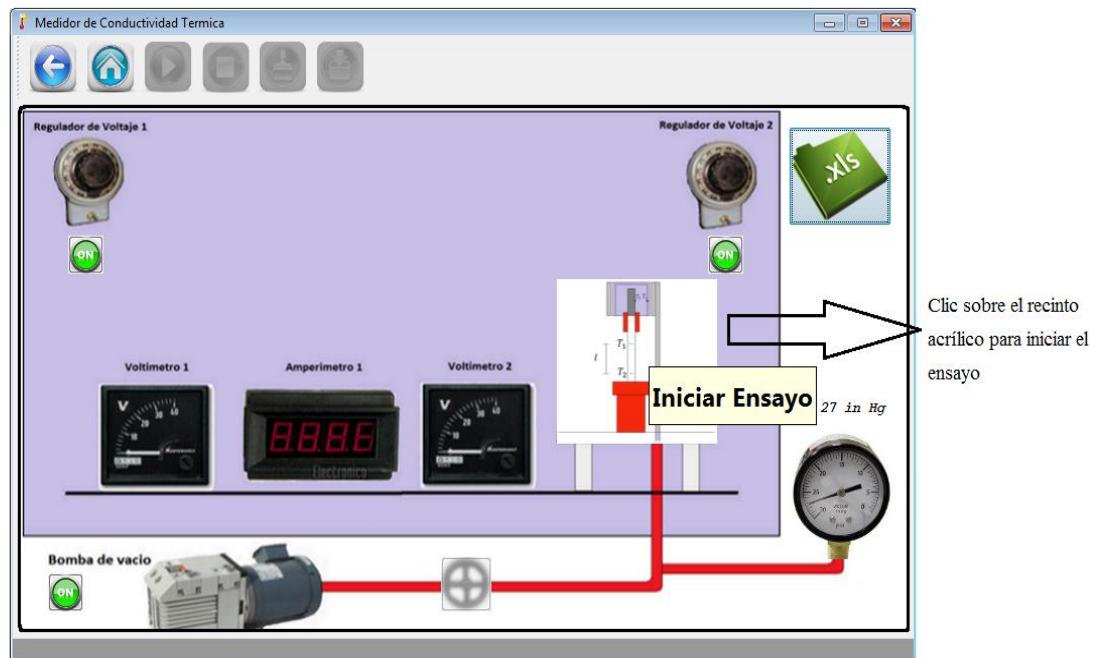
Un elemento adicional incluido en esta primera interfaz del medidor de conductividad térmica (a diferencia de lo existente en el banco de ensayo real), es el “Icono .xls” donde se van a cargar la data de los ensayos realizados en el laboratorio, esta data debe estar guardada en cualquier dirección dentro del computador en un archivo Excel tipo .xls o también llamado archivo Microsoft Excel 97-2003 (.xls). El otro elemento para destacar es la “Perilla” mostrada en la Figura 4.6, esta existe en el banco de ensayo real pero en la interfaz se utiliza para simular el vaciado del recinto acrílico, no como en el laboratorio donde ésta se mantiene abierta en todo el ensayo, esto debido a que al alcanzar la presión deseada para que el coeficiente convectivo



dentro del recinto sea  $h \cong 0$ , esta perilla no se cierra porque durante el ensayo real se pierde la presión deseada ( $P = 26$  in Hg) luego de un corto tiempo; entonces lo que se hace es mantener la bomba encendida y la perilla abierta para no perder la presión de vacío y ella de este modo se mantiene en 27 in Hg durante todo el ensayo, garantizando así que no existan pérdidas de transferencia de calor por convección.

Para iniciar el ensayo es necesario preparar las condiciones necesarias para que el ensayo sea efectivo, es por ello que en esta primera interfaz del medidor de conductividad térmica se enfoca de esta manera. Inicialmente es necesario dar clic al botón de encendido de la bomba de tal forma que este en “ON” , luego se gira la perilla con sólo arrastrar el director del mouse sobre el icono de la perilla simulando como si esta se estuviese abriendo, al mismo tiempo el vacuometro empieza a dar su medida de presión, y ésta hay que llevarla hasta los 27 in Hg de presión vacuométrica, entonces se encienden ambos reguladores de voltaje sin importar el orden, y ahora se puede dar clic al botón del icono .xls y cargar la data de un determinado material, al realizar esto se muestra en la ventana la señal de “Iniciar Ensayo” tal como se muestra en la figura 4.7. Haciendo clic en la bóveda de vacío para continuar.





**Figura 4.7:** Señal para iniciar el ensayo en el Medidor de conductividad Térmica

En la segunda interfaz gráfica se muestra esquemáticamente en montaje de la probeta dentro del recinto acrílico. Inicialmente en la ventana sale la cargada con la data del ensayo seleccionado tal como en la figura 4.8, luego se arrastra la tabla con el cursor del mouse hacia abajo de tal forma que la ventana se vea como la figura 4.9.

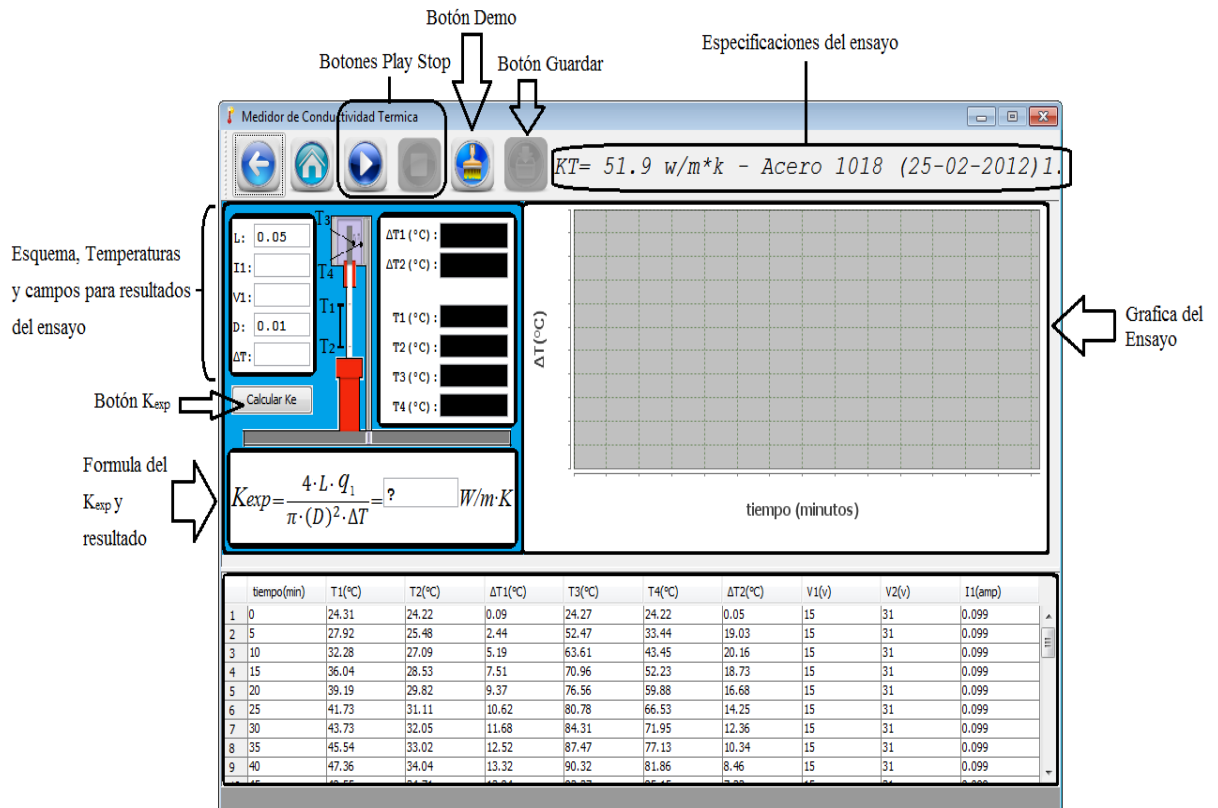
Medidor de Conductividad Térmica

$KT = 51.9 \text{ w/m} \cdot \text{k} - \text{Acero 1018 (25-02-2012) 1.}$

|    | tiempo(min) | T1(°C) | T2(°C) | $\Delta T1(°C)$ | T3(°C) | T4(°C) | $\Delta T2(°C)$ | V1 | V2(v) | I1(amp) |
|----|-------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|-----------------|----|-------|---------|
| 1  | 0           | 24.31  | 24.22  | 0.09            | 24.27  | 24.22  | 0.05            | 15 | 31    | 0.099   |
| 2  | 5           | 27.92  | 25.48  | 2.44            | 52.47  | 33.44  | 19.03           | 15 | 31    | 0.099   |
| 3  | 10          | 32.28  | 27.09  | 5.19            | 63.61  | 43.45  | 20.16           | 15 | 31    | 0.099   |
| 4  | 15          | 36.04  | 28.53  | 7.51            | 70.96  | 52.23  | 18.73           | 15 | 31    | 0.099   |
| 5  | 20          | 39.19  | 29.82  | 9.37            | 76.56  | 59.88  | 16.68           | 15 | 31    | 0.099   |
| 6  | 25          | 41.73  | 31.11  | 10.62           | 80.78  | 66.53  | 14.25           | 15 | 31    | 0.099   |
| 7  | 30          | 43.73  | 32.05  | 11.68           | 84.31  | 71.95  | 12.36           | 15 | 31    | 0.099   |
| 8  | 35          | 45.54  | 33.02  | 12.52           | 87.47  | 77.13  | 10.34           | 15 | 31    | 0.099   |
| 9  | 40          | 47.36  | 34.04  | 13.32           | 90.32  | 81.86  | 8.46            | 15 | 31    | 0.099   |
| 10 | 45          | 48.55  | 34.71  | 13.84           | 92.37  | 85.15  | 7.22            | 15 | 31    | 0.099   |
| 11 | 50          | 49.73  | 35.39  | 14.34           | 94.42  | 88.33  | 6.09            | 15 | 31    | 0.099   |
| 12 | 55          | 51.02  | 36.26  | 14.76           | 96.22  | 91.37  | 4.85            | 15 | 31    | 0.099   |
| 13 | 60          | 51.99  | 36.87  | 15.12           | 97.92  | 93.73  | 4.19            | 15 | 31    | 0.099   |
| 14 | 65          | 52.89  | 37.46  | 15.43           | 99.25  | 95.82  | 3.43            | 15 | 31    | 0.099   |
| 15 | 70          | 53.88  | 38.19  | 15.69           | 100.43 | 97.88  | 2.55            | 15 | 31    | 0.099   |
| 16 | 75          | 54.56  | 38.66  | 15.9            | 101.48 | 99.32  | 2.16            | 15 | 31    | 0.099   |
| 17 | 80          | 55.29  | 39.22  | 16.07           | 102.32 | 100.73 | 1.59            | 15 | 31    | 0.099   |
| 18 | 85          | 56.01  | 39.87  | 16.14           | 103.08 | 101.92 | 1.16            | 15 | 31    | 0.099   |
| 19 | 90          | 56.53  | 40.23  | 16.3            | 103.85 | 102.95 | 0.9             | 15 | 31    | 0.099   |
| 20 | 95          | 56.99  | 40.63  | 16.36           | 104.56 | 103.65 | 0.91            | 15 | 31    | 0.099   |
| 21 | 100         | 57.63  | 41.21  | 16.42           | 105.27 | 104.62 | 0.65            | 15 | 31    | 0.099   |
| 22 | 105         | 58.08  | 41.54  | 16.54           | 105.88 | 105.31 | 0.57            | 15 | 31    | 0.099   |
| 23 | 110         | 58.51  | 41.91  | 16.6            | 106.43 | 105.87 | 0.56            | 15 | 31    | 0.099   |
| 24 | 115         | 59.07  | 42.43  | 16.64           | 106.96 | 106.64 | 0.32            | 15 | 31    | 0.099   |
| 25 | 120         | 59.49  | 42.77  | 16.72           | 107.34 | 107.11 | 0.23            | 15 | 31    | 0.099   |
| 26 | 125         | 59.86  | 43.13  | 16.73           | 107.98 | 107.55 | 0.43            | 15 | 31    | 0.099   |
| 27 | 130         | 60.05  | 43.33  | 16.72           | 108.17 | 107.71 | 0.46            | 15 | 31    | 0.099   |
| 28 | 135         | 60.48  | 43.74  | 16.74           | 108.28 | 108.17 | 0.11            | 15 | 31    | 0.099   |
| 29 | 140         | 60.78  | 44.04  | 16.74           | 108.64 | 108.44 | 0.2             | 15 | 31    | 0.099   |

Se arrastra la tabla hacia abajo con  
el cursor del mouse

**Figura 4.8:** Medidor de conductividad Térmica (vista inicial)



**Figura 4.9:** Medidor de conductividad Térmica

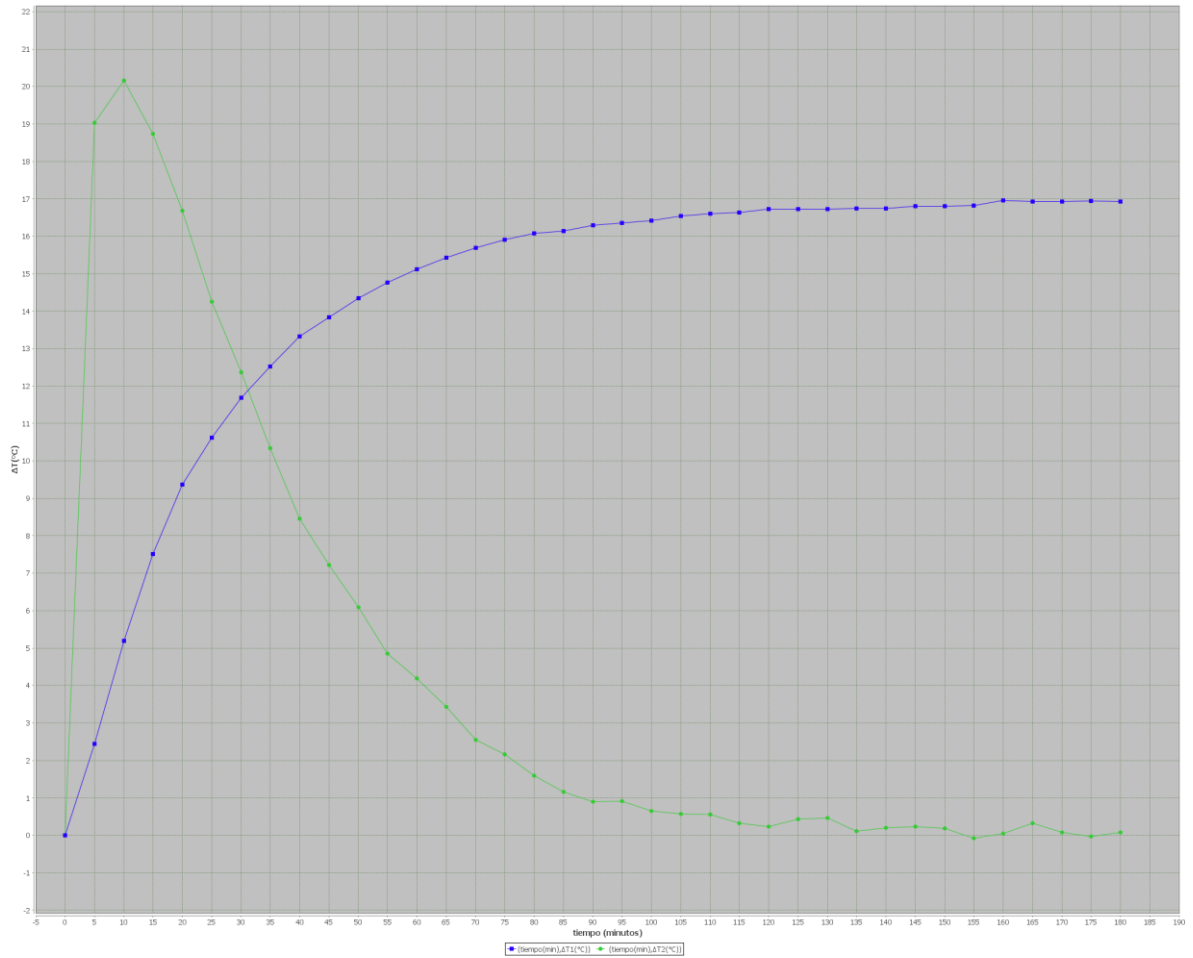
En esta ventana mostrada en la figura 4.9 es donde se reproduce el ensayo con la data antes cargada; esta data contiene los valores de temperaturas en los cuatro puntos principales donde están conectados los termopares en el banco de ensayo real, cabe destacar que estos valores de temperaturas son tomados en intervalos de 5 minutos a lo largo del ensayo real y con estos construye la data del ensayo para un determinado material. La data del ensayo seleccionado contiene datos importantes del ensayo como el tipo de material, la conductividad térmica teórica (Kt) del mismo, la fecha de realización de la data, la longitud entre T1 y T2 (L) y el diámetro de la probeta (D); es por ello que al cargar la data de un determinado material se muestran ya precargados los valores de estas variables (como en la figura 4.9) y para modificarlos se tendría que modificar la data (modificar el archivo .xls).

En esta interfaz gráfica mostrada en la figura 4.9. Se muestran nuevos botones y a continuación se describe su respectiva función:

- Play: Reproduce el ensayo en tiempo real por lo que al activarlo muestra los cambios de temperaturas de los puntos mostrados en el esquema de la figura 4.1; así como los valores de  $\Delta T1$  y  $\Delta T2$  que vienen siendo:  $\Delta T1 = T1 - T2$  y  $\Delta T2 = T3 - T4$ .

Los valores de  $\Delta T1$  y  $\Delta T2$  son los que se grafican, por lo que el ensayo termina cuando se alcance un estado estable de conducción de calor, el cual se logra cuando  $T3 \cong T4$  donde  $\Delta T2 \cong 0$ , así se garantiza una mínima pérdida de calor por radiación entre la resistencia tipo cartucho y la lámina de aluminio.

- Demo: Reproduce el ensayo
- Stop: Detiene ensayo en cualquier momento conservando los valores con los que se detuvo y al presionar el botón Play o Demo luego; se inicia el ensayo nuevamente el ensayo.
- Guardar: Este almacena la gráfica resultante con formato imagen .png en cualquier dirección del ordenador con una resolución (figura 4.10) mayor a la que aparece en la interfaz gráfica del programa para así leer con mayor precisión el valor de  $\Delta T1$  una vez alcanzadas las condiciones de flujo de calor en estado estable.

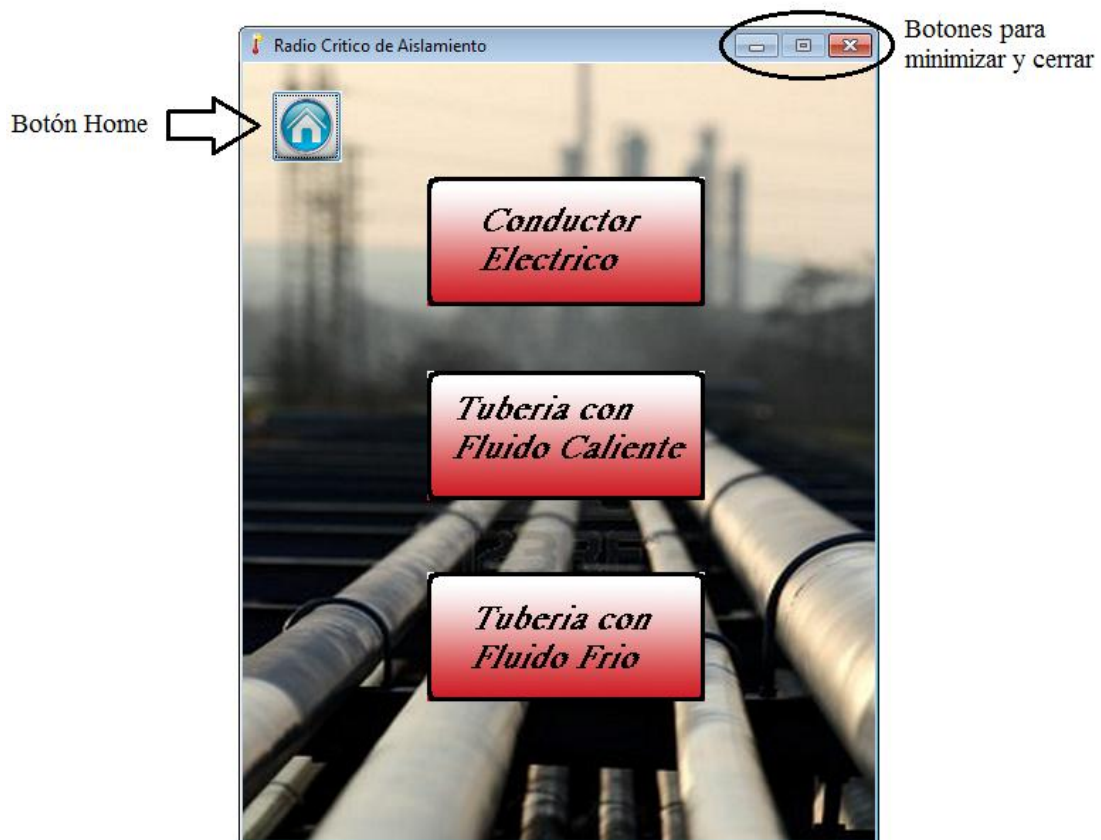


**Figura 4.10:** Grafica resultante del ensayo

- *Kexp*: con los resultados del ensayo se llenan los campos de las variables que determinan la conductividad térmica según la ecuación 3.2, también mostrada en la interfaz gráfica (figura 4.9). al llenar los campos de las variables de presiona el botón *Kexp* y el programa determina el valor de la conductividad térmica obtenida experimentalmente con la ecuación 3.2.

#### 4.2.4. Radio Crítico de Aislamiento.

La interfaz de este módulo llamado “Radio Crítico de Aislamiento” se muestra en la siguiente figura 4.11. El radio crítico de aislamiento se considera como una aplicación de la materia transferencia de calor que se utiliza para determinar solo la cantidad necesaria de un material aislante, ya sea en cuanto al espesor o dependiendo de la aplicación en la que se aplique este criterio. Es por ello que esta interfaz viene siendo una herramienta de cálculo para determinar un radio crítico de aislamiento basado en tres de las principales aplicaciones de radio crítico, las cuales vienen dadas según su determinado criterio en particular; estas son para “Un Conductor Eléctrico”, para “Tubería con Fluido Caliente” y “Tubería con Fluido Frio” tal como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 4.11:** Radio crítico de aislamiento

De igual forma en la interfaz de “Radio Crítico de Aislamiento” se muestran botones clásicos de cerrar y minimizar así como un botón Home que trae de vuelta al menú principal del programa.

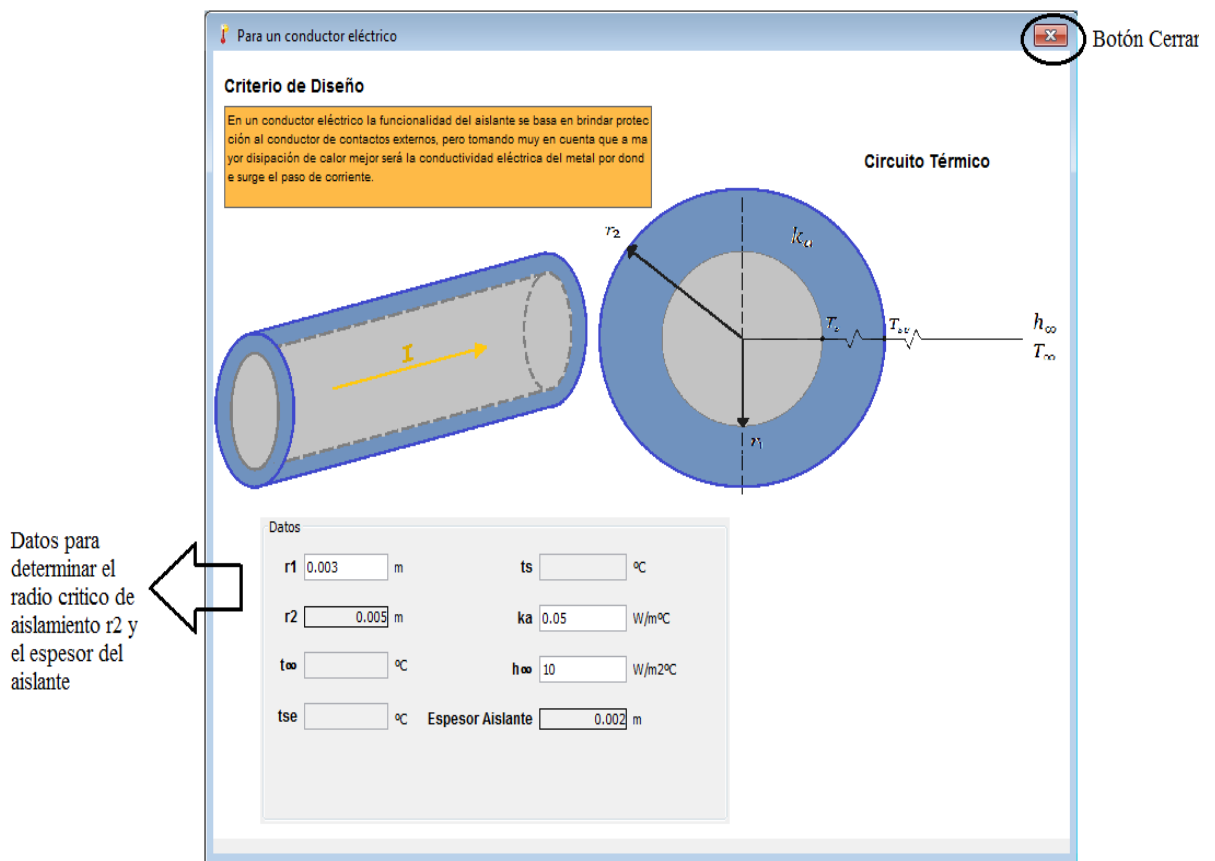
#### **4.2.4.1 Conductor Eléctrico.**

Este módulo se basa en calcular el radio crítico de aislamiento para un conductor eléctrico; es decir el radio crítico que define el espesor de un aislante que recubre conductor eléctrico o cable metálico por donde circula una determinada corriente eléctrica. Esta aplicación parte de un criterio de diseño especificado en la interfaz gráfica mostrada en la figura 4.12.

Criterio de Diseño:

“En un conductor eléctrico la funcionalidad del aislante se basa en brindar protección al conductor de contactos externos, pero tomando muy en cuenta que a mayor disipación de calor mejor será la conductividad eléctrica del metal por donde surge el paso de corriente.”

En la figura 4.12 también se muestra el circuito térmico correspondiente en esta aplicación y los parámetros con los que se calcula el radio crítico que en el caso vendría siendo  $r_2$  y el espesor de aislante la diferencia entre  $r_2$  y  $r_1$ . Dichos parámetros que determinan el radio crítico ( $r_2$ ) y el espesor de aislante son la conductividad térmica del aislante ( $K_a$ ), el coeficiente de transferencia de calor por convección  $h_\infty$  y el radio del conductor eléctrico ( $r_1$ ).



**Figura 4.12:** Radio crítico de aislamiento para un conductor eléctrico.

#### 4.2.4.2 Tubería con Fluido Caliente.

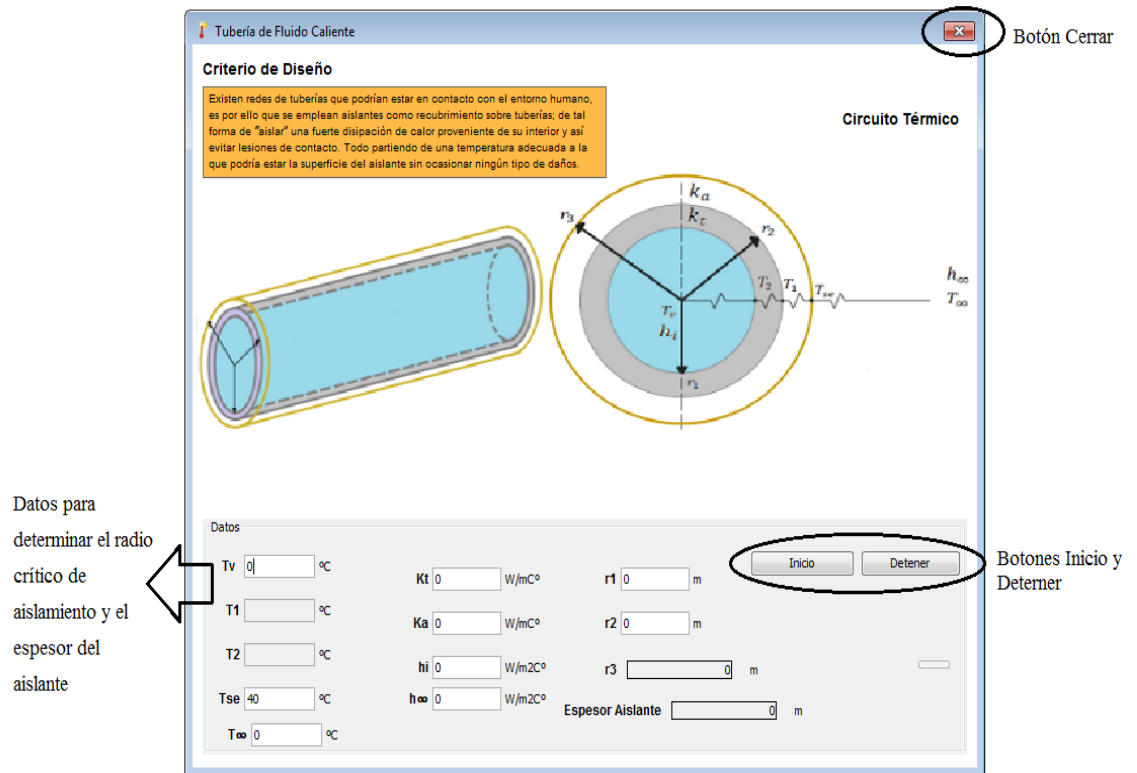
Este módulo se basa en calcular el radio crítico de aislamiento para una tubería que maneja fluidos a altas temperaturas; es decir el radio critico que define el espesor de un aislante que recubre la superficie de una tubería cuando esta maneja fluidos a altas temperaturas. Esta aplicación parte de un criterio de diseño especificado en la interfaz gráfica mostrada en la figura 4.13.



#### Criterio de Diseño:

“Existen redes de tuberías que podrían estar en contacto con el entorno humano, es por ello que se emplean aislantes como recubrimiento sobre tuberías; de tal forma de “aislar” una fuerte disipación de calor proveniente de su interior y así evitar lesiones de contacto. Todo partiendo de una temperatura adecuada a la que podría estar la superficie del aislante sin ocasionar ningún tipo de daños.”

En la figura 4.13 también se muestra el circuito térmico correspondiente en esta aplicación y los parámetros con los que se calcula el radio crítico, que en el caso vendría siendo  $r_3$  y el espesor de aislante sería la diferencia entre  $r_3$  y  $r_2$ . Dichos parámetros que determinan el radio crítico ( $r_3$ ) y el espesor de aislante son: la conductividades térmicas del aislante ( $K_a$ ) y de la tubería ( $K_t$ ), los coeficientes de transferencia de calor por convección externo ( $h_\infty$ ) e interno ( $h_i$ ), el radio interno ( $r_1$ ) y externo ( $r_2$ ) de la tubería, la temperatura del fluido interno dentro de la tubería ( $T_v$ ), la temperatura de la superficie de la tubería ( $T_{se}$ ) y la temperatura externa del ambiente ( $T_\infty$ ).



**Figura 4.13:** Radio crítico de aislamiento para una tubería con Fluido Caliente

Los botones de inicio y detener son de una simple función. Una vez llenados todos los campos respectivos de cada variable, entonces el botón de “Inicio” calcula el radio crítico de aislamiento ( $r_3$ ) y el espesor del aislante, con el botón “Detener” se vacían todos los campos nuevamente para realizar otro cálculo.

#### 4.2.4.3 Tubería con Fluido Frio.

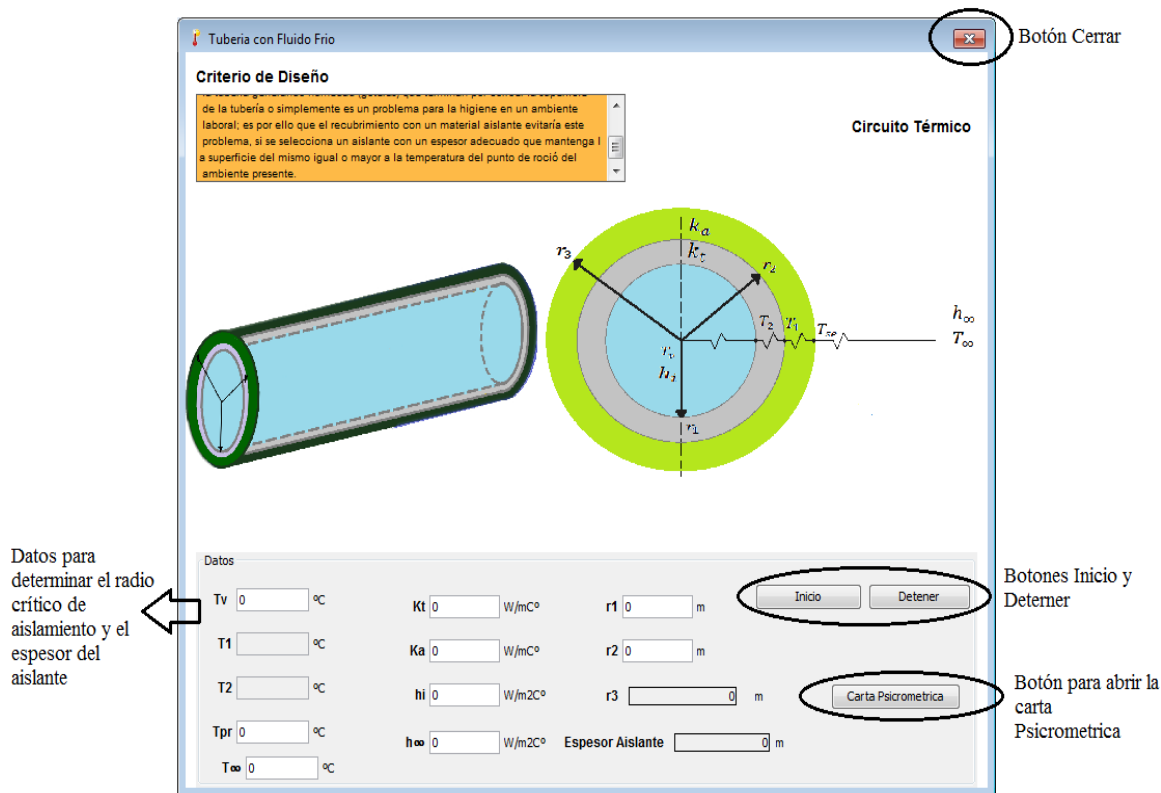
Este módulo se basa en calcular el radio crítico de aislamiento para una tubería que maneja fluidos a bajas temperaturas; es decir el radio crítico que define el espesor de un aislante que recubre la superficie de una tubería cuando esta maneja

fluidos a bajas temperaturas. Esta aplicación parte de un criterio de diseño especificado en la interfaz gráfica mostrada en la figura 4.14.

**Criterio de diseño:**

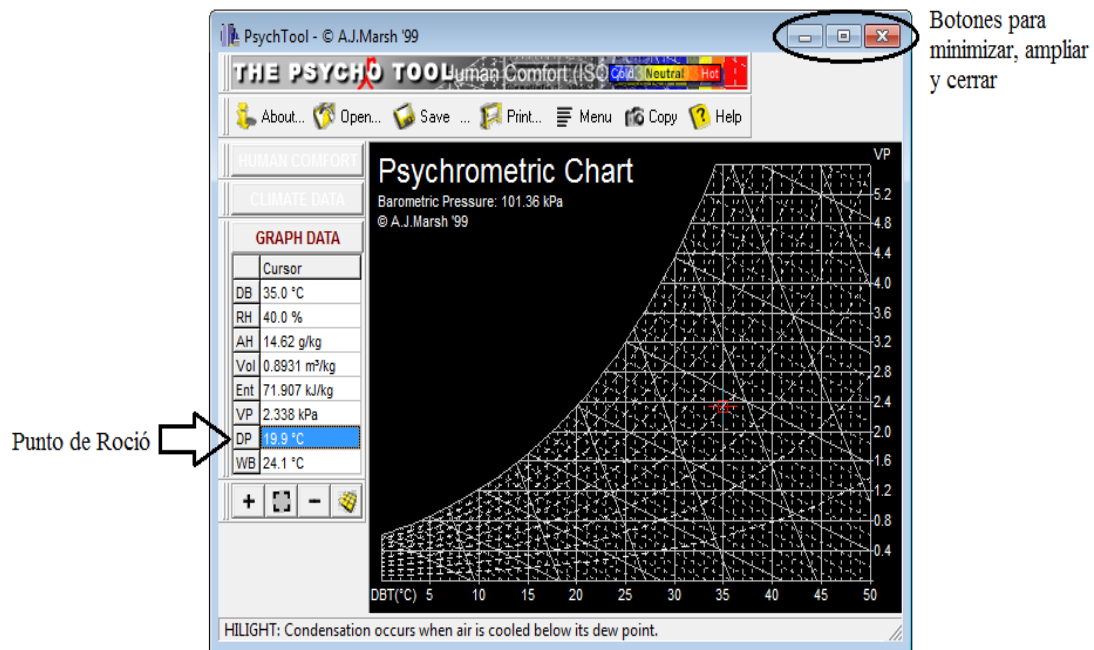
“Existen tuberías presentes en sistemas de refrigeración, acondicionamiento de aire, hasta en procesos industriales que transportan fluidos a muy bajas temperaturas, esto trae como consecuencia la condensación en la superficie de la tubería generando humedad (goteras) que terminan por corroer la superficie de la tubería o simplemente es un problema para la higiene en un ambiente laboral; es por ello que el recubrimiento con un material aislante evitaría este problema, si se selecciona un aislante con un espesor adecuado que mantenga la superficie del mismo igual o mayor a la temperatura del punto de rocío del ambiente presente.”

En la figura 4.14 también se muestra el circuito térmico correspondiente en esta aplicación y los parámetros con los que se calcula el radio crítico, que en el caso vendría siendo  $r_3$  y el espesor de aislante sería la diferencia entre  $r_3$  y  $r_2$ . Dichos parámetros que determinan el radio crítico ( $r_3$ ) y el espesor de aislante son: la conductividades térmicas del aislante ( $K_a$ ) y de la tubería ( $K_t$ ), los coeficientes de transferencia de calor por convección externo ( $h_\infty$ ) e interno ( $h_i$ ), el radio interno ( $r_1$ ) y externo ( $r_2$ ) de la tubería, la temperatura del fluido interno dentro de la tubería ( $T_v$ ), la temperatura de la superficie de la tubería ( $T_{pr}$ ) y la temperatura externa del ambiente ( $T_\infty$ ).



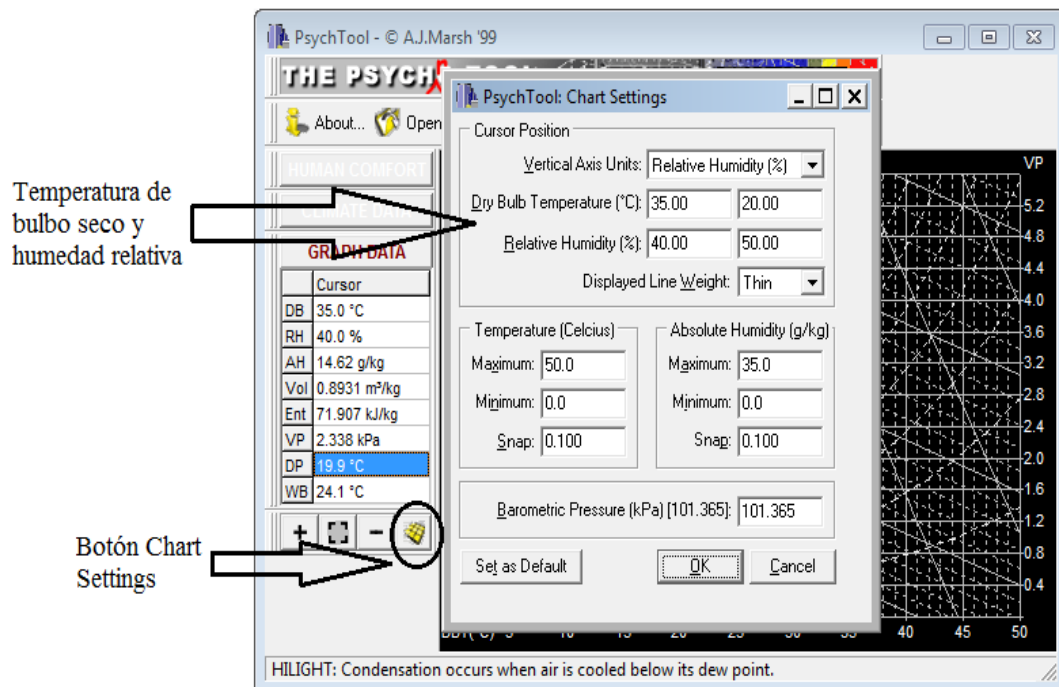
**Figura 4.14:** Radio critico de aislamiento para una tubería con Fluido Frio

Los botones de inicio y detener son de una simple función. Una vez llenados todos los campos respectivos de cada variable, entonces el botón de “Inicio” calcula el radio crítico de aislamiento ( $r_3$ ) y el espesor del aislante, con el botón “Detener” se vacían todos los campos nuevamente para realizar otro cálculo. Adicionalmente existe un botón para abrir una carta psicrométrica que viene dada por el programa PsychTool como se muestra en la figura con la figura 4.15. Esta herramienta se utiliza para determinar el punto de rocío del ambiente en el que se encuentra la tubería.



**Figura 4.15:** Carta Psicrométrica

Para determinar el punto de rocío con la herramienta mostrada, son necesarios al menos dos parámetros para graficar el punto en la carta psicrométrica, inicialmente se presiona el botón “Chart Settings” mostrado en la figura 4.16 y se introducen los datos de temperatura de bulbo seco (temperatura del ambiente) y la humedad relativa del lugar donde se encuentra la tubería. Se presiona el botón OK dentro de la misma ventana mostrada y el programa grafica el punto y muestra todos los parámetros involucrados en la carta psicrométrica tal como se mostró en la figura 4.15 con el punto de rocío buscado.



**Figura 4.16:** Carta Psicrométrica (introducción de parámetros)

### 4.3. Desarrollo de los algoritmos de cálculo.

El desarrollo de los algoritmos de cálculo es el inicio de la programación, primero se elaboran algoritmos que plantean una secuencia de cálculos, estos a su vez otorgan una serie de características definidas para la funcionalidad del programa, luego de esto es que se desarrolla la interfaz gráfica que da un mayor entendimiento y aprendizaje acerca de la utilidad del software.

#### 4.3.1 Medidor de Conductividad Térmica.

El objetivo principal de esta práctica es ilustrar el ensayo realizado en banco de ensayo real del laboratorio de transferencia de calor, para luego mediante el programa determinar la conductividad térmica obtenida experimentalmente y así establecer

conclusiones en cuanto a los resultados obtenidos. El usuario puede reproducir el ensayo mediante el laboratorio virtual y así determinar gráficamente la diferencia de temperatura ( $\Delta T_1$ ) entre los dos puntos de interés sobre la probeta, cuando esta alcanza las condiciones de transferencia de calor por conducción en estado estable, y todas las variables responsables de tal estado estable con las que es posible determinar la conductividad térmica experimental. Por ello se establece como objetivo de esta programación: determinar la conductividad térmica del ensayo experimental.

Para generar el algoritmo respectivo es necesario enfocarnos en el criterio de diseño y en la metodología planteada anteriormente:

#### Subprograma Medidor de Conductividad Térmica:

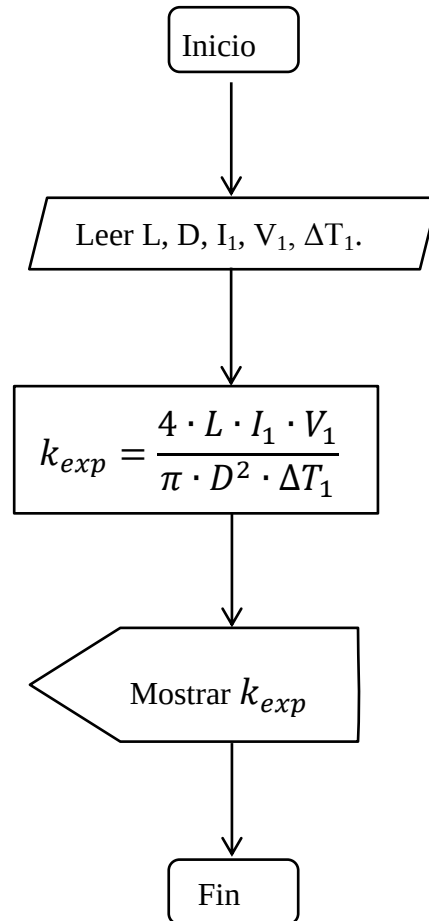
Para lograr este objetivo se emplean varios datos de entrada que son suministrados por el software y otros deducidos por el usuario después de simular el ensayo con en software de laboratorio virtual. Los datos suministrados por el software en realidad son cargados de la data del ensayo realizado en el banco de pruebas real, dichos datos son la distancia entre  $T_1$  y  $T_2$  (L) mostrada en la figura 4. 1 y el diámetro de la probeta, por lo que al realizar el ensayo estos datos están precargados y para determinar la conductividad térmica experimental deben ser complementados por los valores de corriente eléctrica, voltaje y diferencia de temperatura, estos suministrados por el usuario. Este algoritmo de cálculo se puede mostrar en la figura 4.17.

#### Entrada:

Longitud (L), diámetro de la probeta (D), corriente eléctrica ( $I_1$ ), voltaje ( $V_1$ ) y la diferencia de temperatura ( $\Delta T_1$ ).

Salida:

Conductividad térmica experimental ( $k_{exp}$ )



**Figura 4.17:** Algoritmo de cálculo del subprograma del Medidor de Conductividad Térmica

#### 4.3.2 Radio Crítico de Aislamiento.

El objetivo principal de este módulo es proporcionar una herramienta de cálculo que junto con la interfaz gráfica contribuya con el aprendizaje del estudiante,



proporcionando el conocimiento de la aplicación real que tiene el tema según sea el criterio de diseño para el cual es aplicado.

#### **4.3.2.1 Para un conductor eléctrico.**

Para generar el algoritmo respectivo es necesario enfocarnos en el criterio de diseño y en la metodología planteada anteriormente:

Subprograma Radio crítico de aislamiento para un conductor eléctrico:

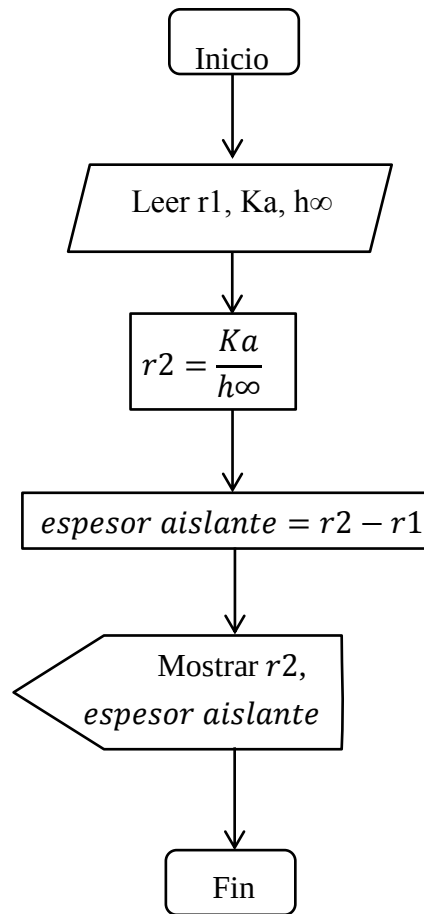
Para lograr este objetivo se emplean varios datos de entrada que son suministrados por el usuario, estos datos de entrada deben seguir un patrón lógico dentro del ámbito de su aplicación (para un conductor eléctrico) y así obtener los resultados esperados para este caso.

Entrada:

El radio del conductor eléctrico ( $r_1$ ), la conductividad térmica del aislante ( $K_a$ ) y el coeficiente convectivo respectivo ( $h_\infty$ ).

Salida:

Radio crítico ( $r_2$ ) y el espesor del aislante.



**Figura 4.18:** Algoritmo de cálculo del subprograma de Radio crítico de aislamiento para un conductor eléctrico

#### 4.3.2.2 Para una tubería con fluido caliente.

Para generar el algoritmo respectivo es necesario enfocarnos en el criterio de diseño y en la metodología planteada anteriormente:

Subprograma Radio critico de aislamiento para una tubería con fluido caliente:

Para lograr este objetivo se emplean varios datos de entrada que son suministrados por el usuario, estos datos de entrada deben seguir un patrón lógico

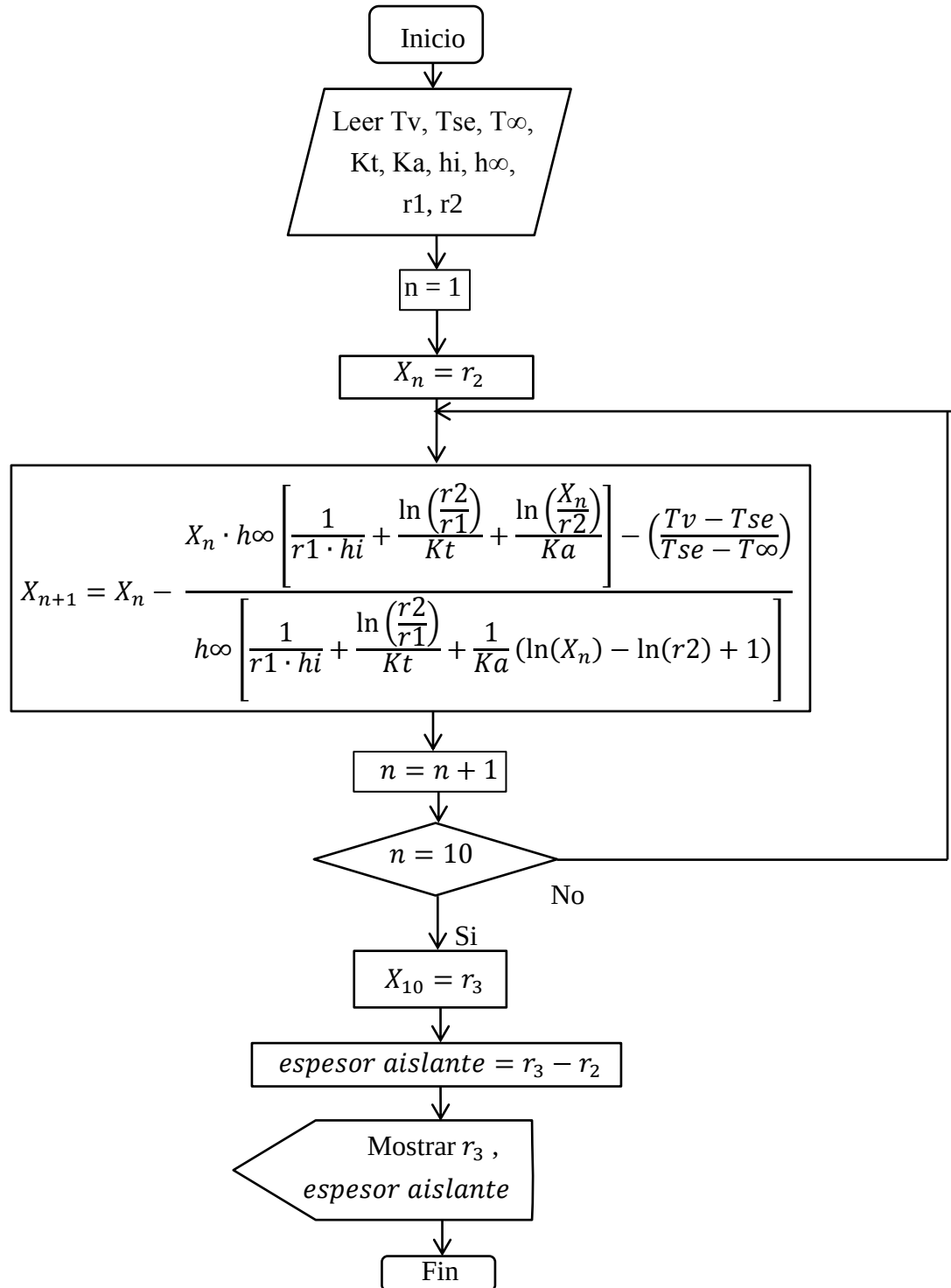
dentro del ámbito de su aplicación (para una tubería con fluido caliente) y así obtener los resultados esperados para este caso.

Entrada:

El radio interno y externo de la tubería ( $r_1$  y  $r_2$ ), la conductividad térmica del aislante y de la tubería ( $K_a$  y  $K_t$ ), el coeficiente convectivo interno y externo ( $h_i$  y  $h_\infty$ ), la temperatura interna del fluido caliente ( $T_v$ ), la temperatura de la superficie del aislante ( $T_{se} = 40^\circ\text{C}$ ) y la temperatura del exterior ( $T_\infty$ ).

Salida:

Radio critico ( $r_3$ ) y el espesor del aislante.



**Figura 4.19:** Algoritmo de cálculo del subprograma de Radio crítico de aislamiento para una tubería con fluido caliente.

#### **4.3.2.3 Para una tubería con fluido frío.**

Para generar el algoritmo respectivo es necesario enfocarnos en el criterio de diseño y en la metodología planteada anteriormente:

Para generar el algoritmo respectivo es necesario enfocarnos en el criterio de diseño planteado anteriormente,

Subprograma Radio crítico de aislamiento para una tubería con fluido frío:

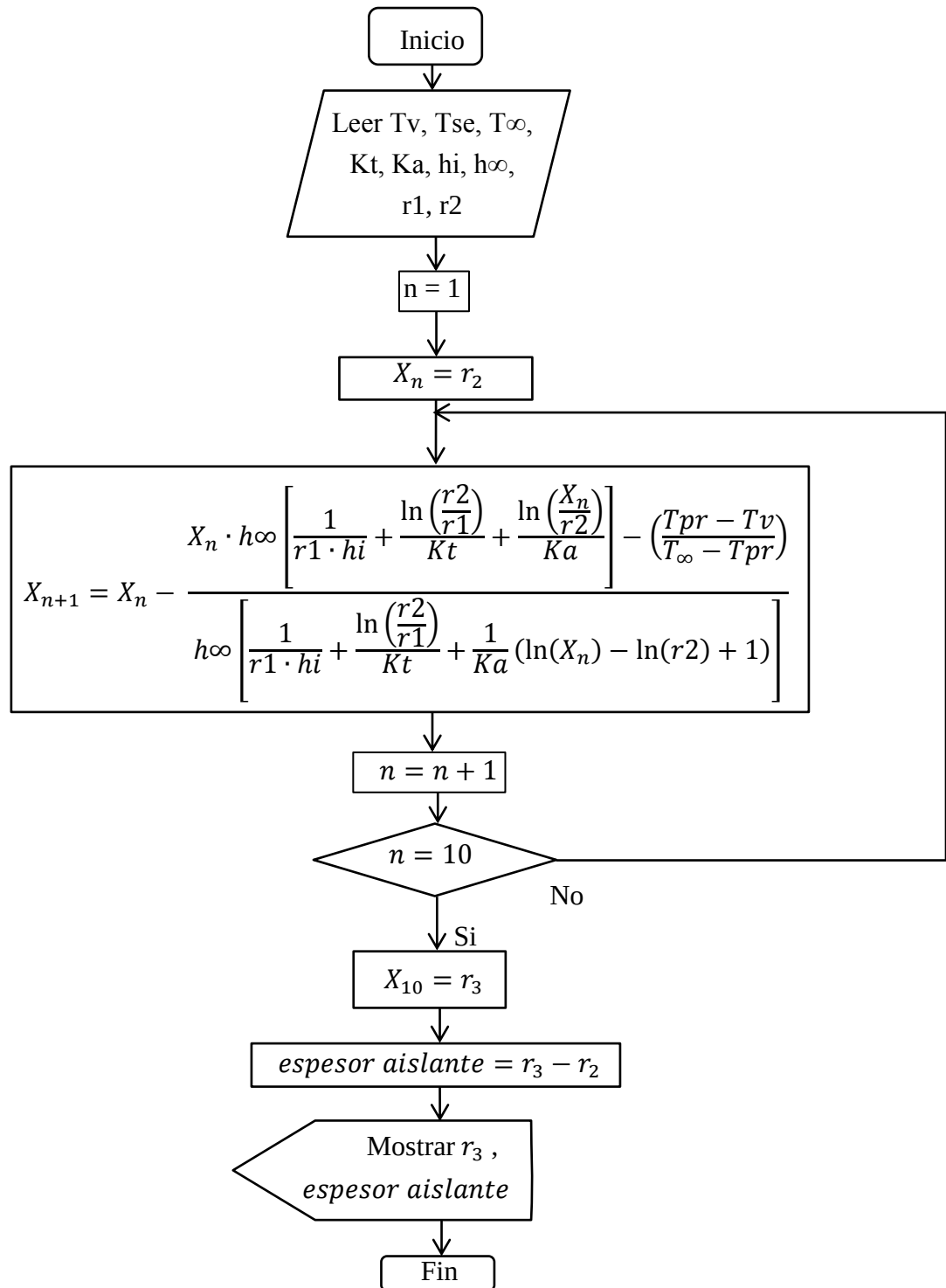
Para lograr este objetivo se emplean varios datos de entrada que son suministrados por el usuario, estos datos de entrada deben seguir un patrón lógico dentro del ámbito de su aplicación (para una tubería con fluido frío) y así obtener los resultados esperados para este caso.

Entrada:

El radio interno y externo de la tubería ( $r_1$  y  $r_2$ ), la conductividad térmica del aislante y de la tubería ( $K_a$  y  $K_t$ ), el coeficiente convectivo interno y externo ( $h_i$  y  $h_\infty$ ), la temperatura interna del fluido frío ( $T_v$ ), la temperatura de la superficie del aislante igual a la temperatura de punto de rocío ( $T_{pr}$ ) y la temperatura del exterior ( $T_\infty$ ).

Salida:

Radio crítico ( $r_3$ ) y el espesor del aislante.



**Figura 4.20:** Algoritmo de cálculo del subprograma de Radio crítico de aislamiento para una tubería con fluido frío

#### **4.4. Desarrollo de la Base de Datos.**

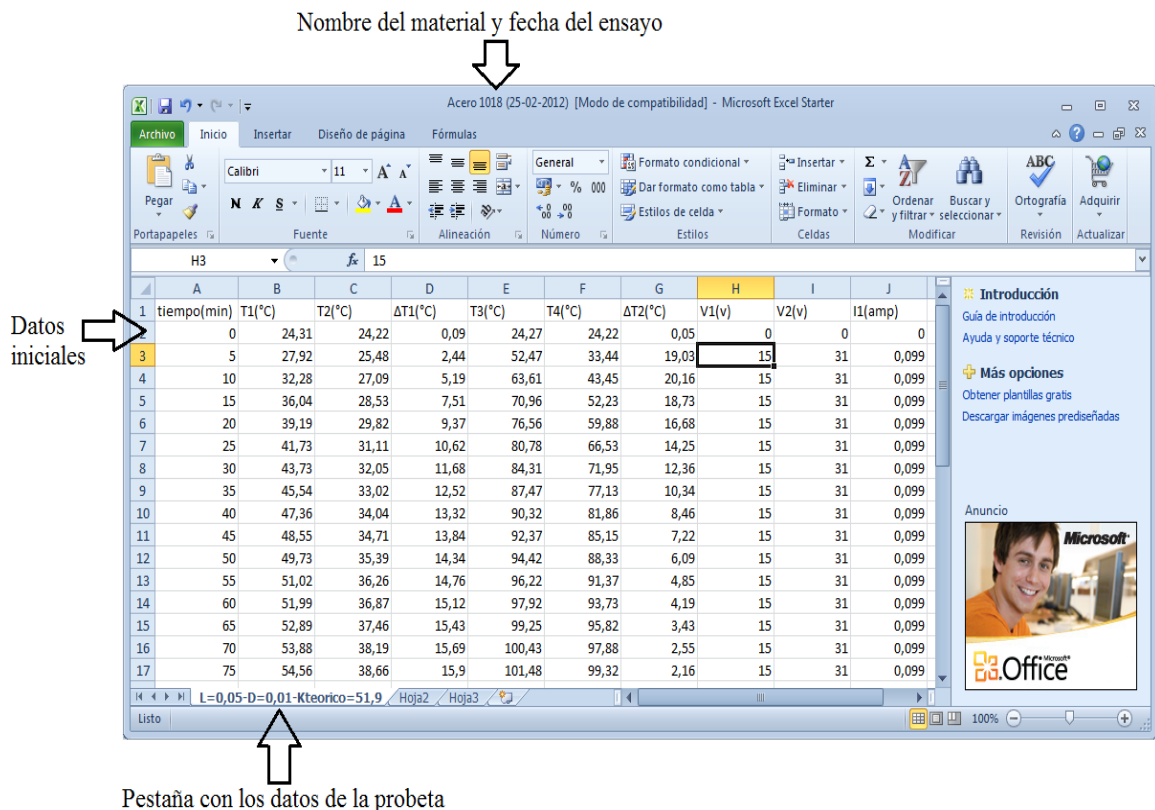
La finalidad de desarrollar una base de datos que contenga los ensayos realizados en el banco de pruebas de transferencia de calor por conducción (medidor de conductividad térmica), es de reproducir el ensayo en el programa del laboratorio virtual a manera de ilustrar en clase tanto el funcionamiento del banco de pruebas como lo ocurrido durante el ensayo y con el mismo software obtener la conductividad térmica obtenida experimentalmente para así generar conclusiones al respecto.

La base de datos comprende una carpeta contenida de archivos de Microsoft Excel 97-2003 (.xls). , donde cada archivo comprende un ensayo realizado en una fecha para un determinado material. El procedimiento para desarrollar la base de datos es de la siguiente forma:

- Inicialmente abre el recinto acrílico para realizar el montaje o cambio de probeta del material, para luego sellar nuevamente el recinto acrílico.
- La instalación del recolector de datos mostrado en la figura 4.2, que va conectado de sus respectivos puertos a los termopares que dan las temperaturas del estudio y del recolector de datos a el ordenador vía USB. Una vez conectado, su software (Instacal) muestra en tiempo real estas medidas de temperaturas.
- Se construye una tabla en Exel como se muestra en la siguiente figura 4.21, donde se toman las temperaturas iniciales de la probeta antes de aplicar cualquier carga calórica, luego se encienden los reguladores del voltaje y empieza la recolección de datos; donde se toman los valores de las cuatro temperaturas, el volteje que entregan los dos reguladores y la corriente eléctrica que genera el primer regulador(I1); estos cada 5 minutos hasta que se

alcance la condición de flujo de calor en estado estable ( $T_3 \cong T_4$  y  $\Delta T_1 \cong$  constante).

- Una vez recolectados todos los datos, en la pestaña del nombre de la hoja donde se realizó la tabla de Excel se escriben los datos respectivos de la probeta tales como; la longitud entre  $T_1$  y  $T_2$  (L) en metros, el diámetro de la probeta en (D) en metros y la conductividad térmica teórica del material en estudio ( $K_{teórico}$ ) en  $W/m \cdot K$ , tal cual como se muestra en la figura 4.21.
- Se guarda el archivo de Microsoft Excel 97-2003 (.xls). en la carpeta de la base de datos con el nombre del material y la fecha en la que se realizó el ensayo como se muestra en la figura 4.21.



**Figura 4.21:** Datos del ensayo



## **CAPITULO V**

### **VALIDACIONES**

Para garantizar el funcionamiento óptimo de la herramienta y la validez de los ensayos que conforman la data o la base de datos realizada, se realizaron múltiples pruebas con el programa del laboratorio virtual con la finalidad de comparar los resultados obtenidos experimentalmente; es decir la conductividad térmica obtenida experimentalmente con la conductividad térmica teórica característica de un material determinado. A continuación se muestran cada uno de los ensayos realizados:

#### **5.1. Resultados Experimentales.**

Para la obtención de los resultados se utilizaron probetas de aluminio, acero 1018 y cobre; con las cuales se realizó la base de datos que contiene cada uno de sus respectivos ensayos.

##### **5.1.1 Datos de Ensayos Realizados:**

A continuación se presentan las tablas realizadas para el ensayo experimental; las cuales son tabla 5.1, para el Ensayo experimental N°1; la tabla 5.2, referida al Ensayo experimental N°2, la tabla 5.3. Para el Ensayo experimental N°3; la tabla 5.4. Para el Ensayo experimental N°4, y la tabla 5.5. Para el Ensayo experimental N°5.

**Tabla 5.1.** Para el Ensayo experimental N°1

Aluminio (20-02-2012): D= 0,0098(m) L= 0,05(m) Kteorico= 237(W/mK)

| tiempo(min) | T1(°C) | T2(°C) | $\Delta T1(^{\circ}C)$ | T3(°C) | T4(°C) | $\Delta T2(^{\circ}C)$ | V1(v) | V2(v) | I1(amp) |
|-------------|--------|--------|------------------------|--------|--------|------------------------|-------|-------|---------|
| 0           | 28,2   | 28,4   | -0,2                   | 28,6   | 28,9   | -0,3                   | 15    | 27    | 0,099   |
| 5           | 31,9   | 29,8   | 2,1                    | 48,2   | 36,7   | 11,5                   | 15    | 27    | 0,099   |
| 10          | 33,7   | 30,7   | 3                      | 54,2   | 43,6   | 10,6                   | 15    | 27    | 0,099   |
| 15          | 35,01  | 31,6   | 3,41                   | 57,7   | 49,9   | 7,8                    | 15    | 27    | 0,099   |
| 20          | 36,04  | 32,37  | 3,67                   | 60,12  | 55,04  | 5,08                   | 15    | 27    | 0,099   |
| 25          | 36,98  | 33,09  | 3,89                   | 62,15  | 59,88  | 2,27                   | 15    | 27    | 0,099   |
| 30          | 37,84  | 33,69  | 4,15                   | 63,83  | 63,9   | -0,07                  | 15    | 27    | 0,099   |
| 35          | 38,5   | 34,2   | 4,3                    | 65,4   | 67,3   | -1,9                   | 15    | 27    | 0,099   |
| 40          | 39,2   | 34,9   | 4,3                    | 66,7   | 70,3   | -3,6                   | 15    | 27    | 0,099   |
| 45          | 40,02  | 35,62  | 4,4                    | 67,9   | 73,1   | -5,2                   | 15    | 27    | 0,099   |
| 50          | 40,64  | 36,15  | 4,49                   | 68,98  | 74,7   | -5,72                  | 15    | 27    | 0,099   |
| 55          | 41,2   | 36,6   | 4,6                    | 69,9   | 75,7   | -5,8                   | 15    | 25    | 0,099   |
| 60          | 41,8   | 37,3   | 4,5                    | 70,68  | 76,7   | -6,02                  | 15    | 25    | 0,099   |
| 65          | 42,39  | 37,8   | 4,59                   | 71,48  | 77,6   | -6,12                  | 15    | 25    | 0,099   |
| 70          | 42,8   | 38,2   | 4,6                    | 71,92  | 77,5   | -5,58                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 75          | 43,2   | 38,78  | 4,42                   | 72,23  | 77,17  | -4,94                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 80          | 43,64  | 39,2   | 4,44                   | 72,43  | 76,88  | -4,45                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 85          | 43,92  | 39,45  | 4,47                   | 72,63  | 76,52  | -3,89                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 90          | 44,4   | 39,98  | 4,42                   | 73,1   | 76,42  | -3,32                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 95          | 44,74  | 40,32  | 4,42                   | 73,37  | 76,47  | -3,1                   | 15    | 23    | 0,099   |
| 100         | 45,01  | 40,56  | 4,45                   | 73,61  | 76,27  | -2,66                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 105         | 45,34  | 40,95  | 4,39                   | 73,71  | 76,22  | -2,51                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 110         | 45,64  | 41,28  | 4,36                   | 73,84  | 76,18  | -2,34                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 115         | 45,81  | 41,47  | 4,34                   | 74,16  | 76,16  | -2                     | 15    | 23    | 0,099   |
| 120         | 46,09  | 41,75  | 4,34                   | 74,39  | 76,2   | -1,81                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 125         | 46,34  | 42,07  | 4,27                   | 74,57  | 76,25  | -1,68                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 130         | 46,55  | 42,23  | 4,32                   | 74,75  | 76,2   | -1,45                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 135         | 46,69  | 42,41  | 4,28                   | 74,95  | 76,15  | -1,2                   | 15    | 23    | 0,099   |
| 140         | 46,99  | 42,73  | 4,26                   | 75,16  | 76,28  | -1,12                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 145         | 47,22  | 42,96  | 4,26                   | 75,38  | 76,29  | -0,91                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 150         | 47,28  | 43,02  | 4,26                   | 75,47  | 76,31  | -0,84                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 155         | 47,6   | 43,37  | 4,23                   | 75,68  | 76,45  | -0,77                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 160         | 47,75  | 43,52  | 4,23                   | 75,88  | 76,5   | -0,62                  | 15    | 23    | 0,099   |

**Fuente:** Propia

**Tabla 5.2.** Para el Ensayo experimental N°2

Aluminio (21-02-2012): D= 0,0098(m) L= 0,05(m) Kteorico= 237(W/mK)

| tiempo(min) | T1(°C) | T2(°C) | $\Delta T1(^{\circ}C)$ | T3(°C) | T4(°C) | $\Delta T2(^{\circ}C)$ | V1(v) | V2(v) | I1(amp) |
|-------------|--------|--------|------------------------|--------|--------|------------------------|-------|-------|---------|
| 0           | 24,38  | 24,53  | -0,15                  | 24,28  | 24,23  | 0,05                   | 15    | 23    | 0,099   |
| 5           | 28,22  | 26,24  | 1,98                   | 43,97  | 27,75  | 16,22                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 10          | 30,31  | 27,43  | 2,88                   | 50,32  | 35,81  | 14,51                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 15          | 31,44  | 28,16  | 3,28                   | 53,14  | 40,18  | 12,96                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 20          | 32,42  | 28,93  | 3,49                   | 55,32  | 44,43  | 10,89                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 25          | 33,31  | 29,63  | 3,68                   | 57,01  | 48,07  | 8,94                   | 15    | 23    | 0,099   |
| 30          | 34,05  | 30,31  | 3,74                   | 58,47  | 51,44  | 7,03                   | 15    | 23    | 0,099   |
| 35          | 34,8   | 30,99  | 3,81                   | 59,48  | 54,52  | 4,96                   | 15    | 23    | 0,099   |
| 40          | 35,36  | 31,49  | 3,87                   | 60,27  | 56,59  | 3,68                   | 15    | 23    | 0,099   |
| 45          | 35,98  | 32,04  | 3,94                   | 61,21  | 58,65  | 2,56                   | 15    | 23    | 0,099   |
| 50          | 36,52  | 32,56  | 3,96                   | 62,19  | 60,33  | 1,86                   | 15    | 23    | 0,099   |
| 55          | 37,15  | 33,12  | 4,03                   | 63,18  | 62,08  | 1,1                    | 15    | 23    | 0,099   |
| 60          | 37,68  | 33,61  | 4,07                   | 63,92  | 63,37  | 0,55                   | 15    | 23    | 0,099   |
| 65          | 38,18  | 34,12  | 4,06                   | 64,73  | 64,65  | 0,08                   | 15    | 23    | 0,099   |
| 70          | 38,71  | 34,56  | 4,15                   | 65,45  | 65,8   | -0,35                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 75          | 39,19  | 35,05  | 4,14                   | 66,18  | 66,81  | -0,63                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 80          | 39,59  | 35,41  | 4,18                   | 66,66  | 67,61  | -0,95                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 85          | 40,01  | 35,81  | 4,2                    | 67,21  | 68,45  | -1,24                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 90          | 40,41  | 36,29  | 4,12                   | 67,65  | 69,08  | -1,43                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 95          | 40,78  | 36,61  | 4,17                   | 68,15  | 69,79  | -1,64                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 100         | 41,15  | 36,93  | 4,22                   | 68,57  | 70,37  | -1,8                   | 15    | 23    | 0,099   |
| 105         | 41,48  | 37,27  | 4,21                   | 68,95  | 70,82  | -1,87                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 110         | 41,79  | 37,56  | 4,23                   | 69,26  | 71,21  | -1,95                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 115         | 42,11  | 37,87  | 4,24                   | 69,58  | 71,56  | -1,98                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 120         | 42,36  | 38,16  | 4,2                    | 69,85  | 71,85  | -2                     | 15    | 23    | 0,099   |
| 125         | 42,62  | 38,43  | 4,19                   | 70,12  | 72,14  | -2,02                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 130         | 42,86  | 38,67  | 4,19                   | 70,39  | 72,45  | -2,06                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 135         | 43,12  | 38,91  | 4,21                   | 70,63  | 72,62  | -1,99                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 140         | 43,33  | 39,13  | 4,2                    | 70,84  | 72,78  | -1,94                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 145         | 43,52  | 39,33  | 4,19                   | 71,06  | 72,98  | -1,92                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 150         | 43,71  | 39,54  | 4,17                   | 71,21  | 73,14  | -1,93                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 155         | 43,92  | 39,71  | 4,21                   | 71,43  | 73,23  | -1,8                   | 15    | 23    | 0,099   |
| 160         | 44,09  | 39,94  | 4,15                   | 71,65  | 73,48  | -1,83                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 165         | 44,27  | 40,12  | 4,15                   | 71,83  | 73,57  | -1,74                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 170         | 44,43  | 40,26  | 4,17                   | 71,96  | 73,69  | -1,73                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 175         | 44,54  | 40,38  | 4,16                   | 72,07  | 73,79  | -1,72                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 180         | 44,71  | 40,59  | 4,12                   | 72,21  | 73,81  | -1,6                   | 15    | 23    | 0,099   |
| 185         | 44,83  | 40,69  | 4,14                   | 72,35  | 73,89  | -1,54                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 190         | 45,03  | 40,84  | 4,19                   | 72,46  | 73,98  | -1,52                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 195         | 45,07  | 40,98  | 4,09                   | 72,61  | 74,01  | -1,4                   | 15    | 23    | 0,099   |
| 200         | 45,27  | 41,08  | 4,19                   | 72,94  | 74,23  | -1,29                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 205         | 45,47  | 41,22  | 4,25                   | 73,24  | 74,43  | -1,19                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 210         | 45,54  | 41,34  | 4,2                    | 73,33  | 74,48  | -1,15                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 215         | 45,64  | 41,47  | 4,17                   | 73,43  | 74,64  | -1,21                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 220         | 45,71  | 41,51  | 4,2                    | 73,56  | 74,71  | -1,15                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 225         | 45,83  | 41,64  | 4,19                   | 73,61  | 74,77  | -1,16                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 230         | 45,86  | 41,67  | 4,19                   | 73,71  | 74,91  | -1,2                   | 15    | 23    | 0,099   |
| 235         | 45,96  | 41,76  | 4,2                    | 73,74  | 74,88  | -1,14                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 240         | 46,04  | 41,86  | 4,18                   | 73,8   | 74,96  | -1,16                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 245         | 46,13  | 41,91  | 4,22                   | 73,91  | 75,06  | -1,15                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 250         | 46,19  | 41,98  | 4,21                   | 74,01  | 75,04  | -1,03                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 255         | 46,28  | 42,09  | 4,19                   | 74,06  | 75,15  | -1,09                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 260         | 46,34  | 42,15  | 4,19                   | 74,12  | 75,11  | -0,99                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 265         | 46,35  | 42,19  | 4,16                   | 74,17  | 75,14  | -0,97                  | 15    | 23    | 0,099   |
| 270         | 46,37  | 42,21  | 4,16                   | 74,25  | 75,18  | -0,93                  | 15    | 23    | 0,099   |

**Fuente:** Propia

**Tabla 5.3.** Para el Ensayo experimental N°3  
Acero 1018 (24-02-2012): D= 0,01(m) L= 0,05(m) Kteorico= 51,9(W/mK)

| tiempo(min) | T1(°C) | T2(°C) | $\Delta T1(^{\circ}C)$ | T3(°C) | T4(°C) | $\Delta T2(^{\circ}C)$ | V1(v) | V2(v) | I1(amp) |
|-------------|--------|--------|------------------------|--------|--------|------------------------|-------|-------|---------|
| 0           | 23,3   | 23,4   | -0,1                   | 23,5   | 23,2   | 0,3                    | 15    | 27    | 0,099   |
| 5           | 26,4   | 24,3   | 2,1                    | 49,6   | 29,1   | 20,5                   | 15    | 27    | 0,099   |
| 10          | 30,7   | 25,9   | 4,8                    | 60,7   | 36,8   | 23,9                   | 15    | 27    | 0,099   |
| 15          | 34,4   | 27,3   | 7,1                    | 68,1   | 43,9   | 24,2                   | 15    | 27    | 0,099   |
| 20          | 37,2   | 28,5   | 8,7                    | 72,7   | 49,7   | 23                     | 15    | 27    | 0,099   |
| 25          | 39,6   | 29,6   | 10                     | 76,7   | 55,1   | 21,6                   | 15    | 27    | 0,099   |
| 30          | 41,5   | 30,5   | 11                     | 80,06  | 59,8   | 20,26                  | 15    | 27    | 0,099   |
| 35          | 43,2   | 31,5   | 11,7                   | 82,6   | 63,8   | 18,8                   | 15    | 27    | 0,099   |
| 40          | 44,5   | 32,2   | 12,3                   | 85,01  | 67,5   | 17,51                  | 15    | 27    | 0,099   |
| 45          | 45,7   | 32,9   | 12,8                   | 87,1   | 70,7   | 16,4                   | 15    | 27    | 0,099   |
| 50          | 47,1   | 33,8   | 13,3                   | 89,06  | 73,9   | 15,16                  | 15    | 27    | 0,099   |
| 55          | 47,9   | 34,2   | 13,7                   | 90,4   | 76,1   | 14,3                   | 15    | 27    | 0,099   |
| 60          | 48,9   | 34,9   | 14                     | 91,8   | 78,3   | 13,5                   | 15    | 27    | 0,099   |
| 65          | 49,7   | 35,6   | 14,1                   | 93,2   | 80,3   | 12,9                   | 15    | 27    | 0,099   |
| 70          | 50,4   | 36,06  | 14,34                  | 94,2   | 81,9   | 12,3                   | 15    | 27    | 0,099   |
| 75          | 51,2   | 36,7   | 14,5                   | 95,1   | 84,7   | 10,4                   | 15    | 30    | 0,099   |
| 80          | 51,9   | 37,1   | 14,8                   | 96,3   | 87,4   | 8,9                    | 15    | 30    | 0,099   |
| 85          | 52,6   | 37,6   | 15                     | 97,6   | 89,8   | 7,8                    | 15    | 30    | 0,099   |
| 90          | 53,5   | 38,2   | 15,3                   | 99,03  | 92,75  | 6,28                   | 15    | 32    | 0,099   |
| 95          | 54,2   | 38,7   | 15,5                   | 100,4  | 95,5   | 4,9                    | 15    | 32    | 0,099   |
| 100         | 55,04  | 39,3   | 15,74                  | 101,6  | 98,1   | 3,5                    | 15    | 32    | 0,099   |
| 105         | 55,8   | 39,8   | 16                     | 102,9  | 100,21 | 2,69                   | 15    | 32    | 0,099   |
| 110         | 56,5   | 40,3   | 16,2                   | 104,08 | 102,07 | 2,01                   | 15    | 32    | 0,099   |
| 115         | 57,2   | 40,9   | 16,3                   | 104,8  | 103,7  | 1,1                    | 15    | 32    | 0,099   |
| 120         | 57,8   | 41,3   | 16,5                   | 105,6  | 104,9  | 0,7                    | 15    | 32    | 0,099   |
| 125         | 58,3   | 41,7   | 16,6                   | 106,3  | 105,9  | 0,4                    | 15    | 32    | 0,099   |
| 130         | 58,8   | 42,1   | 16,7                   | 106,9  | 106,9  | 0                      | 15    | 32    | 0,099   |
| 135         | 59,3   | 42,5   | 16,8                   | 107,39 | 107,69 | -0,3                   | 15    | 32    | 0,099   |
| 140         | 59,8   | 42,9   | 16,9                   | 107,8  | 108,37 | -0,57                  | 15    | 32    | 0,099   |
| 145         | 60,1   | 43,26  | 16,84                  | 108,18 | 108,62 | -0,44                  | 15    | 31    | 0,099   |
| 150         | 60,4   | 43,5   | 16,9                   | 108,4  | 108,7  | -0,3                   | 15    | 31    | 0,099   |
| 155         | 60,8   | 43,9   | 16,9                   | 108,79 | 108,88 | -0,09                  | 15    | 31    | 0,099   |
| 160         | 61,04  | 44,09  | 16,95                  | 109,21 | 109,02 | 0,19                   | 15    | 31    | 0,099   |

**Fuente:** Propia

**Tabla 5.4.** Para el Ensayo experimental N°4

Acero 1018 (25-02-2012): D= 0,01(m) L= 0,05(m) Kteorico= 51,9(W/mK)

| tiempo(min) | T1(°C) | T2(°C) | $\Delta T1(^{\circ}C)$ | T3(°C) | T4(°C) | $\Delta T2(^{\circ}C)$ | V1(v) | V2(v) | I1(amp) |
|-------------|--------|--------|------------------------|--------|--------|------------------------|-------|-------|---------|
| 0           | 24,31  | 24,22  | 0,09                   | 24,27  | 24,22  | 0,05                   | 0     | 0     | 0       |
| 5           | 27,92  | 25,48  | 2,44                   | 52,47  | 33,44  | 19,03                  | 15    | 31    | 0,099   |
| 10          | 32,28  | 27,09  | 5,19                   | 63,61  | 43,45  | 20,16                  | 15    | 31    | 0,099   |
| 15          | 36,04  | 28,53  | 7,51                   | 70,96  | 52,23  | 18,73                  | 15    | 31    | 0,099   |
| 20          | 39,19  | 29,82  | 9,37                   | 76,56  | 59,88  | 16,68                  | 15    | 31    | 0,099   |
| 25          | 41,73  | 31,11  | 10,62                  | 80,78  | 66,53  | 14,25                  | 15    | 31    | 0,099   |
| 30          | 43,73  | 32,05  | 11,68                  | 84,31  | 71,95  | 12,36                  | 15    | 31    | 0,099   |
| 35          | 45,54  | 33,02  | 12,52                  | 87,47  | 77,13  | 10,34                  | 15    | 31    | 0,099   |
| 40          | 47,36  | 34,04  | 13,32                  | 90,32  | 81,86  | 8,46                   | 15    | 31    | 0,099   |
| 45          | 48,55  | 34,71  | 13,84                  | 92,37  | 85,15  | 7,22                   | 15    | 31    | 0,099   |
| 50          | 49,73  | 35,39  | 14,34                  | 94,42  | 88,33  | 6,09                   | 15    | 31    | 0,099   |
| 55          | 51,02  | 36,26  | 14,76                  | 96,22  | 91,37  | 4,85                   | 15    | 31    | 0,099   |
| 60          | 51,99  | 36,87  | 15,12                  | 97,92  | 93,73  | 4,19                   | 15    | 31    | 0,099   |
| 65          | 52,89  | 37,46  | 15,43                  | 99,25  | 95,82  | 3,43                   | 15    | 31    | 0,099   |
| 70          | 53,88  | 38,19  | 15,69                  | 100,43 | 97,88  | 2,55                   | 15    | 31    | 0,099   |
| 75          | 54,56  | 38,66  | 15,9                   | 101,48 | 99,32  | 2,16                   | 15    | 31    | 0,099   |
| 80          | 55,29  | 39,22  | 16,07                  | 102,32 | 100,73 | 1,59                   | 15    | 31    | 0,099   |
| 85          | 56,01  | 39,87  | 16,14                  | 103,08 | 101,92 | 1,16                   | 15    | 31    | 0,099   |
| 90          | 56,53  | 40,23  | 16,3                   | 103,85 | 102,95 | 0,9                    | 15    | 31    | 0,099   |
| 95          | 56,99  | 40,63  | 16,36                  | 104,56 | 103,65 | 0,91                   | 15    | 31    | 0,099   |
| 100         | 57,63  | 41,21  | 16,42                  | 105,27 | 104,62 | 0,65                   | 15    | 31    | 0,099   |
| 105         | 58,08  | 41,54  | 16,54                  | 105,88 | 105,31 | 0,57                   | 15    | 31    | 0,099   |
| 110         | 58,51  | 41,91  | 16,6                   | 106,43 | 105,87 | 0,56                   | 15    | 31    | 0,099   |
| 115         | 59,07  | 42,43  | 16,64                  | 106,96 | 106,64 | 0,32                   | 15    | 31    | 0,099   |
| 120         | 59,49  | 42,77  | 16,72                  | 107,34 | 107,11 | 0,23                   | 15    | 31    | 0,099   |
| 125         | 59,86  | 43,13  | 16,73                  | 107,98 | 107,55 | 0,43                   | 15    | 31    | 0,099   |
| 130         | 60,05  | 43,33  | 16,72                  | 108,17 | 107,71 | 0,46                   | 15    | 31    | 0,099   |
| 135         | 60,48  | 43,74  | 16,74                  | 108,28 | 108,17 | 0,11                   | 15    | 31    | 0,099   |
| 140         | 60,78  | 44,04  | 16,74                  | 108,64 | 108,44 | 0,2                    | 15    | 31    | 0,099   |
| 145         | 61,05  | 44,24  | 16,81                  | 109,04 | 108,81 | 0,23                   | 15    | 31    | 0,099   |
| 150         | 61,33  | 44,53  | 16,8                   | 109,41 | 109,23 | 0,18                   | 15    | 31    | 0,099   |
| 155         | 61,69  | 44,87  | 16,82                  | 109,75 | 109,83 | -0,08                  | 15    | 31    | 0,099   |
| 160         | 61,91  | 44,95  | 16,96                  | 110,02 | 109,98 | 0,04                   | 15    | 31    | 0,099   |
| 165         | 62,17  | 45,24  | 16,93                  | 110,34 | 110,02 | 0,32                   | 15    | 31    | 0,099   |
| 170         | 62,42  | 45,49  | 16,93                  | 110,47 | 110,39 | 0,08                   | 15    | 31    | 0,099   |
| 175         | 62,68  | 45,73  | 16,95                  | 110,74 | 110,77 | -0,03                  | 15    | 31    | 0,099   |
| 180         | 62,77  | 45,85  | 16,92                  | 110,96 | 110,88 | 0,08                   | 15    | 31    | 0,099   |

**Fuente:** Propia

**Tabla 5.5.** Para el Ensayo experimental N°5  
Cobre (29-02-2012): D= 0,01(m) L= 0,05(m) Kteorico= 401(W/mK)

| tiempo(min) | T1(°C) | T2(°C) | $\Delta T1(^{\circ}C)$ | T3(°C) | T4(°C) | $\Delta T2(^{\circ}C)$ | V0 | V2(v) | I1(amp) |
|-------------|--------|--------|------------------------|--------|--------|------------------------|----|-------|---------|
| 0           | 23,94  | 24,18  | -0,24                  | 23,93  | 23,66  | 0,27                   | 15 | 23    | 0,099   |
| 5           | 26,56  | 25,52  | 1,04                   | 45,86  | 29,15  | 16,71                  | 15 | 23    | 0,099   |
| 10          | 28,07  | 26,51  | 1,56                   | 52,74  | 35,02  | 17,72                  | 15 | 23    | 0,099   |
| 15          | 28,99  | 27,19  | 1,8                    | 56,15  | 39,85  | 16,3                   | 15 | 23    | 0,099   |
| 20          | 29,83  | 28,01  | 1,82                   | 58,31  | 44,11  | 14,2                   | 15 | 23    | 0,099   |
| 25          | 30,65  | 28,69  | 1,96                   | 59,96  | 48,08  | 11,88                  | 15 | 23    | 0,099   |
| 30          | 31,31  | 29,25  | 2,06                   | 61,48  | 51,46  | 10,02                  | 15 | 23    | 0,099   |
| 35          | 32,1   | 30,03  | 2,07                   | 62,88  | 54,64  | 8,24                   | 15 | 23    | 0,099   |
| 40          | 32,73  | 30,63  | 2,1                    | 64,08  | 57,21  | 6,87                   | 15 | 23    | 0,099   |
| 45          | 33,31  | 31,14  | 2,17                   | 65,21  | 59,46  | 5,75                   | 15 | 23    | 0,099   |
| 50          | 34,05  | 31,89  | 2,16                   | 66,22  | 61,65  | 4,57                   | 15 | 23    | 0,099   |
| 55          | 34,59  | 32,37  | 2,22                   | 67,2   | 63,61  | 3,59                   | 15 | 23    | 0,099   |
| 60          | 35,13  | 32,86  | 2,27                   | 68,06  | 65,15  | 2,91                   | 15 | 23    | 0,099   |
| 65          | 35,78  | 33,56  | 2,22                   | 68,84  | 66,74  | 2,1                    | 15 | 23    | 0,099   |
| 70          | 36,26  | 33,98  | 2,28                   | 69,54  | 68,01  | 1,53                   | 15 | 23    | 0,099   |
| 75          | 36,68  | 34,39  | 2,29                   | 70,11  | 69,01  | 1,1                    | 15 | 23    | 0,099   |
| 80          | 37,32  | 35,08  | 2,24                   | 70,85  | 70,09  | 0,76                   | 15 | 23    | 0,099   |
| 85          | 37,74  | 35,46  | 2,28                   | 71,38  | 70,98  | 0,4                    | 15 | 23    | 0,099   |
| 90          | 38,16  | 35,9   | 2,26                   | 71,81  | 71,69  | 0,12                   | 15 | 23    | 0,099   |
| 95          | 38,58  | 36,4   | 2,18                   | 72,27  | 72,48  | -0,21                  | 15 | 23    | 0,099   |
| 100         | 38,88  | 36,62  | 2,26                   | 72,75  | 72,92  | -0,17                  | 15 | 23    | 0,099   |
| 105         | 39,34  | 37,06  | 2,28                   | 73,24  | 73,57  | -0,33                  | 15 | 23    | 0,099   |
| 110         | 39,76  | 37,51  | 2,25                   | 73,55  | 74,03  | -0,48                  | 15 | 23    | 0,099   |
| 115         | 40,04  | 37,76  | 2,28                   | 73,83  | 74,45  | -0,62                  | 15 | 23    | 0,099   |
| 120         | 40,28  | 38,03  | 2,25                   | 74,16  | 74,76  | -0,6                   | 15 | 23    | 0,099   |
| 125         | 40,71  | 38,55  | 2,16                   | 74,48  | 75,19  | -0,71                  | 15 | 23    | 0,099   |
| 130         | 40,91  | 38,73  | 2,18                   | 74,73  | 75,36  | -0,63                  | 15 | 23    | 0,099   |
| 135         | 41,17  | 38,91  | 2,26                   | 74,91  | 75,49  | -0,58                  | 15 | 23    | 0,099   |
| 140         | 41,51  | 39,36  | 2,15                   | 75,19  | 75,84  | -0,65                  | 15 | 23    | 0,099   |
| 145         | 41,71  | 39,48  | 2,23                   | 75,49  | 75,88  | -0,39                  | 15 | 23    | 0,099   |
| 150         | 41,93  | 39,7   | 2,23                   | 75,62  | 75,96  | -0,34                  | 15 | 23    | 0,099   |
| 155         | 42,24  | 40,05  | 2,19                   | 75,86  | 76,21  | -0,35                  | 15 | 23    | 0,099   |
| 160         | 42,35  | 40,14  | 2,21                   | 76,01  | 76,31  | -0,3                   | 15 | 23    | 0,099   |
| 165         | 42,52  | 40,32  | 2,2                    | 76,09  | 76,27  | -0,18                  | 15 | 23    | 0,099   |

**Fuente:** Propia

### **5.1.2 Ensayos Experimentales.**

Con el software de laboratorio virtual de transferencia de calor por conducción se reproduce la data obtenida con el banco de ensayo real, con la finalidad de ilustrar y analizar lo acontecido durante el ensayo, determinando luego la conductividad térmica obtenida experimentalmente y comparándola con la conductividad térmica teórica característica del material ensayado. En el mismo orden se muestran los resultados de cada uno de los ensayos realizados:

Ensayo experimental N°1:

En la figura 5.1 se muestra la conclusión del ensayo realizado el 20, de febrero del 2012, para la probeta de aluminio con las especificaciones mostradas, la gráfica de variación de la temperatura en el sistema ( $\Delta T1$  y  $\Delta T2$  vs Tiempo) y la conductividad térmica obtenida experimentalmente.

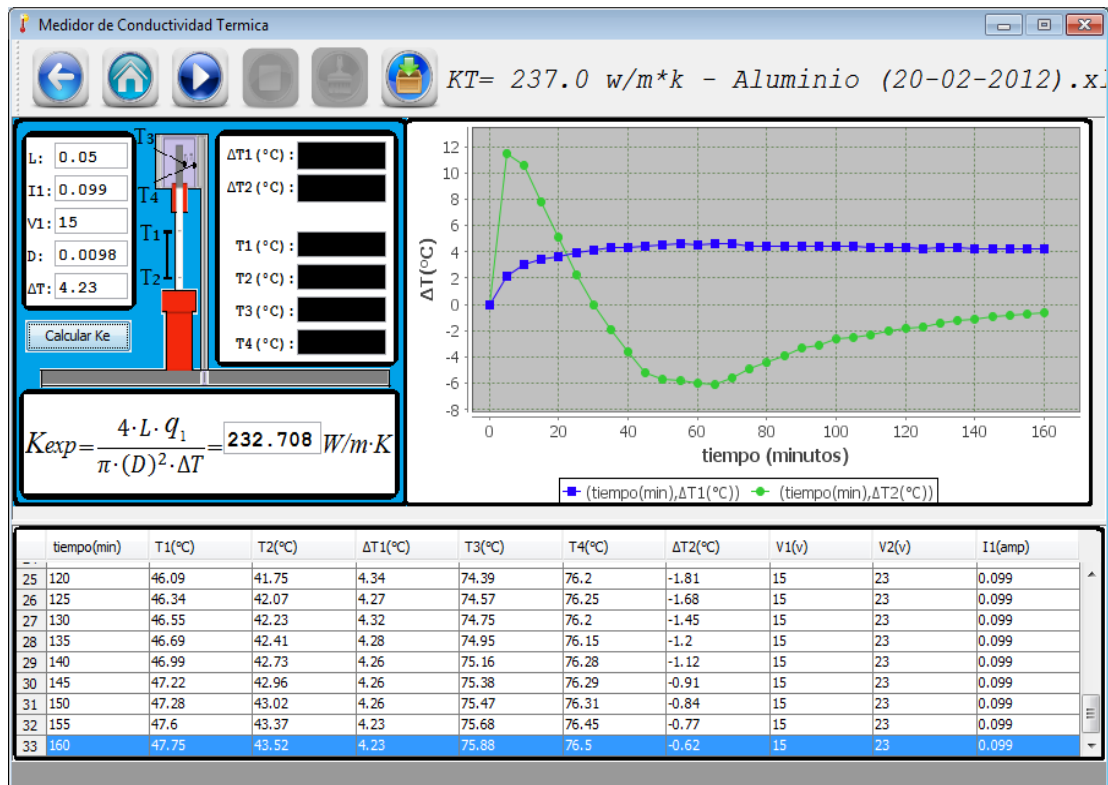


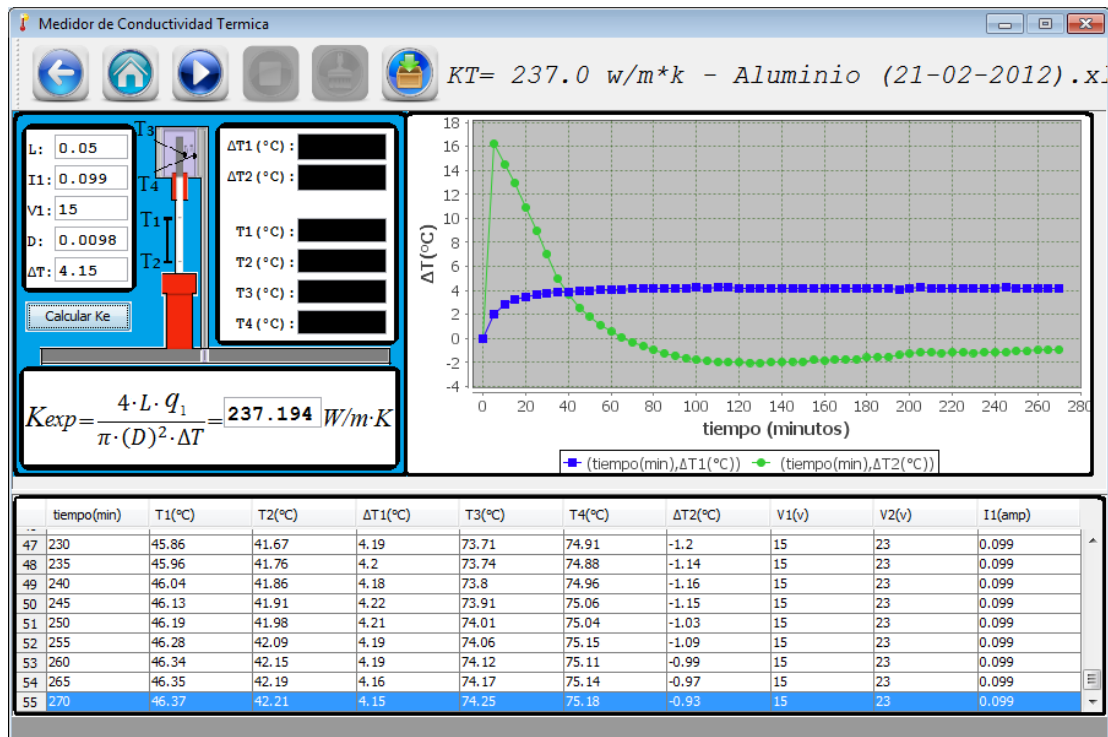
Figura 5.1: Ensayo Experimental N°1

Como se muestra en la figura anterior la conductividad térmica experimental de este ensayo fue de 232,708 W/m K dejando un margen de error del 1,81% con respecto a la conductividad térmica teórica característica del material.

#### Ensayo experimental N°2:

En la figura 5.2 se muestra la conclusión del ensayo realizado el 21, de febrero del 2012, para la probeta de aluminio con las especificaciones mostradas, la gráfica de variación de la temperatura en el sistema (ΔT1 y ΔT2 vs Tiempo) y la conductividad térmica obtenida experimentalmente.



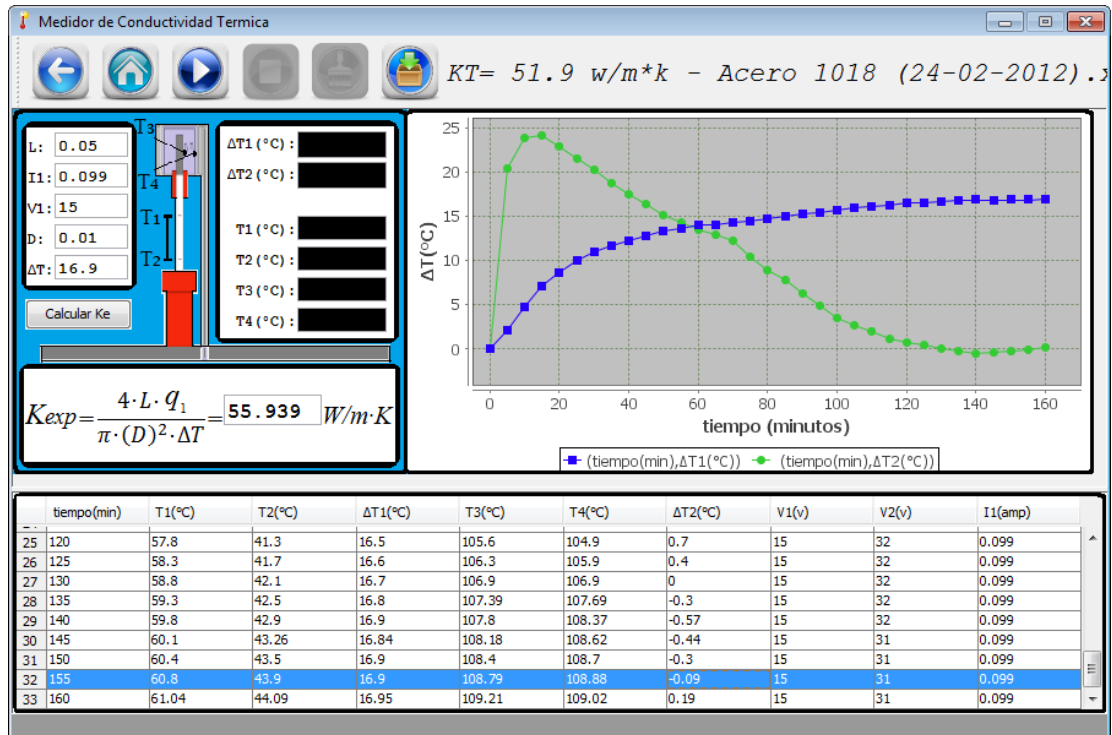


**Figura 5.2:** Ensayo Experimental N°2

Como se muestra en la figura anterior la conductividad térmica experimental de este ensayo fue de 237,194 W/m K dejando un margen de error del 0,08% con respecto a la conductividad térmica teórica característica del material.

Ensayo experimental N°3:

En la figura 5.3 se muestra la conclusión del ensayo realizado el 24, de febrero del 2012, para la probeta de acero 1018 con las especificaciones mostradas, la gráfica de variación de la temperatura en el sistema (ΔT1 y ΔT2 vs Tiempo) y la conductividad térmica obtenida experimentalmente.

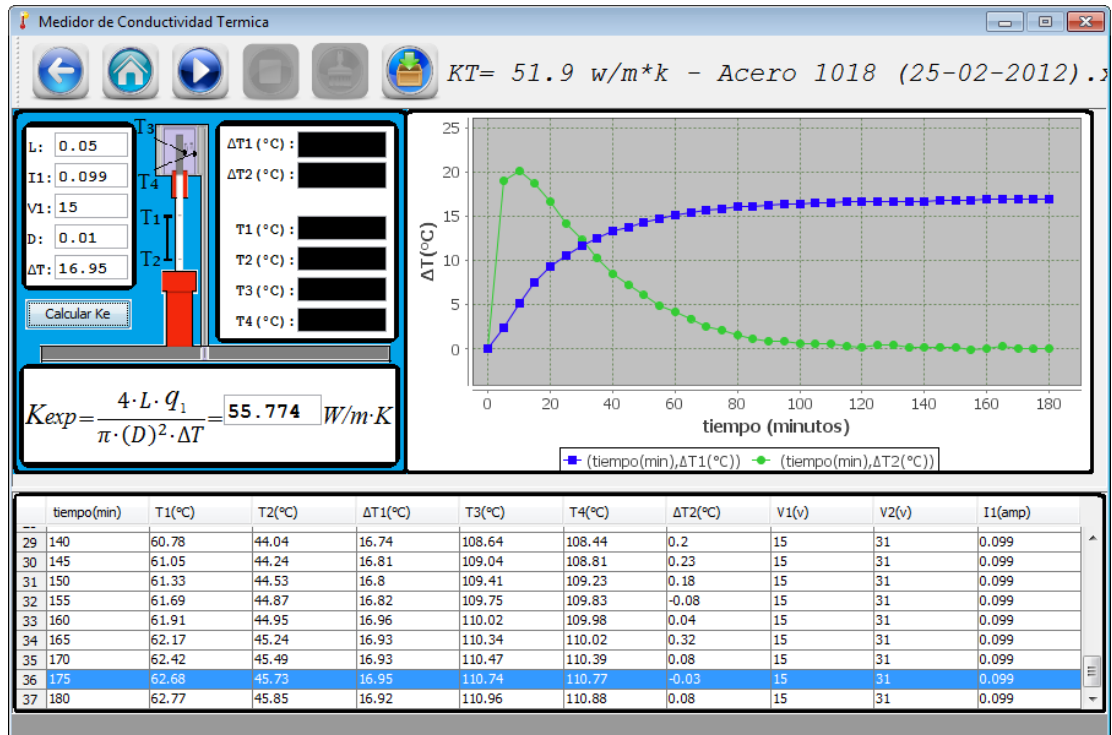


**Figura 5.3:** Ensayo Experimental N°3

Como se muestra en la figura anterior la conductividad térmica experimental de este ensayo fue de 55,939 W/m K dejando un margen de error del 7,78% con respecto a la conductividad térmica teórica característica del material.

Ensayo experimental N°4:

En la figura 5.4 se muestra la conclusión del ensayo realizado el 25, de febrero del 2012, para la probeta de acero 1018 con las especificaciones mostradas, la gráfica de variación de la temperatura en el sistema ( $\Delta T1$  y  $\Delta T2$  vs Tiempo) y la conductividad térmica obtenida experimentalmente.

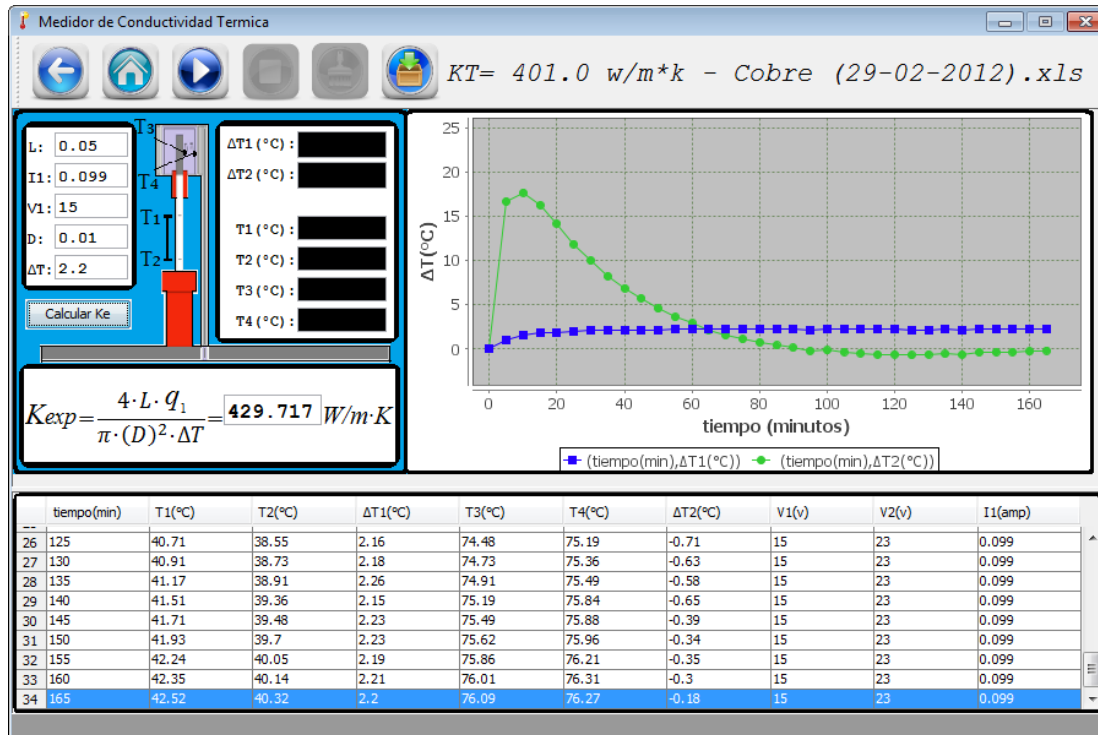


**Figura 5.4:** Ensayo Experimental N°4

Como se muestra en la figura anterior la conductividad térmica experimental de este ensayo fue de 55,774 W/m K dejando un margen de error del 7,46% con respecto a la conductividad térmica teórica característica del material.

Ensayo experimental N°5:

En la figura 5.5 se muestra la conclusión del ensayo realizado el 29, de febrero del 2012, para la probeta de cobre con las especificaciones mostradas, la gráfica de variación de la temperatura en el sistema (ΔT1 y ΔT2 vs Tiempo) y la conductividad térmica obtenida experimentalmente.



**Figura 5.5:** Ensayo Experimental N°5

Como se muestra en la figura anterior la conductividad térmica experimental de este ensayo fue de 429,717 W/m K dejando un margen de error del 7,16% con respecto a la conductividad térmica teórica característica del material.

## 5.2. Análisis de Resultados.

Analizando los valores de las conductividades térmicas obtenidas en todos los ensayos podemos resaltar; que complementando la base de datos con el software del laboratorio virtual se obtuvieron resultados con buena precisión, dejando errores que van desde 0,08% hasta un máximo error del 7,78% por lo que el análisis realizado con el software del laboratorio virtual proporciona una mejor perspectiva al usuario para analizar el ensayo realizado, permitiendo obtener resultados satisfactorios.

Es importante destacar que la diferencia de temperatura esperada ( $\Delta T_1$ ) en materiales de alta conductividad tales como el caso del aluminio y el cobre; se empieza a observar en menor cantidad de tiempo que en los materiales de media conductividad térmica (acero), por lo que se puede asegurar que el tiempo de recolección de datos será menor o mayor según el material de ensayo.

El programa computacional del laboratorio virtual desarrollado permite ilustrar un determinado ensayo en tiempo real, pero también se puede ilustrar el ensayo con el botón “Demo” lo cual que permite ahorrar una cantidad inmensa de tiempo, y así obtener resultados, análisis y conclusiones en cuestión pocos minutos. Reproducir el ensayo en tiempo real tardara el mismo tiempo que se consume en el laboratorio durante la recolección de datos, donde hay ensayos que tardan hasta 270 minutos (4 horas y 30 minutos); por lo que en este aspecto el software del laboratorio virtual proporciona un gran avance y resulta de gran utilidad.

## **CAPITULO VI**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **6.1. Conclusiones**

Una vez realizada la investigación , se logró desarrollar un Laboratorio Virtual de transferencia de calor por conducción para la cátedra de Transferencia de Calor, basándose en el banco de ensayo real (Medidor de Conductividad Térmica), con la finalidad de ilustrar al estudiante acerca del funcionamiento individual y colectivo de cada uno de los elementos que conforman el mismo, familiarizando y preparándolo así de manera remota a las respectivas experiencias que tiene que realizar el ensayo en físico, pero en un tiempo mucho menor y con una dinámica más ilustrativa, esquematizada que proporciona una perspectiva mucho más amplia para la comprensión y el análisis de los fenómenos presentes en el ensayo.

Para lograr el completo desarrollo del programa del laboratorio virtual puntualmente podemos concluir que:

- Se realizó una revisión exhaustiva de los trabajos o antecedentes previos, relacionados al tema desarrollado, los cuales fueron el punto de partida para el desarrollo del laboratorio virtual de transferencia de calor por conducción, ya que brindaron la información necesaria, que permitió entender que era un proyecto factible de ser realizado, visualizando así el enfoque con el cual se desarrolló el presente trabajo.
- Se estudió el completo funcionamiento del banco de pruebas de transferencia de calor por conducción existente en el laboratorio de transferencia de calor para así generar una dinámica ilustrativa mucho más esquematizada en cuanto

al funcionamiento individual y colectivo de cada uno de los elementos que conforman el banco de ensayo. Todo en función del aprendizaje del estudiante.

- Se desarrollaron los algoritmos de cálculo para cada una de las experiencias, permitiendo la simulación de los ensayos, siempre enfocado en el estudio de la transferencia de calor por conducción.
- Se elaboró una metodología para complementar los datos obtenidos del banco de ensayo existente con el programa computacional del laboratorio virtual desarrollado que proporciona un ahorro considerable de tiempo y que facilita la utilización colectiva del programa por la comunidad estudiantil, evitando así la aglomeración innecesaria y poco productiva de estudiantes en el laboratorio de transferencia de calor.
- La interfaz de la práctica se diseñó lo más cercanamente posible a la realidad, preservando las características más resaltantes, para lograr el propósito de familiarización del estudiante con el banco de ensayos. Es importante resaltar que el fondo y los colores que componen la interfaz fueron seleccionados cuidadosamente teniendo como base la psicopedagogía y aprendizajes de la vida cotidiana.
- Se realizó la codificación de los algoritmos de cálculo en lenguaje Java, un lenguaje de alto nivel actualmente muy popular en el mundo de la programación debido a la flexibilidad de aplicaciones que brinda y que para fines de este proyecto resultó ideal.

- El programa computacional del laboratorio virtual obtuvo resultados con buena precisión, ya que la conductividad térmica obtenida experimentalmente respecto a la conductividad térmica teórica característica del material dejó errores que van desde 0,08% hasta un máximo error del 7,78% por lo que el análisis realizado con el programa del laboratorio virtual proporciona una mejor perspectiva al usuario para analizar el ensayo realizado, permitiendo obtener resultados satisfactorios y validando así los resultados obtenidos en el banco de ensayo con el programa computacional del laboratorio virtual desarrollado.

## **6.2. Recomendaciones**

- Utilizar en todo momento el manual del usuario, ya que este suministra instrucciones detalladas acerca del uso y funcionamiento del programa del laboratorio virtual desarrollado.
- Aplicar el programa computacional desarrollado en la cátedra de Transferencia de Calor en la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad de Carabobo.
- Suministrar el programa computacional desarrollado a los profesores de la cátedra de Transferencia de calor de Calor de la facultad de ingeniería mecánica de la Universidad de Carabobo.
- Realizar la práctica de transferencia de calor por conducción desde el salón de clase, a fin de ahorrar tiempo y evitar el congestionamiento improductivo del estudiantado en el laboratorio de transferencia de calor.



- Complementar la base de datos desarrollada con nuevos ensayos de diferentes materiales.

## BIBLIOGRAFÍA:

Alejandro, C. y Perdomo, J. (2009), Aproximando el laboratorio virtual de física general al laboratorio real. Revista Iberoamericana de Educación. Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Universidad Central

Amaya, G., (2009). Laboratorios reales versus laboratorios virtuales, en la enseñanza de la física. El hombre y la máquina, Vol. XXI, Núm. 33, julio-diciembre, 2009, pp. 82-95. Universidad Autónoma de Occidente. Colombia.

Barreto G. J., & Leo P. A. A., (2009). *Desarrollo de un laboratorio virtual para la cátedra de mecánica de los fluidos*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Cengel, Y (2007). *Transferencia de calor y masa*. (3<sup>era</sup> ed.). México DF: Mc Graw- Hill

Cengel, Y y Boles, M (2007). *Termodinámica*. (5<sup>ta</sup> ed.). México DF: Mc Graw-Hill

Deitel, H y Deitel, P. (2007). *Java: How to program*. (7<sup>a</sup> ed.). Prentice–Hall

González, N., & Ramírez, Néstor., (2003). *Diseño y construcción de un dispositivo para medir la conductividad térmica materiales sólidos*. Trabajo especial de grado, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Holman, J. P., (1998) *Transferencia de calor*. (8<sup>va</sup> ed.). Mc Graw- Hill

Incropera F. y De Witt, D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. (4<sup>a</sup> ed.). México: Prentice Hall

Joyanes, A (1999). *Fundamentos de programación. Algoritmos, estructuras de datos y objetos*. (3<sup>era</sup> ed.). México DF: Mc Graw- Hill

Leal, L., & Zeis, R., (1974). *Medición de la conductividad térmica en aislantes*. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.

Norton, R. L. (1999). *Diseño de máquinas*. México: Prentice Hall

Polya, G. (1981). *Cómo plantear y resolver problemas*. Méjico: Trillas

Rosado L. Y Herreros J. R. (2005). Nuevas aportaciones didácticas de los laboratorios virtuales y remotos en la enseñanza de la Física. Recent Research Developments in Learning Technologies. Formatex. Disponible en: <http://www.uv.es/eees/archivo/286.pdf>

Tejada, J., & Alejos, A., (1974). *Diseño y construcción de un aparato para la medición de la conductividad térmica en metales*. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.

Welty, J. R., Wicks, C. E., & Wilson, R. E. (1999). *Fundamentos de Transferencia de calor y masa*. Editorial Limusa.

Biblioteca sobre Ingeniería Energética por Pedro Fernández Díez. (2009). [On-line]. Disponible en: <http://libros.redsauce.net/IngenieriaTermica/Teoria/PDFs/01.pdf>

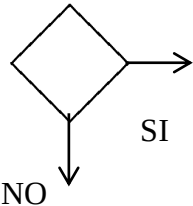
## **ANEXOS**

|                                                | <b>Pág.</b> |
|------------------------------------------------|-------------|
| A.1. Simbología de los diagramas de flujo..... | 119         |
| A. 2 Manual del usuario.....                   | 126         |

### **A.1 Diagramas de flujo**

Un diagrama de flujo (*flowchart*) es una herramienta técnica de representación de algoritmos. El diagrama de flujo utiliza los símbolos (cajas) estándar mostrados en la tabla A.1 y tiene los pasos del algoritmo escritos en esas cajas unidas por flechas, denominadas líneas de flujo, que indican la secuencia en que se debe ejecutar. Cada símbolo visto anteriormente en el trabajo desarrollado indica el tipo de operación a ejecutar y el diagrama de flujo ilustra gráficamente la secuencia en la que se ejecutan las operaciones.

**Tabla A.1 Simbología del diagrama de flujo.**

| Símbolos principales                                                                | Función                                                                                                                                                                                                               |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | Terminal: representa el comienzo, “inicio”, y el final, “fin” de un programa. Puede representar también una parada o interrupción programada que sea necesaria.                                                       |
|    | Entrada/Salida: cualquier tipo de introducción de datos en la memoria desde los periféricos, “entrada”, o registro de la información procesada en un periférico, “salida”.                                            |
|    | Proceso: cualquier tipo de operación que pueda originar cambio de valor, formato o posición de la información almacenada en la memoria, operaciones aritméticas, de transferencia, etc.                               |
|  | Decisión: indica operaciones lógicas o comparación entre datos, normalmente tiene dos salidas (respuestas SI o NO) y en función del resultado se determina cuál de los caminos alternativos del programa debe seguir. |
|  | Indicador de dirección o línea de flujo: indica el sentido de Ejecución de las operaciones.                                                                                                                           |
|  | Línea conectora: sirve de unión entre dos símbolos.                                                                                                                                                                   |
|  | Pantalla: se usa en ocasiones en lugar del símbolo de Entrada/Salida                                                                                                                                                  |

**Fuente:** Joyanes, A. 1999

## **A.2 Manual del usuario.**

### **A.2.1 Acerca del Laboratorio de transferencia de calor por conducción.**

El programa desarrollado comprende un laboratorio virtual para el estudio de la transferencia de calor por conducción; con el que se podrán demostrar los fenómenos presentes en este campo de estudio, ilustrado de forma dinámica y esquematizada cada uno de los elementos que conforman el banco ensayo real permitiendo así un mayor entendimiento, ahorrando mayor espacio y tiempo para la realización de los ensayos.

Es necesario destacar que este programa computacional está destinado a personas con conocimientos básicos en termodinámica y transferencia de calor, por lo que se recomienda antes de su utilización un conocimiento previo en estas áreas o haber recibido la ilustración de un profesor autorizado por la cátedra de Transferencia de Calor de la Escuela de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Carabobo.

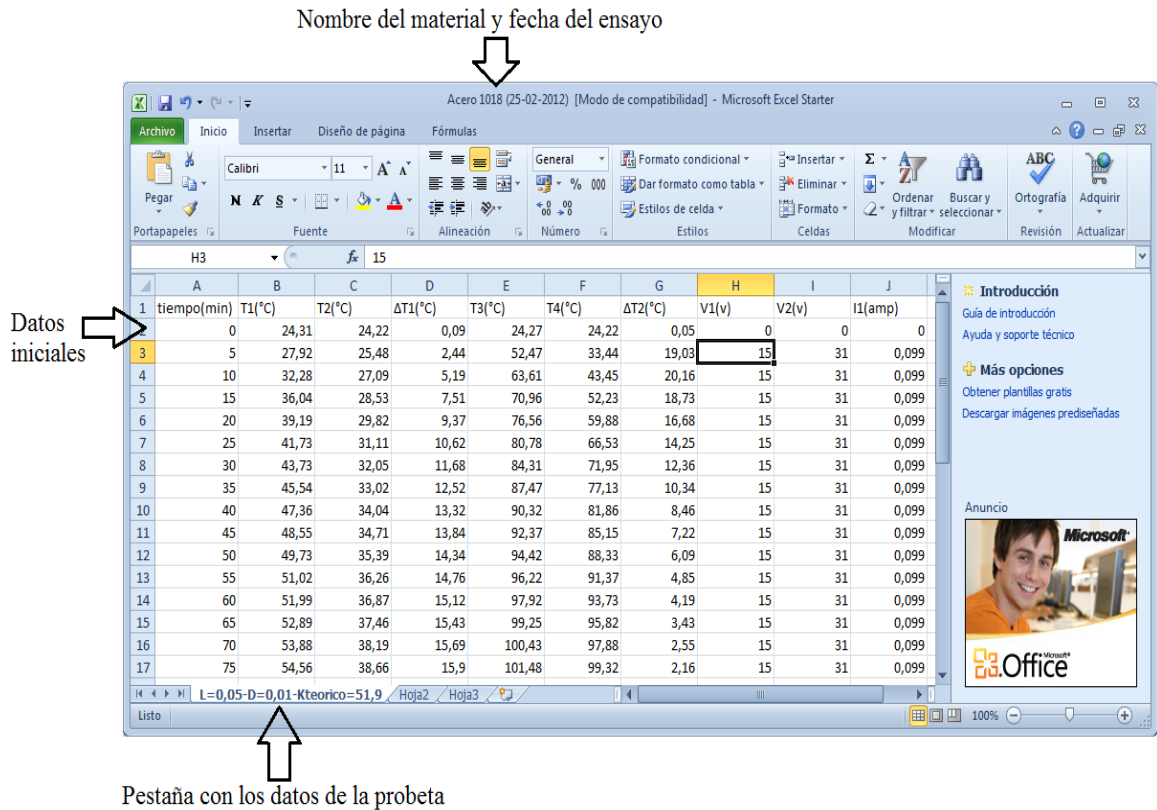
### **A.2.3 Base de Datos.**

La base de datos comprende una carpeta contenida de archivos de Microsoft Excel 97-2003 (.xls). , donde cada archivo comprende un ensayo realizado en una fecha para un determinado material. El procedimiento para desarrollar la base de datos es de la siguiente forma:

- Inicialmente abre el recinto acrílico para realizar el montaje o cambio de probeta del material, para luego sellar nuevamente el recinto acrílico.
- La instalación del recolector de datos mostrado en la figura 4. 2, que va conectado de sus respectivos puertos a los termopares que dan las temperaturas del estudio y del recolector de datos a el ordenador vía USB. Una vez conectado, su programa (Instacal) muestra en tiempo real estas medidas de temperaturas.

- Se construye una tabla en Exel como se muestra en la siguiente figura 4.21, donde se toman las temperaturas iniciales de la probeta antes de aplicar cualquier carga calórica, luego se encienden los reguladores del voltaje y empieza la recolección de datos; donde se toman los valores de las cuatro temperaturas, el volteje que entregan los dos reguladores y la corriente eléctrica que genera el primer regulador(I1); estos cada 5 minutos hasta que se alcance la condición de flujo de calor en estado estable ( $T3 \cong T4$  y  $\Delta T1 \cong$  constante).
- Una vez recolectados todos los datos, en la pestaña del nombre de la hoja donde se realizó la tabla de Exel se escriben los datos respectivos de la probeta tales como; la longitud entre T1 y T2 (L) en metros, el diámetro de la probeta en (D) en metros y la conductividad térmica teórica del material en estudio (Kteórico) en W/m\* K, tal cual como se muestra en la figura 4.21.
- Se guarda el archivo de Microsoft Excel 97-2003 (.xls). en la carpeta de la base de datos con el nombre del material y la fecha en la que se realizó el ensayo como se muestra en la figura 4.21.





**Figura 4.21:** Datos del ensayo

#### A.2.4. Presentación del programa.

Inicialmente para ejecutar el programa del laboratorio virtual se hace doble clic sobre el enlace del programa, así inicia la debida presentación del mismo, con su respectivo título y autores del programa tal como se muestra en la Figura 4.4 (Presentación del programa).

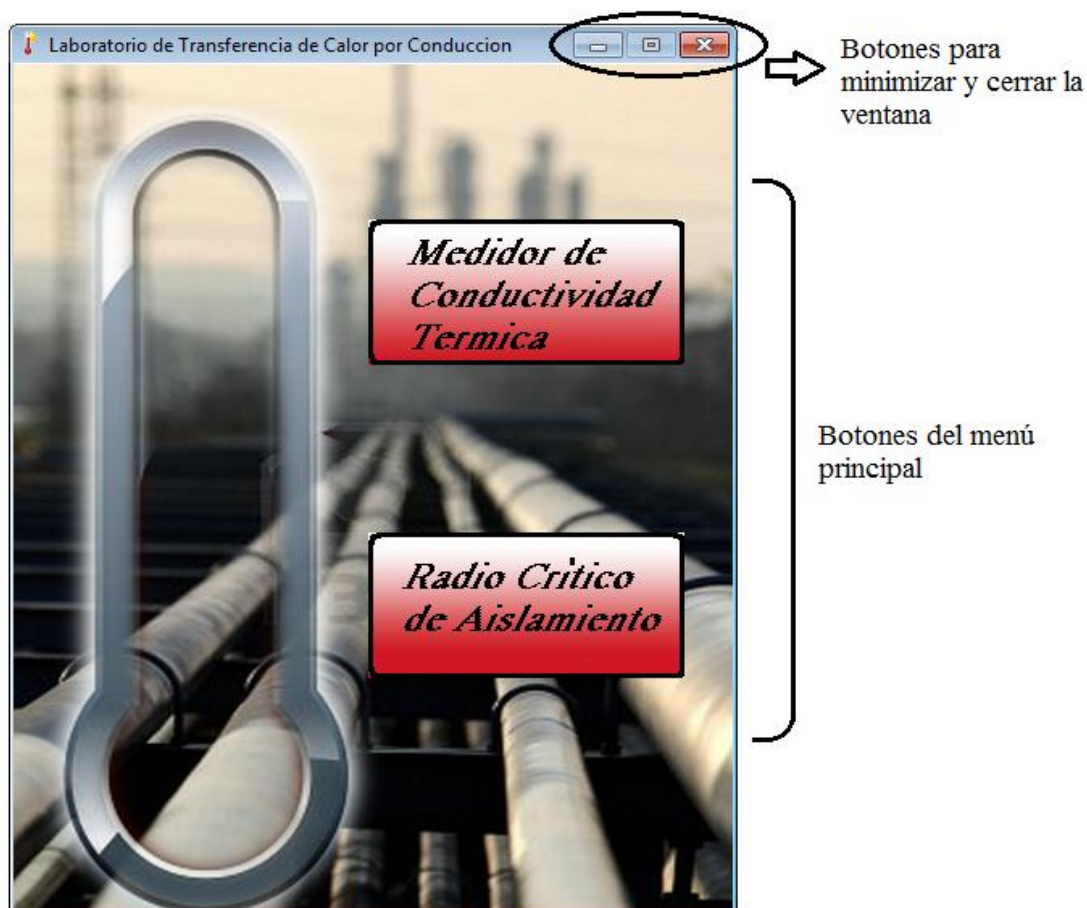


**Figura 4.4:** Ventana inicial

#### **A.2.5. Menú principal.**

El menú principal se encuentra luego de la presentación del programa, en la siguiente figura (Figura 4.5: Ventana inicial del laboratorio virtual de transferencia de calor por conducción) podemos observar cada detalle; los botones clásicos de minimizar y cerrar el programa, el nombre del programa acompañado por el icono del laboratorio virtual, con un fondo que da imagen de la aplicación industrial que tiene la asignatura.

En esta ventana aparecen dos botones para ingresar dentro del banco de ensayo “Medidor de Conductividad Térmica” y otro para ingresar a una herramienta de cálculo adicional del laboratorio de transferencia de calor por conducción conocida como “Radio Crítico de Aislamiento”.



**Figura 4.5:** Ventana inicial del laboratorio virtual de transferencia de calor por conducción.

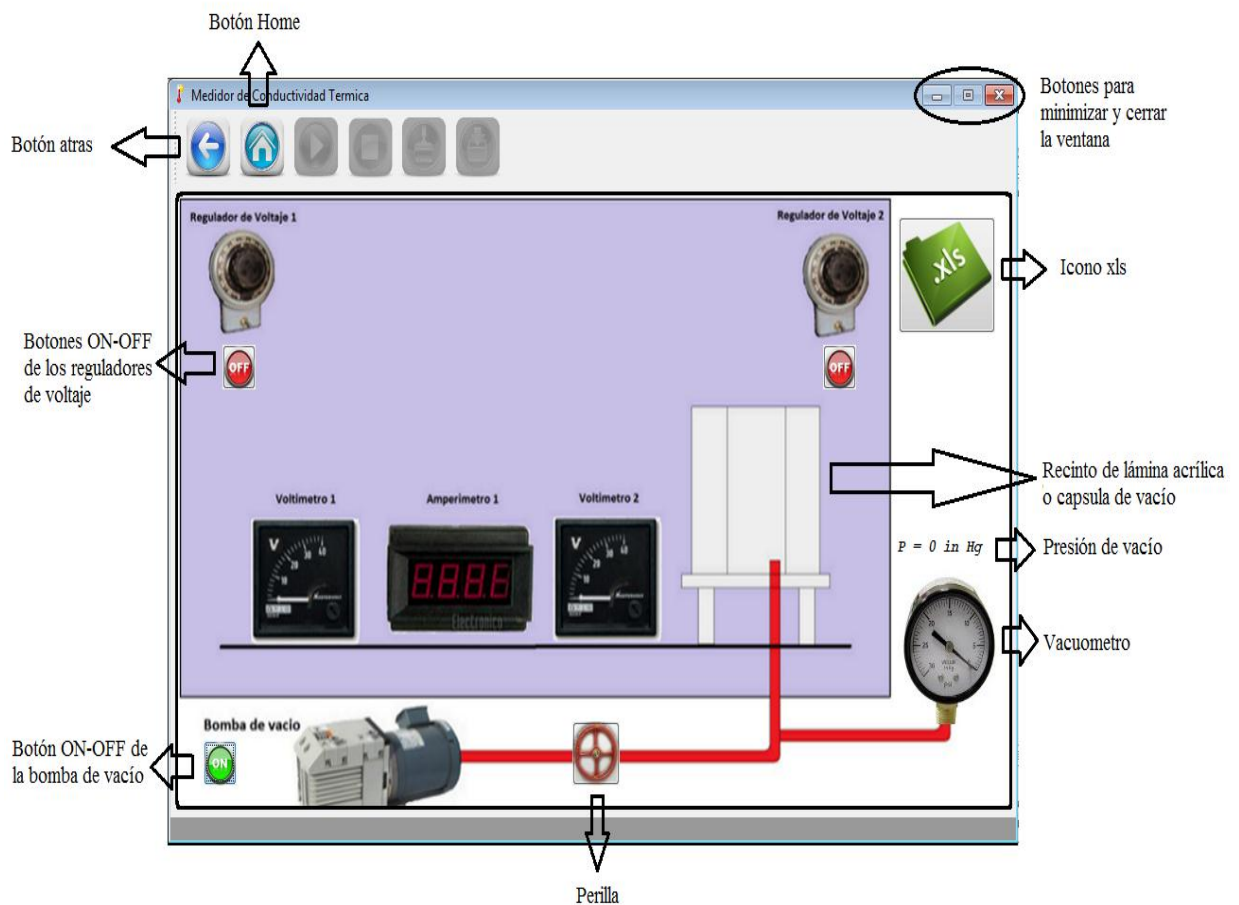
#### **A.2.6. Medidor de Conductividad Térmica.**

La interfaz de este módulo, mostrado en la figura 4.6, muestra esquemáticamente cada uno de los elementos que existen en el banco de ensayo real del laboratorio de transferencia de calor, banco de ensayo conocido como el “Medidor de Conductividad Térmica” antes explicado. Este esquema que basa en una ventana que muestra cada uno de los elementos que conforman el banco de ensayo, en el lugar exacto donde se encuentran en el laboratorio, tanto así que para proceder a

realizar un ensayo es necesario realizar el mismo proceso que se necesita en el laboratorio pero de forma virtual en la interfaz del programa.

Los elementos que conforman esta primera interfaz del Medidor de Conductividad Térmica son los que se ven en primera instancia o al primer contacto visual con el banco de ensayo real, con un elemento adicional, dicho elemento esta mostrado en la figura 4.26, estos son:

- Regulador de voltaje 1
- Regulador de voltaje 2
- Voltímetro 1
- Voltímetro 2
- Amperímetro 1
- Bomba de vacío
- Recinto de lámina acrílica o capsula de vacío
- Vacuometro
- Perilla
- Icono xls

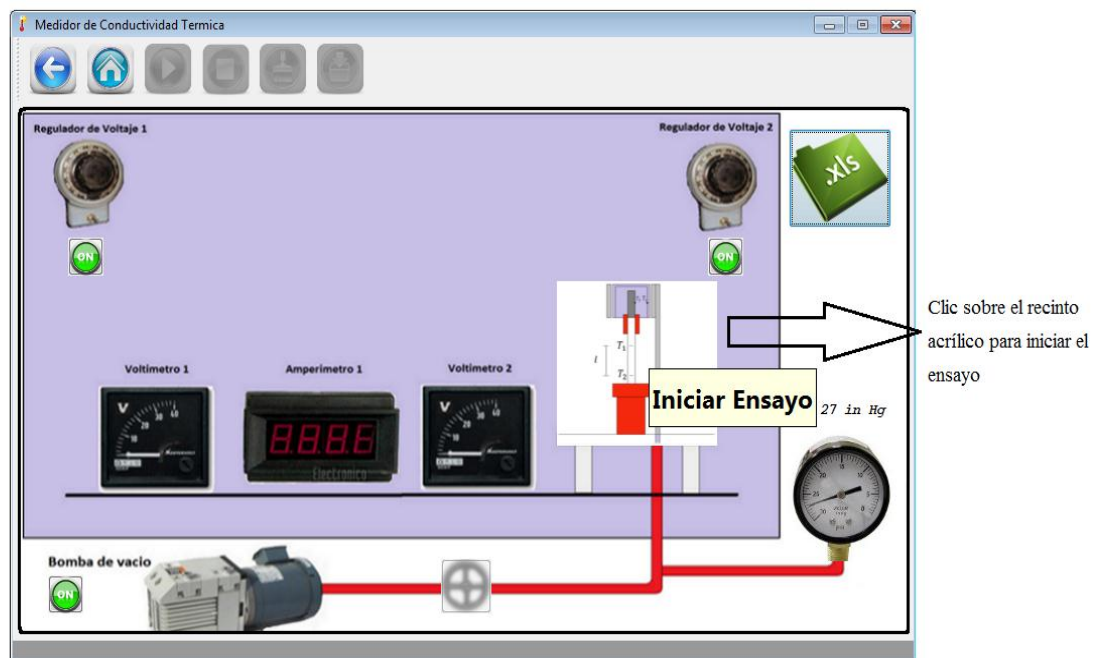


**Figura 4.6:** Medidor de conductividad Térmica.

Un elemento adicional incluido en esta primera interfaz del medidor de conductividad térmica (a diferencia de lo existente en el banco de ensayo real), es el “Icono .xls” donde se van a cargar la data de los ensayos realizados en el laboratorio, esta data debe estar guardada en cualquier dirección dentro del computador en un archivo Excel tipo .xls o también llamado archivo Microsoft Excel 97-2003 (.xls). El otro elemento para destacar es la “Perilla” mostrada en la Figura 4.6, esta existe en el banco de ensayo real pero en la interfaz se utiliza para simular el vaciado del recinto acrílico, no como en el laboratorio donde esta se mantiene abierta en todo el ensayo, esto debido a que al alcanzar la presión deseada para que el coeficiente convectivo

dentro del recinto sea  $h \cong 0$ , esta perilla no se cierra porque durante el ensayo real se pierde la presión deseada ( $P = 26$  in Hg) luego de un corto tiempo; entonces lo que se hace es mantener la bomba encendida y la perilla abierta para no perder la presión de vacío y ella de este modo se mantiene en 27 in Hg durante todo el ensayo, garantizando así que no existan pérdidas de transferencia de calor por convección.

Para iniciar el ensayo es necesario preparar las condiciones necesarias para que el ensayo sea efectivo, es por ello que en esta primera interfaz del medidor de conductividad térmica se enfoca de esta manera. Inicialmente es necesario dar clic al botón de encendido de la bomba de tal forma que este en “ON” , luego se gira la perilla con solo arrastrar el director del mouse sobre el icono de la perilla simulando como si esta se estuviese abriendo, al mismo tiempo el vacuometro empieza a dar su medida de presión, y esta hay que llevarla hasta los 27 in Hg de presión vacuometrica, entonces se encienden ambos reguladores de voltaje sin importar el orden, y ahora si se puede dar clic al botón del icono .xls y cargar la data de un determinado material, al realizar esto se muestra en la ventana la señal de “Iniciar Ensayo” tal como se muestra en la figura 4.7. Haciendo clic en la bóveda de vacío para continuar.



**Figura 4.7:** Señal para iniciar el ensayo en el Medidor de conductividad Térmica.

En la segunda interfaz gráfica se muestra esquemáticamente en montaje de la probeta dentro del recinto acrílico. Inicialmente en la ventana sale la cargada con la data del ensayo seleccionado tal como en la figura 4.8, luego se arrastra la tabla con el cursor del mouse hacia abajo de tal forma que la ventana se vea como la figura 4.9.

Medidor de Conductividad Térmica

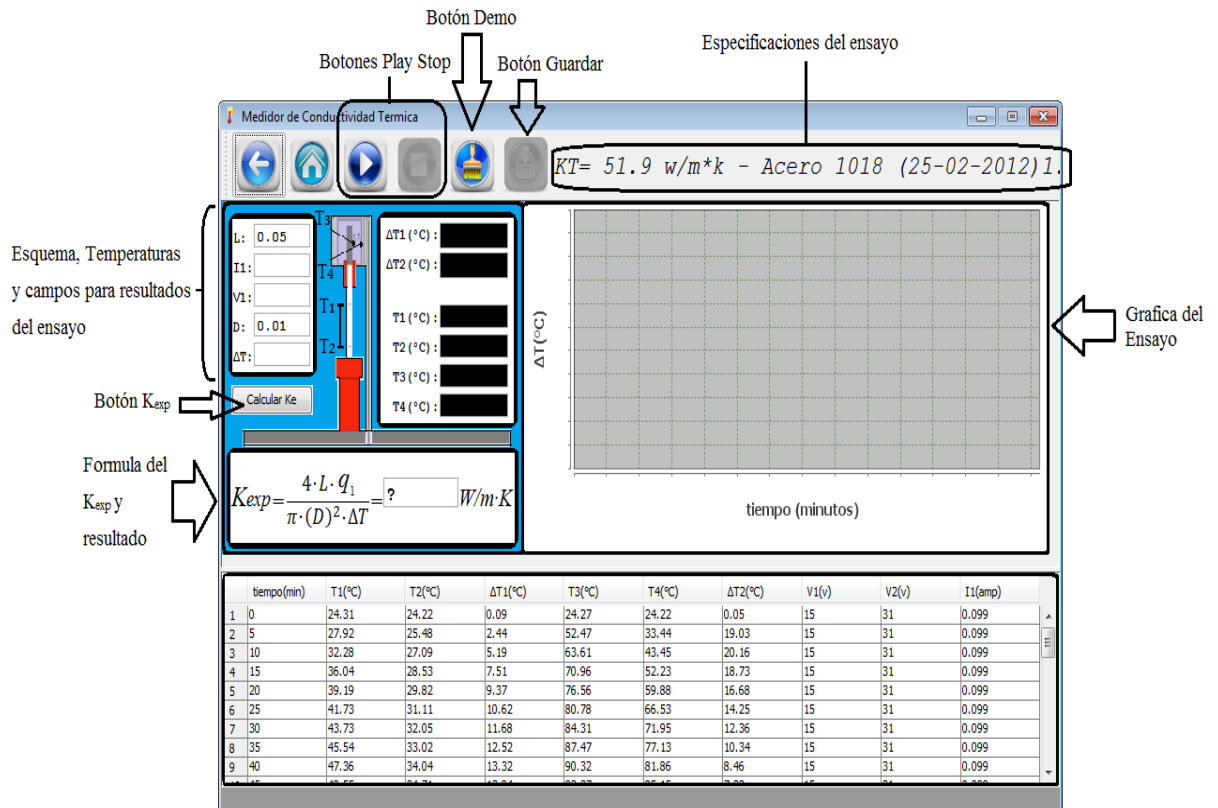
$KT = 51.9 \text{ w/m} \cdot \text{k} - \text{Acero 1018 (25-02-2012) 1.}$

|    | tiempo(min) | T1(°C) | T2(°C) | $\Delta T1(°C)$ | T3(°C) | T4(°C) | $\Delta T2(°C)$ | V1 | V2(v) | I1(amp) |
|----|-------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|-----------------|----|-------|---------|
| 1  | 0           | 24.31  | 24.22  | 0.09            | 24.27  | 24.22  | 0.05            | 15 | 31    | 0.099   |
| 2  | 5           | 27.92  | 25.48  | 2.44            | 52.47  | 33.44  | 19.03           | 15 | 31    | 0.099   |
| 3  | 10          | 32.28  | 27.09  | 5.19            | 63.61  | 43.45  | 20.16           | 15 | 31    | 0.099   |
| 4  | 15          | 36.04  | 28.53  | 7.51            | 70.96  | 52.23  | 18.73           | 15 | 31    | 0.099   |
| 5  | 20          | 39.19  | 29.82  | 9.37            | 76.56  | 59.88  | 16.68           | 15 | 31    | 0.099   |
| 6  | 25          | 41.73  | 31.11  | 10.62           | 80.78  | 66.53  | 14.25           | 15 | 31    | 0.099   |
| 7  | 30          | 43.73  | 32.05  | 11.68           | 84.31  | 71.95  | 12.36           | 15 | 31    | 0.099   |
| 8  | 35          | 45.54  | 33.02  | 12.52           | 87.47  | 77.13  | 10.34           | 15 | 31    | 0.099   |
| 9  | 40          | 47.36  | 34.04  | 13.32           | 90.32  | 81.86  | 8.46            | 15 | 31    | 0.099   |
| 10 | 45          | 48.55  | 34.71  | 13.84           | 92.37  | 85.15  | 7.22            | 15 | 31    | 0.099   |
| 11 | 50          | 49.73  | 35.39  | 14.34           | 94.42  | 88.33  | 6.09            | 15 | 31    | 0.099   |
| 12 | 55          | 51.02  | 36.26  | 14.76           | 96.22  | 91.37  | 4.85            | 15 | 31    | 0.099   |
| 13 | 60          | 51.99  | 36.87  | 15.12           | 97.92  | 93.73  | 4.19            | 15 | 31    | 0.099   |
| 14 | 65          | 52.89  | 37.46  | 15.43           | 99.25  | 95.82  | 3.43            | 15 | 31    | 0.099   |
| 15 | 70          | 53.88  | 38.19  | 15.69           | 100.43 | 97.88  | 2.55            | 15 | 31    | 0.099   |
| 16 | 75          | 54.56  | 38.66  | 15.9            | 101.48 | 99.32  | 2.16            | 15 | 31    | 0.099   |
| 17 | 80          | 55.29  | 39.22  | 16.07           | 102.32 | 100.73 | 1.59            | 15 | 31    | 0.099   |
| 18 | 85          | 56.01  | 39.87  | 16.14           | 103.08 | 101.92 | 1.16            | 15 | 31    | 0.099   |
| 19 | 90          | 56.53  | 40.23  | 16.3            | 103.85 | 102.95 | 0.9             | 15 | 31    | 0.099   |
| 20 | 95          | 56.99  | 40.63  | 16.36           | 104.56 | 103.65 | 0.91            | 15 | 31    | 0.099   |
| 21 | 100         | 57.63  | 41.21  | 16.42           | 105.27 | 104.62 | 0.65            | 15 | 31    | 0.099   |
| 22 | 105         | 58.08  | 41.54  | 16.54           | 105.88 | 105.31 | 0.57            | 15 | 31    | 0.099   |
| 23 | 110         | 58.51  | 41.91  | 16.6            | 106.43 | 105.87 | 0.56            | 15 | 31    | 0.099   |
| 24 | 115         | 59.07  | 42.43  | 16.64           | 106.96 | 106.64 | 0.32            | 15 | 31    | 0.099   |
| 25 | 120         | 59.49  | 42.77  | 16.72           | 107.34 | 107.11 | 0.23            | 15 | 31    | 0.099   |
| 26 | 125         | 59.86  | 43.13  | 16.73           | 107.98 | 107.55 | 0.43            | 15 | 31    | 0.099   |
| 27 | 130         | 60.05  | 43.33  | 16.72           | 108.17 | 107.71 | 0.46            | 15 | 31    | 0.099   |
| 28 | 135         | 60.48  | 43.74  | 16.74           | 108.28 | 108.17 | 0.11            | 15 | 31    | 0.099   |
| 29 | 140         | 60.78  | 44.04  | 16.74           | 108.64 | 108.44 | 0.2             | 15 | 31    | 0.099   |

Se arrastra la tabla hacia abajo con  
el cursor del mouse

**Figura 4.8:** Medidor de conductividad Térmica





**Figura 4.9:** Medidor de conductividad Térmica

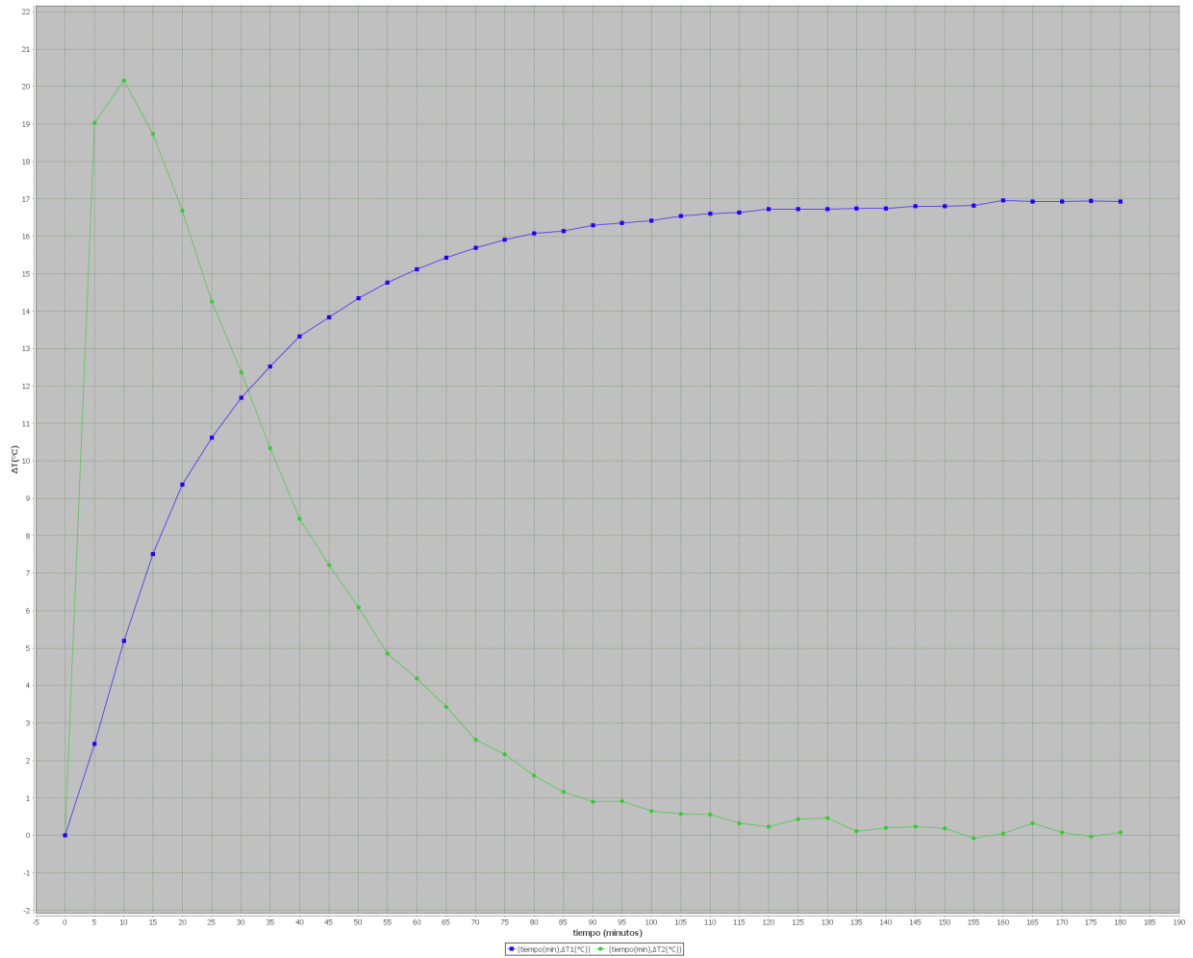
En esta ventana es donde se reproduce el ensayo con la data antes cargada; esta data contiene los valores de temperaturas en los cuatro puntos principales donde están conectados los termopares en el banco de ensayo real, cabe destacar que estos valores de temperaturas son tomados en intervalos de 5 minutos a lo largo del ensayo real y con estos construye la data del ensayo para un determinado material. La data del ensayo seleccionado contiene datos importantes del ensayo como el tipo de material, la conductividad térmica teórica (Kt) del mismo, la fecha de realización de la data, la longitud entre T1 y T2 (L) y el diámetro de la probeta (D); es por ello que al cargar la data de un determinado material se muestran ya precargados los valores de estas variables (como en la figura 4.9) y para modificarlos se tendría que modificar la data (modificar el archivo .xls).

En esta interfaz gráfica mostrada en la figura 4.9. Se muestran nuevos botones y a continuación se describe su respectiva función:

- Play: Reproduce el ensayo en tiempo real por lo que al activarlo muestra los cambios de temperaturas de los puntos mostrados en el esquema de la figura 4.9; así como los valores de  $\Delta T1$  y  $\Delta T2$  que vienen siendo:  $\Delta T1 = T1 - T2$  y  $\Delta T2 = T3 - T4$ .

Los valores de  $\Delta T1$  y  $\Delta T2$  son los que se grafican, por lo que el ensayo termina cuando se alcance un estado estable de conducción de calor, el cual se logra cuando  $T3 \cong T4$  donde  $\Delta T2 \cong 0$ , así se garantiza una mínima pérdida de calor por radiación entre la resistencia tipo cartucho y la lámina de aluminio.

- Demo: Reproduce el ensayo
- Stop: Detiene ensayo en cualquier momento conservando los valores con los que se detuvo y al presionar el botón Play o Demo luego; se inicia el ensayo nuevamente el ensayo.
- Guardar: Este almacena la gráfica resultante en cualquier dirección del ordenador con una resolución (figura 4.10) mayor a la que aparece en la interfaz gráfica del programa para así leer con mayor precisión el valor de  $\Delta T1$  una vez alcanzadas las condiciones de flujo de calor en estado estable.



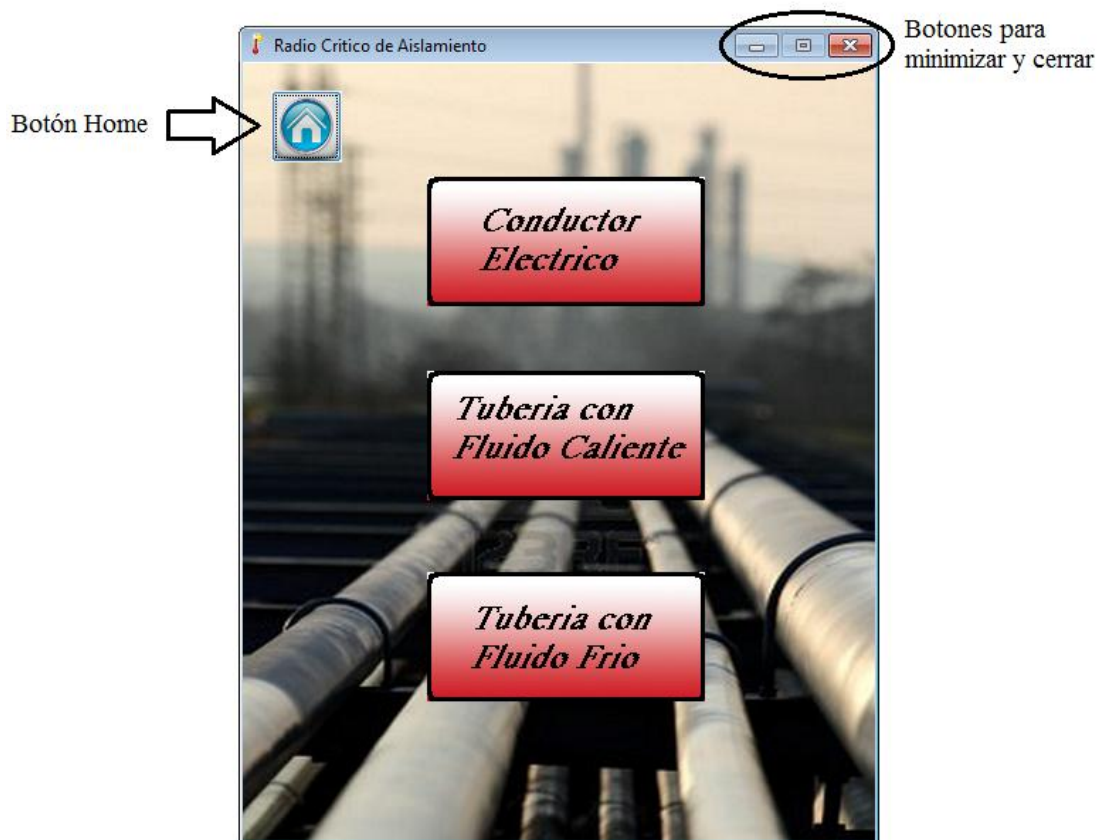
**Figura 4.10:** Grafica resultante del ensayo

- *Kexp*: con los resultados del ensayo se llenan los campos de las variables que determinan la conductividad térmica según la ecuación 2.44, también mostrada en la interfaz gráfica (figura 4.9). al llenar los campos de las variables de presiona el botón *Kexp* y el software determina el valor de la conductividad térmica obtenida experimentalmente según la ecuación:

$$k = \frac{4 \cdot l \cdot V}{\pi \cdot d^2 \cdot (T_1 - T_2)} \quad (2.44)$$

### A.2.7. Radio Crítico de Aislamiento.

La interfaz de este módulo llamado “Radio Crítico de Aislamiento” se muestra en la siguiente figura 4.11. Esta interfaz viene siendo una herramienta de cálculo para determinar un radio critico de aislamiento basado en tres de las principales aplicaciones de radio crítico, los cuales vienen dados según su determinado criterio en particular; estos son para “Un Conductor Eléctrico”, para “Tubería con Fluido Caliente” y “Tubería con Fluido Frio” tal como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 4.11:** Radio Critico de aislamiento

De igual forma en la interfaz de “Radio Crítico de Aislamiento” se muestran botones clásicos de cerrar y minimizar así como un botón Home que trae de vuelta al menú principal del programa.

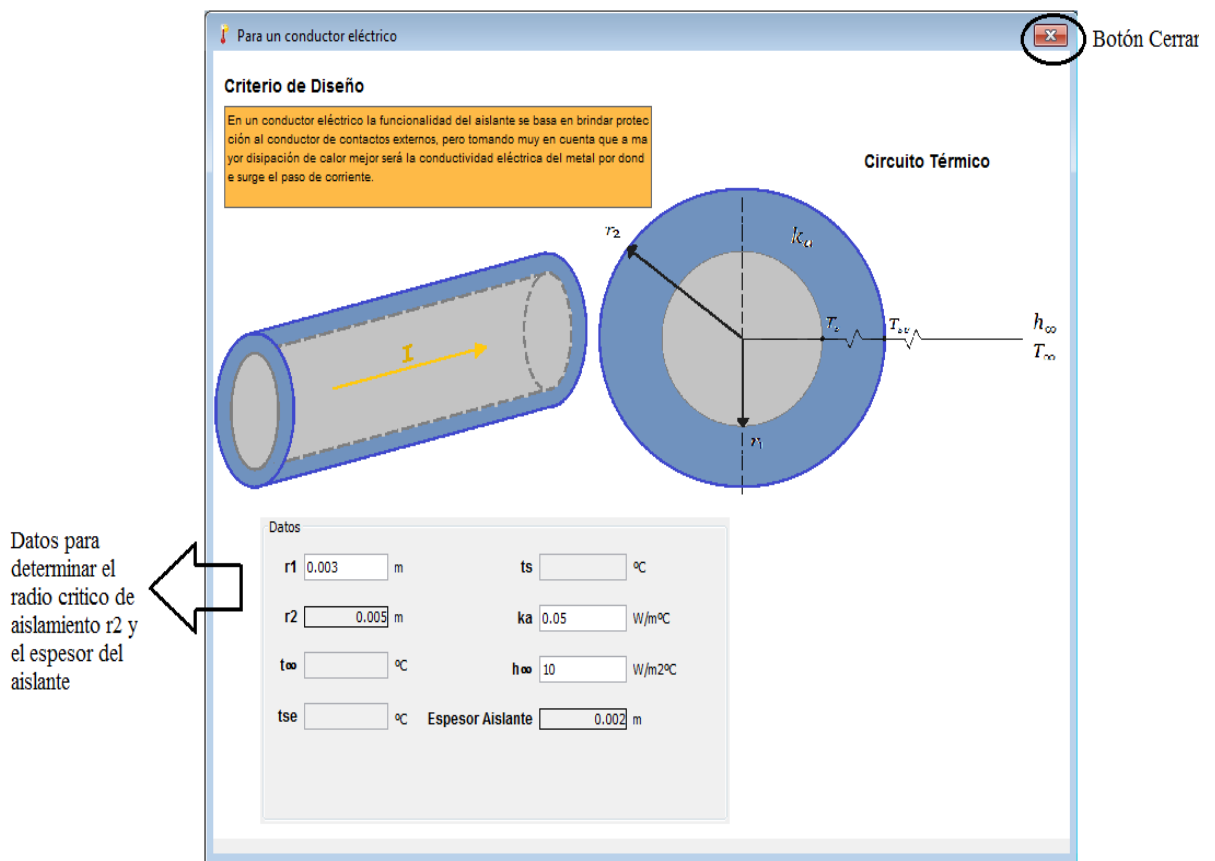
#### **A.2.8. Conductor Eléctrico.**

Este módulo se basa en calcular el radio crítico de aislamiento para un conductor eléctrico; es decir el radio crítico que define el espesor de un aislante que recubre conductor eléctrico o cable metálico por donde circula una determinada corriente eléctrica. Esta aplicación parte de un criterio de diseño especificado en la interfaz gráfica mostrada en la figura 4.12.

##### **Criterio de Diseño:**

“En un conductor eléctrico la funcionalidad del aislante se basa en brindar protección al conductor de contactos externos, pero tomando muy en cuenta que a mayor disipación de calor mejor será la conductividad eléctrica del metal por donde surge el paso de corriente.”

En la figura 4.12 también se muestra el circuito térmico correspondiente en esta aplicación y los parámetros con los que se calcula el radio crítico que en el caso vendría siendo  $r_2$  y el espesor de aislante la diferencia entre  $r_2$  y  $r_1$ . Dichos parámetros que determinan el radio crítico ( $r_2$ ) y el espesor de aislante son la conductividad térmica del aislante ( $K_a$ ), el coeficiente de transferencia de calor por convección  $h_\infty$  y el radio del conductor eléctrico ( $r_1$ ).



**Figura 4.12:** Radio crítico de aislamiento para un conductor eléctrico

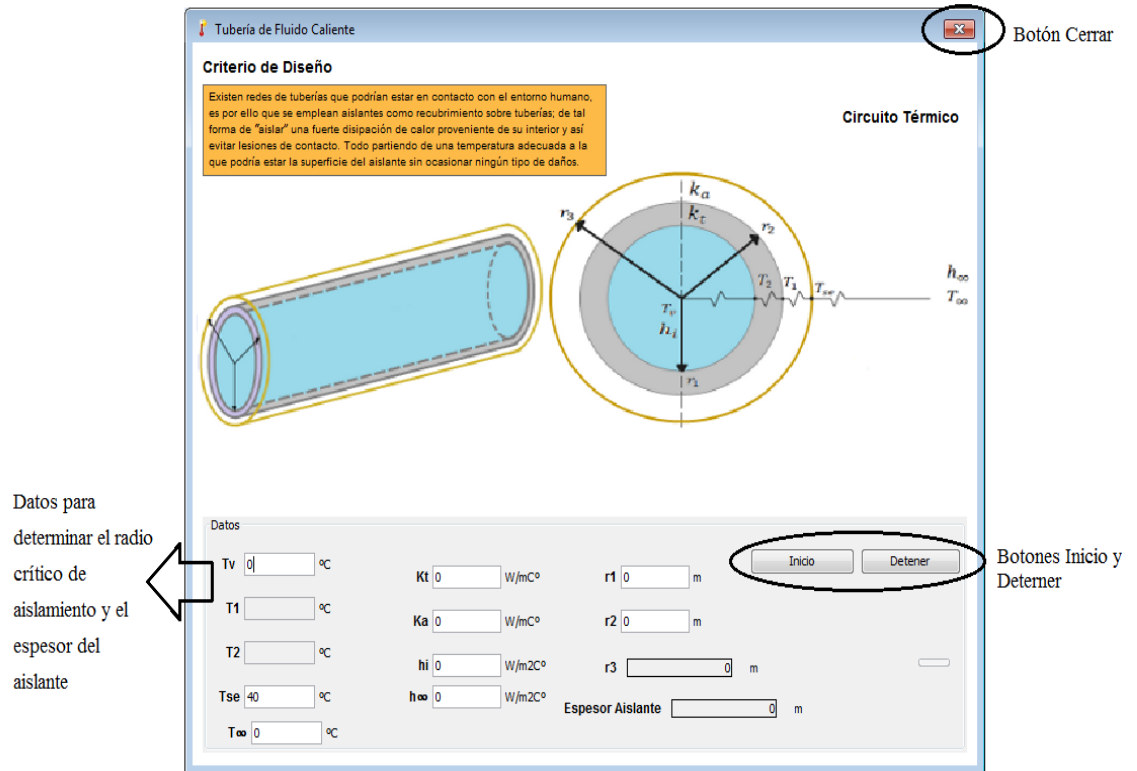
### A.2.9. Tubería con Fluido Caliente.

Este módulo se basa en calcular el radio crítico de aislamiento para una tubería que maneja fluidos a altas temperaturas; es decir el radio crítico que define el espesor de un aislante que recubre la superficie de una tubería cuando esta maneja fluidos a altas temperaturas. Esta aplicación parte de un criterio de diseño especificado en la interfaz gráfica mostrada en la figura 4.13.

**Criterio de Diseño:**

“Existen redes de tuberías que podrían estar en contacto con el entorno humano, es por ello que se emplean aislantes como recubrimiento sobre tuberías; de tal forma de “aislar” una fuerte disipación de calor proveniente de su interior y así evitar lesiones de contacto. Todo partiendo de una temperatura adecuada a la que podría estar la superficie del aislante sin ocasionar ningún tipo de daños.”

En la figura 4.13 también se muestra el circuito térmico correspondiente en esta aplicación y los parámetros con los que se calcula el radio crítico, que en el caso vendría siendo  $r_3$  y el espesor de aislante sería la diferencia entre  $r_3$  y  $r_2$ . Dichos parámetros que determinan el radio crítico ( $r_3$ ) y el espesor de aislante son: la conductividades térmicas del aislante ( $K_a$ ) y de la tubería ( $K_t$ ), los coeficientes de transferencia de calor por convección externo ( $h_\infty$ ) e interno ( $h_i$ ), el radio interno ( $r_1$ ) y externo ( $r_2$ ) de la tubería, la temperatura del fluido interno dentro de la tubería ( $T_v$ ), la temperatura de la superficie de la tubería ( $T_{se}$ ) y la temperatura externa del ambiente ( $T_\infty$ ).



**Figura 4.13:** Radio crítico de aislamiento para una tubería con Fluido Caliente.

Los botones de inicio y detener son de una simple función. Una vez llenados todos los campos respectivos de cada variable, entonces el botón de “Inicio” calcula el radio crítico de aislamiento ( $r_3$ ) y el espesor del aislante, con el botón “Detener” se vacían todos los campos nuevamente para realizar otro cálculo.

#### A.2.10. Tubería con Fluido Frio.

Este módulo se basa en calcular el radio crítico de aislamiento para una tubería que maneja fluidos a bajas temperaturas; es decir el radio crítico que define el espesor de un aislante que recubre la superficie de una tubería cuando esta maneja

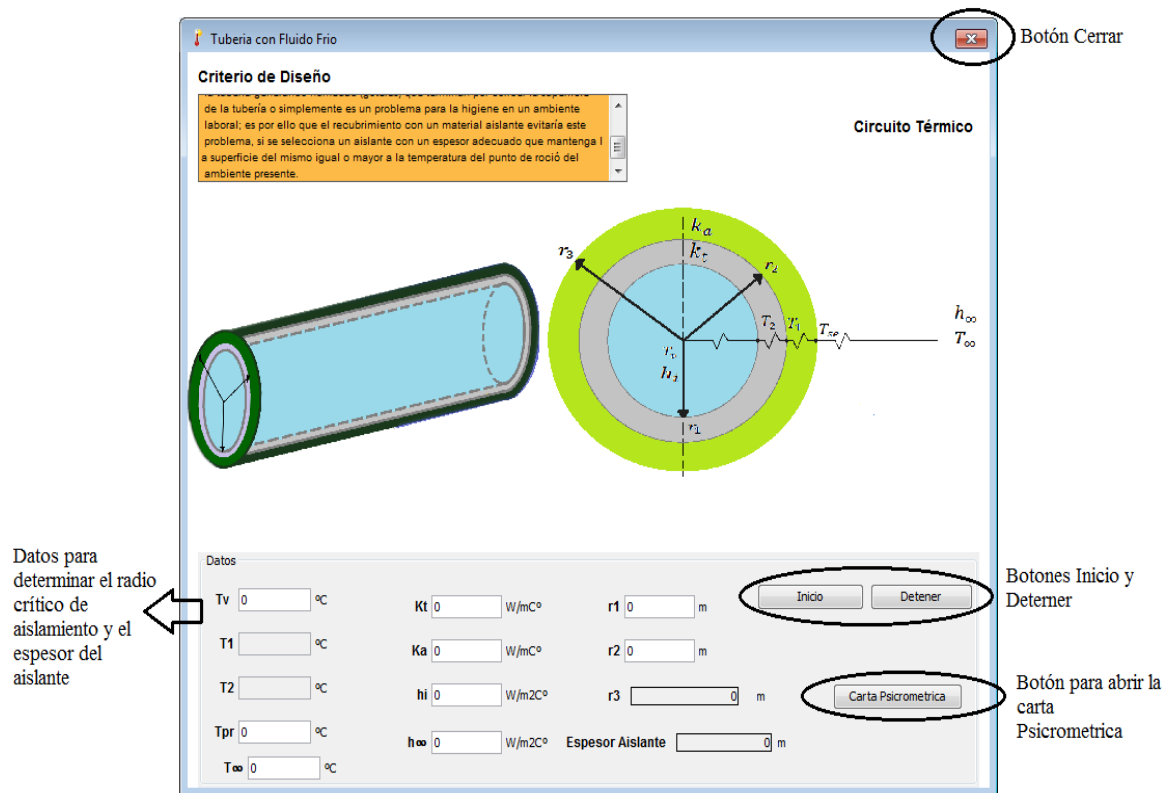


fluidos a bajas temperaturas. Esta aplicación parte de un criterio de diseño especificado en la interfaz gráfica mostrada en la figura 4.14.

**Criterio de diseño:**

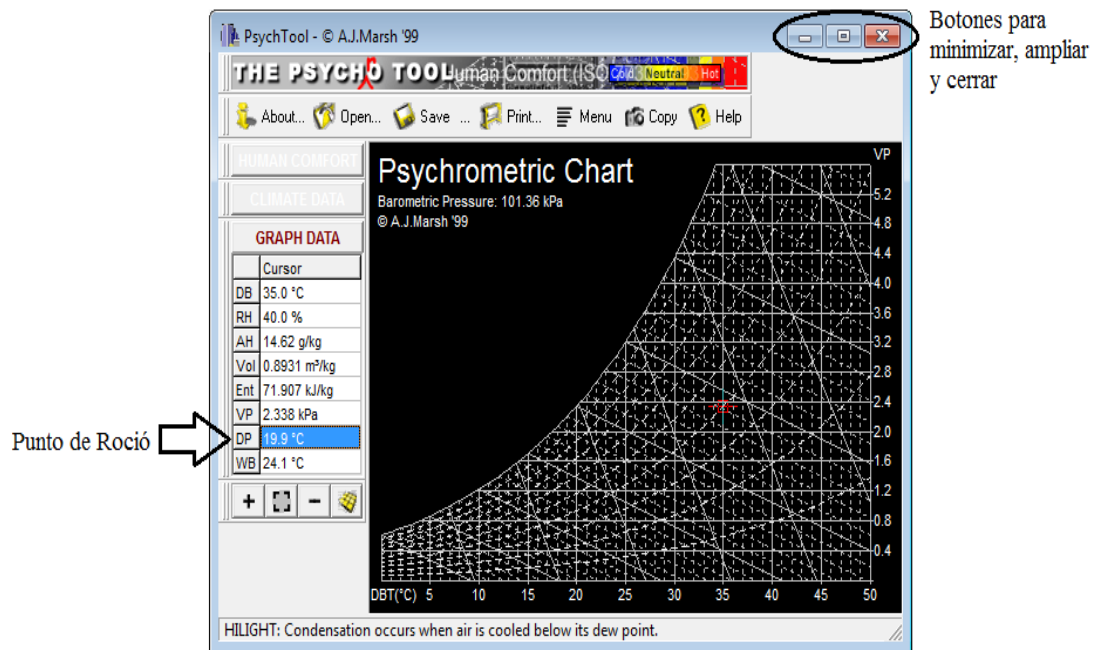
“Existen tuberías presentes en sistemas de refrigeración, acondicionamiento de aire, hasta en procesos industriales que transportan fluidos a muy bajas temperaturas, esto trae como consecuencia la condensación en la superficie de la tubería generando humedad (goteras) que terminan por corroer la superficie de la tubería o simplemente es un problema para la higiene en un ambiente laboral; es por ello que el recubrimiento con un material aislante evitaría este problema, si se selecciona un aislante con un espesor adecuado que mantenga la superficie del mismo igual o mayor a la temperatura del punto de rocío del ambiente presente.”

En la figura 4.14 también se muestra el circuito térmico correspondiente en esta aplicación y los parámetros con los que se calcula el radio crítico, que en el caso vendría siendo  $r_3$  y el espesor de aislante sería la diferencia entre  $r_3$  y  $r_2$ . Dichos parámetros que determinan el radio crítico ( $r_3$ ) y el espesor de aislante son: la conductividades térmicas del aislante ( $K_a$ ) y de la tubería ( $K_t$ ), los coeficientes de transferencia de calor por convección externo ( $h_\infty$ ) e interno ( $h_i$ ), el radio interno ( $r_1$ ) y externo ( $r_2$ ) de la tubería, la temperatura del fluido interno dentro de la tubería ( $T_v$ ), la temperatura de la superficie de la tubería ( $T_{pr}$ ) y la temperatura externa del ambiente ( $T_\infty$ ).



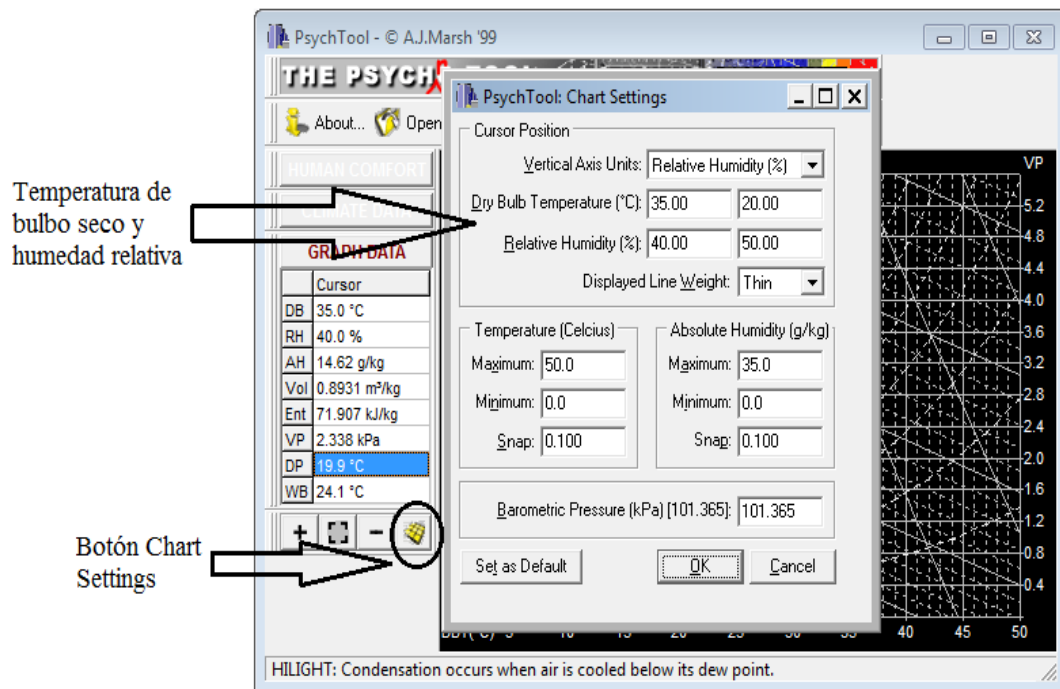
**Figura 4.14:** Radio critico de aislamiento para una tubería con Fluido Frio.

Los botones de inicio y detener son de una simple función. Una vez llenados todos los campos respectivos de cada variable, entonces el botón de “Inicio” calcula el radio crítico de aislamiento ( $r_3$ ) y el espesor del aislante, con el botón “Detener” se vacían todos los campos nuevamente para realizar otro cálculo. Adicionalmente existe un botón para abrir una carta psicométrico que viene dada por el programa PsychTool como se muestra en la figura con la figura 4.15. Esta herramienta se utiliza para determinar el punto de rocío del ambiente en el que se encuentra la tubería.



**Figura 4.15:** Carta Psicométrica.

Para determinar el punto de rocío con la herramienta mostrada, son necesarios al menos dos parámetros para graficar el punto en la carta psicrométrica, inicialmente se presiona el botón Chart Settings mostrado en la figura 4.16 y se introducen los datos de temperatura de bulbo seco (temperatura del ambiente) y la humedad relativa del lugar donde se encuentra la tubería. Se presiona el botón OK dentro de la misma ventana mostrada y el programa nos grafica el punto y nos muestra todos los parámetros involucrados en la carta psicrométrica tal como se mostró en la figura 4.15 con el punto de rocío buscado.



**Figura 4.16:** Carta Psicométrica (introducción de parámetros)

## **A.2 Manual del usuario.**

### **A.2.1 Acerca del Laboratorio de transferencia de calor por conducción.**

El programa desarrollado comprende un laboratorio virtual para el estudio de la transferencia de calor por conducción; con el que se podrán demostrar los fenómenos presentes en este campo de estudio, ilustrado de forma dinámica y esquematizada cada uno de los elementos que conforman el banco ensayo real permitiendo así un mayor entendimiento, ahorrando mayor espacio y tiempo para la realización de los ensayos.

Es necesario destacar que este programa computacional está destinado a personas con conocimientos básicos en termodinámica y transferencia de calor, por lo que se recomienda antes de su utilización un conocimiento previo en estas áreas o haber recibido la ilustración de un profesor autorizado por la cátedra de Transferencia de Calor de la Escuela de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Carabobo.

### **A.2.3 Base de Datos.**

La base de datos comprende una carpeta contenida de archivos de Microsoft Excel 97-2003 (.xls). , donde cada archivo comprende un ensayo realizado en una fecha para un determinado material. El procedimiento para desarrollar la base de datos es de la siguiente forma:

- Inicialmente abre el recinto acrílico para realizar el montaje o cambio de probeta del material, para luego sellar nuevamente el recinto acrílico.
- La instalación del recolector de datos mostrado en la figura 4. 2, que va conectado de sus respectivos puertos a los termopares que dan las temperaturas del estudio y del recolector de datos a el ordenador vía USB. Una vez conectado, su programa (Instacal) muestra en tiempo real estas medidas de temperaturas.
- Se construye una tabla en Excel como se muestra en la siguiente figura 4.21, donde se toman las temperaturas iniciales de la probeta antes de aplicar cualquier carga calórica, luego se encienden los reguladores del voltaje y empieza la recolección de datos; donde se toman los valores de las cuatro temperaturas, el voltaje que entregan

los dos reguladores y la corriente eléctrica que genera el primer regulador(I1); estos cada 5 minutos hasta que se alcance la condición de flujo de calor en estado estable ( $T3 \cong T4$  y  $\Delta T1 \cong \text{constante}$ ).

- Una vez recolectados todos los datos, en la pestaña del nombre de la hoja donde se realizó la tabla de Excel se escriben los datos respectivos de la probeta tales como; la longitud entre T1 y T2 (L) en metros, el diámetro de la probeta en (D) en metros y la conductividad térmica teórica del material en estudio (Kteórico) en W/m\* K, tal cual como se muestra en la figura 4.21.
- Se guarda el archivo de Microsoft Excel 97-2003 (.xls). en la carpeta de la base de datos con el nombre del material y la fecha en la que se realizó el ensayo como se muestra en la figura 4.21.

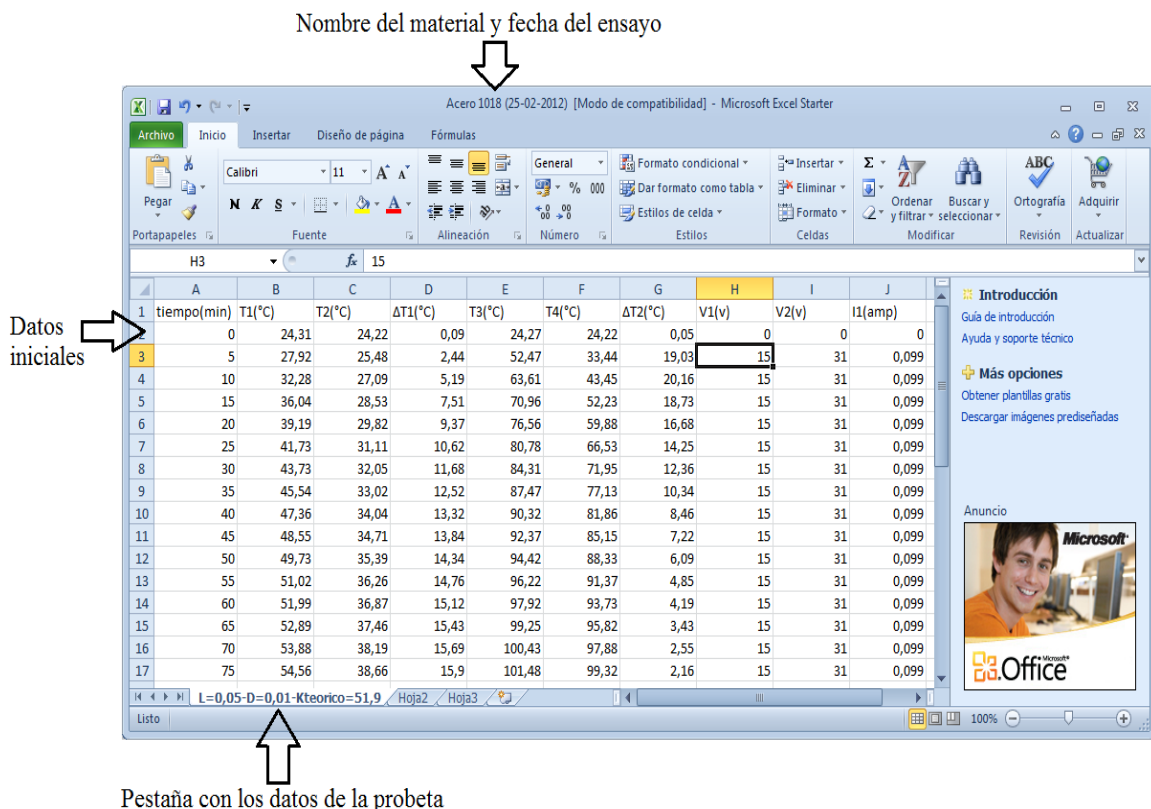


Figura 4.21: Datos del ensayo

#### A.2.4. Presentación del programa.

Inicialmente para ejecutar el programa del laboratorio virtual se hace doble clic sobre el enlace del programa, así inicia la debida presentación del mismo, con su respectivo título y autores del programa tal como se muestra en la Figura 4.4 (Presentación del programa).

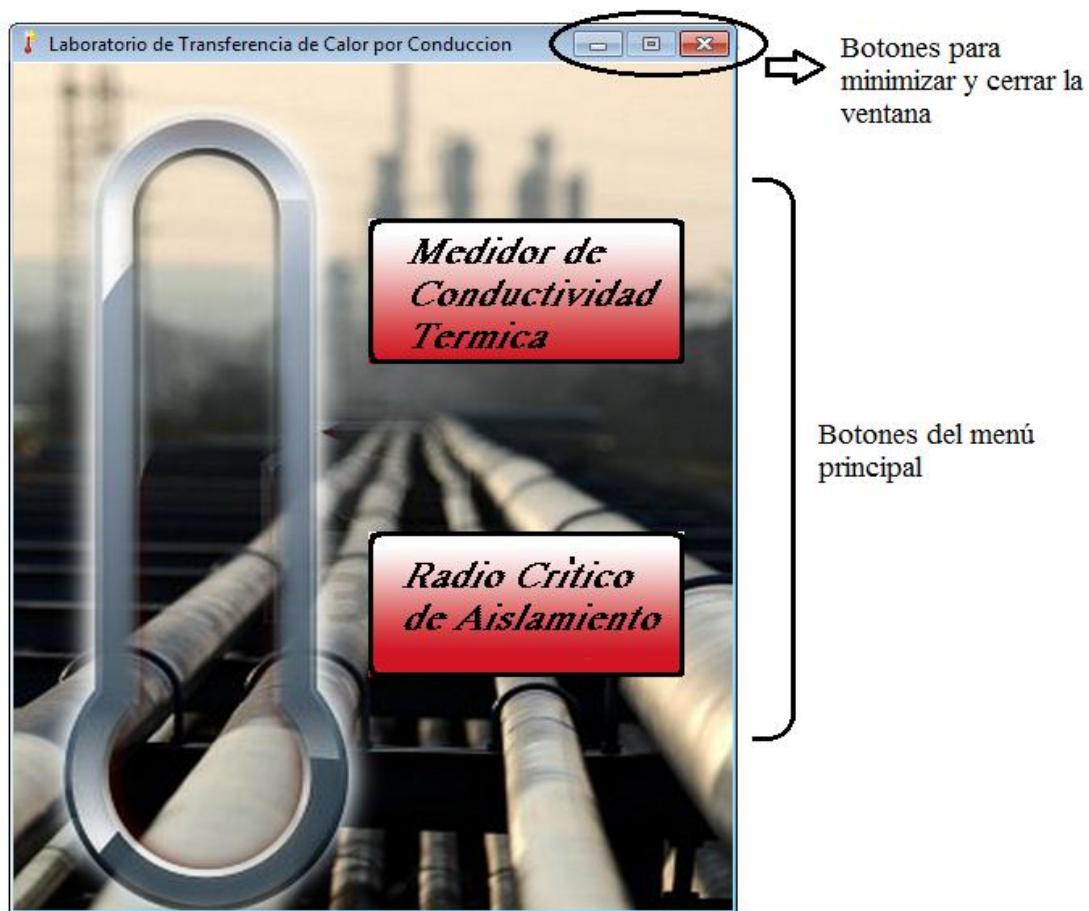


**Figura 4.4:** Ventana inicial

#### **A.2.5. Menú principal.**

El menú principal se encuentra luego de la presentación del programa, en la siguiente figura (Figura 4.5: Ventana inicial del laboratorio virtual de transferencia de calor por conducción) podemos observar cada detalle; los botones clásicos de minimizar y cerrar el programa, el nombre del programa acompañado por el icono del laboratorio virtual, con un fondo que da imagen de la aplicación industrial que tiene la asignatura.

En esta ventana aparecen dos botones para ingresar dentro del banco de ensayo “Medidor de Conductividad Térmica” y otro para ingresar a una herramienta de cálculo adicional del laboratorio de transferencia de calor por conducción conocida como “Radio Crítico de Aislamiento”.



**Figura 4.5:** Ventana inicial del laboratorio virtual de transferencia de calor por conducción.

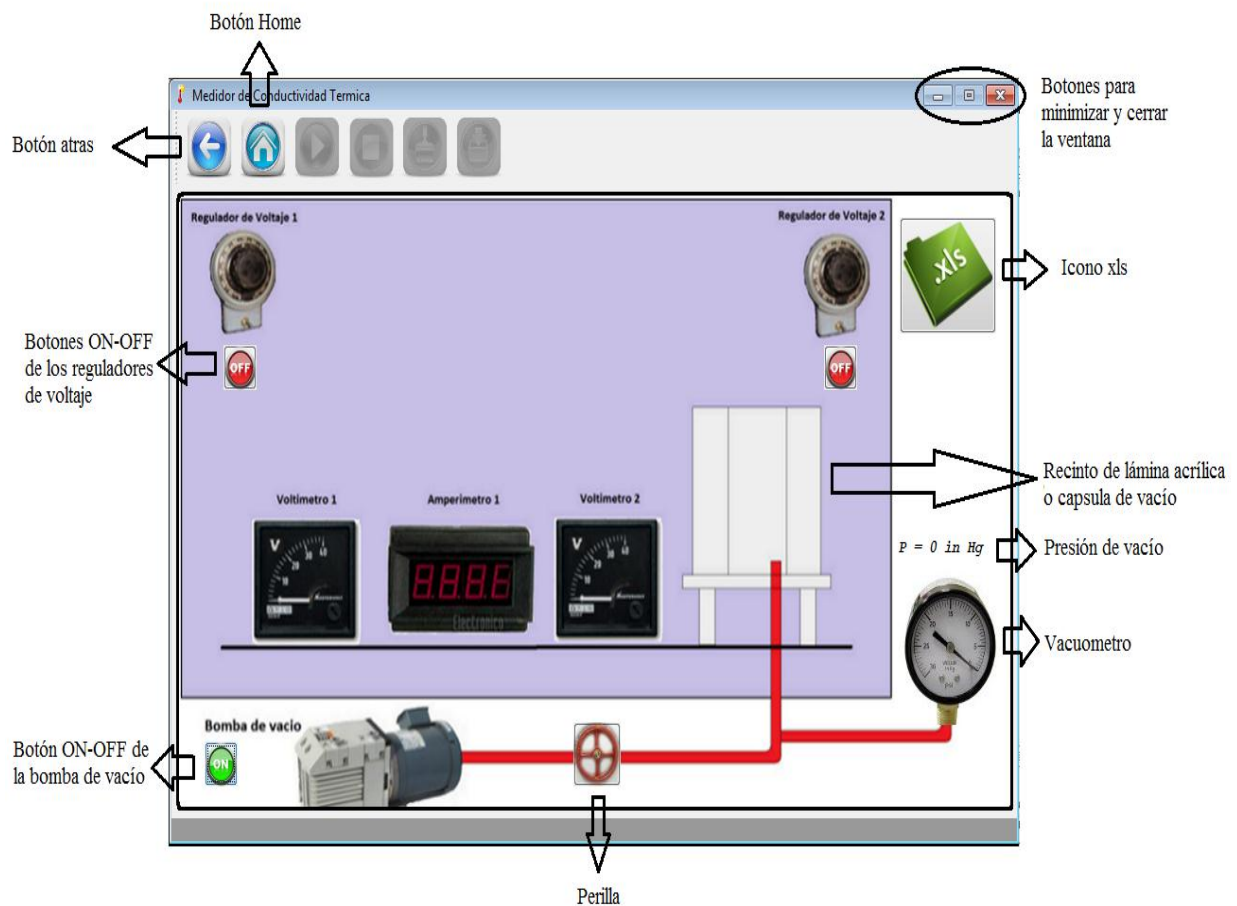
#### **A.2.6. Medidor de Conductividad Térmica.**

La interfaz de este módulo, mostrado en la figura 4.6, muestra esquemáticamente cada uno de los elementos que existen en el banco de ensayo real del laboratorio de transferencia de calor, banco de ensayo conocido como el “Medidor de Conductividad Térmica” antes explicado. Este esquema que basa en una ventana que muestra cada uno de los elementos que conforman el banco de ensayo, en el lugar exacto donde se encuentran en el laboratorio, tanto así que para proceder a realizar un ensayo es necesario realizar el mismo proceso que se necesita en el laboratorio pero de forma virtual en la interfaz del programa.



Los elementos que conforman esta primera interfaz del Medidor de Conductividad Térmica son los que se ven en primera instancia o al primer contacto visual con el banco de ensayo real, con un elemento adicional, dicho elemento esta mostrado en la figura 4.26, estos son:

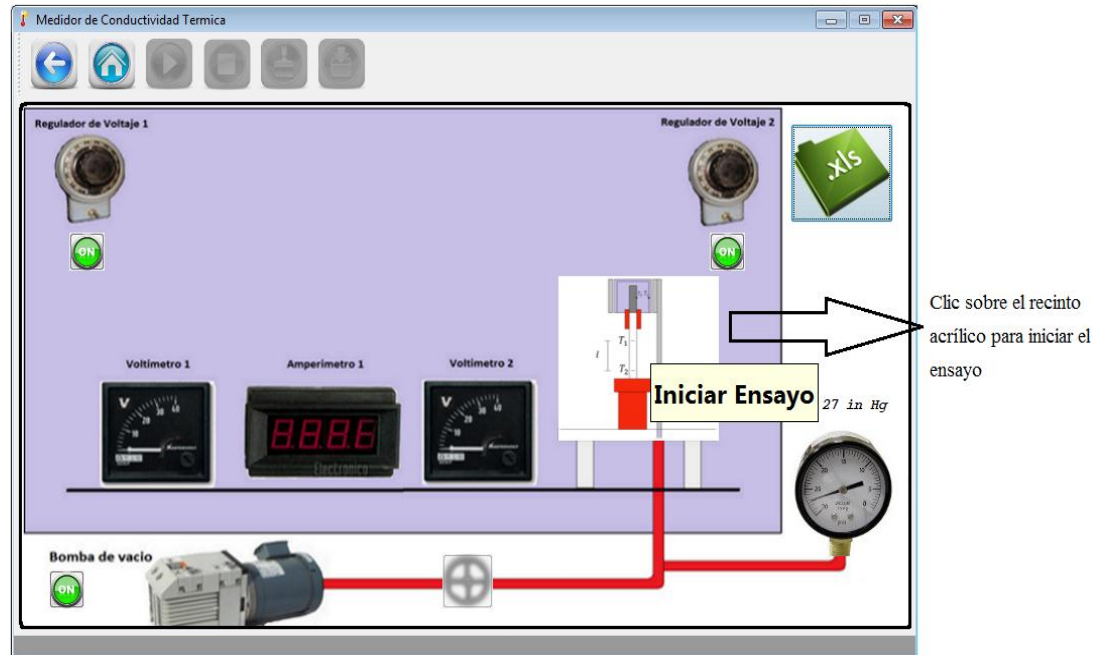
- Regulador de voltaje 1
- Regulador de voltaje 2
- Voltímetro 1
- Voltímetro 2
- Amperímetro 1
- Bomba de vacío
- Recinto de lámina acrílica o capsula de vacío
- Vacuometro
- Perilla
- Icono xls



**Figura 4.6:** Medidor de conductividad Térmica.

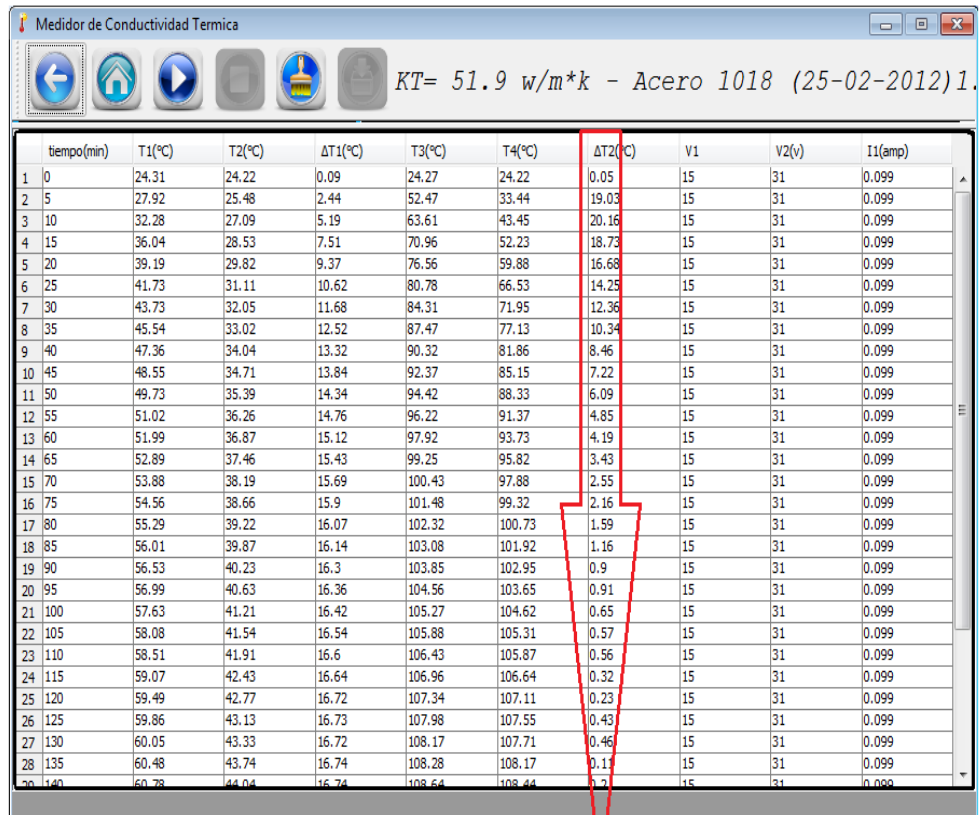
Un elemento adicional incluido en esta primera interfaz del medidor de conductividad térmica (a diferencia de lo existente en el banco de ensayo real), es el “Icono .xls” donde se van a cargar la data de los ensayos realizados en el laboratorio, esta data debe estar guardada en cualquier dirección dentro del computador en un archivo Excel tipo .xls o también llamado archivo Microsoft Excel 97-2003 (.xls). El otro elemento para destacar es la “Perilla” mostrada en la Figura 4.6, esta existe en el banco de ensayo real pero en la interfaz se utiliza para simular el vaciado del recinto acrílico, no como en el laboratorio donde esta se mantiene abierta en todo el ensayo, esto debido a que al alcanzar la presión deseada para que el coeficiente convectivo dentro del recinto sea  $h \cong 0$ , esta perilla no se cierra porque durante el ensayo real se pierde la presión deseada ( $P = 26$  in Hg) luego de un corto tiempo; entonces lo que se hace es mantener la bomba encendida y la perilla abierta para no perder la presión de vacío y ella de este modo se mantiene en 27 in Hg durante todo el ensayo, garantizando así que no existan pérdidas de transferencia de calor por convección.

Para iniciar el ensayo es necesario preparar las condiciones necesarias para que el ensayo sea efectivo, es por ello que en esta primera interfaz del medidor de conductividad térmica se enfoca de esta manera. Inicialmente es necesario dar clic al botón de encendido de la bomba de tal forma que este en “ON”, luego se gira la perilla con solo arrastrar el director del mouse sobre el icono de la perilla simulando como si esta se estuviese abriendo, al mismo tiempo el vacuometro empieza a dar su medida de presión, y esta hay que llevarla hasta los 27 in Hg de presión vacuometrica, entonces se encienden ambos reguladores de voltaje sin importar el orden, y ahora si se puede dar clic al botón del icono .xls y cargar la data de un determinado material, al realizar esto se muestra en la ventana la señal de “Iniciar Ensayo” tal como se muestra en la figura 4.7. Haciendo clic en la bóveda de vacío para continuar.



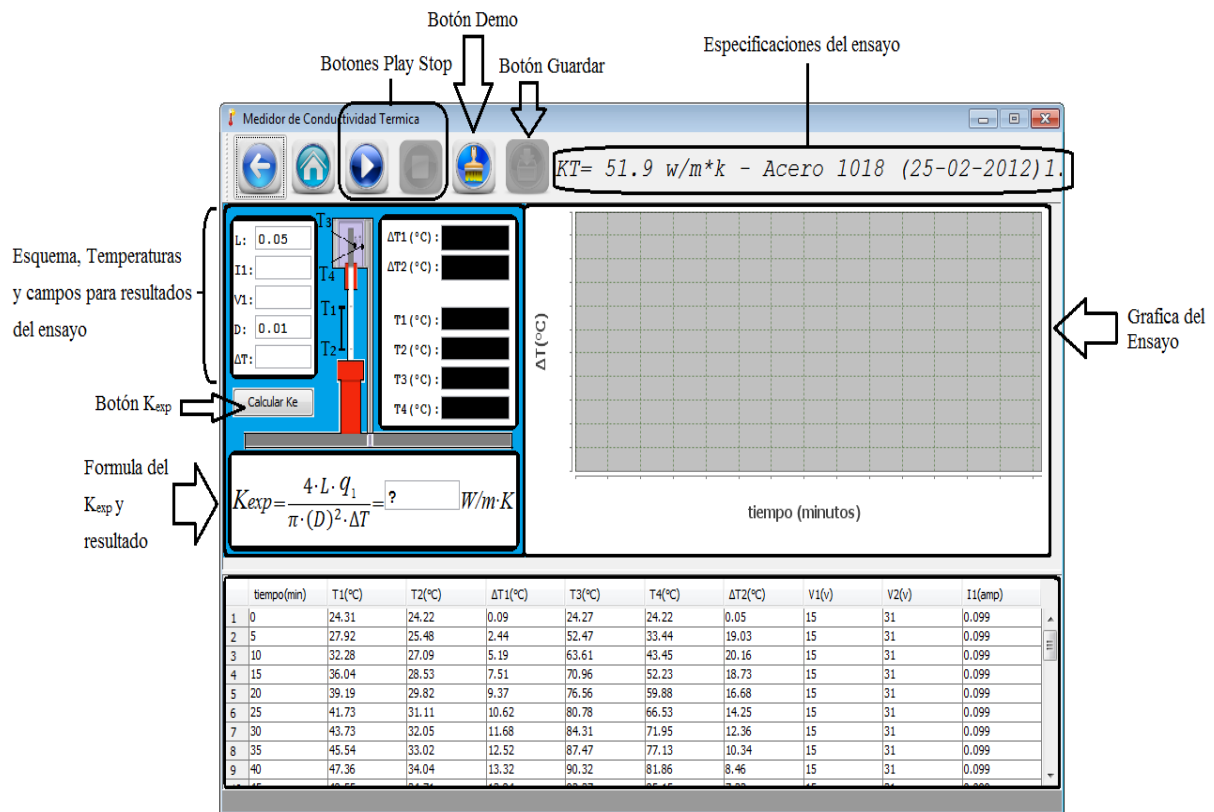
**Figura 4.7:** Señal para iniciar el ensayo en el Medidor de conductividad Térmica.

En la segunda interfaz gráfica se muestra esquemáticamente en montaje de la probeta dentro del recinto acrílico. Inicialmente en la ventana sale la cargada con la data del ensayo seleccionado tal como en la figura 4.8, luego se arrastra la tabla con el cursor del mouse hacia abajo de tal forma que la ventana se vea como la figura 4.9.



Se arrastra la tabla hacia abajo con  
el cursor del mouse

**Figura 4.8:** Medidor de conductividad Térmica



**Figura 4.9:** Medidor de conductividad Térmica

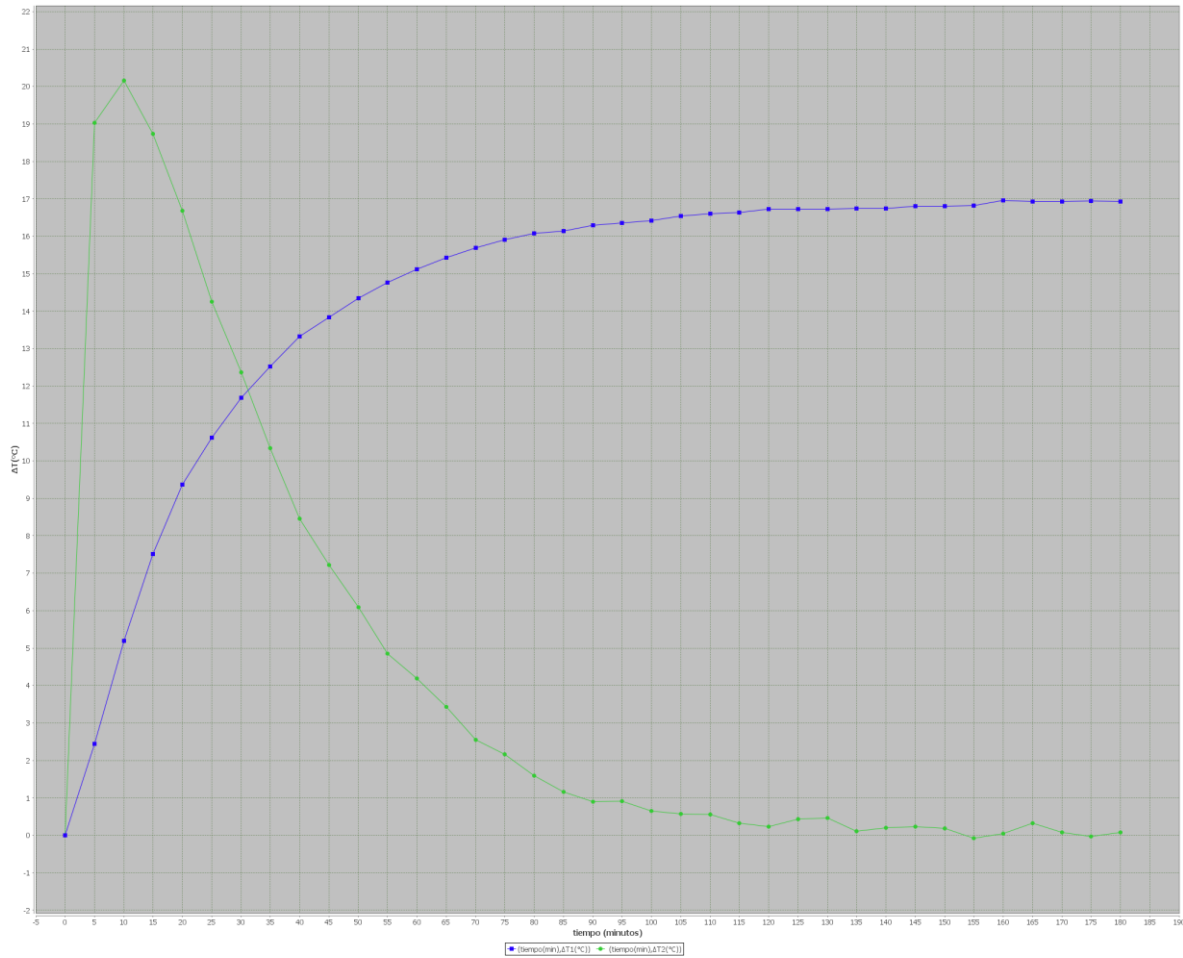
En esta ventana es donde se reproduce el ensayo con la data antes cargada; esta data contiene los valores de temperaturas en los cuatro puntos principales donde están conectados los termopares en el banco de ensayo real, cabe destacar que estos valores de temperaturas son tomados en intervalos de 5 minutos a lo largo del ensayo real y con estos construye la data del ensayo para un determinado material. La data del ensayo seleccionado contiene datos importantes del ensayo como el tipo de material, la conductividad térmica teórica (Kt) del mismo, la fecha de realización de la data, la longitud entre T1 y T2 (L) y el diámetro de la probeta (D); es por ello que al cargar la data de un determinado material se muestran ya precargados los valores de estas variables (como en la figura 4.9) y para modificarlos se tendría que modificar la data (modificar el archivo .xls).

En esta interfaz gráfica mostrada en la figura 4.9. Se muestran nuevos botones y a continuación se describe su respectiva función:

- Play: Reproduce el ensayo en tiempo real por lo que al activarlo muestra los cambios de temperaturas de los puntos mostrados en el esquema de la figura 4.9; así como los valores de  $\Delta T1$  y  $\Delta T2$  que vienen siendo:  $\Delta T1 = T1 - T2$  y  $\Delta T2 = T3 - T4$ .

Los valores de  $\Delta T1$  y  $\Delta T2$  son los que se grafican, por lo que el ensayo termina cuando se alcance un estado estable de conducción de calor, el cual se logra cuando  $T3 \cong T4$  donde  $\Delta T2 \cong 0$ , así se garantiza una mínima pérdida de calor por radiación entre la resistencia tipo cartucho y la lámina de aluminio.

- Demo: Reproduce el ensayo
- Stop: Detiene ensayo en cualquier momento conservando los valores con los que se detuvo y al presionar el botón Play o Demo luego; se inicia el ensayo nuevamente el ensayo.
- Guardar: Este almacena la gráfica resultante en cualquier dirección del ordenador con una resolución (figura 4.10) mayor a la que aparece en la interfaz gráfica del programa para así leer con mayor precisión el valor de  $\Delta T1$  una vez alcanzadas las condiciones de flujo de calor en estado estable.



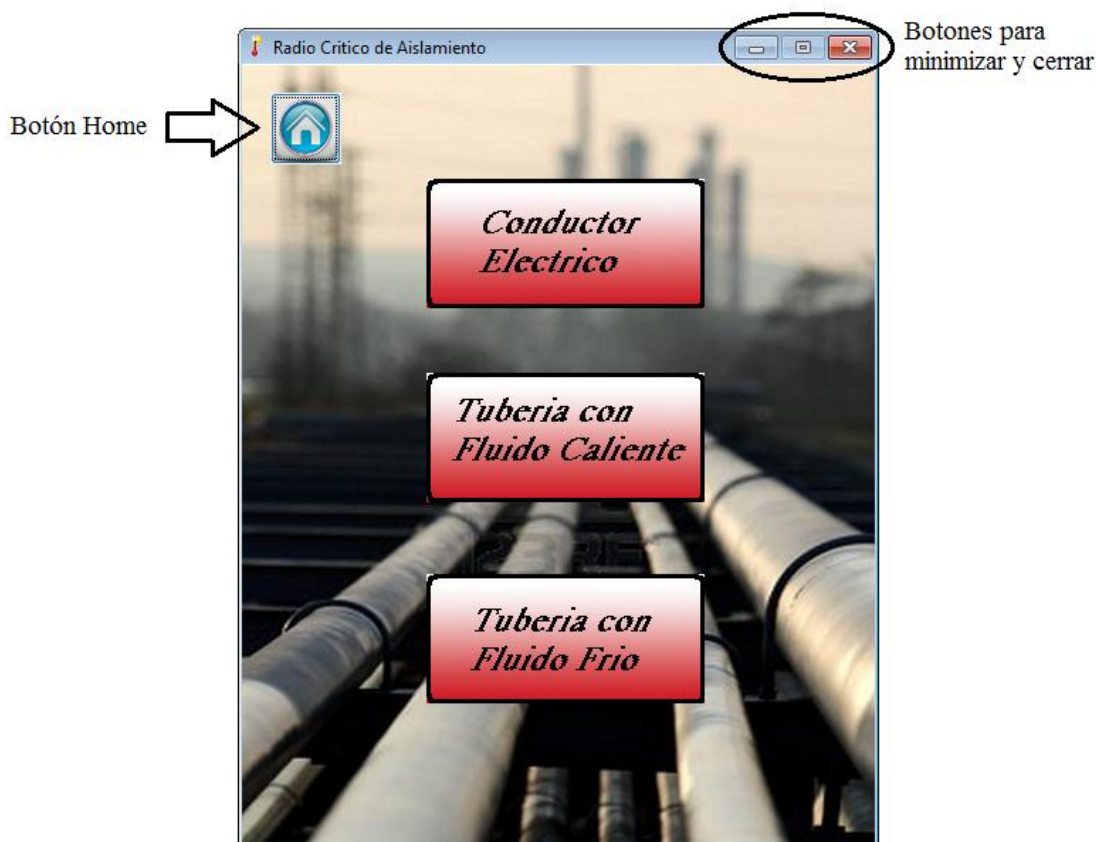
**Figura 4.10:** Grafica resultante del ensayo

- **Kexp:** con los resultados del ensayo se llenan los campos de las variables que determinan la conductividad térmica según la ecuación 2.44, también mostrada en la interfaz gráfica (figura 4.9). al llenar los campos de las variables de presiona el botón Kexp y el software determina el valor de la conductividad térmica obtenida experimentalmente según la ecuación:

$$k = \frac{4 \cdot l \cdot I \cdot V}{\pi \cdot d^2 \cdot (T_1 - T_2)} \quad (2.44)$$

### A.2.7. Radio Crítico de Aislamiento.

La interfaz de este módulo llamado “Radio Crítico de Aislamiento” se muestra en la siguiente figura 4.11. Esta interfaz viene siendo una herramienta de cálculo para determinar un radio critico de aislamiento basado en tres de las principales aplicaciones de radio crítico, los cuales vienen dados según su determinado criterio en particular; estos son para “Un Conductor Eléctrico”, para “Tubería con Fluido Caliente” y “Tubería con Fluido Frio” tal como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 4.11:** Radio Critico de aislamiento

De igual forma en la interfaz de “Radio Crítico de Aislamiento” se muestran botones clásicos de cerrar y minimizar así como un botón Home que trae de vuelta al menú principal del programa.

#### **A.2.8. Conductor Eléctrico.**

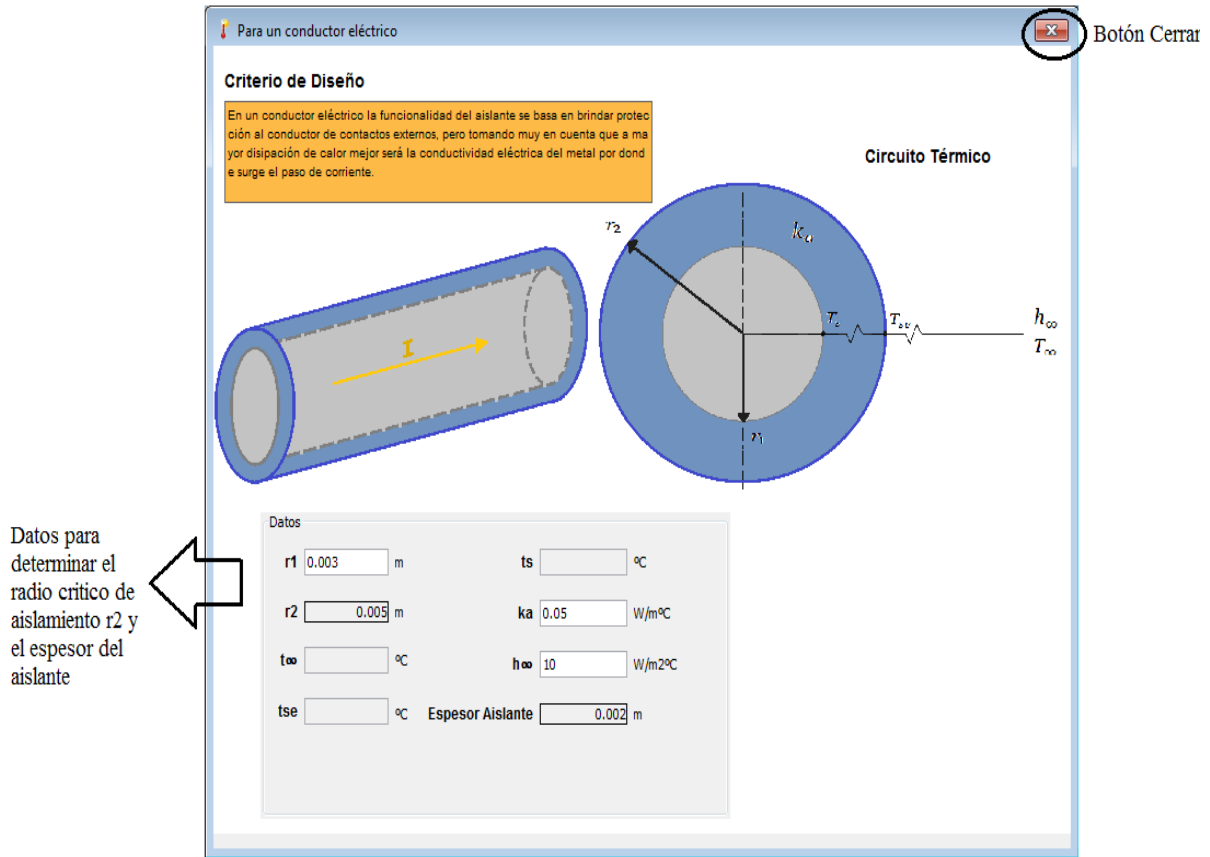


Este módulo se basa en calcular el radio crítico de aislamiento para un conductor eléctrico; es decir el radio critico que define el espesor de un aislante que recubre conductor eléctrico o cable metálico por donde circula una determinada corriente eléctrica. Esta aplicación parte de un criterio de diseño especificado en la interfaz gráfica mostrada en la figura 4.12.

**Criterio de Diseño:**

“En un conductor eléctrico la funcionalidad del aislante se basa en brindar protección al conductor de contactos externos, pero tomando muy en cuenta que a mayor disipación de calor mejor será la conductividad eléctrica del metal por donde surge el paso de corriente.”

En la figura 4.12 también se muestra el circuito térmico correspondiente en esta aplicación y los parámetros con los que se calcula el radio crítico que en el caso vendría siendo  $r_2$  y el espesor de aislante la diferencia entre  $r_2$  y  $r_1$ . Dichos parámetros que determinan el radio critico ( $r_2$ ) y el espesor de aislante son la conductividad térmica del aislante ( $K_a$ ), el coeficiente de transferencia de calor por convección  $h_\infty$  y el radio del conductor eléctrico ( $r_1$ ).



**Figura 4.12:** Radio critico de aislamiento para un conductor eléctrico

#### A.2.9. Tubería con Fluido Caliente.

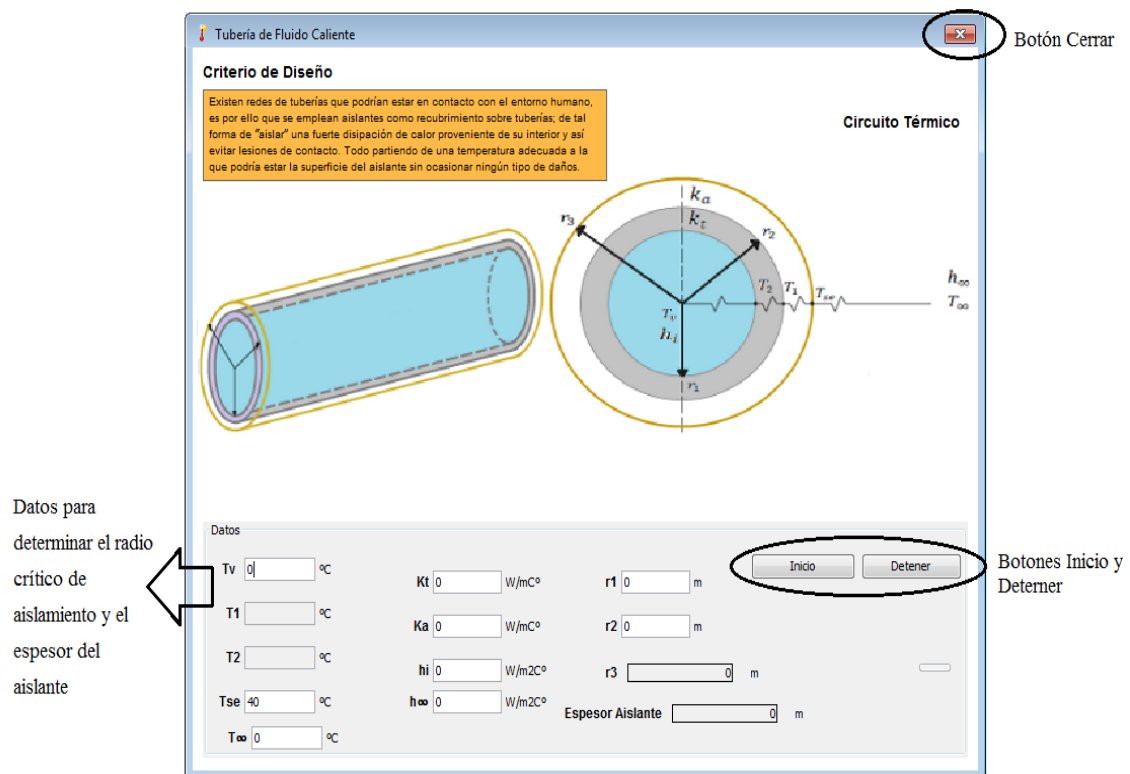
Este módulo se basa en calcular el radio crítico de aislamiento para una tubería que maneja fluidos a altas temperaturas; es decir el radio critico que define el espesor de un aislante que recubre la superficie de una tubería cuando esta maneja fluidos a altas temperaturas. Esta aplicación parte de un criterio de diseño especificado en la interfaz gráfica mostrada en la figura 4.13.

#### Criterio de Diseño:

“Existen redes de tuberías que podrían estar en contacto con el entorno humano, es por ello que se emplean aislantes como recubrimiento sobre tuberías; de tal forma de

“aislar” una fuerte disipación de calor proveniente de su interior y así evitar lesiones de contacto. Todo partiendo de una temperatura adecuada a la que podría estar la superficie del aislante sin ocasionar ningún tipo de daños.”

En la figura 4.13 también se muestra el circuito térmico correspondiente en esta aplicación y los parámetros con los que se calcula el radio crítico, que en el caso vendría siendo  $r_3$  y el espesor de aislante sería la diferencia entre  $r_3$  y  $r_2$ . Dichos parámetros que determinan el radio crítico ( $r_3$ ) y el espesor de aislante son: la conductividades térmicas del aislante ( $K_a$ ) y de la tubería ( $K_t$ ), los coeficientes de transferencia de calor por convección externo ( $h_{\infty}$ ) e interno ( $h_i$ ), el radio interno ( $r_1$ ) y externo ( $r_2$ ) de la tubería, la temperatura del fluido interno dentro de la tubería ( $T_v$ ), la temperatura de la superficie de la tubería ( $T_{se}$ ) y la temperatura externa del ambiente ( $T_{\infty}$ ).



**Figura 4.13:** Radio critico de aislamiento para una tubería con Fluido Caliente.

Los botones de inicio y detener son de una simple función. Una vez llenados todos los campos respectivos de cada variable, entonces el botón de “Inicio” calcula el radio crítico de aislamiento ( $r_3$ ) y el espesor del aislante, con el botón “Detener” se vacían todos los campos nuevamente para realizar otro cálculo.

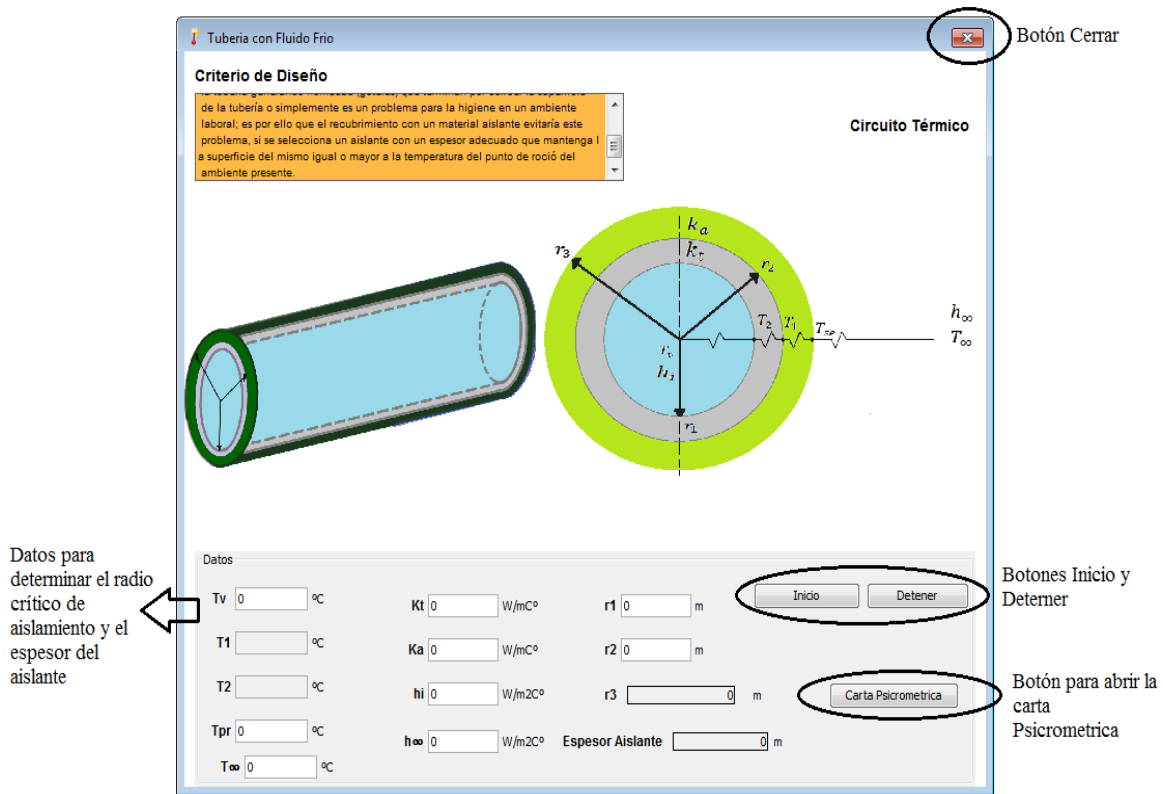
#### **A.2.10. Tubería con Fluido Frio.**

Este módulo se basa en calcular el radio crítico de aislamiento para una tubería que maneja fluidos a bajas temperaturas; es decir el radio crítico que define el espesor de un aislante que recubre la superficie de una tubería cuando esta maneja fluidos a bajas temperaturas. Esta aplicación parte de un criterio de diseño especificado en la interfaz gráfica mostrada en la figura 4.14.

##### **Criterio de diseño:**

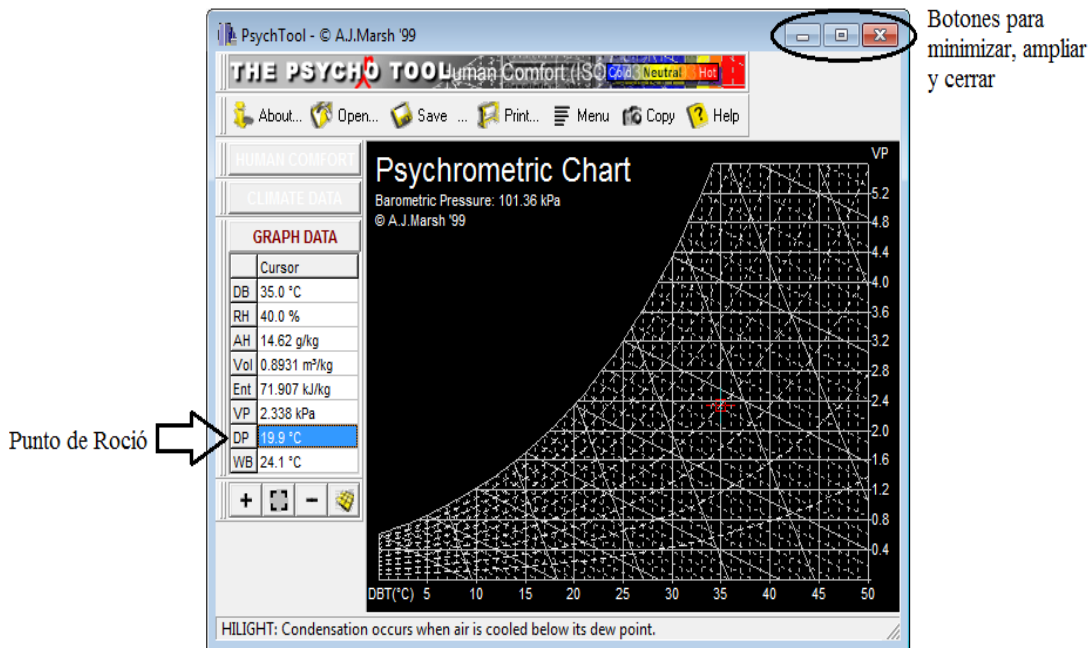
“Existen tuberías presentes en sistemas de refrigeración, acondicionamiento de aire, hasta en procesos industriales que transportan fluidos a muy bajas temperaturas, esto trae como consecuencia la condensación en la superficie de la tubería generando humedad (goteras) que terminan por corroer la superficie de la tubería o simplemente es un problema para la higiene en un ambiente laboral; es por ello que el recubrimiento con un material aislante evitaría este problema, si se selecciona un aislante con un espesor adecuado que mantenga la superficie del mismo igual o mayor a la temperatura del punto de rocío del ambiente presente.”

En la figura 4.14 también se muestra el circuito térmico correspondiente en esta aplicación y los parámetros con los que se calcula el radio crítico, que en el caso vendría siendo  $r_3$  y el espesor de aislante sería la diferencia entre  $r_3$  y  $r_2$ . Dichos parámetros que determinan el radio crítico ( $r_3$ ) y el espesor de aislante son: la conductividades térmicas del aislante ( $K_a$ ) y de la tubería ( $K_t$ ), los coeficientes de transferencia de calor por convección externo ( $h_\infty$ ) e interno ( $h_i$ ), el radio interno ( $r_1$ ) y externo ( $r_2$ ) de la tubería, la temperatura del fluido interno dentro de la tubería ( $T_v$ ), la temperatura de la superficie de la tubería ( $T_{pr}$ ) y la temperatura externa del ambiente ( $T_\infty$ ).



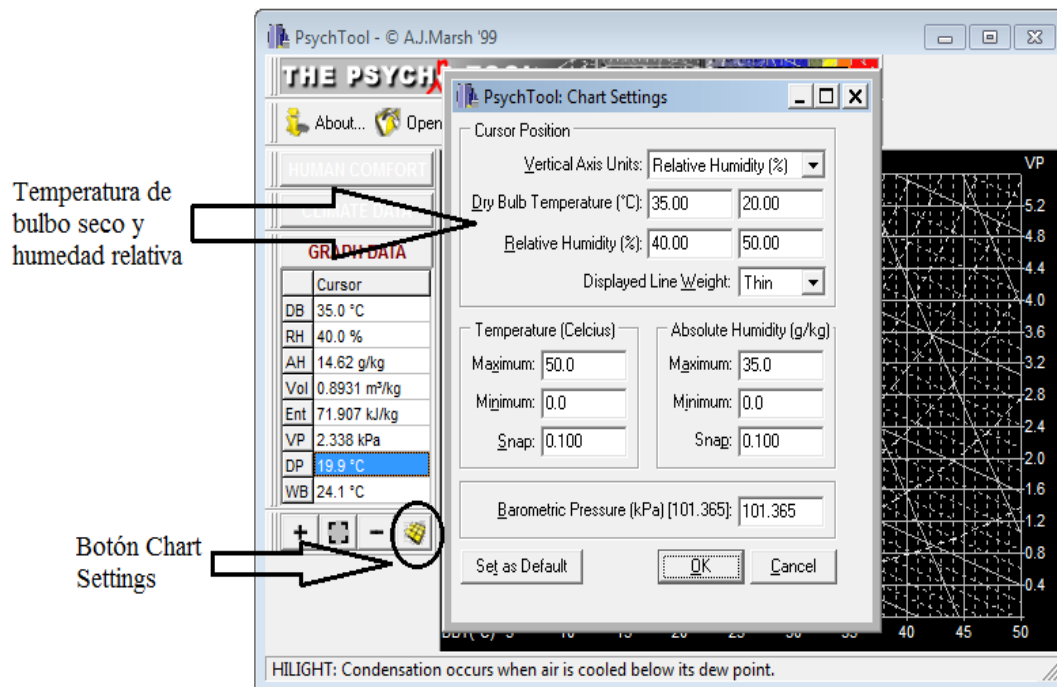
**Figura 4.14:** Radio critico de aislamiento para una tubería con Fluido Frio.

Los botones de inicio y detener son de una simple función. Una vez llenados todos los campos respectivos de cada variable, entonces el botón de “Inicio” calcula el radio crítico de aislamiento ( $r_3$ ) y el espesor del aislante, con el botón “Detener” se vacían todos los campos nuevamente para realizar otro cálculo. Adicionalmente existe un botón para abrir una carta psicométrico que viene dada por el programa PsychTool como se muestra en la figura con la figura 4.15. Esta herramienta se utiliza para determinar el punto de rocío del ambiente en el que se encuentra la tubería.



**Figura 4.15:** Carta Psicométrica.

Para determinar el punto de rocío con la herramienta mostrada, son necesarios al menos dos parámetros para graficar el punto en la carta psicrométrica, inicialmente se presiona el botón Chart Settings mostrado en la figura 4.16 y se introducen los datos de temperatura de bulbo seco (temperatura del ambiente) y la humedad relativa del lugar donde se encuentra la tubería. Se presiona el botón OK dentro de la misma ventana mostrada y el programa nos grafica el punto y nos muestra todos los parámetros involucrados en la carta psicrométrica tal como se mostró en la figura 4.15 con el punto de rocío buscado.



**Figura 4.16:** Carta Psicométrica (introducción de parámetros)