

## SIMULACIÓN DE DISTINTOS SISTEMAS FÍSICOS CON SIMUSOL

Dolores Alía de Saravia y Luis R. Saravia<sup>1</sup>

INENCO, Instituto UNSa-CONICET  
Buenos Aires 177, 4400, Salta, Argentina  
e-mail:saravia@unsa.edu.ar, Tel. 54-0387-4255424

**RESUMEN:** El Simusol es un programa que facilita la descripción de circuitos y su simulación numérica. Fue inicialmente producido para el estudio de sistemas solares a parámetros concentrados desde el punto de vista térmico. No obstante, el simulador puede ser utilizado para el estudio de otros sistemas físicos como los eléctricos, aire húmedo, etc. Tampoco existe inconveniente en encarar la simulación de mezclas de sistemas diferentes. En este trabajo se presenta la generalización de la representación gráfica utilizada en el Simusol con el fin de que el usuario sea capaz de generar sus propios símbolos para los elementos, sin necesidad de modificar la programación, incorporando las fórmulas que definen su comportamiento, de manera que la representación de sistemas mixtos puede llevarse a cabo con sencillez y sea de fácil interpretación visual. Como ejemplo de sistema térmico-eléctrico se presenta un circuito para la simulación del funcionamiento de un termistor como instrumento de medida de temperaturas. Con el circuito, se estudia la constante de tiempo de la medida, el fenómeno de autocalentamiento del termistor y la influencia de la radiación solar. Se comprueba que la simulación del termistor constituye por sí misma un elemento valioso para el diseño de termómetros que usan termistores así como la optimización de sus condiciones de funcionamiento. El Simusol también puede ser utilizado como una herramienta de enseñanza poderosa, permitiendo la presentación de ejemplos prácticos con una buena interacción entre el experimento simulado y el estudiante, por lo que se constituye en un importante auxiliar de clase. El caso del termistor ilustra este punto.

### INTRODUCCIÓN

El Simusol es un programa que facilita la descripción de circuitos y su simulación numérica. Fue producido inicialmente para el estudio de sistemas térmicos los cuales son simulados numéricamente utilizando al programa Sceptre (Saravia, y otro, 2000). Simusol posibilita realizar descripciones gráficas de los circuitos utilizando el programa Dia; está escrito en Perl y, fundamentalmente, traduce el archivo en el que Dia almacena el diagrama para producir un archivo de entrada para Sceptre; además se encarga de varias funciones de utilidad como detección de errores y producción de gráficos relativos a la simulación (Alía y otros, 2002).

El Sceptre recibe la descripción de los elementos del circuito a simular numéricamente en un archivo de texto. Existen muchos sistemas físicos regidos por ecuaciones básicas similares a las resueltas por el Sceptre por lo que es posible utilizar el mismo para estudiar otros sistemas físicos. Como ejemplos, se tiene a los sistemas eléctricos, para los cuales el Sceptre fue inicialmente programado, a los sistemas de cañerías por las cuales circula un fluido, etc.. También existe la posibilidad de formar el circuito con elementos provenientes de distintos sistemas físicos que interactúan entre ellos aunque no sean del mismo tipo, lo que amplía en mucho las posibilidades de uso del Sceptre. Por ejemplo, es posible estudiar sistemas fotovoltaicos con un modelo en el que conviven el circuito eléctrico con el térmico, interactuando entre ambos. Otros casos son los de los sistemas térmicos con aire en movimiento por convección natural, donde la evolución térmica del aire se mezcla con el movimiento del aire por diferencias de temperatura; o los sistemas con aire húmedo donde el problema térmico se mezcla con las variaciones de vapor de agua mezclado en el aire.

Desde el punto de vista del Simusol, el Dia permite dibujar diagramas formados por “formas gráficas” que se unen con “líneas”. También puede incluir cuadros con información textual. El Dia puede ser extendido con formas gráficas creadas por el usuario

Al diseñar Simusol, se extendió al Dia con varias “formas” para representar elementos térmicos; y se programó a Simusol para que reconociera esas formas. Para cada nueva forma incorporada, había que modificar la programación de Simusol. Actualmente, se ha modificado a Simusol para que sea capaz de reconocer nuevas formas, en determinadas condiciones, sin necesidad de modificaciones adicionales del programa. Así será posible que el usuario pueda crear y definir nuevas formas para representar a elementos físicos de su interés. De esta forma, el usuario podrá simular elementos físicos con elementos no previstos en la versión original del Simusol, utilizando formas gráficas creadas por él o ella y que permitan entender los circuitos con mayor claridad

En este trabajo se usará, como ejemplo ilustrativo de un sistema que involucra elementos térmicos y eléctricos, a un caso muy sencillo: el de un termómetro que usa un termistor. Con el mismo se explicará en forma sucesiva las distintas formas de aprovechar la generalización que se ha introducido en el Dia para aumentar sus posibilidades de uso. En

---

1.- Investigador del CONICET

primer lugar se discutirá el modelo del termistor utilizando únicamente representaciones térmicas de sus elementos. Será la situación en que no se usaría la generalización del programa y servirá de referencia para la discusión posterior. Luego se introducirá la representación de elementos eléctricos con sus formas asociadas. Por último, se introducirá como nueva posibilidad la de presentar a los dos circuitos que forman el termistor como un modelo único al que se asignará un esquema diferenciado con sus propios parámetros. Este modelo complejo podrá ser utilizado en estudios del comportamiento de estos termómetros cuando se integran a sistemas que podría alterar su funcionamiento. Por ejemplo, se puede analizar el comportamiento bajo radiación solar o cuando está colocado en un recinto cuyas paredes generan una radiación térmica importante.

Como ejemplos de uso del circuito de simulación se estudiarán varias aplicaciones: la determinación del tiempo que es necesario esperar para que se estabilice el termistor y la medida se pueda llevar a cabo, la fuente de corriente con la que se puede alimentar el termistor sin producir un error importante en la medida (problema conocido con el nombre de auto calentamiento) y el efecto de la radiación solar sobre el termistor cuando se lo coloca en un sistema sobre el cual incide la misma.

El Dia y el Sceptre pueden ser utilizados por cualquier usuario en forma libre bajo la llamada licencia GPL. La única exigencia es que las personas que los utilicen también pondrán los programas que generen, incluyendo las fuentes, a libre disponibilidad. Por tal razón, el Simusol se distribuye bajo la licencia GPL, sin restricciones en su uso.

### EL CIRCUITO INICIAL DEL TERMISTOR

La figura 1 muestra un esquema del circuito físico básico de un termistor NTC, incluyendo las conexiones necesarias para realizar una medida de temperatura con el mismo.

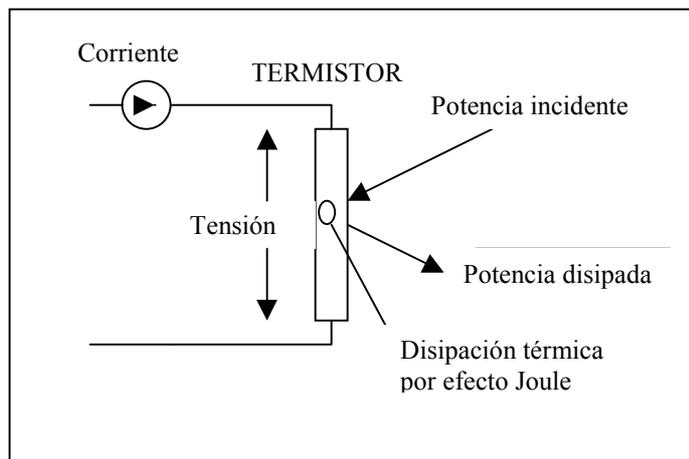


Fig. 1.- Esquema del termistor mostrando la fuente de corriente, su tensión entre bordes, las potencias que inciden y se disipan y la disipación térmica de origen eléctrico.

La medida de temperatura utiliza la propiedad de que la resistencia del termistor varía con su temperatura, de acuerdo a la fórmula siguiente (Norton, 1982):

$$R_t = R_{to} \cdot \exp\left[b \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_o}\right)\right] \quad (1)$$

Donde  $T_o$  es una temperatura de referencia,  $R_{to}$  es la resistencia correspondiente del termistor,  $T$  es la temperatura actual del elemento y  $R_t$  su correspondiente resistencia.  $b$  es un parámetro característico del termistor. Las temperaturas deben expresarse en grados Kelvin. En los manuales se pueden encontrar las características fundamentales de los termistores dedicados a mediciones de temperatura. Además de  $b$  y  $R_{to}$  se mencionan otras propiedades medidas tales como su disipación térmica, la potencia máxima que es capaz de soportar y la temperatura máxima a la que se aconseja su funcionamiento. Se ha elegido un termistor miniatura encapsulado en vidrio (GM Electrónica, 2000) como referencia para preparar los circuitos que se presentan a continuación. La Tabla 1 muestra las propiedades del mismo, tal cual se detallan en el manual.

El análisis del comportamiento del termistor comprende dos partes: la eléctrica y la térmica. En la primera se coloca en los bornes del termistor una fuente de corriente que atraviesa la resistencia del termistor y se mide la tensión que aparece entre bornes con el fin de determinar su resistencia, con la cual se obtiene la temperatura. En la segunda el termistor posee una masa con un cierto calor específico, la cual eleva su temperatura hasta ser similar a la del fluido cuya temperatura quiere obtenerse. Las dos partes interactúan entre sí ya que la resistencia eléctrica depende de la temperatura

y a su vez, el pasaje de corriente eléctrica produce una disipación térmica (efecto Joule) que afecta la temperatura del termistor.

Tabla 1 : Propiedades del termistor utilizado en el modelo

Propiedad	Valor	Unidad
Resistencia eléctrica a 25 °C	10000	ohms
Parámetro b	3500	K
Disipación térmica al ambiente	0.8	mW/°C
Temperatura máxima de trabajo	200	°C
Disipación máxima	2.50	MW
Diámetro	1.6	Mm
Longitud	6.4	Mm
Calor específico	835	W/kg.°C
Densidad	2300	Kg/m3

Cada una de las dos partes puede simularse utilizando el Sceptre mediante el uso de los símbolos correspondientes a los circuitos térmicos, tal cual se muestra en la figura 2.a). A la izquierda se muestra el circuito eléctrico representado con un elemento térmico, en este caso una resistencia convectiva (R4). En los bornes a y b se conectará la fuente de corriente y se medirá el voltaje. A la derecha se muestra el circuito térmico usando una masa de acumulación (C4), una resistencia convectiva (R6) hacia el exterior por la que ocurren las pérdidas de calor al ambiente y una fuente de calor (J4) que representa la generación térmica de origen eléctrico. Este circuito será interpretado por el Sceptre utilizando los valores adecuados para las variables eléctricas y térmicas. No obstante debe reconocerse que esta forma de encarar el problema va a traer múltiples confusiones en cuanto el circuito crezca en complejidad ya que la representación gráfica no permite distinguir claramente los distintos sistemas físicos que integran el circuito.

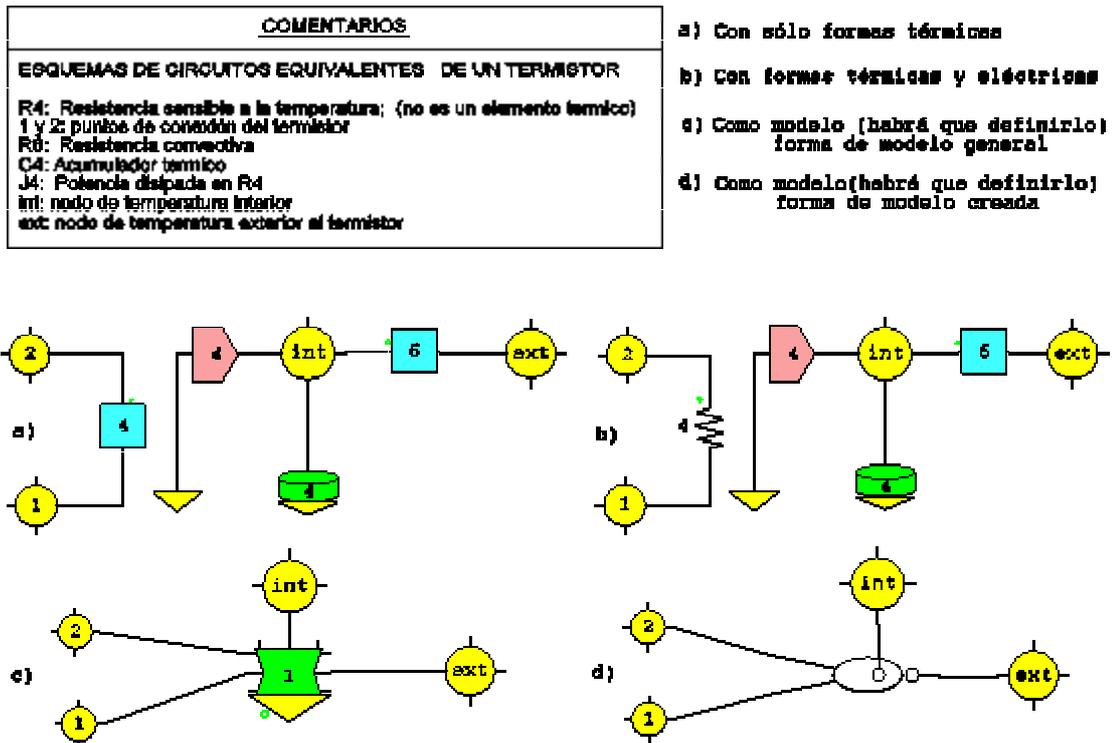


Fig. 2.- Muestra los esquemas de circuitos equivalentes de un termistor

Sería preferible disponer de elementos convenientemente individualizados para el sistema eléctrico y para el sistema térmico. Por otro lado, también se aumentaría sustancialmente la ductilidad del simulador si los propios usuarios pudiesen crear los gráficos que representen a los elementos que pretendan simular, incluyendo también las fórmulas que definen el funcionamiento de los mismos. Esta tarea ha sido llevada a cabo modificando a Simusol para que pueda aceptar la representación gráfica de los elementos con nuevas formas. Para el caso del ejemplo que ilustra los conceptos que se están introduciendo, ha sido necesario crear un conjunto de dibujos de tipo eléctrico (resistencias, fuentes de corriente y tensión, condensadores, etc). La figura 2.b) muestra la forma en que queda representado el circuito del termistor, donde la resistencia eléctrica R4 es ahora representada por un dibujo típico y a la misma se adjuntan las ecuaciones necesarias para representar su funcionamiento.

## REPRESENTACION GRAFICA DE LOS MODELOS.

Actualmente en el Simusol se puede utilizar la noción de modelo, por la cual un circuito que constituye una parte parcial de una simulación de mayor tamaño puede ser representado con un solo símbolo al que se le da el nombre genérico de "modelo". La noción de modelo permite expresar en una forma gráfica compacta un circuito complicado. Para los modelos se introdujo en un trabajo anterior un gráfico característico que se muestra en la figura 2.c) representando a un termistor. El modelo incorpora los distintos elementos del termistor.

Extendiendo la idea de presentar elementos de distintos sistemas físicos con gráficos especializados, también 9intse ha recurrido a la idea de que el propio usuario sea capaz de armar un circuito. Por ejemplo, la figura 2.d) muestra la representación gráfica adoptada para el termistor con los cuatro nodos a través de los cuales el circuito representado por el modelo se conecta con el resto del circuito del cual forma parte, a saber: los dos nodos para la conexión eléctrica (1 y 2), el nodo que representa la temperatura ambiente (ext) y el que representa la temperatura interna del termistor (int). Este último se agrega a pesar de ser interno para permitir la llegada de flujos de calor al termistor. Un caso típico es aquel en el que el termistor es parte de un circuito donde llega la radiación solar calentando al elemento.

La figura 3 muestra la definición de este modelo de termistor en el entorno del Día. Allí se aprecia el circuito que define el termistor, donde se utilizan elementos térmicos y eléctricos, y el gráfico que se usa para representar este nuevo modelo. Los cuadros explican el uso del modelo y la definición detallada de los elementos, así como la función QTERM que da la dependencia de la resistencia eléctrica (R4T2) del termistor con su temperatura. El modelo está identificado con el número 2, por lo que todos los elementos del circuito tienen nombres que deben terminar con la sigla "T2". La masa de acumulación térmica esta representada por el elemento C4T2, la disipación térmica esta dada por R6T2 y el flujo de calor producido por efecto Joule está dado por J4T2 como un producto de la corriente que entra (IR4T2) por la diferencia de tensión entre los bornes 1 y 2 (VR4T2).

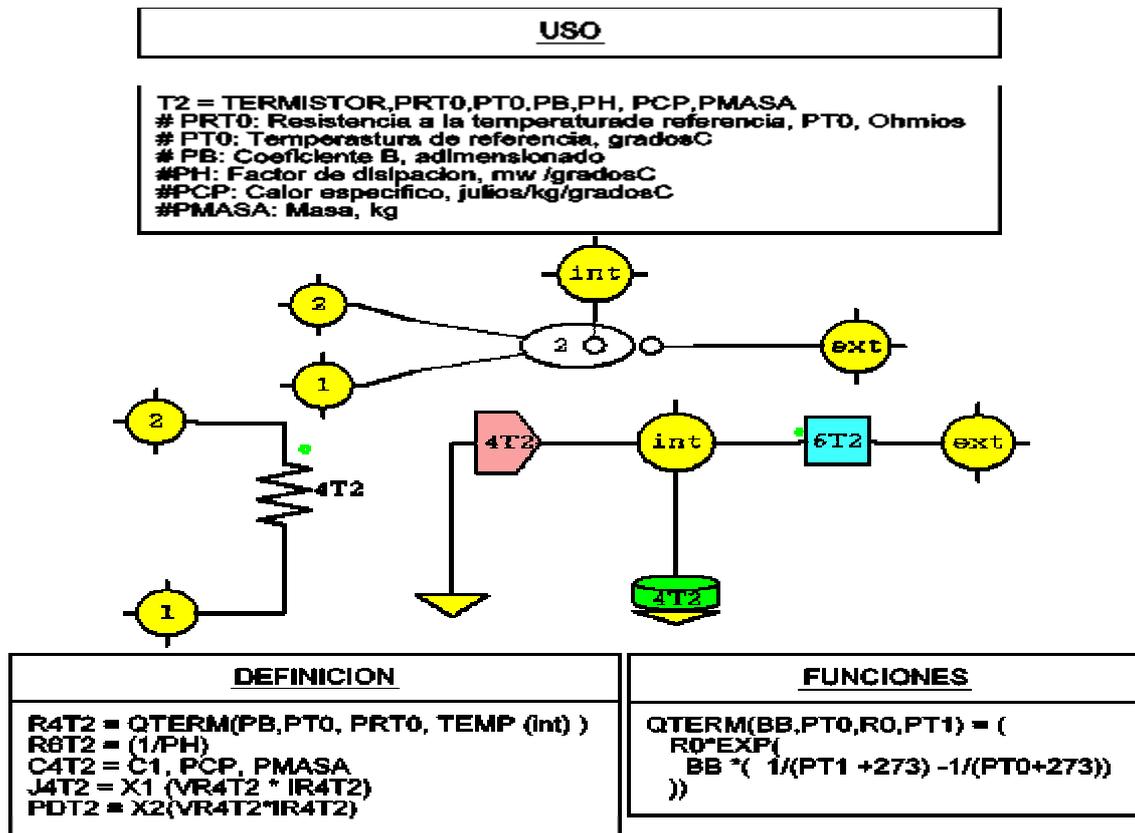


Fig. 3.- Definición del modelo del termistor

### LA SIMULACION DEL FUNCIONAMIENTO DEL TERMISTOR

El termistor se ensaya alimentándolo con una fuente de corriente entre los bornes 1 y 2 e imponiendo una temperatura externa mediante una fuente, como se muestra en la figura 4. La corriente seleccionada, J3, tiene un valor de 0.0001 A y la temperatura externa vale 50 C. Inicialmente el termistor se encuentra a una temperatura (C4T1) de 20 C° y al ponérselo en contacto con la temperatura externa igual a 50 °C se va calentando como función del tiempo hasta llegar al nuevo estado estacionario. La figura 5 muestra el resultado de la simulación, donde se aprecia que el termistor tarda alrededor de 2 minutos para llegar al nuevo valor estacionario.

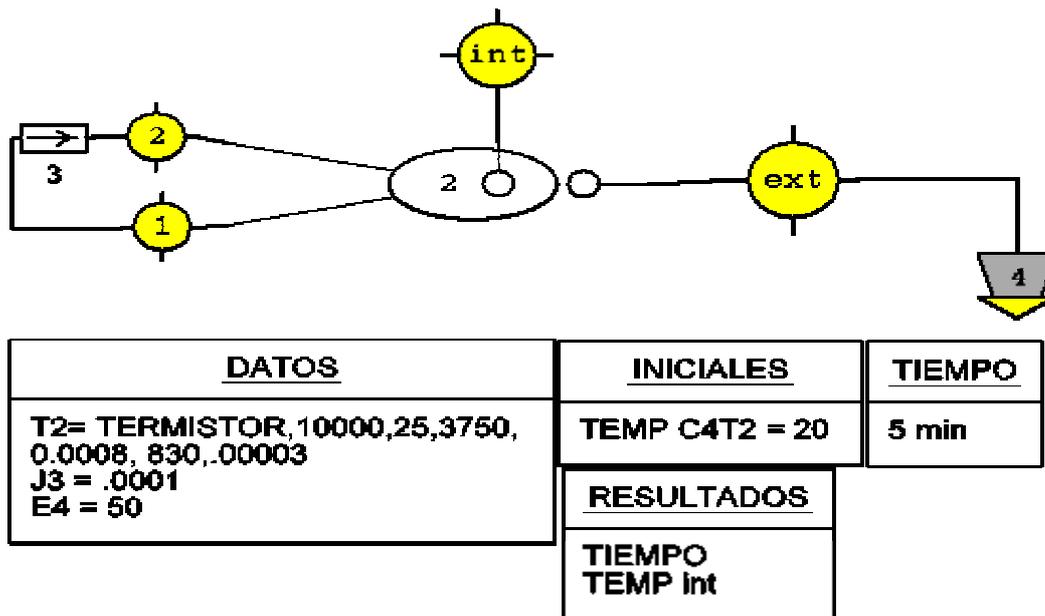


Fig. 4.- Muestra el circuito utilizado para ensayar el termistor

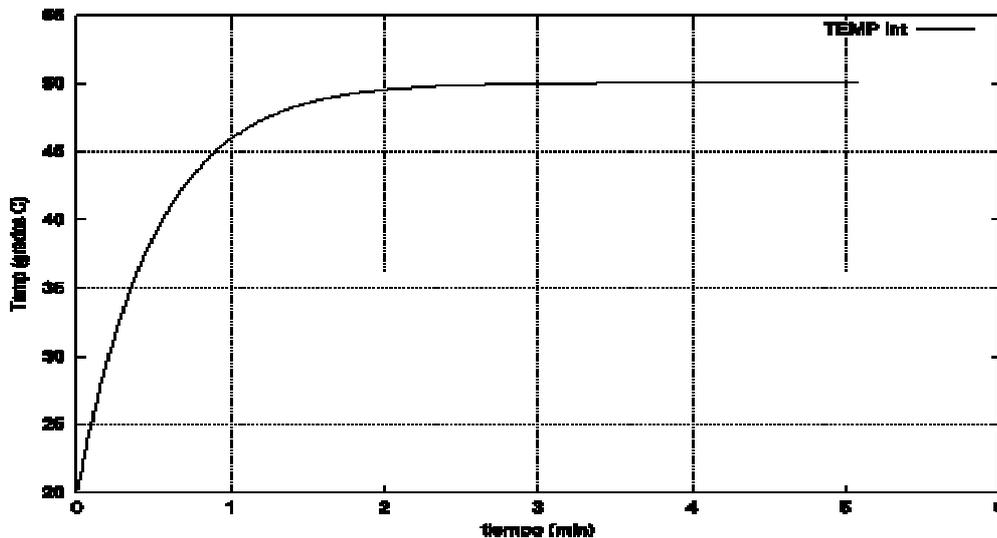


Fig. 5.- Muestra la variación de la temperatura del termistor con el tiempo para llegar a un nuevo valor estacionario

Tabla 2.- Error en la temperatura medida como función de la corriente de alimentación

Corriente (A)	Diferencia de Temperatura (°C)
0.00005	0.01
0.0001	0.04
0.00015	0.09
0.0002	0.17

La disipación térmica por efecto Joule tiende a levantar la temperatura del termistor por encima de aquella que debe medir, que es la temperatura ambiente. Este fenómeno se conoce con el nombre de “autocalentamiento” del termistor y se puede analizar realizando distintas corridas de simulación donde se adoptan valores crecientes de la fuente de corriente y se observa que diferencia de temperatura se obtiene. La tabla 2 muestra los valores obtenidos para corrientes entre 0.00005 y 0.00025A. Se aprecia que la diferencia de temperatura comienza a ser mayor que 0.1 °C cuando la corriente pasa los 0.00015 A, por lo que un valor de 0.0001 A sería conveniente para tener un efecto de autocalentamiento despreciable. (aumento de temperatura menor a 0.04 °C).

Como se aprecia, la simulación numérica del termistor se constituye en una herramienta muy valiosa para seleccionar el termistor más adecuado para realizar una cierta medida, pudiéndose variar tanto el termistor en sí como sus condiciones de operación con el fin de seleccionar los valores óptimos de los distintos parámetros.

## **EL EFECTO DE LA RADIACIÓN SOLAR EN MEDIDAS DE TEMPERATURA CON UN TERMISTOR**

En el estudio experimental de sistemas solares se debe medir temperaturas en zonas del sistema donde incide la radiación solar sobre el termistor a utilizar. Esta radiación solar sobrecalienta el termistor aumentando la diferencia entre la temperatura real a medir en el fluido y la temperatura a la que está el termistor. Este error puede ser evaluado si se conecta un flujo de calor en el borne "int" del termistor, indicando tanto el flujo de calor que llega (la radiación solar) por unidad de área del termistor expuesta al sol como el valor de esa área.

La simulación en esas condiciones indica que para una radiación solar incidente de 800 W/ m<sup>2</sup>, típica en un sistema solar, el aumento de temperatura es de 10 °C, lo que no es aceptable en absoluto. Aún para una radiación incidente baja, igual a 100 W/m<sup>2</sup>, el aumento es de 1.3 °C, que tampoco es aceptable. Esto indica que para obtener una medida razonable, el termistor no debe estar expuesto a la radiación solar, por lo que se deberá utilizar una cubierta protectora de tipo espejo, que rechace completamente la radiación calentándose poco, de manera que el intercambio radiativo entre el termistor y la cubierta expuesta a la radiación no lo caliente. Es posible estudiar el diseño de esta cubierta simulando con el Simusol la cubierta y su intercambio convectivo-radiativo con el termistor. Esto no se expone aquí por falta de espacio.

## **CONCLUSIONES**

Las modificaciones introducidas a la representación gráfica de los circuitos utilizados en el Simusol permite encarar en forma sencilla el estudio de sistemas que combinan más de un tipo de sistema físico, ampliando significativamente la utilidad del Simusol como herramienta de estudio de los sistemas físicos. La posibilidad de que los usuarios generen sus propias representaciones gráficas para los sistemas físicos que deban estudiar aumenta en mucho la ductilidad y facilidad de uso del Simusol.

El ejemplo utilizado, la simulación de un termistor, también tiene un interés práctico ya que permite seleccionar el termistor más conveniente para una aplicación dada, así como optimizar su uso. A título de ejemplo se puede citar la posibilidad de realizar un estudio de los circuitos que se pueden anexar para linealizar la salida del termistor, donde se han encontrado resultados interesantes que no se pueden detallar por razones de espacio.

El Simusol también puede ser utilizado como una herramienta de enseñanza poderosa, permitiendo la presentación de ejemplos prácticos con una muy buena interacción entre el experimento simulado y el estudiante, por lo que se constituye en un importante auxiliar de clase. El ejemplo del termistor ilustra este punto.

## **REFERENCIAS**

- Saravia, L. y Saravia, D., (2000), *Simulación de sistemas solares térmicos con un programa de cálculo de circuitos eléctricos*, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, ISSN 0329-5184, ASADES, vol. 4, No. 1, pp. 08.17-08.22.
- Alía de Saravia, D.; Saravia, L. y Saravia, D., (2002), *Avances en la capacidad del simulador de sistemas solares térmicos, Simusol*, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, ISSN 0329-5184, ASADES, vol. 6, No. 2, pp. 08.31-08.36.
- G. M. Electrónica (2000), *Manual de componentes*, Edición de la propia Compañía, Buenos Aires.
- Norton, H. N. (1982), *Sensor and Analyzer Handbook*, Prentice Hall International, ISBN 0-13-806760-0.

## **ABSTRACT:**

### **SIMULATION OF DIFFERENT PHYSICAL SYSTEMS USING THE PROGRAM SIMUSOL Dolores Alía de Saravia and Luis R. Saravia**

Simusol is a program where circuits can be graphically described and simulated using a numerical solution. It was initially used for the study of solar thermal systems but it can also be used to study other physical systems and even an interactive mix of them. In this paper a generalization of the graphical representation is presented, where the user can generate his symbols to be used in the representation of physical systems not considered in the standard Simusol version. As an example of an electric-thermal system, a circuit representing a thermistor used for temperature measurements is discussed. The time constant of the instrument, the thermistor self-heating and the changes introduced when it is heated using solar radiation are discussed using the Simusol simulator. The thermistor simulation becomes a valuable tool for the design of the instrument and the optimization of the different parameters. Simusol can also be used as a powerful teaching tool, allowing the presentation of practical examples with a high degree of interaction between the simulated experiment and the students.