

## LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA LA MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES<sup>1</sup>

M. CONDORÍ, M. GEA, L. SARAVIA<sup>2</sup>  
INENCO, Instituto UNSa-CONICET  
Universidad Nacional de Salta,  
Calle Buenos Aires 177, 4400, Salta, Argentina  
Tel: 0387-4255579 - Fax: 0387-4255489, e-mail: condori@unsa.edu.ar

**RESUMEN:** Se presentan tres laboratorios de integración implementados durante el dictado de un módulo de la Maestría en Energías Renovables, en la Universidad Nacional de Catamarca. Estos laboratorios incluyen experiencias de medición que permiten su simulación computacional utilizando el SIMUSOL, un simulador desarrollado por el INENCO. Los laboratorios son sencillos de implementar y de fácil simulación mediante el método de circuitos térmicos. Estas herramientas permitieron integrar los conceptos básicos involucrados en los procesos de transferencia de calor por parte de los alumnos, evidenciado en el eficiente diseño de cada red térmica y en los buenos ajustes obtenidos en referencia a los datos experimentales.

**Palabras Claves:** transferencias térmicas, acumulación de calor, circuito térmico.

### INTRODUCCIÓN

Dentro del marco del convenio celebrado entre la Universidad Nacional de Salta y la Universidad Nacional de Catamarca, se dicta en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Catamarca la Maestría y/o Especialidad en Energías Renovables de la Facultad de Ciencias Exactas, carrera acreditada por la Universidad Nacional de Salta. Esta labor está siendo desarrollada por varios integrantes del INENCO Salta y Catamarca, entre los que se encuentran los autores del presente trabajo.

Como parte de esta maestría se dicta el Curso “Energética General y Medio Ambiente”, cuya primera parte consiste de una teoría con contenidos en: Balances térmicos, procesos de transferencia del calor y la ecuación del calor. En particular se trata la conducción, convección térmica, casos estacionarios en una dimensión. La barra conductora. Distintos casos de convección: forzada, natural. Casos internos y externos. Casos de flujo laminar y flujo turbulento. Transferencia térmica por radiación entre superficies. Se complementa la enseñanza teórica de estos temas con la resolución por parte de los alumnos de una guía de trabajos prácticos, con problemas en transferencia de calor estructurados en un grado de dificultad creciente.

La primera parte también incluye el planteo de circuitos térmicos como herramienta de simulación numérica, a través del método del simul eléctrico. Para tal fin se enseña el programa SIMUSOL, desarrollado por el INENCO, que permite una fácil confección de estas redes térmicas a través del DIA y su resolución para casos estacionarios y no estacionarios utilizando el Sceptre, (Saravia, 2000;2001). Para este fin se contó con un laboratorio de siete máquinas con el software para el sistema Linux. En este laboratorio computacional se plantearon prácticas para aprender el manejo del SIMUSOL, y la resolución simultánea de algunos problemas de la guía de trabajos prácticos mencionada anteriormente.

Finalmente, se implementaron prácticas tendientes a lograr la integración de los conceptos básicos del balance térmico, de los procesos de transferencia de calor y de la herramienta de simulación. Para ello se planteó en forma simultánea el desarrollo tres experiencias de laboratorio sencillas para obtener en forma automatizada datos experimentales que permitan luego realizar un ajuste numérico de la simulación computacional de los circuitos térmicos, las que se realizaron utilizando el SIMUSOL.

En las secciones que siguen se describen las tres experiencias de laboratorio realizadas y luego, se presentan los circuitos térmicos desarrollado por los alumnos, como así también los resultados de las simulaciones comparándolas con los datos experimentales obtenidos.

### LABORATORIOS EXPERIMENTALES

#### *Conductora Térmica en una barra de cobre*

Esta experiencia consistió en la medición de la distribución de temperatura a través de una barra conductora de cobre, que se calienta por un extremo y pierde calor por el otro. La barra de 1,20 de largo y sección transversal cuadrada de 16 cm<sup>2</sup>, se aísla térmicamente a lo largo, con excepción de los extremos, envolviéndola con lana de vidrio a fin de disminuir las pérdidas por convección y mejorar la aproximación del sistema a un modelo de transferencia de calor unidimensional. Uno de los extremos se calienta mediante una pistola de calor, mientras que el otro extremo esta descubierto permitiendo pérdidas de

<sup>1</sup> Parcialmente financiado por el CIUNSa y el CONICET

<sup>2</sup> Investigador del CONICET

calor principalmente por convección. Se mide la temperatura interna en cinco puntos de la barra, separados 20 cm entre sí, mediante termocuplas del tipo K. Otra termocupla se coloca cerca para registrar la temperatura ambiente. La lectura de las termocuplas se realiza a través de una tarjeta de adquisición de datos de National Instrument. Se utiliza una PC para controlar la tarjeta mediante software provisto por el fabricante y la visualización en tiempo real de todas las variables medidas.

### Acumulación de calor en un lecho de piedras

Se plantea estudiar la acumulación de calor sensible en un lecho conformado por piedras medianas del tipo de canto rodado. Estas piedras se colocan en el interior de una caja de cartón de 40 cm de largo, 30 cm de alto y 20 cm de ancho. Esta caja está aislada térmicamente en sus cuatro caras longitudinales con poliestireno expandido de 5 cm de espesor, mientras que en una de las caras transversales se coloca un secador de pelo con difusor de aire circular de 15 cm de diámetro. En el interior de la caja, los primeros 10 cm se dejan como un pequeño pleno donde se coloca una malla reticulada metálica para ayudar a uniformizar el flujo de aire. La otra cara se mantiene abierta para permitir la salida del aire después de dejar parte de su calor en el lecho de piedras. Se mide la temperatura del aire a la entrada al lecho y a la salida del mismo, como así también la temperatura del lecho en un punto medio del mismo. Para ello se utilizó un sistema de adquisición conformado por termocuplas conectadas a un módulo de conexión seriada de Nudam y éste, a una agenda electrónica para la colección de los registros. Esta experiencia también fue realizada con un lecho conformada por pequeñas botellas descartables llenas de agua.

### Calentamiento de un recinto con y sin masa de acumulación

Esta experiencia consiste en calentar el aire de una pequeña caja de 30 cm de largo, 20 cm de ancho y 15 cm de alto, con paredes de poliestireno expandido de 1 cm de espesor. En el interior de la misma se coloca una pequeña resistencia eléctrica que se calienta alimentándola con una fuente de tensión constante de 12 voltios. Se mide la temperatura del aire en el interior y el exterior del recinto. El sistema que se utilizó para la adquisición de datos es similar al del laboratorio anterior. Esta experiencia también se repitió aumentando la masa térmica en el interior del recinto colocando un pequeño frasco lleno de agua.

## RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

A continuación se muestran los tres circuitos térmicos correspondientes a las experiencias antes mencionadas en el mismo orden de presentación, tal cual se confecciona en la pantalla del SIMUSOL.

En la Figura 1 se muestra el circuito para la barra de cobre. Este cuenta con una fuente de temperatura correspondiente al nodo 1 de temperatura próxima a la pistola de calor. Las temperaturas registradas para este nodo son tomadas como datos de entrada para la simulación que se introducen a través de la Tabla 2. Los nodos 3, 5, 7 y 9 se corresponden con las posiciones en la que se colocaron las termocuplas en la experiencia y son las que se simulan. El nodo 10 está conectado a una fuente de temperatura constante correspondiente a la temperatura ambiente. Uniéndolos se colocan resistencias conductivas en serie, salvo para el último nodo donde se considera una resistencia convectiva para la pérdida de calor en ese extremo. Se han considerados también nodos intermedios, 2, 4, 6 y 8, donde se colocaron acumuladores de calor para considerar la masa de la barra.

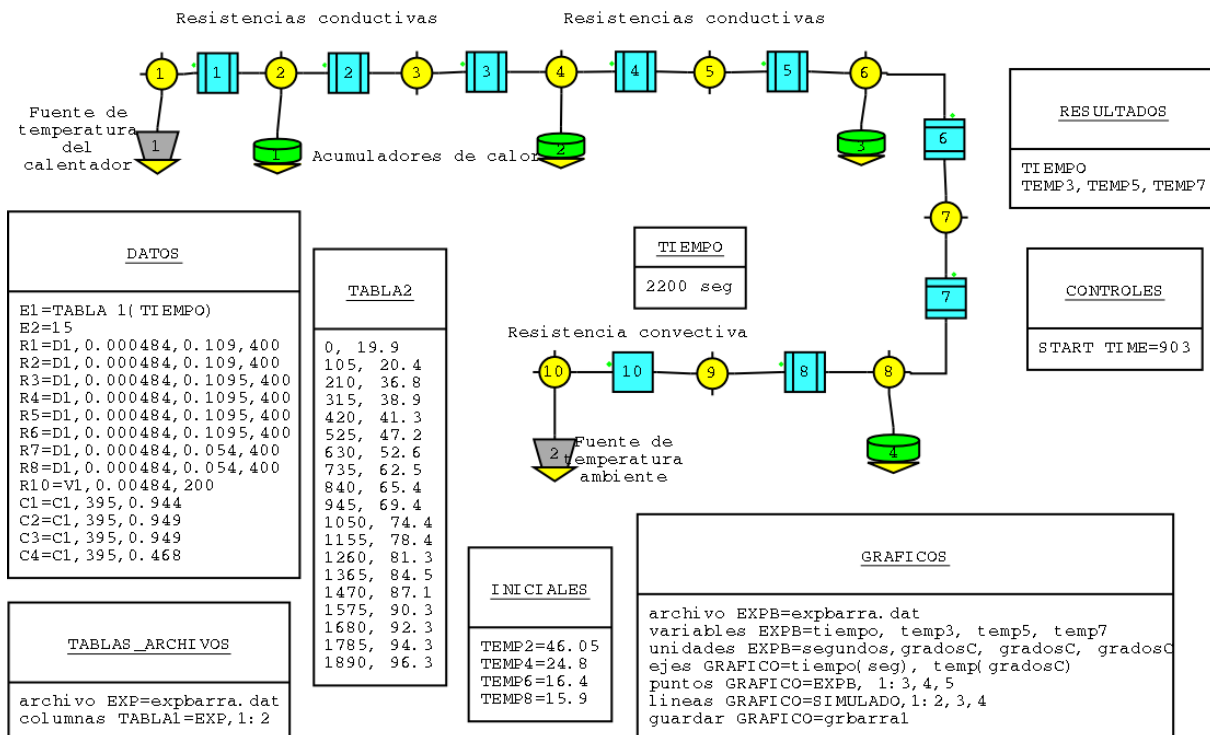


Figura 1: Circuito térmico para conducción de calor unidimensional en la barra de cobre

En la Figura 2 se muestra el resultado de la simulación juntamente con los datos experimentales para los nodos 3, 5 y 7. Se observa una muy buena correspondencia entre ambas, especialmente para bajas temperaturas ya que a medida que la barra se calienta las pérdidas por la envoltura son más significativas y el circuito térmico confeccionado no las considera.

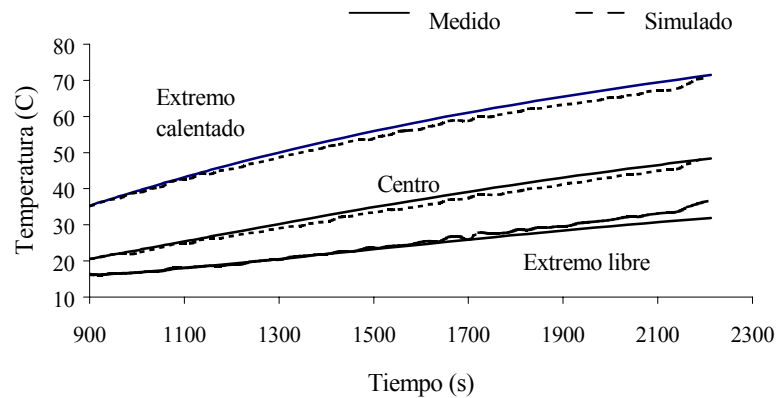


Figura 2: Resultados de la simulación y de los datos medidos para la barra de cobre.

La Figura 3 muestra la red térmica correspondiente al lecho conformado por botellas plásticas llena de agua. El nodo de temperatura 3 corresponde al aire a la entrada al lecho el cual está conectado a una fuente de temperatura que es alimentada con los datos experimentales de la Tabla 1. El aire ingresa al lecho a temperatura alta debido a la fuente de flujo másico de aire forzado y caliente que proviene del secador. Luego este flujo de aire es expelido fuera del lecho hacia el nodo de temperatura referencia para todo el circuito. Se considera un solo nodo para la temperatura del lecho de agua envasada, nodo 2, y uno sólo para la temperatura del aire en contacto con el lecho, el nodo 1. Este último tiene conectado una rama superior que considera primero el intercambio de calor por convección con las paredes de la caja, y luego las pérdidas de calor hacia el exterior, el nodo 6, que se encuentra a una fuente de temperatura que lo mantiene a temperatura constante. A fin de estabilizar el sistema, se considera la masa de aire del nodo 1 colocando un acumulador de calor con sus propiedades. De éste también sale una rama inferior que considera el intercambio de calor entre el aire caliente y las botellas con agua, que inicialmente están a temperatura ambiente. En el nodo 2, correspondiente a la temperatura del agua, se coloca otro acumulador de calor.

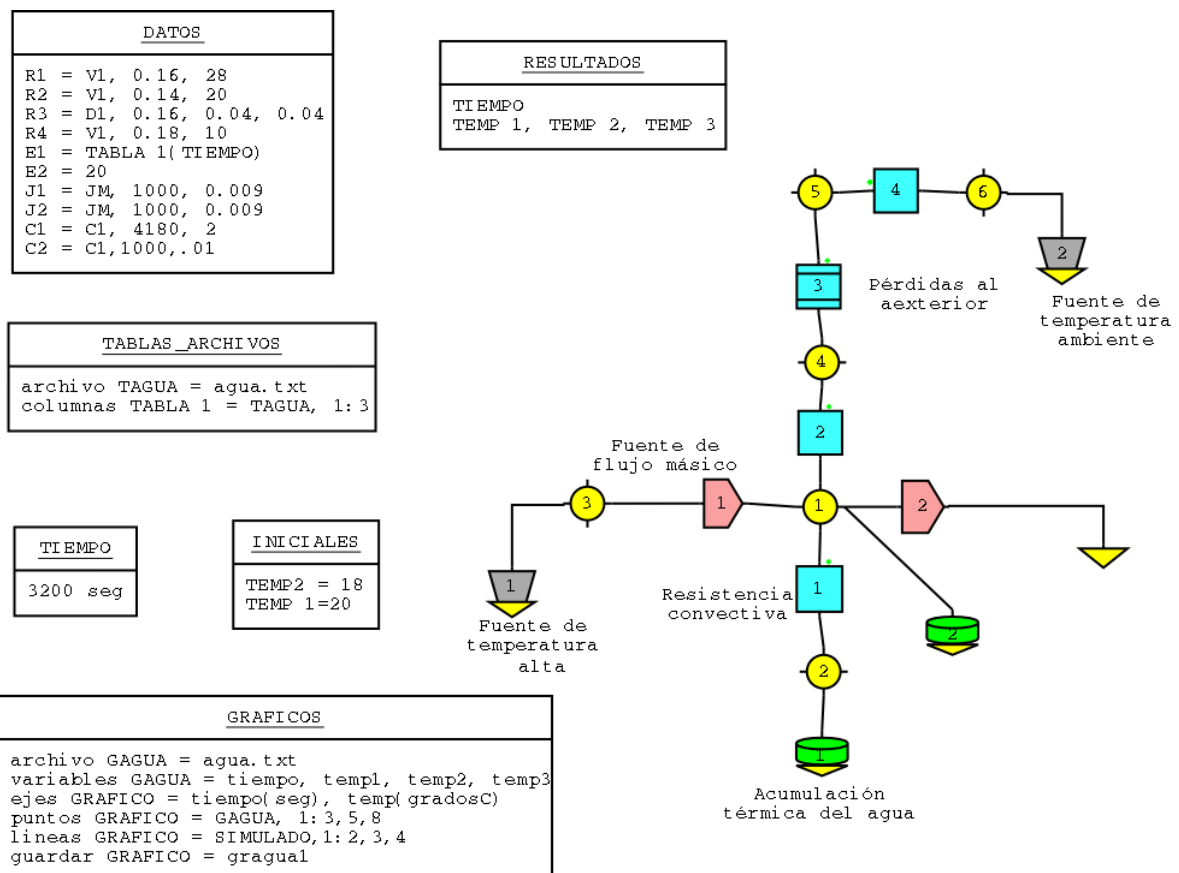


Figura 3: Circuito térmico correspondiente al lecho de botellas plásticas de llenas con agua.

En la Figura 4 se muestran los datos medidos y simulados para la experiencia del lecho conformado de botellas con agua. Se observa que la correspondencia y el ajuste entre ambos son excelentes. Se incluyen en la gráfica varios registros con las condiciones iniciales de la experiencia, luego de lo cual se enciende el secador eléctrico. La simulación es alimentada con los datos del aire de entrada y se simula la temperatura del aire a la salida del lecho y la temperatura del agua en el interior de una botella.

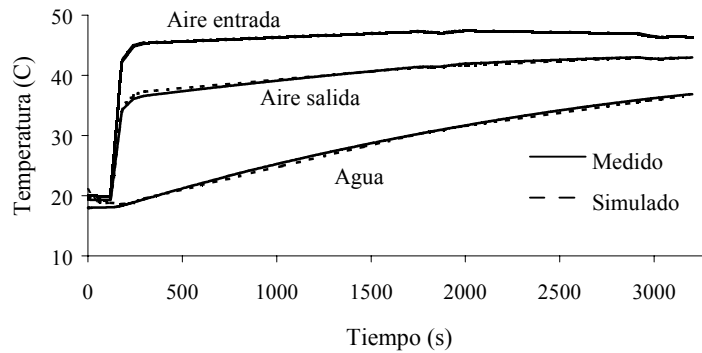


Figura 4: Resultados de la simulación y de la experiencia medida para el lecho de botellas con agua.

En la Figura 5 se muestra el circuito térmico correspondiente al calentamiento del aire en el interior de un recinto aislado. El nodo 1 del mismo corresponde a la temperatura del aire interior y que es calentado por una fuente de calor que se alimenta con los datos de la potencia entregada a la resistencia eléctrica, a través de la Tabla 1. Para estabilizar el comportamiento transitorio del sistema, se considera un acumulador de calor con las propiedades de la masa de aire encerrada. Luego, el aire tiene intercambio de calor por convección con las paredes internas de la caja. Se ha considerado que la temperatura de la superficie interna, nodo 2, y la temperatura de la superficie externa, nodo 4, de estas paredes se encuentran todas a temperatura uniforme. En el interior de la pared se consideran resistencias conductivas y un acumulador de calor con los datos correspondiente a la masa de la pared. Desde el nodo de temperatura 4 la pared pierde calor hacia el exterior, por lo que se coloca una resistencia convectiva conectada al nodo de temperatura ambiente, nodo 5, que se mantiene constante por estar alimentado por una fuente de temperatura fija.

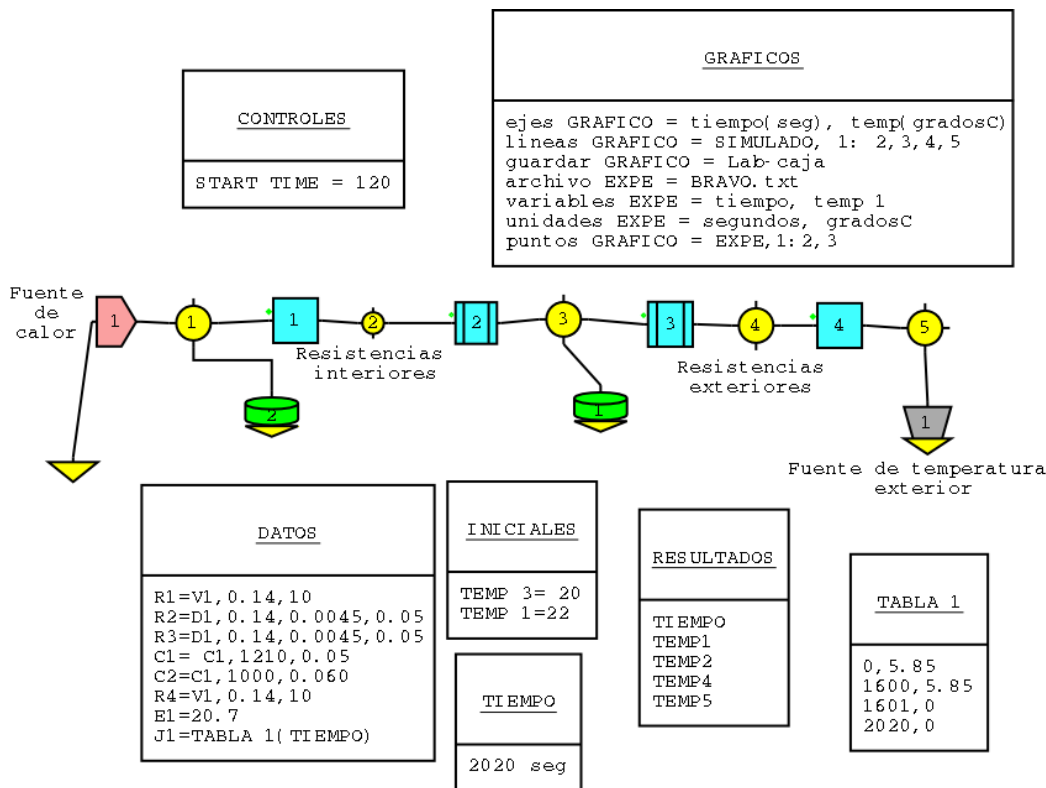


Figura 5: Circuito térmico para la caja aislada con acumulación de calor en un reservorio de agua.

En la Figura 6 se muestran los resultados medidos y simulados de la experiencia, para un registro correspondiente a la temperatura del aire en el interior del recinto, que se ha considerado se encuentra a temperatura uniforme. Se observa otra vez un muy buen ajuste entre los registros experimentales y su simulación computacional. Hacia el final de la experiencia se

cortó la alimentación de la resistencia eléctrica y se quitó la tapa superior de la caja. Esto produce la curva de descarga que se observa en la figura a los 1600 segundos de iniciada la experiencia. Debido a que la simulación realizada ya no se corresponde con la nueva situación experimental, es que se observa la mayor diferencia con los datos medidos.

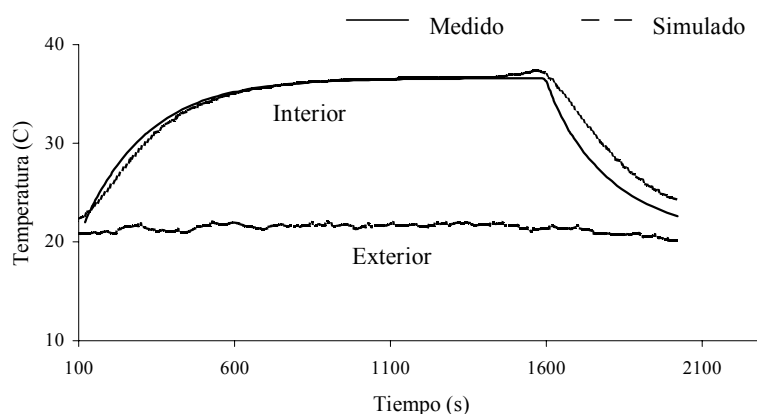


Figura 6: Datos simulados y experimentales para el calentamiento del aire en el interior de una caja aislada.

Los alumnos trabajaron en pequeños grupos de dos o tres personas, que debían realizar una experiencia distinta cada día, durante tres días consecutivos. Entre la experiencia y la simulación, los alumnos contaron con un total de cuatro horas por día. Se planteó como objetivo que al final de la jornada se terminase la simulación, propuesta y diseñada por cada grupo en forma independiente, restando sólo la presentación formal del informe, que se realiza posteriormente por mail.

## CONCLUSIONES

Se han desarrollado tres laboratorios experimentales sobre temas de transferencia de calor implementados durante un curso de postgrado en energías renovables. Estos laboratorios son sencillos de implementar y relativamente de bajo costo. El mayor costo corresponde a los equipos de adquisición de datos, pero que son habitualmente utilizado por los equipos de investigación en el tema.

Como uno de los objetivos se planteó que los alumnos pudiesen realizar la simulación computacional de cada uno de estos laboratorios utilizando el SIMUSOL como herramienta de diseño. En este sentido, el SIMUSOL resultó ser una fácil y potente herramienta para el aprendizaje de los procesos involucrados en la transferencia térmica, ya que el objetivo fue cumplimentado por todos los grupos en los tiempos estipulados.

La integración de estas experiencias con su posterior simulación computacional, conformó una forma muy efectiva de impartir y asimilar los nuevos conceptos al grupo de alumnos, a quienes se les planteó la realización de trabajo individual final en el que deben simular un sistema solar térmico de mayor envergadura. Este debe ser entregado posteriormente, para lo cual cuentan con herramientas de consulta a distancia.

## REFERENCIAS

- Duffie, J. A. and Beckman W. A. (1991). *Solar Engineering of thermal Processes*, 2a. edición, pp. 268-290. Wiley Interscience, New York.
- Saravia L. y Saravia D. (2000). *Simulación de sistemas solares térmicos con un programa de cálculo de circuitos eléctricos de libre disponibilidad*. Avances en Energía Renovables y Medio Ambiente, vol. 4, N° 2 , pp. 8.17-8.22, Argentina.
- Saravia L. y Alias D. (2001). *SIMUTERM: un simulador de sistemas solares térmicos*. Avances en Energía Renovables y Medio Ambiente, vol. 5, N° 2 , pp. 8.07-8.12, Argentina.
- Alias D, Saravia L. Y Saravia D. (2002). *Avances introducidos en la capacidad del simulador de sistemas solares térmicos simuterm (SIMUSOL)*. Avances en Energía Renovables y Medio Ambiente, vol. 6, N° 2 , pp. 8.31-8.36, Argentina.

**ABSTRACT:** Three integrated laboratories are presented. These were implemented during a course of the master in Renewable Energy in the Catamarca National University. These laboratories included measuring tests that can be simulated using the SIMUSOL, a software developed by the INENCO. The laboratories are simple to implement and easy to simulate using the thermal nets method. These tools permitted, by part of the students, the integration of the basic concepts involved in the thermal transference processes. It was showed in the efficient design of each thermal net and in the good fitting obtained in reference to the experimental records.

**Keywords:** thermal transferences, storage of heat, thermal net.