

## **EQUIPOS PARA LA ENSEÑANZA DE LOS FENOMENOS DE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA Y DE CONVERSIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR**

Enrique Albizzati y Germán Rossetti

Cátedra de Fundamentos de la Ingeniería Química - Dpto. de Ing. Qca.  
Facultad de Ingeniería Química - U.N. del Litoral  
Stgo del Estero 2654 - (3000) Santa Fe - Fax 042 - 571162 - E-mail: albizzati@fiquis.unl.edu.ar

### **RESUMEN**

En este trabajo se presentan equipos desarrollados en Trabajos Prácticos grupales, con participación activa de los estudiantes. Las actividades comprenden el diseño, la construcción y el ensayo de un equipo didáctico para el estudio de los fenómenos de Transferencia de Energía, haciendo énfasis en aquellos que pueden ser útiles en el área de Energía Solar. Estos equipos están orientados al análisis fenomenológico y conceptual, y a la medición de coeficientes, involucrando los tres mecanismos básicos: conducción, convección y radiación. El objetivo del Trabajo Práctico es que los alumnos adquieran capacidades, aptitudes y actitudes, no contempladas en los métodos tradicionales de enseñanza. A través de esta nueva modalidad de enseñanza-aprendizaje, se vincula la teoría y la práctica, lo conceptual y lo aplicado, lo actitudinal y la práctica social, la transferencia de generalizaciones a contextos concretos y la consideración de situaciones reales como punto de vista para consolidar los elementos teóricos.

### **INTRODUCCIÓN**

El curso Fundamentos de la Ingeniería Química es una asignatura del tercer año de la Carrera de Ingeniería Química, de transición entre las básicas (Matemáticas, Física, Química, Termodinámica, Cálculo Numérico y Computación) y las correspondientes al ciclo de Formación Profesional (Operaciones Unitarias, Ingeniería de las Reacciones Químicas, Instrumentación y Control de Procesos). En la misma se estudian los Fenómenos de Transferencia de Cantidad de Movimiento, de Energía y de Materia, así como las ecuaciones del Balance Integral y Local de estas propiedades.

Las actividades de enseñanza-aprendizaje comprenden clases teóricas, de resolución de problemas y la realización por parte de los estudiantes de un trabajo práctico intensivo. La planificación del trabajo práctica involucra el diseño, la construcción y el ensayo de un equipo didáctico, y se encuadra en lo que se conoce como "método de proyectos", tiene características extra-áulicas y grupal, realizándose en base a una metodología de participación activa, bajo la supervisión de un docente. La metodología aplicada genera interés, favorece las relaciones interpersonales, brinda oportunidades para la comunicación oral y escrita, contribuye a un mayor conocimiento y desarrollo de la habilidad en la toma de decisiones del estudiante, en lo que respecta a los procedimientos experimentales, exigiendo paralelamente una mayor dedicación de los docentes (Albizzati y colab., 1998).

En este trabajo se presentan algunos equipos desarrollados para el estudio de los fenómenos de Transferencia de Energía, haciendo énfasis en aquellos que pueden ser útiles en el área de Energía Solar. Estos equipos están orientados al análisis fenomenológico y conceptual, y a la medición de coeficientes de transferencia, involucrando los tres mecanismos básicos: conducción, convección y radiación. El tema Conversión de la Radiación Solar, no estaba incluido en la asignatura, utilizándose en un principio la actividad de Trabajo opcional como modalidad de enseñanza. Los resultados de la experiencia llevada a cabo favorecieron la posterior inclusión de la temática en las clases teóricas y de problemas correspondientes a Radiación Térmica.

### **EQUIPAMIENTO DESARROLLADO**

A continuación se refiere a aquellos aspectos más significativos relacionados con los equipos didácticos. Se ha diseñado y construido un primer conjunto de equipos teniendo como base los esquemas y detalles de la bibliografía que incluye experiencias "típicas" para el estudio de estos temas, pero modificando varias de las propuestas en lo relativo a objetivos, modelos teóricos, elementos constructivos e instrumental de medición, alcanzando así una modalidad propia en la aplicación de cada uno de estos dispositivos.

Como ejemplo de las tareas realizadas en el tema Transferencia de Energía se pueden citar los equipos para medición de conductividad térmica de un aislante según la propuesta de Molyneux (1969) y la determinación de perfiles de temperatura en barras sólidas (Crosby, 1968). En el primer caso se ha incluido el estudio de la variación de la conductividad térmica del aislante con la temperatura, y en el segundo el efecto de la temperatura sobre el valor del coeficiente local de transferencia de energía desde la superficie de la barra al ambiente. Además se estudia la incidencia del flujo de aire sobre la transferencia de calor mediante convección forzada y convección natural.

Otros desarrollos clásicos relacionados con esta área son el cálculo y la verificación experimental de coeficientes totales e individuales de transferencia de calor en un tanque agitado con serpentín interno y en un intercambiador de tubos concéntricos (Crosby, 1968). En ambos equipos el calentamiento se efectúa utilizando vapor de agua a baja presión. En el tanque agitado se investiga la variación del coeficiente total de transferencia de energía con el tiempo y con la velocidad del agitador. En los trabajos, empleando el intercambiador de tubos concéntricos, se ha determinado el efecto del caudal másico de fluido calentado sobre el coeficiente total y el coeficiente convectivo interno de transferencia de energía usando el método de Wilson (Greenkorn y Kessler, 1972).

También se han abordado otros temas relacionados con la Transferencia de Energía, pero aunque las pautas seguidas en estos, fueron análogas a las aplicadas en la adaptación de los equipos clásicos referidos con anterioridad, puede decirse que en general el avance fue más lento. En todos los casos, se dio lugar a un análisis más crítico, surgieron mayores discusiones en lo que respecta a detalles constructivos, modelado teórico, técnicas de medición e interpretación de resultados experimentales. Fue necesario contrastar la información obtenida con la proveniente de revistas y libros, se reformularon los modelos y se redefinieron los objetivos del Trabajo Práctico en función de las primeras conclusiones elaboradas.

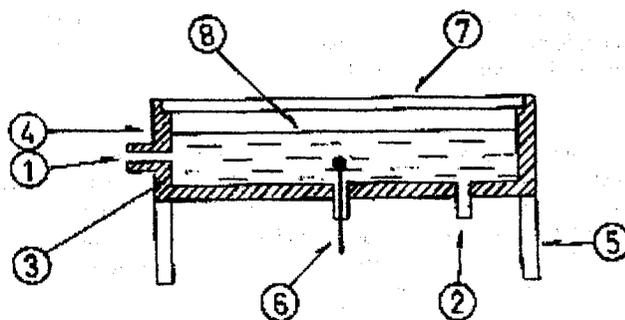
Dentro de este grupo puede incluirse el dispositivo para estudiar la Transferencia de Energía desde una superficie plana (Incropera y De Witt, 1990). Para efectuar el estudio se adoptó la forma de placa circular, analizándose el efecto de tipo de superficie sobre el valor del coeficiente de transferencia de energía y del flujo de calor transferido por los mecanismos de convección natural y de radiación térmica. Las experiencias se llevaron a cabo con superficies de acero inoxidable muy pulido y con la misma superficie cubierta con una pintura negra mate. Los resultados experimentales sirvieron para discutir sobre las restricciones de las correlaciones propuestas en la bibliografía.

Otros equipos de este tipo son los relacionados con la utilización de la Energía Solar: Calentamiento de Agua con Radiación Solar y Calentamiento de Aire en un Colector Solar, los cuales se detallan a continuación:

### Calentamiento de Agua con Radiación Solar

El fenómeno en estudio es el calentamiento de líquidos empleando radiación solar. El objetivo del trabajo es comparar el comportamiento de dos equipos simples que colectan y acumulan energía solar. Están formados básicamente por una caja de chapa galvanizada que contiene agua, en su parte superior tienen una cubierta, luego una cámara de aire y una placa metálica de chapa pintada de negro en contacto con el fluido, y se encuentran aislados en los laterales y en el fondo (Figura 1). Uno de ellos posee la cubierta de vidrio común y el otro de policarbonato alveolar, ambas de igual espesor.

La energía absorbida, que es función del tiempo, se expresa como el producto entre la radiación solar incidente y el rendimiento óptico. La energía perdida por unidad de área se expresa como el producto entre el coeficiente total de pérdidas de energía y la diferencia entre la temperatura del fluido y la ambiente. El rendimiento térmico es función de las temperaturas referidas y puede calcularse midiendo la radiación solar y la masa de fluido. Haciendo uso de un método de regresión se encuentran el rendimiento óptico y el coeficiente de pérdidas, para caracterizar y comparar los dos tipos de colectores solares (Albizzati y colab., 1993).



- |                       |                   |                        |
|-----------------------|-------------------|------------------------|
| 1 - Carga de agua     | 4 - Caja de chapa | 7 - Cubierta de vidrio |
| 2 - Descarga de agua  | 5 - Soportes      | 8 - Placa absorbente   |
| 3 - Aislación térmica | 6 - Termocupla    |                        |

Figura 1: Calentamiento de Agua con Radiación Solar.

En cualquier instante la energía útil se expresa como la diferencia entre la energía absorbida y la energía perdida por el dispositivo, siendo:

$$M_w C_{pw} \frac{dT_w}{dt} = \eta_0 I A_c - U_c A_c (T_w - T_a) \quad (1)$$

$A_c$	área del colector	$T_a$	temperatura ambiente (°C)
$C_{pw}$	calor específico del agua (kJ/kg °C)	$T_w$	temperatura media del agua (°C)
$I$	radiación solar incidente (kW/m <sup>2</sup> )	$U_c$	coeficiente de pérdidas de energía (kW/m <sup>2</sup> °C)

$M_w$  masa de agua (kg)  
 $t$  tiempo (s)

$\eta_0$  rendimiento óptico (-)

Si se define el rendimiento térmico del equipo solar como la relación entre la energía útil y la radiación incidente resulta entonces:

$$\eta = MC_p \left( \frac{dT}{dt} \right) / (IA_c) \quad (2)$$

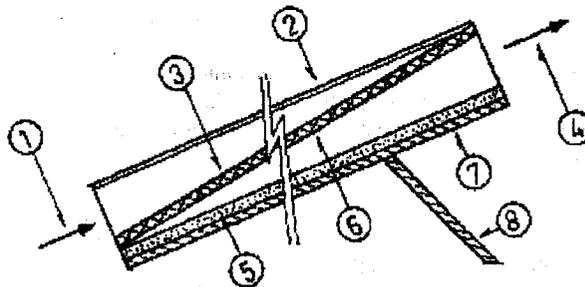
Para cada uno de los equipos, en las experiencias, se miden cada 10-20 minutos las temperaturas  $T$  y  $T_a$ , y la radiación, que es la suma de la radiación directa y difusa incidente sobre el colector. Para cuantificarla se utiliza un piranómetro Eppley que posee como detector térmico una termopila; las temperaturas se miden con termocuplas y lector digital. Dado que el rendimiento térmico puede formularse como:

$$\eta = \eta_0 - U_c (T - T_a) / I \quad (3)$$

al representar  $\eta$  vs  $(T - T_a)/I$ , se puede verificar que los puntos representados están alineados, significando ello que  $\eta_0$  y  $U_c$  son constantes. Por otro lado, aplicando el método de los cuadrados mínimos se determinan  $\eta_0$  (ordenada al origen) y  $U_c$  (pendiente de la recta). Luego se pueden comparar los valores obtenidos de ambos parámetros los que sirven para caracterizar los dos tipos de colectores acumuladores de la radiación solar.

### Calentamiento de Aire en un Colector Solar

Se analiza el comportamiento de un equipo para calentamiento de aire con energía solar, determinándose la eficiencia térmica y sus parámetros característicos. La radiación solar atraviesa una lámina plástica transparente de nylon y se acumula en un lecho absorbente constituido por virutas metálicas distribuidas sobre una malla que actúa como soporte. La corriente de aire, que circula a través del lecho impulsada por un ventilador-extractor, se calienta la recibir parte de la energía térmica acumulada en el lecho. La cubierta y el lecho se hallan contenidos por una estructura de madera cuya cara inferior soporta un aislante térmico (Figura 2). En las experiencias se miden en el transcurso del tiempo, las temperaturas de entrada y salida del aire, y las temperaturas en varios puntos del lecho, también se determinan la velocidad del aire, y la radiación solar sobre el colector. El diseño de las experiencias y el procedimiento de cálculo aplicado permiten hallar la temperatura media de la malla en cada instante, la eficiencia térmica, el rendimiento óptico y el coeficiente de pérdidas de energía, característicos del colector solar.



- |                           |                      |                      |
|---------------------------|----------------------|----------------------|
| 1 - Entrada de aire       | 4 - Salida de aire   | 7 - Caja contenedora |
| 2 - Cubierta transparente | 5 - Aislante térmico | 8 - Soporte          |
| 3 - Material absorbente   | 6 - Malla de soporte |                      |

Figura 2: Calentamiento de Aire en un Colector Solar.

La energía útil en este equipo es el producto entre el caudal, calor específico y salto térmico de la corriente de aire que circula por el colector. A su vez en la ecuación de balance por el lecho absorbente se incluyen los términos relacionados con la energía acumulada, absorbida y perdida.

$$M_L C_L \frac{dT_L}{dt} = \eta_0 I A_c - U_c A_c (T_L - T_a) - m C (T_s - T_e) \quad (4)$$

- |       |                                       |       |                                      |
|-------|---------------------------------------|-------|--------------------------------------|
| $C$   | calor específico del aire (kJ/kg °C)  | $T_e$ | temperatura de entrada del aire (°C) |
| $C_L$ | calor específico del lecho (kJ/kg °C) | $T_L$ | temperatura media del lecho (°C)     |
| $m$   | caudal másico del aire (kg/s)         | $T_s$ | temperatura de salida del aire (°C)  |
| $M_L$ | masa del lecho (kg)                   |       |                                      |

Estas últimas son las nuevas variables incluidas para este caso, ya que el significado de los símbolos  $t$ ,  $\eta_0$ ,  $I$ ,  $A_c$ ,  $U_c$  y  $T_a$  es el mismo que para el equipo solar antes descrito.

El rendimiento térmico del colector solar de aire responde a la expresión siguiente:

$$\eta = m C (T_s - T_e) / (I A_C) \quad (5)$$

Puede ser calculado realizando la medición del caudal y la temperatura del aire y posterior estimación del calor específico, además de la medición de la radiación solar incidente sobre el plano del colector y del área del mismo.

La determinación de los parámetros característicos del colector puede realizarse mediante la definición de un rendimiento ficticio:

$$\eta^* = \eta + m C \left( \frac{dT_m}{dt} \right) / (I A_C) \quad (6)$$

Haciendo uso de la relación lineal entre  $\eta^*$  y  $(T_m - T_a) / I$  semejante a la del colector solar de agua.

$$\eta^* = \eta_0 - U_c (T_m - T_a) / I \quad (7)$$

Por ello es que se aplica en ambas situaciones un método idéntico para correlacionar los datos y obtener los citados parámetros.

## CONCLUSIONES

El desarrollo de los Trabajos Prácticos ha dado lugar a que los estudiantes aborden situaciones que pueden resolverse según variados enfoques, propiciando la estimulación del pensamiento creativo, el análisis crítico, el razonamiento y la iniciativa personal de los estudiantes. También posibilita, en general, una relación más intensa con Centros de Documentación, Gabinete de Informática, Institutos de Investigación, Talleres de Vidrio y Mecánico, y Servicios de Planta Piloto.

El trabajo en grupo favorece la formación en el campo de las relaciones interpersonales y el desarrollo de capacidades de liderazgo, lo cual resulta beneficioso para el futuro Ingeniero considerando que la carencia de estos atributos va en desmedro de su desempeño profesional, aún cuando cuente con las capacidades técnicas requeridas. Además brinda buenas oportunidades para el ejercicio de la comunicación lo cual es útil, teniendo en cuenta la dificultad real que representa para los estudiantes de Ingeniería la expresión oral y escrita.

Con respecto a las actividades relacionadas con la Radiación Solar, se observa que su inclusión en la planificación de las clases teóricas y en los prácticos, ha posibilitado abordar nuevos conceptos, y asimismo suavizar los enfoques tradicionalmente duros relacionados con la Radiación Térmica que se presenta en la bibliografía clásica (concepto de cuerpo negro y reales, variación espectral de las propiedades ópticas), asimilándolos a través de esta temática. Otro aspecto a tener en cuenta es la posibilidad de analizar claramente la participación de los mecanismos de Transferencia de Energía (conducción, convección y radiación) y su importancia relativa en ambos equipos solares. Por otra parte es sabido que existen semejanzas con el tratamiento de otros tipos de intercambiadores (carcaza y tubo, tubos concéntricos, compactos) las que pueden ser destacadas en el análisis de cada uno de ellos.

Finalmente debe comentarse que debido al interés mostrado por los estudiantes, se ha implementado un Taller sobre Conversión Térmica de la Radiación Solar, pasantías, cientíbecas, becas de iniciación a la Investigación y se ha dictado un curso sobre el tema en el Congreso Nacional de Estudiantes de Ingeniería Química, que se realizó en Santa Fe.

**AGRADECIMIENTOS:** Se agradece a la Universidad Nacional del Litoral (Programación CAI+D), por su contribución a la realización del presente trabajo.

## REFERENCIAS

- Albizzati, E., Arese, A., y Rossetti, G. (1993), "Trabajo Práctico sobre Calentamiento de Agua con Energía Solar", Actas de la 16ª Reunión ASADES y 7º Congreso ALES, pp. 493-499.
- Albizzati, E., Arese, A., Estenoz, D. y Rossetti, G. (1998), "Equipamiento para el aprendizaje de los Fundamentos de la Transferencia de Cantidad de Movimiento, de Energía y de Materia", *Información Tecnológica*, Vol. 9, n° 4, pp. 349-355.
- Crosby, E. J. (1968), "Experimentos sobre Fenómenos de Transporte en las Operaciones Unitarias de la Industria Química", Ed. Hispano Americana S.A., Buenos Aires.
- Greenkorn, R. A. y Kessler, D. P. (1972), "Transfer Operations", Ed. Mc Graw-Hill Book Company, New York.
- Incropera F. y De Witt D. (1990), "Fundamentals of heat and mass transfer", 3rd. Ed., Ed. J. Wiley & Sons, New York.
- Molyneux, F. (1969), "Ejercicios de Laboratorio de Ingeniería Química", Ed. Blume, Madrid.