

Análisis del rendimiento térmico de un calentador solar de aire con perforaciones

Badache, Messaoud (1); Hallé, Stéphane (2); Rouse, Daniel (3)

(1) Chaire de recherche industrielle t3e, École de technologie supérieure, Montréal, Canada

messaoud@t3e.info

(2) École de technologie supérieure, Montréal, Canada

stephane.halle@etsmtl.ca

(3) Chaire de recherche industrielle t3e, École de technologie supérieure, Montréal, Canada

daniel@t3e.info

Resumen:

Este artículo presenta los resultados de un estudio sobre la modelización y la optimización del rendimiento térmico de un calentador solar de aire sin acristalamiento y con perforaciones, basado en un diseño experimental completo de tres niveles. Para ello, se construyó un prototipo de calentador solar de aire sin acristalamiento y con perforaciones. Inicialmente, la metodología de diseño experimental nos permitió determinar un modelo analítico que predice el rendimiento de dicho calentador. Este modelo es validado mediante ANOVA y un análisis de residuos fue optimizado gracias a una representación gráfica de las curvas de superficies de respuesta. Una combinación óptima de cuatro parámetros fue obtenida para un rendimiento comprendido entre 70% y 80%.

Palabras claves: Calentador solar con perforaciones, rendimiento, diseño experimental, optimización estadística.

Analysis of thermal performance of an unglazed transpired solar air heater

Abstract:

This article presents the results of a study on modeling and optimization of thermal performance of an unglazed transpired solar air heater, based on an experimental design of three levels. To do this, a prototype of an unglazed transpired solar air heater was built. Initially, the experimental design methodology allowed us to determine an analytical model that predicts the performance of the heater. This model was validated by ANOVA and a residual analysis using a graphical representation of the response-surface curves was optimized. An optimal combination of four parameters was obtained for a performance between 70% and 80%.

Keywords: unglazed transpired solar air heater, performance, experimental design, statistical optimization.

NOMENCLATURA

Símbolos :

A_{coll} : Área del colector, m^2

C_p : Capacidad calórica del aire, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$

D : Diámetro de las perforaciones, mm

DDL : Grado de libertad,-

G_T : Intensidad de la radiación, W/m^2

L : Longitud del colector, m

P : Espacio entre las perforaciones del colector, mm

T_{coll} : Temperatura del colector, $^\circ C$

T_{amb} : Temperatura ambiente, $^\circ C$

T_{out} : Temperatura de salida del aire, $^\circ C$

\dot{m} : Flujo másico de aire por unidad de área, $kg/(m^2 \cdot s)$

Letras griegas:

α : Absortividad

ε : Emisividad
 η_{coll} : Rendimiento del colector
 α_{rev} : Recubrimiento del colector (parámetro cualitativo)

Subíndices:

coll : Colector
 abs : Absorbedor

Introducción

Entre las técnicas más comunes para captar la energía solar se puede distinguir el sistema de calentamiento solar de aire con placa perforada, a veces nombrado calentador solar sin acristalamiento «*Unglazed Transpired Collector*» (UTC). Estos calentadores están generalmente constituidos de una placa perforada de color negro. Las perforaciones, de unos pocos milímetros de diámetro, permiten la admisión de aire proveniente del exterior. El aire es precalentado, por el contacto con la placa perforada, antes de ser introducido en el sistema de ventilación del edificio. Este aire caliente puede ser utilizado principalmente para el precalentamiento del edificio en los países del hemisferio norte, mientras que en los países del sur puede ser empleado para el secado o el calentamiento de procesos.

La investigación sobre el UTC comenzó a finales de los años 80. Estas investigaciones preliminares se centraron en el desarrollo de la teoría de intercambio de calor entre el aire y la placa perforada [1]. Posteriormente, los esfuerzos de investigación han estado orientados principalmente hacia el desarrollo de modelos analíticos presentados por [2], y modelos numéricos presentados por [3]. Dado el gran número de parámetros que intervienen en los sistemas de UTC (diámetro y espacio entre las perforaciones, recubrimiento del colector, radiación incidente, flujo de aire requerido, etc.), la evaluación del rendimiento térmico de estos últimos empleando métodos analíticos y numéricos se convierte en una operación muy compleja. Esta complejidad se deriva del creciente número de parámetros que influyen en el rendimiento térmico del UTC. Sin embargo, estos parámetros no tienen todos el mismo nivel de influencia sobre el rendimiento térmico. El desarrollo de soluciones aproximadas al problema de transferencia de calor, aunque necesario en algunos casos, limita cualquier análisis exhaustivo de las respuestas. Debido a estas limitaciones, proponemos un método potente y confiable en la toma de decisión, el cual ha ganado una buena reputación en el control y la modelización de los sistemas complejos. La elección de este método se basa en el hecho de que su uso es bastante sencillo en sistemas con muchos parámetros de control, como es el caso de los UTCs.

Método del diseño de experimentos

El objetivo del diseño experimental desarrollado en este estudio es conocer los rendimientos térmicos óptimos de un UTC en función de los parámetros de operación. Más concretamente, se trata de implementar un diseño experimental factorial completo de tres niveles para la determinación de un modelo polinomial de orden 2, que muestra el rendimiento térmico del UTC y destaca la influencia de los parámetros claves.

La definición de parámetros de control persigue determinar todos los parámetros que influyen en el rendimiento térmico del UTC. Una revisión de la literatura ha permitido realizar un inventario de todos los parámetros experimentales que pueden afectar al rendimiento de un colector perforado sin acristalamiento. En total, se identificaron once parámetros. A causa del gran número de parámetros, no es posible cuantificar detalladamente la influencia de cada uno de ellos en el rendimiento térmico del UTC. Las limitaciones materiales y de tiempo, nos llevó a fijar el número de parámetros de control a cuatro, reduciendo así el orden del problema a estudiar [9]. Los cuatro parámetros seleccionados y que pueden tener una influencia preponderante sobre el rendimiento térmico del UTC son los siguientes:

- El diámetro de las perforaciones (D).
- El flujo másico de aire aspirado (\dot{m}_a).
- La radiación solar incidente (G_T).
- El recubrimiento del colector (α_{rev})

Los tres primeros (D , \dot{m} , G_T) son parámetros cuantitativos, mientras que el recubrimiento del colector (α_{rev}) constituye un parámetro cualitativo. Dicho parámetro caracteriza los "rendimientos" del recubrimiento frente a la radiación solar incidente y a la radiación infrarroja emitida. Por lo tanto, el recubrimiento del colector no debe ser confundido con su absorptividad.

La estrategia asociada al método del diseño experimental es de elegir los puntos de medición en los extremos del dominio de experimentación. Así, el nivel más bajo del factor se denota por "-1", el nivel intermedio como "0" y alto "1". El dominio de variación de cada parámetro está compuesto de todos los valores comprendidos entre el nivel más bajo y el nivel alto. Una vez que el modelo experimental haya sido determinado, será posible predecir el rendimiento óptimo del UTC dentro del dominio elegido. Los principales pasos a seguir para la aplicación del diseño experimental se muestra esquemáticamente en la Figura 1 [4].

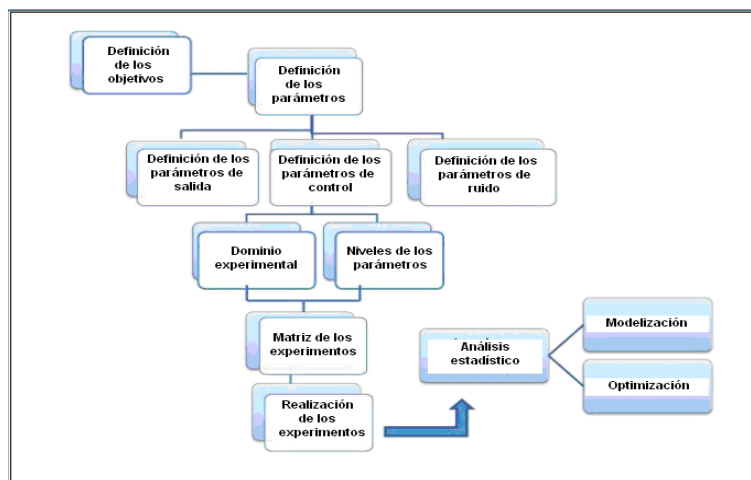


Figura 1: Metodología de diseño experimental aplicado a UTC

Los parámetros de respuesta que permiten predecir los rendimientos térmicos del UTC son la temperatura del aire a la salida del colector (T_{out}) y la temperatura del absorbedor (T_{abs}). Duffie y Beckman [5] desarrollaron la siguiente ecuación que relaciona las temperaturas antes mencionadas con el rendimiento térmico del UTC.

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{m}C_p(T_{out} - T_{amb})}{G_T \times A_{coll}} \quad (1)$$

La temperatura ambiente (T_{amb}), del lugar donde los experimentos se llevaron a cabo, puede incidir sobre el rendimiento del colector. Sin embargo, no fue posible realizar un control preciso sobre dicha temperatura que varía entre 23 y 25 °C. La figura 2 muestra los distintos parámetros identificados en la aplicación de la metodología del diseño experimental sobre el UTC.

Una vez determinados los cuatro parámetros seleccionados para el estudio, el siguiente paso es fijar para cada parámetro un dominio de experimentación y un número adecuado de niveles. Las informaciones disponibles en la literatura permitieron determinar el rango típico de variación de estos parámetros. Refiriéndose a los resultados de [1], el flujo de aire de aspiración, expresado por unidad de superficie del colector (\dot{m}), se ha fijado entre 0.011 kg / (m² · s) y 0,04 kg / (m² · s).

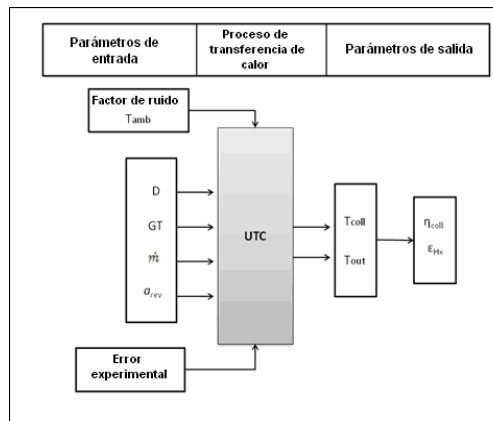


Figura 2: Esquema de los parámetros del diseño experimental realizado sobre el UTC

La radiación representa otro parámetro importante para este estudio. Su dominio de variación se ve limitado por la intensidad del sistema de alumbrado y la necesidad de una radiación uniforme sobre el colector solar. Varias mediciones con un piranómetro (Kipp & Zonen, CMP 11) permitieron determinar las distancias mínimas y máximas admisibles entre las lámparas y el colector. Los valores seleccionados para la intensidad de la radiación incidente (G_T) sobre el colector son 348 W/m^2 , 399 W/m^2 y 605 W/m^2 . Estos valores corresponden a distancias lámparas-colector de 1,4 m, 1,2 m y 1m, respectivamente. Por último, el diámetro de las perforaciones (D) se estableció entre 1,5 mm (nivel inferior) y 2,4 mm (nivel alto), el nivel intermedio se fijó en 2 mm. La tabla 1 muestra los parámetros utilizados y sus niveles.

Tabla 1: Niveles de los factores del diseño experimental

Niveles	Parámetros de control			
	Recubrimiento (α_{rev})	Diámetro D (mm)	Radiación G_T (W/m^2)	Flujo \dot{m} ($\text{kg/m}^2\text{s}$)
-1 Mínimo	Sin recubrimiento	1,5	348	0,011
0 Intermedio	Selectivo	2	399	0,025
1 Máximo	Negro	2,4	605	0,039

Instalación experimental

La metodología de diseño experimental requiere de la evaluación experimental del rendimiento del UTC (llamada función de respuesta) en función de los parámetros de entrada, en todo el dominio experimental designado. La instalación experimental utilizada para la recolección de datos se presenta detalladamente en en [6]. En esta referencia se describen los elementos que forman parte del calentador solar de aire con perforaciones. Los instrumentos utilizados para realizar los experimentos y la incertidumbre asociada con las mediciones experimentales se presentan también en dicha referencia. La figura 3 muestra una foto del calentador de aire con perforaciones y de la fuente de radiación utilizados en la fase experimental.



Figura 3: Fotografía de la instalación experimental

Análisis del diseño experimental

En el presente estudio, la función de respuesta (η_{coil}) se determina mediante un modelo estadístico que toma en cuenta los efectos principales de los parámetros y sus interacciones. Este modelo cuadrático se puede presentar en la siguiente forma general:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{44} X_4^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{14} X_1 X_4 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{24} X_2 X_4 + \beta_{34} X_3 X_4 + \epsilon_i \quad (2)$$

En esta relación, los coeficientes del modelo ($\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ij}$) se denominan coeficientes de regresión. Estos coeficientes son estimados por el método de los mínimos cuadrados [7]. Ellos son 15 en total, de los cuales 6 son coeficientes de interacción no lineal. El enfoque adoptado para establecer el modelo estadístico es el siguiente: I) la verificación de la calidad del modelo, II) el ajuste del modelo y III) la validación del modelo.

I) Verificación de la calidad del modelo

La prueba estadística que permite la verificación de la calidad de la modelización es el estadígrafo R-cuadrado o coeficiente de determinación. El mismo da la proporción de la variación total de los datos que se explica por el modelo: cuanto más se aproxima el valor de R^2 a 1, el modelo es más exacto en su representación de los datos experimentales. El estadígrafo R^2 del modelo del rendimiento da un valor de 0,9547, lo que significa que el 95,47% de la variabilidad de los datos se explica por el modelo resultante para estimar el rendimiento.

II) Ajuste del modelo

El diagrama de Pareto de la figura 4 muestra los parámetros y sus interacciones en orden de importancia decreciente.

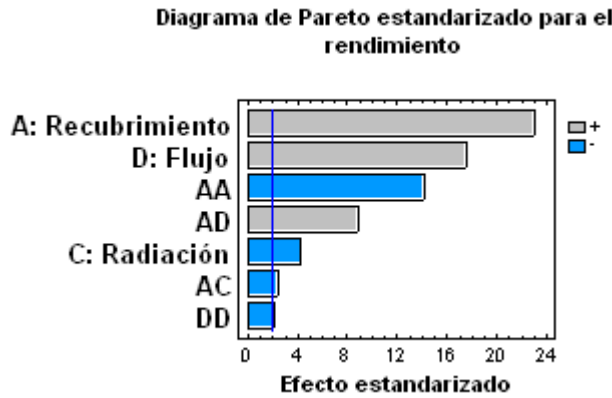


Figura 4: Diagrama de Pareto de los efectos significativos para el rendimiento

La longitud de cada barra es proporcional al valor del estadígrafo calculado para el efecto asociado. La línea vertical se utiliza para juzgar los efectos estadísticamente significativos. Todas las barras que se extienden más allá de esta línea corresponden a efectos estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95,0%. El signo (+) indica que el parámetro contribuye positivamente con el rendimiento mientras que el signo (-) indica que el parámetro contribuye negativamente. En este caso, 7 efectos significativos son identificados. Los parámetros cuyo efecto sobre el rendimiento está a la izquierda de la línea vertical son estadísticamente insignificantes y se eliminan del modelo. El modelo ajustado del rendimiento del UTC se presenta en la ecuación 3 [6].

$$\eta_{coll} = 66,5 + 24,42\alpha_{rev} - 4,29G_T + 18,37\dot{m} - 25,67\alpha_{rev}^2 - 2,93\alpha_{rev} \times G_T + 11,3\alpha_{rev} \times \dot{m} - 3,92\dot{m}^2 \quad (3)$$

III) Validación del Modelo

Entramos en la etapa de validación de modelos utilizando pruebas estadísticas tales como: las pruebas de residuos, de análisis de varianza o la prueba de Student-Fischer [8]. Los resultados del análisis de varianza (ANOVA), realizado a partir del rendimiento del UTC, se presentan en la tabla 2. Esta tabla muestra el porcentaje de varianza explicado por el modelo matemático en comparación con la varianza contenida en los resultados experimentales. El tamaño de $SS_{tratamiento}$ y SS_{error} indica si la diferencia observada entre los tratamientos es real o si se debe al azar. La diferencia debida al tratamiento será real si esta supera el error experimental de manera significativa. Sin embargo, cabe señalar que la suma vinculada al error ($SS_{error} = 4298.86$) constituye el 5,7% de la variabilidad total del rendimiento del UTC ($SS_{tratamiento} = 74208,30$). De esta manera, el 94,3% de la variabilidad total se debe a los efectos causados por los parámetros seleccionados. Esto significa que el recubrimiento, la radiación, el flujo de aire y las interacciones "recubrimiento-flujo" y "recubrimiento-radiación" son responsables de la variabilidad total de la función de respuesta η_{coll} en una proporción de 94,3%.

Tabla 2: Análisis de varianza para el rendimiento

Fuente	Suma de cuadrados	DDL	Media cuadrática	Relación F	P-valor
A:Recubrimiento	31010,2	1	31010,2	526,6	0,0000
C:Radiación	1079,3	1	1079,3	18,3	0,0001
D:Flujo	18240,8	1	18240,8	309,7	0,0000
AA	11865,6	1	11865,6	201,5	0,0000
AC	337,01	1	337,0	5,7	0,0193
AD	4602,0	1	4602,0	78,1	0,0000
DD	276,60	1	276,6	4,7	0,0335
Error total	4298,8	73	58,8		
Total (corr.)	74208,3	80			

Los residuos se definen como la diferencia entre los valores observados y predichos por el modelo de regresión. Ellos tienen la particularidad de representar la parte no explicada por la ecuación de regresión. Este análisis consiste en verificar las tres condiciones básicas siguientes: I) la independencia de los residuos, II) homogeneidad de las varianzas y III) la normalidad de los residuos.

En esta etapa se intenta verificar que la representación de los residuos no muestra ninguna estructura especial para la verificación de la independencia de los residuos y la homogeneidad de las varianzas, y que debe equivaler a un derecho para la verificación de la normalidad de los residuos. Después de haber comprobado con éxito las tres condiciones básicas del análisis de residuos, podemos afirmar que el modelo del rendimiento es representativo y que los resultados que se obtengan a partir de este modelo son válidos.

Análisis de los resultados

En la gráfica de efectos principales, presentada en la figura 5, se muestran los valores estimados del rendimiento del UTC en función de cada parámetro experimental. El parámetro considerado está delimitado por los niveles inferior (-1) y superior (1), mientras todos los demás parámetros se fijan en su nivel intermedio, designado por el valor (0). Por un lado, el análisis de esta figura indica que el rendimiento (η_{coll}) del UTC disminuye cuando aumenta la radiación. Esto se explica por el hecho de que la pérdida de calor en el UTC se incrementa a medida que aumenta la radiación. Al aumentar la temperatura del colector, las pérdidas de calor por convección y radiación hacia el medio ambiente se incrementarán. Este resultado es consistente con lo reportado por [2]. Por otro lado, este gráfico muestra otros dos efectos, más importantes que la intensidad de la radiación. Estos efectos son el recubrimiento del absorbedor y el flujo de aire aspirado. Es de señalar que estos parámetros siguen una evolución no monótona. La interpretación de esta tendencia puede explicarse por la presencia de los términos $-25,67 \times \alpha_{rev}^2$ y $-3,92 \times \dot{m}^2$ en el modelo de regresión (ecuación 3). En efecto, para una radiación y recubrimiento del absorbedor fijados en su nivel intermedio (0), la evolución del rendimiento en función del flujo $\eta_{coll} = f(\dot{m})$ viene dada por la expresión (4). Esta parábola tiene su máximo fuera del dominio de variación del caudal de aspiración, en el punto donde $\frac{d\eta_{coll}}{d\dot{m}} = 0$ y que es igual a 2,34, o sea 0,093 kg/m²/s.

$$\eta_{coll}(\dot{m}) = 66,50 + 18,37\dot{m} - 3,92\dot{m}^2 \quad (4)$$

La ecuación 4 explica lo que acontece dentro del dominio de variación del flujo de aire (entre -1 y 1), es decir, entre 0.011 kg/m²/s y 0.04 kg/m²/s. Fuera de dicho rango la ecuación ya no es válida, porque en realidad el rendimiento debería tender a una constante cuando el flujo tiende a infinito.

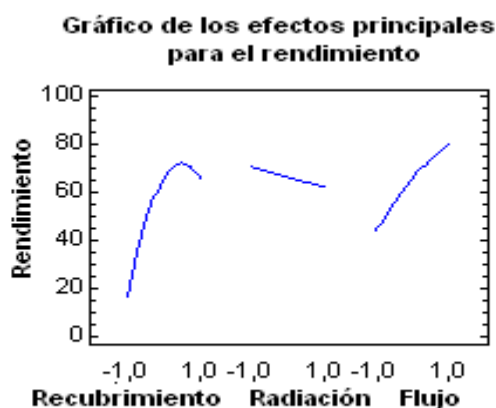


Figura 5: Efectos principales para el rendimiento

La presencia de un máximo en la gráfica $\eta_{coll} = f(\alpha_{rev})$ de la figura 5 se explica por el término $-25,67 \times \alpha_{rev}^2$, lo cual significa que el rendimiento depende en gran medida de la naturaleza del recubrimiento del absorbedor.

Contrariamente a lo que se esperaba los mejores rendimientos se obtienen para un nivel recubrimiento igual a 0,73. Las características ópticas (α , ϵ) de este colector se acercan más a las de un colector con recubrimiento negro que a las de un colector con recubrimiento selectivo. Esta tendencia puede explicarse por el hecho de que las características del absorbedor con recubrimiento selectivo son para colectores expuestos a la radiación solar, cuyo espectro de emisión es comparable a la de un cuerpo negro a 5800 K. En nuestro caso, el uso de lámparas halógenas genera un espectro de emisión que se asemeja al de un cuerpo negro a 3500 K. Por lo tanto, esto nos permite excluir el uso del colector con recubrimiento selectivo y fijar el nivel del recubrimiento del colector en 1 para la optimización del rendimiento del UTC.

La figura 6 (efectos de interacción recubrimiento-flujo) muestra que el cambio del nivel de recubrimiento del colector de su nivel bajo (-1) a su nivel intermedio (0), para un flujo de aire mantenido en su nivel alto (1), aumenta el rendimiento de 18% a 90%, un incremento del 72%. Sin embargo, un aumento de sólo un 27% se observa con el nivel bajo (-1) del flujo de aire. La influencia del flujo de aspiración sobre el rendimiento del UTC se amplifica al sustituir el colector sin recubrimiento (-1) por un absorbedor con recubrimiento selectivo (0) o negro (1). Esto es consistente con las observaciones experimentales y confirma la importancia del uso de colectores con perforaciones que utilicen un recubrimiento selectivo o negro. En tal caso existe una interacción entre estos parámetros, ya que el efecto del flujo depende del recubrimiento. Esta interacción corresponde al séptimo miembro de la ecuación de rendimiento obtenida. En la misma figura 6 se observa que no existe una interacción significativa entre el recubrimiento y el flujo de aire para los niveles medio y alto del recubrimiento del absorbedor.

Optimización del rendimiento

El análisis del gráfico de superficie de respuesta del rendimiento del UTC (figura 7) indica la altura de la superficie de respuesta. Esta altura representa el valor esperado del rendimiento del UTC en función del recubrimiento del colector y del flujo de aire. Los demás parámetros se fijan en sus respectivos valores intermedios. Este gráfico muestra que muchas soluciones se encuentran disponibles, cada una con su propia variabilidad. La elección entre estas soluciones se puede hacer solamente de acuerdo con las especificaciones de los cuatro parámetros del modelo. Una buena elección sería seleccionar el recubrimiento negro para el colector y un flujo de aire elevado para limitar el aumento de la temperatura. Una vez fijados el nivel del recubrimiento y del diámetro de las perforaciones, el gráfico de la figura 7 resulta más fácil de usar. La figura 8 representa los contornos de superficie de respuesta. Esta figura señala un intervalo de flujo de aire entre los niveles "0,25 y 0,75" y un rendimiento de entre 70% y 80% para un absorbedor donde el nivel del recubrimiento y del diámetro es igual a "1" y "0", respectivamente. Dicha figura permite detectar no solamente un punto de funcionamiento óptimo para el rendimiento del UTC, sino también un intervalo de flujo de aire en el cual el rendimiento se encuentra entre 70% y 80%.



Figura 6: Efectos de la interacción recubrimiento-flujo sobre el rendimiento

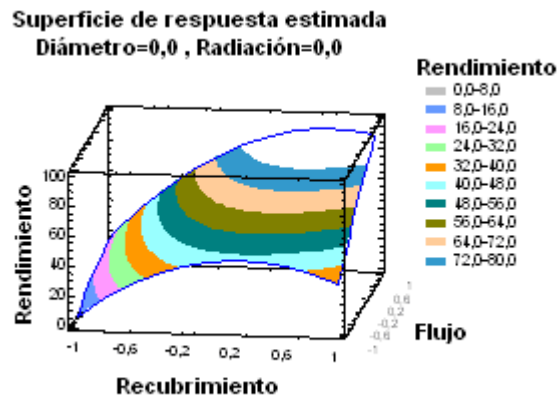


Figura 7: Superficie de respuesta para el rendimiento

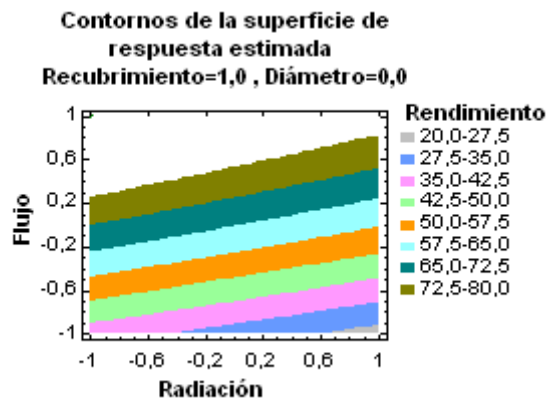


Figura 8: Contornos de superficie de respuesta para el rendimiento

Conclusiones

El empleo del método de diseño experimental demostró su fiabilidad en los sistemas con múltiples parámetros de control, como es el caso de los calentadores solares de aire con perforaciones. Este método permitió abordar una serie de cuestiones, tales como la cuantificación de los parámetros más sensibles del modelo y sus interacciones, lo cual es difícil de lograr mediante la adopción de un método experimental convencional. Tres parámetros principales influyen en el rendimiento del UTC, ellos son: el recubrimiento del absorbedor, el flujo de aire aspirado por el ventilador y la intensidad de la radiación. El diámetro de las perforaciones es el parámetro menos influyente. Recordemos que el recubrimiento del absorbedor y el flujo de aire son los parámetros más influyentes del modelo. Por último, el método de superficies de respuesta permitió identificar un ajuste óptimo de los cuatro parámetros en el cual el rendimiento del UTC oscila entre 70% y 80%.

Referencias bibliográficas

- [1] KUTSCHER, C.F.C., et B.BARKER., Unglazed transpired solar collectors: heat loss theory. Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME, 115(3), p. 182-188, (1993).
- [2] LEON, M.A. et S. KUMAR, Mathematical modeling and thermal performance analysis of unglazed transpired solar collectors. Solar Energy, 81(1), p. 62-75, (2007).

- [3] ARULANANDAM, S.J., K.G.T. HOLLANDS, et E. BRUNDRETT, A CFD heat transfer analysis of the transpired solar collector under no-wind conditions, *Solar Energy*, 67(1-3), p. 93-100, (1999).
- [4] GOUPY, J., Introduction aux plans d'expériences, 2e éd. Technique et ingénierie, Série Matériaux, Paris, Dunod, 293 pages, (2001).
- [5] DUFFIE, J.A.B., et WILLIAM A., Solar engineering of thermal processes. 3rd ed, Hoboken, N.J. Wiley, 908 pages, 2006.
- [6] BADACHE, M., Modélisation et optimisation des performances thermiques d'un mur solaire à perforations (UTC), Mémoire de maîtrise, École de Technologie Supérieure: Canada. 113 pages, (2010).
- [7] JAYARAMAN, K., Manuel de statistique pour la recherche forestière, D.d. forêts, Editor, FO: GCP/RAS, (1999).
- [8] VIGIER, M., Pratique des plans d'expériences : méthodologie Taguchi et compléments: Paris . Éditions d'Organisation, 189 pages, (1988).
- [9] BADACHE, M., ROUSSE, D.R., HALLE, S., Experimental characterization of an unglazed transpired solar collector, *Proc. Eurosun* , (2010).