

ESTUDIO DE UN CAUDALÍMETRO SIMPLE Y DE BAJO COSTO PARA MEDICIONES EN SISTEMAS SOLARES TERMOSIFÓNICOS

Juan M. Lucchini, Javier Garnica, Rodolfo G. Stoll, Jorge R. Barral
Universidad Nacional de Río Cuarto - Facultad de Ingeniería - Departamento de Mecánica
Ruta Nac. 36 Km. 601, 5800 Río Cuarto
Tel./Fax: (0358) 4676246 - e-mail: mlucchini@ing.unrc.edu.ar

RESUMEN: Este trabajo presenta el diseño, construcción, análisis y calibración de un caudalímetro prototipo para medir el flujo de agua a través de un sistema de calentamiento solar termosifónico. Se pretende lograr un equipamiento sencillo, barato, con bajas pérdidas de carga y fácil montaje para experiencias a campo. El principio de funcionamiento consiste en la inyección de un pulso de energía térmica por donde circula el caudal a conocer, determinándose éste a partir del tiempo que tarda la perturbación en pasar por termocuplas ordenadas aguas abajo en la tubería. Las mediciones se hicieron con termocuplas K y un adquirente de datos de precisión, determinándose la correspondencia de un caudal medido con respecto al deducido a partir de la velocidad de propagación de la mencionada perturbación. Se graficaron los datos y se analizaron curvas que mejor ajustaran a los experimentos. Se logró una buena aproximación con curvas recíprocas de paquetes estadísticos convencionales.

Palabras clave: caudalímetro, calibración, sistema termosifónico.

INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo fue construir, analizar el comportamiento y determinar la curva de calibración de un equipo de medición de caudal másico, considerando que sea de fácil montaje para cualquier tipo de sistema solar termosifónico para calentamiento de agua, que se pueda construir un dispositivo con materiales provistos en el mercado local, y que permita, en lo posible, mediciones a campo en lugares sin servicio eléctrico.

En los sistemas de calentamiento solar de agua que utilizan el principio de funcionamiento termosifónico, el flujo de agua que circula entre el colector y el tanque es ocasionado por el calentamiento que proporciona la radiación solar, siendo nulo durante la noche y variable durante el día., lo que dificulta el estudio de estos sistemas. Si bien se han propuesto modelos de estimación de caudal basados en las diferencias de densidades y las pérdidas por fricción en los distintos componentes del circuito hidráulico (Goswami, 2000), resulta muy difícil poder determinar con alguna precisión los parámetros de estos modelos para obtener resultados confiables. Existe un método analítico aproximado propuesto por Duffie y Beckman (1991) el cual presenta el problema de que no siempre se cuenta con parámetros como el coeficiente global de pérdidas de calor U_L y el Factor de eficiencia del colector F' para calcular el caudal termosifónico. Es por ello que es necesario medir el caudal en el circuito donde se produce el efecto termosifónico.

El flujo debido al efecto termosifónico, ocasionado por la diferencia de densidad entre el agua caliente y el agua fría, dependerá de las condiciones climáticas, del estado del agua en el tanque de almacenamiento y de las pérdidas de carga. Los valores máximos de estos caudales son del orden de los 0,011 kg/s, lo cual es un valor extremadamente bajo, ocasionado por una diferencia de presión que a lo sumo es de 30 mm de columna de agua (Morrison y Ranatunga, 1980).

Debido a que la fuerza impulsora del movimiento del fluido es pequeña no es posible introducir caudalímetros tipo rotámetro, a resorte, etc., en el circuito, ya que ocasionarían caídas de presión, que por pequeñas que sean, afectarían sustancialmente el flujo termosifónico de los colectores solares, modificando el valor del parámetro que se desea medir.

Se han utilizado distintos dispositivos para determinar estos bajos caudales. Uno de los elementos utilizados ha sido un medidor de caudal Láser-Doppler (Morrison y Ranatunga, 1980), que es ideal desde el punto de vista técnico, ya que no introduce ninguna perturbación al flujo dentro de la tubería, pero el costo del equipo es muy elevado. Bannerot et al. (1992) han utilizado burbujas de hidrógeno generadas por electrólisis del agua, midiendo el tiempo que tarda la burbuja en recorrer cierta distancia para determinar el caudal, método que además de su complejidad tiene como defecto una sobreestimación del caudal cuando su magnitud es baja. Un método basado en la utilización de una traza de tinta fue usado por Huang y Hsieh (1985), y uno similar es descrito por Chuawittayawuth y Kumar (2002), el cual implica la necesidad de una cañería transparente y funciona para caudales muy bajos con un error de un 30 %. Norton et al. (1987), utilizaron un medidor de caudal de disipación térmica, método que tiene la desventaja de tener errores por ser la resistencia del alambre no constante a causa de las variaciones de la transmisión por convección por las fluctuaciones de velocidad del flujo a medir. Shitzer et al. (1979) utilizaron un dispositivo especial que se basa en la traza de una disipación térmica, pero el instrumento no es descrito Meir et al. (2002) utilizaron un método calorimétrico para determinar la performance del sistema solar por mediciones de datos en el lugar.

Fraser et al. (1995) y Belessiotis y Mathioulakis (2002) utilizaron un sensor de flujo basado en una turbina que opera por medios magnéticos, lo cual reduce las pérdidas por fricción. Kudish et al. (1985) utilizaron un método de medición directo, adaptando una técnica de laboratorio de medición de volúmenes, pero solo sirve para evaluar el colector. Young (1981) implementó un método indirecto usando la distribución de temperaturas del tanque de almacenamiento para la determinación de caudal, pero este método solo fue validado para sistemas de circulación forzada.

Uno de los métodos que en principio se presenta como conveniente, tanto en lo que hace a nivel de complejidad como a costos es el basado en principios calorimétricos (Collares-Pereira et al., 1981), el cual consiste en estimar el caudal en función del salto térmico que se produce en la masa de agua cuando se le proporciona energía, midiéndose la temperatura del agua antes y después de la entrega de dicha energía. Este sistema de medición presenta dos desventajas: se necesita ingresar una cantidad de energía considerable para efectuar la medida de caudal, provocando errores en la misma, y además el caudalímetro calorimétrico necesita un tiempo para estabilizarse, lo que provoca que cada ciclo de medición sea demasiado lento (Lucchini et al., 2007).

MÉTODO PROPUESTO

Para evitar los problemas ocasionados por un sistema de medición del tipo calorimétrico, se propone un procedimiento que consiste en inyectar una pequeña cantidad energía térmica en una cañería horizontal por donde circula el caudal a conocer. La cantidad de energía introducida es ínfima, de manera que solo actúa como marcador, de la misma manera que las tintas en los trabajos citados en la introducción (Huang y Hsieh, 1985; Chuawittayawuth y Kumar, 2002). A diferencia del método de las tintas no ingresa masa al sistema por lo que la tubería es estanca (sin posibilidad de fugas), y como el indicador de la perturbación introducida es la temperatura los sensores son simples, económicos, disponibles y bien conocidos (termocuplas y termómetros digitales). Además, si se introduce la energía térmica por medio de una resistencia eléctrica, con la selección adecuada de ésta (dimensiones y formas), se pueden lograr pérdidas de carga mínimas.

El caudal másico que circula por una tubería se puede calcular como:

$$\dot{m} = \delta \cdot A \cdot v \quad (1)$$

Donde δ es la densidad, A es el área de sección transversal del producto y v es la velocidad media del fluido.

Si se supone una porción de cañería en la cual de alguna forma se eleva la temperatura del fluido, como de la parte sombreada de la figura 1(a), y considerando fluido ideal, a medida que transcurre el tiempo esa porción de materia se desplazará, y la distribución de temperatura se modificará por transferencia de calor entre porciones contiguas de fluido. Al cabo de un tiempo (t_B) la perturbación introducida llegará a la posición B, ubicada a una distancia d_{AB} aguas abajo de la posición A, como se muestra en la figura 1(b). Del mismo modo transcurrido un tiempo t_C la perturbación llegara a C, Figura 1(c). El tiempo que tarda la perturbación desde A hasta B, como de B a C podría considerarse como función de la velocidad media a la que circula el fluido (v) y de la transferencia de calor entre porciones adyacentes del fluido.

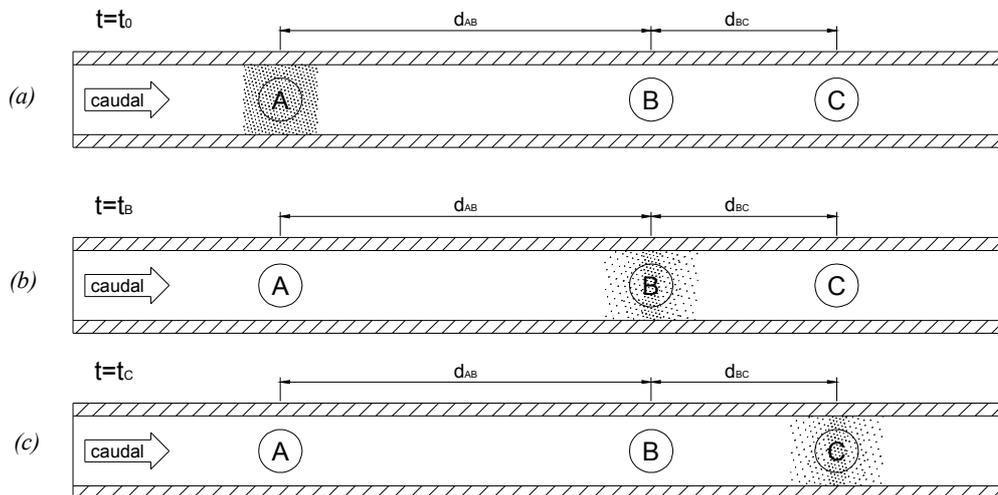


Figura 1. Desplazamiento de la perturbación térmica.

En un fluido real t_{AB} y t_{BC} dependerán de la viscosidad, turbulencia, etc. Pensando en esto podría considerarse al tiempo t_A como función de la velocidad media, la transferencia de calor, la viscosidad y otros términos no lineales, esto es:

$$t_{AB} = f_1(v, TC, \alpha) \quad (2)$$

Donde TC es la transferencia de calor y α contiene los términos no lineales, y teniendo en cuenta la ecuación 2 se puede expresar a v como:

$$v = f_2(t_{AB}, TC, \alpha) \quad (3)$$

Utilizando las ecuaciones 1 y 3 podemos escribir:

$$\dot{m} = f_3(t_{AB}, TC, \alpha) \quad (4)$$

Si consideramos que al menos para un caudal determinado todos los parámetros permanecen constantes el caudal sería sólo función del tiempo t_{AB} , esto es:

$$\dot{m} = F(t_{AB}) \quad (5)$$

Igual razonamiento se puede seguir para t_{BC} .

El problema consiste ahora en encontrar la relación funcional F y los parámetros que correspondan para cada caudal. Aprovechando las posibilidades actuales de medición se propone utilizar un modelo de caja negra para F , de manera que, obtenido t_{AB} , automáticamente se obtenga el caudal. Para encontrar F se deben realizar mediciones simultáneas de caudal másico, t_{AB} y t_{BC} , varias mediciones para algunos caudales dentro del rango de interés, y mediante técnicas estadísticas se pueden obtener los parámetros de F .

Cabe mencionar que el valor de temperatura que se mide en B y C no es relevante, ya que sólo sirve como indicador para obtener t_{AB} o t_{BC} , detectando variaciones de temperaturas.

DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

El prototipo ensayado consta de un tubo de acrílico transparente de 20 mm de diámetro interno, en el cual se introdujo una resistencia eléctrica. Esta resistencia es la encargada de entregar la energía térmica al fluido que circula por la cañería. Aguas abajo de la resistencia se ubican cinco termocuplas tipo K, que sirven para medir la temperatura del fluido. La Figura 2 muestra un esquema básico del prototipo construido.

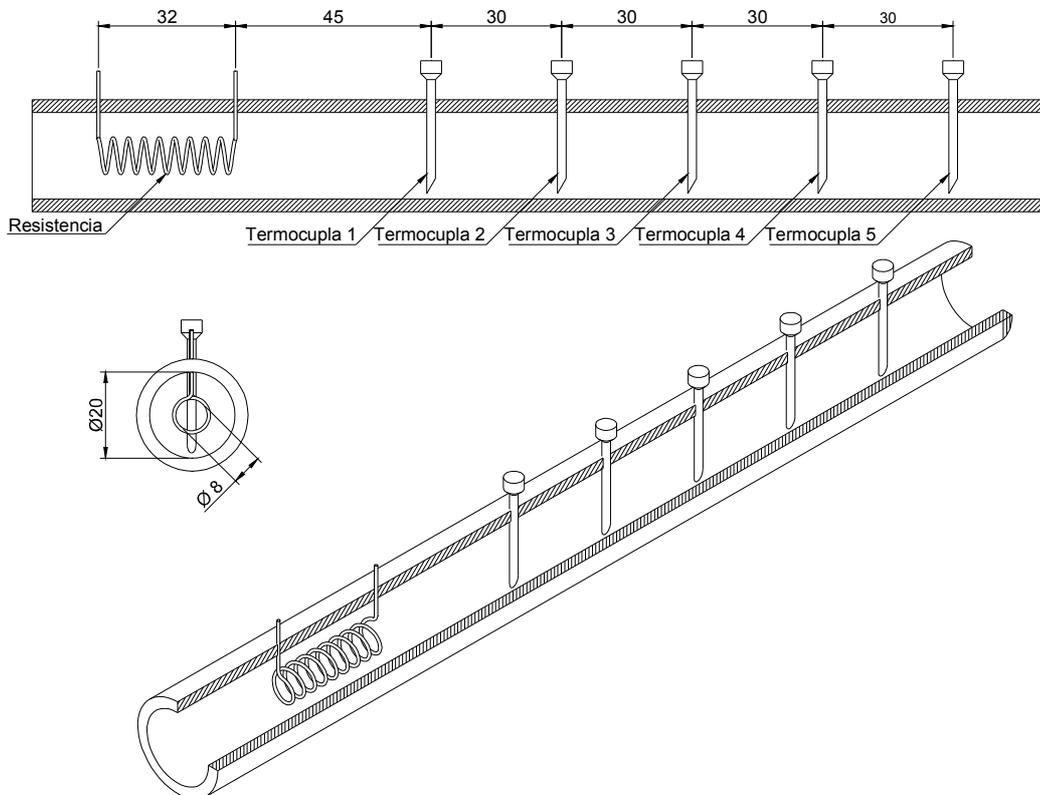


Figura 2. Esquema básico del caudalímetro diseñado (medidas en milímetros).

La resistencia que se encuentra sumergida en el agua se construyó con alambre de nicrome ya que este material tiene una resistencia elevada por unidad de longitud, lo que evita un calentador voluminoso que generaría mayores pérdidas de carga en la cañería. El alambre es de 0,75 mm de diámetro y la geometría de la resistencia resultó una hélice de 8 mm de diámetro

interno, aproximadamente 3,5 mm de paso y una longitud aproximada de 30 mm. El valor de la resistencia es de 1 ohm aproximadamente y la fuente de alimentación es de 12 Voltios de corriente continua, lo que implica que la potencia suministrada es de 140 W. La selección de este nivel de tensión evita riesgos de descargas eléctricas y permite que la operación a campo sea posible en lugares donde no exista red de distribución eléctrica, al tener la posibilidad de conectar este dispositivo a una batería de automóvil.

Las termocuplas usadas son de tipo K, soldadas en la punta caliente con estaño y envainadas en acero inoxidable pulido. De esta forma se intenta uniformizar la respuesta térmica de los sensores e introducir la menor perturbación hidrodinámica en el fluido que se desplaza por el tubo. La primera termocupla se encuentra a 45 mm de la resistencia y las demás a 30 mm una de otra. En la Figura 3 se muestra el prototipo construido.

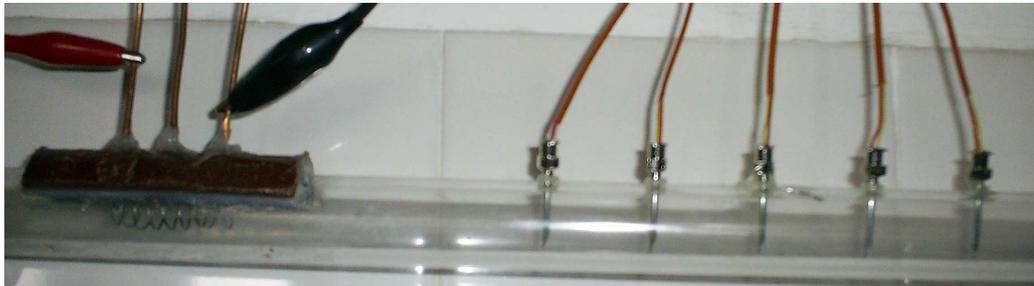


Figura 3. Prototipo.

METODOLOGÍA GENERAL

El ensayo del equipo consistió en la determinación del caudal real mediante la medición del peso del fluido que sale por la tubería, utilizando la señal de la galga extensiométrica de una balanza electrónica (KRETZ modelo SIN 31B), en el tiempo que dura la experiencia. Simultáneamente se midieron las señales de tensión de alimentación de la resistencia y de las termocuplas para estimar el funcionamiento del caudalímetro. Todas las señales fueron tomadas por un adquisidor de datos (Agilent tipo 34970A) con interfase gráfica a una PC, de manera que todos los datos medidos se encuentran referenciados a la misma base de tiempo. El intervalo de muestreo fue de 0,5 segundos.

Para calibrar el prototipo de caudalímetro se dispuso de los elementos mostrados en el esquema de la Figura 4. La función del tanque estabilizador fue conseguir que la altura del líquido se mantuviera constante mediante el flotante colocado a la salida de la red de agua corriente. Esto permitió que el flujo no varíe por perturbaciones que podrían introducirse por la red. A continuación se colocó el prototipo del caudalímetro que se sujetó a las cañerías mediante acoples rápidos. La resistencia eléctrica era alimentada por una batería de 12V y mediante un pulsador se administró el pulso de energía. La válvula de regulación de flujo fue colocada en el extremo final de la cañería, de manera que esté sobreelevada para eliminar fácilmente cualquier burbuja de aire en la cañería del prototipo. Durante el ensayo se prestó atención a que el fluido deslice sobre las paredes de la probeta, de manera que no genere perturbaciones al chocar sobre la superficie del fluido que está en dicha probeta. La balanza fue nivelada sobre una mesada de mármol.

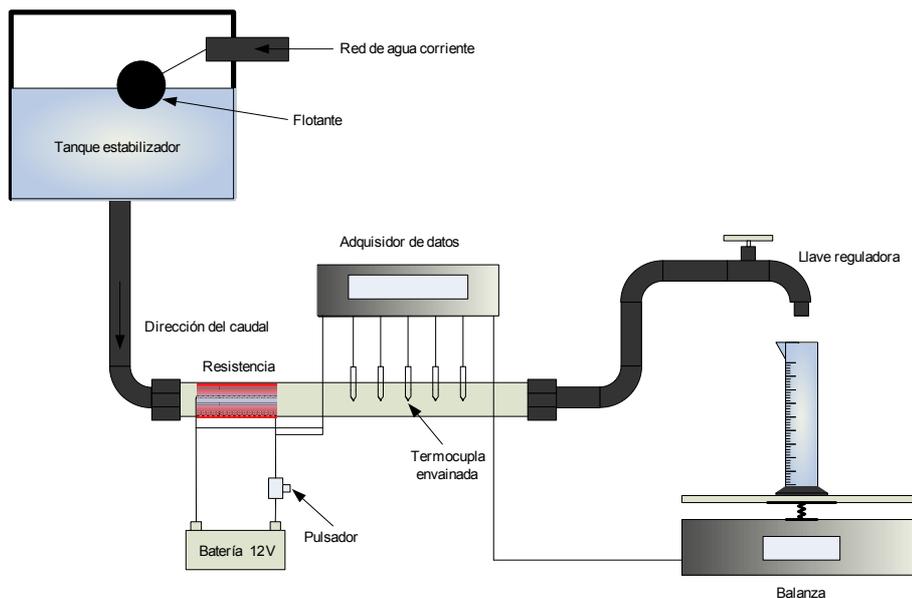


Figura 4. Esquema del circuito de calibración.

Para cada una de las series de mediciones se fijó un caudal aproximado a través del prototipo, usando un cronómetro y una probeta de 500 ml de capacidad. Una vez establecido el caudal se comienza a medir con el adquisidor de datos, posteriormente se le proporciona tensión a la resistencia durante 10 segundos y se registran los valores de temperatura, peso y tensión durante 120 segundos, de manera de medir la propagación de la perturbación térmica introducida. Después de repetir cinco veces las mediciones, se establece otro caudal y se repite las operaciones enunciadas anteriormente. Se efectuaron mediciones para 7 caudales distintos de manera que se obtuvieron 35 mediciones. Los datos recopilados se utilizaron para determinar una curva de calibración del prototipo.

DETERMINACIÓN DEL CAUDAL REAL

Para determinar el caudal real que circula fue necesario calibrar la balanza utilizada. Como la resolución estándar de la balanza es de 5 g y además poder registrar la medición en una única base de tiempo, se midió directamente la señal generada por el sensor de fuerza de la balanza y se efectuó la calibración; de esta manera se determinó el caudal real con el que se está trabajando. A modo de explicación se presenta sólo un caso, pero se debe tener en cuenta que este proceso se repite a lo largo de las 35 mediciones.

El peso que mide la balanza es variable en el tiempo ya que se modifica constantemente debido al caudal que ingresa al recipiente que ésta pesa. La derivada de la masa con respecto al tiempo es, por definición, el caudal másico. Para obtener esta derivada se buscó la función de ajuste, mediante mínimos cuadrados, de los datos medidos y luego se derivó analíticamente. De esta forma se puede tener en cuenta un gran rango de datos para obtener el valor del caudal medio que circula por el prototipo durante cada medición.

En el gráfico de la Figura 5 se observa que la masa medida es lineal en el tiempo durante cada ensayo.

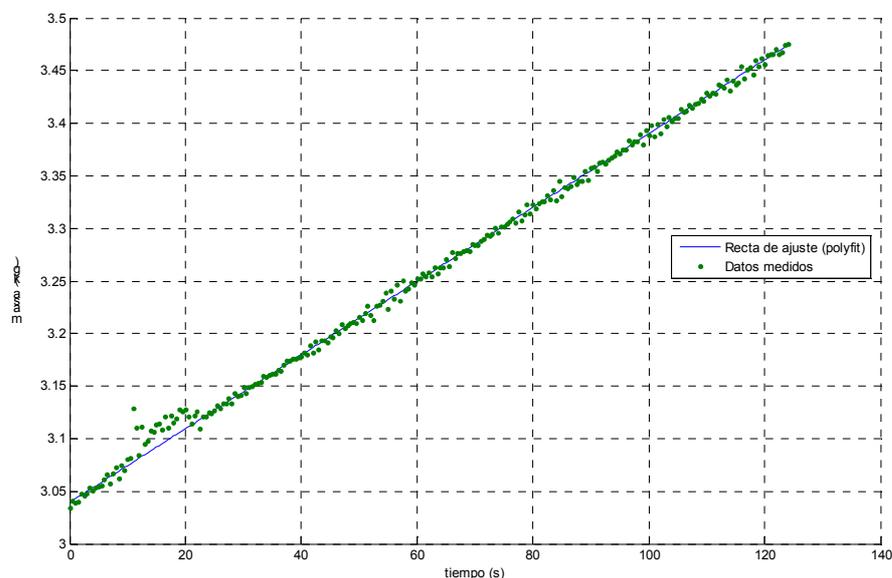


Figura 5. Respuesta de la balanza, masa en función del tiempo.

Para encontrar la función lineal que representa a la masa en función del tiempo se planteó una regresión lineal de los datos medidos. Mediante un software de estadística se efectuó un análisis de la respuesta de la balanza, obteniendo un modelo lineal que describe la relación entre masa y el tiempo t que se presenta en la ecuación 6. El valor del estadístico fue R -cuadrado = 99,903 % y el coeficiente R -cuadrado ajustado = 99,902 %, estos valores se mantuvieron durante las 35 mediciones realizadas.

$$masa = 3,0379 + 0,0035278 \times t \quad (6)$$

Derivando la ecuación 6 se obtiene el caudal que circula por la cañería.

FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO

En la Figura 6 se muestran las señales tomadas por el adquisidor de datos. En ella se observan la señal de tensión proporcionada a la resistencia, y las señales de las termocuplas. Los asteriscos puestos en cada curva denotan los tiempos que se usarán como referencia para calcular los intervalos de tiempo, los cuales servirán para inferir el caudal que circula. De todos los intervalos de tiempo marcados, solo se utilizó para realizar la curva de calibración del caudalímetro aquel intervalo de tiempo que presentaba menor error estándar relativo al caudal medio medido para los 7 caudales probados.

Para cada serie de mediciones correspondientes a un caudal determinado se analizó la variabilidad relativa de los intervalos de tiempo entre el comienzo del pulso de energía y cada termocupla y también entre distintos pares de termocuplas,

representado por la desviación estándar dividido la media (error estándar relativo). Esto se repitió para todos los caudales medidos, seleccionando de estos datos el par de señales que ofrecían menos variabilidad a lo largo de todo el rango de caudales ensayados. Resulta así que el par formado por la señal del pulso de energía y de la primera termocupla es el más aceptable y también se observó que las señales de las termocuplas 1 y 5 proporcionan mediciones estables. Este último par es el que se usaría en una operación a campo, ya que con un termómetro digital de dos entradas sería suficiente para efectuar las mediciones.

El rango de caudales en el que se evaluó el prototipo fue entre 1,7 g/s y 16 g/s, ya que dentro de este intervalo se supone que operan los equipos termosifónicos. En este rango de caudales la potencia utilizada fue de 140 W, resultando la energía introducida en cada medición de 1400 J. Si comparamos esta energía con la utilizada en el caudalímetro calorimétrico (Lucchini et al., 2007), que utiliza una potencia de 70 W durante 15min, se obtiene una relación de energía 45 veces menor que la que utiliza este último sistema.

Los intervalos de tiempo quedaron determinados cuando cada termocupla registró un cambio de temperatura del fluido lo suficientemente grande para evitar el ruido de las señales (en este caso de 0,25°C). Cabe destacar que el cambio de temperatura no debe ser demasiado grande ya que esto implicaría entregar mayor cantidad de energía al fluido para poder detectar la perturbación.

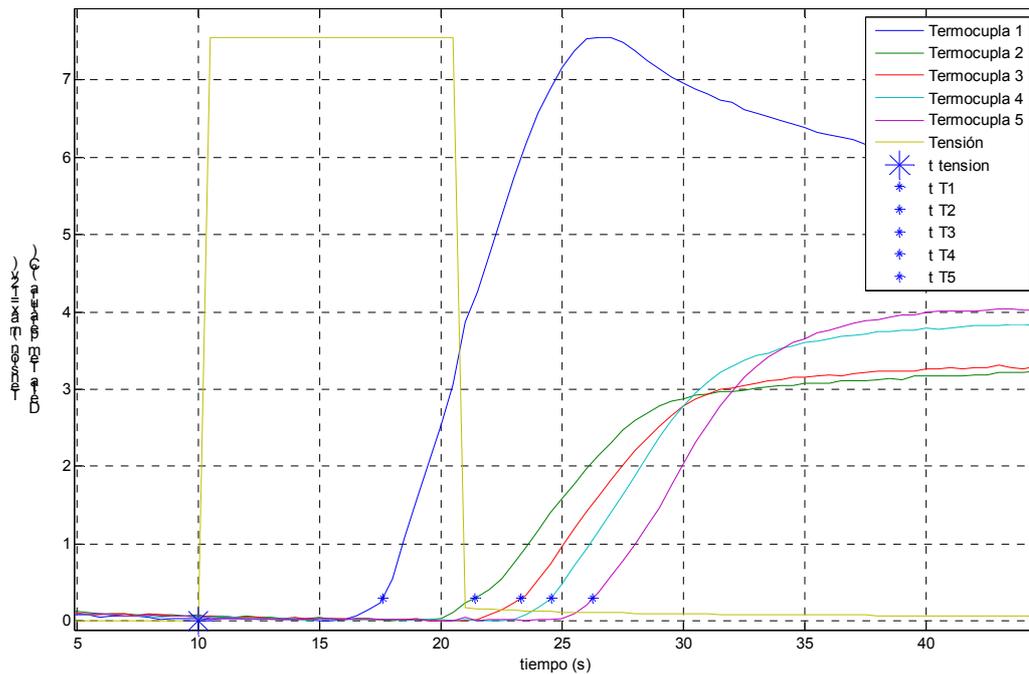


Figura 6. Pulso de energía y respuesta de las termocuplas en función del tiempo.

RESULTADOS OBTENIDOS

Los intervalos seleccionados para la determinación del caudal real se presentan en la Figura 7. Se observa allí que la forma de la curva es de carácter hiperbólico.

Teniendo en cuenta que el caudal ideal puede calcularse utilizando la ecuación (1), a ésta se la reescribe de la forma:

$$\dot{m} = \delta \cdot A \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{K}{\Delta t} \tag{7}$$

donde $\Delta x/\Delta t$ representa a la velocidad media del fluido. Δx es la separación que existe entre la resistencia y una termocupla, o entre dos termocuplas, y Δt el tiempo que tarda la perturbación en recorrer dicho espacio. Esta ecuación es válida para flujo ideal, basándose en ella se propone para el caso de flujo real un modelo de ajuste de la curva de calibración con la forma:

$$\dot{m} = a + b \cdot \frac{1}{\Delta t} \tag{8}$$

El modelo de regresión no lineal para describir la relación entre la variable caudal (\dot{m}) y el intervalo de tiempo entre el comienzo del pulso de energía y la detección de la perturbación en la primera termocupla (t_{v-1}), medido desde que se

comienza a inyectar energía hasta que primer sensor de temperatura detecta un salto de temperatura, queda representado en la ecuación 9.

$$\dot{m} = -0,00380738 + 0,0555101/t_{v-1} \quad (9)$$

El estadístico R-cuadrado obtenido a partir del software del modelo así ajustado explica 98,3268 % de la variabilidad en Caudal. El estadístico R-cuadrado ajustado más conveniente para comparar modelos con números diferentes de variables independientes es de 98,2761 %. El error estándar de la estimación muestra que la desviación normal de los residuos es 0,000666279.

Puede obtenerse una ecuación equivalente a (9) para determinar el caudal a partir del intervalo de tiempo entre la termocupla 1 y 5 con estadísticos similares. Esta ecuación es útil en el caso de disponer de un termómetro digital de dos entradas, y no sería necesario un adquirente de datos.

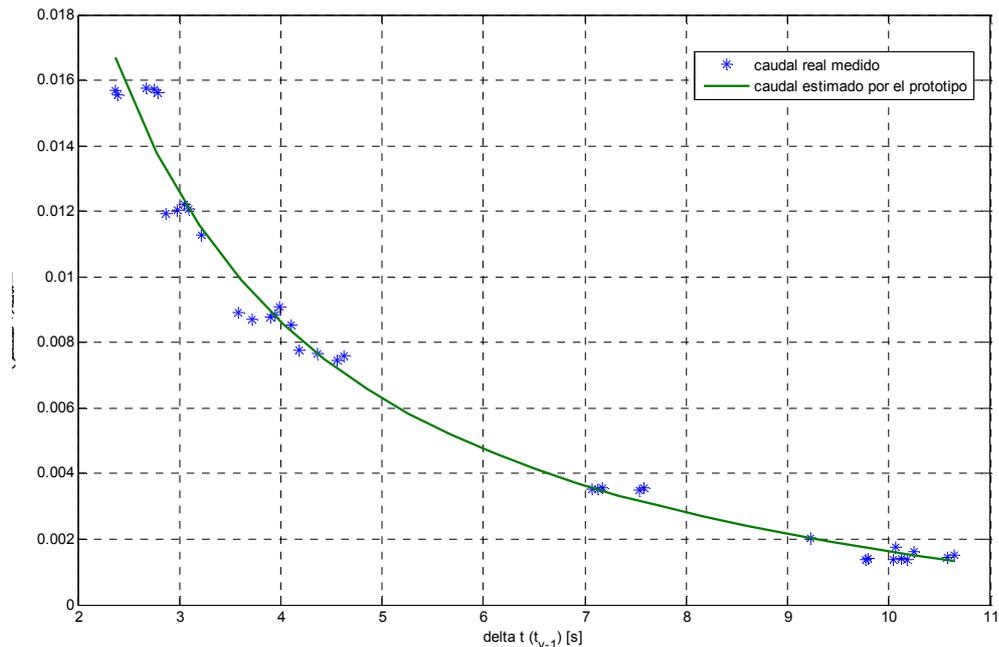


Figura 7. Caudales medidos y curva de ajuste para las señales de pulso de tensión y termocupla 1

CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO

Con los resultados obtenidos, se puede ver que se ha logrado un dispositivo de medición de bajo caudal muy simple, ya que para aplicarlo sólo se debe intercalar en serie esta sección de cañería (en posición horizontal) en el circuito termosifónico. Los elementos necesarios para el dispositivo de medición serían entonces: el segmento de cañería aislada con las termocuplas, una fuente de tensión y un termómetro digital de dos canales.

Para operar este equipo se puede realizar de dos maneras. Si se dispone de un adquirente de datos: (a) aplicar la tensión a la resistencia; (b) realizar la lectura de tiempo entre el punto que se estableció el pulso y la primera termocupla luego (c) determinar el caudal con la curva de calibración adecuada. Si sólo se dispone de un termómetro digital de dos entradas: (a) aplicar la tensión a la resistencia; (b) realizar la lectura de tiempo entre la primera termocupla y la termocupla 5 luego (c) determinar el caudal con la curva de calibración correspondiente.

Este tipo de caudalímetro sería de difícil utilización en los sistemas termosifónicos de calentamiento de agua compactos (comúnmente con un tanque horizontal adosado en la parte superior del colector), en los cuales sería necesario realizar una modificación más compleja del equipo a medir.

Como mejoras al prototipo se propone agregar termocuplas aguas arriba, como también distintas distancias de las resistencias a las termocuplas, para que de esta forma se disminuya la energía que se debe agregar al fluido; tratando de obtener una señal más estable con perturbaciones menores.

Esto se puede considerar en principio una primera aproximación a un buen sistema de medición. Como una mejora tecnológica, debería pensarse en la automatización del instrumento de medición, lo cual se podría lograr con ayuda de un conversor analógico digital, microcontroladores y electrónica de potencia, además de construir el prototipo con mecanizado de precisión, lo que disminuiría los efectos de turbulencia hidrodinámica. Si bien estas mejoras implicarían algún costo

adicional al equipamiento, aumentaría notablemente la simplicidad de manejo del equipo, y aún así seguiría manteniéndose el costo total muy por debajo de lo que sería realizar estas mediciones con un medidor de caudal del tipo Láser-Doppler.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló en la Universidad Nacional de Río Cuarto y está subsidiado por la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNRC y la Facultad de Ingeniería de la UNRC.

REFERENCIAS

- Bannerot R. B., Tu Yi-Wey, Scott A., Macke G. y Pochd T. (1992) A Simple Device for Monitoring Flow Rates in Thermosiphon Solar Water Heaters. *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 114 I, pp. 47-51.
- Beckwith T. G., Marangoni R. D. y Lienhard J. H. (1993) *Mechanical Measurements*, Fifth Edition. Addison-Wesley Publishing Company.
- Belessiotis V. y Mathioulakis E. (2002) Analytical Approach of Thermosiphon Solar Domestic Hot Water System Performance. *Solar Energy*, Vol. 72, N° 4, pp. 307-315.
- Chuawittayawuth K. y Kumar S. (2002) Experimental Investigation Of Temperature And Flow Distribution in a Thermosiphon Solar Water Heating System. *Renewable Energy*, Vol. 26, pp. 431-448.
- Collares-Pereira M., Duque J., Saraiva C. y Rego -Teixeira A. (1981) A Calorimeter For Solar Thermal Collector Testing. *Solar Energy*, Vol. 27, N° 6, pp. 581-582.
- Duffie J. A. y Beckman W. A (1991) *Solar Engineering of Thermal Processes*, Second Edition, John Wiley and Sons, Inc.
- D. Yogi Goswami (2000) *Principles of Solar Engineering*. Taylor & Francis.
- Fraser K. F., Hollands K. G. T. y Brunger A. P. (1995) An Empirical Model for Natural Convection Heat Exchangers in SDHW Systems. *Solar Energy*, Vol. 55, pp. 75-84.
- Hinkle J. E. y Rayens W. S. (2006) Reciprocal curves. *Computational Statistics & Data Analysis*, Vol. 51, Issue 2, 15 November 2006, pp. 836-858.
- Kudish A. I., Santamaura P. y Beaufort (1985) Direct Measurement and Analysis of Thermosiphon Flow. *Solar Energy*, Vol. 35, N° 2, pp. 167-173.
- Meir M., Rekstad J., Peter M., Henden L. y Sandnes. (2002) Determination of the Performance of Solar Systems With the Calorimetric Method. *Solar Energy*, Vol. 73 N° 3, pp. 195-207.
- Morrison G. L. y D. B. J. Ranatunga (1980) Thermosiphon Circulation in Solar Collectors. *Solar Energy*, Vol. 24, pp. 191-198.
- Morrison G. L. y D. B. J. Ranatunga (1980) Transient Response of Thermosiphon Solar Collectors. *Solar Energy*, Vol. 24, pp. 55-61.
- Morrison G. L. y Tra H. N. (1984) Simulation of the Long Term Performance of Thermosiphon Solar Water Heaters. *Solar Energy*, Vol. 33, pp. 515-526.
- Norton B., Probert S. D. y Gidney J. T. (1987) Diurnal Performance of Thermosiphonic Solar Water Heaters – An Empirical Prediction Method. *Solar Energy*, Vol. 39, pp. 257-265.
- Lucchini J. M., Barral J. R. y Galimberti P. D. (2007), Estudio de un caudalímetro calorimétrico para mediciones en sistemas de calentamiento de agua solares termosifónicos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 11, pp. 8-175:8-182.
- Spiegel M. R. (1994) *Theory and Problems of Statistics*, Second Edition. McGraw-Hill.
- Young M. F. y Bergquam J. B. (1981) Performance Characteristics of a Thermosiphon Solar Domestic Hot Water System. *Journal of Solar Energy Engineering*. Vol. 103, pp 193-200.
- Shitzer A., Kalmanoviz D., Zvirin Y. y Grossman G. (1979) Experiments With a Flat Plate Solar Water Heating System in Thermosiphonic Flow. *Solar Energy*, Vol. 22, pp. 27-35.

ABSTRACT. This work presents the design, construction, analysis and calibration of a prototype flowmeter to measure the water flow rate in a thermosiphonic solar system. The goal is to obtain a simple and low cost equipment, which have low pressure losses and an easy mounting procedure for field experiments. The principle of functioning consists in the injection of a pulse of thermal energy where the unknown flow rate circulates, in order to determine the flow rate from the time the perturbation takes to pass through thermocouples that are ordered downstream in the pipe. The measurements were made with K thermocouples and a high precision datalogger, determining the relationship between measured flow rates and flow rates deduced from the velocity propagation of the mentioned perturbation. The data were plotted and curves to adjust with the experiments were analyzed. A good approximation was obtained with reciprocal curves from conventional software packages.

Keywords: flowmeter, calibration, thermosiphonic system