



ESTUDIO DE UN CAUDALÍMETRO CALORIMÉTRICO PARA MEDICIONES EN SISTEMAS SOLARES TERMOSIFÓNICOS DE CALENTAMIENTO DE AGUA

Juan M. Lucchini, Jorge R. Barral, Pablo D. Galimberti

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: jbarral@ing.unrc.edu.ar

RESUMEN: Se presenta en este trabajo el diseño, construcción y calibración de un caudalímetro calorimétrico para usar en la medición del flujo de agua por un colector solar de un sistema termosifónico. El objetivo fue lograr un equipamiento sencillo y de fácil montaje para experiencias a campo. El sistema funciona por aumento de la temperatura del agua mediante energía eléctrica en una cañería aislada y la medición aguas abajo para determinar en función del aumento de temperatura de que magnitud es el caudal de agua. Las mediciones se hicieron con termocuplas y termómetros digitales, determinándose la correspondencia de un caudal medido con el salto térmico experimentado entre la entrada y la salida del sistema, luego de su estabilización para determinar de cada punto. Los datos fueron graficados y se buscaron las curvas que mejor ajustaran a las mediciones. Se logró una buena aproximación con curvas exponenciales, mediante paquetes estadísticos convencionales.

Palabras clave: caudalímetro, calorimetría, calibración, sistema termosifónico.

INTRODUCCIÓN

En los sistemas de calentamiento solar de agua, que utilizan el principio de funcionamiento termosifónico, se pueden identificar dos flujos de agua: el ocasionado por la demanda del usuario de agua caliente y el que se produce por el efecto termosifónico propiamente dicho. En la Figura 1 se identifican estos flujos para un sistema tradicional de calentamiento de agua. A la salida del tanque de almacenamiento se identifica con C_U el caudal debido a la demanda del usuario, el cual es arbitrario de acuerdo a las necesidades de éste. Este será en sus valores máximos del orden de los 14 kg/min (ducha de una persona). En la cañería a la salida del colector se identifica con C_T al flujo debido al efecto termosifónico, ocasionado por la diferencia de densidad entre el agua caliente y el agua fría, el cual no puede ser impuesto y dependerá de las condiciones climáticas y del estado del agua en el tanque de almacenamiento; los valores máximos de estos caudales son del orden de los 0,04 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).

En los sistemas de calentamiento solar de agua activos, el flujo másico de la combinación colector-tanque aislado es mantenido y controlado por una bomba, por lo cual es predecible. Por el contrario, en los sistemas termosifónicos, 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. Esta variabilidad dificulta el estudio de estos sistemas, y si bien se han propuesto modelos de estimación basados en las diferencias de densidades y las pérdidas por fricción en los distintos componentes del circuito hidráulico (D. Yogi Goswami), resulta muy difícil poder estimar con alguna precisión estos parámetros para obtener resultados confiables. Por lo tanto para el estudio de estos equipos es necesario medir dicho caudal.

Debido a que la fuerza impulsora del movimiento del fluido es la pequeña diferencia de densidad del mismo ocasionada por la diferencia de temperaturas, no es posible introducir en serie en el circuito caudalímetros tipo rotámetro, a resorte, etc., que ocasionarían caídas de presión, que por pequeñas que sean, disminuirían sustancialmente el flujo ya de por sí bajo de estos sistemas. Enfocando el problema desde el punto de vista de los principios de medición, puede decirse que no se deben utilizar instrumentos de medición que con la intervención de sus sensores modifiquen 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 el anemómetro láser dopler (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) ha utilizado burbujas de hidrógeno, generado por una electrólisis del agua, que circulan por un tubo vertical, y determina el tiempo que tarda la burbuja en recorrer una cierta distancia, 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 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 %. Duffie y Beckman (1991) se basan en experiencias de distintos autores para proponer el cálculo del flujo másico de estos sistemas en función a un salto térmico de aproximadamente 10 °C entre la entrada y la salida del colector, la radiación recibida por el colector y parámetros del mismo como el coeficiente global de pérdidas de calor U_L y el Factor de eficiencia del colector F' . Además se ser aproximado, este método presenta el problema de que no se pueden computar valores a la mañana temprano y al atardecer cuando el flujo termosifónico se está iniciando o terminando y no siempre se cuenta para el colector con los valores de los parámetros anteriormente mencionados, o si se los tiene, están referidos a un flujo másico que no necesariamente es cercano al que se está midiendo.

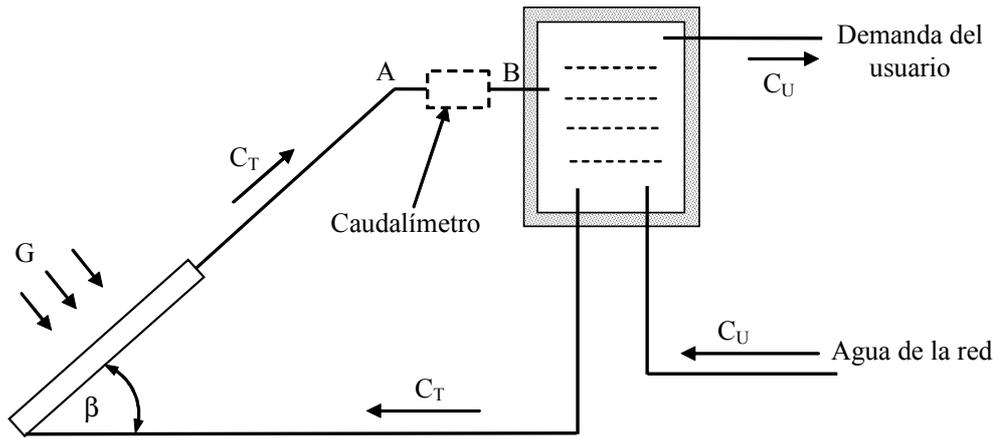


Figura 1. Caudales de un sistema de calentamiento de agua termosifónico y ubicación del caudalímetro calorimétrico.

Uno de los métodos que aparece como bastante 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.

Se realizó en este trabajo el estudio de un sistema del tipo calorimétrico, basado en una sección de cañería aislada a colocar en serie en la cañería a medir, donde la medición se realiza con dos termocuplas y la entrega de energía al fluido se hace mediante un autotransformador. La idea básica fue lograr un equipamiento de fácil montaje para cualquier tipo de sistema termosifónico que se encuentre ya instalado. Se detallan a continuación las características constructivas del sistema de medición propuesto, los ensayos realizados sobre el mismo, y los resultados obtenidos.

DESCRIPCIÓN DEL CAUDALÍMETRO CALORIMÉTRICO

El calorímetro que se describe a continuación es una variante del propuesto por Collares-Pereira *et al.* (1981), pero en vez de considerar una caja aislada como proponen dichos autores, se le ha diseñado directamente como una sección de cañería de polipropileno, aislada por fuera, a colocar en serie en la corriente de flujo a medir. Dado que dicho calorímetro presenta pérdidas de calor, debe esperarse un cierto tiempo antes de realizar cada medición, a fin de lograr la estabilización de todo el sistema. Ésto introduce una cantidad extra de energía en el sistema, por lo cual no debe usarse en forma continua, y se le deberá colocar en la sección AB mostrada en el circuito hidráulico de la Fig. 1, para que su influencia en el cambio de densidad del fluido sea prácticamente nula. En esta ubicación el agua con el incremento de temperatura ocasionado por el caudalímetro llega inmediatamente al tanque de almacenamiento, donde es amortiguado por la gran cantidad de agua que este posee, moviéndose además el fluido caliente hacia la parte superior del tanque sin recircular nuevamente en el circuito termosifónico.

En la Figura 2 se muestra un corte esquemático del caudalímetro, con todas las medidas en centímetros, y en la Figura 3 se ve una fotografía de la sección de cañería y accesorios que lo componen, sin el aislante, y la resistencia eléctrica sumergible por separado. La resistencia tiene forma de L y se introduce en la cañería mediante una T de polipropileno. La resistencia eléctrica se hizo fabricar especialmente y consta de una vaina de acero inoxidable de 1,26 cm de diámetro; el elemento resistivo se halla en la rama más larga para asegurar que todo el calor generado por efecto Joule es transferido al fluido.

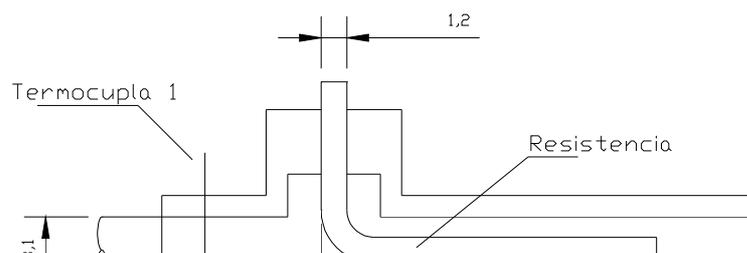


Figura 2. Corte esquemático del caudalímetro.



Figura 3. Resistencia eléctrica, cañería y accesorios de polipropileno del caudalímetro.

Es de importancia la longitud del elemento calefactor ya que de esta manera ocupa un espacio reducido dentro de la cañería disminuyendo lo más posible las pérdidas de carga y por otro lado contribuye a una mejor difusión del calor al estar en contacto con el agua en un trayecto más largo, ya que teniendo en cuenta la baja velocidad del flujo, es de esperar un comportamiento mayormente laminar del mismo, lo cual dificultaría la difusión del calor. Por otro lado, la propia inserción de la resistencia genera turbulencia lo cual favorece el mezclado y la uniformización de la temperatura.

La T de polipropileno y los niples de polipropileno tienen las siguientes características: Densidad a 23 ° = 0.902 g/cm³, Temperatura de reblandecimiento 150 °C, Conductividad Térmica a 20°C = 0,21 W / m K y Resistencia Química al agua clorada a 100°C = alta (IPS, 2007). El conjunto se encuentra aislado térmicamente por un aislante de espuma de polietileno recubierta en el exterior con una lámina de aluminio, marca comercial Coverthor (Polifusión S.A., 2007), cuyas principales características son: Baja conductividad térmica: 0.35 kcal/h.m. °C, Densidad 30 a 40 kg/m³, Absorción de agua 1,2% V y amplio rango de temperaturas de aplicación -40°C a +90°C, y para un diámetro nominal de 1 pulgada el diámetro interior es de 32mm con un espesor de 5 mm (se colocó doble aislamiento).

Las termocuplas son del tipo K y están ubicadas a 5cm de la resistencia, una aguas arriba y otra aguas abajo. Al pensar en sensar la temperatura surgió el problema de que en toda la sección del conducto pudiera no ser uniforme, sobre todo en la segunda termocupla que esta ubicada aguas debajo de la resistencia calefactora, por lo cual se dispuso una conexión especial para esta segunda termocupla. Una termocupla normal se compone de un solo punto de unión entre los dos materiales como se observa en la soldadura A de la Figura 4-a (Cromel línea fina, Alumel línea gruesa), lo cual a una temperatura dada da un valor dado de potencial, pero para lograr un valor más representativo de la temperatura en toda la sección se decidió realizar una conexión particular para que así la termocupla arroje un promedio de todas las temperaturas que pudiera tener el área. En la Figura 4-b vemos como se realizaron las uniones en los distintos puntos; en función a las leyes de los circuitos termoeléctricos (Beckwith *et al.*, 1993), éste tiene la ventaja de tomar un promedio de temperaturas ya que si existieran diferencias de temperaturas en la sección cada punto crearía una diferencia de potencial y como éstas estarían opuestas, la suma de ellas sería el promedio de las temperaturas. Las termocuplas fueron calibradas con un termómetro de vidrio de precisión en un medio homogeneizado.

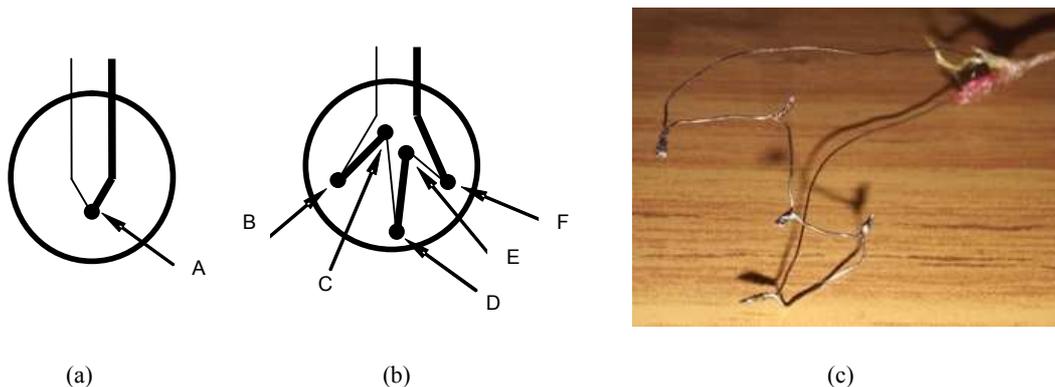


Figura 4. (a) conexión usual de una termocupla; (b) conexión en serie para sensar temperatura promedio; (c) fotografía de las del arreglo para sensar promedio y sus soldaduras.

En la Figura 5 se muestra el montaje del equipo para la calibración del caudalímetro. La alimentación de agua al equipo se realizó directamente de la red del laboratorio que el Grupo de Energía Solar posee en la UNRC. Dicho laboratorio está aislado de otras dependencias, por lo que se aprovecha la existencia de un tanque de almacenamiento de agua propio, cuyo nivel es controlable, permitiendo así mantener un caudal muy constante durante todo tiempo que dura cada ensayo. El tanque tiene un diámetro de 1,5m y el nivel de agua está a unos 4 m de altura respecto a donde se conecta el equipo.

La energía eléctrica se tomó de la red y se utilizó un autotransformador (variac) para alimentar la resistencia a una potencia dada. Para el control de la potencia se utilizó un Multímetro digital datalogger PROVA 903 para medir la tensión eléctrica y

una pinza amperométrica Pinza amperométrica PROVA 11 para censar la corriente eléctrica. Luego como la carga es resistiva pura, la potencia se calcula directamente como $Potencia = Tensión \times Corriente$.

La temperatura se midió mediante un termómetro TES datalogger 1307 k/J con dos canales que puede almacenar datos para descargarlos luego en una computadora personal, y el caudal se determinó midiendo el volumen que pasaba a través del equipo con una probeta de 500 ml, determinando el tiempo con un cronómetro digital.

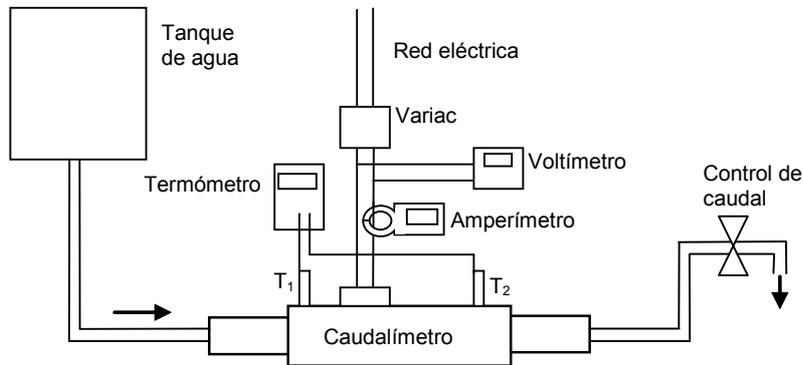


Figura 5. Esquema del equipo de medición



Figura 6. Montaje del equipo en el laboratorio del Grupo de Energía Solar de la UNRC

EXPERIENCIAS REALIZADAS

Para la calibración del caudalímetro se fijaron los caudales midiendo con una probeta entre 300 y 500 ml, en un determinado tiempo (180s, 120s, 90s, 60s, 30s, 20s o 10s), para lo cual se emplea la válvula de control de caudal (Figura 5). De acuerdo a la potencia que se desea entregar al equipo se calibra una tensión dada (50, 100, 150 y 220V) con el variac, midiendo con el multímetro digital. Se controla que la temperatura del agua al ingreso (T_1), primer termómetro, se mantenga constante, lo cual asegura que la potencia es correcta para el caudal que estamos sensando, ya que si fuera excesiva esta aumentaría por efecto de disipación de calor (mayormente conducción a través del polipropileno).

Luego, para la determinación de un punto se midió periódicamente, cada 5 minutos, el caudal, tensión y corriente que se entregaba al equipo. El período de medición se extendió por 30 minutos para asegurarse que la temperatura de salida del agua se había estabilizado, lo cual se determinó cuando la temperatura en la termocupla segunda (T_2) dejaba de variar. Se repitió el proceso con distintos caudales para la misma potencia entregada hasta completar una serie de puntos para dicha potencia.

Con cada corrida se generó un grupo de datos que consta de temperaturas de entrada y salida en función del tiempo, a las cuales se las graficó y seleccionando un conjunto de temperaturas estables en el tiempo se calculó el promedio y la desviación estándar, para así tener el valor más probable de temperatura y la dispersión de la medida; cabe destacar que esta dispersión es dependiente del caudal; a caudales bajos se verifica que la dispersión es pequeña mientras que a caudales altos ésta aumenta.

La tensión y la corriente sufrieron variaciones en el transcurso de las experiencias por lo que para cada potencia se determinaron los valores del promedio y con estos valores se calculó la potencia aplicada a la resistencia. El caudal, que también fue controlado durante cada corrida, fue el que sufrió menos variación y se tomaron dos valores y se calculó el promedio. Todos los datos medios de cada corrida (temperatura y caudal) se volcaron a un gráfico paramétrico en potencia, por lo que se obtuvieron cuatro gráficos.

Con los datos obtenidos se procedió a un análisis, primero mediante Microsoft Excel, tomando las temperaturas con las dos termocuplas a lo largo del tiempo en un intervalo de 5 segundos por un lapso aproximado entre 25 y 30 minutos en cada corrida para una potencia fija. Con estos datos se graficaron las mediciones versus el tiempo como variable independiente con dos finalidades: una, ver cuan estables eran las mediciones en el tiempo y otra cuanto tardaba el sistema en estabilizarse.

En la Figura 7 se muestran las zonas características. Primero una zona donde la temperatura aguas abajo crece, otra donde esa temperatura se estabiliza y por ultimo la zona donde la temperatura decrece al haber dejado de suministrar la potencia eléctrica a la resistencia. Cabe destacar que la temperatura aguas arriba permanece constante lo cual indica que no se disipa calor aguas arriba y por ende que la potencia es adecuada. Los puntos de la temperatura de estabilización son los que se promedian para generar el dato, y estos se descargan a la computadora a través de la conexión RS-232 que poseen los termómetros digitales. Por cada punto que se determinó se realizó una curva similar a la de la Figura 7.

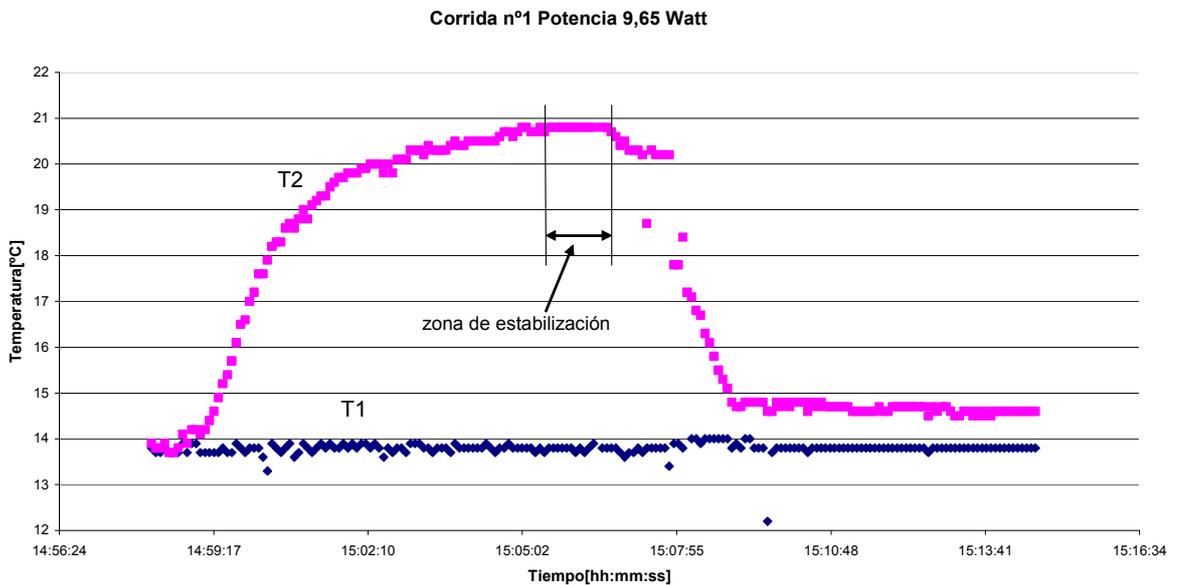


Figura 7. Seguimiento de temperaturas de una corrida y determinación de temperatura de estabilización

RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados de estas mediciones fueron volcados en gráficos de caudal en función del salto térmico. Luego de varias mediciones de prueba, se observó que para cubrir el rango de posibles caudales que se dan en los sistemas termosifónicos, era necesario realizar experimentos para al menos cuatro valores de potencia, que se seleccionaron de 9,65 W, 35,76 W, 79,43 W y 177,33 W. En realidad lo que se trató fue de fijar el potencial eléctrico, el cual también sufría pequeñas variaciones durante los experimentos. Una vez fijado el potencial, se media la corriente y con ello se determinaba la potencia. Los resultados medidos, puestos de la forma caudal en función de temperatura se muestran en las Figuras 8, 9, 10 y 11.

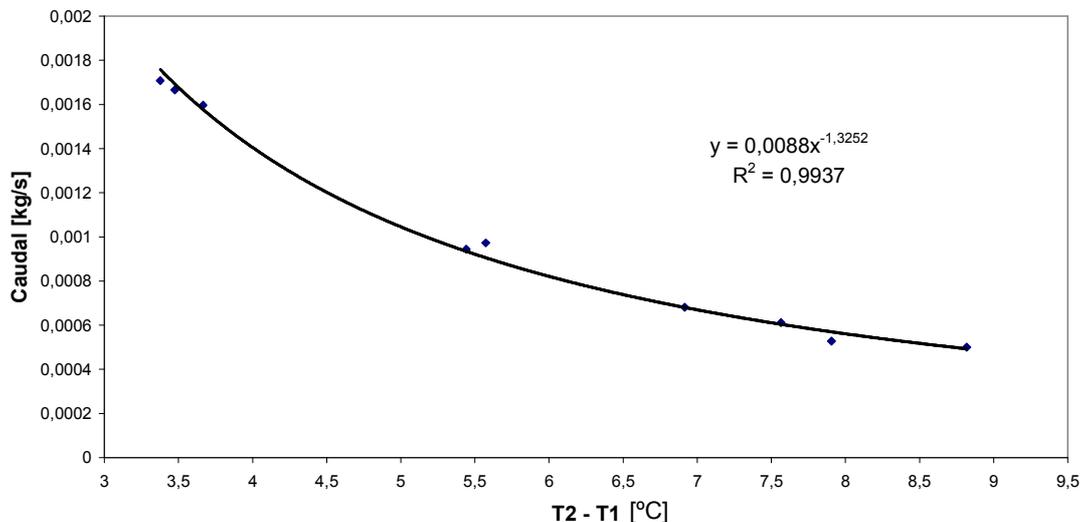


Figura 8. Ajuste de curva a los datos medidos para una potencia de 9,65 W.

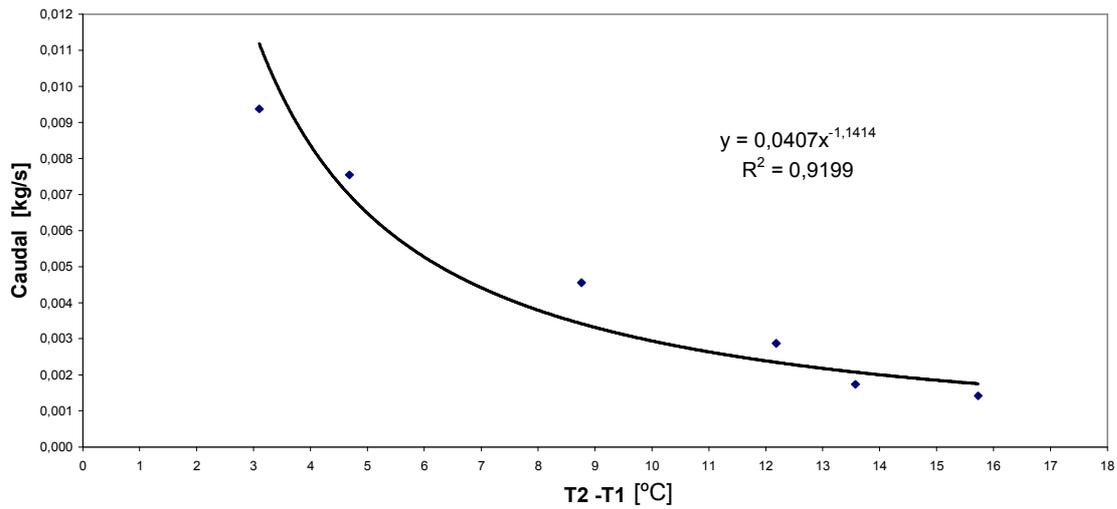


Figura 9. Ajuste de curva a los datos medidos para una potencia de 35,76 W.

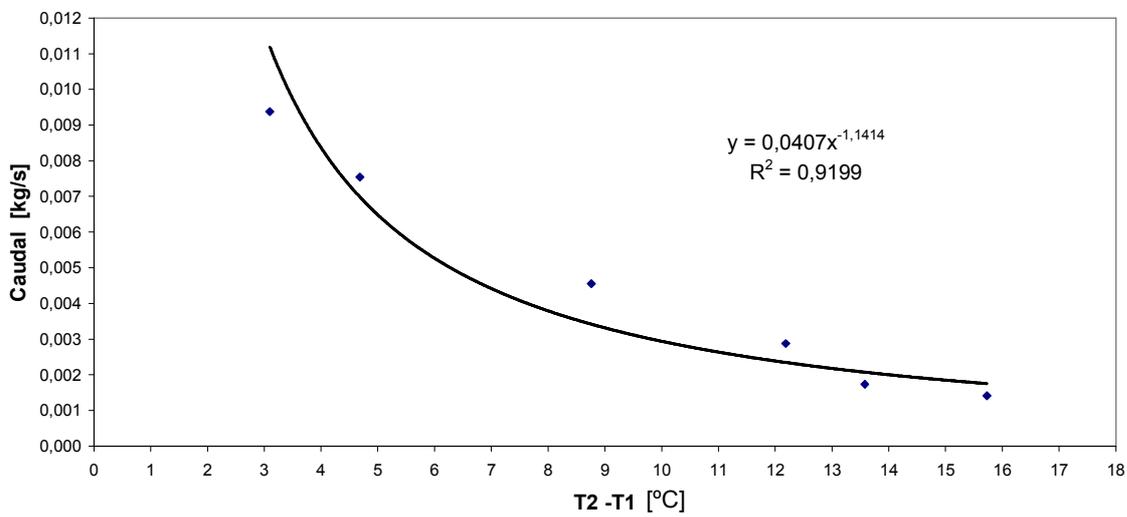


Figura 10. Ajuste de curva a los datos medidos para una potencia de 79,43 W.

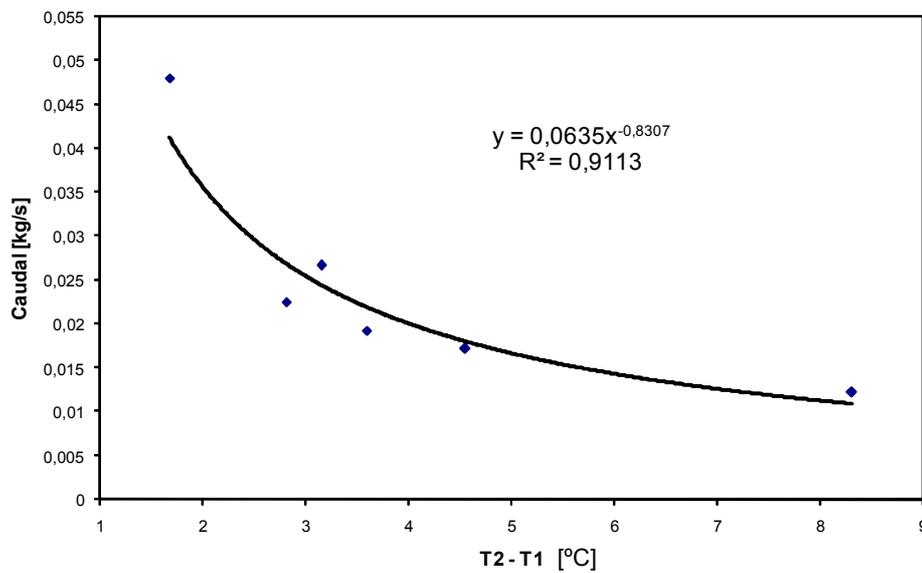


Figura 11. Ajuste de curva a los datos medidos para una potencia de 177,33 W.

Posteriormente, con Microsoft Excel se probaron distintas aproximaciones, resultando con un ajuste muy bueno las curvas exponenciales, cuyos resultados se muestran también en las Figuras 8, 9, 10 y 11, tanto la línea de tendencia, como la ecuación que la genera y el coeficiente de correlación R^2 que nos permite saber si el ajuste de la nube de puntos a la curva de regresión obtenida es satisfactorio; mientras más cercano a 1 es dicho coeficiente, mejor es el ajuste (Spiegel, 1994).

Se ve entonces que es posible cubrir el rango de caudales posibles en un sistema termosifónico mediante la utilización de estas cuatro curvas. Una forma más clara de presentar estos resultados es superponiéndolas en un solo gráfico, lo cual permite apreciar en una sola mirada el subrango de aplicación de cada una de ellas.

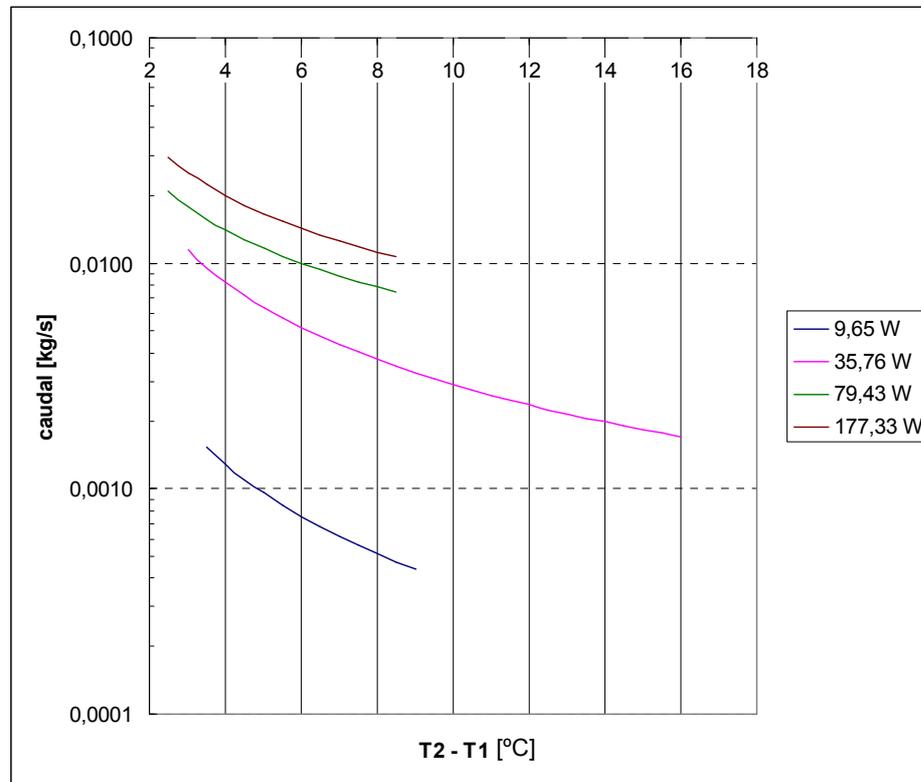


Figura 12. Visualización de los rangos de aplicación de cada una de las curvas.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO

En función de los resultados obtenidos, se puede ver que se ha obtenido un dispositivo de medición de bajo caudal relativamente simple, ya que para aplicarlo sólo se debe intercalar en serie esta sección de cañería antes de entrar al tanque de almacenamiento aislado de un sistema termosifónico. Los elementos necesarios para el dispositivo de medición serían entonces: el segmento de cañería aislada con las dos termocuplas, un variador de tensión, un termómetro de dos canales y un multímetro de dos canales (uno de ellos con capacidad de medir corriente).

La forma de operar este equipo sería entonces: (a) en función a la hora del día, estimar previamente si se puede estar en presencia de un caudal bajo, medio o alto para seleccionar el rango de potencia a usar; (b) aplicar la tensión correspondiente chequeando los datos de tensión y corriente; (c) realizar la lectura de las temperaturas indicadas como T_1 y T_2 y esperar a que las éstas se estabilicen (d) verificar si no se está fuera del rango de aplicación de la curva que corresponde a esa potencia, (e) en caso de estar en la curva correcta, directamente se aplica la ecuación exponencial que corresponde siendo la variable x el salto de temperaturas, o (f) si se sale de rango, cambiar a la curva correcta.

Este tipo de caudalímetro sería de difícil utilización en los sistemas de calentamiento de agua compactos (comúnmente el colector con el tanque horizontal adosado), en los cuales sería necesario (probablemente) desarmar un poco el sistema. En los otros, con un tanque vertical separado, simplemente se coloca en serie en la cañería de entrada al tanque.

Esto se puede considerar en principio una primera aproximación a un buen sistema de medición. Dado que las mediciones se realizaron en condiciones de laboratorio, se hicieron con una temperatura ambiente relativamente estable en condiciones de confort para el ser humano, y aunque el caudalímetro está aislado térmicamente, el aislamiento no es perfecto y la pérdidas que sufre son función de la diferencia de temperatura con el ambiente. Debería entonces tenerse en cuenta como un trabajo a futuro realizar las mismas experiencias en otras condiciones de temperatura exterior, lo cual probablemente arroje una serie de curvas similares a las aquí obtenidas pero con algún corrimiento.

Además, para proveer un instrumento de medición completo, debería realizarse un estudio de los errores que se cometen en estas mediciones en función a los datos que se utilizaron para determinar las curvas más el ajuste que luego se hizo de las mismas. 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.

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 Thermosyphon 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.
- Chuawittayawuth K. y Kumar S. (2002) Experimental Investigation Of Temperature And Flow Distribution in a Thermosyphon 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.
- IPS (2007) IPS Rosca < <http://www.ips-arg.com>>.
- Morrison G. L. y D. B. J. Ranatunga (1980) Thermosyphon Circulation in Solar Collectors. *Solar Energy*, Vol. 24, pp. 191-198.
- Polifusión S.A. (2007) COVERTHOR, aislaciones térmicas para tuberías <<http://www.polifusion.cl/index.html>>.
- Spiegel M. R. (1994) *Theory and Problems of Statistics*, Second Edition. McGraw-Hill.

ABSTRACT: This work explains the design, construction and calibration of a calorimetric flowmeter to be used in the measurement of water flow in a solar collector of a thermosyphonic system. The goal was to obtain a simple equipment, of easy mounting for field experiments. The system works by increasing the water temperature by means of electric energy in an insulated pipe and the measurement of this increasing downstream, to determine the flow rate as a function of the temperature variation. The experiment measurements were made by using thermocouples and digital thermometers, checking the stabilization of the system before the determination of each data. The data were plotted and the best approximations curves were determined to approximate these data. A good agreement with data was achieved with exponential curves by using conventional statistical softwares.

Keywords: flowmeter, calorimeter, calibration, thermosyphonic system