

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE COMPUTADORES DE FLUJO

Edgar Javier Barajas Herrera¹, Julio César Pérez², Jaime Guillermo Barrero³, Rafael Roncansio⁴, Isaac Luque Ortiz⁵

RESUMEN

Este artículo presenta el diseño, la construcción e implementación de computadores de flujo de gas para medidor primario tipo turbina. El equipo está basado en una CPU (sistema embebido, TDS2020F) para el desarrollo de los cálculos de corrección, la tarjeta de acondicionamiento de señal, y la instrumentación electrónica para el monitoreo de la temperatura y presión del gas. El firmware se implementó en lenguaje de programación Forth.

Palabra Claves: Computador de flujo, medidor de turbina, medición de gas, normas AGA, Lenguaje Forth, TDS2020F, Acondicionamiento de Señal, Instrumentación electrónica

ABSTRACT

This article presents the design, construction and implementation of a flow computer for turbine primary meter. The device is based in a CPU (embedded system, TDS2020F) for the development of the correction calculus, the conditioned board, and the electronic instrumentation for the monitoring of the gas temperature and pressure. The firmware has been implemented in Forth language.

Keywords: flow measurement, flow computer, AGA, API, A/D converters, algorithmic languages, data acquisition, embedded systems, gas turbines, industry automation, measuring transducers, pulse signal, sensors.

¹ MSc. en Ingeniería Electrónica. Ing. Electrónico. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga. Colombia.

² Esp. Ingeniería de Gas. Ing. de Petróleos. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga. Colombia.

³ MSc. en Potencia Eléctrica. Ing. Electricista. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga. Colombia.

⁴ Esp. en Ingeniería de Gas. Universidad Industrial de Santander. Ing. Electrónico. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Colombia.

⁵ Esp. en Ingeniería de Gas. Universidad Industrial de Santander. Ing. de Petróleos. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga. Colombia.

INTRODUCCIÓN

Uno de los requerimientos más importantes en el transporte de gas, es el de disponer de un sistema de medición eficiente y confiable de los volúmenes que se entregan y reciben en los procedimientos de compra y venta del producto (transferencia de custodia). La medición realizada por los medidores primarios (turbina, platina de orificio, ultrasonido) no representa un valor real, debido a las variaciones de temperatura y presión que sufre el gas durante el proceso. Para corregir estos errores, se emplean dispositivos de alta precisión que se colocan en complemento de los medidores primarios. Estos equipos se denominan **computadores de flujo**, los cuales monitorean el cambio en presión y temperatura, calculan la densidad del fluido y proveen la medida real en volumen o en flujo másico. Además, ofrecen una serie de ventajas al usuario como: almacenamiento de información histórica, conexión a un computador PC portátil para manejo de la información, y transmisión de estos datos remotamente usando un módem. En la actualidad Colombia importa estos equipos, con la desventaja que representa el alto costo de la unidad y sus repuestos, los tiempos de entrega, y la dependencia tecnológica, debido a que no se tiene acceso a la configuración del equipo y sus algoritmos.

Como una alternativa a la necesidad de reducir los costos de operación en las empresas de gas, y como un aporte a la innovación tecnológica de nuestro país; la Empresa Colombiana de Gas (ECOGAS), COLCIENCIAS y la Universidad Industrial de Santander (UIS), a través del Centro de Investigación del Gas (CIG), la Escuela de Ingeniería de Petróleos (EIP) y la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T); han construido dos prototipos de computador de flujo:

- ECOFLOW2020T, de dos brazos de medición para medidor primario tipo turbina.
- ECOFLOW2020P, para medidor primario tipo platina de orificio.

Este proyecto tiene como meta a largo plazo, lograr que el ECOFLOW2020 cumpla con los requerimientos de la industria de gas en Colombia y de esta manera eliminar la importación de computadores de flujo.

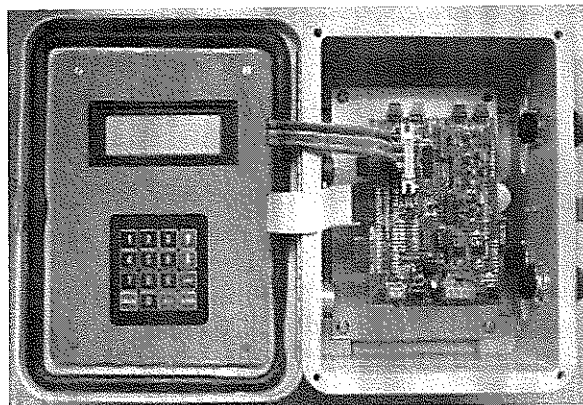


Figura 1. Computador de flujo ECOFLOW2020T.

NORMAS INTERNACIONALES DE MEDICIÓN DE GAS NATURAL

Los estándares de medición son usados por todos los sectores de la industria del gas para asegurar confiabilidad y exactitud en las medidas. En el ECOFLOW2020T se han implementado las normas de la American Gas Association (AGA) para la corrección del flujo de gas, y el Capítulo 21 de la norma API (Instituto Americano del Petróleo) que define los requerimientos y características necesarias para medición de flujo empleando sistemas electrónicos.

AGA 8: Compresibilidad y Supercompresibilidad para gas natural y otros gases de hidrocarburos.

Este documento describe los métodos para el cálculo del factor de compresibilidad (Z) para gas natural, el cual es función de la temperatura, presión y composición del gas (obtenida por cromatografía). Esta norma es la más extensa e involucra gran rigor matemático, tanto en exactitud como en extensión. La última actualización del AGA8 se realizó en 1992. Esta norma propone dos métodos para deducir el factor de compresibilidad: "Detail" y "Gross".

En el ECOFLOW2020T se implementó el método Gross, ya que se ajusta a las condiciones de operación de los gasoductos en Colombia. El método Detail requiere una cromatografía completa (extendida) del gas en el sitio donde se instale el computador de flujo.

La ecuación de estado aplicada para hallar el factor de compresibilidad por el método AGA8 Gross, utiliza el modelo SGERG, el cual trata al gas natural como si estuviera basado en solo tres componentes, donde el CO_2 y el N_2 están diluidos. Todos los componentes hidrocarbonados son tratados como un simple componente equivalente hidrocarbonado, CH. La ecuación de estado según el modelo SGERG, es:

$$Z = 1 + B_{mix} d + C_{mix} d^2 \quad (1)$$

Donde,

Z = factor de compresibilidad

B_{mix} = segundo coeficiente virial de la mezcla

C_{mix} = tercer coeficiente virial de la mezcla

d = densidad molar (moles por unidad de volumen)

Los coeficientes viriales dependen de la composición y la temperatura ($^{\circ}\text{K}$).

AGA 7: Medición de gas combustible con medidores de turbina.

Es el estándar que describe el cálculo del flujo, cuando se emplea como medidor primario una turbina de flujo axial. El volumen registrado por la turbina, se encuentra a las condiciones de presión y temperatura del sistema en ese instante, por lo cual debe ser corregido a las condiciones base especificadas para propósitos de facturación.

La ecuación 2 presenta el cálculo de la rata de flujo a condiciones base.

$$Q_b = Q_f F_{pm} F_{tm} Z_b / Z_f \quad (2)$$

Donde:

Q_f = rata de flujo a condiciones de flujo

F_{pm} = factor de presión = P_f / P_b

P_f = presión de flujo en psia

P_b = presión base o contractual

F_{tm} = factor de temperatura de flujo = T_b / T_f

T_b = temperatura base o contractual en $^{\circ}\text{R}$

T_f = temperatura de flujo en $^{\circ}\text{R}$

Z_b / Z_f = multiplicador de compresibilidad

Z_b = compresibilidad a condiciones base

Z_f = compresibilidad a condiciones de flujo

AGA-3/ANSI/API 2530 Medición de Gas Natural con Orificio

Este estándar provee un procedimiento para la medición del gas natural, hidrocarburos y otros fluidos usando medidores de orificio con tomas de brida y de tubo. La norma fue reconocida como la más moderna en medición de gas natural por medio de orificio por el vigésimo octavo Comité Técnico Internacional de la Organización de Estándares

Capítulo 21 de API.

Este estándar es emitido por el American Petroleum Institute, y describe la normatividad para equipos electrónicos dedicados a la medición de volumen de gas. Una sugerencia importante de esta norma es que el tiempo de muestreo de las variables debe ser al menos de 500ms. Además, define metodologías para efectuar los promedios de las señales y cantidades evaluadas empleando una ventana móvil de ancho ajustable dependiendo de las condiciones del fluido. De esta manera, en condiciones de mucho ruido por algún fenómeno físico, un mayor ancho de ventana suavizará el efecto del ruido en la medida. También esta norma caracteriza otras tareas internas del computador de flujo, tales como almacenamiento de datos históricos y metodología de cálculo.

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El computador de flujo ECOFLOW2020 esta conformado por las siguientes partes:

Unidad de Control, Procesamiento y Almacenamiento.

Esta basada en el sistema embebido TDS2020F de 16 bits, de la empresa inglesa Triangle Digital Service.

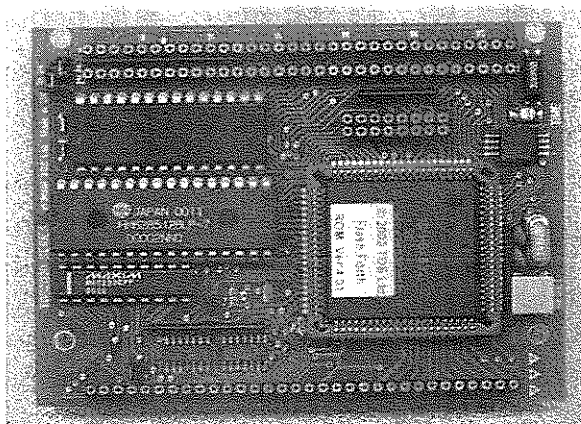


Figura 2. Sistema embebido TDS2020F.

Esta unidad es la CPU del computador de flujo, ya que tiene la función de coordinar todo el sistema para que sea un dispositivo autónomo de campo. Así mismo, procesa todas las variables de medición y efectúa los cálculos necesarios para la corrección del volumen siguiendo los estándares de medición del AGA. Consta tanto de hardware como de firmware (software de bajo nivel). El TDS2020F posee las siguientes características:

- Procesador: Hitachi H8/532.
- Velocidad: 19 Mhz.
- Instrucciones por segundo: 3 millones.
- Almacenamiento: 512K.
- Manejo de punto flotante.
- Bajo consumo de potencia.
- Puertos de comunicación serial RS232.
- (4) entradas analógicas de 16 bits.
- (2) entradas digitales.
- Lenguaje de programación: Forth.

Unidad de Medición.

Esta unidad posee dos brazos de medición en el ECOFLOW2020T, lo que permite adquirir datos de dos líneas de gas al mismo tiempo. Esta conformada por los sensores de presión (2) y temperatura (2), y la tarjeta que acondiciona las señales enviadas por estos instrumentos. Esta unidad trabaja en conjunto al medidor primario (turbina) que se encuentra instalado en la tubería. La turbina envía la señal de flujo no corregido a la tarjeta de acondicionamiento del computador de flujo. Para el ECOFLOW2020P se incluye un sensor de presión diferencial.

En la selección de los elementos que conforman la unidad de medición, uno de los parámetros que se tuvo en cuenta fue el consumo de

potencia, ya que el dispositivo final debía cumplir con las características de ser autónomo y capaz de operar en áreas peligrosas debido a la presencia de gases inflamables.

Turbina. El medidor de turbina es un dispositivo de medición de velocidad.

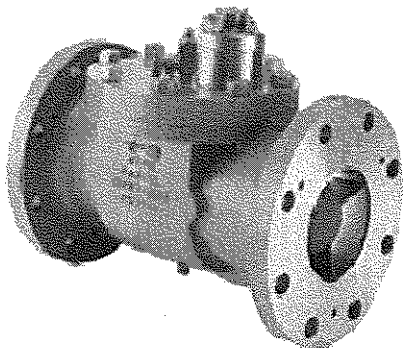


Figura 3. Medidor de turbina.

El flujo del gas a través de la turbina causa que su rotor gire a una velocidad proporcional a la rata de flujo. Las revoluciones del rotor son contadas electrónicamente, generándose una señal de pulsos con la información del volumen no corregido.

Transductores de Presión. El computador de flujo incluye dos sensores análogos de presión fabricados por la empresa Barksdale. Sus principales características, son:

- Rango de presión: 0-2068 Kpa.
- Rango de operación (temp): 255 a 344 °K.
- Consumo de potencia: 3 mA.
- Exactitud: $\pm 0,25\%$.
- Voltaje de entrada: 10 voltios.
- Salida full escala: 100mV.
- Salida no-amplificada.
- Sensor estable de silicio.
- Peso: 0,13 kilogramos.

- Construcción en acero inoxidable.

Barksdale

Series 422
100mV

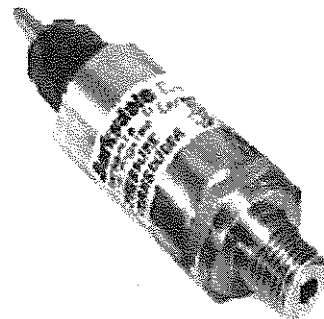


Figura 4. Sensor de presión.

Transductores de Temperatura. Los dos sensores de temperatura son RTD's de marca Murphy. Sus características, son:

- PT-100, 3 hilos.
- Exactitud: 0,12%.
- Rango de temperatura: hasta 516 °K
- Rango de operación (presión): hasta 48,3 Mpa.
- Construcción en acero inoxidable.

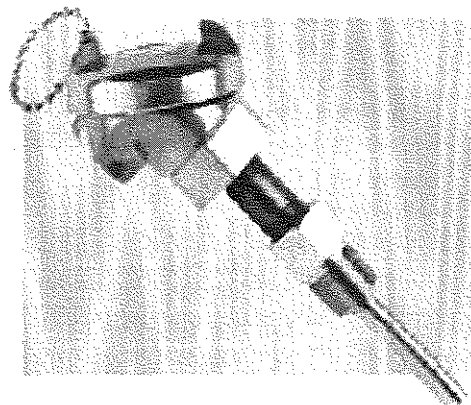


Figura 5. Sensor de temperatura.

Sensor de Presión Diferencial: El computador de flujo incluye un sensor análogo de presión

fabricados por la empresa Barksdale. Sus principales características, son:

- Construcción de Acero inoxidable
- Salida 4-20mA
- Exactitud del $\pm 0,25\%$
- Rango de Presión diferencial: 0-360' H2O
- Rango de Operación: -18 a 71 °C

Tarjeta de Acondicionamiento de Señal (TAS). La tarjeta de acondicionamiento fue diseñada y construida por la UIS.

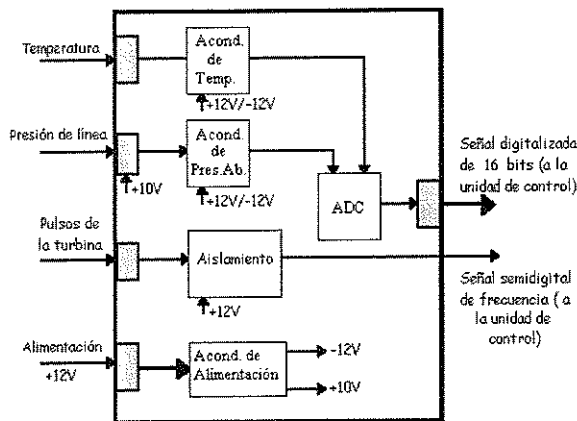


Figura 6. Diagrama de bloques de la tarjeta de acondicionamiento de señal.

La TAS aísla la señal proveniente del medidor de turbina, la cual es un tren de pulsos TTL cuya frecuencia es proporcional al flujo por unidad de tiempo que pasa a través del tubo. Para aislar la tierra del medidor y de la TAS, se utiliza el optoacoplador 4N26.

La TAS alimenta la RTD a través de un integrado fuente de corriente REF200. Luego esta señal es amplificada para llevarla al margen de 0 a 10V, para lo cual se emplea el amplificador de instrumentación INA118. De la misma forma, la salida de los transductores de presión absoluta es llevada de 0 y 100mV, a los niveles de entrada del conversor análogo-digital (0-10V).

El conversor A/D (Análogo-Digital) ADS7825 es utilizado para convertir las señales análogas acondicionadas de los sensores de presión absoluta y temperatura, en señales digitales que son enviadas a la unidad de procesamiento del computador de flujo. En el TDS2020F se implementaron las rutinas para el manejo del conversor A/D en modo paralelo.

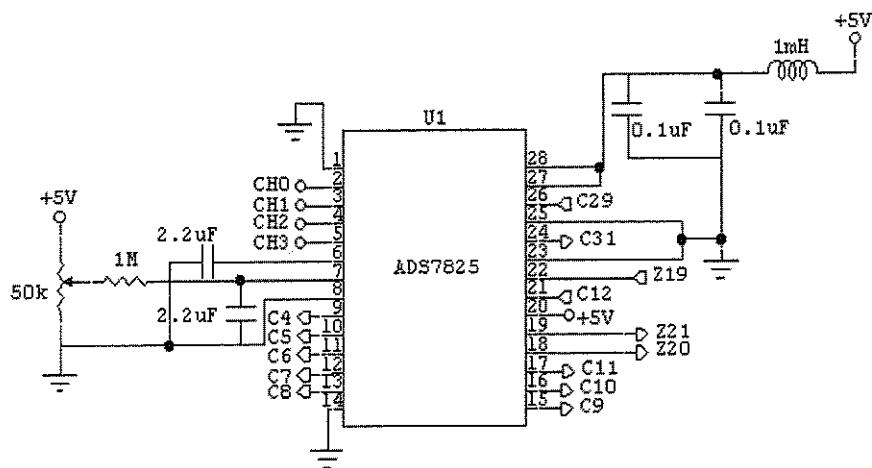


Figura 7. Conexiones del ADS7825.

En la Figura 8, se muestra la tarjeta de acondicionamiento de señal para el computador de flujo ECOFLOW2020T.

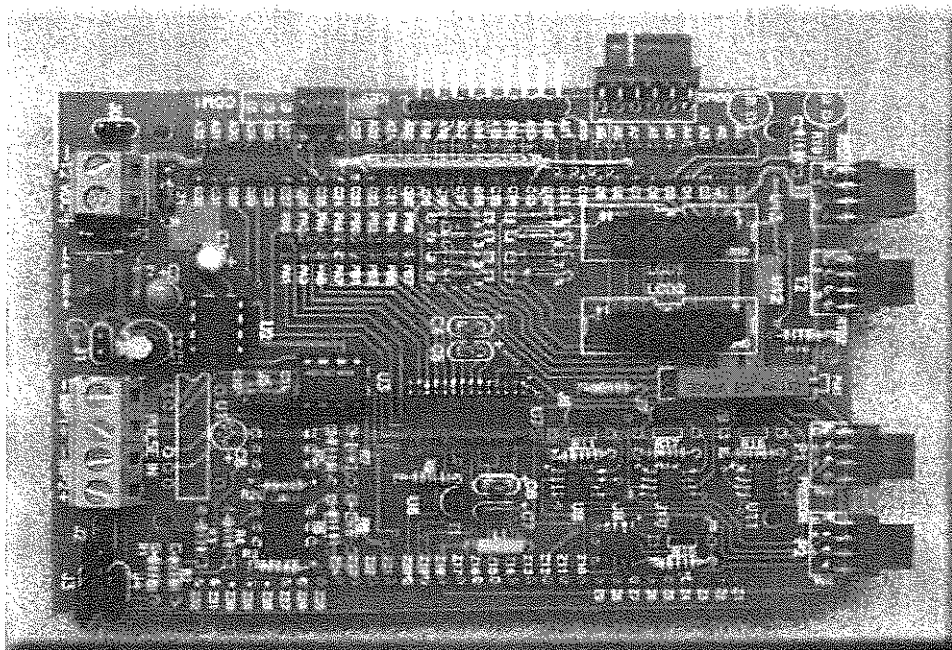


Figura 8. Tarjeta de acondicionamiento de señal del ECOFLOW2020T.

Unidad de firmware

Esta unidad esta en el interior del microprocesador H8/532, el cual fue programado en lenguaje Forth. La razón de programar en Forth es que para sistemas embebidos, se obtienen resultados más rápidos y eficientes (menos líneas de código) con este lenguaje.

La unidad contiene todas las rutinas que debe ejecutar el TDS2020F para el control del computador de flujo. Es allí, donde se implementaron los cálculos del estándar internacional AGA. El programa de control, procesamiento, y almacenamiento del ECOFLOW2020T ocupa un espacio de 25Kbytes. Como el computador de flujo esta destinado a trabajar con presión constante de 1724 kilo pascales, no siempre es necesario realizar el cálculo de factor Z (AGA8), por lo que el tiempo de ejecución del programa es de

3 milisegundos en rutina normal. Cuando se incluye el cálculo del AGA8 se aumenta a 3 segundos. El muestreo de las señales provenientes de los sensores se realiza cada 50ms, pero si se desea se puede llegar a establecer en 10ms. El tiempo entre pulsos no es un evento periódico, pues ellos se leen con interrupción de *hardware*.

Unidad de software

ECOFLOW2020T también posee un software de aplicación diseñado para servir de interfase con el usuario con la posibilidad de descargar la información contenida en el computador de flujo a un PC para manipular dichos datos e imprimir reportes. Además, posee una base de datos donde se puede almacenar información e históricos de las diversas estaciones donde se encuentran instalados computadores de flujo.

PRUEBA EN CAMPO

En el city gate de Barrancabermeja (COGB) perteneciente a Ecogás, el ECOFLOW2020T fue sometido a una prueba de operación, instalando el equipo en serie con un computador de flujo comercial “American Meter AE5000”. El objetivo de de esta prueba era conocer el comportamiento en campo del prototipo respecto a una unidad comercial, aclarando que esta última no representa un patrón de medida.

En el momento de la prueba las condiciones de temperatura y presión fueron:

- Presión: 1724 Kpa.
- Temperatura: 300 °K.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en los días de prueba del equipo, comparando las lecturas de volumen diario.

Tabla 1. Lectura del volumen de flujo diario.

Lectura Volumen Diario (Millones de pies ³)			
Día	AE5000	ECOFLOW	Diferencia
1	1197	1200,38	0,28
2	1189	1193,73	0,40
3	1206	1209,69	0,31
4	1213	1213,76	0,06

Se observa que el ECOFLOW2020T tiene una diferencia promedio de 0.26% respecto al AE5000. Esta mínima desigualdad en la lectura es ocasionada por las siguientes razones:

- Los equipos están tomando medidas de dos brazos diferentes de la tubería.
- Se desconoce la manera como el AE5000 promedia la temperatura y presión. Sin embargo, el ECOFLOW2020T sigue el estándar Capítulo API 21.
- Las normas implementadas para el cálculo del factor Z en ambos equipos son diferentes.

El ECOFLOW2020T realiza los cálculos basado en el estándar internacional más actualizado, el AGA8. El AE5000 realiza el cálculo basado en la norma NX-19 (norma precedente al AGA8).

En las figuras 9 y 10, se contrastan las curvas del volumen diario corregido, para la conexión en serie de los dos computadores de flujo. En ellas se observa que el ECOFLOW2020T realiza un excelente seguimiento en la medición de flujo. Estos datos corresponden al tercer día de la prueba.

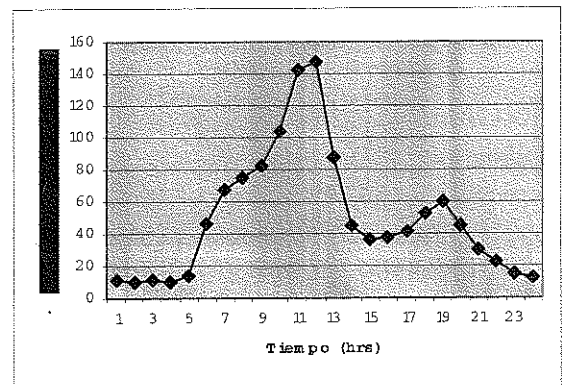


Figura 9. Lectura volumen corregido día 3, AE5000.

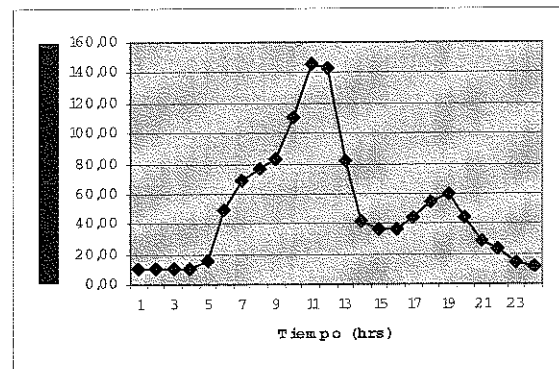


Figura 10. Lectura volumen corregido día 3, ECOFLOW2020T.

CONCLUSIONES

Para suplir la importación de computadores de flujo se ha diseñado y construido el

ECOFLOW2020. El equipo tiene un bajo consumo de potencia lo que permite su implementación en cualquier área industrial. El porcentaje de error obtenido en el cálculo del factor Z es del cero por ciento respecto a las tablas contenidas en el AGA8.

El ECOFLOW2020T opero 80 horas en campo sin presentar ningún inconveniente de bloqueos o fallas. Además su medida fue contrastada con la de una unidad comercial, donde se comprobó el excelente seguimiento en la medición que realiza el prototipo, ya que su diferencia promedio respecto al AE5000 fue del 0.26%

La siguiente etapa en el desarrollo del ECOFLOW 2020T es obtener la certificación internacional que incluye el cumplimiento de las normas de medición, compatibilidad electromagnética y seguridad intrínseca.

REFERENCIAS

AMERICAN GAS ASSOCIATION. (1996). *AGA report n° 7: Measurement of Gas by Turbine Meters*. Arlington, Virginia.

AMERICAN GAS ASSOCIATION. (1992). *AGA report n° 8: Compressibility Factors of Natural Gas and others Relates Hydrocarbon Gases*. Arlington, Virginia.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. (1993). *Manual of Petroleum Measurements Standards. Chapter 21- Flow Measurement using Electronic Metering Systems*. Washington, D.C.

BAKER, R. (2000). *Flow Measurement Handbook: Industrial Designs, Operating, Principles, Performance an Applications*. Cambridge University.

BRODIE, L. and FORTH, Inc. (1987). *Starting Forth: An Introduction to the Forth Language and*

Operating System for Beginners and Professionals. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

CORZO, M. (2003). *Computador de Flujo: Diseño e Implementación del Soporte de Hardware y Selección de la Instrumentación*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

GÓMEZ, L. (2004). *Computador de Flujo: Diseño e Implementacion del Software para la Medicion del Flujo de Gas*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

GONZÁLEZ, R. (2000). *Diseño e Implementación del Hardware y Firmware para un Computador de Flujo Tipo Turbina usando la Norma AGA 7*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

LOY, E. y LANASA, P. (2002). *Fluid Flow Measurement: A Practical Guide to Accurate Flow Measurement*. Gulf Professional Publishing, United States of America.

RONCANCIO, R. Diseño e Implementación del Hardware y Software de Presentación para el Computador de Flujo de un Medidor de Gas tipo turbina. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al grupo de ingenieros del Centro de Investigación del Gas y del Petróleo de la Universidad Industrial de Santander: Julio César Pérez (director), Edgar Barajas, Nelfor Castelblanco, Luis Gómez, Mónica Corzo e Isaac Luque; y la asesoría prestada por el ingeniero Rafael Roncancio (Q.E.P.D.) de la Empresa Colombiana de Gas.

Recibido: 11 de mayo de 2004
Aceptado: 14 de marzo de 2006