

SISTEMA PORTÁTIL PARA MEDICIÓN Y REGISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA TOLERANTE A FALLOS EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN MONOFÁSICA

Portable Fault-tolerant Electrical Energy Measurement- Recording Data in 2-wire Distribution System.

RESUMEN

Se presenta el diseño de un sistema electrónico digital de gran exactitud para la medición y almacenamiento de la energía eléctrica en una carga monofásica bifilar. El sistema posee una alta estabilidad en condiciones ambientales extremas y la tolerancia a fallas en la red eléctrica permitiendo continuar registrando datos durante una eventual falla.

El sistema ofrece una gran utilidad en el análisis del consumo y calidad de la energía eléctrica, además de tener un bajo costo de implementación.

El sistema diseñado hace parte de uno de los proyectos del grupo de investigación ROBÓTICA APLICADA de la Universidad Tecnológica de Pereira en el *aprovechamiento y uso de la energía solar*.

PALABRAS CLAVES: *adquisición de datos, cálculo hardware, calidad de la energía eléctrica, energía eléctrica, microcontrolador, sistemas digitales.*

ABSTRACT

The design of a high-accuracy digital electronic system is presented for the measurement and recording of real power in 2-wire electrical distribution network. The system provides superior stability over extremes in environmental conditions and over time. The system warns of fault conditions and allows device to continue accurate billing during a fault event. .

The system is useful in power consumption and electric power quality analysis, besides having a low cost implementation.

The system is part of the projects on APPLIED ROBOTICS group of investigation of Technological University of Pereira in use of solar energy.

KEYWORDS: *calculus by hardware, data acquisition, digital systems, electrical energy, electrical power quality, microcontroller.*

1. INTRODUCCIÓN.

La medición de la energía eléctrica ha llegado a ser de suma importancia en la determinación del flujo de potencia industrial.

El avance en el desarrollo tecnológico trae consigo un incremento en la utilización de equipos basados en microelectrónica, microprocesadores, que a su vez son susceptibles e indefensos frente al entorno electromagnético. De otro lado, consecuentemente con su propósito de proveerse de comodidad, el ser humano automatiza los procesos, trata de volverlos confiables y de garantizar su continuidad eficiente, acrecentando el uso de reguladores de tensión, estabilizadores, ascensores, fotocopiadoras, controladores de máquinas eléctricas, rectificadores, etc. Las empresas del sector eléctrico no son la excepción en la utilización de este tipo de cargas (consumo) denominadas no lineales.

OMAR ENRIQUE CASTRO HERNÁNDEZ

Ingeniero Electricista.

Candidato a Magíster en Ingeniería Eléctrica.

Universidad Tecnológica de Pereira.

Profesor Asistente Departamento de Física.

Universidad Tecnológica de Pereira.

ramo@utp.edu.co

JOSÉ ANDRÉS CHAVES OSORIO

Ingeniero Electricista.

Universidad Tecnológica de Pereira.

Especialista en Pedagogía.

Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

Magíster en Instrumentación Física.

Universidad Tecnológica de Pereira.

Profesor Asociado Departamento de Física.

Universidad Tecnológica de Pereira.

jachaves@utp.edu.co

HUGO BALDOMIRO CANO GARZÓN

Ingeniero Electricista.

Universidad Tecnológica de Pereira

Especialista en Gerencia de Tecnología.

Convenio de La Escuela de Administración de

Negocios y la Universidad Tecnológica de Pereira

Candidato a Magíster en Instrumentación Física.

Universidad Tecnológica de Pereira

Docente Asistente.

Universidad Tecnológica de Pereira.

hbcano@utp.edu.co

Las cargas no lineales conectadas a la red de suministro eléctrico, a la vez que son sensibles a las variaciones, también generan demasiadas perturbaciones, introducen una significativa cantidad de armónicos, que es preciso controlar, para garantizar una buena calidad de la energía eléctrica.

Para controlar los efectos negativos a la red eléctrica mencionados anteriormente es necesario efectuar antes ciertas mediciones del flujo de potencia en una determinada carga o circuito eléctrico, y después de analizar dicha información se plantea la solución requerida. De esta manera se evidencia la necesidad de contar con sistemas de energía eléctrica exactos y confiables.

En el mercado, las empresas prestadoras de servicios en electricidad cuentan con analizadores de energía eléctrica que, para ciertos usuarios, resultaría muy costosa su obtención [1].

La mayoría de los medidores actuales de potencia y energía, están diseñados para funcionar en régimen sinusoidal, lo que produce errores en las medidas cuando la carga a medir es un elemento no lineal o la tensión de la red está distorsionada. Además, en general, los medidores proporcionan sólo el valor global del consumo y no permiten al usuario seguir su evolución histórica.

Otro aspecto a tener en cuenta es la posibilidad de disponer de un registro con la evolución de las medidas en el tiempo de tal manera que un usuario pueda reclamar a la compañía de distribución eléctrica indemnizaciones cuando se produzcan cortes en el suministro y/o perturbaciones que afectan al proceso de producción de una empresa o a la calidad del servicio de una instalación comercial.

Entendiendo la importancia de realizar mediciones de energía eléctrica para posteriormente controlar todos los fenómenos que afectan su calidad, y, la necesidad de algunos usuarios (especialmente de la pequeña y mediana industria) en disponer de sistemas analizadores de energía eléctrica al alcance a su presupuesto y para una eventual auditoría o defensa jurídica, se propone el diseño de un medidor de energía eléctrica de bajo costo, de gran exactitud en el cálculo de los datos, de gran estabilidad en el proceso de adquisición de datos y tolerante a fallas eléctricas presentadas en la red analizada.

El sistema de medida diseñado calcula la potencia real con gran exactitud aún cuando las formas del voltaje y la corriente no son sinusoidales.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDA.

Un diagrama general del sistema de medida y registro de energía eléctrica propuesto se muestra en la figura 1.

El sistema de medida consta de los siguientes módulos principales:

- Módulo de Transductores. Son los sensores de las señales requeridas (voltaje, corriente) para los cálculos requeridos [2]. Básicamente corresponden a transformadores de corriente y de potencial.

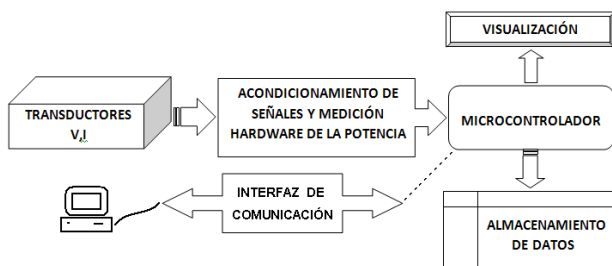


Figura 1. Diagrama del Sistema de Medición Diseñado.

- Módulo de Acondicionamiento de las señales. Aquí se adaptan las señales a medir a valores y tipos admisibles por el módulo de adquisición y cálculo. Asimismo se proporciona aislamiento electromagnético, contra sobretensiones u otros

eventos que puedan causar daño al resto de los módulos del sistema de medida o al operador mismo. Esta etapa en el sistema de medida la ejecuta el circuito integrado ADE7751.

- Módulo de Almacenamiento de Información. Consiste esencialmente en un bloque de memoria respaldada con una fuente de energía interna para la retención permanente de los datos y un reloj de tiempo real.
- Módulo de Visualización Local. Es una interfaz gráfica para la presentación local de los datos medidos en tiempo real.
- Módulo de Comunicaciones. Interfaz de comunicación para que el sistema de medida envíe la información almacenada a un sistema central local basado en computadores, o, a un sistema remoto de medición.
- Módulo Microcontrolador. Sistema programable al cual se conectan todos los módulos del sistema de medición realizando funciones de control y transferencia de la información.

3. COMPONENTES DEL SISTEMA DE MEDIDA.

A continuación se detalla la información de cada uno de los dispositivos hardware utilizados en el sistema de medida [1].

3.1. Medidor de Potencia Real, CI ADE7751 [3].

El ADE7751 es un circuito integrado (CI) de Analog Devices que mide la energía eléctrica en un sistema de distribución bifilar con gran exactitud y tolerante a fallas en la red eléctrica bajo estudio.

3.1.1. Descripción general [3].

En la figura 2¹ se muestra el diagrama de bloques funcional del ADE7751. Este CI está compuesto por una circuitería analógica (los convertidores analógico a digital /ADC y la referencia de voltaje, REF) y una circuitería digital (multiplicación y filtrado de señales) para el procesamiento de las señales requeridas.

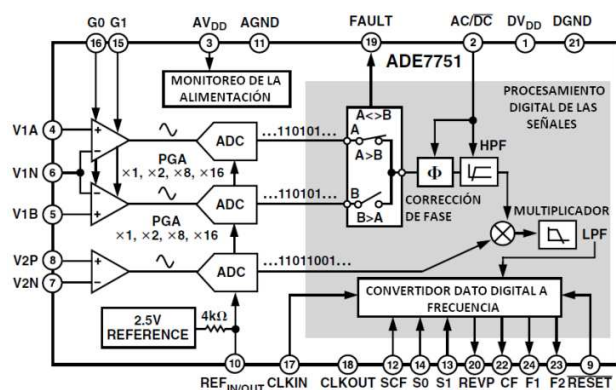


Figura 2. Diagrama de bloques funcional del ADE7751.

¹ Imagen basada en la hoja de datos técnicos del documento http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADE7751.pdf.

El ADE7751 incorpora un novedoso esquema de detección de fallas que permite continuar con el registro exacto de las medidas en una eventual falla, ya que mantiene un monitoreo continuo de las corrientes de fase y de neutro (retorno). Se indica la detección de una falla cuando estas corrientes difieren entre sí por más del 12.5%. El registro se continúa haciendo con la mayor de estas corrientes.

El ADE7751 entrega información de la potencia real promedio en las salidas de baja frecuencia F1 y F2. Estas salidas lógicas pueden ser conectadas directamente a un contador electromecánico o a la interfaz de un sistema microcontrolador. La salida lógica CF da información acerca de la potencia real instantánea, usándose como señal de calibración.

El ADE7751 incluye un circuito de monitoreo de la alimentación en el pin AV_{DD}. El ADE7751 permanecerá en una condición de reset hasta que el voltaje de alimentación en el pin AV_{DD} alcance los 4 V. Si este voltaje cae por debajo de 4 V, el ADE7751 también se reseteará y no aparecerán pulsos en los pines F1, F2 y CF.

3.1.2. Teoría de operación [3].

Existen dos convertidores ADC que digitalizan las señales de voltaje y corriente de los respectivos transductores de voltaje y corriente. Estos ADC son de 16 bits, del tipo sigma-delta de segundo orden con una tasa de muestreo de 900 KHz. Esta estructura de entrada análoga simplifica grandemente la interfaz del transductor proveyendo un amplio rango dinámico para la conexión directa con el transductor y simplificando también el diseño del filtro anti-aliasing.

Una etapa de ganancia programable en el canal de corriente facilita además la fácil interfaz con el transductor. Un filtro pasa-alto en el canal de corriente remueve cualquier componente dc de la señal de corriente. Esto elimina cualquier inexactitud en el cálculo de la potencia real debido al offset de las señales de voltaje o de corriente.

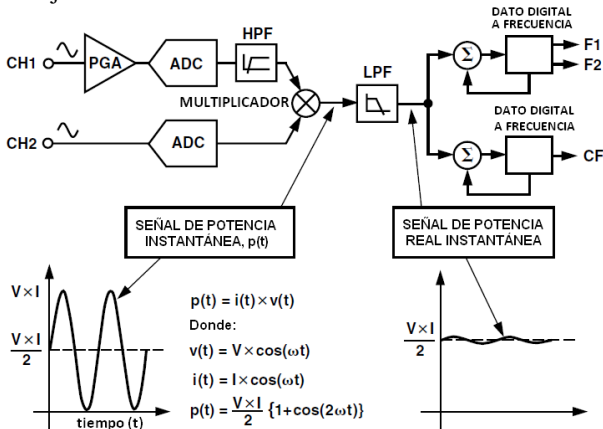


Figura 3. Diagrama del procesamiento de las señales.

El cálculo de la potencia real se obtiene de la señal de potencia instantánea. La señal de potencia instantánea es generada por una multiplicación directa de las señales de voltaje y de corriente. Con el fin de extraer la componente de la potencia real (la componente dc), la señal de potencia instantánea es filtrada a través de un filtro pasa-bajo. En la figura 3² se ilustra la señal de potencia real instantánea y se muestra como la información de la potencia real puede ser extraída filtrando la señal de potencia instantánea a través de un filtro pasa-bajo. Todo el procesamiento de las señales se lleva a cabo en el dominio digital obteniendo una gran estabilidad en el tiempo y al efecto de la temperatura.

La salida de baja frecuencia del ADE7751 es generada al acumular la información de la potencia real. Esta baja frecuencia permite un gran tiempo de acumulación entre los pulsos de salida. Por lo tanto, la frecuencia de salida es proporcional a la potencia real promedio. La información de esta potencia real promedio puede ser a su vez acumulada (p. ej., por un contador) para generar información de energía real. Debido a su alta frecuencia de salida, y al corto tiempo de integración, la salida del convertidor de frecuencia (CF) es proporcional a la potencia real instantánea. Así, esta salida es útil para los propósitos del sistema de calibración que podría tomar lugar bajo condiciones de carga en estado estable.

3.1.3. Consideraciones del Factor de Potencia (FP).

El método usado para obtener la información de la señal de la potencia instantánea (es decir, el filtrado pasa-bajo) es aún válida cuando las señales de voltaje de corriente no están en fase. La figura 4² muestra la condición para factor de potencia la unidad y un desplazamiento del factor de potencia de 0.5, es decir, la señal de corriente atrasada a la señal de voltaje en 60°.

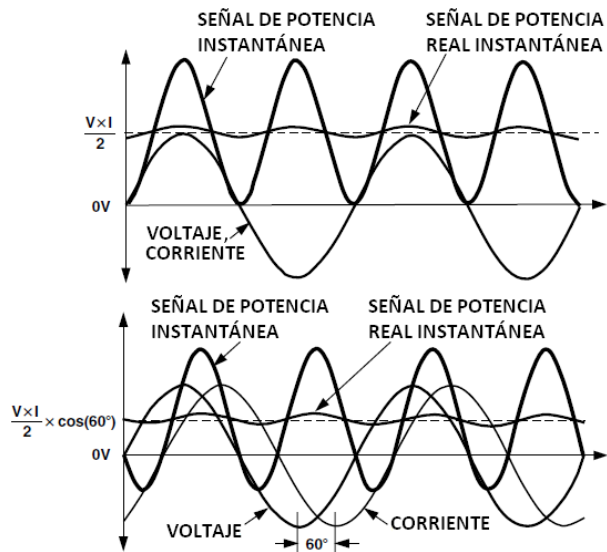


Figura 4. Componentes dc de la potencia con FP < 1

² Imagen basada en la hoja de datos técnicos del documento http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADE7751.pdf.

Si asumimos que las formas de onda de voltaje y corriente son sinusoidales, la componente de potencia real de la señal de potencia instantánea (es decir, el término dc) está dado por:

$$\left[\frac{V \cdot I}{2}\right] \cdot \cos(60^\circ) \quad (1)$$

Este es el cálculo correcto de la potencia real.

3.1.4. Voltaje y Corriente no Sinusoidales.

El método de cálculo de la potencia real se mantiene para formas de onda no sinusoidales del voltaje y la corriente. Todas las formas de onda de voltaje y de corriente en aplicaciones prácticas tendrán algún contenido armónico. Usando la transformada de Fourier, las formas de onda del voltaje y la corriente instantáneas pueden ser expresadas en términos de su contenido armónico de la forma:

$$v(t) = V_0 + \sqrt{2} \cdot \sum_{h \neq 0} V_h \cdot \text{sen}(h \cdot \omega \cdot t + \alpha_h) \quad (2)$$

Donde:

- $v(t)$: El voltaje instantáneo,
- V_0 : Valor promedio (componente dc) del voltaje,
- V_h : Valor rms del voltaje armónico h
- α_h : Ángulo de fase del voltaje armónico h .

$$i(t) = I_0 + \sqrt{2} \cdot \sum_{h \neq 0} I_h \cdot \text{sen}(h \cdot \omega \cdot t + \beta_h) \quad (3)$$

Donde:

- $i(t)$: La corriente instantánea,
- I_0 : Valor medio (componente dc) de la corriente
- I_h : Valor rms de la corriente armónica h y
- β_h : Ángulo de fase de la corriente armónica h .

Usando las ecuaciones (2) y (3), la potencia real P se puede expresar en términos de su potencia real fundamental P_1 y la potencia real armónica P_H :

$$P = P_1 + P_H$$

Donde:

$$P_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\phi_1) \quad (4)$$

$$\phi_1 = \alpha_1 - \beta_1.$$

$$P_H = \sum_{h \neq 1} V_h \cdot I_h \cdot \cos(\phi_h) \quad (5)$$

$$\phi_h = \alpha_h - \beta_h.$$

Como se puede ver en la ecuación (5), una componente armónica de la potencia real es generada por cada armónica con tal que la armónica esté presente en las formas de onda del voltaje y de la corriente. El cálculo del factor de potencia es exacto en el caso de una senoide pura, por lo tanto, la potencia real armónica debe también calcularse correctamente para dicho factor de potencia ya que este se deriva de una serie de sinusoides puras.

Note que el ancho de banda de entrada de las señales análogas es de 14 KHz con una frecuencia de reloj maestro de 3.5795 MHz.

3.1.5. Entradas Análogas.

- Canal V2 (Canal de voltaje): La salida del transductor del voltaje de línea se conecta al ADE7751 por medio de su entrada análoga. Este canal es una entrada total de voltaje diferencial. La señal pico máxima diferencial en el canal 2 es ± 660 mV. La figura 5³ ilustra los máximos niveles de las señales que pueden ser conectadas al canal 2 del ADE7751.

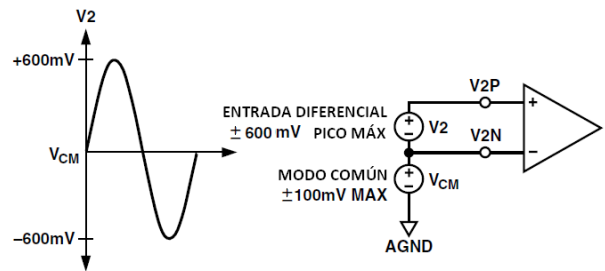


Figura 5. Niveles máximos de la señal en el canal 2.

- Canal V1 (Canal de corriente): Las salidas de voltaje de los transductores de corriente se conectan a este canal del ADE7751. El canal V1 tiene dos voltajes de entrada llamados V1A y V1B. Estas entradas son totalmente diferenciales con respecto a V1N. Sin embargo, en cualquier instante de tiempo solo una señal es seleccionada para realizar el cálculo de potencia. Las entradas análogas V1A, V1B y V1N tienen las mismas restricciones de niveles máximos que las entradas V2P y V2N. Sin embargo, el canal 1 tiene un amplificador de ganancia programable (PGA) con ganancias de 1, 2, 8 ó 16 (ver Tabla 1). La figura 6³ muestra los niveles máximos de las señales para V1A, V1B y V1N.

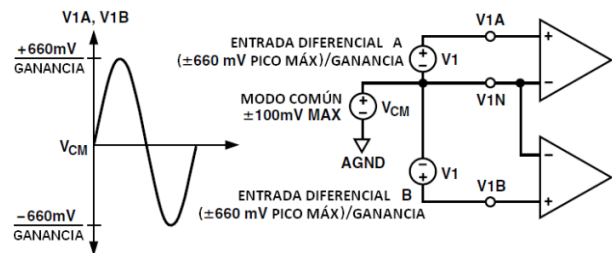


Figura 6. Niveles máximos de las entradas en el canal 1.

El voltaje máximo diferencial es ± 660 mV dividido entre la ganancia seleccionada del amplificador.

Tabla 1

G1	G0	GANANCIA	Señal Diferencial Máxima
0	0	1	± 660 mV
0	1	2	± 330 mV
1	0	8	± 82 mV
1	1	16	± 41 mV

³ Imagen tomada de la hoja de datos técnicos del documento http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADE7751.pdf.

3.1.6. Diagrama de Conexiones Típica [3].

En la figura 7⁴ se muestra el diagrama de conexión para la señal de entrada analógica en el canal 1. En esta conexión las señales analógicas se han usado para monitorear las corrientes de fase y de neutro. Debido a la gran diferencia de potencial entra la fase y el neutro, se deben usar dos transformadores de corriente (CT) para proporcionar el aislamiento adecuado. La construcción de los CT y los resistores de carga (R_b) se seleccionan de tal manera que el voltaje pico diferencial sea de (± 660 mV)/ganancia.

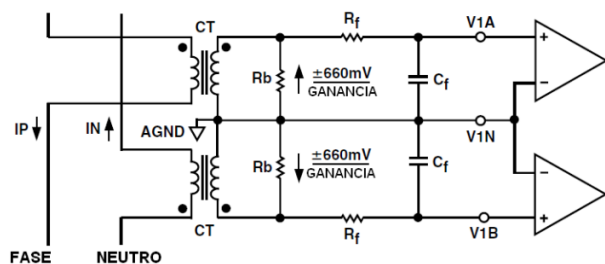


Figura 7. Conexión típica para el canal 1.

En la figura 8⁴ se ilustran dos conexiones típicas para el canal V2. La primera opción usa un transformador de potencial (PT) proporcionando aislamiento completo de los voltajes principales. En la segunda opción el ADE7751 es conectado a través de un divisor de tensión resistivo proveyendo una señal de voltaje que es proporcional al voltaje de línea. Ajustando los valores de R_a y R_b se logra también una calibración adecuada del medidor.

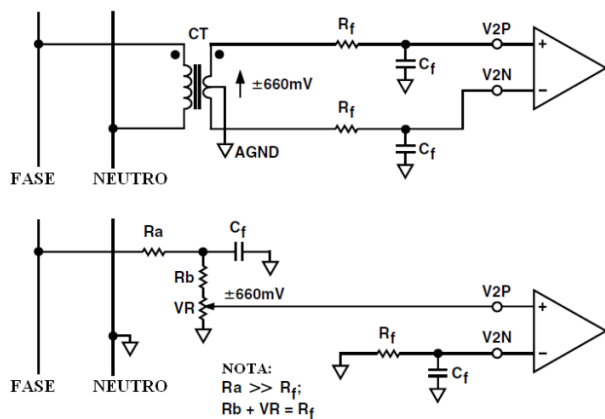


Figura 8. Conexiones típicas para el canal 2.

3.2. El Microcontrolador [4].

Es el cerebro del sistema de medida con las siguientes funciones:

- Capturar los pulsos entregados por el CI ADE7751 y hacer el cálculo correspondiente al valor de la potencia real y la energía eléctrica de la red.
- Visualizar los valores de energía eléctrica calculados en determinados instantes de tiempo.

- Almacenar los datos correspondientes a la energía eléctrica con la hora y fecha requeridos por el usuario en el CI DS1244.
- Controlar el intercambio de información con un computador mediante una interfaz de comunicación serial (estándar RS 485).

El microcontrolador usado en este proyecto corresponde al PIC 18F4550. La razón principal de su escogencia radica en el hecho de que posee una memoria de programa de tipo flash muy amplia (32 KB) en la cual se pueden almacenar los datos de energía eléctrica calculados si se opta por esta opción entre dos posibles (la otra opción consiste en usar una memoria RAM externa). Adjunto a esta característica, para este dispositivo se dispone de instrucciones de programación para almacenar y leer datos en/hacia la memoria de programa en una forma 'rápida' y segura como manipulando una tabla de datos. Si los datos se almacenan en la memoria de programa son retenidos en forma permanente sin la necesidad de usar una batería de respaldo externa.

Si se opta por la otra opción de almacenamiento de datos, se necesita manipular una memoria RAM paralela y este microcontrolador posee los pines suficientes para realizar dicha labor (35 pines de entrada/salida).

Este microcontrolador posee además entre otras las siguientes características:

- Soporte hardware y software para comunicación USB V 2.0.
- Memoria de datos SRAM de 2 KB y EEPROM de 256 bytes (con retención de datos > 40 años).
- Convertidor ADC de 10 bits para un máximo de 13 entradas analógicas.
- Tres fuentes externas de interrupción.
- Módulo USART mejorado.
- Multiplicador hardware de 8 bits.
- Rango amplio del el voltaje de operación (2 a 5.5 V)
- Velocidad de operación: Hasta 48 MHz con 2 modos externos de reloj.
- Cuatro módulos temporizador/contador.

3.3. Almacenamiento de los Datos [5].

Los datos calculados de energía eléctrica son almacenados en una memoria del tipo RAM estática paralela no volátil, en este proyecto el CI DS1244 de Dallas Semiconductor.

Esta memoria tiene una capacidad de 32 KB con un reloj de tiempo real interno. Además, cuenta con una fuente de energía tipo litio y una circuitería de control que monitorea constantemente el voltaje de alimentación para una condición de falla. Cuando sucede un evento de falla, la batería de litio se conmuta automáticamente para proteger contra escritura tanto la memoria como el reloj de tiempo real. En la figura 9⁵ se muestra la distribución de pines del CI DS1244.

⁴ Imagen tomada de la hoja de datos técnicos del documento http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADE7751.pdf.

⁵ Imagen tomada de la hoja de datos técnicos del documento http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADE7751.pdf.

A14/RST	1	28	V _{CC}
A12	2	27	WE
A7	3	26	A13
A6	4	25	A8
A5	5	24	A9
A4	6	23	A11
A3	7	22	OE
A2	8	21	A10
A1	9	20	CE
A0	10	19	DQ7
DQ0	11	18	DQ6
DQ1	12	17	DQ5
DQ2	13	16	DQ4
GND	14	15	DQ3

Figura 9. Distribución de pines del CI DS1244.

El reloj incorporado en el DS1244 provee información de centésimas de segundos, segundos, minutos, horas, días, fecha, mes y año. El fin de mes se ajusta automáticamente para aquellos con menos de 31 días, incluyendo la corrección para años bisiestos.

Existe otra opción de almacenamiento de información descrita en el apartado 3.2.

La comunicación entre el microcontrolador y el reloj interno del DS1244 se establece mediante el reconocimiento de un patrón que consiste en una trama de dato de 64 bits, el cual puede ser emparejado ejecutando 64 ciclos de escritura consecutivos con el dato apropiado en el pin DQ0. Después que se realiza el reconocimiento, los próximos 64 ciclos de lectura o escritura extraen o actualizan los datos en el reloj y se inhibe el acceso a la memoria.

3.4. Módulo de Visualización.

La interfaz gráfica usada en este proyecto corresponde a una pantalla de cristal líquido (LCD) de 2 líneas y 16 columnas. El dato de energía eléctrica se visualiza en un determinado periodo de tiempo configurado previamente por el usuario en el sistema de medida o en forma asíncrona mediante un mando manual (pulsador).

3.5. Módulo de Comunicaciones.

La interfaz de comunicación empleada en este proyecto es del tipo serial. Se dispone del estándar serial RS485 para intercomunicar un computador local o una red remota de medidores con el sistema de medida diseñado. En el módulo de comunicaciones se utilizan circuitos integrados SN75176 para convertir los niveles de voltaje TTL a niveles RS485 adecuados para el protocolo serial. Este estándar de comunicación es de aplicación industrial y maneja grandes distancias para la transferencia de datos.

4. CONCLUSIONES

Es claro que se pueden implementar sistemas electrónicos digitales para el análisis y posterior control del flujo de potencia en la industria que conlleve a mejorar la calidad de la energía desde el punto de vista de los usuarios.

Haciendo una minuciosa búsqueda de nuevas tecnologías e integrando sus funciones en el campo de la instrumentación, se logra el diseño y desarrollo de productos robustos y de bajo costo que resuelven problemas del sector industrial.

El sistema propuesto y diseñado se tendrá como un componente esencial en un gran proyecto de aprovechamiento de la energía solar, luego de hacer las respectivas conversiones de energía (energía solar-energía eléctrica, voltaje/corriente DC-AC, etc.)

En futuras implementaciones del sistema de medida diseñado en este proyecto se propone uno que maneje cargas eléctricas en sistemas trifásicos y de potencias medias y altas.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. J. Peter, T. Jeffrey, K. William. "Instrument and Measurement Technology Education-A Case Study: Inexpensive Student-Designed Power Monitoring Instrument for Campus Submetering", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Vol. 56, No. 5, Octubre de 2007, páginas: 1744-1752.
- [2] M. H. Shwehdi, Chris Jacobsen. "A microprocessor-based digital wattmeter system design", *IEEE Document 96189*. Páginas: 1840-1545. Authorized licensed use limited to: Universidad Tecnológica de Pereira. Downloaded on June 16, 2010 at 23:58:25 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.
- [3] "Energy Metering IC with On-Chip Fault Detection ADE7751 datasheet" [En línea], disponible en: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADE7751.pdf (Consultado el 17 de Mayo de 2010).
- [4] "PIC 18F4550 Microcontroller datasheet" [En línea], disponible en: <http://www.microchip.com/> (Consultado el 17 de Mayo de 2010).
- [5] "DS1244 256k NV SRAM with Phantom Clock" [En línea], disponible en: <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/DS1244-DS1244P.pdf> (Consultado el 10 de Julio de 2010).