

Construcción de un sincrofasor de bajo costo basado en un DSP-Controlador

A. R. San Vicente Cisneros , PhD Student.

Profesor Consultor, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey CEM, México.

PhD Student, Instituto Politécnico Nacional ESIME SEPI, México.

asanvice@itesm.mx

R. A. Cortés Mateos, PhD.

Profesor Investigador, Instituto Politécnico Nacional ESIME SEPI, México.

rcortes@ipn.mx

J. Robles García, PhD.

Profesor Investigador, Instituto Politécnico Nacional ESIME SEPI, México.

jarobles@ipn.mx

J. E. Chong Quero, PhD.

Profesor Investigador, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey CEM, México.

jchong@itesm.mx

Resumen

Según el estándar IEEE 1344 un fasor es el equivalente complejo, en forma polar de una señal senoidal en donde el módulo del complejo es la amplitud de la senoide y el ángulo es el desfase de la senoide. En el mismo estándar, sincrofasor es el acrónimo de fasor sincronizado y es un fasor medido y calculado mediante muestreos con una referencia temporal estándar. Se presenta el diseño de un sincrofasor basado en un DSP-Microcontrolador de la familia C2000 y cuya referencia temporal estándar se genera con la señal un pulso por segundo (1PPS) de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS), de tal forma que, se pueden medir ángulos de desfase de señales eléctricas ubicados en nodos de una red eléctrica geográficamente remotos.

En un sistema de distribución de energía eléctrica, la medición del fasor de los voltajes y corrientes son de importancia ya que con esta medición se pueden conocer los consumos de energía, las pérdidas de energía en una línea de transmisión y los flujos de potencia entre otros parámetros. Y además entre otras aplicaciones, la medición del sincrofasor también es requerida por los relevadores de distancia y protección en un sistema eléctrico de potencia.

Palabras clave

Sincrofasor, DSP-Microcontrolador.

1. Introducción

En la transmisión de energía eléctrica a través de líneas de transmisión y de otros elementos de la red eléctrica, se producen desfases de las señales de corriente y de voltaje. Estos desfases se deben a las cargas y a los flujos de energía.

1.1 Planteamiento del problema

El problema consiste en:

- Poder medir el desfase que presenta una misma señal eléctrica en dos puntos distantes.
- Poder medir el desfase entre dos señales eléctricas diferentes que se encuentran en dos puntos remotos.

La medición de las amplitudes en las señales eléctricas distantes resulta sencilla ya que en estos casos los voltajes se miden con la misma referencia de voltaje que es tierra o cero volts. Para el caso de la medición del desfase se requiere también de una misma referencia, pero en este caso es temporal. Con un mismo instrumento se pueden medir el desfase de una misma señal o de dos señales diferentes de manera local, ya que ambas señales se están midiendo con la misma referencia temporal del propio instrumento. Esta referencia temporal que genera el instrumento esta únicamente referenciada con el tiempo en que fue energizado, es decir que, es aleatoria.

Por razones obvias, para el caso de dos puntos remotos resulta imposible medir con el mismo instrumento. Si se utilizan dos instrumentos diferentes cada una de las señales remotas quedaran referenciadas temporalmente a su propio instrumento es decir a un punto aleatorio. Por lo tanto, resulta imposible la medición.

Partiendo de los razonamientos anteriores, el problema de medir el desfase en dos puntos remotos ya sea de la misma señal o de señales diferentes, se reduce a poder sincronizar ambos instrumentos con la misma referencia temporal. Es decir realizar una medición sincronizada del fasor como se puede apreciar en la figura 1, en donde, en cada nodo se hace una medición de amplitud V con un ángulo de fase δ en el mismo instante de tiempo.

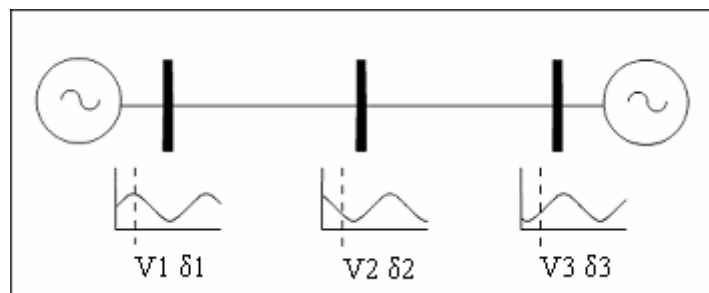


Figura 1: Sincronización de la medición

Además de la medición de flujos de potencia, la medición sincronizada del fasor tiene actualmente diversas aplicaciones (Anderson et al., 2003. Phadke, 1997), entre otras, en relevadores de protección y en el control de FACTS (Flexible AC Transmission Systems). En el siguiente apartado (Estado del Arte) se describen los avances que existen en la medición sincronizada del fasor.

1.2 Estado del arte

En 1988 se desarrolla en el Tecnológico de Virginia la primer Unidad de Medición Fasorial (PMU) sincronizada mediante un pulso de reloj proveniente de un GPS (Phadke, 2002). En 1995 se desarrolla el

estándar IEEE 1344, en el cual se denomina a la PMU sincronizada mediante un GPS como Sincrofásor. En el mismo estándar se define el formato de los datos de salida de un sincrofásor. En el 2001 se reafirma dicho estándar (Phadke et al., 2001. Thorp, 1998).

Actualmente, los equipos más desarrollados incorporan además de la función de medición fasorial el sistema de protección de línea de alta velocidad, automatización, control y protección de líneas de transmisión con funciones de distancia y direccionales (Anderson et al., 2003). No obstante el costo por nodo asciende hasta \$24,000 USD por sincrofásor dedicado (Moxley et al., 2002).

2. Sincronía vía GPS

El GPS consta en promedio de una constelación de 24 satélites activos. Los satélites describen tales orbitas que, en todo momento del día hay “línea de vista” de varios satélites en cualquier lugar de la Tierra. El sistema proporciona a usuarios terrestres que cuentan con un receptor GPS, varios servicios entre los que se encuentran la medición de las coordenadas geográficas, la altura al nivel del mar, la velocidad, la dirección del desplazamiento, la deriva magnética en grados, la hora mediante el UTC (Universal Coordinated Time) y la señal de un pulso por segundo (1PPS) entre otros (Moore, 1994. Trimble Navigation Limited, 2000).

El GPS terrestre recibe la señal de uno o más satélites, (para poder calcular las coordenadas terrestres por ejemplo, se requiere que el receptor capte por lo menos tres satélites). Una vez que el receptor detecta una señal de buena calidad de al menos un satélite, éste decodifica el UTC y lo trasmite en sincronía con la señal de 1PPS a cada uno de los medidores fasoriales (PMU) (Phadke., 1993). Cada PMU utiliza la señal de 1PPS para sincronizar sus respectivos temporizadores de muestreo, calcula el fasor y lo trasmite junto con el UTC a un procesador central que es el que se encarga de calcular los desfases de cada nodo de medición, tal como puede apreciarse en la figura 2 del diagrama a bloques del sistema de medición.

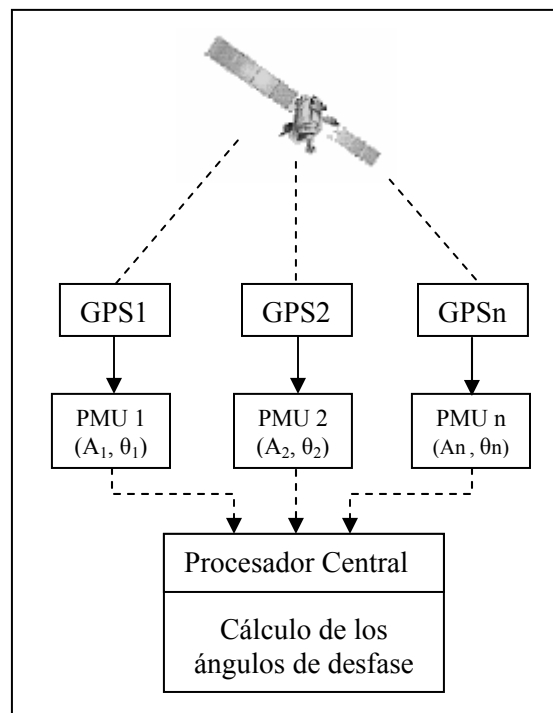


Figura 2: Sistema de medición

2.1 Señal de sincronía 1PPS

La señal de 1PPS es una señal TTL generada por el sistema GPS receptor (terrestre). Por omisión, cada vez que se energiza el receptor, se genera el 1PPS aunque no se haya detectado satélite alguno, una vez que se detecta por lo menos un satélite, el receptor sincroniza el flanco de subida del 1PPS con la recepción del UTC.

La señal de 1PPS tiene un ancho de pulso de 10 microsegundos, un tiempo de ascenso típico menor de 20 nanosegundos y un periodo de un segundo con una exactitud de ± 100 nanosegundos. A su vez el UTC esta sincronizado con un reloj atómico de Cesium de alta estabilidad que contiene cada satélite, el reloj de cada uno de los satélites están sincronizados entre si con un reloj maestro, de tal manera que, todos los satélites envían el UTC virtualmente al mismo tiempo. Para cualquier aplicación en donde se utilice el GPS para sincronizar, se deberá usar el flanco de subida del 1PPS ya que este se sincroniza a partir de la recepción del UTC (Trimble Navigation Limited, 2000).

3. Medición de los ángulos de desfase

Para calcular el desfase en un nodo determinado, es necesario que uno de los ángulos de una de las señales, se seleccione como señal de referencia, con esta referencia el desfase de las señales de los demás nodos se calculan con una resta, como se puede observar en la figura 3.

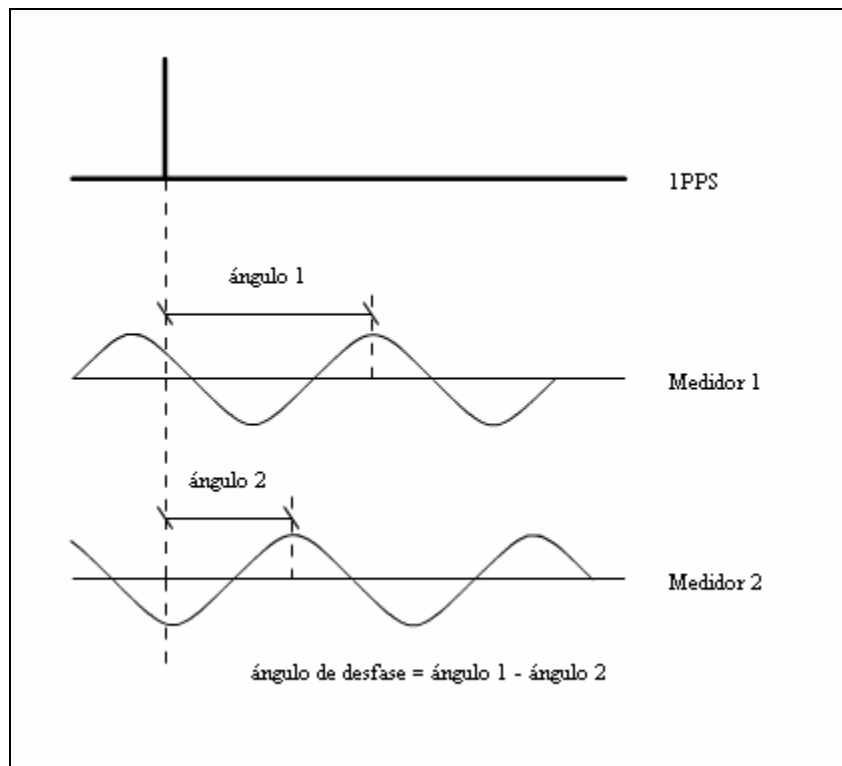


Figura 3: Cálculo del ángulo de desfase

El procedimiento del cálculo del desfase de las señales de la figura 3 se ejemplifica en los siguientes pasos:

- La referencia 1PPS se recibe al mismo tiempo en cada uno de los medidores.

- Se calcula el ángulo de desfase de la señal medida en el nodo con respecto a la referencia 1PPS, dando como resultado los ángulos 1 y 2; θ_1 y θ_2 respectivamente.
- Cada medidor transmite por algún medio de comunicación a un procesador central los ángulos calculados junto con el tiempo específico en el que se hizo la medición.
- El procesador central calcula el desfase. Si se toma como referencia el medidor 1 (θ_1). El desfase de la señal del medidor 2 con respecto a la señal del medidor 1 esta dado por $\delta_2 = \theta_1 - \theta_2$.

4. Cálculo del fasor

En 1983 se proponen una técnica para la medición de la amplitud y fase de una señal eléctrica (Phadke et al., 1983). En el cálculo se aplica la transformada discreta de Fourier (DFT) a un conjunto de muestras obtenidas de una ventana del tamaño de un periodo.

La señal senoidal representada en su forma polar o fasorial esta dada por

$$A \angle \theta \quad (1)$$

y

$$A = \sqrt{(Z_r)^2 + (Z_i)^2} \quad (2)$$

$$\theta = \arctan \frac{Z_i}{Z_r} \quad (3)$$

$$Z_i = j \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X[n] \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad (4)$$

$$Z_r = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X[n] \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad (5)$$

$X[n]$ son cada una de las muestras y N es el número de muestras obtenidas en la ventana de un periodo, para la implementación que aquí se presenta se escogió un número de 16 muestras, siendo el mínimo aceptable de 12 (Phadke et al., 1983). Este proceso de cálculo es aplicado en el sistema eléctrico trifásico a cada una de las tres señales de voltaje y de corriente.

5. Diseño a bloques del instrumento

El sincrofasor consiste en un sistema GPS ACE III de la marca Trimble, un DSP TMS320LF2407 de Texas Instrument (TI) y una computadora (PC). El GPS proporciona la señal 1PPS y el UTC para sincronizar la medición, el DSP calcula la amplitud y el ángulo de las señales con respecto al pulso de sincronía, la PC recibe los ángulos y amplitudes, hace un procesamiento y almacenamiento local y sube la información a un servidor vía Internet. Una PC remota recibe las señales de las diferentes estaciones locales para el cálculo del desfase, para hacer el cálculo a la PC remota se le especifica el nodo de referencia, es decir, el nodo con un ángulo de cero. Con el ángulo de referencia y el UTC la PC remota

efectúa las restas de los ángulos que tienen el mismo UTC, de tal manera que el cálculo del desfase solo es posible si se tiene el fasor junto con el estampado de tiempo en que se efectuó la medición.

El receptor GPS mediante un puerto serial asíncrono, transmite el UTC junto con otros datos en una cadena o trama de mensajes de acuerdo al protocolo estándar industrial NMEA 0183 (National Marine Electronics Association) (Trimble Navigation Limited, 2000). Existen otros protocolos, sin embargo el NMEA resulta ser el más económico y sencillo de utilizar, requiere de una sola vía de comunicación (simplex) y utiliza el código estándar ASCII. Otros protocolos además de ser de dos vías (full duplex), requieren del desarrollo de software para la interpretación de los comandos en código binario, por otro lado, el NMEA por su estatus de protocolo estándar, es manejado por la mayoría de los receptores GPS. En la figura 4 se muestra el diagrama a bloques del sistema.

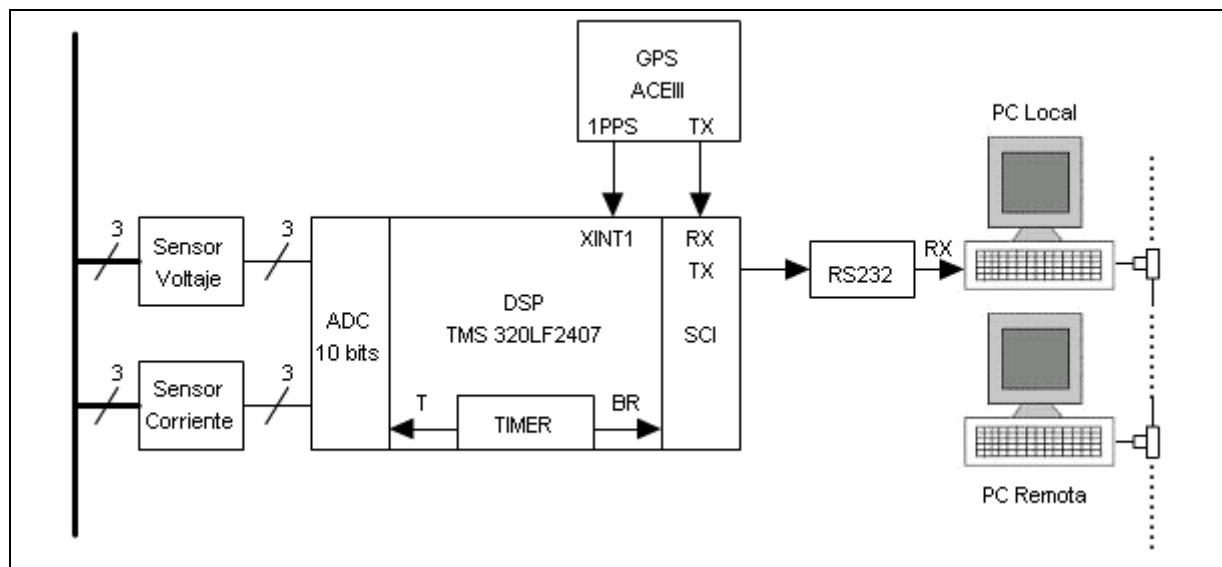


Figura 4: Diagrama a bloques del sistema

El DSPD TMS320LF2407 es un dispositivo de la familia C2000 de TI, esta familia fue una de las primeras en integrar en una sola pastilla de circuito integrado (CI) un DSP de punto fijo con diversos periféricos, a esta nueva generación de procesadores se les denomina DSP microntrolador ya que integran las funciones de un DSP y un microcontrolador. El bajo costo del desarrollo aquí presentado radica precisamente en concentrar en un solo CI la mayor parte de los requerimientos de diseño del instrumento.

Detallando con más precisión el diagrama de bloques, se puede apreciar que en el DSP ya está contenido el Convertidor Analógico Digital (ADC) de 10 bits y 16 canales de los cuales solamente se utilizan 6 canales. El ADC se encarga de digitalizar las señales analógicas de corriente y voltaje que ya previamente se han acondicionado a una señal de 0 a 3.3 volts (máximo nivel de voltaje que aceptan los canales del ADC). El temporizador (timer) cuya señal de reloj proviene de un oscilador de cuarzo se encarga de generar los periodos de muestreo, de tal manera que, se puedan adquirir con precisión y exactitud las 16 muestras por periodo de todas y cada una de las señales. A su vez, el inicio de las adquisiciones está sincronizada con la señal de interrupción externa (XINT1) que proviene de la señal 1PPS del GPS. También mediante el timer se genera la tasa de transmisión “Baud Rate” (BR) que requiere la Interfase de Comunicación Serial (SCI). El DSP recibe por medio de la terminal RX el UTC del GPS. Por otro lado, una vez que se ha calculado el fasor, el DSP por medio de la terminal TX transmite a la PC el valor de la amplitud y el ángulo de fase. En la comunicación entre el DSP y la PC es requerido un circuito igualador de niveles eléctricos el cual se logra con el CI RS 232. Las características de la comunicación asíncrona con la cual se programa el SPI son las del estándar NMEA las cuales se enlistan en la tabla 1.

Tabla 1: Características del estándar NMEA 0183

Baud Rate	Bits de datos	Paridad	Bits de paro
4800	8	Ninguna	1

6. Proceso de medición

Una vez que el receptor GPS terrestre se ha sincronizado con el satélite, la cadena de datos NMEA que contienen el UTC es transmitida 22ms después de que el GPS generó la señal de 1PPS. En la figura 5 se muestra la sincronía entre el 1PPS, la cadena de datos NMEA y una porción de la señal que se digitaliza. Como se puede observar, la información obtenida de la figura 5 sugiere la forma en como se puede calcular el fasor.

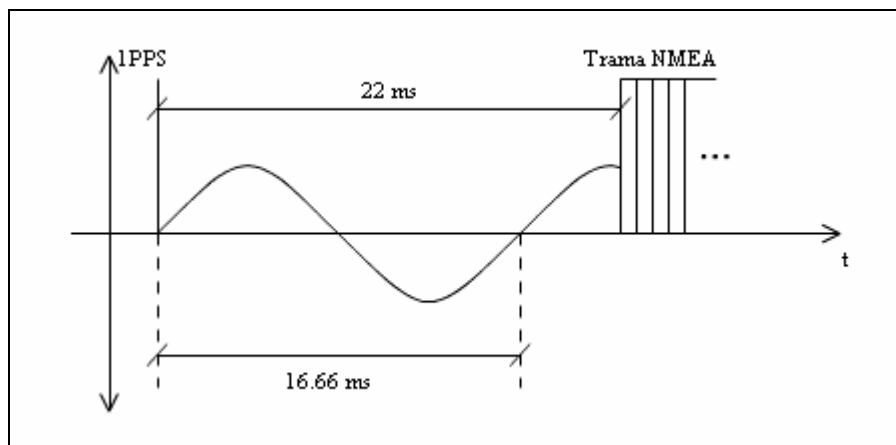


Figura 5: Sincronía IPPS, Trama NMEA y señal de 60Hz a digitalizar

Entre el 1PPS y la trama NMEA (22ms) cabe un periodo de la señal a digitalizar (16.66ms), por lo tanto, el proceso debe seguir los siguientes pasos (ver tabla 2):

Tabla 2: Proceso de medición de los fasores

Paso	Proceso
1	Se espera el 1PPS
2	Se hacen las 16 adquisiciones de los 6 canales
3	Se espera la trama NMEA
4	Se captura el UTC
5	Se calculan los seis fasores
6	Se transmiten el UTC y los seis fasores
7	Regresa al paso 1

6.1 Algoritmo computacional.

El programa se compone básicamente de tres bloques: El programa principal, la rutina de servicio de la interrupción externa XINT1 (generada por el 1PPS) y la rutina de servicio de la interrupción de fin de conversión del ADC. En la figura 6 se muestran los diagramas de flujo de las tres partes del programa

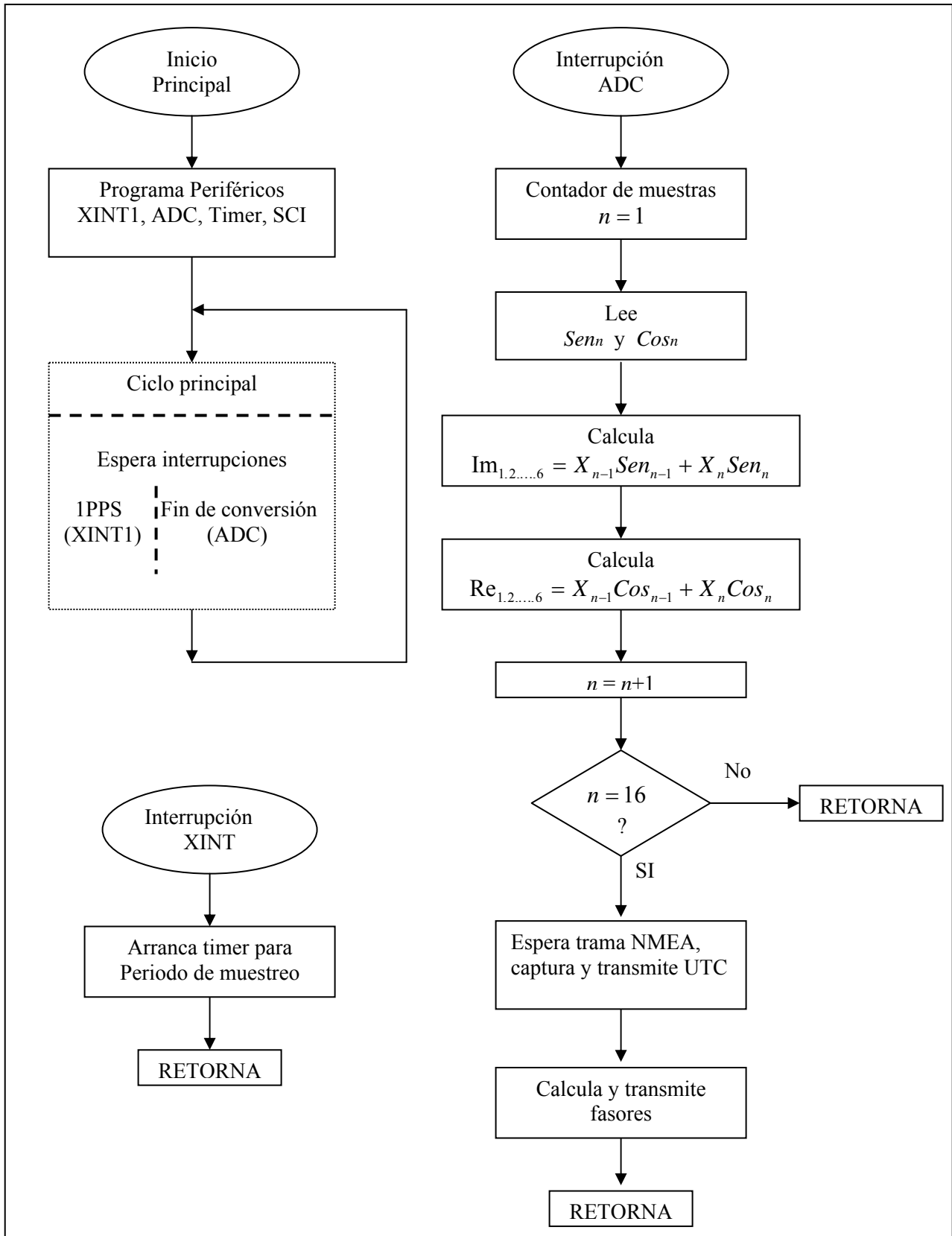


Figura 6: Diagramas de flujo del programa

El programa principal: En el programa principal se prepara y reserva la memoria a utilizar, se programan y habilitan los periféricos a utilizar: el ADC, el Timer y el SCI. Se habilitan las interrupciones y se esperan en un ciclo infinito las interrupciones XINT1 y la de fin de conversión del ADC.

La rutina de servicio de la interrupción IXNT1: En esta rutina lo único que se hace es arrancar el temporizador que proporciona el periodo de muestreo del ADC. Como esta interrupción es generada por la señal 1PPS del GPS se presenta cada segundo.

La rutina de servicio de la interrupción de fin de conversión del ADC: El periodo de muestro que genera el timer en el ADC es de 960 Hz, por lo tanto, esta interrupción se presenta en 16 ocasiones después de recibido el 1PPS. Aplicando el algoritmo computacional, cada vez que se genera la interrupción del ADC se hace el cálculo de $X_n \text{Cos}_n$ y se acumula con el mismo producto de todas y cada una de las muestras, para la primer interrupción en donde $n = 1$ se tiene que:

$$X_0 \text{Cos}_0 = X_0 \text{Sen}_0 = 0 \quad (6)$$

Como el ADC entrega el valor de la conversión de los 6 canales entonces, se pueden hacer las sumatorias de los productos de cada una de las 6 señales aplicando los siguientes algoritmos.

$$\text{Re} = X_{n-1} \text{Cos}_{n-1} + X_n \text{Cos}_n \quad (7)$$

$$\text{Im} = X_{n-1} \text{Sen}_{n-1} + X_n \text{Sen}_n \quad (8)$$

De tal forma que, después de las 16 adquisiciones ya se tienen de las 6 señales las componentes real e imaginaria expresadas en las ecuaciones (4) y (5).

Después de calculadas las componentes reales e imaginarias, se espera mediante poleo la recepción de datos provenientes del GPS (trama NMEA), se captura el UTC que llega con el formato HHMMSS.S. Ya capturado el UTC se transmite y se procede al cálculo del fasor de cada una de las 6 señales mediante las ecuaciones (2) y (3). Finalmente se transmiten los fasores calculados y se retorna al programa principal a esperar la siguiente interrupción del 1PPS.

Conclusiones

Actualmente los sincrofasores se encuentran instalados en líneas de transmisión, sin embargo, también son requeridos en las áreas de distribución, esto implica un gran gasto en medidores. El desarrollo aquí presentado permite un abatimiento de hasta el 80% del costo de los medidores comerciales. El bajo costo del desarrollo aquí presentado radica precisamente en concentrar en un solo CI la mayor parte de los requerimientos de diseño del instrumento. El reducido tamaño de la tarjeta del circuito impreso (PCB) y el uso de un procesador de punto fijo también fueron factores en el bajo costo del instrumento.

Referencias

Anderson, Chris, Fearn, Brian, Guzmán, Armando, Moxley, Roy.(2003) "Using SEL-421 relay synchrophasors in basic applications." *SEL Application Guide*, Vol. 1

Martin, K. E., Benmouyal, G., Adamiak, M. G., Begovic, M., Burnett, R.O., Jr., Carr, K. R, Cobb, A., Kusters, J. A., Horowitz, S. H., Jensen, G. R., Michel, G. L., Murphy, R.J., Phadke, A. G., Sachdev, M.S., Thorp, J.S. (1998). "IEEE standard for synchrophasors for power systems." *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, No. 1, January.

Moore, T. (1994) "An introduction to the global positioning system and its applications." *Developments in the Use of Global Positioning Systems*, the Institution of Electrical Engineers. Savoy Place. London, UK 8 Feb Pages:1/1 - 1/6.

Moxley, Ro, Woodward Darold. (2002). "Improving power system operating capacity through wide-area synchronous phase angle measurement." *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Phadke, A. G., Thorp, J. S., Adamiak, M. G. (1983). "A new measurement technique for tracking voltage phasors, local system frequency, and rate of change frequency." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, No. 5, May.

Phadke, A. G. (1997) "Synchronized phasor measurements, Chapter 6." *IEEE Tutorial Course, Advancements in microprocessor based protection and communication.*

Phadke, A.G. (2002) "Synchronized phasor measurements-a historical overview." Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia Pacific. IEEE/PES, Volume: 1 6-10 Oct. Pages:476 - 479 vol.1.

Phadke, A.G. (1993) "Synchronized phasor measurements in power systems." *Computer Applications in Power, IEEE*, Volume: 6, Issue: 2, April Pages:10 – 15.

Phadke, A. G., Martin, K. (2001). "IEEE standard for synchrophasors for power systems." *IEEE Std 1344-1995(R2001)*.

Trimble Navigation Limited. (2000). "ACE III GPS™ System Designer Reference Manual." Sunnyvale, CA.

Información Biográfica

Rafael SAN VICENTE CISNEROS Mr. Profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey - Campus Estado de México, Estudiante del Doctorado en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en la Sección de Graduados e Investigación de la ESIME-IPN.

Dr. Raúl CORTÉS MATEOS. Profesor Titular (TCE). Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica de la ESIME-IPN (1971). Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, Sección de Graduados e Investigación ESIME-IPN (1975). y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en la Sección de Graduados e Investigación de la ESIME-IPN (1997).

Dr. Jaime ROBLES GARCÍA. Profesor Titular (TCE). Ingeniero Electricista de la ESIME-IPN (1987). Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, Sección de Graduados e Investigación ESIME-IPN (1993). Doctor en ciencias en Ingeniería Eléctrica, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (1996).

Dr. Jesús Enrique CHONG QUERO. El Dr. Chong Quero es profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey - Campus Estado de México, y actualmente es colaborador del Centro de Investigación en Calidad Ambiental del mismo Instituto.