

Registrador de perturbaciones para la red de transmisión eléctrica.

Juan H. Luján, Pablo Mazzara, Juan P. Oliver, Fernando Silveira.

*Instituto de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Montevideo.*

1. Resumen

El proyecto se desarrolló en el marco de un Convenio suscrito entre el IIE y la UTE y comprendió el desarrollo del hardware y software de un prototipo de registrador de perturbaciones de la red de transmisión eléctrica.

El equipo adquiere de forma continua 8 señales analógicas muestreadas a 4000 muestras por segundo y 16 señales digitales, muestreadas a razón de 1000 veces por segundo.

Las muestras de las señales son analizadas en tiempo real para detectar varios tipos de posibles desviaciones respecto del comportamiento nominal. En caso de detección positiva de desviaciones, las señales se almacenan en medio magnético para su posterior procesamiento.

El presente trabajo resume las experiencias adquiridas en el desarrollo de las interfaces del adquisidor con las señales a medir. La atención se concentra en las soluciones a los problemas de medida y aislación en el entorno particular en que el equipo funcionará.

2. Introducción.

El equipo se ha desarrollado¹ a los efectos de realizar una supervisión permanente de la red eléctrica. Dicha supervisión está compuesta por un lado de la detección de las perturbaciones de la red y por otro del registro de las mismas para su posterior análisis.

¹- Participaron en el desarrollo del equipo: Omar Barreneche, Pablo Darscht, Gabriel Gómez Sena, Juan Luján, Pablo Mazzara, Juan Pablo Oliver, Julio Pérez Acle, Conrado Rossi Aicardi, Fernando Silveira.

2.1 Requerimientos del equipo

Las especificaciones del equipo ([1]) indican que se deben poder supervisar un total de 8 canales analógicos y 16 canales digitales. A estos efectos, se deberán adquirir las señales de estos canales y analizarlas, para determinar si existió una perturbación. Llamaremos arranque al desencadenamiento de un registro en medio magnético. Las condiciones de arranque posibles son:

- a) En el caso de señales analógicas:
 - frecuencia inferior a un cierto mínimo.
 - frecuencia superior a un cierto máximo.
 - amplitud inferior a un cierto mínimo.
 - amplitud superior a un cierto máximo.
 - pendiente superior a un cierto máximo.
- b) En el caso de señales digitales:
 - flanco creciente o decreciente.
- c) Contacto sin tensión.
- d) Ensayo por el operador.

Las causas a) y b) pueden ser deshabilitadas en forma independiente para cada canal.

Los registros deben incluir un total de 3 segundos, a partir de al menos 200 msec. antes de la detección de la primera condición de arranque y deben almacenarse los datos de la totalidad de los canales (analógicos y digitales) correspondientes a ese período de tiempo.

Por lo tanto el equipo debe poder funcionar en forma ininterrumpida y autónoma.

Las señales deben adquirirse de acuerdo a los siguientes requerimientos:

- * Entradas analógicas:
 - ancho de banda: 1 KHz
 - error permitido: 5 % para señales mayores que 50% de la nominal.
 - fondo de escala: la situación más exigente se da para las medidas de corriente, en las que se desea medir hasta 20 * valor nominal. Las razones que llevan a esta condición, así como desempeños opcionales que luego se introdujeron en el equipo se verán en la Sección 3.1.2 donde se discute el diseño de la interfaz de corriente.
 - consumo admisible, características de aislación e inmunidad al ruido como se detallan en la Sección 3.1.1.

* Entradas digitales:

- frecuencia de muestreo: 1 Khz.
- niveles lógicos, consumo admisible, características de aislación, inmunidad al ruido como se detallan en la Sección 3.2.

Las señales a medir se toman del secundario de los transformadores de medida de una subestación de UTE para las entradas analógicas y de los dispositivos de protección en el caso de las entradas digitales.

Dado que las señales analógicas deben ser registradas con un ancho de banda de 1 Khz, de acuerdo al Teorema del Muestreo, la frecuencia de muestreo debe ser superior a 2000 muestras por segundo y por canal. Teniendo en cuenta las características de atenuación de los filtros a ser utilizados para evitar "aliasing", se eligió muestrear 4000 veces por segundo y por canal.

Para tener una cota de error de acuerdo a las especificaciones, el intervalo de cuantificación debe ser menor que:

$$0.05 * (1/2) * (\text{Valor nominal})$$

Dado que el máximo valor a medir es $20 * (\text{Valor nominal})$, y considerando el error de cuantificación de 0.5 LSB, el conversor A/D a utilizar debe tener como mínimo 400 palabras de código distintas, más un bit de signo.

De lo anterior se obtiene que el conversor A/D debe tener por lo menos una precisión de 10 bits.

2.2- Estructura general del equipo

A los efectos de minimizar el tiempo de desarrollo, se optó por diseñar el equipo aprovechando donde ello era posible elementos disponibles en el mercado como ser:

- Computador Personal con microprocesador de 16 bits 80286 (sin teclado ni monitor).
- Tarjeta adquisidora, interior al computador, de 12 bits de precisión y velocidad máxima de adquisición de 50000 muestras por segundo.

Y realizando un desarrollo propio en el caso de las partes específicas a la aplicación como ser:

- Transformadores de medida para tensión y corriente.

- Tarjeta de acondicionamiento de las señales analógicas.
- Tarjeta de acondicionamiento y aislación de las entradas lógicas.
- Software del equipo.
- Fuente de alimentación
- Diseño físico general del equipo de acuerdo a normas internacionales.

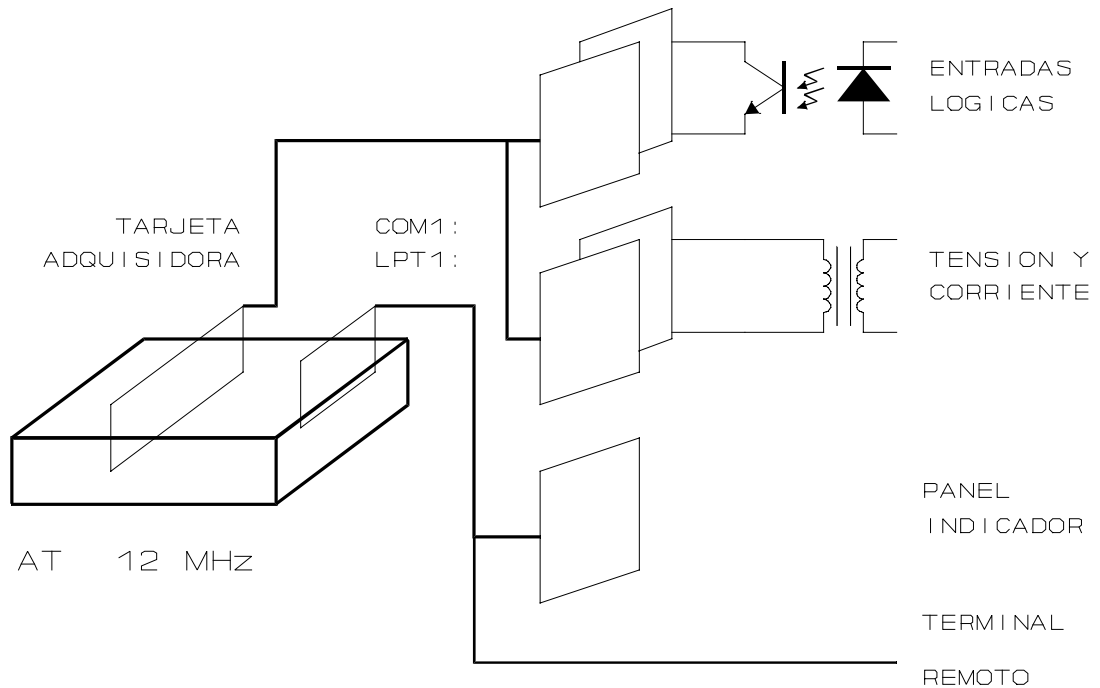


Fig. 2

A partir de los elementos descritos en el párrafo anterior y a efectos de cumplir con los requerimientos detallados en el punto 2.1, se construyó un equipo que desde el punto de vista de procesamiento y adquisición de los datos tiene las siguientes características relevantes:[2,3]

- Se utiliza una frecuencia de muestreo de 4000 muestras por segundo y por canal.
- A los efectos de lograr un flujo continuo de muestras analógicas hacia la memoria del computador, se emplean dos canales de Acceso Directo a Memoria (DMA) alternadamente.

- El análisis de los datos analógicos y digitales adquiridos, se realiza por software una vez que se encuentran digitalizados en la memoria del computador. Durante cada segundo se analizan 32000 muestras analógicas y 1000 muestras digitales de 2 bytes cada una, lo que consume aproximadamente el 33% del tiempo del procesador.

- La lectura de las señales lógicas se realiza a través de un puerto de 16 bits incluido en la tarjeta adquisidora.

- A los efectos de comandar el panel de indicaciones luminosas del equipo, de leer el estado del botón para ensayo y de la entrada de arranque por contacto sin tensión, se utilizó el puerto estándar de impresora.

- En cuanto a la entrada/salida de los datos, existen dos posibilidades: o bien realizarla mediante la diskettera, o bien a través del puerto serie. Esta facilidad se utiliza para retirar registros o modificar la configuración del equipo.

3. Aislación y acondicionamiento de las entradas.

3.1. Entradas analógicas.

En lo que se refiere a aislación y acondicionamiento, del equipo se requerían las siguientes prestaciones:

* Medida de cuatro tensiones con valores nominales de $100/\sqrt{3}V_{eff}$ o $200/\sqrt{3}V_{eff}$ y valores en condición de sobrecarga de hasta $380V_{eff}$.

* Medida de cuatro corrientes con valores nominales de 1A o 5A y valores en condición de sobrecarga de 20A y 100A.

En ambos casos se debía cumplir además:

* Aislaciones:

- Resistencia de aislación mayor que $100M\Omega$, @ 500Vcc y rigidez dieléctrica a $2.5kV_{eff}$, 50Hz, 1min., según norma IEC 258.

- Ensayo de impulso, 1.2/50 μ seg., 5kVp. según norma IEC 255-5.

* Inmunidad a parásitos de H.F.: según norma IEC 255-6-C:

- 1MHz, 400Hz, 2seg., 2.5kVp. en modo longitudinal (modo común).

- 1MHz, 400Hz, 2seg., 1kVp. en modo transversal (modo diferencial).

Teniendo en cuenta la arquitectura utilizada para la conversión A/D, que impone la aislación de las señales del "lado analógico", y los rangos de señales a medir, la solución más adecuada para la aislación de las entradas es la utilización de transformadores de medida. Esto además permite un primer acondicionamiento de los niveles de las señales.

El error admisible de los transformadores de medida surge de lo siguiente:

La tarjeta de conversión utilizada garantiza una exactitud global de 0.03% del fondo de escala (lo que es equivalente a 0.6144 LSB).

El requerimiento de un error menor al 5% para un medio del valor nominal ($Valnom$) es más exigente para el caso de los canales de corriente en los que el fondo de escala es $20 * Valnom$. En este caso, para un conversor de 12 bits, se tiene un error máximo admisible de aproximadamente 2.5 LSB. Por lo tanto se tiene para las etapas de aislación y acondicionamiento: 1.89 LSB, lo que es equivalente a 3.7% para $Valnom/2$.

En base a esto se tomó como criterio de diseño para los transformadores un error relativo máximo para valores mayores que $Valnom/2$ de 1% ; lo que se aplicó a ambos tipos de transformadores.

En el curso del diseño del equipo se acordó dar la opción de que el fondo de escala para medidas de corriente fuera de $60 * Valnom$, ya que los estudios acerca del comportamiento de los transitorios de corrientes de cortocircuito indicaban que era usual tener valores de pico de este orden (siendo $20In$ la condición de régimen en cortocircuito)[4]. Si bien esto implica una degradación del error para $Valnom/2$, la misma no es muy importante, ya que para fondo de escala $20 * Valnom$, se cumple holgadamente con la especificación del error admisible.

3.1.1. Transformadores de corriente.

El transformador de corriente se diseñó en base a un núcleo toroidal construido utilizando una cinta de hierro silicio. Esta elección permitió desde el punto de vista constructivo obtener una relación de transformación de 1 a 35000 que hace posible acondicionar la corriente de salida con una electrónica simple (en base a amplificadores operacionales sin una electrónica de potencia intermedia).

Los criterios de diseño, en resumen, fueron:

- i) Error relativo < 1%.

- ii) Campo magnético máximo en el núcleo: 0.1 T. Esta condición, tiene en cuenta el hecho que durante el transitorio de las corrientes de cortocircuito, se tiene valor medio no nulo durante varios ciclos imponiendo una magnetización superior a la de régimen en el núcleo.
- iii) Factor de llenado < 0.5.
- iv) Consumo máximo 5 VA.
- v) Densidad de corriente < 2 A/mm².
- vi) Relación de transformación que asegure una corriente máxima en el secundario menor que 15mA (de modo que fuera manejable por el amplificador operacional elegido).

En base a estos criterios se llegó a un transformador con las siguientes características:

- i) Relación de transformación de 1 a 35000.
- ii) Núcleo con las siguiente dimensiones:
 - Radio interior: 4cm.
 - Radio exterior: 7cm.
 - Ancho de la cinta: 4 cm.
- iii) Alambre de diámetro: 2mm.

Se construyeron 4 transformadores con estas características, y al ensayarlos se obtuvieron resultados que garantizan un error en esta etapa menor que el 1%, para amplitudes entre $V_{\text{alnom}}/2$ y fondo de escala.

3.1.2. Transformadores de tensión.

En el caso de los transformadores de tensión se utilizaron los siguientes criterios de diseño:

- i) Tensión máxima de entrada: 380 V_{eff}.
- ii) Frecuencia mínima: 30 Hz.
- iii) Consumo máximo 5VA.
- iv) Se despreció en el modelo utilizado para los cálculos la self de fugas.
- v) Error relativo menor que 1%, lo que da una condición en función de la resistencia del bobinado primario y la self magnetizante.
- vi) Relación de transformación: 4 a 1.
- vii) Campo máximo en el núcleo: 1T a 50 Hz.
- viii) Densidad de corriente máxima: 2 A/mm².
- ix) Factor de llenado < 0.5.

En base a estos criterios se obtuvo:

$$N_1 = 3076$$

$$N_2 = 769$$

$$\text{Sección del núcleo} = 33 \times 33 \text{ mm}^2$$

$$\text{Diámetro de alambre} = 0.3 \text{ mm.}$$

Se construyeron 4 transformadores con estas características y con dos pantallas, y al ensayarlos se obtuvieron resultados que garantizan un error en esta etapa menor que el 1%, para amplitudes entre $V_{nom}/2$ y fondo de escala. Esto se verificó para frecuencias entre 30Hz y 2KHz.

3.1.3. Tarjeta de acondicionamiento analógico.

Esta tarjeta contiene:

- * acondicionamiento de niveles (que incluye en los canales de corriente la conversión corriente - tensión) para que la señal de salida esté en el rango de entrada de la tarjeta A/D ($\pm 10V$).

- * filtrado "antialiasing", implementado con un filtro de Butterworth de sexto orden, con frecuencia de corte 1KHz. El orden del filtro fue determinado en base al criterio de tener una atenuación mayor que 30dB @ 2KHz, doble de la frecuencia de corte y mitad de la frecuencia de muestreo. Se eligió un filtro de Butterworth teniendo en cuenta sus buenas características desde el punto de vista de la respuesta amplitud frecuencia y su regularidad en el retardo de grupo.

Para el amplificador de entrada se utilizó el operacional OP10, siendo esta etapa en la que se encuentra el ajuste de offset del canal. Para el filtro se utilizó TL084.

El circuito impreso diseñado es tamaño doble EUROCARD (como el resto de las tarjetas del equipo), y en él se encuentran las etapas de acondicionamiento de cuatro canales, pudiéndose configurar en el armado del circuito cada uno de ellos como canal de corriente o de tensión.

3.2. Entradas lógicas.

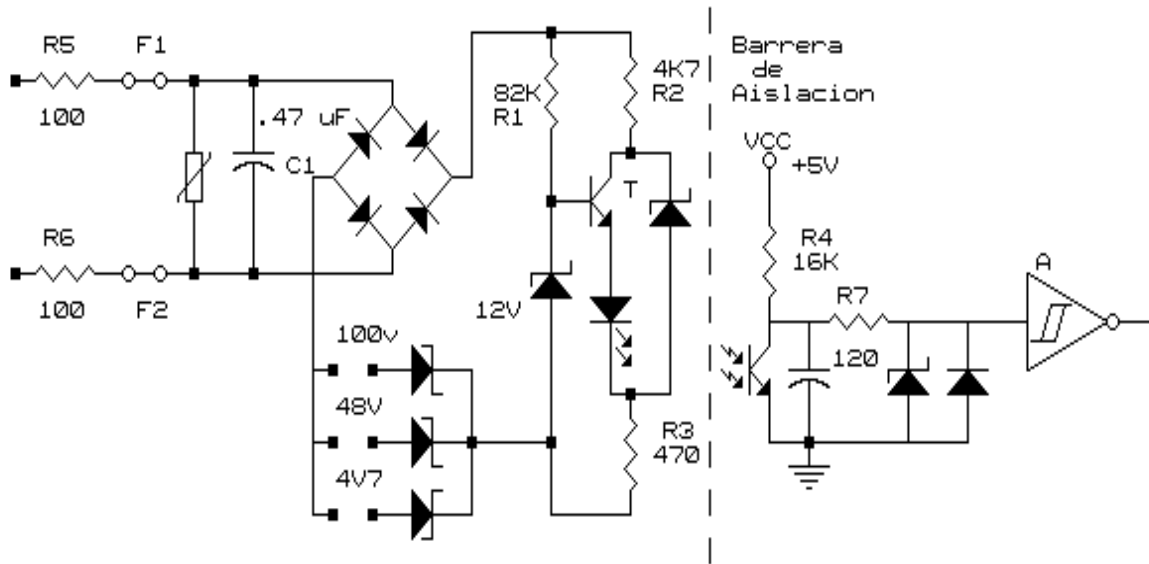
3.2.1. Especificaciones.

Las entradas digitales debían cumplir:

- * Admitir tensiones seleccionables de 48, 110 a 125, o 220 a 250 VCC, de cualquier polaridad.

- * Soportar una sobrecarga de 380 Veff. **en forma permanente, en cualquier configuración.**

- * Especificaciones de aislación e inmunidad a parásitos iguales que para las entradas analógicas.



3.2.2. Descripción del circuito adoptado.

La tarjeta se compone de los siguientes bloques:

- * Filtro de entrada para rechazar parásitos de alta frecuencia.
- * Rectificador en puente para permitir conexiones de cualquier polaridad.
- * Bloque de discriminación de niveles y aislación. Este bloque tiene umbral configurable de acuerdo al rango de entrada elegido. La barrera de aislación está implementada con optoacopladores.
- * Etapa de salida en niveles TTL.

La condición de sobrecarga resultó la más difícil de satisfacer, teniendo en cuenta el gran rango de trabajo que se tiene cuando esta condición se da para una entrada configurada para 48VCC. Además se encontró que las exigencias en caso de sobrecarga se ven agravadas debido al transitorio que se produce al conectar y desconectar los 380Veff. sobre el filtro capacitivo de entrada.

Luego de estudiar y ensayar varias alternativas se obtuvo el circuito de la figura 2, el cuál soporta adecuadamente las sobretensiones transitorias y de régimen, con una disipación admisible, estando construido enteramente en base a componentes disponibles en plaza.

El optoacoplador utilizado soporta tensiones máximas de 7.5kVp a través de la barrera de aislación. Si bien esto es suficiente para cumplir las especificaciones del equipo, se previó una protección que garantice que este rating no sea excedido, en base a descargadores en aire implementados en el propio circuito impreso. Esto resolvió el problema de la no disponibilidad de descargadores gaseosos de tensiones adecuadas, comportándose satisfactoriamente en los ensayos realizados hasta el momento.

4. Resultados obtenidos.

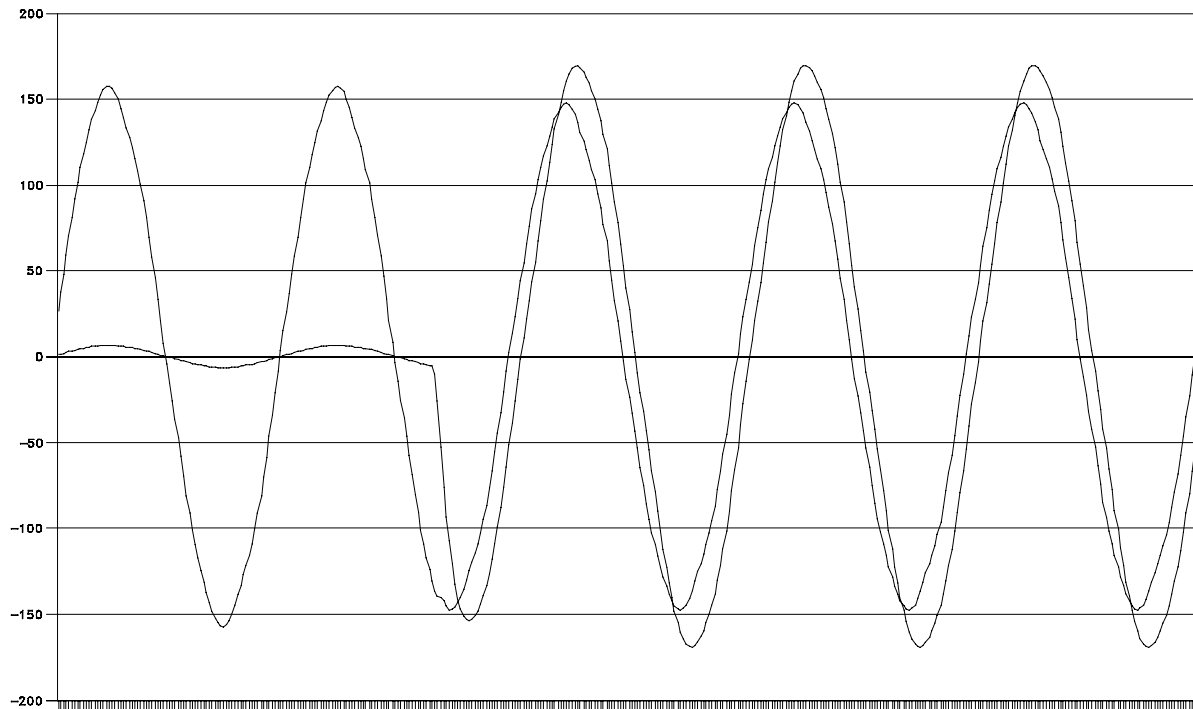


Figura 3. Formas de onda del cortocircuito ensayado adquiridas por el registrador. Escala: Tensión en Volts, Corriente en Amperes. El voltaje registrado es el de la red a través de un transformador de medida 220V/110V.

Al momento de presentación de este trabajo se han verificado satisfactoriamente el cumplimiento de las normas de aislación e inmunidad a parásitos por los transformadores de medida; y del ensayo de impulso por parte de la tarjeta de entradas lógicas. Los ensayos restantes se encuentran en proceso de realización.

Para la verificación de la exactitud del sistema completo se realizaron hasta el momento los siguientes ensayos:

- i) Se contrastó el funcionamiento del equipo contra un

osciloscopio de memoria digital Tektronix 2232, que si bien tiene menor exactitud en la medida de amplitud (trabaja con 8 bits), permite realizar la medida con una frecuencia de muestreo mayor (10 kmuestras por canal en la escala de tiempos elegida). Los datos adquiridos fueron transferidos a una PC a través de una interfaz IEEE-488.

Este ensayo da una idea cualitativa del funcionamiento del equipo, comprobándose que las ondas se adquieren sin deformación apreciable.

El ensayo consistió en simular un corto circuito monofásico en la red pasando la corriente de $5A_{eff}$ a $100 A_{eff}$ aproximadamente, adquiriendo tensión y corriente.

Los resultados se muestran en las figuras 3 y 4.

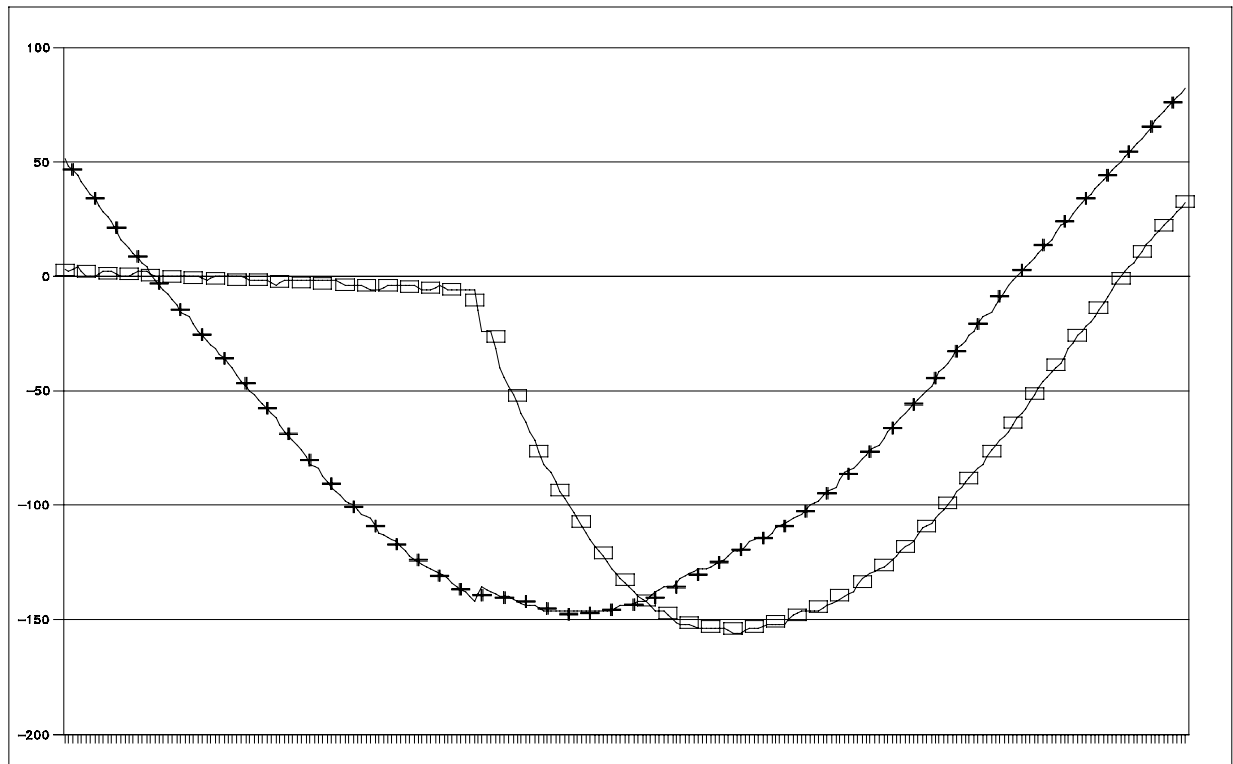


Figura 4. En línea continua curvas adquiridas por el osciloscopio. Marcada con rectángulos las muestras de corriente adquiridas por el registrador, y con cruces las de tensión. Escala: Tensión en V y corriente en A.

ii) A los efectos de estimar el error total del equipo se adquirieron tensiones y corrientes de amplitud 50% de los valores nominales ($100/(\sqrt{3*2}) V_{eff}$. y $2.5 A_{eff}$.), a partir de las cuáles se calculó el valor RMS. Este valor se comparó con los directamente medidos con un multímetro FLUKE 45; utilizándose para la medida de

la corriente un shunt. El error máximo del multímetro en la medida de tensión es 0.5% y el del conjunto multímetro - shunt en la medida de corriente: 1.5%.

El error máximo del registrador respecto al multímetro fue 4.1% para la tensión y 1.3% para la corriente.

5 Conclusiones

Como se desprende de los ensayos realizados hasta el momento se comprueba que el equipo construido cumple con las especificaciones exigidas por UTE, tanto en lo que se refiere a errores de medida como en aislaciones.

El desarrollo de un equipo de estas características fue posible en base al criterio de diseñar y construir solamente aquellos elementos específicos a la función que resultaron imposibles de adquirir en el mercado. Los esfuerzos se centraron en la creación de un producto de características únicas, ajustado a las necesidades específicas del usuario (UTE).

6 Agradecimientos

Fueron de gran importancia en el desarrollo de este trabajo los aportes brindados por los Ings. César Briozzo y Daniel Slomovitz, en lo relacionado con el diseño de los transformadores de medida; y por el Ing. Jorge Alonso en lo referente a las características de las señales a medir. Asimismo es de destacar la cooperación de los integrantes del Laboratorio de UTE en la realización de los ensayos de aislación e inmunidad a parásitos.

7 Referencias.

- 1.- "REGISTRADOR DE PERTURBACIONES PARA LA RED DE TRANSMISION - ESPECIFICACION TECNICA", UTE, 1990.
- 2.- "REGISTRADOR DE PERTURBACIONES: SOFTWARE", Reporte Interno, Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Montevideo, 1991.
- 3.- "REGISTRADOR DE PERTURBACIONES DE LA RED ELECTRICA", Omar Barreneche, Pablo Darscht, Gabriel Gómez Sena, Julio Pérez Acle; Anales del 2do. Seminario de Informática en el Uruguay; Montevideo, Julio 1991.
- 4.- "NOTAS DEL CURSO DE MEDIDAS Y PROTECCIONES ELECTRICAS", Jorge Alonso, Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Montevideo, Uruguay.