

# Implementación de un Sistema de Monitoreo Eléctrico de una Subestación Transformadora en una Planta Industrial

Juan Giró<sup>1,2</sup>, Julio Massa<sup>1</sup> y José Stuardi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Velez Sarsfield 1600, Córdoba

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería en Sistemas de Información, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, Maestro López esq. Cruz Roja Argentina, Córdoba

**Resumen.** Se presenta un sistema de monitoreo eléctrico del funcionamiento de una estación transformadora que fue diseñado, desarrollado e implementado para una importante empresa automotriz de la Ciudad de Córdoba y que actualmente se encuentra operando en forma normal. Se describen los requerimientos del usuario, la solución propuesta y las características de la implementación. Finalmente se describe el desempeño del sistema, se presentan algunos registros de las mediciones efectuadas y se enumeran los beneficios derivados de la utilización del sistema.

**Palabras Clave:** Sistemas Scada, Monitoreo de parámetros eléctricos.

## 1 Introducción

La eficiencia energética no es un concepto novedoso en la industria, pero ha cobrado en la actualidad significativa importancia debido a tres factores concurrentes: *i*) El creciente nivel de competitividad que debe enfrentar la industria, algo que se vio enormemente incrementado a raíz de la globalización de los mercados, *ii*) el fuerte aumento que viene experimentando el precio de la energía eléctrica y *iii*) la propia crisis energética, que condujo recientemente a operar en escenarios hasta hace poco no imaginados, como son la importante reducción en la disponibilidad de energía, los esquemas de cortes y la necesidad de disponer de generación propia.

Todo lo expuesto condujo a la necesidad de optimizar el consumo eléctrico en las plantas productivas. Una vez admitida esta necesidad, el primer paso es disponer de información confiable y actualizada sobre el funcionamiento del sistema eléctrico, para lo cual el monitoreo de sus parámetros desempeña un papel fundamental.

Al hablarse de monitoreo se está haciendo referencia a la medición regular y sistemática de parámetros característicos del suministro eléctrico y demanda de la planta, como son (por fase) la corriente, voltaje, potencia real y factor de potencia. Además, se miden la frecuencia, energía real y energía aparente.

Aquí es necesario reconocer a la tecnología como un aliado fundamental a la hora de implementar sistemas eficaces de monitoreo de parámetros eléctricos. En efecto, la disponibilidad de unidades de lecturas eléctricas de alto rendimiento, los dispositivos

convertidores entre diferentes tipos de redes, las propias redes de comunicaciones y la capacidad de los computadores modernos permiten hacer realidad sistemas de monitoreo que cubren el amplio espectro de parámetros eléctricos y operan en forma ininterrumpida todos los días del año.

Como consecuencia de lo expuesto, en torno al monitoreo eléctrico se ha desarrollado un importante ámbito de trabajo en el que convergen investigadores [1] [2][3], fabricantes de equipos de mediciones [4], desarrolladores de sistemas [5] y usuarios. Cabe aquí acotar que estos sistemas quedan encuadrados en lo que se denomina SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), solo que orientados a un tipo de monitoreo muy específico.

En este contexto es que se inscribe esta trabajo, que presenta un sistema de monitoreo que fue específicamente diseñado, desarrollado e implementado para una importante empresa automotriz de la Ciudad de Córdoba y que se encuentra operando en forma normal.

El resto de este documento se organiza de la siguiente manera. En la Sección 2 se describen las características de las estaciones transformadoras y se resumen los requerimientos planteados por la empresa que solicitó el sistema de monitoreo. Luego, en la Sección 3 se describe la solución propuesta, en la sección 4 las características de la implementación y en la sección 5 los resultados obtenidos. Finalmente, en la Sección 6 se presentan las conclusiones y posibles actividades futuras.

## **2 Especificación de Requerimientos**

### **2.1 Características de las Subestaciones a ser Monitoreadas**

La planta industrial donde se instaló el equipo dispone de dos subestaciones transformadoras (SET), que se encuentran entre sí a una distancia de 250 mts. La SET principal incluye una celda de media tensión de 13,2 KV y dos celdas de baja tensión de 380 y 415 V.

La segunda SET tiene una única celda de baja tensión de 380 V. Las cuatro celdas fueron equipadas con dispositivos digitales de medición de energía Powerlogic serie PM 800, modelo PM810 de Schneider Electric [6], que disponen de una puerta RS-485 y protocolo Modbus / J-BUS [7]. Si bien estas puertas están previstas para consultar y operar a los instrumentos en forma remota, las consultas eran realizadas en forma manual y de esa forma se registraba diariamente la energía consumida.

### **2.2 Requerimientos**

El Dpto. de Ingeniería de Planta de la empresa solicitó un sistema de monitoreo remoto de los parámetros eléctricos de ambas SET con las siguientes características:

- a) Consulta regular y sistemática del valor de las variables medidas por los dispositivos digitales de medición, con una periodicidad que pueda ser definida por el usuario, que

incluye los siguientes parámetros:

- Corriente (tres fases y neutro).
  - Voltaje (entre fases y medio).
  - Potencia real (por cada fase y total).
  - Factor de potencia (por cada fase y total).
  - Frecuencia.
  - Energía real.
  - Energía aparente.
- b) Almacenamiento regular de los registros de datos consultados en el “data center” de la empresa, que se encuentra en el edificio de dirección y administración, distante de las SET.
- c) Posibilidad de consultar los registros de datos de mediciones eléctricas a partir de la selección de la celda transformadora, parámetros y fecha. Migración a planilla Excel de los datos seleccionados a efectos de emitir reportes tabulados y distintos gráficos.
- d) Emisión de reportes mensuales con detalle del consumo diario de energía eléctrica a partir de la selección de la celda transformadora y período.
- e) Disponibilidad de una representación en tiempo “cuasi real” de actualización periódica que muestre la totalidad de los valores medidos en la oficina de Ingeniería.
- f) Disponibilidad de las opciones de consulta definidas en los puntos “c”, “d” y “e” desde una o más computadoras (PC) de la oficina de Ingeniería.
- g) Previsiones para la operación continua del sistema, las 24 hs del día todos los días de la semana. Éste debe operar en forma ininterrumpida debido a la necesidad de conocer las condiciones del suministro eléctrico durante la noche y fines de semana. Este registro es necesario para la evaluación de la calidad del suministro eléctrico y advertir cortes o caídas de tensión.

Esta última condición de operación ininterrumpida condujo a incorporar los siguientes requerimientos no funcionales:

- h) Fiabilidad o alta disponibilidad, lo que implica muy baja probabilidad de falla.
- i) Robustez o capacidad de recuperarse ante condiciones de operación no previstas.

### **3 Solución Propuesta**

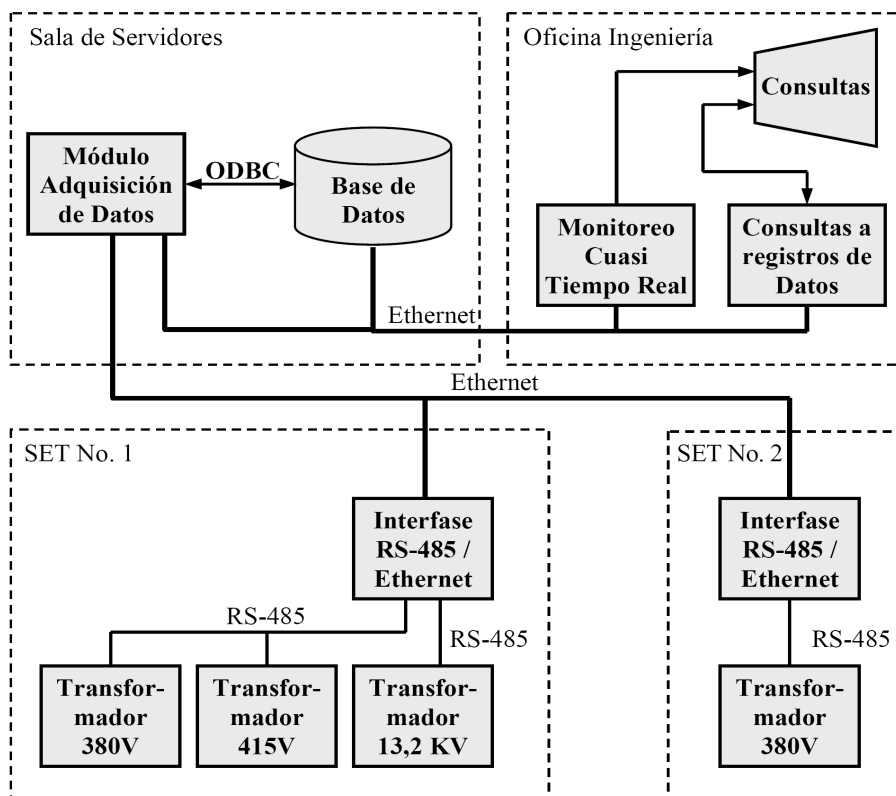
Para dar respuesta a los requerimientos enunciados se diseñó un sistema informático que incluye tres módulos o aplicaciones y una Base de Datos, con las siguientes características principales:

- a) Módulo de adquisición de datos con las siguientes tres funciones principales: *i*) Comunicación con los cuatro equipos Powerlogic PM 810 [6] a través de líneas RS-485 y protocolo J-Bus [7] a efectos de consultar regularmente los valores medidos. *ii*) Preparación de los registros de datos e inserción de los mismos en las tablas con la periodicidad requerida por el usuario, lo que es realizado con lenguaje SQL [8] a través de ODBC (Open Data Base Connectivity). Aquí cabe destacar que la utilización de ODBC asegura compatibilidad de la aplicación con

todas las Bases de Datos del mercado. *iii*) Preparación y transmisión de los registros destinados a la representación en tiempo cuasi real con un intervalo de muestreo de 1 segundo.

- b) Módulo destinado a la realización de consultas, búsquedas en las tablas de datos a través de Lenguaje SQL / ODBC, transferencia de los datos seleccionados a una tabla Excel y activación de la tabla Excel en pantalla.
- c) Módulo destinado a representar en pantalla información actualizada sobre los parámetros medidos, en una modalidad de tiempo cuasi real.
- d) Utilización de conversores de comunicaciones RS-485 a Ethernet con el fin de tener acceso remoto a los dispositivos digitales de medición Powerlogic PM 810. Se seleccionó para ello dos equipos Quatech Modelo DSE-400D [9] con dos puertos RS-232/RS-485 cada uno, a ser instalados uno en cada SET.
- e) Base de Datos para el almacenamiento de registros de mediciones de las cuatro celdas transformadoras, con estructura de tablas y claves de consulta acordes a los parámetros considerados y consultas previstas.

En la Figura 1 se representa un esquema del Sistema de Monitoreo antes descrito, en el que se muestran los cuatro sectores involucrados, que son: SET No. 1, SET No. 2, Sala de Servidores y Oficina de Ingeniería.



**Figura 1.** Esquema del Sistema de Monitoreo con sus Componentes Principales.

Se ha previsto que los tres módulos principales del sistema (Adquisición, Consulta y Tiempo Real) operen en forma independiente. Esto posibilita que solo esté activo el módulo de adquisición de datos a fin de alimentar con datos en forma ininterrumpida las tablas que corresponden a cada una de las cuatro celdas transformadoras. Los otros dos módulos pueden ser activados en forma optativa, según necesidad de consultas por parte del personal de Ingeniería.

### **3.1 Módulo de Adquisición de Datos**

Las exigencias de fiabilidad y robustez (puntos 2.1.h y 2.1.i) obligaron a un diseño y programación muy detallada, que se apoyó en soluciones clásicas y altamente confiables. Por estos mismos motivos se incorporó un registro de la actividad cumplida. Su finalidad fue disponer de testimonios que faciliten la búsqueda de las causas de eventuales fallas, tanto en las consultas a través de los equipos Quatech como en los accesos a la Base de Datos.

Las consultas de mediciones eléctricas fueron implementadas sobre el protocolo J.Bus mediante comandos de lectura de los contenidos de direcciones específicas de la memoria de los equipos Powerlogic PM 810. Estas direcciones están documentadas en el manual de referencia del PM 810 [6] y al arrancar el módulo las lee de una tabla de configuración juntamente con los parámetros de comunicación serial (Baudios, Bits de Datos, Stop Bits y paridad).

La fiabilidad de las comunicaciones con los PM 810 tiene los dos soportes siguientes: *i)* el protocolo J-Bus contempla un registro CRC que hace prácticamente imposible que no se advierta un error de comunicaciones y *ii)* se realiza un riguroso control de consistencia de los valores recibidos según sea el tipo del parámetro eléctrico solicitado. Cualquiera sea la condición de error detectada se vuelve a repetir la lectura y en caso de reiterarse la falla ésta es informada y se prosigue con la consulta a la siguiente dirección. Se dio mucha importancia a la detección de estos errores ya que es necesario salvaguardar la integridad de los datos históricos de las tablas evitando el almacenamiento en Base de Datos de información errónea o alterada.

Para la migración de registros a las tablas de la Base de Datos a través de comandos SQL se implementó una librería específica que opera directamente sobre las funciones de ODBC que están disponibles en la API de Windows. Esto permitió una transferencia de datos muy eficiente y un código de dimensiones muy reducidas. Esto último, el tamaño del módulo de adquisición de datos, fue también un factor considerado en el diseño ya que el mismo debe operar en un servidor compartiendo recursos con otras muchas aplicaciones. Se indica como referencia que el archivo ejecutable de este módulo, que incluye la interfaz gráfica y todas las librerías, ocupa 252 Kbytes. Para la programación del módulo de adquisición de datos se utilizó el lenguaje Delphi, que es una implementación visual y orientada a objetos del lenguaje Pascal.

### **3.2 Módulo de Representación de Lecturas en Tiempo Cuasi Real**

Este módulo tiene una ventana que muestra los valores medidos en las cuatro celdas transformadoras y se actualiza regularmente con un período de un segundo. La ventana indica la hora de la última medición representada y emite avisos de advertencia en caso de falta de comunicación u otro tipo de falla. Este módulo fue también programado en lenguaje Delphi y su archivo ejecutable tiene una dimensión de 376 Kbytes.

### 3.3 Módulo de Consultas

El módulo de consultas recibe los requerimientos del operador, implementa las consultas en la Base de Datos y transfiere los valores recibidos a una planilla Excel. Su programación fue realizada en Visual Basic utilizando los recursos del lenguaje para el acceso a las tablas de la Base de Datos y el archivo ejecutable ocupa 870 Kbytes.

## 4 Implementación del Sistema

En la Figura 1 se presentan los vínculos RS-485 entre los convertidores y los dispositivos de medición. En la SET No. 1 se optó por conectar las celdas transformadoras de baja tensión a una misma línea de comunicaciones, mientras que la celda transformadora de media tensión es conectada por separado a la segunda puerta disponible. La localización de los transformadores en el recinto de la SET condujo a este esquema de conexiones para facilitar el tendido de los cables de comunicaciones. En la SET No. 2 se establece un vínculo directo de comunicación y la segunda puerta de RS-485 queda disponible.

De acuerdo a lo previsto y para asegurar la operación ininterrumpida del módulo de adquisición de datos se lo instaló en un servidor en el Data Center de la empresa, que opera con suministro eléctrico respaldado por una UPS. En la Figura 2 se presenta la ventana normal de operación del módulo en dimensiones reales (150 x 50 mm). Se optó por una representación de dimensiones reducidas para poder compartir la pantalla del servidor con otras aplicaciones que operan en forma permanente y para ello se muestra la mínima información necesaria. Puede observarse que ocho botones de colores verde / rojo permiten una inmediata verificación de las condiciones de las comunicaciones con los equipos PM 810.

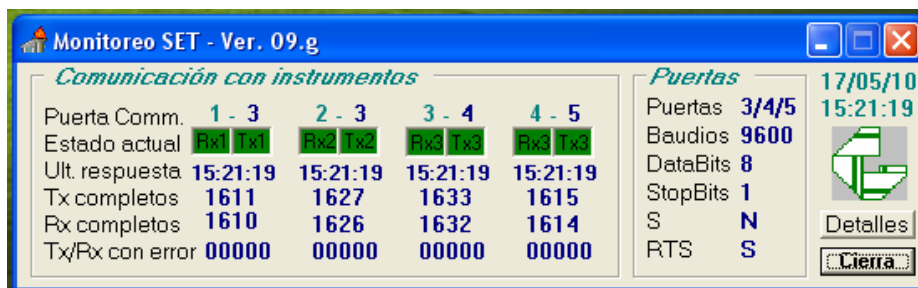


Figura 2. Ventana principal del módulo de adquisición de datos y control.

El botón “Detalles” que figura en el lado derecho permite desplegar una segunda ventana en la que se representan los últimos datos que van siendo recibidos de los equipos PM 810. Esta ventana se muestra en la Figura 3 y los datos están organizados en cuatro columnas que corresponden a cada celda de transformación. A la derecha, con fondo de color amarillo, se muestran las direcciones de memoria utilizadas y las lecturas obtenidas en cada una de ellas.

Cabe acotar que, por operar en un servidor, las dos ventanas del módulo de adquisición de datos son solo eventualmente consultadas por personal especializado para verificar la marcha normal del sistema.

Datos recibidos					Direccionamiento y valores
Parámetros medidos	Baja Tens. 380V	Baja Tens. 380V C	Baja Tens. 415V	Media Tension	
Corriente-Fase A	1348	943	1028	084	1 1099 : 1348
Corriente-Fase B	1413	578	1045	081	2 1100 : 1413
Corriente-Fase C	1360	688	984	082	3 1101 : 1360
Corriente-Neutro	347	000	000	000	4 1102 : 347
Voltaje A-B ....	394	402	433	3819	5 1119 : 394
Voltaje B-C ....	394	407	433	3855	6 1120 : 394
Voltaje C-A ....	393	403	433	3804	7 1121 : 393
Voltaje Medio ..	394	404	433	3826	8 1122 : 394
Potencia Real -A	297	098	256	618	9 1139 : 297
Potencia Real -B	311	012	256	602	10 1140 : 311
Potencia Real -C	298	084	242	600	11 1141 : 298
Potencia Real -T	906	195	754	1820	12 1142 : 906
Fact.Potencia -A	-0.967	-0.481	-0.988	-0.933	13 1159 : -0,967
Fact.Potencia -B	-0.966	-0.076	-0.978	-0.908	14 1160 : -0,966
Fact.Potencia -C	-0.964	-0.618	-0.980	-0.936	15 1161 : -0,964
Fact.Potencia -T	-0.966	-0.401	-0.982	-0.926	16 1162 : -0,966
Frecuencia .....	50.01	50.00	50.00	50.02	17 1179 : 50,01
Energía Real ...	21289959	429249	10465534	22524816	18 1699 : 9084
Energía Aparente	22751363	967916	11186697	23615058	
	6054029	526485	2042567	5061686	

Figura 3. Ventana ampliada que muestra los últimos datos recibidos de las celdas transformadoras.

La fisonomía de la ventana que despliega el módulo de representación en tiempo cuasi real se muestra en la Figura 4. Notar que es muy similar a la ventana ampliada del módulo anterior.

Monitoreo Remoto en Tiempo Real / V.09.c				
SUBESTACIONES TRANSFORMADORAS				17/05/10 14:17:28
Parámetros medidos	380 V SET Principal	380 V - SET Chapa	415 V - Pintura	13,2 KV - General
Corriente-Fase A [A]	1348	943	1028	084
Corriente-Fase B [A]	1413	578	1045	081
Corriente-Fase C [A]	1360	688	984	082
Corriente-Neutro [A]	347	000	000	000
Voltaje A-B .... [V]	394	402	433	3819
Voltaje B-C .... [V]	394	407	433	3855
Voltaje C-A .... [V]	393	403	433	3804
Voltaje Medio .. [V]	394	404	433	3826
Potencia Real -A [Kw]	297	098	256	618
Potencia Real -B [Kw]	311	012	256	602
Potencia Real -C [Kw]	298	084	242	600
Potencia Real -T [Kw]	906	195	754	1820
Fact.Potencia -A	-0.967	-0.481	-0.988	-0.933
Fact.Potencia -B	-0.966	-0.076	-0.978	-0.908
Fact.Potencia -C	-0.964	-0.618	-0.980	-0.936
Fact.Potencia -T	-0.966	-0.401	-0.982	-0.926
Frecuencia .... [Hz]	50.01	50.00	50.00	50.02
Energía Real ... [WH]	21289959	429249	10465534	22524816
Energía Aparente [VAH]	22751363	967916	11186697	23615058
Energía Reactiva [VAH]	6054029	526485	2042567	5061686

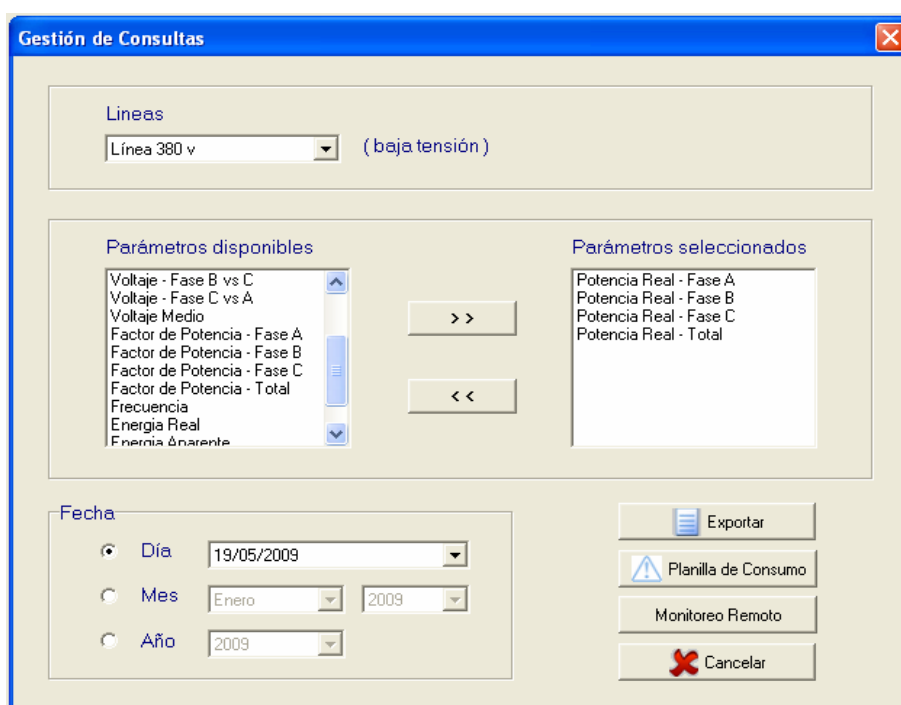
Comunicación: **NORMAL** Último acceso: 17/05/10 13:47:23

Registro de novedades Cierre

Figura 4. Ventana del módulo de representación en tiempo cuasi real.

Hay que tener presente que ambas ventanas (Figuras 3 y 4) están sobre pantallas de distintos computadores, en edificios diferentes, distantes 100 mts entre sí. En la ventana de tiempo real se incorporó además información relativa al vínculo de comunicaciones, la fecha y hora del último acceso a datos del servidor y un botón para acceder a un historial de la actividad cumplida.

En la Figura 5 se muestra la ventana principal del módulo de consulta. En esta ventana se despliegan todas las variables eléctricas que son monitoreadas para facilitar su selección por parte del operador. Esas variables deben ser identificadas con el mouse y confirmadas, pasando así al grupo de parámetros seleccionados (a la derecha). Luego el operador debe identificar la celda de transformación y la fecha de la consulta, para finalmente presionar el botón “Exportar” para enviar los datos consultados a una planilla Excel.

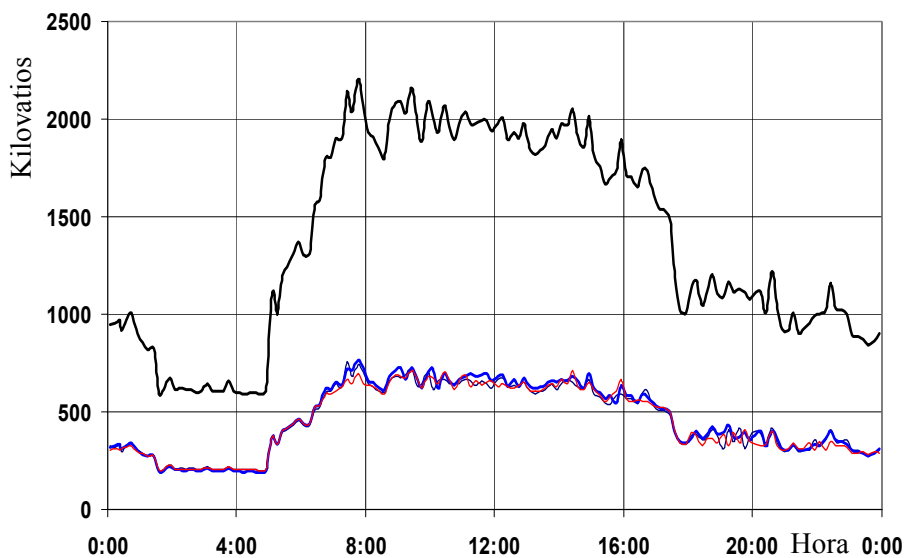


**Figura 5.** Ventana principal del módulo de consulta.

Una vez que los datos han sido incorporados a una planilla Excel se dispone de toda la potencialidad gráfica de esta aplicación para hacer las representaciones más convenientes. A título de ejemplo, en las Figuras 6, 7 y 8 se muestran curvas de registros históricos obtenidos con el sistema de monitoreo.

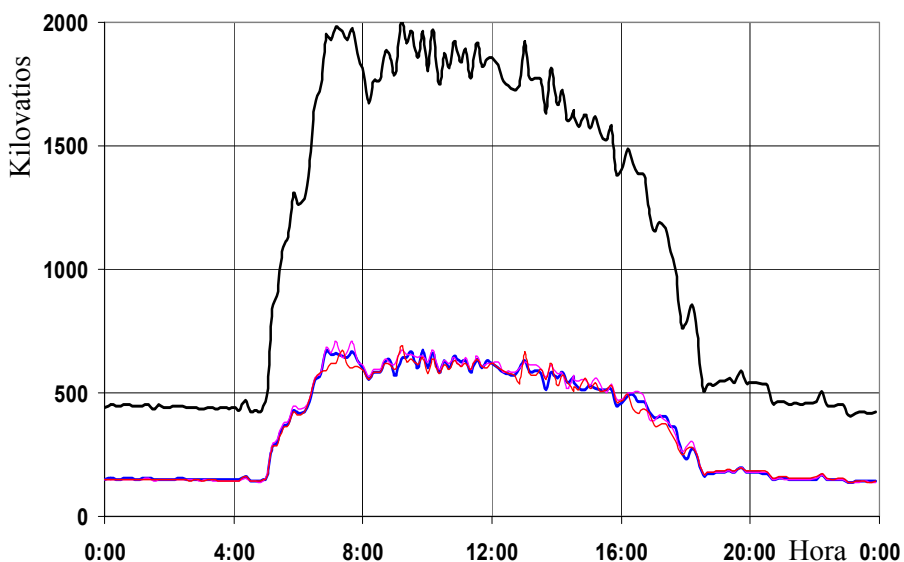
En el gráfico de la Figura 6 se representan las potencias por fase y la potencia total registradas a lo largo de 24 hs en las celda de transformación de media tensión (13,2 KV) en un día hábil (Jueves 13 de Mayo). Como puede observarse, la demanda de potencia delata el horario de actividad principal y es un perfil que en condiciones normales se repite, casi idéntico, los cinco días de la semana.





**Figura 6.** Evolución de la potencia total y por fase a lo largo de 24 hs – 13,2 KV.

En la Figura 7 se representan los mismos parámetros medidos en un día sábado, en este caso el 8 de Mayo. Puede observarse una menor demanda de potencia y una caída más pronunciada, alcanzando el nivel de demanda mínima en el entorno de las 17:30 hs. Nótese que, en ambos casos, la demanda de potencia comienza a crecer a partir de las cinco de la mañana y alcanza el valor máximo antes de las 8 hs.



**Figura 7.** Evolución de la potencia total y por fase a lo largo de 24 hs de un día sábado.

En la Figura 8 se muestran los registros de corriente (A) de las tres fases a lo largo de las 24 hs. Estos valores corresponden a la actividad del día 13 de Mayo. Notar la correlación con los valores del gráfico de la Figura 6.

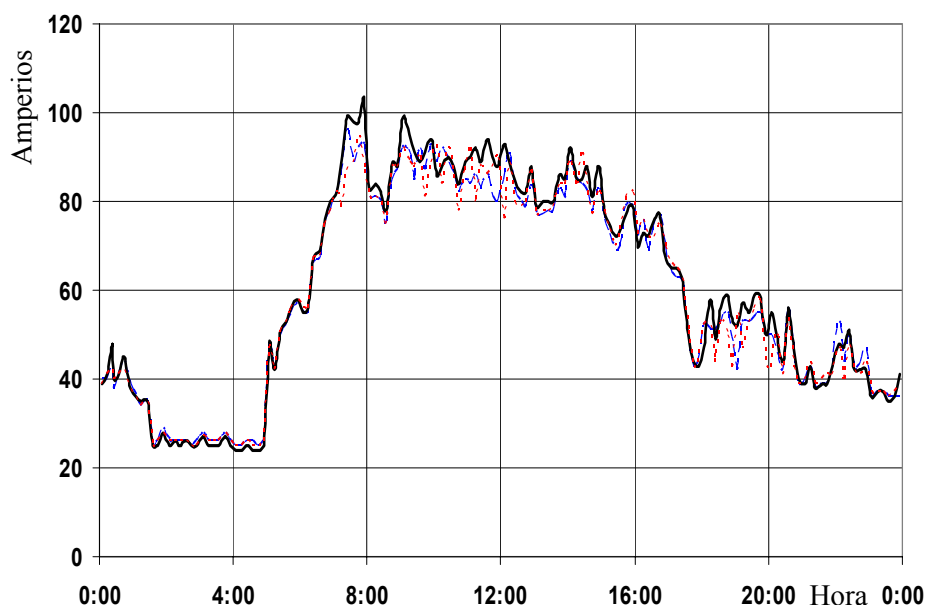


Figura 8. Consumo de corriente por fase a lo largo de 24 hs.

## 5 Resultados Obtenidos

El sistema implementado está en servicio desde Septiembre del 2007 monitoreando regularmente las cuatro celdas de transformación y almacenando registros de las variables en la Base de Datos con un periodo de 10', es decir 576 registros diarios. Cada uno de estos registros contiene 20 valores de parámetros eléctricos, lo que hace un total de 11.520 mediciones que se almacenan por día en la Base de Datos y que se incorporan a los registros históricos de demanda de energía eléctrica de la empresa.

La disponibilidad de esta información ha demostrado ser de suma utilidad, ya que ha permitido un seguimiento muy detallado de la demanda de energía y de los resultados de las acciones conducentes a su reducción. Con este fin la empresa ha trabajado sobre la iluminación de la planta, calefacción para la producción, calefacción de confort en las oficinas, actividad de compresores neumáticos, transformadores, etc, fijando políticas de reducción de energía y verificando su nivel de cumplimiento a través de los datos brindados por el sistema.

El sistema de monitoreo resultó particularmente útil durante la crisis energética del invierno del año 2009, donde el Ente Nacional Regulador de la Electricidad (ENRE) y

la empresa provincial proveedora de energía establecieron límites al consumo industrial en diversas franjas horarias y serias penalidades en los casos de incumplimiento.

También los registros históricos de consumo de energía eléctrica han demostrado su utilidad como valiosos testimonios en los casos de reclamos por deficiencias en la provisión de energía, como son los casos de bajas de tensión o cortes imprevistos.

## 6 Conclusiones y Actividad Futura

En este trabajo se describió un sistema de monitoreo eléctrico de una subestación transformadora que fue diseñado e implementado para cubrir los requerimientos de una empresa del área industrial. El sistema se apoyó en los recursos tecnológicos actualmente disponibles y en soluciones simples y ha operando correctamente desde su puesta en servicio hace más de dos años.

Tal como fue concebido, el almacenamiento de los registros de las mediciones eléctricas es realizado con un período fijo y preestablecido por el usuario, normalmente de 10<sup>7</sup>. Esto es suficiente para registros históricos en condiciones normales, pero el seguimiento de situaciones especiales requeriría de una reducción de este período durante breves intervalos de tiempo. La actividad futura estará destinada a dotar al sistema de la capacidad incrementar la frecuencia de monitoreo en forma automática en caso de detectarse (también automáticamente) una anomalía.

## Referencias

1. Bi, Y., Zhao, J., Zhang, D.: Research on Power Communication Network and Power Quality Monitoring Using OPNET. ICIEA 2007, Proceedings of the Second IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (2007)
2. Heronaldo de Sousa, A., Adami, V., do Prado, A.: Monitoring, Parameterization and Supervision of Industrial Equipments with Handheld Computers Over Modbus. IEEE ISIE 2006, Montreal, Quebec, Canada (2006)
3. Chandler, T.: The Technology Development of Automatic Metering and Monitoring Systems. Power Engineering Conference, pp. 1--147, IEEE (2005)
4. Power Logic PM800 Series, Compact Power, Energy and Power Quality Meters. Square D, Schneider Electric - North American Operating Division, Document # 3000BR0710 (2007)
5. Wenhui, Q., Zhinkun, L.: Sistema Inteligente de Monitoreo de Voltaje para Estación Transformadora de 220KV. Raien Ingeniería y Sistemas, Buenos Aires, Argentina (2009)
6. Power Meter PM 810: Referente Manual. Schneider Electric, Power Monitoring and Control. Document 63230-500-201A2 (2005)
7. Modbus Network Guide: Schneider Electric SA, Merlin Gerin (2000)
8. Mendelzon, A., Ale, J.: Introducción a las Bases de Datos Relacionales. Ed. Pearson (2000)
9. Dual-Port Multi-Interface (RS-232/422/485) Ethernet Serial Device Server, Model DSE-410D. Quatech, Inc. Document Number: 940-0186-100 (2003)