

## ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE SERVICIO Y PRODUCTO EN UN SISTEMA ELÉCTRICO CONECTADO A UN PARQUE EÓLICO

di Prátula, Horacio Raúl<sup>1</sup>, Bocero, Rodolfo<sup>2</sup>

† Universidad Tecnológica Nacional Facultad Reg. Bahía Blanca, Grupo GESE FRBB, E Mail: hrdiprat@bblanca.com.ar  
E Mail: rbocero@bblanca.com.ar

**RESUMEN:** Este trabajo analiza la calidad de servicio y producto de un sistema cuya red eléctrica, de baja potencia de cortocircuito, se encuentra conectada a través de una Subestación Transformadora al Sistema interconectado Nacional e intercambia energía con un parque eólico. La red eléctrica comprende 500 km de líneas rurales, la zona Urbana y el parque eólico. Se estudiaron los fenómenos de cortes de tensión (calidad de servicio), armónicas, flickeo, interrupción de voltaje (calidad de producto) y factor de potencia, teóricamente y por medición con analizadores de redes. Las mediciones se efectuaron antes y después de la conexión del parque eólico a la red eléctrica y también con y sin compensación del factor de potencia. El análisis permite establecer pautas de cálculo e investigación en casos de interacción entre red eléctrica y parque eólico en lo referente a calidad de servicio y producto.

**Palabras clave:** calidad de servicio, calidad de producto – parque eólico.

### INTRODUCCION

La ley 23395 (Provincia de Buenos Aires publicada en el boletín oficial del día 14 de Julio de 1997) y la Ley 11769 del marco regulatorio eléctrico de la Provincia de Buenos Aires con su reglamentación establecen las normas de calidad de servicio público y las sanciones por su incumplimiento (sub-anexo D).

Como calidad de servicio se entiende “*La frecuencia de interrupciones (cantidad de veces en un período determinado que se interrumpe el suministro a un usuario) y la duración total de la interrupción (tiempo total sin suministro en un período determinado)*” y como calidad de producto técnico suministrado se controlarán “*perturbaciones y el nivel de tensión*” “*Las perturbaciones que se controlarán son las variaciones rápidas de tensión (flicker), las caídas lentas de tensión y las armónicas*”.

Los cortes de tensión (incluidos microcortes) producen la detención de los parques eólicos con conexión a la red eléctrica por lo que los aerogeneradores se detendrán mediante un frenado de emergencia produciendo un desgaste prematuro del sistema de frenado y un compromiso estructural ante las vibraciones producido por esta situación. La dependencia de estos aerogeneradores de la red eléctrica es total dado su requerimiento de energía reactiva para su excitación. La influencia del parque eólico sobre la calidad de servicio es nula dado que su accionar no provoca faltas de tensión aunque sí es afectado por las mismas. Por lo tanto enfocaremos nuestra atención sobre la calidad de producto y el factor de potencia.

En las secciones siguientes se presentarán datos obtenidos mediante un analizador de redes utilizado en la SE Transformadora conexiona el sistema eléctrico rural y Urbano incluyendo el Parque Eólico con la Red eléctrica Nacional (Fig. 1)(di Prátula, H.R. - 1999) y tres equipos analizadores de calidad utilizados en forma rotativa en el sistema Urbano-Rural de la Cooperativa Eléctrica y de Servicios Mayor Buratovich Ltda. El enfoque dado a la publicación ha requerido del análisis de las leyes, decretos y reglamentaciones vigentes en la Provincia de Bs.As. lugar de asentamiento del Parque eólico.

El análisis de los aspectos teóricos y conceptuales de la calidad de producto ha requerido la consulta de diversas publicaciones obtenidas de la web y de revistas como El manual de Sica (2001), los artículos de la Union of the Electricity Industry EUROELECTRIC (J.Gutierrez Iglesias, G. Bartak, 2002), el artículo técnico de Schneider (Philippe Ferracci, 2001) y los artículos de The Power Quality Group (2000). Para el análisis de flicker, armónicas y modificaciones en el intercambio de energía activa y reactiva con la red eléctrica (afecta el factor de potencia), se requirió trabajos como los artículos de Cutler Hammer sobre protección y acondicionamiento de la energía, Circutor (J. Balcells, 2004) que trata el tema relacionado a la Energía eólica específicamente y Schneider (Wierda René, 1995) que especifica coeficientes y datos sobre el flicker así como las consultas efectuadas a Danish Wind Industry Association para el tratamiento de armónicas se utilizó un trabajo publicado por Schneider (Christian COLLOMBET, Jean-Marc LUPIN, Jacques SCHONEK, (2000)). Los gráficos y tablas incorporadas al trabajo corresponden a mediciones efectuadas sobre el sistema con equipos propios extendidos en el tiempo durante el periodo 1995-2005.

<sup>1</sup> Director del Grupo GESE FRBB – Profesor Asociado

<sup>2</sup> Investigador del Grupo GESE FRBB

La metodología de trabajo consistió en la toma de datos semanales durante el periodo mencionado en el párrafo anterior dividido en tres etapas: antes y después (sin y con compensación del factor de potencia) de la colocación del parque eólico. El equipo analizador de redes principal se colocó en el nodo de alimentación a la red eléctrica local (SE 33/13.2 kV) y los equipos analizadores de calidad de servicio y producto en forma rotativa en el sector Urbano, suburbano y rural.

## SEGUIMIENTO DEL CÁLCULO Y LA INVESTIGACIÓN

### Etapa previa a la colocación del parque eólico

En la etapa previa a la colocación del parque eólico se realizaron cálculos teóricos orientados a verificar la posibilidad de perturbaciones producidas por el arranque de los aerogeneradores y la variación de los vientos con una modificación abrupta de la energía activa y reactiva intercambiada con la red eléctrica por el parque eólico. El valor de tensión en el nodo según la estimación teórica durante el proceso de arranque de uno de los aerogeneradores sería del 85% de  $V_n$  durante 100 mseg mientras que el intercambio de energía activa y reactiva en marcha y condiciones nominales sería  $S_{aerog} = -505 + j211$ .

El estudio nos muestra que la tensión nodal no será inferior a 13.113 [kV] (99.34%) si la tensión de la red fuera la nominal y la potencia en el nodo de los aerogeneradores indicará con su signo negativo sobre la parte real y positivo sobre la parte imaginaria que el aerogenerador entrega energía activa y consume energía reactiva. El análisis de las armónicas de tensión sin compensación y antes de la colocación de los equipos aerogeneradores pueden observarse en la Figura 1 mostrarían una componente de armónica 5 preponderante y las armónicas 3 y 7 menos importante. La forma de onda se encuentra afectada fundamentalmente por la existencia de una potencia instalada rural de transformadores con baja carga. Estos valores fueron corroborados por mediciones efectuadas antes de la colocación de los equipos generadores en el nodo (27/11/96).

Los fenómenos de Cortocircuito en la zona rural producían SAG de tensión y sobrecorriente. La Figura 2 muestra una falla de sobrecorriente por cortocircuito bifásico lejano a Subestación que provoca un SAG de tensión en las fases A y B, mientras que la Figura 3 muestra un cortocircuito monofásico cercano a Subestación que provoca un SAG de tensión en la fase B. No se efectuaron mediciones ni se detectaron en ese periodo fenómenos de variación rápida de tensión en el nodo conocido como flicker.

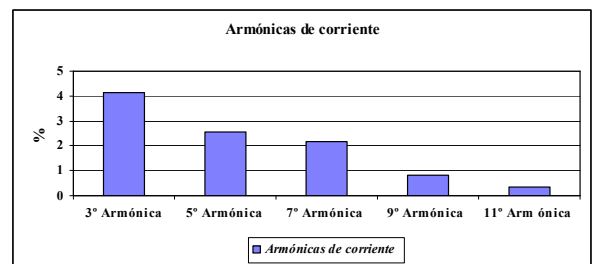
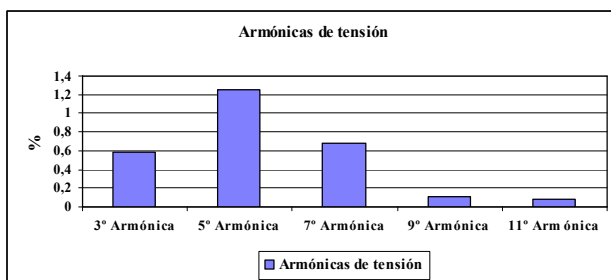


Figura 1a: Armónica de tensión (THDv = 1.59)

Figura 1b: Armónicas de corriente (THDi = 5.45)

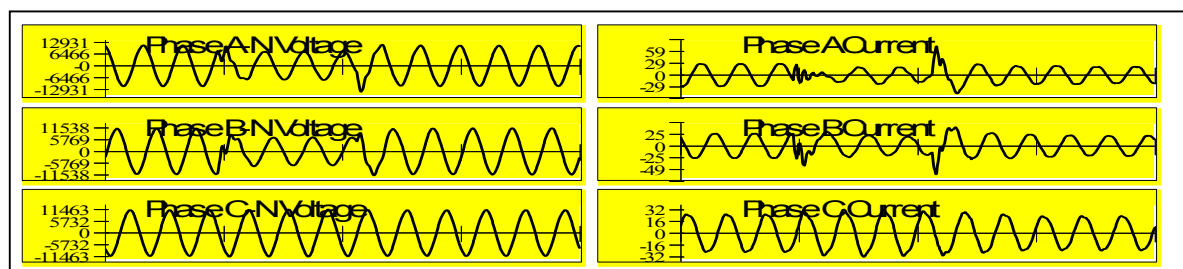


Figura 2: Falla en zona rural (cortocircuito bifásico) lejano al nodo que afectó la tensión (fases A y B) – 12/03/97

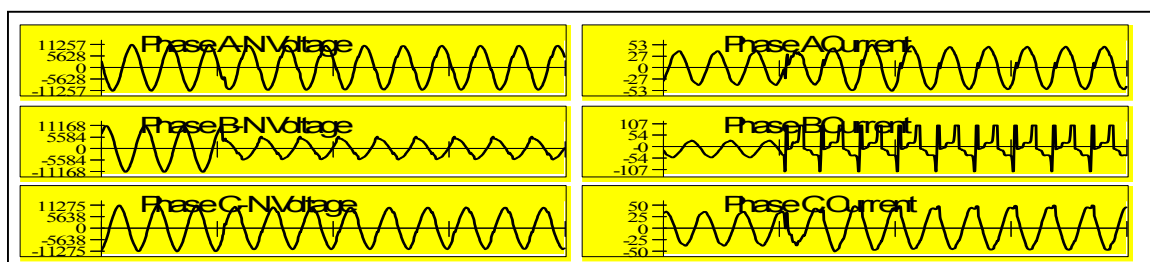


Figura 3: Falla en zona rural (cortocircuito monofásico) cercano al nodo que afectó la tensión (fase B) – 11/03/97

Se efectuaron mediciones del factor de potencia, la tensión, la potencia activa y la reactiva existente en el nodo ya que se preveía un importante intercambio de energía activa y reactiva con la red. La figura 4 exhibe la potencia reactiva positiva y la activa negativa (convenciones del equipo de medición (segundo cuadrante)) para un factor de potencia en retraso (inductivo) durante un día (06/10/97).

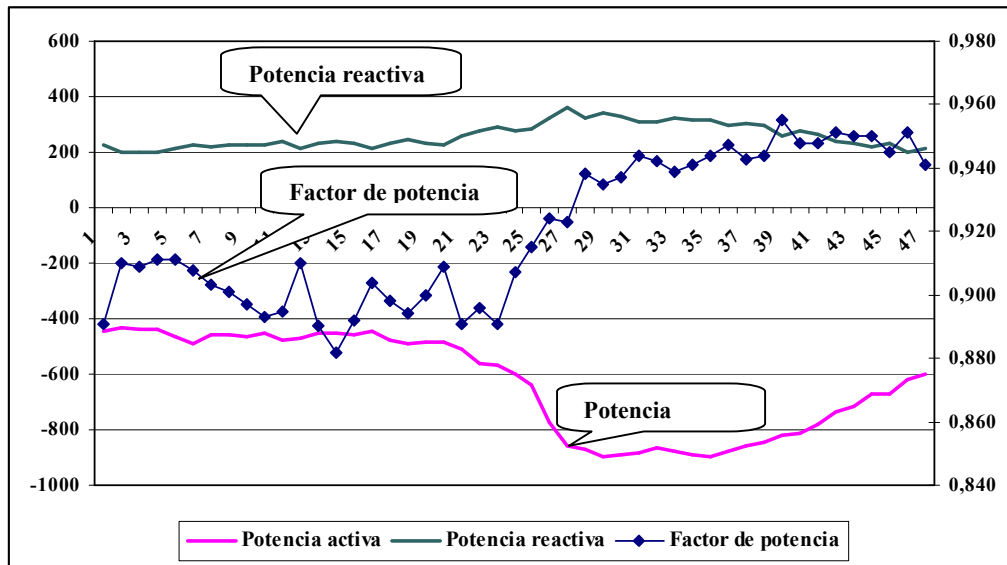


Figura 4: Gráfico que exhibe: Factor de potencia inductivo entre 0.84 y 0.98, potencia reactiva y activa entrando al nodo.

Segunda etapa: Parque eólico conectado antes de la colocación de nuevos capacitores

Podemos resumir el análisis del comportamiento de las variables que afectan la calidad de servicio del siguiente modo:

1. La magnitud de la tensión presentó una disminución menor al 1% respecto de la original.
2. La potencia reactiva se incrementó levemente (los aerogeneradores se hallan compensados).
3. La potencia activa presenta valores negativos y positivos lo que indica que durante algunos lapsos de tiempo la energía es entregada a la red (Figura 5).
4. El factor de potencia presenta valores cambiantes, esto se debe a que por momentos la energía activa cambia de signo (Figura 5).
5. Las armónicas de tensión incrementaron su valor anterior (THDv = 1.59) un 81.76% (THDv = 2.89) (Figura 6).
6. Las armónicas de corriente incrementaron su valor anterior (THDi = 5.45) un 32.3% (THDi = 7.21) (Figura 6).

Las modificaciones del factor de potencia en el nodo obedecen al intercambio de energía activa y no a un aumento importante de la energía reactiva tomada por el sistema. Este inconveniente es importante al considerar el sistema comercial ya que el problema es que se compra menos energía activa y se mantiene la necesidad de energía reactiva. La modificación de los contenidos de armónicas tanto en tensión como corriente (Figura 6) no puede obedecer al cambio de carga (cargas no lineales), por lo que el problema se debe a la mayor incidencia de la energía reactiva (transformadores rurales) con gran contenido de armónicas, especialmente la quinta (Ecuación 1).

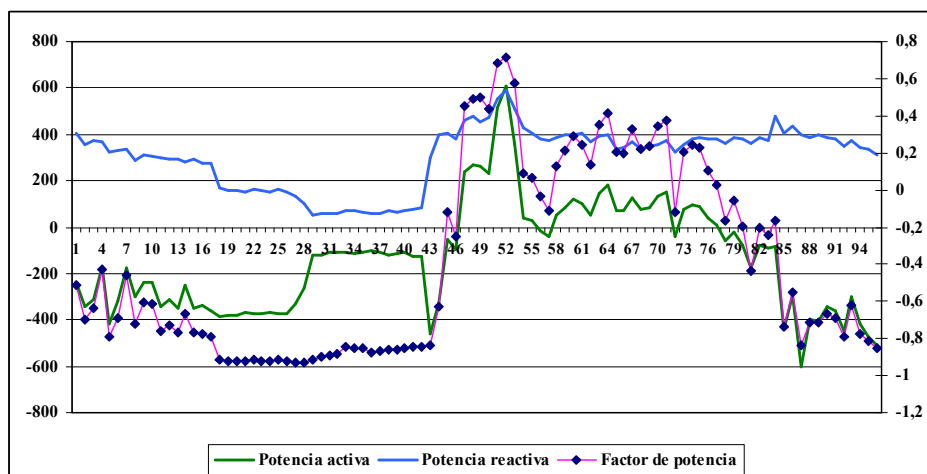


Figura 5: Gráfico que exhibe el comportamiento del factor de potencia, potencia activa y reactiva en el nodo.

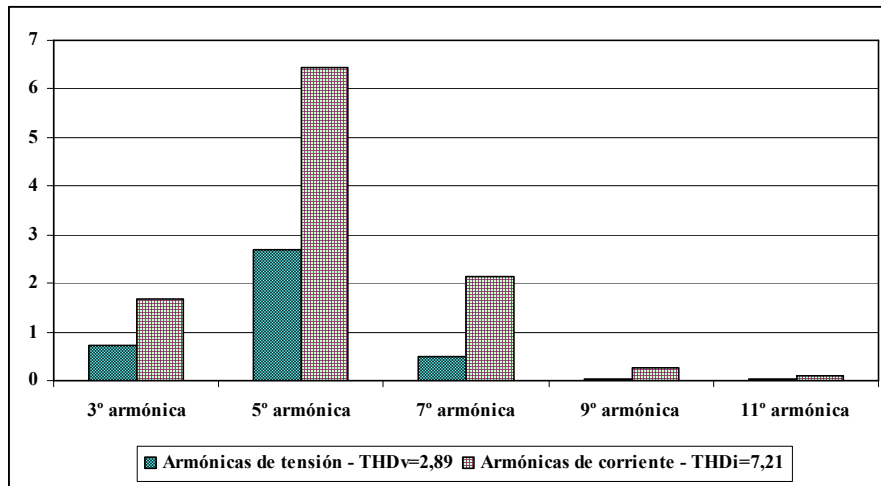


Figura 6: Armónicas de tensión y corriente. Etapa posterior a la colocación del parque eólico sin aumento de compensación.

El factor de amplificación es:

$$FA = \sqrt{\frac{Q \times P_{cc}}{P}} \quad (1)$$

Como se observa el factor de amplificación depende del cociente entre Q y P siendo Pcc la potencia de cortocircuito de la red en el lugar. Debe disminuirse el FA como forma de mejorar la situación. No se observó un incremento de componentes de frecuencia del orden de 10 Hz en la tensión asociado al flicker.

Tercera etapa: Parque eólico conectado después de la colocación de nuevos capacitores

En esta etapa, el análisis se extendió a los microcortes y fallas no atribuibles a la generación eólica debido a que las mismas afectan el parque eólico por salidas de servicio con la utilización de los frenos de emergencia (se produjo un desgaste excesivo de los mismos). La colocación de los capacitares corrigió el factor de potencia pero incrementó el problema de armónicas en tensión y corriente así como se notó la aparición de flicker.

La Figura 7 nos muestra las fluctuaciones del factor de potencia entre inductivo (valor negativo) y capacitivo (valor positivo) mientras que la potencia activa muestra el intercambio de energía activa con la red (cambio de signo) y la potencia reactiva también cambia de signo.

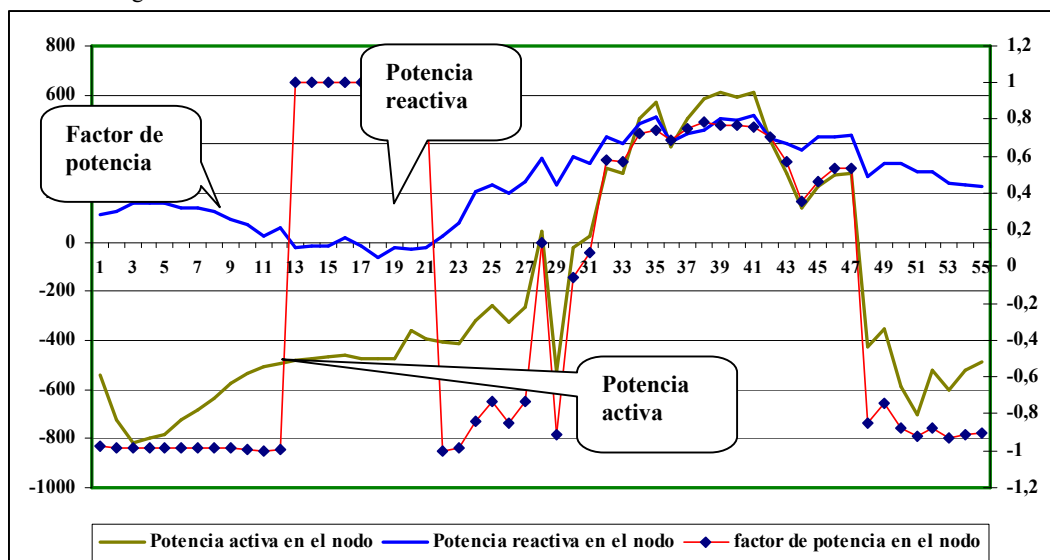


Figura 7: Tercera etapa: con compensación del factor de potencia (fluctúa entre -0.7 y 0.57), potencia activa y Reactiva.

En estos casos es posible que el factor de potencia cambie de signo debido al cambio de signo de la potencia activa o de la reactiva. Si ambos muestran el mismo signo (positivo o negativo) el factor de potencia es capacitivo (valor positivo). El análisis de textos relacionados al tema (Christian COLLOMBET, Jean-Marc LUPIN, Jacques SCHONEK, (2000)) permitió determinar que la elección de compensar o compensar y filtrar en este sistema estaba en el límite y su costo era

elevado. Las condiciones para una potencia  $S_n > 2$  MVA (suma de las potencias de los transformadores) es que  $G_h \leq S_{cc}/120$  siendo  $S_{cc}$  la potencia de cortocircuito en el nodo de alimentación.

La Figura 8 exhibe las armónicas para esta etapa dónde se observa que el valor  $THD_v = 3.34$  con un incremento de 110% sobre el inicial y de  $THD_i = 12.87$  con un incremento del 136% sobre el valor original.

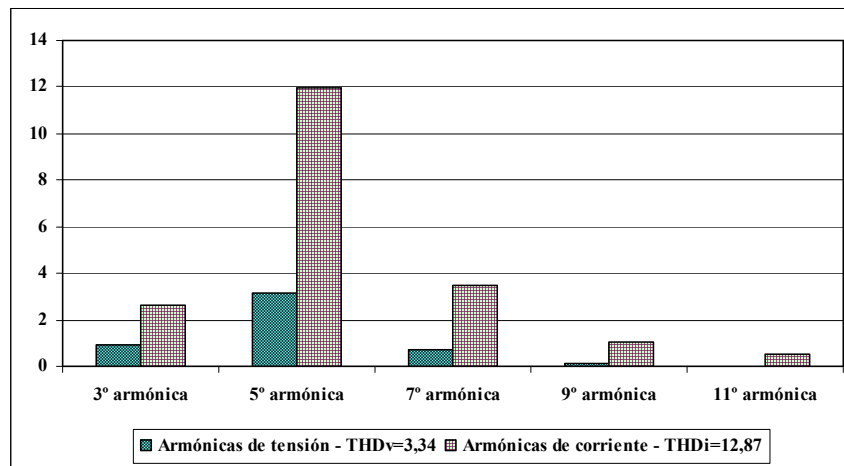


Figura:8 Armónicos de tensión y corriente medidos con el sistema compensado.

Las mediciones de calidad de servicio en la localidad muestran el aumento de las armónicas y un pequeño fenómeno de flicker ( $0.07 \leq flicker \leq 0.2$ ) que inicialmente no se presentaba. El aumento de las armónicas de tensión y corriente se deben al factor de amplificación (FA) que es afectado por la compensación fija. La aparición de algunos fenómenos de flicker pueden asociarse a la existencia de mayor contenido de armónicas en las variables eléctricas (tensión y corriente) y no a la existencia del parque eólico. Dado que la potencia de cortocircuito del sistema es mayor ( $S_{cc}$  (26 MVA)  $\gg$  Pinstalada (1.2 MVA)) que la potencia instalada en generación eólica y considerando que al superar las 20 veces esa diferencia el fenómeno de variación de tensión por variación del viento no se percibe. En ese sentido, se hicieron ensayos arrancando y deteniendo un aerogenerador súbitamente no siendo la incidencia sobre el nodo tan importante como lo marca el cálculo inicial.

Sin embargo el número de eventos atribuibles a la red eléctrica aguas arriba si tuvo una importante incidencia sobre el comportamiento del parque eólico. Se realizaron estadísticas de tipos de fallas y detenciones del parque en un periodo de tiempo lo que muestra el inconveniente que ha sufrido el parque eólico por problemas que no están contemplados en las normas vigentes de calidad de servicio. Los resultados se observan en la Tabla 1

Tipo de fallas	SAG %	Sobre frecuencia %	SWELL %	Sobrevoltaje %
	48	1	2	49
Detención de los equipos	Total de fallas		Paradas manuales	Fallas del sistema
	Molino 1	187	21	166
	Molino 2	165	18	147

Tabla 1: Resultados estadístico de fallas durante un periodo de tiempo que marca una tendencia.

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La tensión no mostró una importante variación, la potencia activa indicó con su signo el intercambio de energía activa entre el parque eólico y la red eléctrica y la potencia reactiva mantuvo el signo incrementándose hasta la colocación de los capacitores para corregir el factor de potencia, pero el exceso de compensación (fija) trajo aparejado inconvenientes en el nodo, como ser un leve aumento de tensión y el incremento de la deformación de onda.

El bajo factor de potencia ocurre porque ingresa menos energía activa y se mantiene la toma de energía reactiva mientras que las armónicas se ven incentivadas porque el valor del factor de amplificación fue afectado por la compensación (colocación de capacitores) para cumplir con los valores estipulados por ley. La tabla 2 exhibe la comparación de la deformación de onda antes, durante y después de la compensación.

## CONCLUSIONES.

Los resultados muestran los siguientes aspectos:

1. La tensión no mostró una variación (en magnitud) importante debido a las fluctuaciones en la potencia de salida del parque (variación del viento).
2. La energía activa tuvo una variación importante ya que por periodos el parque eólico entregó energía a la red.
3. La energía reactiva no mostró una variación significativa.

4. El fenómeno de armónicas en el sistema se vio incrementado debido a la modificación importante del factor de amplificación, en especial después de la compensación.
5. El fenómeno de flicker se incrementó levemente sin llegar a superar valores que afecten la calidad de producto.
6. Los fenómenos de microcortes (no contemplados como falta de calidad de producto en las reglamentaciones vigentes) aguas arriba perturbaron el buen funcionamiento del parque eólico.
7. El elemento ha corregir para subsanar los inconvenientes apuntados pasa por reducir el factor de amplificación o compensar filtrando.
8. Dado que la 5° armónica es la de mayor importancia debe reducirse la impedancia para esa armónica (resonancia) (J. Balcells, 2004).

Otra forma de solucionar este inconveniente pasa por reducir la compensación considerando que el valor bajo de factor de potencia se debe a la menor energía activa comprada y no al aumento de la energía reactiva entrante.

## REFERENCIAS

### Manuales:

**Manual de Sica** – “La calidad de la energía” - [http://sn00253ar/portal/Manual\\_pq/Home/manual.htm](http://sn00253ar/portal/Manual_pq/Home/manual.htm) - 2001

### Artículo de revista:

**J. Balcells** Profesor titular del Departamento de Ingeniería Electrónica de la UPC y asesor técnico de CIRCUTOR S.A.. - Artículo técnico de la revista de difusión de CIRCUTOR “compensación de la energía reactiva y filtrado de armónicas en parques eólicos” extraído de: [http://www.tecnicsuport.com/enerenov/taulesconsulta/reactiva\\_eolicos/articulo1.htm](http://www.tecnicsuport.com/enerenov/taulesconsulta/reactiva_eolicos/articulo1.htm) (2004)

**Dr. W. Mack Grady, ENS346, 471-5231, grady@mail.utexas.edu, /www.ece.utexas.edu/~grady/** - “Harmonics and Power System Analysis Notes” - EE379K and EE394, Fall 2001 - Unique Numbers 15515 and 15710, respectively.

### Artículos en la Web:

**Christian COLLOMBET, Jean-Marc LUPIN, Jacques SCHONEK** – “Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento” – Schneider – 2000.

**Cutler-Hammer** – “Protección de transientes y Acondicionamiento de energía”

**Danish Wind Industry Association** – “La red eléctrica” [www.windpower.org](http://www.windpower.org) –

**J. Gutierrez Iglesias (ES) and G. Bartak (AT)** - Union of the Electricity Industry - EURELECTRIC, “Power Quality” - <http://www.eurelectric.org> -

**Philippe FERRACCI** – Diplomado por la Escuela Superior de Electricidad en 1991 - Artículo técnico de Schneider electric (<http://www.schneiderelectric.es>) “La calidad de la energía eléctrica”. Schneider – 2001.

**The Power Quality Group** - Los Angeles Department of water and Power - “FUNDAMENTALS OF POWER QUALITY” <http://www.ladwp.com/powrqual/pqhome.htm>, 2000.

**Wierda René** Diplomado en 1989 como Ingeniero en Tecnología Eléctrica y Conducción de Redes en la Universidad Técnica de Delft en los Países Bajos- “Flicker o parpadeo de las fuentes luminosas” - Schneider – 1995.

### Publicación en Congreso:

**Di Prátula, Horacio R.** “Caracterización neuronal de fallas de un sistema compuesto por parque eólico y red eléctrica de media tensión” expuesto en el Congreso VIII RPIC –n° 164 -1999.

### Ley:

Provincia de Bs.As. n° 23395 - <http://www.gob.gba.gov.ar/>

### Decreto:

Provincia de Bs.As. 1208/97 - <http://www.gob.gba.gov.ar/>

### Reglamentación:

Ley 11769 - Marco regulatorio eléctrico de la Provincia de Buenos Aires - Decreto Reglamentario N° 2479/04,

**ABSTRACT:** This work analyzes the service and product quality of a system which electric network, of low power short-circuits, is connected through a Transformer Substation to the National interconnected System and exchanges energy with a wind park. The electric network has 500 km of rural lines, the urban zone and the wind park. Voltage cuts (service quality), harmonics, flicker, voltage interruptions (product quality) and power factor were investigated theoretically and by measurement with network analyzers. The measurement were done before and after the connection of the wind park to the electric network and also with and without compensation of the power factor. The investigation allows establishing patterns of calculation and investigation in interaction cases between electric network and wind park referring to the quality service and product.

**Keywords:** power quality, service quality, product quality, wind park