

**Los objetivos que se persiguen en este ensayo son:**

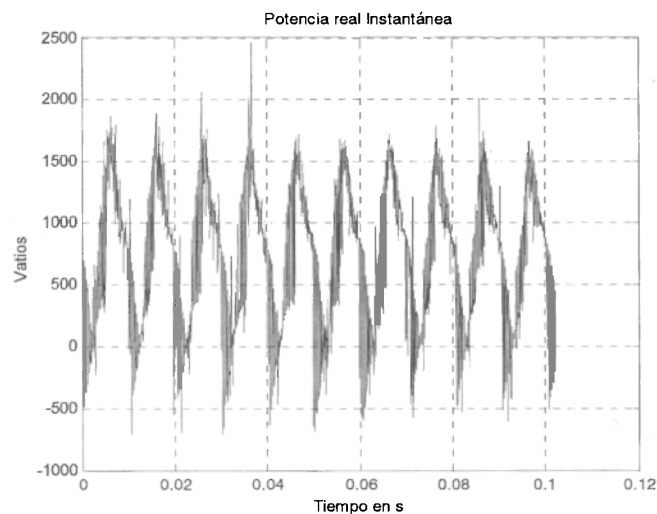
- a) Validar el modelo de línea de transmisión (JMarti) utilizado en el sistema de 13 barras del IEEE estudiado en el capítulo 6.
- b) Verificar de manera experimental los resultados alcanzados en el caso 10 expuesto en el capítulo 5.

Los resultados obtenidos al aplicar la técnica pqAT se dan en las figuras. 7.28 a 7.36.

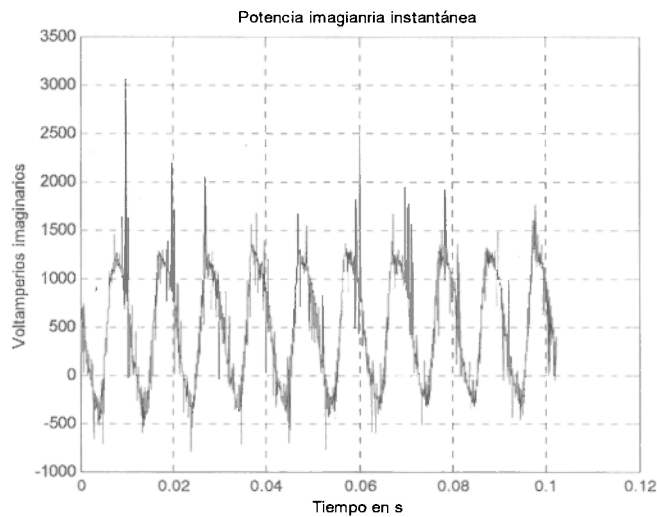
La potencia se midió utilizando la tabla 7.5 para el análisis de multirresolución.

En estos resultados se muestra concordancia con los resultados que arrojaron las simulaciones presentadas en el capítulo 5.

Las potencias real e imaginaria se muestran en la figura. 7.28 y 7.29 respectivamente.



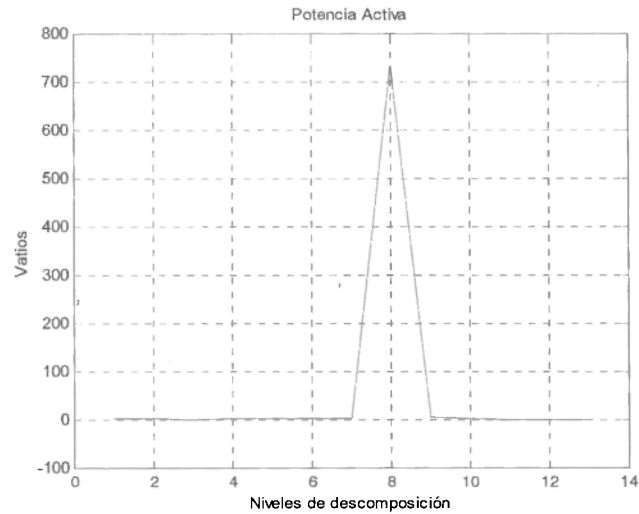
**Figura 7.28: Ensayo 2, Interacción Variador de velocidad – Cable-Motor. Potencia real.**



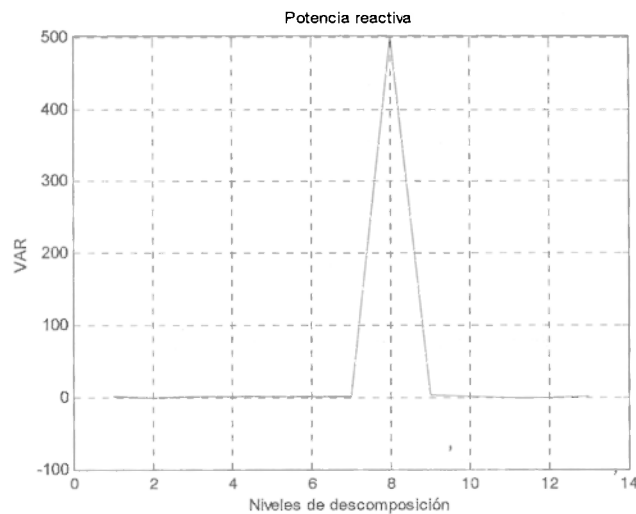
**Figura 7.29: Ensayo 2, Interacción Variador de velocidad – Cable-Motor. Potencia imaginaria.**

Los impulsos que se observan obedecen al frente de onda viajera que ha procurado captar la señal de tensión. Está reportado en [6] que la responsabilidad de este tipo de eventos se atribuye a la velocidad de conmutación de los interruptores y la longitud del cable. También en la bibliografía consultada [6,7] se muestran dos figuras en relación con la longitud y la velocidad de conmutación, que permiten concluir que de acuerdo a la tecnología elegida para la conmutación de la estructura del convertidor de c.c./c.a. se puede ir de una longitud máxima de 180m a una de no más de 5m (la primera para tiristores rápidos y la segunda para MOS de potencia). La importancia de esta aplicación radica primordialmente en la utilización que de ella se hace en la industria petrolera (el variador de velocidad está en la superficie mientras que la máquina de inducción y el equipo de bombeo están situados algunos kilómetros debajo, en la profundidad del pozo).

Medir la potencia activa y reactivas en estas condiciones aplicando la técnica pqAT dió los resultados que se presentan en las figura 7.30 y 7.31.



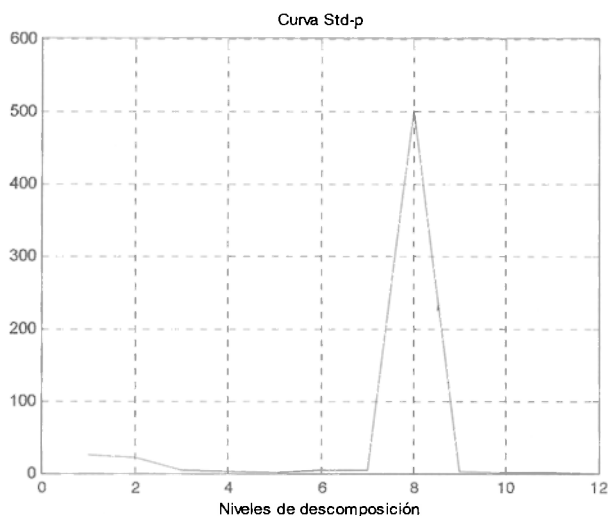
**Figura 7.30: Ensayo 2, interacción Variador de velocidad – Cable-Motor. Potencia activa determinada a través de pqAT.**



**Figura 7.31: Ensayo 2, interacción Variador de velocidad – Cable-Motor. Potencia reactiva determinada a través de pqAT.**

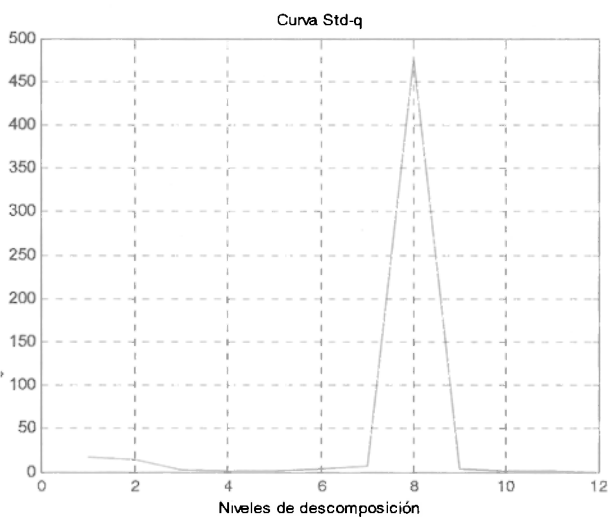
Los niveles de potencia activa y reactiva poliarmónica son mínimos, resultando visualmente imperceptible el grado de desviación en las figuras 7.30 y 7.31. Sin embargo, la curva std permite apreciar las diferencias.

Las curvas de desviación std-p y std-q que se originan a partir de los datos medidos en el ensayo 2 se pueden ver en las figuras. 7.32 y 7.33 respectivamente.



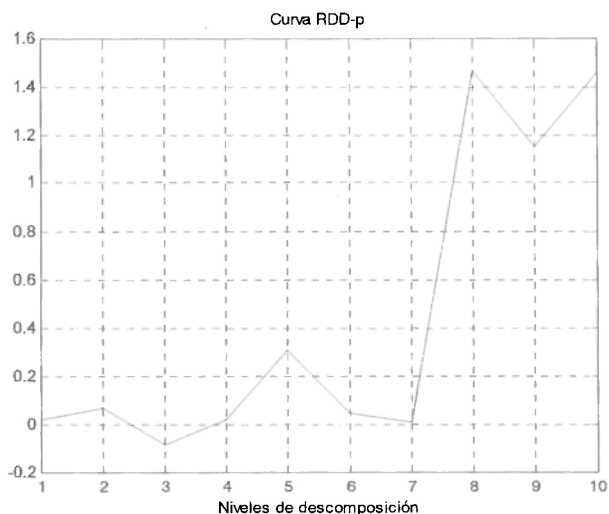
**Figura 7.32: Ensayo 2, interacción Variador de velocidad – Cable-Motor. Curva Std-p.**

Esta curva (std-p) de la figura 7.32 solamente logró discriminar el nivel de descomposición de la potencia fundamental (nivel 8) y las frecuencias de viaje de los frentes de onda a través del cable (niveles 1 y 2).



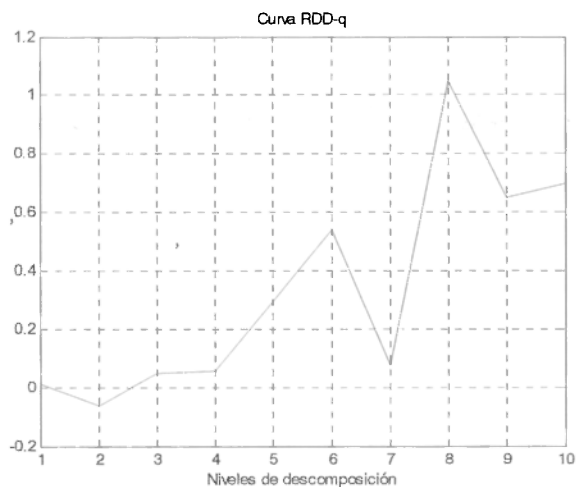
**Figura 7.33: Ensayo 2, interacción Variador de velocidad – Cable-Motor. Curva Std-q**

El efecto de discriminación para la curva std-q es el mismo que se observa en la figura 7.32, es decir las figuras 7.32 y 7.33 logran discriminar las potencias fundamental y de onda viajera. Para las otras características, el grado de desviación de los coeficientes es imperceptible. Introduciendo las curvas RDD-p y RDD-q para el ensayo 2 se obtiene:



**Figura 7.34: Ensayo 2, interacción Variador de velocidad – Cable-Motor. Curva RDD-p**

Las reflexiones, el funcionamiento a frecuencia fundamental, las frecuencias poliarmónicas y finalmente la fluctuación del rizado por la carga y descarga de los componentes inductivos y capacitivos, efecto de baja frecuencia se detectan perfectamente mediante la discriminación que presenta la figura 7.34. La figura 7.35 muestra la curva RDD-q que presenta un detalle similar a la de la relación RDD-p.



**Figura.7.35: Ensayo 2, interacción Variador de velocidad – Cable-Motor. Curva RDD-q.**

Nótese que en esta sección se consideró una metodología para medir las variables eléctricas fuertemente distorsionadas (los subarmónicos detectados se deben a

la relación entre la frecuencia de referencia 40Hz y la frecuencia de alimentación de 50Hz del variador de velocidad).

El nivel 2 de la figura 7.35 muestra la reflexión de las ondas viajeras a través del cable.

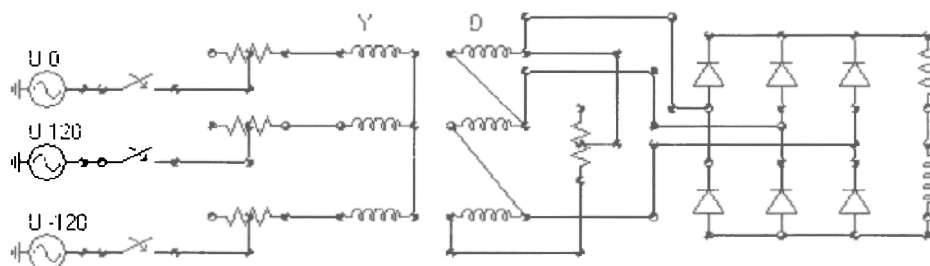
**Conclusiones del ensayo:**

- a) El modelo JMarti utilizado en la simulación de los cables muestra una aproximación muy apropiada en la estimación de la amplitud del transitorio y en el frente de onda. No es muy buena en la aproximación que muestra el coeficiente de amortiguamiento, esto se puede constatar con la figura 7.24. La frecuencia de amortiguamiento o “damping” fue diferente, esto es debido a que la matriz de transformación modal en ATP es constante y no varía con la frecuencia. La solución a este problema ha sido propuesta por Castellanos [12] y fue implementada en DGC-EPRI- EMTP, versión que no es de distribución gratuita como, lo es ATP.
- b) Los resultados alcanzados en el capítulo 5 evidenciaron la posibilidad de detectar las ondas de reflexión que se pueden observar en las curvas RDD-p y RDD-q.
- c) La asimetría de la distribución geométrica del cable se ve reflejada en la tensión de alimentación que llega a la carga y finalmente, esto produce un desbalance en la operación de la máquina como se puede ver en la figuras 7-18-7.21 y 7.26. Este resultado motiva a realizar un nuevo ensayo con un cable simétrico.

**7.3 MONTAJES REALIZADOS EN UNC-MANIZALES, LABORATORIO DE CALIDAD DE LA ENERGÍA**

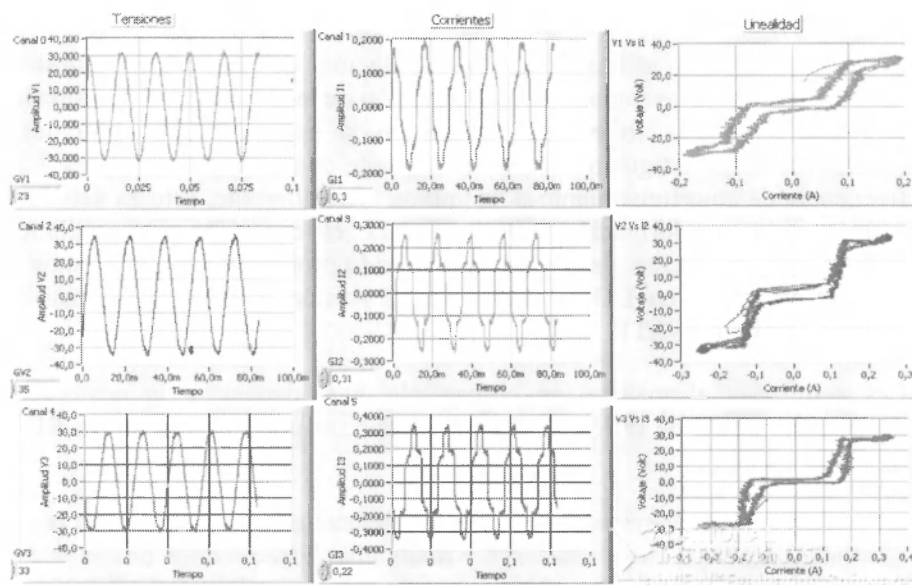
**7.3.1 Procedimientos para realizar los montajes de varias cargas no lineales**

Se hace la conexión del transformador en YD1 (estrella-Delta -o triángulo) y se conectó como carga al rectificador de la mesa de trabajo. A la salida del rectificador se pueden conectar cargas de tipo R, RL serie, RC paralelo, etc. (figura 7.36). Se puede repetir el procedimiento con un transformador en conexión DD<sub>0</sub>.



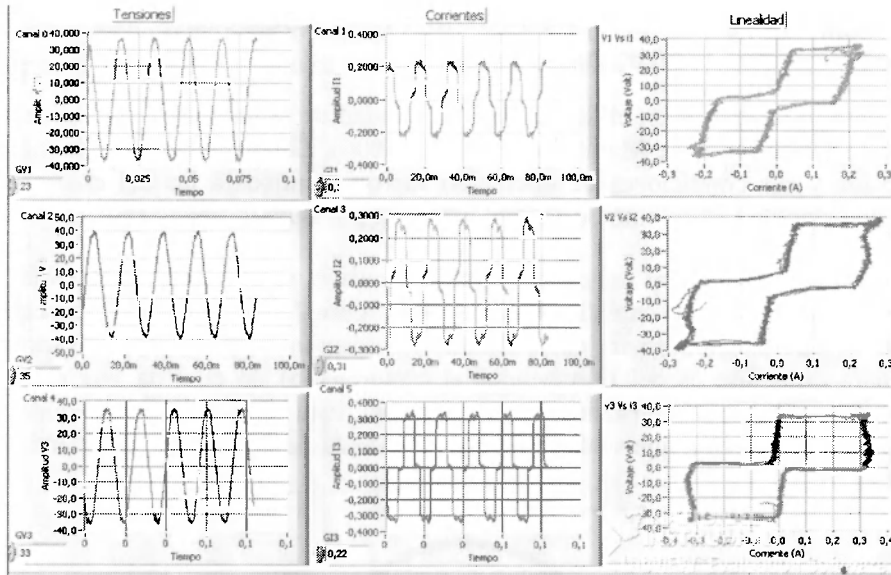
**Figura 7.36 Rectificador alimentado por transformador en conexión YD1.**

Las formas de ondas de tensión y corriente al medir con la tarjeta NI PCI6220 de National Instruments [13] ubicada en el computador de la mesa de trabajo, se muestra en la figura 7.37 a la entrada del transformador, al igual que la grafica tensión contra corriente. La carga conectada a la salida del puente rectificador es tipo “RL”.



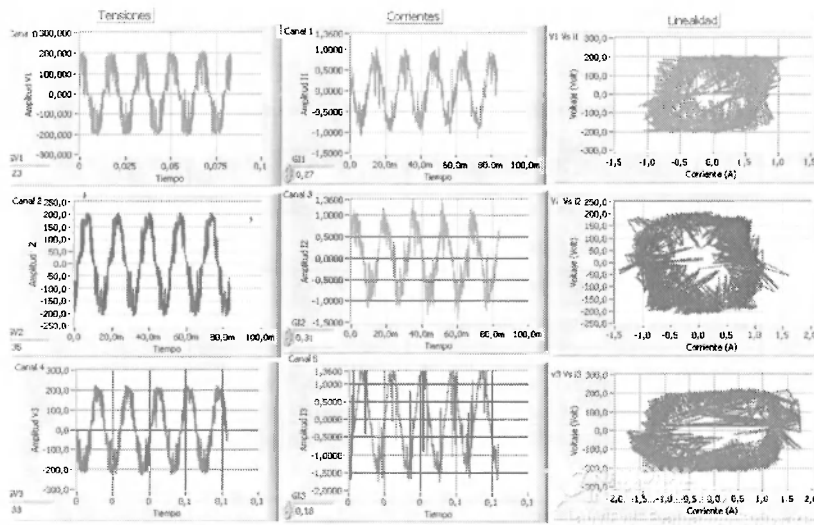
**Figura 7.37: Tensión de fase R y corriente a la entrada del transformador**

En la figura 7.38 se muestran las formas de ondas de tensión y corriente a la salida del transformador, poniendo en desbalance la fase S. La carga conectada a la salida del puente rectificador es de tipo “RL”.



**Figura 7.38 Tensión de línea y corriente para cada fase a la salida del transformador, desbalance del 15% en la fase S.**

En la figura 7.39 se muestran las formas de ondas de tensión y corriente a la salida del variador de velocidad de la mesa de trabajo. Las figura 7.37 a 7.39 evidencia que la medida simultánea con la tarjeta de adquisición, no mostró diferencia con la metodología adoptada en LABCATYP descrita en el apartado 7.2.1.



**Figura 7.39: Tensión de fase y corriente a la salida del variador de velocidad**

### 7.4 Medida del grado de Asimetría en la estructura variador de velocidad-Cable-Motor, ensayo 3:

Este ensayo se realizó en el laboratorio de calidad de la energía de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales (junio de 2006). Los parámetros de la máquina de inducción y sus condiciones de operación fueron idénticos a las del ensayo 2. El variador de velocidad es del tipo de control vectorial por flujo indirecto [10].

Las características físicas del cable objeto del ensayo, se describen en la tabla 7.7 y la estructura geométrica del cable se muestra en la figura 7.46. Cada centro del cable se consideró  $45^\circ$  desplazado en un corte frontal en relación a los ejes y la disposición general para cada fase es del tipo helicoidal (entorchado), lo cual da una estructura simétrica al ser su disposición física complementaria. Esta es una situación equivalente al evento de transposición que suele utilizarse en subestaciones de líneas de transmisión de longitudes considerables.

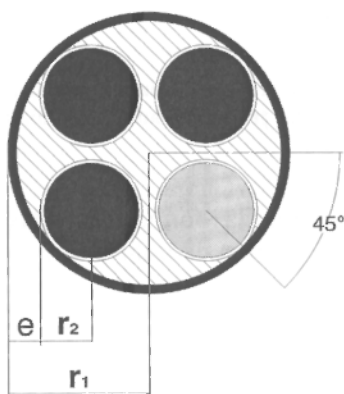


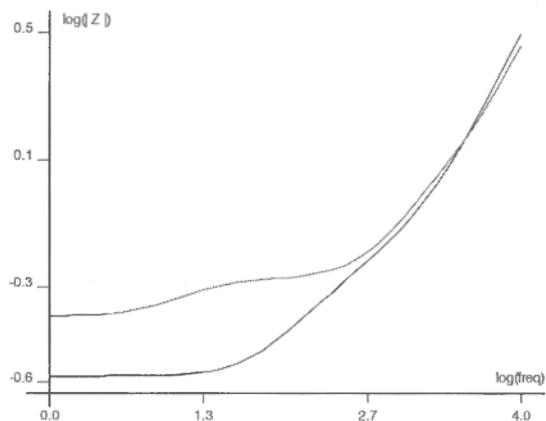
Figura 7.40: Ensayo 3, disposición geométrica del cable a ser ensayado.

Tabla 7.7: Características del cable ensayado en UNC-Manizales.

Dimensiones del conductor	12AWG
Espesor de la cubierta del aislamiento "r2" en, figura 7.36	1,5 mm.
Permeabilidad relativa del aislante principal figura 7.36: (e)	3,5
Permeabilidad relativa de la cubierta figura 7.36: (e)	8,0
Resistividad del conductor (Cu)	$1,7 \cdot 10^{-7} \Omega / m.$
Longitud del Cable	220 m.

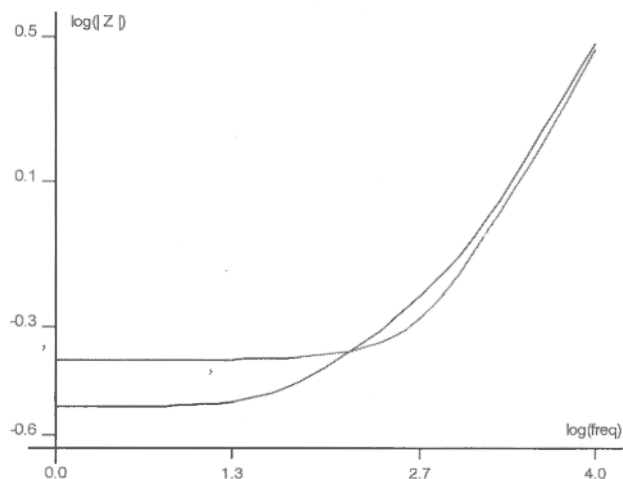
El conductor libre mostrado en la figura 7.40 con un color claro, indica que es el conductor de equipotencialidad en las puestas a tierra del variador y del motor.

La simulación mostró el comportamiento en frecuencia para las impedancias de secuencia positiva y cero que se muestra en las figuras 7.41 y 7.42 respectivamente.



**Figura 7.41: Ensayo 3, comportamiento en frecuencia para la secuencia cero del cable de la figura 7.40, en azul se muestra el modelo de JMarti en rojo el modelo  $\square$ .**

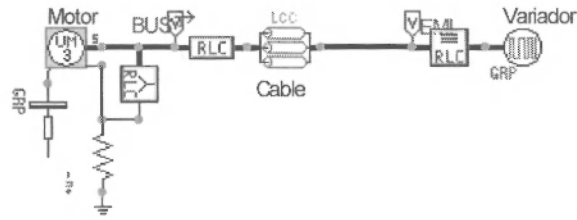
La secuencia positiva simulada para las tres fases es la misma. Ésta se muestra en la figura 7.42.



**Figura 7.42: Ensayo 3, comportamiento en frecuencia para la secuencia positiva del cable de la figura 7.40, en azul se muestra el modelo de JMarti en rojo el modelo  $\square$ .**

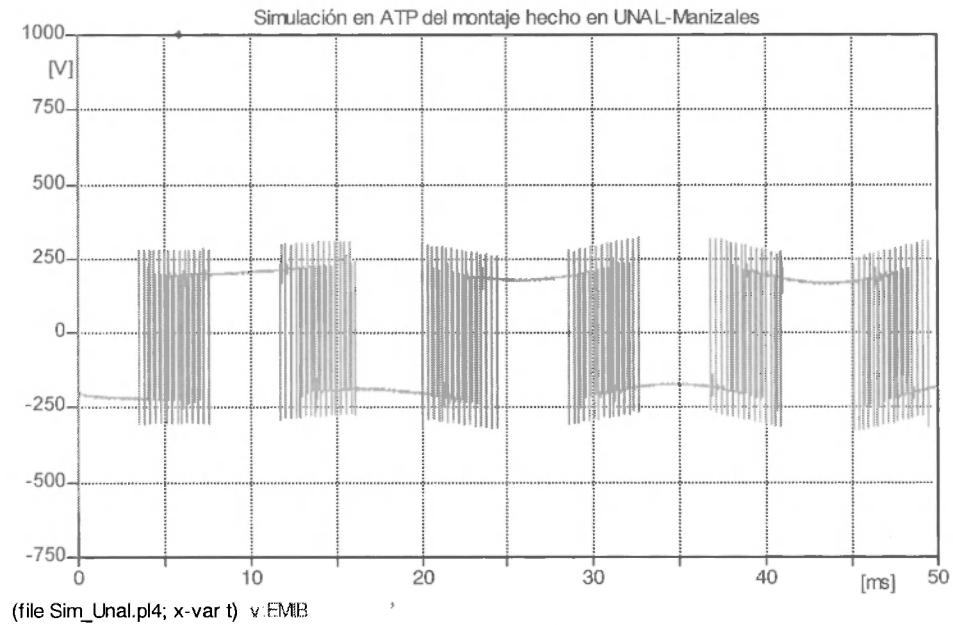
El modelo  $\square$  proporciona un transitorio menos agresivo que el que resulta del modelo JMarti para las bajas frecuencias (obsérvese la impedancia). El caso contrario ocurre para las altas frecuencia pero las diferencias resultan muy pequeñas.

El modelo implementado en ATPDraw se muestra en al figura 7.43.



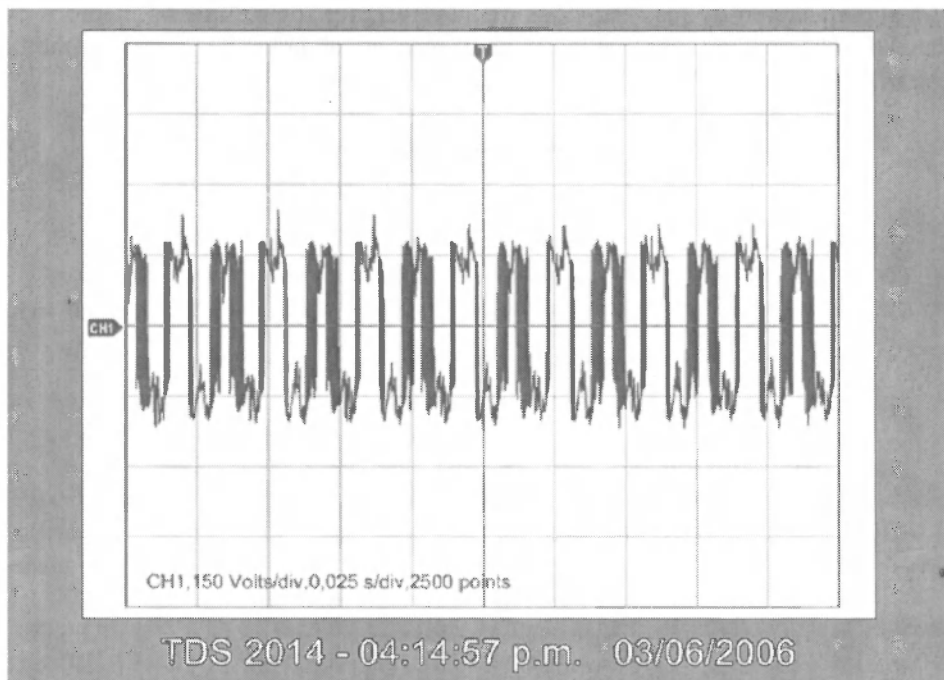
**Figura 7.43: Modelo implementado para la simulación del ensayo 3.**

Los resultados de la simulación del modelo implementado se muestran en la figura 7.44. Éste es el resultado de simular la fase S.



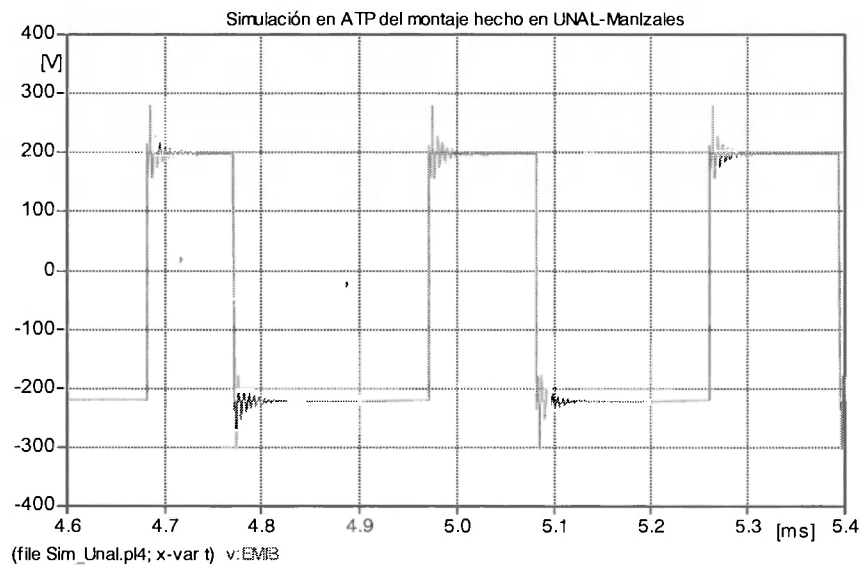
**Figura 7.44: Resultados de la simulación con ATPDraw del ensayo 3, fase S del lado del emisor.**

En el ensayo 3 se utilizó un osciloscopio Tektronix 2014 y en la figura 7.45 se muestran las mediciones obtenidas.



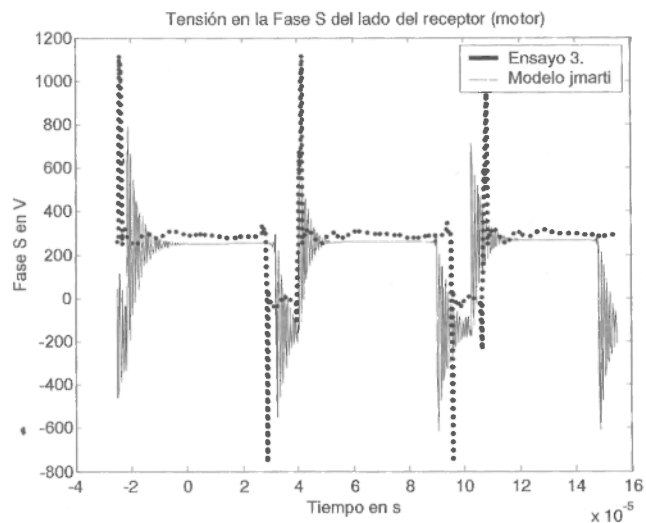
**Figura 7.45: Ensayo 3, fase S medida con el osciloscopio Tectronix 2014 en el lado emisor.**

La tensión simulada en el lado emisor, en una ventana de 1ms, se muestra en la figura 7.46.



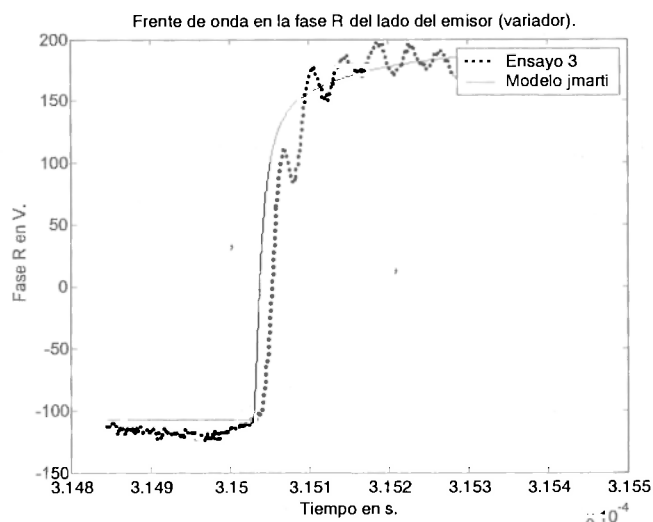
**Figura 7.46: Simulación del ensayo 3, 1ms de observación lado del emisor (Variador de velocidad).**

La superposición de los resultados de simulación y los resultados medidos con la ventana de observación de lms y las tensiones en el lado del receptor (motor) se muestran en la figura 7.47.



**Figura 7.47: Superposición de resultados, simulación, medida en el lado receptor.**

La captura del frente de onda, en la figura 7.48, para el lado emisor muestra que el transitorio es menor al que ocurre del lado receptor, que es muy severo.



**Figura 7.48: Captura del frente de onda del ensayo 3 del lado del emisor.**

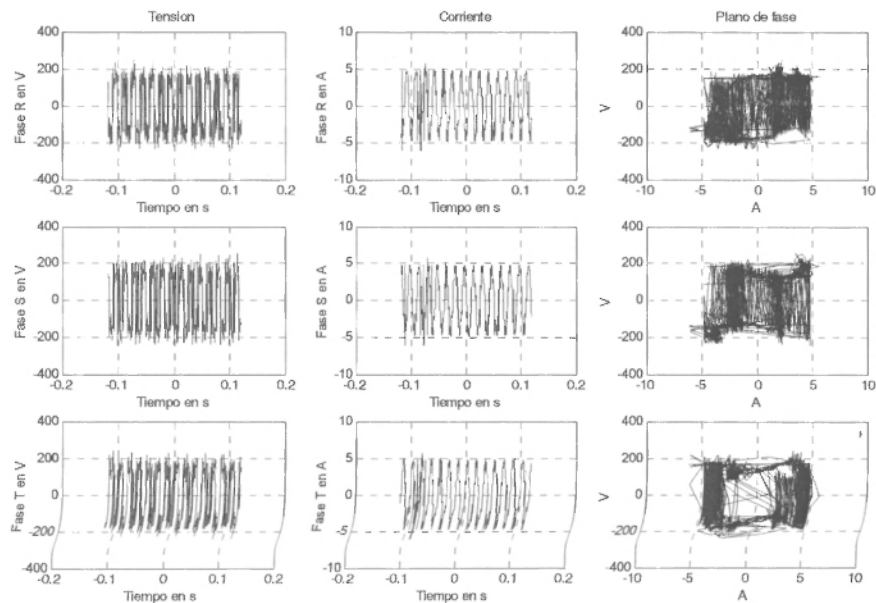
Con los resultados expuestos en las figuras 7.47 y 7.48 se muestra que la metodología de simulación implementada concuerda con los resultados experimentales.

**Objetivos del ensayo:**

- a) Comparar el ensayo desarrollado en la F.I.U.B.A. con el realizado en la U.N.C. para dos topologías diferentes de cable, la primera asimétrica (como puede observarse en la figura 7.17) y la segunda, con una estructura simétrica (figura 7.40).
- b) Verificar las condiciones reactivas en los cables compactos respecto de las condiciones en cables independientes.

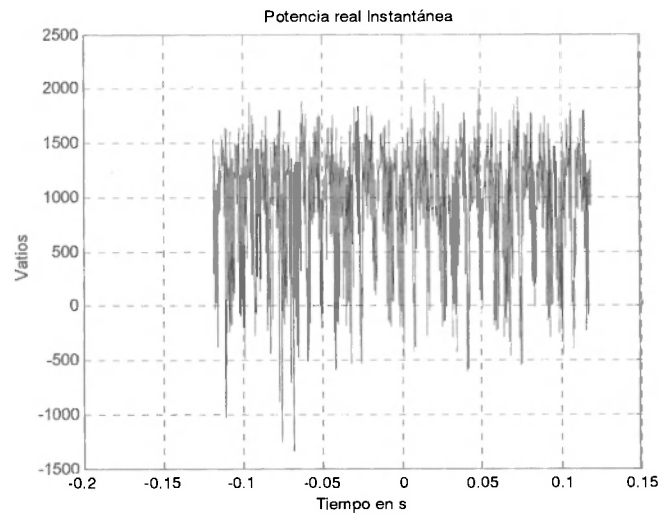
Para lograr los objetivos citados se presentan a continuación los resultados de aplicar la técnica pqAT y superponer las curvas std-p, std-q, RDD-p y RDD-q de los ensayos 2 y 3.

Las características de tensión y corrientes medias para el ensayo 3 se muestran en la figura 7.49.



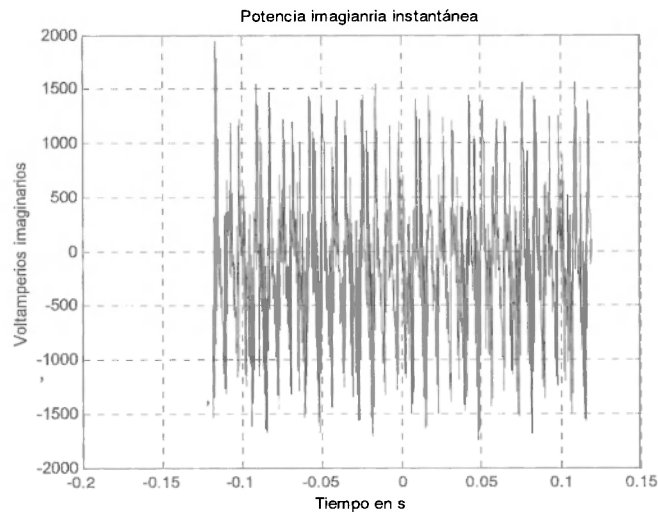
**Figura 7.49: Características de tensión de fase y corriente en el ensayo 3.**

La potencia instantánea real e imaginaria se muestran en la figura 7.50 y 7.51 los eventos transitorios aparecen más severos.



**Figura 7.50: Ensayo 3, potencia real instantánea.**

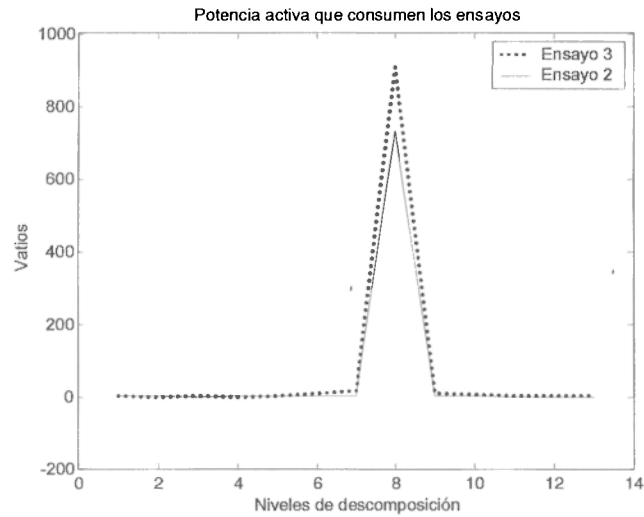
Los picos negativos se evaluaron en su componente transitoria como el frente de onda medido en la figura 7.48 para el caso de la tensión de la fase S. La potencia imaginaria instantánea muestra el mismo efecto en la figura 7.51 .



**Figura 7.51: Ensayo 3, potencia imaginaria instantánea.**

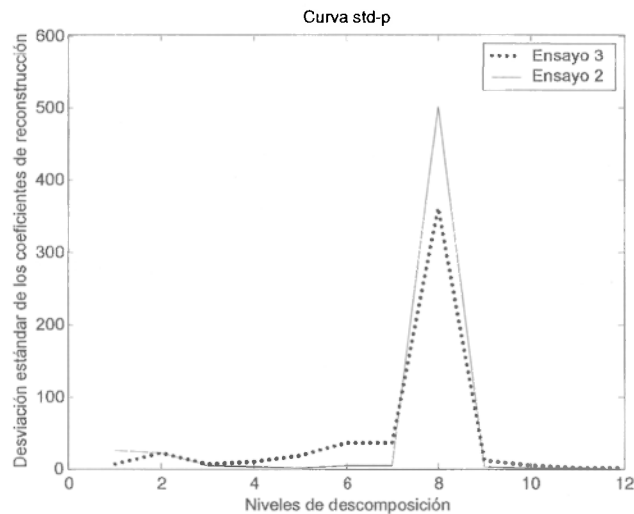
Para observar la diferencias entre los ensayos 2 y 3 se presentan a continuación las curvas de la desviación de los coeficientes y la relación ruido/señal (en trazo continuo el ensayo 2 y en trazo punteado el ensayo 3).

La comparación de la potencia activa que consumen los sistemas del ensayo 2 y 3 se muestra en la figura 7.52.



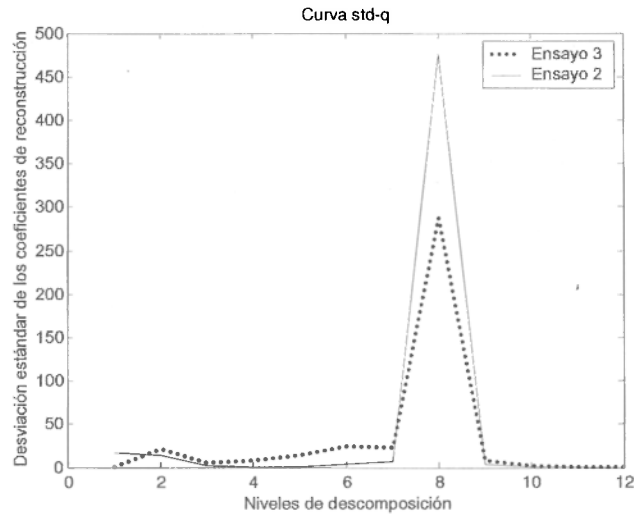
**Figura 7.52: Comparativo de los ensayos 2 y 3, potencia activa tomada por el motor.**

La desviación estándar de los coeficientes de la potencia real instantánea e imaginaria instantánea se observa en las figura 7.53 y 7.54.



**Figura 7.53: Comparativo para la curva std-p ensayos 2 y 3.**

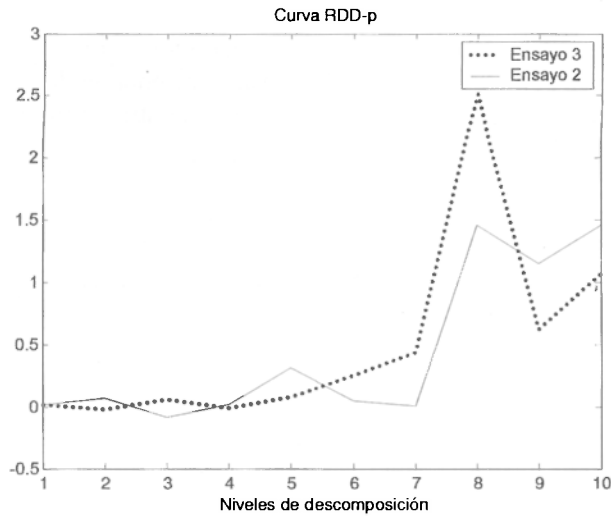
Como se explicó en el capítulo 5, las desviaciones en el nivel que describe la frecuencia fundamental obedecen a condiciones de desbalance. Si las componentes en comparación son similares, el consumo de potencia activa resulta similar, como se muestra en la figura 7.52.



**Figura 7.54: Comparativo para la curva std-q ensayos 2 y 3.**

Las desviaciones por parte del ensayo 3 en los niveles 4 al 7 de las figuras 7.53 y 7.54 muestran que la contaminación armónica entregada por el variador 1 [8] es mayor a la producida por el variador 2 [9].

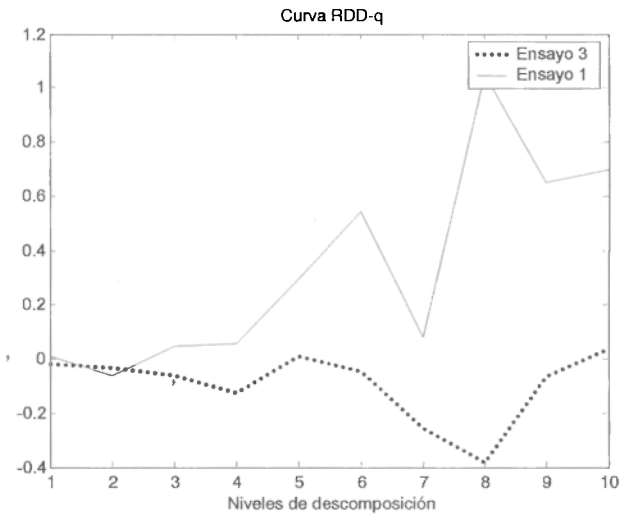
Los fenómenos de la potencia imaginaria instantánea son muy diferentes y opuestos lo que es debido a la estructura del cable. Observando el resultado de las curvas RDD-p y RDD-q se puede comprobar que hay un comportamiento inverso en las dos topologías. Por un lado, el desbalance del cable se observa por la diferencia mostrada por la figura 7.55 en el nivel 8. La figura 7.56 evidencia en la línea de transmisión el fenómeno oscilante de la componente imaginaria de la potencia instantánea, el efecto solamente ocurre por el enlace de transmisión -el cable. Se deduce entonces que la observación hecha por Aredes (que se aclara en el apéndice A) en relación con la interpretación física de q (la potencia imaginaria instantánea) es expresada por la curva RDD-q.



**Figura 7.55: Comparativo de los ensayos 2 y 3, curva RDD-p**

El cambio que observa la figura 7.55 en el nivel 8 revela la asimetría del cable.

El caso resulta más claro viendo la figura 7.56 donde se muestra la curva RDD-q.



**Figura 7.56: Comparativo de los ensayos 2 y 3, curva RDD-q**

El efecto capacitivo del cable del ensayo 3 se evidencia por el signo de la potencia imaginaria instantánea en los niveles 1 al 9 de la figura 7.56

### **Conclusiones del ensayo 3:**

- a) Los cables trifásicos instalados entre el variador y el motor presentan transitorios muy críticos con valores que pueden estar por encima de 8 p.u del valor nominal de alimentación. Por esta razón se recomienda utilizar un nivel de aislamiento de 2000V. De acuerdo al estándar UL1569 [10].
- b) Con cables más compactos el transitorio es más severo. Igualmente en condiciones estacionarias, como se puede observar de los niveles 1 al 5 de las curvas RDD-p y RDD-q. En relación a la asimetría que detecta la escala 8 de las curvas std-p y std-q en las figuras 7.53 y 7.54, la desviación indica mayores problemas con el cable utilizado en la F.I.U.B.A.. El comportamiento del cable compacto fue mejor.
- c) Al evaluar las dos estructuras del cable utilizadas, se encontró que la estructura más compleja es la estructura de cable asimétrico.
- d) Las condiciones del flujo de potencias reactivas en ambos ensayos fueron opuestas. La capacidad parásita característica del cable, entre el conductor de la fase y el conductor destinado a la puesta a tierra, permite aliviar los costos del compensador y aprovechar esta capacidad en un circuito RC que sirva como filtro [8,13].

## **7.6 Conclusiones**

La razón de poder descomponer la potencia en sus componentes de banda fundamental y residual obedece a tres causas:

- 1) Los efectos del sistema ideal se presentan solamente en el nivel de componente fundamental.
- 2) Los efectos de perturbación se pueden identificar muy rápido debido a sus características: armónicos en todos los niveles, flicker en el nivel de bajas frecuencias (coeficientes de aproximación) y efectos de desbalance en la magnitud del nivel fundamental.
- 3) Puesto que estas magnitudes son evaluadas de manera continua el índice de calidad puede ser asociado para agruparlas a todas. Caracterizar el índice desde el punto de vista grafico con las curvas RDD-p y RDD-q permite una idea intuitiva de evaluación.

Las evaluaciones hechas con la potencia instantánea no implican ningún tipo de descomposición en las corrientes del sistema, haciendo del proceso de medida una aplicación simple para el monitoreo en línea. Poder medir la potencia con filtros de tipo FIR (ondita Daubechies 6) posibilita la realización de la medida en línea (caso de sumo interés para aplicaciones de monitoreo y compensación).

El signo de la evaluación se presenta en la relación ruido/señal, que de este modo revela el origen (al frente o no del instrumento de medida).

### **7.7 Referencias bibliográficas correspondientes al capítulo 7**

- [1] Manual del usuario del vatímetro YOKOGAWA WT130 .
- [2] Manual del usuario del analizador de calidad de la potencia FLUKE 43.
- [3] Manual del usuario del osciloscopio HAMEG 507.
- [4] MatLab versión 6.0.
- [5] A.M. Gaouda, M.M.A Salama, M.R. Sultan, A.Y.Chikhani, “Power Quality Detection and Classification Using Wavelet-Multiresolution Signal Decomposition”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No.4, October 1999.
- [6] Jean Bonal et Guy Séguier “Entraînements électriques à vitesse variable, Volume 3: Interactions convertisseur-réseau et convertisseur-moteur-charge”, Prométhée – Schneider Electric 2000.
- [7] John M. Bentley and Patrick J. Link, “Evaluation of Motor Power Cables for PWM AC Drives”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No.2, pp.342- 358, March/April 1997.
- [8] Manual del usuario del variador de velocidad: YASKAWA: P5 GPD506.
- [9] Manual del usuario del variador de velocidad: ABB ACS 100.
- [10] “Metal clad cables” Underwrites Laboratory inc. UL1569, May 30, 1996.
- [11] E. Cano Plata, H. Tacca, “Dynamic Damping Over Voltage Problem”, Ciência & Engenharia, Vol 9, No. 2, pp. 840-846, Julio del 2000.
- [12] Castellanos,F. and Marti,J.R.; “Full frequency-dependent phase-domain transmission line model Power Systems, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.12, No 3, Aug. 1997 Page(s):1331 - 1339
- [13] NI-DAQ 7, DAQ Quick Start Guide.

# CAPÍTULO 8:

## RESULTADOS EXPERIMENTALES, HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

### *RESUMEN*

*En este capítulo se hace un ensayo sobre un horno de arco eléctrico (HAE) para aplicar la metodología desarrollada en los primeros capítulos a la representación de hornos para generalizarla a otros tipos de sistemas y a otros niveles de tensión.*

*Se comienza estudiando las características de los arcos eléctricos en hornos de arco, describiendo el comportamiento de las principales variables durante el ensayo en el período de fusión. A continuación se analizan los parámetros que evalúa la técnica pqAT relacionándolos con el resultado de la simulación del caso 9 a partir del modelo estudiado en el capítulo cuatro.*

*Para finalizar, se investigan algunos estados del horno y la característica que de éstos refleja la técnica de evaluación, presentando una gráfica comparativa del método con la curva RDD.*

## CAPÍTULO 8: *Resultados experimentales, horno de arco eléctrico*

### 8.1 INTRODUCCIÓN:

A continuación se presenta un estudio de campo que complementa los desarrollos logrados en los laboratorios, con el objeto de evaluar un horno de arco eléctrico (HAE) en su estado más característico, el estado de fusión. Al final, se comparan los tres estados de operación que se pueden encontrar, el estado de fusión (estado sólido de la chatarra), estado liquido-sólido de la chatarra y finalmente el estado de afinado (liquido).

La disposición general del horno y su respuesta viene indicada por su geometría. Los espacios abiertos en la cubierta del horno son los de paso para los electrodos que permiten el movimiento oscilatorio de los electrodos. Este movimiento es ocasionado por el burbujeo de la chatarra en la fluctuación liquido- sólido. Cómo refleja la técnica pqAT este fenómeno será el tema de este capítulo.

### 8.2 Horno de arco eléctrico (HAE), ensayo 4:

La empresa Acerías de Caldas S.A. (ACASA) funde chatarra recolectada en diversos puntos de la región denominada “eje cafetero” de Colombia. La capacidad de ACASA es de 40 toneladas (volumen que se logra utilizando dos hornos: uno LECTROMEL con capacidad de 15 T y el otro WAITHING de 33T ).

El tiempo de un ciclo de trabajo para el horno LECTROMEL es de 115 minutos.

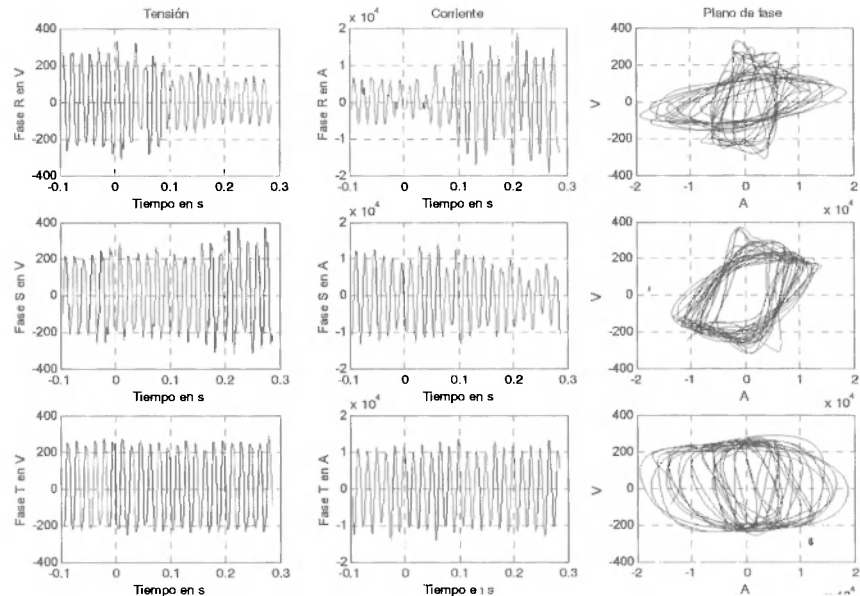
La empresa de suministro eléctrico es la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC). Los datos utilizados provienen de mediciones realizadas durante los meses de mayo y junio del 2006. Existen igualmente, trabajos realizados entre CHEC, ACASA y la Universidad Nacional de Colombia [3-4].

Los vectores de tensión y corriente se utilizan aquí para aplicar la técnica pqAT.

#### Objetivos del Ensayo:

- La caracterización del estado de fusión del HAE LECTROMEL en ACASA con pqAT.
- Comparar la simulación presentada en el capítulo 4 con los resultados de campo.
- Evaluar la calidad de la potencia en un HAE con la técnica pqAT.

La figura 8.1 muestra las tensiones y corrientes en el secundario del transformador del HAE que alimenta el horno Lectromelt [1], el transformador es de 7MW y tiene 13 derivaciones (“taps”) con pasos que varían de 19V a 42V.

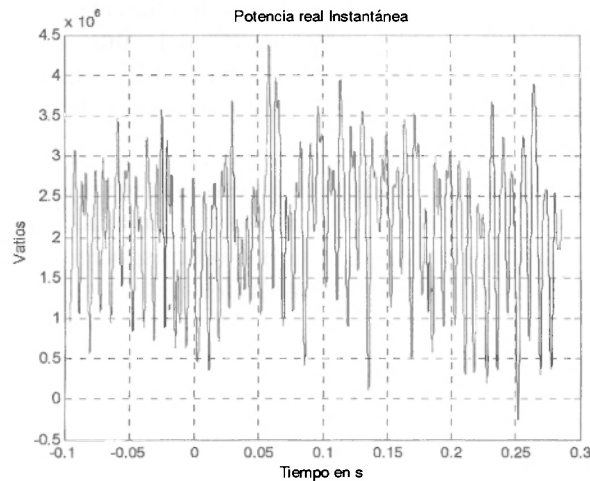


**Figura 8.1: Ensayo 4, tensiones y corrientes medidas en el secundario del transformador que alimenta el horno LECTROMEL en ACASA.**

Las figuras 8.2 a 8.11 muestran el estado de fusión del horno. En ellas se detecta el efecto de contaminación armónica y el “flicker”. Esta contaminación de armónicos puede ser visualizada en los primeros niveles de descomposición (1 al 7) de las curvas RDD-p y RDD-q. La frecuencia fundamental del sistema se dejó en el nivel ocho, de tal manera que los subsiguientes niveles se refieran a subarmónicos y al flicker. O sea, a los niveles 9 al 13 que representan la región de muy bajas frecuencias caracterizada por la función de escala.

Las potencias real e imaginaria se muestran en las figuras 8.2 y 8.3 respectivamente.

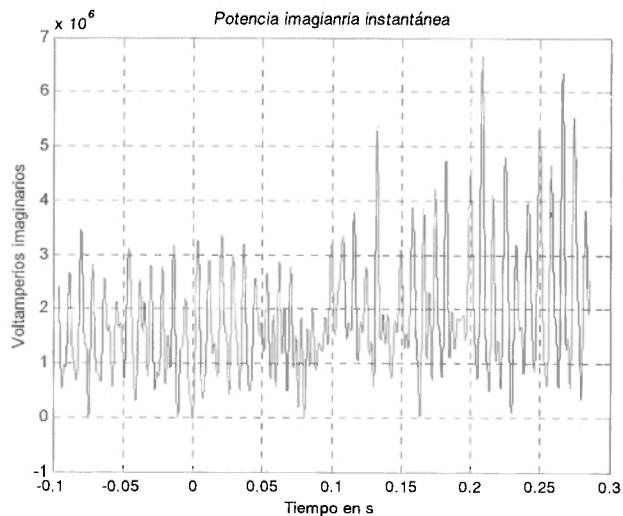
Según descubrió Ayrton (a principios del siglo XX) el arco tiene características inductivas.



**Figura 8.2: Ensayo 4, potencia real instantánea en el estado de fusión de un horno LECTROMEL de 15T, alimentado por un transformador Westinghouse de 7MVA**

El regulador del horno mueve los electrodos mediante un sistema que acciona el motor de cada electrodo. El principio de regulación es simple, un cambio en la corriente origina un cambio en la potencia del circuito. Dentro de los límites de estabilidad del circuito, la corriente con una determinada tensión aplicada puede variarse cambiando la longitud del arco (según el modelo presentado en el capítulo 4).

La figura 8.3 muestra la potencia imaginaria instantánea. Las fluctuaciones son muy severas evidenciado las condiciones del movimiento de los electrodos accionados por el regulador y la reacción de la chatarra al fundir (romper o establecer el arco).



**Figura 8.3: Ensayo 4, potencia imaginaria instantánea**

La descomposición utilizando daubechies de 6 coeficientes, de las señales de las potencias real instantánea e imaginaria instantánea se presentan en las figuras 8.4 y 8.5. En ellas se puede observar las escalas de mayor concentración energética. El nivel ocho

centra el contenido energético de la frecuencia de alimentación, el sistema funciona a 60Hz. Entre el nivel 6 y el 10 se encuentra el 90% del contenido energético del sistema, involucrando así armónicos de bajo orden y subarmónicos. El flicker presenta un nivel bajo de energía pero está claramente segmentado en los niveles 11 al 13.

El funcionamiento de un horno de arco depende del elemento estabilizador del circuito, el circuito contiene las reactancias y resistencias trabajando a tensión constante y la carga (el arco). De acuerdo con la técnica de fusión utilizada (para el ensayo que se presenta se utiliza la técnica de arco sumergido o de espuma de escoria) los factores de potencia son superiores a 0,707, que a mediados del siglo XX se consideraba era el óptimo de producción. La máxima potencia del arco se obtiene con los valores más elevados del factor de potencia del circuito. Las características con las cuales se analizó el circuito se mostraron en el capítulo 4. El valor de funcionamiento óptimo depende de las constantes del circuito.

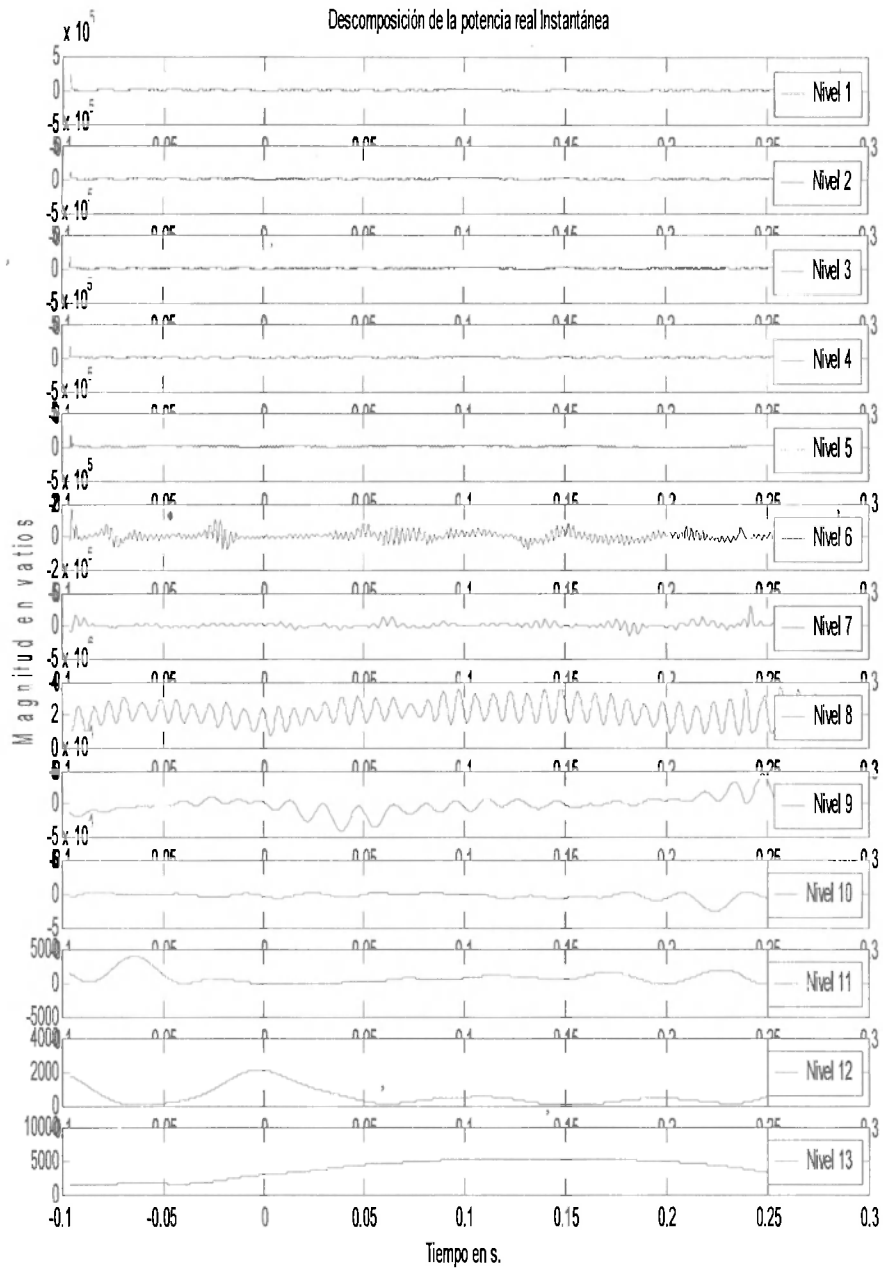
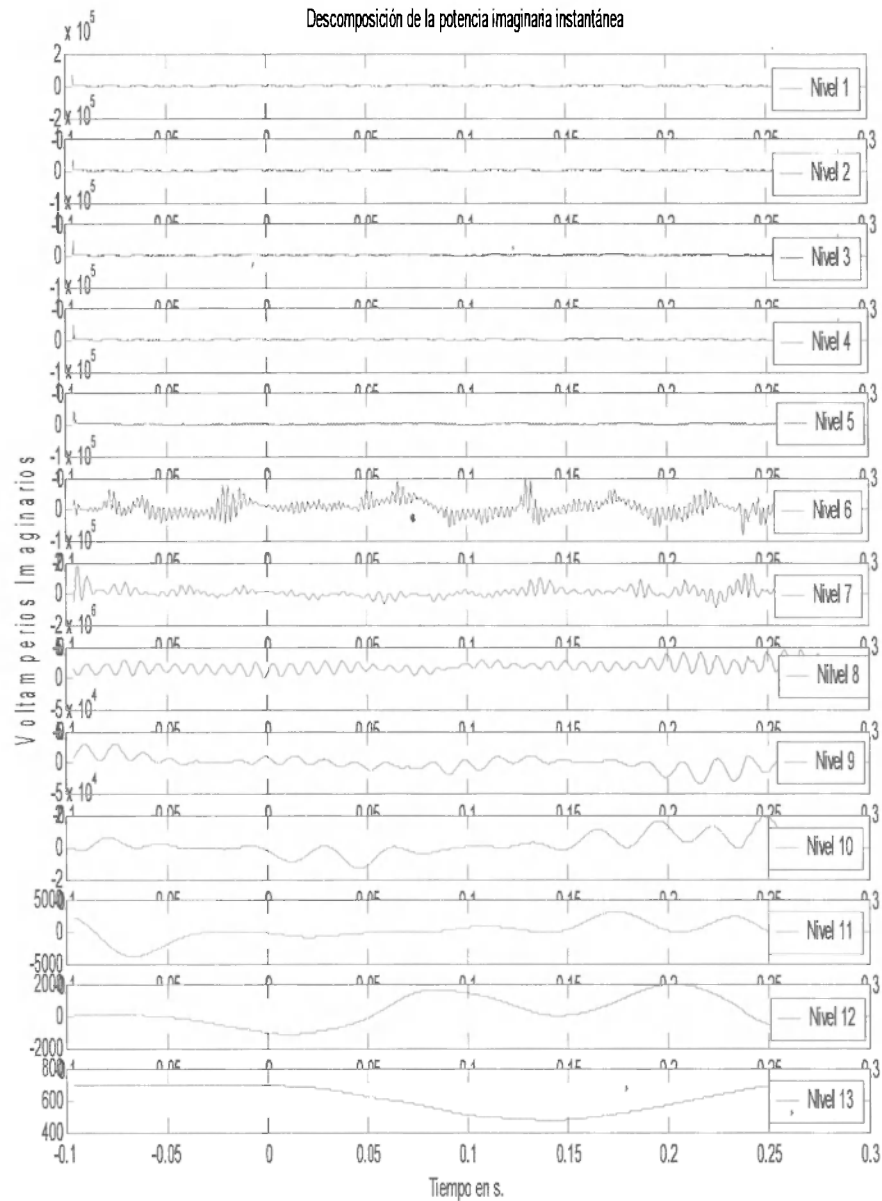


Figura 8.4: Ensayo 4, descomposición de la potencia real instantánea.

La descomposición de la potencia imaginaria instantánea se muestra en 8.5.



**Figura 8.5: Ensayo 4, descomposición de la potencia imaginaria instantánea**

La potencia activa que consume el sistema se muestra en la figura 8.6. Como se puede observar, el transformador no precisa características determinadas de regulación (caída de tensión) y se le pide un amplio margen de tensiones al lado del secundario con sus correspondientes corrientes. La potencia oscila a medida que la chatarra pasa del estado sólido al de fusión, hasta que al final del periodo de fusión resulta poco fluctuante.

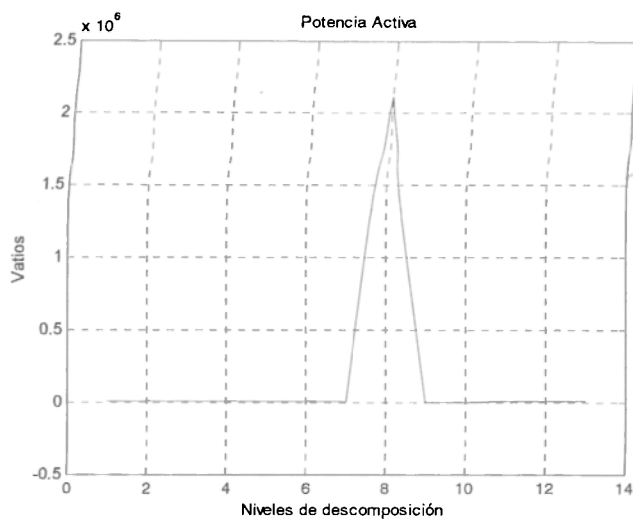


Figura 8.6: Ensayo 4, potencia activa medida con pqAT.

No hay un criterio fijo para lograr la estabilidad del arco ni para limitar la corriente pero siempre ha resultado satisfactorio tener reactancias equivalentes de 40% al 60%. En consecuencia, para mantener el arco estable se forzó una condición reactiva de tipo inductivo, como se muestra en la figura 8.7.

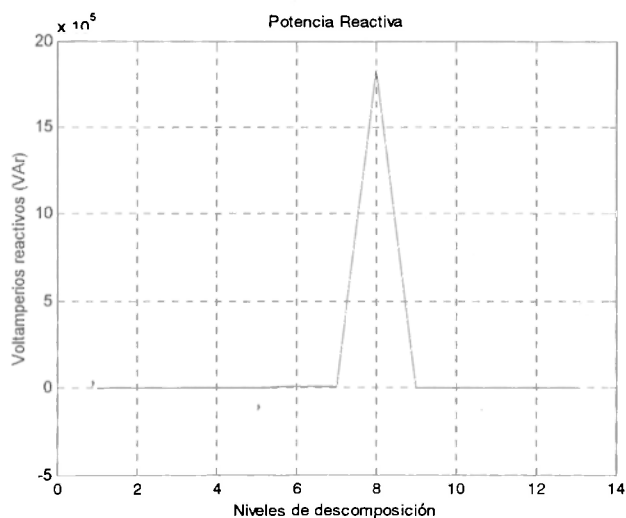
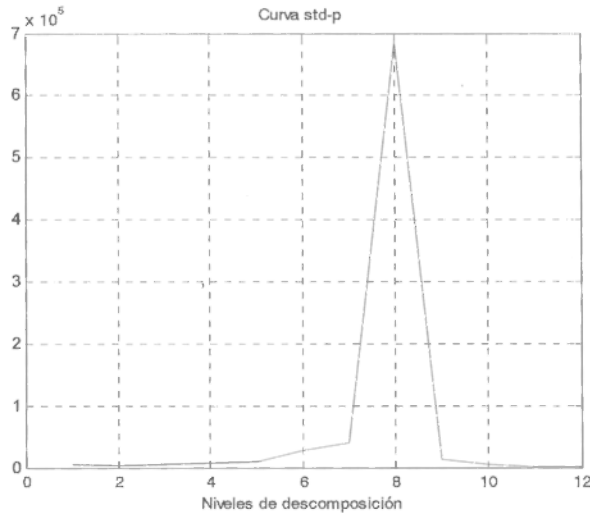


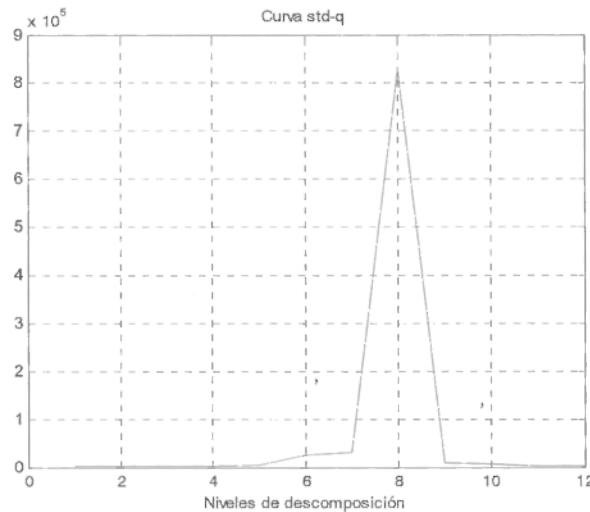
Figura 8.7: Ensayo 4, potencia reactiva medida con pqAT

Para evaluar la calidad de la potencia en el secundario del transformador se presentan las curvas std-p y std-q en las figuras 8.8 y 8.9



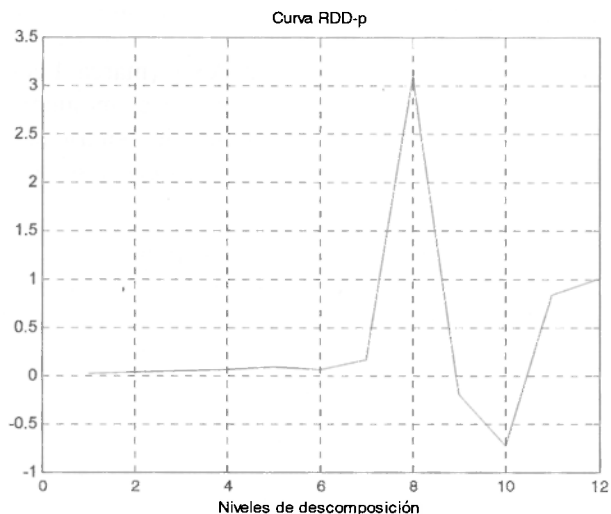
**Figura 8.8: Ensayo 4, desviación de los coeficientes de reconstrucción de la potencia real instantánea.**

Como los niveles de consumo para la frecuencia fundamental son tan altos, resulta imperceptible el grado de desviación de los niveles diferentes al octavo. En la figura 8.9 se alcanza a notar alguna diferencia en los niveles 6 y 7.



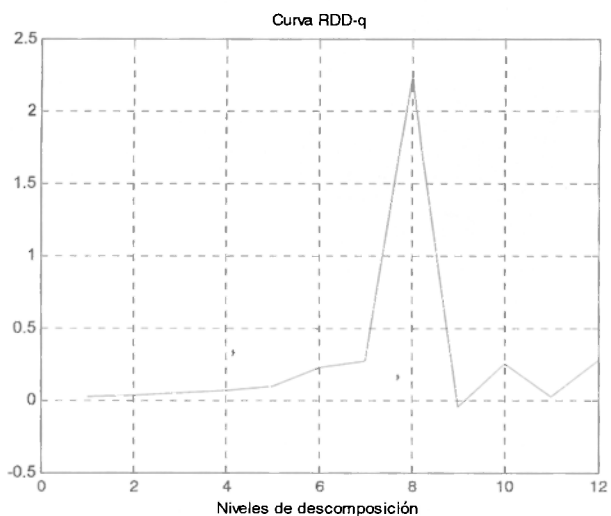
**Figura 8.9: Ensayo 4, desviación de los coeficientes de reconstrucción de la potencia imaginaria instantánea.**

Esta situación se mejora con la introducción de la relación ruido/señal que entregan las curvas RDD-p y RDD-q que se presentan en las figuras 8.10 y 8.11



**Figura 8.10: Ensayo 4, relación ruido/señal de la potencia real instantánea por niveles de descomposición.**

Aunque el proceso de producción de acero no es periódico, los armónicos pares ocurrirán con relativa baja amplitud. Sin embargo, el segundo armónico será importante pero lo predominante es la emisión de componentes subarmónicas responsables de efecto de parpadeo “flicker”. Esto se observa en el nivel 10 de la figura 8.10.



**Figura 8.11: Ensayo 4, relación ruido/señal de la potencia imaginaria instantánea por niveles de descomposición.**

Las componentes del nivel 10 y 11 en la descomposición de la curva RDD-q representada en la figura 8.11, muestran el efecto inductivo predominante para este rango de frecuencia.

Una condición importante para lograr la estabilidad del arco en la etapa de fusión es tener tensión en el momento del cruce por cero de la corriente y ello implica tener un sistema inductivo.

**Conclusiones del ensayo:**

- a) El horno de arco eléctrico de ACASA (marca Lectromel) presenta unas características de estabilidad del arco en el momento de la fusión que no permiten su extinción por el cambio de polaridad, esto repercute en la calidad de potencia que es capaz de transferir y se ve en el nivel ocho de las figuras 8.8 a 8.11.
- b) La simulaciones presentadas en el capítulo 4 muestran que el caso 9C caracteriza de manera muy aproximada la condición de fusión del horno Lectromel [1] medido en el ensayo 4. La diferencia radica en que el horno para el caso de la simulación presentó un desfase de  $90^\circ$  respecto del horno medido. Por esta razón las curvas 4.26 y 8.11 son de signo contrario.
- c) La técnica pqAT mostró resultados similares a los que se reportaron en el capítulo 4. El horno de arco eléctrico Lectromel de acería de Caldas ACASA es productor de fluctuaciones que originan parpadeo (“flicker”) pero las componentes de distorsión armónica son bajas en comparación con las cargas electrónicas (puentes rectificadores y variadores de velocidad vistos en el capítulo 7).



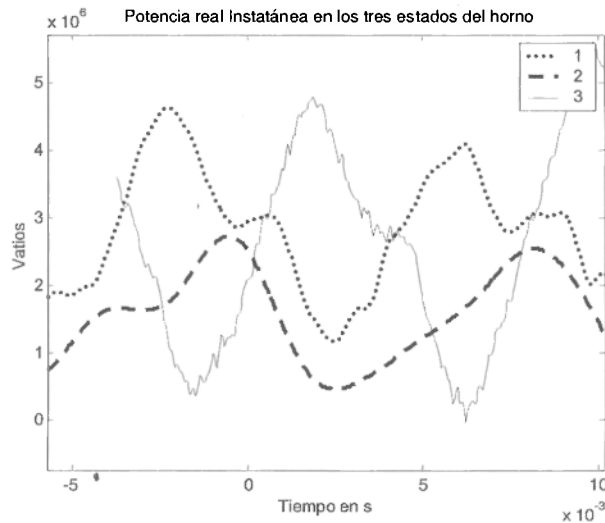
**Figura 8.12: Horno LECTROMEL en ACASA año 2005.**

**8.3 Estados representativos del HAE:**

El volumen que se funde no puede agregarse totalmente al horno en una sola carga sino que, para lograr mayor eficiencia en la fundición, deben realizarse de 5 a 6 recargas hasta alcanzar el volumen nominal del horno. Este proceso se denomina período de obtención de colada y en él se pueden describir tres estados del horno: El primero, es el estado de fusión propiamente dicho; el segundo, es un estado entre líquido y chatarra que se denominará intermedio y el último es el estado de afinado.

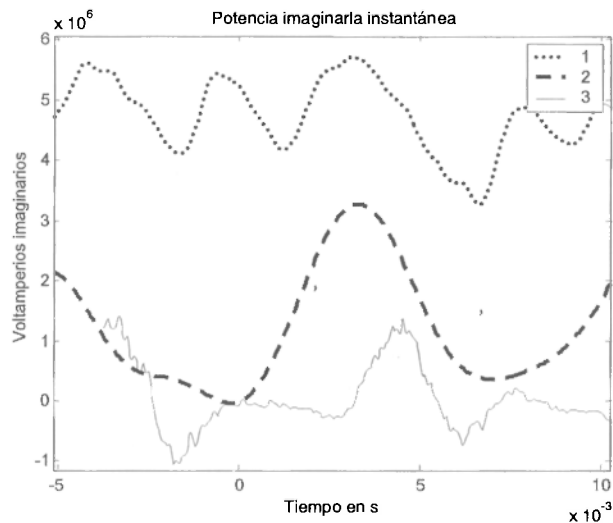
El tiempo de un ciclo de trabajo para el horno es de 115 minutos, durante los que el horno presentará cinco o seis veces la condición de fusión, esto es el encendido, rompimiento y creación del canal plasmático en la carga metálica o chatarra. A continuación se tratará de visualizar el comportamiento de las curvas desarrolladas en estos tres estados.

Las figuras 8.13 a 8.18 muestran el estado de afinado (3), el inicio o fusión (2) y el estado medio (1) de la colada.



**Figura 8.13: Evaluación de un HAE en sus tres estados más representativos con pqAT, potencia real instantánea.**

El estado 2 no es eficiente aprovechando la potencia activa y es mucho más reactivo que el estado 3. Los datos se obtuvieron con el sistema de adquisición del regulador GE-AMI [2].



**Figura 8.14: Evaluación de un HAE en sus tres estados más representativos con pqAT, potencia imaginaria instantánea.**

La potencia instantánea presenta mayor componente reactivo en el estado intermedio de la colada como se observa en la figura 8.14.

Obsérvese en la curva de la figura 8.15, tomada en momentos de similar consumo de corriente, que la potencia activa para los tres estados resulta muy similar.

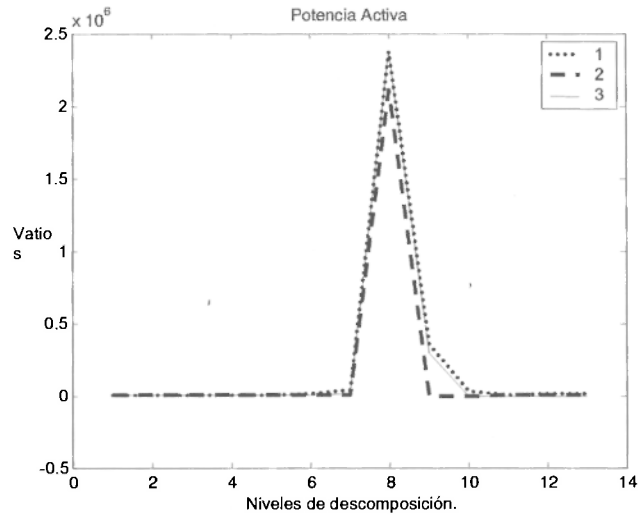


Figura 8.15: Evaluación de un HAE en sus tres estados más representativos con pqAT, potencia Activa.

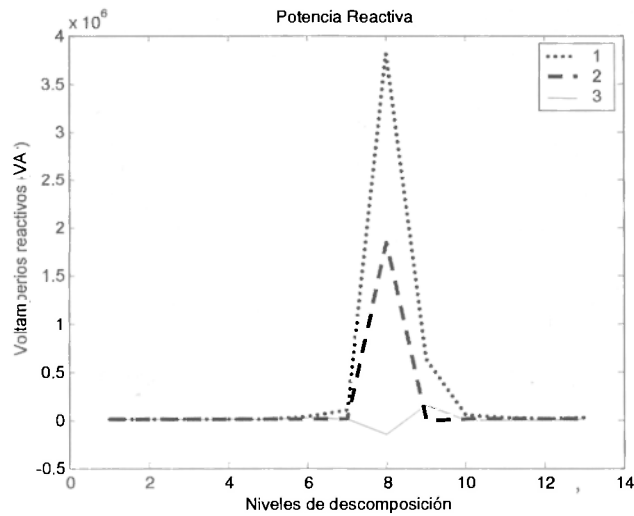
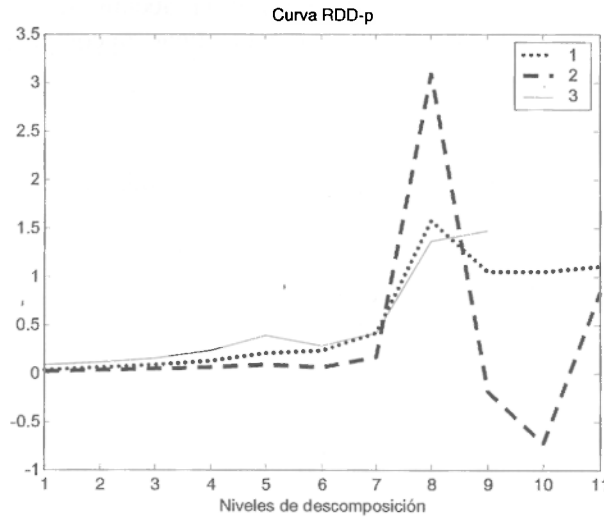


Figura 8.16: Evaluación de un HAE en sus tres estados más representativos con pqAT, potencia Reactiva.

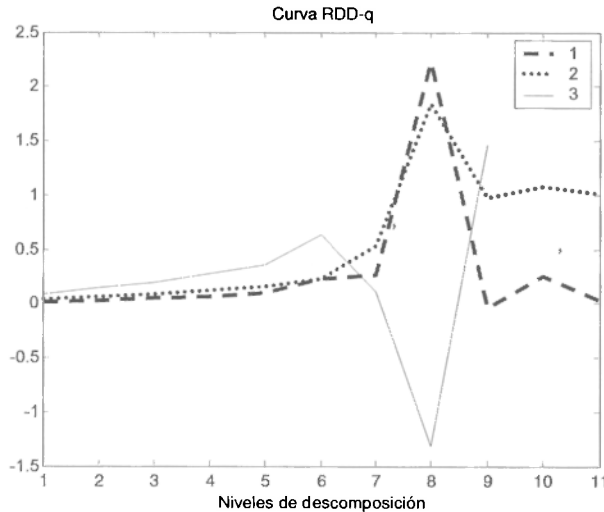
El consumo de potencia reactiva disminuye apreciablemente en el estado de afinado, como lo muestra la figura 8.16. Es decir, que en afinado el sistema es prácticamente resistivo.



**Figura 8.17: Evaluación de un HAE en sus tres estados más representativos con pqAT, Curva RDD-p.**

La simulación arrojó un resultado más pesimista en relación con el grado de desbalance, pues en el nivel 8 de la figura 4.26 y 4.27 marcó 11, mientras que el valor medido fue 3 como se observa en las figuras 8.17 y 8.18.

Los resultados de las bajas frecuencias son similares respecto de los datos medidos en este capítulo comparados con los simulados en el capítulo 4 [5] (figuras 4.26 y 4.27) pero la frecuencia de “flicker” detectada está en el nivel 10 de la figura 8.17 y la simulación la mostró en el nivel 11 de la curva RDD-p para el caso 9C.



**Figura 8.18: Evaluación de un HAE en sus tres estados más representativos con pqAT, Curva RDD-q.**

La curva RDD-q dió el mismo signo que el caso 9 del capítulo 4. Los otros estados son más complejos de predecir. El comportamiento estocástico de la fluctuación del electrodo muestra en el sistema horno - transformador de ACASA que la componente



**8.5 Referencias bibliográficas correspondientes al capítulo 8**

- [1] LECTROMELT, inc, Sistema de operación del horno de 18T,1969.
- [2] Sistema de regulación de electrodos de horno de arco eléctrico:  
Digitarc plusm, Manual del usuario, AMI-GE 2003.
- [3] A. Piedrahita “Calidad de la Potencia”, Tesis de maestría de la Universidad de los Andes, 1993.
- [4] M. Echeverry, “Simulación del horno de arco eléctrico de Acerías de Caldas”, Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia, 1996.
- [5] S. Varadan, E. B. Makram, A. A. Girgis, “A New Time Domain Voltage Source Model for An Arc Furnace Using EMTP”, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 11, No. 3, pp. 1685-1691, July 1996.

# CAPITULO 9:

## CONCLUSIONES, APORTES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

### *RESUMEN*

*En este último capítulo se resumen las principales conclusiones a las que se fue llegando durante los desarrollos de los siete capítulos anteriores y se presentan diversos aportes que han sido el resultado de las investigaciones que se realizaron.*

*Para finalizar, se presentan las posibles líneas de investigación que han surgido de manera natural con la realización de esta tesis y que deberían ser estudiadas en futuros trabajos.*

**CAPÍTULO 9:**  
***Conclusiones, aportes y futuras líneas de investigación***

***9.1 Conclusiones generales:***

- Se ha definido la potencia trifásica en el marco de la transformada ondita.
- Se realizó una recopilación de los métodos más comunes para simulación de eventos transitorios con miras a la evaluación de la calidad de la potencia, utilizando las definiciones de potencia desarrolladas.
- Se comprobó la aplicabilidad de los modelos utilizados aquí, por medio de ensayos de laboratorio similares a las cargas no lineales más comunes en redes de distribución.
- Se diseñó una técnica fundamentada en reglas heurísticas, que determina el tipo de perturbación bajo análisis (denominada pqAT).
- La metodología desarrollada en pqAT será aplicable en aquellos sistemas donde se disponga de la adquisición instantánea de tensión y corriente, pues los estudios realizados en este sentido se basaron siempre en la definición de potencia instantánea. Al respecto, conviene destacar que los sistemas de adquisición distribuidos actualmente disponibles tienen la capacidad de ser sincronizados.
- Las curvas de calidad permitieron definir las reglas heurísticas de clasificación en pqAT y se fundamentan en los espacios de calidad. Entre las curvas más destacables está la relación ruido/señal (Curva RDD\_) en el marco de la transformada ondita (multirresolución).
- Para la simulación de casos con elementos no lineales se utilizó el programa para análisis de transitorios electromagnéticos ATP que demostró ser también adecuado para la simulación de sistemas típicos de la electrónica de potencia.
- Se demostró que el programa ATP resulta apropiado para simular el arco eléctrico, dado que el comportamiento de sus parámetros en función de la conductancia, permite simular adecuadamente el funcionamiento de hornos de arco eléctrico, con vistas a obtener índices de calidad de potencia.
- Con este modelo de hornos de arco eléctrico se obtienen índices de calidad de potencia en concordancia con aquellos obtenidos de mediciones.

- La validez de las simulaciones empleando modelos de arco (como los aquí analizados) se encuadran dentro del rango de tiempo cuasi-estacionario para cada estado de la colada.
- Con el programa ATP se logró simular fenómenos transitorios ocasionados por cables de longitud superior a los 100 m, conectados a variadores de velocidad con motores de inducción.
- La técnica propuesta permitió evaluar el comportamiento de la estructura ASD–cable–motor hallándose índices de calidad concordantes con las mediciones de campo.

### **9.2 Aportes realizados:**

Entre los aportes realizados cabe destacar:

- Se propone una definición de las potencias activa y reactiva trifásicas en el marco de la transformada ondita.
- Se define la energía de perturbación y con esta definición la potencia de perturbación.
- Se brinda un resumen de las distintas combinaciones posibles para definir curvas de calidad.
- Se brinda un resumen de los distintos modelos que por su característica no lineal son la fuente de perturbación en los sistemas de distribución. Estos son evaluados en el marco de la transformada ondita.
- Se ha desarrollado la técnica pqAT para el análisis de la potencia eléctrica, esta técnica se puso a prueba utilizando el test de 13 barras para simulación de armónicos propuesto por el IEEE.
- Se desarrollaron reglas simples para discernir fenómenos transitorios de fenómenos estacionarios, que resultan fáciles de aplicar en un sistema de inferencia automático.
- Utilizando las curvas desarrolladas (curvas de calidad) la técnica propuesta incorpora la capacidad de identificación de cargas. Provee un amplio rango para los propósitos de identificación, siendo útil tanto en aplicaciones para la identificación de equipo de electrónica de potencia, arco eléctrico o para la identificación de cargas desbalanceadas.
- Dentro de la evaluación de la calidad de la potencia, esta técnica muestra quién es el responsable ante un evento de perturbación y en qué medida. Se apoya en el flujo de la energía (signo) y la evaluación del índice de calidad definido como QDI.
- La pqAT incluye elementos de decisión simples en su formulación y se basa en los desarrollos y definiciones de potencia eléctrica propuestos en esta

tesis. El motor de inferencia de la tesis se basa en pocas reglas de simple interpretación.

- Con el parámetro físico determinado se midieron tres tipos de fuentes que producen distorsión en redes trifásicas. Estas mediciones mostraron la concordancia de las definiciones con los métodos tradicionales
- Al definir la energía de perturbación se aportó un procedimiento para determinar la perturbación vista por cada instrumento instalado en la red.

Es posible seguir el grado de perturbación y verificar en que magnitud afecta a los usuarios el índice de calidad que se ve en cada nivel de descomposición y que fue definido en esta tesis como PDQI.

### ***9.3 Futuras líneas de investigación:***

Como futuras líneas de investigación están resumidos aquellos aspectos que resultaron ser potencialmente muy interesantes pero cuyo alcance escapa a los objetivos primarios de este trabajo.

- Es necesario investigar la definición de potencia activa y reactiva utilizando bancos de filtros para analizar las sub-bandas o agregar un sistema de multirresolución en las sub-bandas (por onditas). Con ello se logrará mayor precisión en la localización “tiempo- frecuencia” de eventos transitorios.
- Respecto de la capacidad de localización del disturbio, la calibración de los instrumentos debe ser aún estudiada para lograr el ajuste automático. Para esto es necesario desarrollar un programa de cálculo de parámetros que permita tener varias tablas de multirresolución de acuerdo a los cambios suaves o abruptos del vector de potencia instantánea.
- El empleo rutinario de la metodología desarrollada, posibilitará el análisis de las perturbaciones utilizando técnicas de inteligencia artificial tales como la lógica difusa, las redes neuronales o los algoritmos genéticos, en el motor de inferencia del sistema pqAT.
- Sería muy conveniente el desarrollo de un sistema de adquisición de datos distribuido que permita adquirir todas las señales de tensión y corriente en forma sincrónica. Como la técnica desarrollada permite comprimir la información registrada por cada lectura, esto permitiría pensar en métodos menos rígidos para la adquisición.
- Los hornos de arco eléctrico merecen un capítulo aparte de análisis y resultaría necesario desarrollar un modelo que permita reproducir los tres estados del sistema en una sola simulación. Sin embargo, las diferencias temporales entre los transitorios electromagnéticos y los tiempos propios de las transferencias de calor, hacen del problema un caso complejo de simulación, muy exigente en cuanto a requerimientos de memoria.