

2.3.2 Potencia activa y reactiva en el marco transformado:

El valor medio de la expresión (2.25) es exactamente el mismo valor de la potencia poliarmónica.

De (2.25) se tiene que:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T i_t v_t dt \equiv \frac{1}{2^N} \sum_{n=0}^{2^N-1} i_n v_n \Rightarrow$$

$$P_{3\phi} = \sum_{l=\alpha,\beta,0} \left(\frac{1}{2^N} \sum_{j \geq j_0}^{2^{j_0}-1} c_{j_0,k,l} c'_{j_0,k,l} + \sum_{j \geq j_0}^{N-1} \frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2^j-1} d_{j,k,l} d'_{j,k,l} \right)$$

$$P_{3\phi} = P_{j_0} + \sum_{j \geq j_0}^{N-1} P_j \quad (2.33)$$

Igualmente, se puede hacer el análisis para la potencia reactiva según (2.26):

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T i_t v_{t-90} dt \Rightarrow Q_{3\phi} = \left(\frac{1}{2^N} \sum_{j \geq j_0}^{2^{j_0}-1} c_{j_0,k,\alpha} c'_{j_0,k,\beta} + \sum_{j \geq j_0}^{N-1} \frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2^j-1} d_{j,k,\alpha} d'_{j,k,\beta} \right) -$$

$$\left(\frac{1}{2^N} \sum_{j \geq j_0}^{2^{j_0}-1} c_{j_0,k,\beta} c'_{j_0,k,\alpha} + \sum_{j \geq j_0}^{N-1} \frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2^j-1} d_{j,k,\beta} d'_{j,k,\alpha} \right)$$

$$Q_{3\phi} = Q_{j_0} + \sum_{j \geq j_0}^{N-1} Q_j \quad (2.34)$$

Nótese que el desfase en 90° de la tensión respecto de la corriente se logra directamente de las componentes en cuadratura del plano transformado $\alpha - \beta$. Este avance, en comparación con la propuesta de [30] para medir la potencia reactiva, permite la correcta ponderación de esta magnitud en sistemas trifásicos.

La base teórica para el cálculo de las ecuaciones. (2.18) – (2.26) surge de la igualdad de Parseval [26-28]. Una descripción del teorema de conservación de la energía se ve en el apéndice B.

2.4 Análisis Comparativo de la Potencia Reactiva con el método de Yoon:

Yoon [29-30] formuló la base teórica para el cálculo de la potencia reactiva a partir de la transformada ondita. Para lograrlo tuvo que diseñar una red de filtros digitales que le permitiesen lograr el desfase de 90° necesarios para mantener la condición de cuadratura entre las corrientes y las tensiones de fase.

En consecuencia, el método presenta dos condiciones:

La primera: es un método de cálculo de potencia monofásica.

La segunda: Necesita crear una red adicional para lograr el desfase por cada banda de transformación en el algoritmo de multirresolución. Para ello investigo dos métodos:

“Aproximación de mínimo rizo” (Butterworth de primer orden).

“Aproximación de Rizado Equivalente” (elíptica)

A continuación se describe el método de rizado equivalente.

Utilizando funciones de Jacobi elípticas junto con transformaciones bilineales, se puede construir un sistema en cuadratura.

Asumiendo dos fases $\phi_1 = 90 - \varepsilon$ y $\phi_2 = 90 + \varepsilon$ con ε , la incertidumbre, muy pequeña. El procedimiento para la construcción de tal sistema en el ancho de banda $\omega_a < \omega < \omega_b$, es el siguiente:

1. determine:

$$k = \frac{\tan\left(\frac{\omega_a}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\omega_b}{2}\right)} \text{ y } k_1 = \frac{\tan\left(\frac{\phi_1}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\phi_2}{2}\right)} = \left(\frac{1 - \tan\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)}{1 + \tan\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)} \right)^2 \quad (2.35)$$

2. determine el orden $N' = (K'(k)K(k_1)/K(k)K'(k_1))$ forcé N' al entero siguiente. Donde $K(k)$, $K'(k)$, $K(k_1)$ y $K'(k_1)$ son integrales elípticas de primer orden, así entonen $K(k)$ y $K'(k)$ se definen respectivamente:

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\phi}{(1 - k^2 \sin^2 \phi)^{1/2}} \text{ y } K'(k) = K\sqrt{1 - k^2} \quad (2.36)$$

3. Calcule los coeficientes de la red en cuadratura con la siguiente expresión:

$$p_l = -\tan\left(\frac{\omega_a}{2}\right) \frac{\text{sn}\left[\frac{(4l+1)K'(k)}{2N',k'}\right]}{\text{cn}\left[\frac{(4l+1)K'(k)}{2N',k'}\right]} \quad (2.37)$$

para $l = 0, 1, \dots, N' - 1$, y sn y cn son funciones elípticas de Jacobi.

4. Los coeficientes de la red directa y en cuadratura quedaran así respectivamente:

$$z_{1,l} = \frac{1 + p_l}{1 - p_l} \text{ y } z_{2,l} = \frac{1 - p_l}{1 + p_l} \quad (2.38)$$

2.4.1 Evaluación de la técnica de Yoon y la técnica pqAT:

Basado en el método anteriormente descrito se propone un ejemplo de aplicación como elemento comparativo de los algoritmos desarrollados, los valores de tensión y corriente se suponen simétricos para asemejarlo al sistema trifásico. La tabla 2.1, y 2.2 se tomó de la referencia [30] los resultados logrados con (2.33) y (2.34) se denominan en la tabla 2.2 cálculos con pqAT.

Análisis de una señal simulada:

Se aplica la técnica expresada por las ecuaciones (2.25) a (2.34) a una simulación para validar los resultados, ésta considera el caso estacionario. La ventana rectangular se utilizó múltiplo de la fundamental, con la intención de disminuir la dispersión espectral, se tomaron 14 periodos de 60 Hz, como tiempo de simulación.

Se hace el cálculo de la energía para los valores de tensión y corriente que se han simulado a partir de (2.25) y (2.26) utilizando la tabla 2.1. Finalmente, el cálculo de la potencia activa y reactiva se compara con la técnica de Yoon en la tabla 2.2, La red de Yoon utilizada para generar la descomposición en cuadratura fue la descrita en la sección 2.4 y se compran los resultado en la tabla 2.2.

Tabla 2.1: Valores fasoriales de las señales simuladas

Orden del Armónico	1 ^{er}	5 ^{to}	11 ^{avo}	13 ^{avo}	23 ^{avo}	45 ^{avo}
Ángulo de la corriente	60°	0	0	0	0	-45°
Ángulo de la tensión	0	150°	0	90°	-45°	45°

En la simulación de las señales se utilizó un valor eficaz de la magnitud de cada armónico igual a uno.

Se trabajó con una frecuencia de muestreo de $f_s = 8192\text{Hz}$. Un tiempo máximo de registro de 0,24 segundos.

Los resultados de aplicar el método Yoon [29,30], y las ecuaciones (2.25) a (2.34) así como los datos teóricos se ven en la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Potencia activa y reactiva usando los coeficientes wavelet

Nivel	Método Yoon		Método pqAT		Cálculo teórico	
	P	Q	P	Q	P	Q
5	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
4	0,707	-0,707	0,707	-0,707	0,707	-0,707
3	1,000	0,999	1,000	0,999	1,000	1,000
2	-0,866	0,500	-0,866	0,500	-0,866	0,500
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1*	0,500	-0,866	0,500	-0,866	0,500	-0,866
Potencia total	1,341	0,927	1,341	0,927	1,341	0,927
Error	0,00006%	-0,0099%	0,00008%	0,00046%	0	0

La figura 2.1 muestra la potencia real e imaginaria para un periodo de la frecuencia fundamental. La Ondita madre utilizada fue “db4” para el caso pqAT. El método de evaluación de la serie hacen muy sensible la precisión del calculo, para este caso se utilizó la técnica de extensión por “zero – padding” [27].

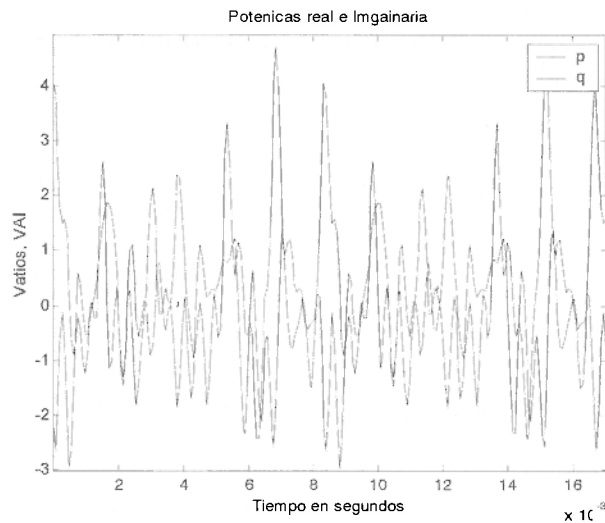


Figura 2.1: Potencia real e imaginaria de las señales simuladas.

Se ha planteado una técnica para medir la potencia activa y reactiva en sistemas trifásicos, utilizando la teoría de potencia instantánea y la transformada Ondita.

2.5 Conclusiones:

- ◆ La generalización del método de Fryze conduce a la formulación de la teoría de potencia instantánea según Akagi y Nabae.
- ◆ Medir la calidad de la potencia en el marco $\alpha - \beta - 0$ resulta bastante flexible, dada la generalización que este marco presenta respecto de la definición de la potencia instantánea real e imaginaria.
- ◆ La transformación $\alpha - \beta - 0$ es algebraica y no representa ningún retardo. Esta es una característica muy importante si se pretende hacer un monitoreo en tiempo real del sistema de potencia. No se requiere ninguna descomposición previa de la corriente ni de la tensión para medir la potencia reactiva. El algoritmo de medida de potencia en el plano transformado es directo.
- ◆ El algoritmo de multirresolución es más rápido que la FFT para el caso de la evaluación en tiempo real del sistema de potencia. Su capacidad de detección de eventos rápidos en los primeros niveles lo destaca entre los posibles métodos a elegir.
- ◆ El algoritmo de multirresolución mostró ser una forma de fácil interpretación física para descomponer la potencia instantánea en sus partes real e imaginaria.

- ◆ Basándose en la teoría de potencia instantánea en el marco de la transformada ondita, se ha definido la potencia de perturbación S_D en ella se incluyen todas las componentes de potencia en bandas de frecuencia, no deseadas.
- ◆ La energía oscilante resultante de la potencia real e imaginaria es un parámetro capaz de detectar la fuente de la perturbación, dado que es una energía signada (flujo de la energía de perturbación). Como representa toda la distorsión no deseada de la señal de potencia instantánea, ella es capaz de caracterizar el tipo de perturbación presente en el sistema.
- ◆ La ventaja de medir esta energía en el marco transformado radica en la poderosa propiedad de localización tiempo-escala (banda de frecuencias), que presenta la transformada ondita. Esta información adicional permite aplicar el análisis a eventos transitorios, tales como los fallos simultáneos.
- ◆ Se ha planteado la base matemática de una técnica para evaluar la calidad de la energía. Esta se denominará técnica pqAT.

2.5 Referencias bibliográficas correspondientes al capítulo 2

- [1] P. H. Swart, M. J. Case, J.D. Van Wyk, "On techniques for Localization of Sources Producing Distortion in Electric Power Networks" ETEP Eur. Trans. On Electr. Power Eng. Vol. 4, No. 6, pp. 485-490.
- [2] V. G. Smith, "Reactive and Fictitious Power" A.I.E.E. Trans. September 1933, pp.748-751.
- [3] C. L. Fortescue "Power, Reactive Volt-Amperes, Power Factor" A.I.E.E Trans. September 1933, pp.758-762.
- [4] J. L. Williams "Mathematical Foundations of the Instantaneous Power Concepts: A Geometrical Approach", ETEP Eur. Trans. On Electr. Power Eng. Vol. 6, No. 5, pp. 299-314.
- [5] A. Ferrero "Some Considerations about the Best Approach to the Study of Electric Systems Under Non-Sinusoidal Conditions: Frequency-Domain or Time-Domain Approach?", ETEP Eur. Trans. On Electr. Power Eng. Vol. 4, No. 6, pp. 499-502.
- [6] R. Sasdelli, A. Menchetti "Some Remarks on Power Theories", ETEP Eur. Trans. On Electr. Power Eng. Vol. 4, No. 6, pp. 457-462.
- [7] S. Fryze, "Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nicht-sinusförmigen Verlauf von Strom und Spannung", ETZ-Arch. Elektrotech., Vol. 53, 1932, pp. 596-599.
- [8] S. Fryze, "Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nicht-sinusförmigen Verlauf von Strom und Spannung", ETZ-Arch. Elektrotech., Vol. 53, 1932, pp. 625-627.
- [9] S. Fryze, "Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nicht-sinusförmigen Verlauf von Strom und Spannung", ETZ-Arch. Elektrotech., Vol. 53, 1932, pp. 700-702.
- [10] L. S. Czarnecki, T. Swietlicki, "Powers in Nonsinusoidal Networks: Their Interpretation, Analysis, and Measurement", IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement, Vol. 39. No. 2, April 1990, pp. 340-345.
- [11] E. H. Watanabe, R. M. Stephan, M. Aredes "New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers In Electrical Systems with Generic loads", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 8, No.2, April 1993, pp. 697-703.
- [12] IEEE Working Group on Non Sinusoidal Situation, "Practical Definitions for Powers in Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 11, No.1, January 1996, pp. 79-101.

- [13] IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms. ANSI/IEEE Std. 100-1992, The Ins. of Electrical and Electronics Engineers, Inc. New York, 1992.
- [14] A. E. Emmanuel “On the Definition of Power Factor and Apparent Power in Unbalanced Polyphase Circuits With Sinusoidal Voltage and Currents”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No.3, July 1993, pp. 841-852.
- [15] A. E. Emmanuel “ Apparent and Reactive Powers in Three-Phase Systems: In Search of a Physical Meaning and a Better Resolution”, ETEP Eur. Trans. on Electr. Power Eng. Vol. 3, No. 1, pp. 7-14.
- [16] E. Clarke, “Circuits Analysis of A-C Power Systems, Vol I- Symmetrical and Related Components”, New York: John Wiley and Sons, Inc. 1943.
- [17] ---- 1938, "Problems solved by Modified Symmetrical Components: Part I, Unsymmetrical Circuits, faults, and Open Conductors" General Electric Review, Vol. 41, No. 11, 1938, pp.488-494.
- [18] ----- 1938, "Problems solved by Modified Symmetrical Components: Part II: Open-delta and Scott-Connected Transformer and autotransformer banks." General electric Review, Vol. 41, No. 12, 1938, pp.546-549.
- [19] H. Akagi, A. Nabae, “The p-q Theory in Three- Phase Systems under Non-Sinusoidal Conditions” European Transactions on Power Systems, ETEP vol. 3, No.1, pp. 27-30, January/February 1993.
- [20] A. Nabae, T. Tanaka, “A New Definition of Instantaneous Active – Reactive Current and Power Based on Instantaneous Space Vectors on Polar Coordinates in Three- Phase Circuits”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 11, No.3, July 1996, pp. 1238-1243.
- [21] L. Cristaldi, A. Ferrero, G. Superti Furga, “Power and Current Decomposition into Time- and Frequency – Domain Componentes: Analysis and Comparison”, ETEP Eur. Trans. On Electr. Power Eng. Vol. 4, No.5, pp. 359-369.
- [22] E. Watanabe, M. Aredes, “Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações –Filtros Ativos e FACTS-, Memorias Curso de Electrónica de Potencia, Instituto de Energía Eléctrica, Universidad Nacional de San Juan, Agosto de 1998.
- [23] M. Aredes, E. Watanabe, “New Control Algorithms for Series and Shunt Three-Phase Four-Wire Active Power Filters”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 10, No.3, July 1996, pp. 1649-1656.
- [24] L. Salvatore, M. Savino, “Time- Frequency Representations of Instantaneous Complex Power; Voltage and Current Space Vectors”, ETEP Eur. Trans. On Electr. Power Eng. Vol. 4, No.5, pp. 395-401.

- [25] G. Andria, F. Attivissimo, M. Savino, "Instantaneous Power Measurement in Time-Frequency Domain", *ETEP Eur. Trans. On Electr. Power Eng.* Vol. 6, No.5, pp. 351-356.
- [26] I. Daubechies "Ten Lectures on Wavelets" Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992.
- [27] M. Vetterli, J. Kovacevic, "Wavelets and Subband coding" Prentice Hall 1995.
- [28] G. Strang and T. Nguyen, "Waveletes and Filter Banks" Wellesley-Cambridge Press, 1996.
- [29] W. Yoon, M. J. Davaney, "Power Measurement Using the Wavelet Transform", *IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement*, Vol. 47. No.5, October 1998, pp. 1205-1210.
- [30] W. Yoon, M. J. Davaney, "Reactive Power Measurement Using the Wavelet Transform", *IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement*, Vol. 49. No.2, April 2000, pp. 246-252.
- [31] H. Akagi, A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices without Energy Storage Components" *IEEE Trans. On Industry applications*, Vol.IA-20, No.3, May/June 1984, pp. 625-630.

CAPÍTULO 3:

DEFINICIONES PARA LA TÉCNICA PQAT

RESUMEN

En este capítulo se define la calidad de un sistema eléctrico desde dos puntos de vista, primero como un conjunto de propiedades y características, luego como un grado de excelencia. Se pone énfasis en que las propiedades y características deben provenir de los parámetros conservativos del sistema, para poder definir a partir de ellos el grado, nivel o curva de excelencia. En este capítulo se propone un sistema para la evaluación de la calidad de la potencia eléctrica, que se denominará pqAT.

CAPÍTULO 3:
Definiciones para la técnica pqAT

3. INTRODUCCIÓN:

Determinar responsabilidades con relación a la calidad de la potencia eléctrica implica primero definir claramente el concepto “Calidad de la Potencia”, de la misma forma que los escenarios que se generan cuando la meta es hacer uso eficiente de la energía eléctrica.

La exposición que se desarrolla a continuación, introduce algunas definiciones básicas para el desarrollo de esta tesis. Se comienza estableciendo qué se entiende por “determinar responsabilidades con relación a la calidad de la potencia eléctrica”. Se introduce un criterio de calidad y se concluye exponiendo diversos temas que luego servirán para proponer soluciones al problema de identificación de cargas y perturbaciones.

En la actualidad muchos autores y grupos de trabajo pretenden unificar el tratamiento y las definiciones sobre la operación de sistemas eléctricos en condiciones no senoidales y desbalanceadas [1].

3.1 Definiciones básicas:

Los requisitos a cumplir en relación con las definiciones que se van a presentar son [2]:

- No tener contradicciones lógicas.
- No generar contradicciones a las teorías planteadas en la literatura.
- Que sean de uso práctico.

Definición 3.1 – Calidad:

Se define por una serie de atributos de un objeto o proceso físico que propenda a que este objeto o proceso esté en condiciones óptimas (mantenga un grado de excelencia).

Comentario: Esto implica hacer una enumeración de los atributos del objeto o proceso bajo evaluación y determinar su grado de excelencia.

Definición 3.2 - Potencia o energía eléctrica:

Es un objeto físico caracterizado por una serie de atributos que se pueden expresar en forma matemática. Su lógica está axiomatizada por el principio de conservación.

Comentario: Esta definición supone el conocimiento claro del fenómeno electromagnético y su proceso para producir el objeto; la energía o potencia eléctrica.

Definición 3.3 – Atributos:

Son elementos con los cuales se hace la definición de calidad, en sistemas trifásicos, son los representados por los conjuntos de variables que conforman las definiciones de potencia instantánea, estos es la corriente i y tensión v instantánea $\{i_1, i_2, \dots, i_{m-1}, v_1 - v_m, v_2 - v_m, \dots, v_{m-1} - v_m\}$, donde m es el número de terminales de sistema.

Comentario: Estos atributos describen el estado de transmisión de energía en todo momento sin considerar aún su grado de excelencia, puede ser de interés para fenómenos transitorios.

Definición 3.4 - Atributos primordiales de calidad:

Se definen como el conjunto de las potencias real, imaginaria y de secuencia cero, absorbidas por el sistema trifásico durante un período de observación. $\{p(t), p_0(t), q(t)\} t \in [0, nT], \forall n \in N$

Comentario: Estos parámetros que definen una calidad primordial, son considerados bajo un período o para un múltiplo entero de períodos, que será necesario y suficiente para conocer toda la información concerniente a la transferencia de potencia y energía electromagnética de cualquier sistema trifásico. A partir de esta información, se pueden derivar los parámetros considerados en el marco de la transformada ondita, presentados en el capítulo 2.

Definición 3.5 – Responsabilizar:

Es el acto de identificar la fuente de deterioro de un atributo que reduce la calidad del objeto bajo evaluación.

Comentario: La definición 3.5 introduce necesariamente el concepto de flujo de la perturbación, desde el punto de vista del mismo objeto evaluado, es decir flujo de potencia o energía de perturbación.

3.2 Espacios y curvas de calidad:

La teoría de control plantea el seguimiento de una trayectoria por parte de las llamadas variables de estado del sistema [3]. Esto sugiere la idea de un planteamiento similar para vislumbrar el problema de identificación de la fuente de perturbación.

Definición 3.6 - Espacio de parámetros de calidad:

Es un espacio multidimensional, normado. Cada eje representa un parámetro y es de unidad diferente a los otros ejes.

Comentario: Estos espacios, cuyos parámetros fueron formulados en la definición 3.5, en principio serán espacios donde existe una medida o una norma, según el análisis funcional, donde surgen las definiciones de espacios de Banach y de Hilbert, claves en las aplicaciones y que mezclan estructuras topológicas, algebraicas y geométricas [3-4]. Haciendo uso de la definición de norma para tal espacio se puede llegar al análisis del grado de excelencia.

Definición 3.7 - Calidad óptima:

Es la calidad definida sobre una trayectoria óptima, y representa el mayor grado de excelencia.

Comentario: Una trayectoria es aquella función resultante en los espacios de calidad. Para el sistema de potencia, se intuye que el óptimo será el resultado de considerar la transferencia de potencia en un sistema resistivo balanceado. Con ella, se puede decir que se ha generado una función o trayectoria con parámetros óptimos para la transferencia de potencia. En la figura 3.1 se muestra gráficamente el concepto de trayectoria.

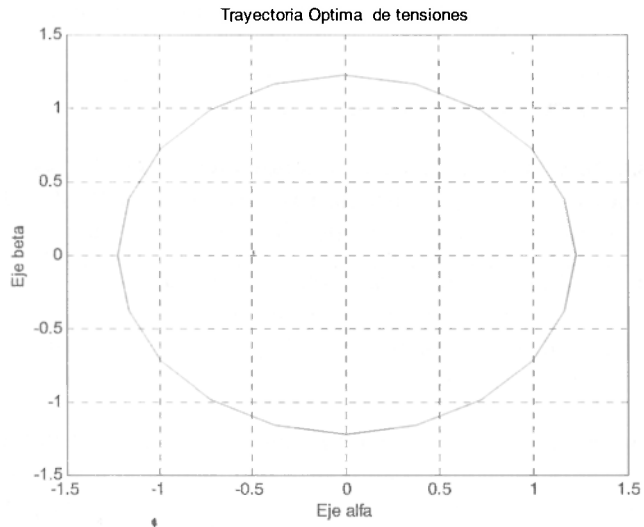


Figura 3.1: Representa el diagrama polar de las tensiones en vectores de Clarke en el caso de un sistema balanceado y senoidal.

Definición 3.8 - Estado relativo:

Es toda desviación del óptimo.

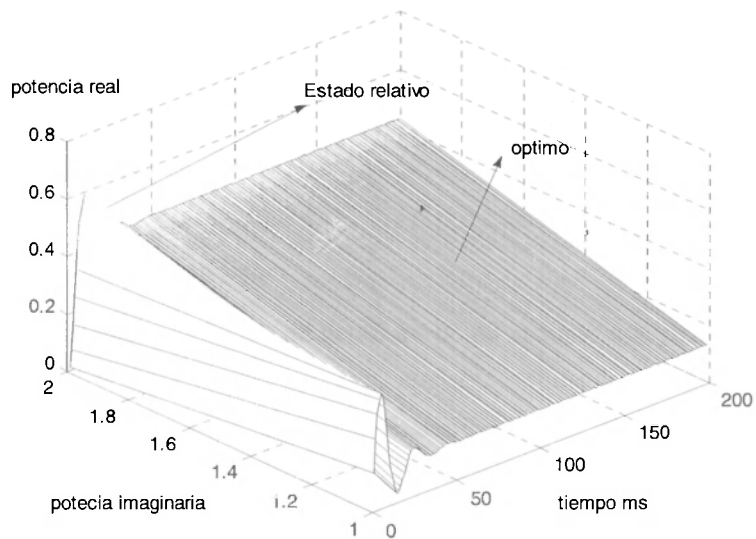


Figura 3.2: fenómeno de energización de una carga resistiva capacitiva, evolución de la potencia real e imaginaria.

Comentario: En el fenómeno transitorio descrito por la figura 3.2, la condición óptima del sistema se encuentra al llegar al estado estacionario unos milisegundos más tarde (150ms).

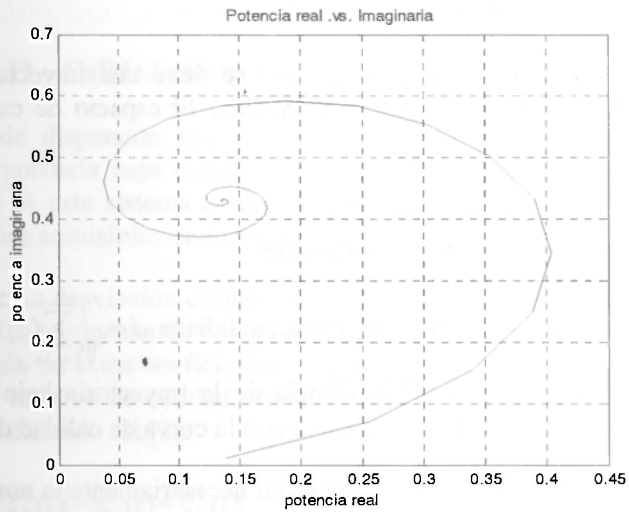


Figura 3.3: Representación de la potencia en el plano p,q, se ha omitido el eje temporal.

Definición 3.9 - Curva relativa de calidad:

Es aquella que se genera para describir el proceso del sistema teniendo como referencia las cargas de tipo resistivo balanceado. Esta curva se encuentra en el espacio de la definición 3.6 cuyas bases son generadas por los parámetros de calidad $\{p(t), p_o(t), q(t)\}; t \in [0, nT], \forall n \in N$.

Comentario: Con ello se puede decir que se tiene una trayectoria de calidad y cualquier desviación puede ser sujeta a la medida. El espacio de calidad puede ser discreto o continuo.

Definición 3.10 – Medida de la excelencia:

Se puede normalizar el espacio con norma euclidiana $d = \sqrt{\sum_{k=1..n} (\xi_k(t) - \xi'_k(t))^2}$ que representa la medida del grado de excelencia de la trayectoria bajo evaluación $\xi_i(t)$ respecto de la óptima $\xi'_k(t)$. Como se muestra con la curva de calidad de la figura 3.4.

Comentario: Por ser espacios de Hilbert, no necesariamente la norma euclidiana es la mejor. Sin embargo, para el desarrollo presentado en esta tesis se escogió esta norma debido a la correlación que se puede tener con la definición de potencia de perturbación, presentada en el capítulo 2.

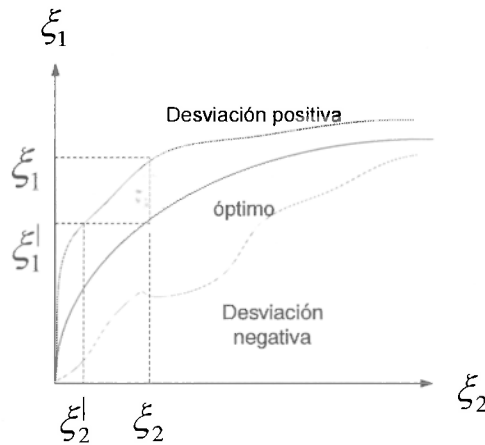


Figura 3.4: Espacios de calidad. Óptimo y curvas de calidad relativa.

De esta manera se llega a la definición del índice de calidad. Se puede utilizar el espacio de parámetros continuos o parámetros discretos $\{L^n, l^n\}$. Como es un trabajo que se puede llevar al marco transformado, la medida e integral en él serán definidas según Lebesgue [5] y se puede hacer el análisis en el espacio discreto.

Definición 3.11 – Calidad relativa:

La medida de dispersión respecto de una curva que representa el óptimo de transferencia de potencia bajo condiciones libres de contaminación de cualquier tipo, define la calidad de este sistema respecto a esta curva. Con ella, se puede generar un tubo de trayectorias admisibles dentro del sistema.

Comentario: La desviación estándar es una medida de dispersión que aplicada a los coeficientes ondita representa la energía de una onda, para la cual el valor medio es cero. La dispersión de estos coeficientes con relación a una carga lineal resistiva pura origina un grado relativo de calidad. Pensando en el marco temporal el índice relativo de calidad queda definido así [2]:

$$q_k = \frac{|\xi_{ka}(t) - \xi_k^0(t)| - |\xi_k(t) - \xi_k^0(t)|}{|\xi_{ka}(t) - \xi_k^0(t)|}, \tag{3.1}$$

donde ξ_{ka} es el máximo admisible del parámetro, ξ_k^0 es la trayectoria óptima y ξ_k es el registro.

Una proyección de (3.1) en el marco transformado conduce a las definiciones 3.12 y 3.13.

Definición 3.12 - Índice particular de desviación de la calidad:

Se define como la razón entre las desviaciones estándar de los coeficientes de reconstrucción de la energía real o imaginaria, del nivel a, respecto de la desviación estándar de los coeficientes del nivel a de un sistema de las mismas características pero resistivo

$$PDQI = \frac{std(d_a) - std(d_{Resistivo})}{std(d_a)} \tag{3.2}$$

donde std representa el símbolo de desviación estándar, d_a representa el valor de los coeficientes ondita en el nivel a para la potencia instantánea medida en dicho nivel y $d_{Resistivo}$ representa el valor de los coeficientes ondita para una potencia que consume una carga resistiva en el mismo nivel a .

Definición 3.13 - Índice global de la calidad de la potencia:

Es la sumatoria de las desviaciones estándar que resultan de las diferencias entre los coeficientes de reconstrucción de la señal de potencia real de la carga bajo evaluación en comparación del óptimo, por cada nivel, dividido por la suma de la desviación de los coeficientes de la carga, estos se simbolizan como d_a en la ecuación (3.3).

$$DQI = \frac{\sum_{a=1..n} std(d_a - d_{Resistivo_a})}{\sum_{a=1..n} std(d_a)} \quad (3.3)$$

donde n es el nivel máximo de descomposición en el algoritmo de multiresolución.

Comentario: Se observa la correlación existente entre la potencia de perturbación S_D (2.27) y la desviación estándar de los coeficientes onditas, es por ello que el índice DQI engloba el concepto que tradicionalmente se ha tenido de factor de potencia.

Definición 3.14 - Determinar responsabilidades con relación a la calidad de la potencia eléctrica:

Es la evaluación en un punto de monitoreo de los índices de calidad dados por las definiciones 3.12 y 3.13, asignando la responsabilidad del deterioro de esta calidad a los signos que entregue el flujo de la energía de perturbación (2.24, 2.25), identificando si fue adelante o atrás del instrumento. La técnica desarrollada para la evaluación de este flujo y de estos índices de calidad se denomina pqAT, en virtud de estar fundamentada en la teoría de la potencia instantánea y la transformada ondita.

3.3 Técnica pqAT:

En la actualidad se han realizado muchos trabajos respecto a la clasificación y caracterización de disturbios [6-16].

Aquí se propone la técnica denominada pqAT que es un algoritmo cuyo objetivo es la caracterización y la clasificación de cargas y disturbios en el sistema; así como también medir el consumo de potencia del sistema.

El método de análisis de la señal parte de las definiciones de potencia instantánea y luego se hace la transformación al marco de la transformada ondita. Allí se determinan los parámetros de potencia activa, reactiva y de perturbación.

La figura 3.5 muestra la estructura de la técnica para la medida de la potencia y la clasificación de eventos en sistemas de potencia.

En el diagrama se observan 13 bloques, divididos a su vez en tres estructuras, la estructura representada por los bloques de trazo continuo, intenta caracterizar los

fenómenos transitorios. Los bloques delineados por trazos largos, procuran medir la energía y la potencia en plano transformado y están pensados para los fenómenos en estado estacionario. Finalmente, se muestra una estructura punteada que básicamente es un motor de inferencia, éste a partir de unas reglas procura identificar el tipo de fenómeno que se ha registrado. A continuación se da una descripción de cada uno de los bloques.

- El bloque que mide la tensión y la corriente está realizado por un instrumento o por un sistema SCADA (tal como se hace en algunos sistemas actualmente) [6-8] para el monitoreo de diversos puntos de operación del sistema. La información obtenida pasa al siguiente bloque donde será transformada la tensión y la corriente del marco de fase a-b-c al marco α - β - 0 y luego a cada señal se le aplica el algoritmo de multirresolución.
- El cálculo de la energía y el flujo (su signo) es determinado a través de los resultados obtenidos en el capítulo 2 con este bloque y luego se procede a:
 - Determinar la potencia activa, reactiva y de perturbación de cada registro trifásico completo (tensión y corriente) según (2.27), (2.28) y (2.29).
 - Hallar la desviación estándar de los coeficientes ondita para la energía real e imaginaria según (2.24) y (2.25). Aquí se forma una matriz que guarda el dato y su desviación.
- Calcular en el siguiente bloque el índice particular de desviación de la calidad y el índice global de la calidad que se obtuvo en (3.2) y (3.3).

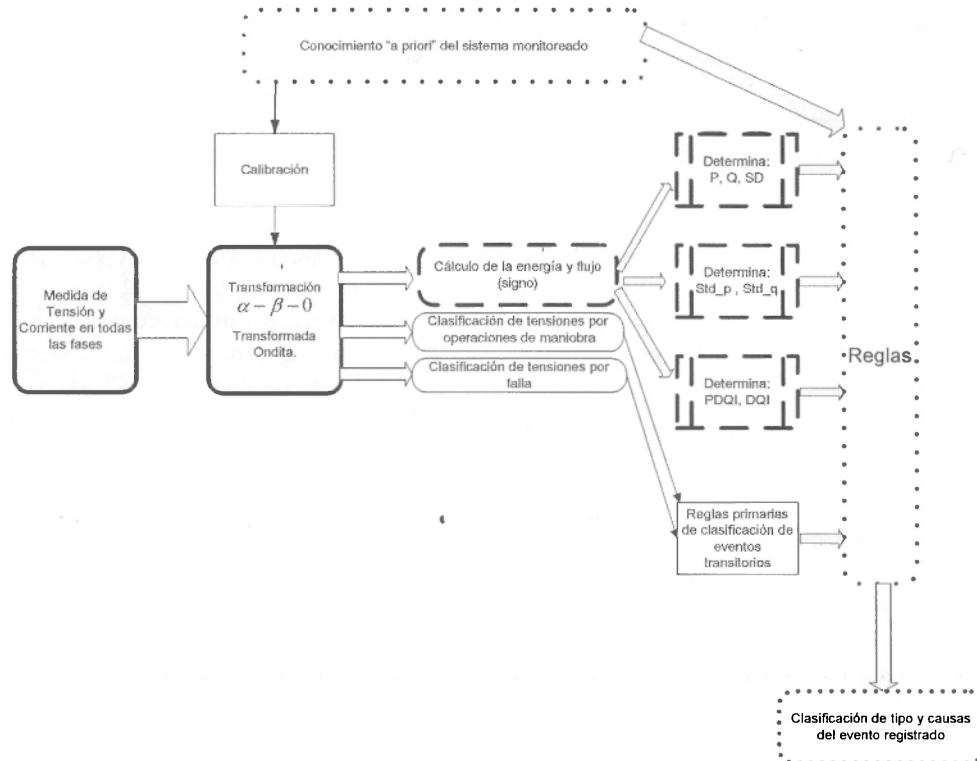


Figura 3.5: Estructura en diagrama de bloques de pqAT.

- La clasificación de tensiones por operaciones de maniobra se describe en el capítulo 5. Este bloque cubre eventos cuya caracterización se hace más eficiente en el marco temporal y tiene que ver con una disminución en el valor de la tensión. Los principales eventos caracterizados aquí son:
 - Energización de líneas.
 - Encendido de motores.
 - Puesta en servicio de banco de capacitores.
- El bloque de clasificación de tensiones debido a fallas, que muestra todos los aspectos de caracterización de fallas (eventualmente seguidas por la actuación del sistema de protecciones) será estudiado en el capítulo 5.
- Un bloque que representa la base de datos con los cuales se puede hacer planeamiento y operación del sistema monitoreado se utiliza para alimentar el motor de inferencia, que es el bloque demarcado como “reglas”. Allí se definen la premisas sobre las que se hace la identificación de carga y la clasificación de eventos transitorios. Este bloque, denominado conocimiento “a priori” del sistema, también alimenta el bloque de calibración.

- Estas premisas acompañadas del motor de inferencia producen los resultados que presentará el bloque de clasificación.
- En el bloque de calibración se ajustan dos parámetros, de los cuales dependerá todo el análisis por multirresolución, y que hace al método completamente dependiente de ellos. Estos parámetros son la frecuencia de muestreo y el número de niveles de descomposición. Para el caso del número de niveles, por ser una descomposición diádica (división del eje de frecuencias en octavas), se limitará también el tamaño de la señal a una cantidad de muestras múltiplo de dos, lo que concuerda con la mayoría de los instrumentos que utilizan la FFT.

La literatura actual muestra avances significativos en el tratamiento de la información desde el punto de vista de las técnicas de clasificación, utilizando la transformada ondita en sistemas de potencia. Desde los trabajos pioneros [15] hasta los resultados presentados en [6-13] se observan dos tendencias, la primera, el análisis y la segunda la clasificación. Con la técnica pqAT, se pretende unificar estos dos criterios y dar unidad a la manera de determinar tres efectos típicos del fenómeno electromagnético en sistemas trifásicos, el desbalance, los armónicos y los transitorios. Esto se logra a través de la estructura de sistema experto planteada por la figura. 3.5.

3.4 Conclusiones:

- Se ha definido la calidad desde dos puntos principales, como una serie de atributos de un objeto físico y un grado de excelencia que se debe calificar según esa serie de atributos.
- La primera parte de este capítulo propone la idea de cuantificar el grado de excelencia a través de la definición de los índices de calidad. Esto se basa en aquellos parámetros de tipo conservativo que se determinan a través de las definiciones de potencia instantánea.
- La segunda parte propone evaluar la calidad de la potencia eléctrica utilizando la estructura de un sistema experto dedicado a la medida y clasificación de perturbaciones, sistema que es denominado pqAT. La novedad que presenta esta técnica radica en que mediante el empleo de la misma estructura se unifica el análisis de desbalances, armónicos y transitorios en sistemas de potencia. La topología del sistema se ha planteado en la forma más general posible y se basa en los resultados obtenidos en el capítulo 2.

3.5 Referencias bibliográficas correspondientes al capítulo 3

- [1] A. Ferrero, “Definitions of Electrical Quantities Commonly Used in Non-Sinusoidal Conditions”, Eur. Trans. on Power Systems Eng. ETEP Vol. 8 No. 4, pp. 235-240 July/August 1998.
- [2] A. Tugulea, “Criteria for the Definition of the Electric Power Quality and its Measurement Systems”, Eur. Trans. on Power Systems Eng. ETEP Vol. 6 No. 5, pp. 357-363 September/October 1996.
- [3] H. K. Khalil, “Nonlinear Systems”, Prentice- Hall, Second Edition, 1996.
- [4] W. Rudin “Functional Analysis”, Mcgraw- Hill, Second Edition, 1973.
- [5] C. E. D’Attellis “Teoría Distribucional de Sistemas” Cursos y seminarios de matemáticas - Fascículo 34, Universidad de Buenos aires, 1988.
- [6] E. Styvaktakis, “On feature extraction of voltage disturbance signals”, Technical Report No. 340L, Department of signals and systems, School of electrical and computer engineering, Chalmers University of Technology, Sweden, March 2000.
- [7] S. Santoso, E. Powers, W.M. Grady, A. C. Parsons, “Power Quality Disturbance Waveform Recognition Using Wavelet-Based Neural Classifier – Part 1: Theoretical Foundation”, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 15, No. 1, pp. 222-228, January 2000.
- [8] S. Santoso, E. Powers, W.M. Grady, A. C. Parsons, “Power Quality Disturbance Waveform Recognition Using Wavelet-Based Neural Classifier – Part 2: Application”, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 15, No. 1, pp. 229-234, January 2000.
- [9] S. Huang, C. Hsieh, “High-Impedance Fault Detection Utilizing a Morlet Wavelet Transform Approach”, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 14, No. 4, pp. 1401-1410, October 1999.
- [10] G. T. Heydt, P. S. Fjeld, C. C. Liu, D. Pierce, L. Tu, G. Hensley, “Applications of the Windowed FFT to Electric Power Quality Assessment”, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 14, No. 4, pp. 1411-1416, October 1999.
- [11] O. Poisson, P. Rioual, M. Meunier, “Detection and Measurement of Power Quality Disturbances Using Wavelet Transform”, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 15, No. 3, pp. 1039-1044, July 2000.

- [12] S. Sansoto, M. W. Grady, E. J. Powers, J. Lamoree, S. Bhatt, "Characterization of Distribution Power Quality Events with Fourier and Wavelet Transforms", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 15, No. 1, pp. 247-254, January 2000 .
- [13] M. Karimi, H. Mokhtari, M. R. Iravani, "Wavelet Based On -Line Disturbance Detection for Power Quality Applications", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 15, No. 4, pp. 1212-1220, October 2000.
- [14] D. C. Robertson, O. I. Camps, J. S. Mayer, W. B. Gish, " Wavelets and Electromagnetic Power Systems Transients", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 11, No. 2, pp. 1050-1057, April 1996.
- [15] P. F. Ribeiro "Wavelet Transform: An advanced Tool For Analyzing Non-Stationary Harmonic Distortion in Power Systems", EPRI – Power Quality Steering Committee, Baltimore, MD, February 11, 1993.
- [16] Y. Gu, M. H. J. Bollen, "Time-Frequency and Time-Scale Domain Analysis of Voltage Disturbances", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 15, No. 4, pp. 1279-1284, October 2000.

CAPÍTULO 4:

IDENTIFICACIÓN DE CARGAS

RESUMEN

Esta sección está dedicada al estudio del sistema eléctrico en estado estacionario. Se mide la potencia eléctrica activa, reactiva y de distorsión, según las definiciones hechas en el capítulo 2, para diversos tipos de carga. Basándose en las definiciones realizadas, se hacen los cálculos para los parámetros de calidad en cada carga individual que se presenta en el sistema de potencia. Se consideraron cargas resistivas, inductivas y no lineales típicas de la electrónica de potencia. También, la menos común pero quizás la más severa: el horno de arco eléctrico. Dentro del esquema de identificación desarrollado se planteó una solución gráfica a partir de las curvas de calidad y en ellas se logró definir la característica de cada carga. Igualmente, de la misma curva, surgen de manera natural algunas reglas que van construyendo las reglas de clasificación y el motor de inferencia del sistema experto denominado pqAT. Este capítulo introduce una metodología orientada a la deducción de reglas heurísticas para la identificación de cargas, buscando definir la estructura de pqAT para el caso estacionario.

CAPÍTULO 4: *Identificación de cargas*

4. INTRODUCCIÓN:

Como se indicó en el capítulo 1, las técnicas existentes para el análisis de la calidad de la potencia eléctrica son inaplicables en el caso de sistemas polifásicos o bien son incompletas cuando se aplican al caso de cargas desbalanceadas.

Luego de establecer las bases matemáticas en el capítulo 2, en el capítulo 3 se establecieron las definiciones para proponer un sistema experto como herramienta de asignación de responsabilidades con relación a la calidad de la potencia.

Ahora, se pretende dar forma a la estructura, componente del sistema experto, que se dedicará al análisis del sistema eléctrico en estado estacionario. A partir de las definiciones de los parámetros basados en la teoría de la transformada ondita, se evaluará la distorsión y el desbalance, indicadores de la calidad vista en el “punto común de acoplamiento” o punto de interconexión entre el usuario y la empresa de suministro.

El índice de calidad emerge de considerar inadecuadas las normativas norteamericana [1] y europea [2]. En particular, estas normativas se concentran en la determinación de la distorsión armónica (total o individual) de la tensión o la corriente, pero no proveen información referente a la metodología para la localización y/o caracterización de la fuente de perturbación.

Muchos investigadores han destacado esta falencia y han intentado plantear soluciones alternativas [3-18]. Entre las propuestas para la identificación de disturbios, se ve muy prometedora la de A.M. Gaouda [19-20].

Para lograr la identificación de carga a través de algunas reglas, este capítulo presenta una modificación al método de Gaouda. El método es aplicable cuando se hace la medida de la energía real e imaginaria en el marco de la transformada ondita.

4.1 Parámetro para identificación de cargas:

En general, las compañías de suministro no tienen correctamente acotado el costo que puede ocasionar cualquier fallo o perturbación dentro del sistema, ya sea porque hay daños no cuantificables del lado del consumidor o porque sencillamente hay escenarios no considerados y que en términos generales se toman como una variable estocástica.

En esta parte del estudio la meta es adoptar un parámetro que pueda ser aplicado al usuario para penalización o para indemnización, de la forma similar a como se utiliza el factor de potencia.

Es conocido que la medida de un simple índice en un sólo lugar del sistema no da la información del estado del sistema [3,15]. Sin embargo, se intentó identificar un parámetro que cubra una serie de atributos que actualmente no se tienen en consideración:

- ◆ Se intentará distinguir entre la calidad de la energía suministrada y la degradación de dicha calidad introducida por una carga, cualesquiera sean las características de la red y del tipo de cargas analizadas.
- ◆ Deberá brindar una medida de la desviación respecto de la carga lineal y balanceada, o sea que la carga lineal y balanceada no resultará objeto de penalización pero sí aquella que introduzca distorsión y/o desbalance.
- ◆ Deberá ser práctico de usar. Generará índices que describan adecuadamente la calidad de la potencia y determinen claramente las responsabilidades en su degradación.

Muchos índices han sido propuestos en la literatura [10,11,14,17]. Algunos se basan en la estimación del factor de potencia, para lo cual es necesario como condición básica tener una definición precisa de la potencia aparente pero como se indicó en el capítulo 2, existen distintas definiciones para la potencia aparente en condiciones no senoidales en sistemas trifásicos. Otros índices, por el contrario, están orientados a la detección de la dirección del flujo de potencia para diferentes armónicos [3-9]. Como esta familia de índices provee información para la localización de la fuente de distorsión, ésta será la línea que se seguirá aquí.

4.2 Índice de calidad:

Las definiciones 3.12 y 3.13, mostraron al índice de desviación de la calidad como la relación ruido/señal de los coeficientes ondita $j > j_0$ entregados por el algoritmo de multirresolución con relación a un consumidor lineal y balanceado. Esta definición difiere de las propuestas realizadas en [3-9] en el aspecto de agruparse en bandas de frecuencia.

Como se mostró en la definición 3.13, el índice es básicamente la desviación estándar de los coeficientes ondita de cada banda de descomposición, menos los coeficientes ondita de la carga lineal resistiva equivalente, dividido por la desviación estándar de los coeficientes ondita de la carga a ser evaluada (3.3):

$$DQI = \frac{\sum_{a=1..n} std(d_a - d_{Re.sistivo_a})}{\sum_{a=1..n} std(d_a)}$$

donde los d_a son los coeficientes por cada nivel a de descomposición y n es el número de niveles,

$$d_{Re.sistivo_a} = \sum_{j=1..n} \sum_{k=-\infty}^{\infty} |d_{j,k}|^2, \quad (4.1)$$

siendo $d_{j,k}$ los coeficientes ondita para la potencia instantánea de una carga resistiva y balanceada.

4.3 Aplicaciones:

Utilizando la propiedad de localización en bandas de frecuencia de la transformada ondita, se obtiene una idea del grado de distorsión de la carga evaluada. De acuerdo con esta información, se pueden clasificar las distintas cargas (para el caso estacionario) o los distintos tipos de perturbación (para el caso transitorio) que se presenten en el sistema.

La figura. 4.1 muestra los bloques a desarrollar para obtener las reglas de identificación de carga a partir de las transformaciones.

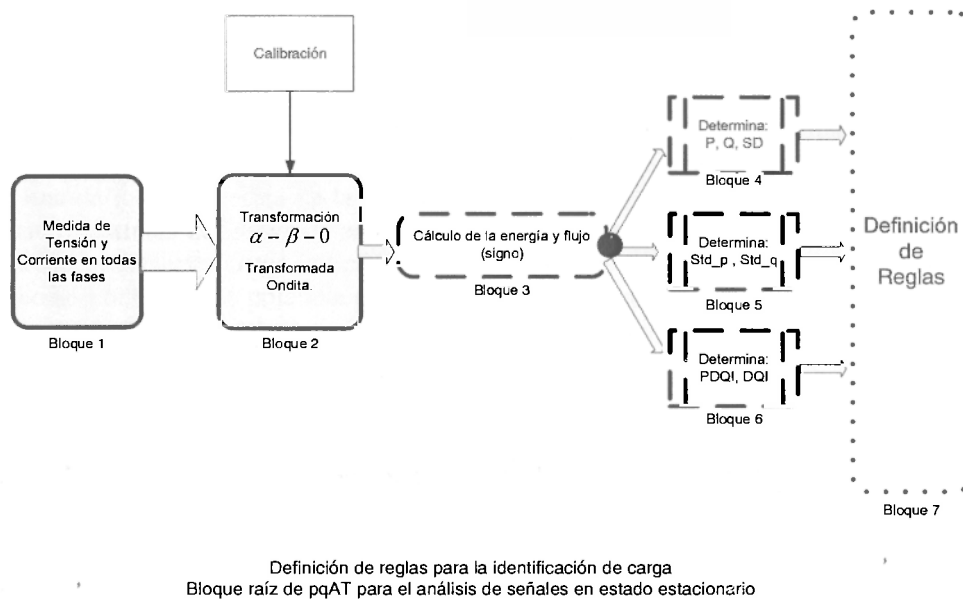


Figura. 4.1: Cuadro sinóptico de la estructura del sistema de evaluación a desarrollar en este capítulo.

4.3.1 Curva *std_MRA*:

Definición 4.1 [19,20] - Se define la **curva *srd_MRA*** como la descripción gráfica entre la desviación estándar de los coeficientes de reconstrucción de una señal de tensión y el nivel de reconstrucción. Esta curva extrae información para discriminar eventos transitorios de corta duración y la señal analizada es de tipo monofásico. En ella se diferencian tres grandes regiones “zona de sobretensión y caída de tensión”, “zona de altas frecuencias” y “zona de bajas frecuencias”.

$$std(v_i) = [std(\sum_k c'_{i_n,k}), std(\sum_{j \geq j_0} d'_{j,k})] \quad (4.2)$$

La conformación del vector *std_MRA* está expresada por la ecuación (4.2) donde *std* indica la desviación estándar de los coeficientes por cada nivel *j*.

4.3.2 Curva *std-p* y *std-q*:

La curva *std_MRA*, introducida por Gaouda [19,20], fue modificada para propósitos de identificación de carga, se denomina *std_p* y *std_q*, ellas definen la desviación de los coeficientes de reconstrucción por cada nivel para la energía real E_p e imaginaria E_q .

La principal diferencia de las curvas *std-p* y *std-q*, con la definición 4.1, radica en el tratamiento unificado de la señal trifásica, como una característica de un sistema conformado por las señales instantáneas *p* y *q*.

Definición 4.2 - Curva *std-p*

Es la descripción gráfica de la desviación estándar de los coeficientes de reconstrucción de la señal E_p en cada nivel de reconstrucción. Representa la energía asociada a cada banda de frecuencia proveniente de la potencia oscilante \bar{p} y el valor promedio, que representa la energía poliarmónica. Considerando que último nivel concentra la componente continua, entonces la desviación estándar es igual al valor eficaz de la energía asociada.

Esta curva se caracteriza por contener información compacta del sistema trifásico, pues es el resultado de la asociación de los coeficientes de tensión y corriente (parte real). Su expresión es:

$$std-p = [std(\sum_k c'_{j_0,k,\alpha} c_{j_0,k,\alpha}), std(\sum_{j \geq j_0} d'_{j,k,\alpha} d_{j,k,\alpha}), \\ std(\sum_k c'_{j_0,k,\beta} c_{j_0,k,\beta}), std(\sum_{j \geq j_0} d'_{j,k,\beta} d_{j,k,\beta}), \\ std(\sum_k c'_{j_0,k,0} c_{j_0,k,0}), std(\sum_{j \geq j_0} d'_{j,k,0} d_{j,k,0})] \quad (4.3)$$

Entiéndase por *std* a la desviación estándar.

Definición 4.3 - Curva std-q

De manera similar, es la descripción gráfica de la desviación estándar de los coeficientes de reconstrucción de la señal E_q en cada nivel de reconstrucción. Con estos coeficientes se conforma la curva std-q. Representa la energía asociada a cada banda de frecuencia proveniente de la potencia oscilante \bar{q} y el valor promedio, que representa la energía poliarmónica imaginaria.

Igualmente, esta curva se caracteriza por contener información compacta del sistema trifásico, pues es el resultado del análisis de la señal E_q (parte imaginaria de la energía).

El vector se construye como lo muestra la ecuación (4.4).

$$\begin{aligned} std - q = [std(\sum_k (c'_{j_0, k, \alpha} c_{j_0, k, \beta} - c'_{j_0, k, \beta} c_{j_0, k, \alpha})), \\ std(\sum_{j \geq j_0} (d'_{j, k, \alpha} d_{j, k, \beta} - d'_{j, k, \beta} d_{j, k, \alpha}))] \end{aligned} \quad (4.4)$$

Estas curvas se logran mediante el procedimiento siguiente [17]:

Utilizando el algoritmo de multirresolución, se descomponen las señales de energía real e imaginaria de la potencia instantánea en los diferentes niveles de descomposición, procurando que en la partición de bandas de frecuencia quede centrada la frecuencia fundamental en una de ellas. La cantidad de niveles se escoge de tal forma que cubra las bandas de frecuencia que interesan (ver apéndice B). Con ello, el primer nivel de descomposición dará información de un evento transitorio (altas frecuencias) y los últimos niveles indican las bajas frecuencia de los eventos (estado estacionario, subarmónicos). En el caso de desear hacer un análisis de subarmónicos y flicker, más detallado, se procurará que la banda de frecuencia fundamental se encuentre en el nivel intermedio del número de escalas elegido y bien centrada en la banda. Por ello, no se puede trabajar con cualquier frecuencia de muestreo, es menester que esta señal al ser descompuesta en bandas de frecuencia, dé origen a una banda muy bien centrada en la frecuencia fundamental y las frecuencias de interés, en los niveles de descomposición.

Con los valores determinados de los coeficientes, se evalúa la desviación estándar por nivel de descomposición y se forma un vector que contenga para cada nivel el valor de desviación, la gráfica entre el vector obtenido y el nivel será la curva std_p y std_q, para la energía real e imaginaria respectivamente.

4.3.3 Curva de relación ruido/señal:

Se ha introducido una modificación a la curva std-p y std-q, con el objetivo de poder cuantificar el grado de desviación respecto del valor medio y además tratar de

conservar el signo que presenta el valor medio en cada nivel por ser indicativo del sentido del flujo. Ello se logra normalizando la desviación de los coeficientes respecto de su valor medio. Esta normalización tradicionalmente se ha conocido con el nombre de relación ruido/señal [22].

La curva relación ruido/señal, es la construcción de una gráfica, en la que el eje de abscisas representa el nivel de descomposición de la señal y el eje de ordenadas entrega el valor de la desviación estándar de los coeficientes de reconstrucción de la señal. Esta señal es la energía real e imaginaria dividida por el valor medio de la energía (potencia activa y reactiva) en cada nivel de descomposición. Así se tiene una idea gráfica de lo que hay “a espaldas” del instrumento de medida. De ésta manera la curva de relación ruido/señal es la representación gráfica de la desviación estándar de la potencia de perturbación S_D , normalizada por la potencia activa y reactiva de cada nivel. Estas curvas se denominarán RDD-p y RDD-q (RDD acrónimo de ruido, desbalance y distorsión) de la energía real (E_p) e imaginaria (E_q), respectivamente.

Definición 4.4 - El vector RDD-p surge de la energía real promedio correspondiente a cada escala del algoritmo de multirresolución a la fracción de la razón de la energía real total por escala de la amplitud de los coeficientes. Para cada escala se asocia un valor y con ello se construye el vector RDD-p.

$$RDD - p = [medio(E_{p1}) / std(E_{p1}) \dots medio(E_{pJ}) / std(E_{pJ})] \quad (4.5)$$

donde *medio* indica el valor promedio y *std* indica la desviación estándar. J hace referencia al nivel máximo de descomposición.

Definición 4.5 - El vector RDD-q se construye a partir de la energía imaginaria promedio correspondiente a cada escala del algoritmo de multirresolución a la fracción de la razón de la energía imaginaria total por escala de la amplitud de los coeficientes. Para cada escala se asocia un valor y con ello se construye el vector RDD-q.

$$RDD - q = [medio(E_{q1}) / std(E_{q1}) \dots medio(E_{qJ}) / std(E_{qJ})] \quad (4.6)$$

donde *medio* indica el valor promedio y *std* indica la desviación estándar. J hace referencia al Nivel máximo de descomposición.

El análisis presentado por Gaouda [19,20] queda formalizado dentro de la teoría de potencia instantánea en el marco de la transformada ondita, con las definiciones 4.2 a 4.5.

Lo nuevo en la formulación radica en la evaluación que se hace de la señal trifásica. Lo convencional en las definiciones 4.2 a 4.5 es la definición de factor de forma, que se ha considerado como la razón de la amplitud del valor eficaz, a la fracción del valor medio de una señal. El inverso será en este caso equivalente a un componente de los vectores expresados por las ecuaciones (4.5) y (4.6).

4.3.4 Algoritmo para determinar reglas de caracterización de carga:

A continuación se presentan los pasos a seguir para aplicar pqAT según la figura 4.1:

- Medida de v_a, v_b, v_c e i_a, i_b, i_c , (representada por el bloque 1 de la figura 4.1).
- Transformación al marco α - β -0 y cálculo de los coeficientes ondita de los vectores i_l, v_l (se muestra en el bloque 2 de la figura 4.1).
- Evaluación de la energía real e imaginaria en el marco de la transformada ondita representa el bloque 3 y utiliza (2.24) y (2.25).
- Cálculo de los valores medios de la energía real e imaginaria. Así se determina la potencia activa y reactiva del sistema, según (2.28) y (2.29). La potencia de distorsión se cuantifica por medio de (2.27).

Estas operaciones se representan con el bloque 4 de la figura 4.1.

- En el bloque 5 de la figura 4.1 se determinan los vectores std_MSD de la energía real e imaginaria, std_p y std_q que se normalizan respecto del valor medio de E_p y E_q obteniéndose los vectores RDD_p y RDD_q .
- Se calculan los índices de calidad indicados en definiciones 3.12 y 3.13. Estas operaciones se realizan en el bloque 6 de la figura 4.1.
- Formación de la curva ruido/señal para vislumbrar reglas de inferencia en la identificación de cargas (curvas RDD_p y RDD_q).
- Calibración: La técnica utilizada en el bloque de calibración emplea la ondita Daubechies 4 y 12 niveles de descomposición, desarrollada en Matlab [21] (el apéndice B detalla la manera como se hizo esta elección). Se escogió una frecuencia de muestreo de 19200 Hz y 13 niveles de descomposición, esto hace que la frecuencia fundamental esté centrada en el nivel 8 de la estructura de multirresolución (Ver apéndice B) y esta fue la calibración elegida para la evaluación del sistema en estado estacionario.

Esta técnica se aplicó sobre una gran variedad de cargas lineales, desbalanceadas, y no lineales. Todos los datos se generaron usando ATP-EMTP [18].

4.3.5 Estadística de los coeficientes ondita

Con la potencia de perturbación de la forma definida en (2.27), utilizando la frecuencia de muestreo y los 13 niveles de multirresolución, se obtiene:

$$\tilde{P}_j = \sqrt{\frac{1}{T} (E_{pj})^2 - P_j^2} = std(E_{pj}) \quad (4.7)$$

donde E_{pj} son los coeficientes entregados en la escala j de la energía real y P_j es el valor medio de los coeficientes en dicha escala, o sea, la potencia activa para esa escala según (2.28). Por ello, \tilde{p}_j es la desviación estándar de los coeficientes en la escala j , representada en (4.7) por $std(E_{pj})$.

De igual modo:

$$\tilde{q}_j = \sqrt{\frac{1}{T}(E_{qj})^2 - Q_j^2} = std(E_{qj}) \quad (4.8)$$

representa la potencia imaginaria del nivel j . Q_j es el valor medio de los coeficientes de dicha escala (la potencia reactiva en dicha escala). En consecuencia, \tilde{q}_j representa la desviación estándar de los coeficientes en la escala j .

$$S_D = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^{13} \tilde{p}_j\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^{13} \tilde{q}_j\right)^2} = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^{13} std(E_{pj})\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^{13} std(E_{qj})\right)^2} \quad (4.9)$$

La expresión (4.9) hace una evaluación estadística de la potencia de perturbación. El nivel 13 representa la evaluación de los coeficientes escala.

Entonces, la curva de la desviación estándar de los coeficientes de la energía real (std_p) e imaginaria (std_q) representa la potencia de perturbación del sistema y contiene las componentes de desbalance y las componentes de distorsión. Estas componentes deberían ser prácticamente nulas en un sistema libre de distorsión.

4.4 Análisis de resultados

A continuación se presentan como ejemplos nueve casos, uno libre de distorsión (el caso 1), mientras que los otros casos procuran representar escenarios con posibles cargas lineales, desbalanceadas y no lineales.

Se aplica cada paso del algoritmo al ejemplo de la figura. 4.2. En ese montaje se hacen una serie de variaciones de los parámetros resistivo, inductivo y de la fuente, con la intención de crear los escenarios de desbalance que permitan evaluar el desempeño del índice de desviación de la calidad que se propone.

4.4.1 Primera parte, análisis de desbalance y reactivos

Hacer una interpretación de los índices y parámetros de calidad que se han definido, induce a mirar su comportamiento ante la presencia de una carga libre de distorsión, de desbalance y resistiva pura. Este caso será luego comparado con aquellos casos en condiciones de asimetría.

4.4.1.1 Caso 1: Carga resistiva, balanceada, tensión simétrica.

Inicialmente, se consideró una carga lineal y balanceada. ($R_a = R_b = R_c = 0.333$ pu.; $L_a = L_b = L_c = 0.0$), $V_{pico} = 1.4142$ pu, frecuencia del sistema 50 Hz.

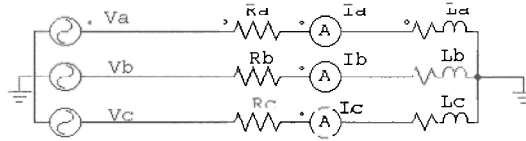


Figura 4.2: Circuito trifásico empleado para ejemplificar el calculo de DQI.

Los resultados de aplicar la técnica son mostrados en las figuras 4.3 a 4.6.

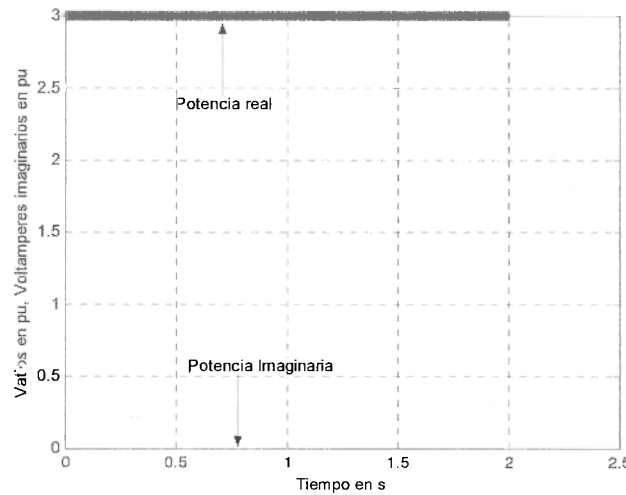


Figura 4.3: potencia real e imaginaria carga resistiva balanceada alimentación simétrica. $R_a=1$, $V_a=1$.

En la figura 4.3 se observa que la componente oscilatoria de la potencia real e imaginaria es casi nula.

Esto hace prever que en los niveles de descomposición de las curvas de desviación std_p y std_q será casi nulos los valores.

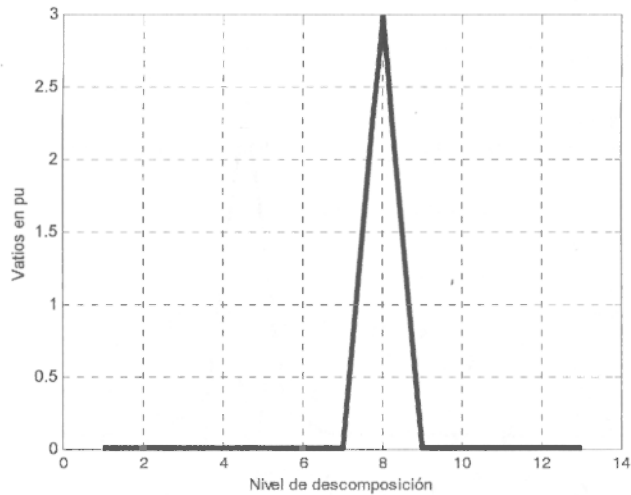


Figura 4.4: Potencia activa, medida para cada nivel de descomposición, se centró la frecuencia fundamental en la escala 8.

La figura 4.4 muestra la precisión en la selección de la banda de energía que contiene a la frecuencia fundamental del sistema, ella se concentra en el nivel 8.

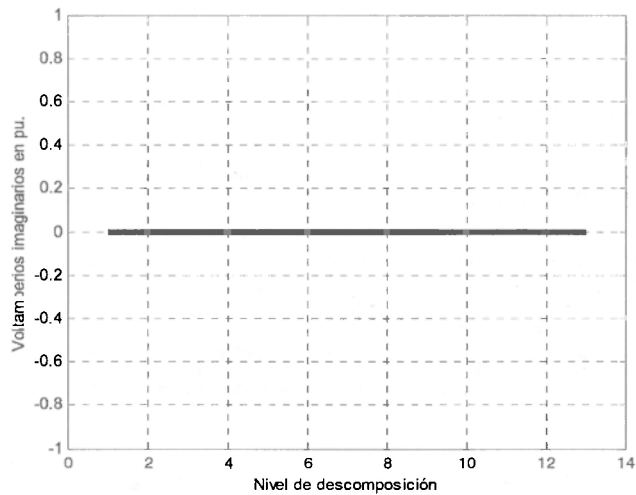


Figura 4.5: Potencia reactiva nula, como era de esperarse en un sistema resistivo y balanceado.

Como muestra la figura 4.5, el valor de la potencia imaginaria es prácticamente cero para una carga resistiva pura.

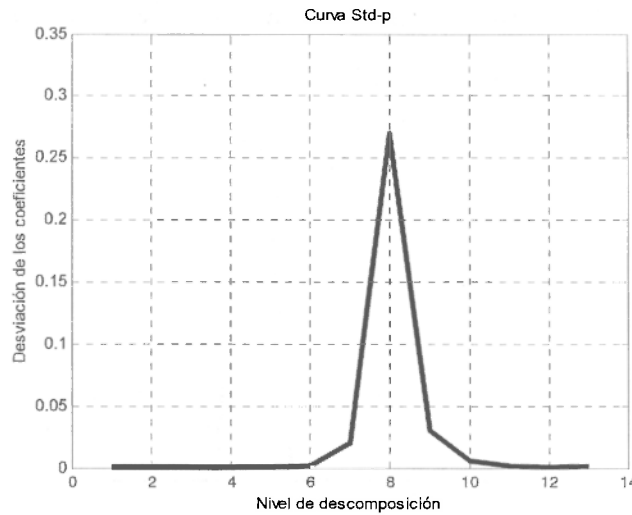


Figura 4.6: La curva *std_p* presenta una pequeña desviación debido a la componente oscilatoria de la potencia instantánea.

Como muestra la figura 4.6, en este caso hay una leve oscilación en la potencia real, debido a la imposibilidad de dejar a la red conectada a una barra infinita, pues con ello se perdería fiabilidad en la simulación. La curva *stp_q* es nula.

4.4.1.2 Superposición de resultados para diferentes casos

A continuación se describen los casos simulados, en el apéndice C se detallan las plantillas para las simulaciones en el ATP y la rutina en Matlab de la técnica pqAT:

Caso 1: Carga resistiva y balanceada alimentación senoidal $R_a=R_b=R_c= 0,333333$ ohms, $V_a=V_b=V_c=1$.

Caso 2: Carga resistiva y desbalanceada (fase a < 30% de la fase b, fase c>30% de la fase b), tensión de alimentación simétrica, variaciones hechas de acuerdo con los parámetros de la figura 4.2.

Caso 3: Carga resistiva y balanceada con tensión de alimentación en desbalance (fase a < 40% de la fase b, fase c>40% de la fase b).

Caso 4: Sistema desbalanceado y asimétrico, desbalance y asimetría de acuerdo a los dos casos anteriores.

Caso 5: Carga inductiva balanceada tensión simétrica R_a, R_b y $R_c = 0,3333$ ohms, $L_a=L_b=L_c= 4$ pu, tensión simétrica $V_a=V_b=V_c=1$ pu.

Caso 6: Carga inductiva, desbalanceada (fase a < 30% de la fase b, fase c > 30% de la fase b), tensión de alimentación simétrica.

Caso 7: sistema desbalanceado, inductivo y asimétrico, combinación caso 5 y 6.

Los resultados de los casos simulados se muestran en figuras 4.7 a 4.12.

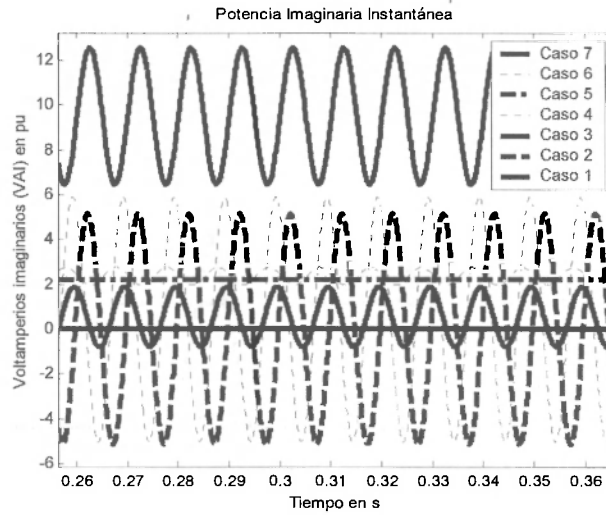


Figura 4.7a: Potencia imaginaria instantánea, para todos los casos.

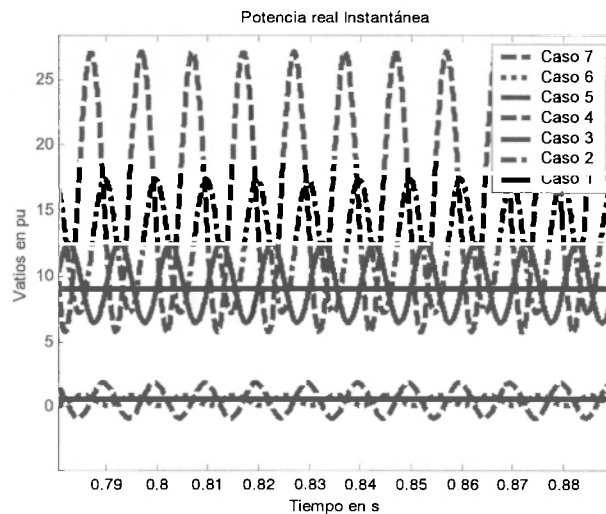


Figura 4.7b: Casos 1 a 7, potencia real instantánea.

Las potencias reales e imaginarias se presentan en las figuras 4.7a y 4.7b, en la medida en que se aumenta el desbalance, se ve un incremento apreciable en la amplitud de las componentes oscilatorias de la potencia, tanto en la parte real como en la imaginaria. El valor medio de la potencia imaginaria es nulo cuando el sistema analizado no tiene elementos capaces de almacenar energía reactiva. También puede observarse que la amplitud de la onda es mayor cuando mas grande es el desbalance. Estos resultados son obtenidos mediante el procesamiento que realiza el bloque 2 de la figura 4.1.

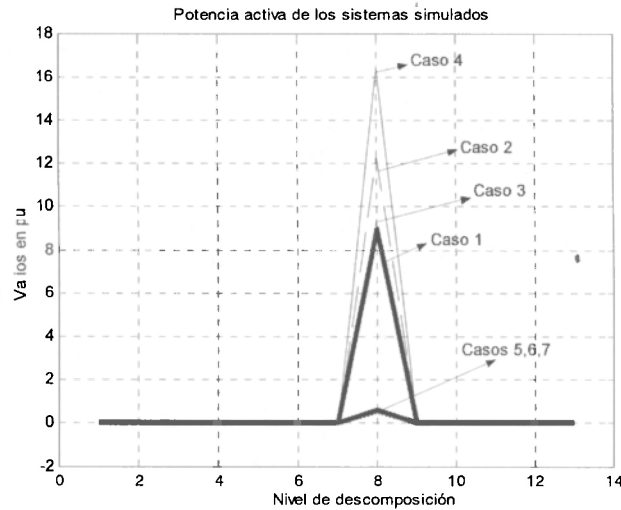


Figura 4.8: Medida de la potencia activa para los casos simulados.

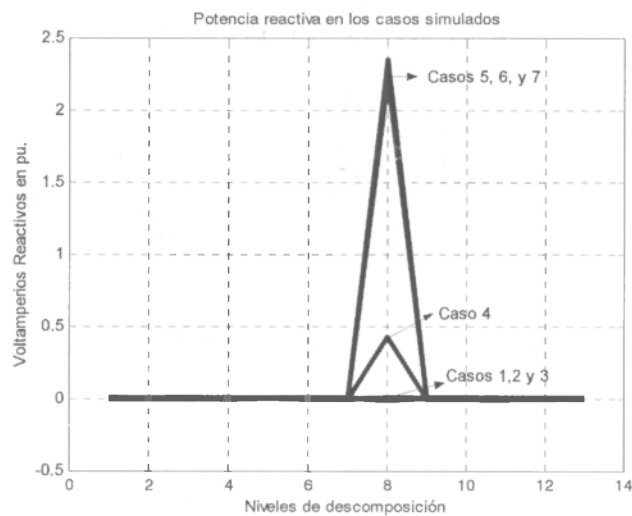


Figura 4.9: Medida de la potencia reactiva para los casos simulados.

La red de potencia mostrada en figura 4.2 determina las potencias de perturbación calculadas por el bloque 4 de figura 4.1. Las curvas *std_p* y *std_q* determinadas por el bloque 5 de figura 4.1 son mostradas en las figuras 4.10 y 4.11

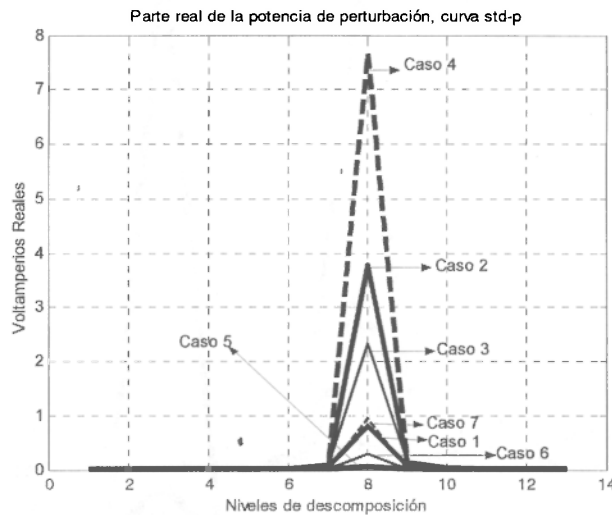


Figura 4.10: La curva *std_p* para los casos simulados. Esta curva mide la parte real de la potencia de perturbación que para el caso de cargas lineales solamente contiene el grado de desbalance del sistema.

La parte real de la potencia de perturbación identifica la amplitud de la componente alterna de la energía real. Esta amplitud es la resultante del desbalance en el sistema analizado y queda claramente diferenciada con la curva de desviación de los coeficientes mostrada en figuras 4.10 y 4.11. La transferencia de potencia activa en el caso 1 presenta una leve componente oscilante que sobresale en el nivel 8 de la figura 4.10. Igualmente ocurre con la componente oscilatoria del caso 6. Esto hace referencia al valor de la resistencia interna de la fuente de alimentación, como se explica en el apéndice C: se asocian pequeños valores de resistencia y de inductancia que representa el equivalente de red de la fuente; la fuente para todos los casos tiene una resistencia de 3 mili-ohmios por fase y una inductancia de $9.5E-9\text{mH}$ en serie con el sistema. Teóricamente para el caso 6, se esperaría un valor cercano a cero en la curva *std-p*.

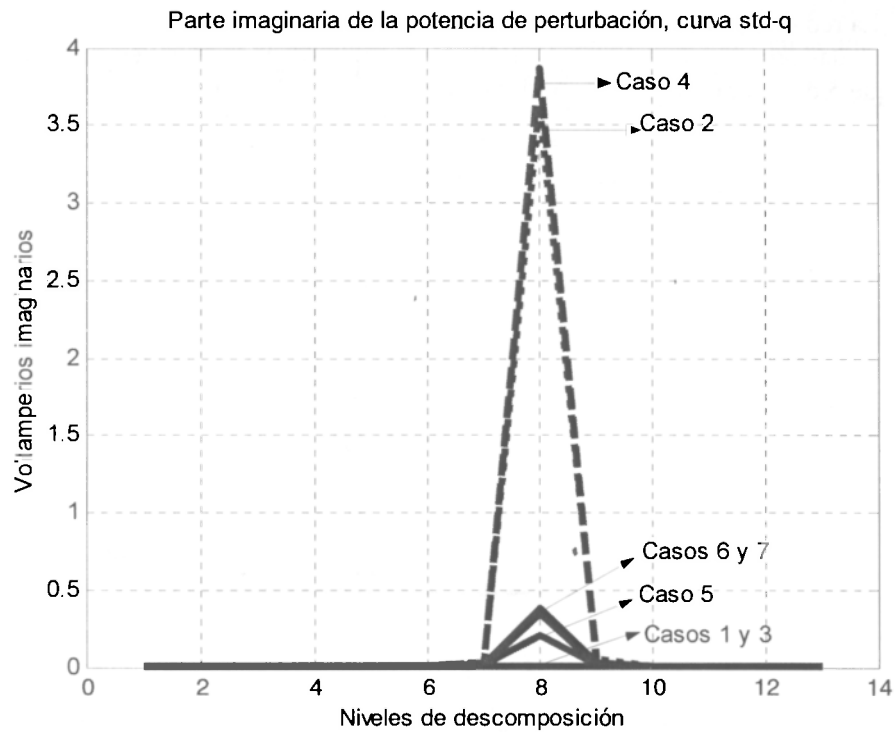


Figura 4.11: Curvas std_q, para los casos simulados Esta curva mide la parte imaginaria de la potencia de perturbación que para los casos de cargas lineales solamente contiene el grado de desbalance del sistema.

A partir de estos resultados, se pretende definir un conjunto de reglas y para ello se desarrolló el bloque 7 de la figura 4.1. En este bloque las curvas RDD_p y RDD_q arrojan información que permite inferir unas reglas para construir un mapa capaz de caracterizar el flujo de reactivos y la causa de los desbalances. En la figura 4.12 se muestra la curva RDD_p para los casos simulados.