

corriente trifásica se hace el cálculo de la potencia instantánea y su respectiva descomposición. Ante la presencia del evento, la descomposición de la potencia trifásica en potencia de perturbación y potencia de frecuencia fundamental indica que, en estado estacionario, la potencia de perturbación es casi cero mientras que la potencia de la banda de frecuencia fundamental es casi constante. Esto muestra cómo un valor en la potencia de distorsión se convierte en un indicativo de la anormalidad del sistema. Adicionalmente, el flujo queda indicado por el signo presente en las bandas de descomposición.

Por otra parte, la integral de la potencia de perturbación muestra la energía de perturbación claramente definida por los coeficientes ondita, tal como se detalla en el apéndice B.2, proposición de conservación de la energía.

5.2.1 Casos de estudio:

La figura 5.21 muestra un diagrama de la red simulada en EMTP-ATP, en la que se indica la localización de los instrumentos de medida y las cargas. Las flechas ubicadas en los instrumentos indican el sentido del flujo de la potencia en estado estacionario. A este sistema, presentado en [7], se pretende aplicarle la técnica desarrollada.

5.2.1.1 Perturbación por la maniobra de un banco capacitivo, caso 11:

Objetivos:

Los objetivos que se persiguen en la simulación son:

- i. Analizar el flujo de la potencia de perturbación como un parámetro físico para determinar la fuente que dio origen al fenómeno.
- ii. Proponer un criterio de discriminación entre operaciones de maniobra y fallos, éste debe ser simple y orientado a la coordinación de protecciones en sistemas de distribución.
- iii. Poner a prueba la técnica pqAT ante operaciones de energización de bancos capacitivos.

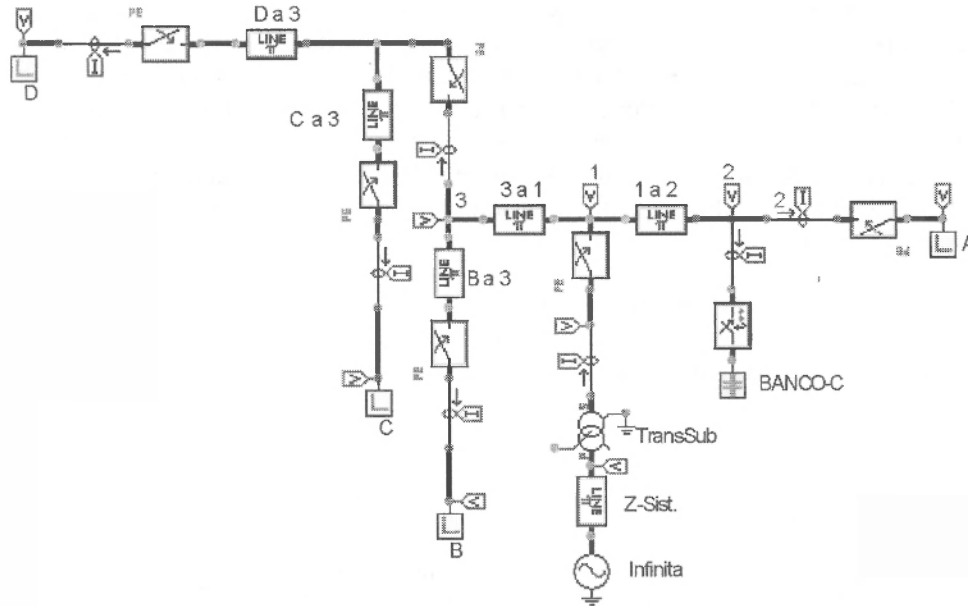


Figura 5.21: muestra el diagrama del sistema de los casos de estudio, Caso 11 y Caso 12.

Tabla 5.4 Descripción de las líneas de transmisión modelo Π .

Nombre	Longitud	Tamaño del Conductor	Material
D a 3	2718 ft	350 c mil	Cu
C a 3	4324 ft	1/0 AWG	Al
B a 3	2718 ft	350 c mil	Cu
3 a 1	618 ft	1000 c mil	Aluminio con núcleo de acero como refuerzo. (ACSR)
1 a 2	618 ft	1000 c mil	ACSR

Tabla 5.5: Características eléctricas del tipo del cable conductor. Nota: El sistema de distribución Colombiano, tiene una herencia muy fuerte del método Westinghouse. La mayorparte de su sistema se ha fundamentado en estos conceptos [24].

Diámetro -Material	R+ (ohms/milla)	X+ (ohms/milla)
1000c mil - ACSR	0,1495	0,1831
350 c mil - Cu	0,2546	0,1976
1/0 AWG - Al	0,0399	0,4710

Tabla 5.6: Cargas lineales del sistema de distribución de la figura 5.21

Cargas	Potencia aparente	Factor de potencia
A	1 MVA	0,85↓
B	0,5 MVA	0,85↓
C	0,5 MVA	0,85↓
D	0,5 MVA	0,85↓

Tabla 5.7: Banco de compensación (Banco-C)

Nombre	Potencia Reactiva
Banco-C	300 kVAr

El objetivo del banco es lograr un factor de potencia de 0.90↓ en el punto de registro de la subestación (Baraje denominado Fuente).

Fuente: La integran una barra de alimentación infinita, la impedancia equivalente del sistema (equivalente según el teorema de Thévenin) y el transformador de la subestación.

En la tabla 5.8 se hace una descripción de las características de la fuente de alimentación y el equivalente de Thévenin. La tabla 5.9 describe el transformador.

Tabla 5.8: Sistema de alimentación equivalente.

Componente	Tensión	I _{SC}	S _{Base}	X/R
Alimentador (Infinita)	138 kV (1,02 pu)	Infinita	10MVA	Infinita
Impedancia equivalente de Thévenin (Z- Sist.)	138 kV	34,4 pu.	10MVA	5,0

Tabla 5.9: Características del transformador (TransSub)

Potencia	Impedancia	S _{Base}	X/R	Tap	Configuración	relación
10/12,5/14 MVA	6,54%	10 MVA	10	1.025	Δ/Y (5) gnd.	138/ 12,47k V

Descripción:

En la figura 5.21, los nodos están marcados con números arábigos de color rojo. Las cargas que se han representado se muestran marcadas con las letras mayúsculas A, B, C, D. Ellas tienen el valor que se representa en la tabla 5.6. Así mismo las líneas del sistema de distribución se han caracterizado por el lazo de unión de los nodos con la etiqueta azul y se caracterizan según las tablas 5.4 y 5.5. Para concluir, también con etiqueta azul, se ha dejado el nombre de las partes más importantes del sistema esto es: el Banco capacitivo, la barra de alimentación infinita, la red de impedancia equivalente y el transformador de la subestación. La descripción de cada componente se encuentra en las tablas 5.7, 5.8 y 5.9 respectivamente. El método de cálculo de los parámetros se muestra en el apéndice E.

Se reporta a continuación en la figura 5.22 la tensión en la fase C de cada Barra.

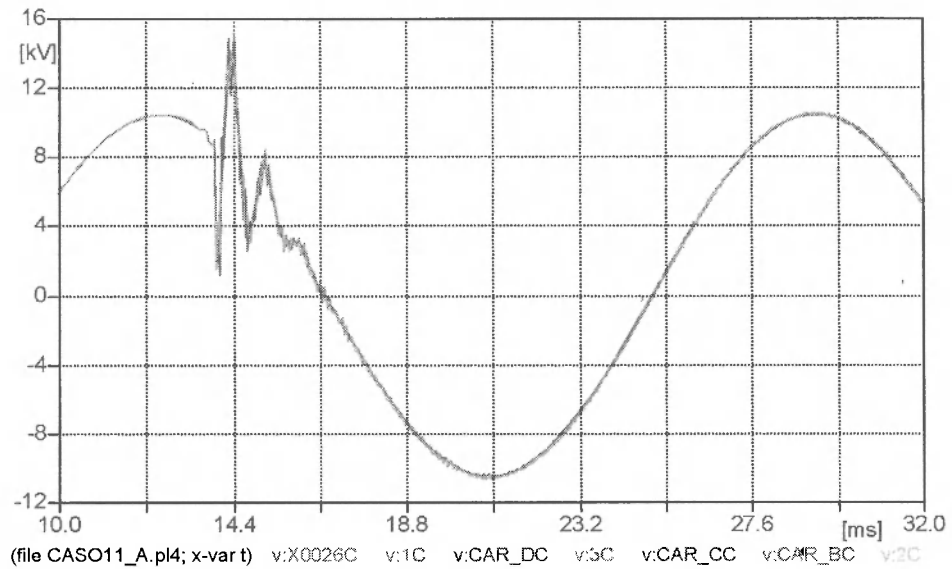


Figura 5.22: Evento de energización visto por todos los nodos del sistema, las variables que se muestran son las tensiones de fase.

En la figura 5.23 se detalla el flujo de la energía en estado estacionario por cada nodo.

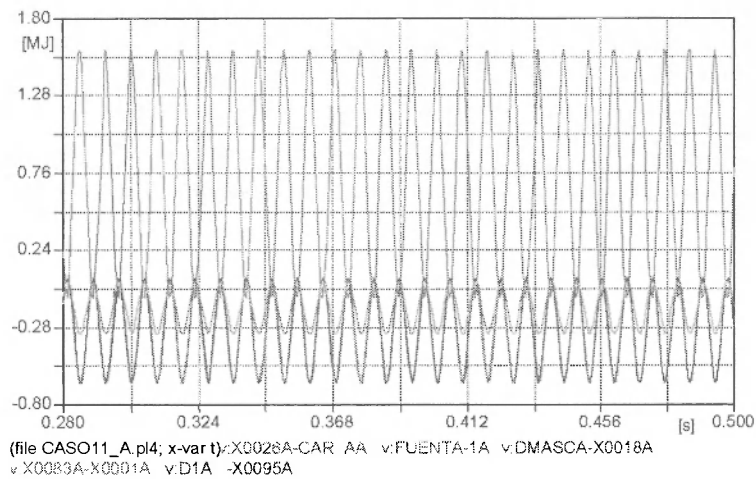


Figura 5.23: Caso 11, en condiciones normales, la fuente alimenta a cada carga, observe el sentido de la potencia.

En el momento del evento el flujo es el que se observa en la figura 5.24, la energización del banco capacitivo presenta una reacción tal como lo muestra la

señal de potencia instantánea real, con un cambio de polaridad en un tiempo inferior a los 10ms.

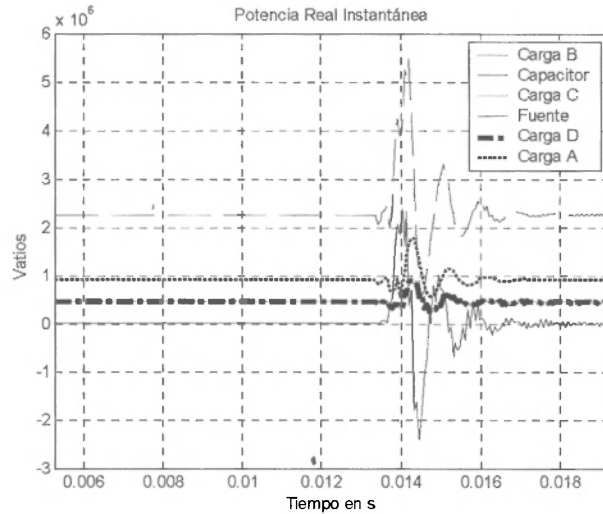


Figura 5.24: Caso 11, potencia real instantánea del evento de energización.

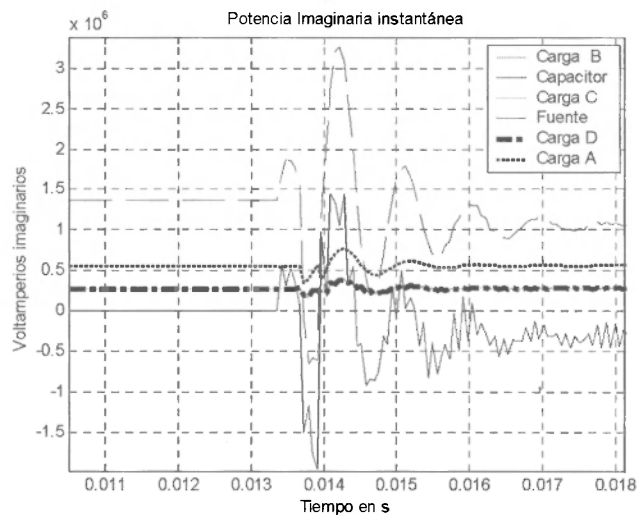


Figura 5.25: Caso 11, potencia imaginaria instantánea.

La descomposición por el algoritmo de multirresolución para la energía real, en la fuente se muestra en la figura 5.26. El intervalo entre los valores extremos mide el tiempo promedio del evento registrado. Estos tiempos están caracterizados en [18]. Los eventos comprendidos dentro del rango de 10ms son eventos de energización de capacitores. Como muestra la figura 5.26, este tiempo queda identificado ya sea en la descomposición de la energía real o en la imaginaria. La figura 5.26 representa la energía real medida por el instrumento ubicado en la subestación.

Caso 11: Descomposición de la energía real E_p medida en la Subestación

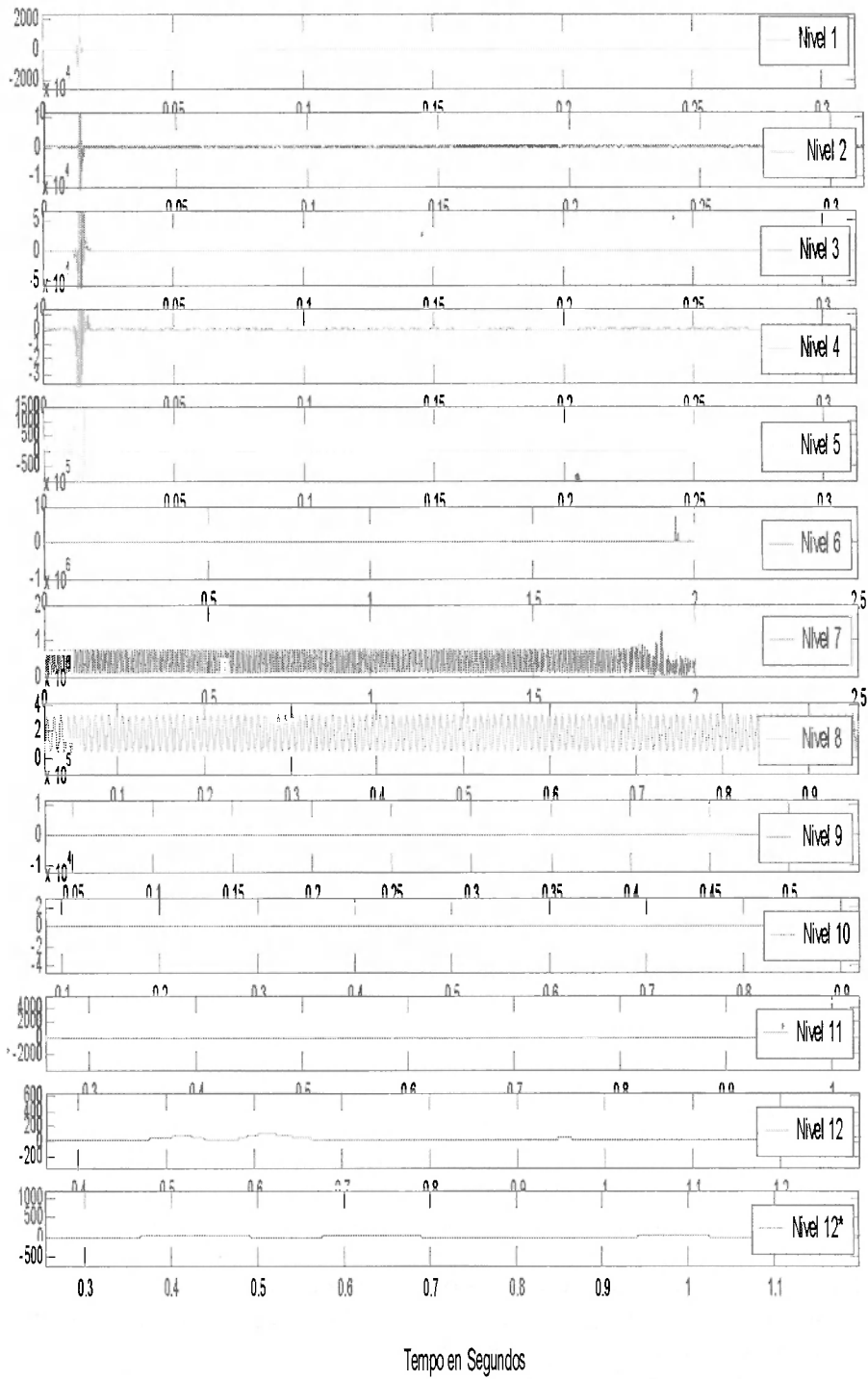


Figura 5.26: Caso 11, niveles de descomposición de la energía real E_p .

Observe que en los primeros cuatro niveles se detecta el cambio de signo en no menos de 10ms.

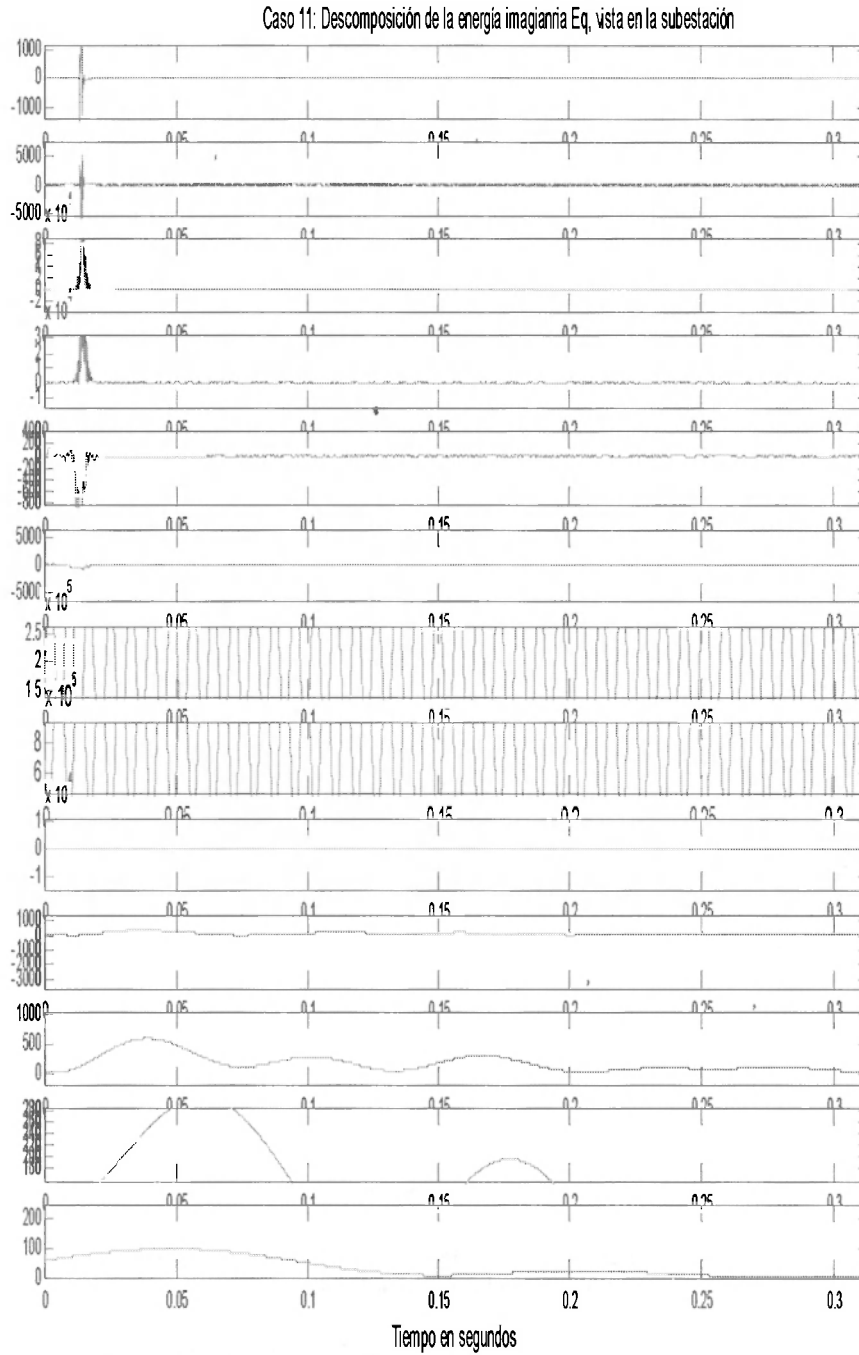


Figura 5.27: Caso 11, niveles de descomposición energía Imaginaria E_q en la subestación.

En este caso el cambio de signo se detecta en los primeros dos niveles. El tercer nivel falla y en el cuarto nivel se vuelve a observar el cambio de signo.

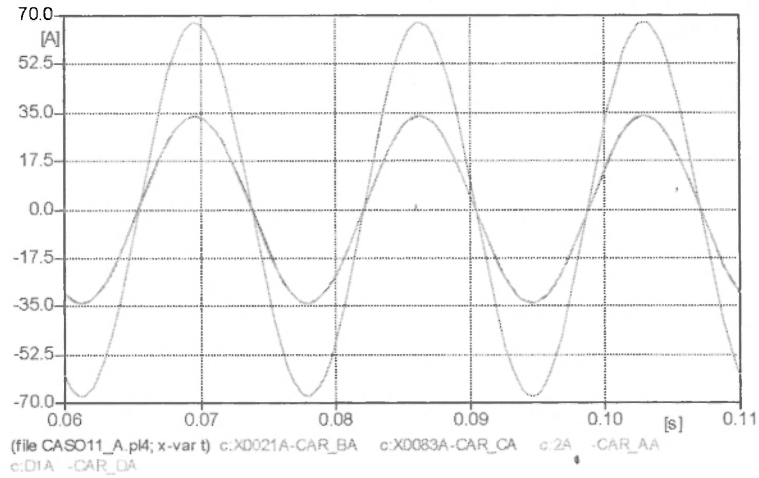


Figura 5.28: Caso 11, corriente que fluye en las cuatro cargas.

La técnica pqAT midió la potencia Activa para cada barra como muestra la figura 5.29.

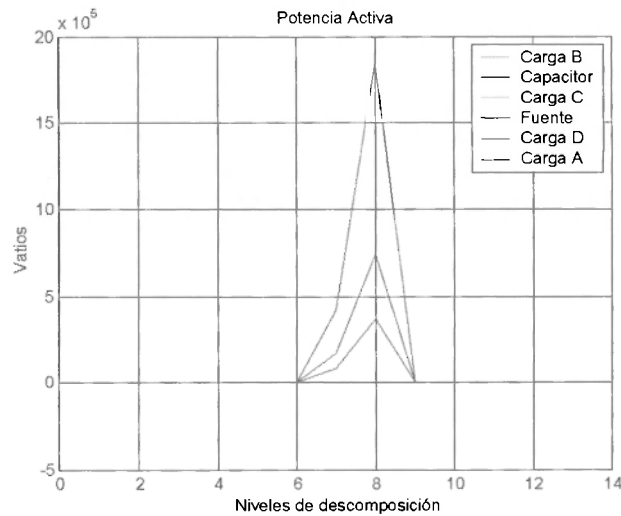


Figura 5.29: Caso 11, Potencia activa medida por los instrumentos en cada barra del sistema.

El Factor de potencia en la fuente y en las cargas lineales se ha considerado de 0.85. En consecuencia, el valor de potencia activa esperado para una carga de 1MVA será igual a 8500 kW como se observa en la carga A de la figura 5.29.

El caso de la potencia reactiva se observa en la figura 5.30, con las ventajas enumeradas en el capítulo 1 en su determinación.

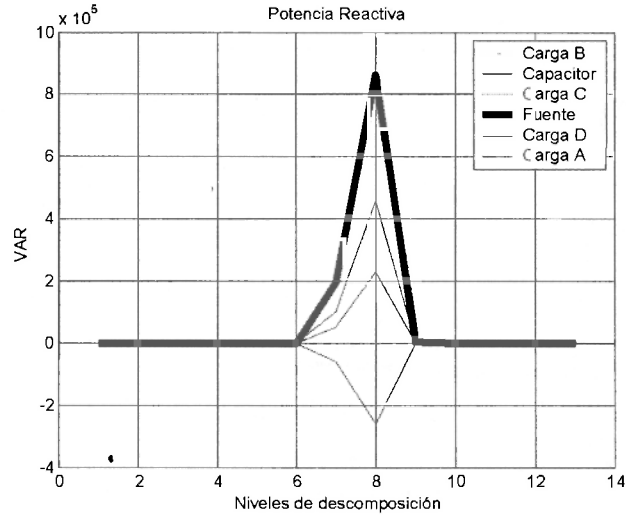


Figura 5.30: Caso 11, potencia reactiva evaluada encada barra.

Como era de esperarse el banco capacitivo es generador de reactivos, esto se indica con el signo en el nivel 8 de la figura 5.30. Igualmente, la potencia reactiva esperada es de 5.26 kVAR.

Se muestra la corriente y la tensión en la carga D fase A en la figura 5.31

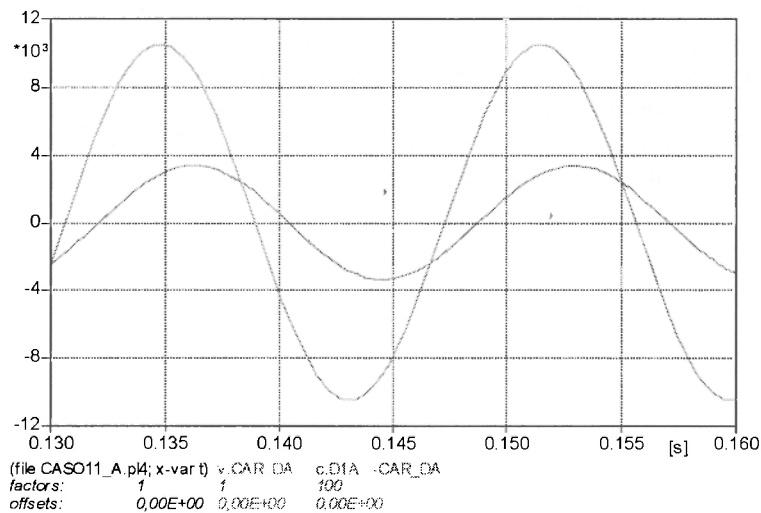


Figura 5.31: Caso11, corriente y tensión en la carga D, la corriente esta aumentada por un factor de 10, esto con el fin de visualizar el factor de desplazamiento.

La figura 5.32 muestra la corriente y la tensión en el secundario del transformador de la subestación.

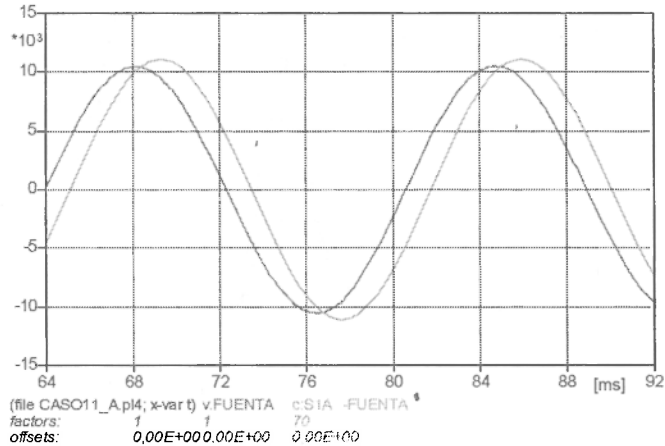


Figura 5.32: Caso 11, tensión y corriente en la fase a de la señal tomada a la salida del transformador de la subestación.

Se ha multiplicado por un factor de 70, el factor de desplazamiento indica que el reactor está funcionando correctamente y ha logrado compensar en un valor equivalente a 0.9↓.

El fenómeno de la perturbación puede apreciarse mas fácilmente con la curvas de desviación std-p y std q. Así también, con la relación ruido/señal RDD-p y

RDD-q. Desde el punto de vista convencional, es necesario para el ingeniero en calidad de la potencia visualizar muchas formas de onda de tal manera que su pericia heurística le permita valorar el tipo de perturbación presente y así generar un criterio de discriminación entre operación y fallo. La curva std-p se muestra en la figura 5.33. Por ello, la introducción de las curvas RDD-p y RDD-q marcan un cambio importante en la capacidad de discriminación dado el signo que pueden entregar.

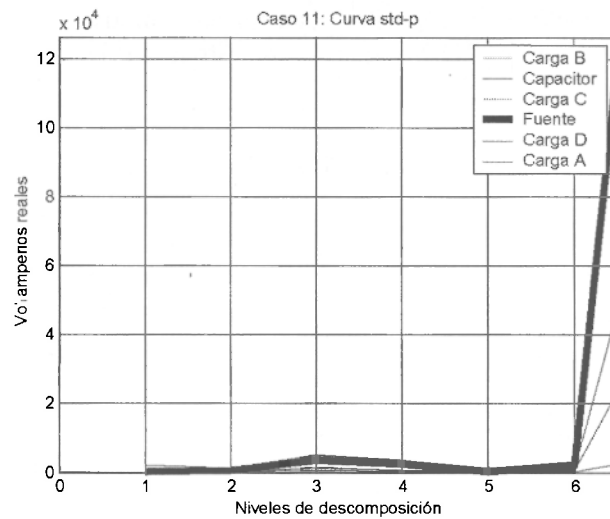


Figura 5.33: Caso 11, curva std-p, la desviación de alta frecuencia es detectada en los primeros cuatro niveles, el valor máximo para este rango de frecuencias se detectó en el nivel 3.

Como se mostró en las figuras 5.26 y 5.27 los primeros niveles indican las altas frecuencias presentes en el sistema, éste es un muy buen indicativo de la potencia perturbada por la operación de maniobra realizada, pero es una desviación que no entrega información sobre el sentido del flujo.

La curva std-q se muestra en la figura 5.34.

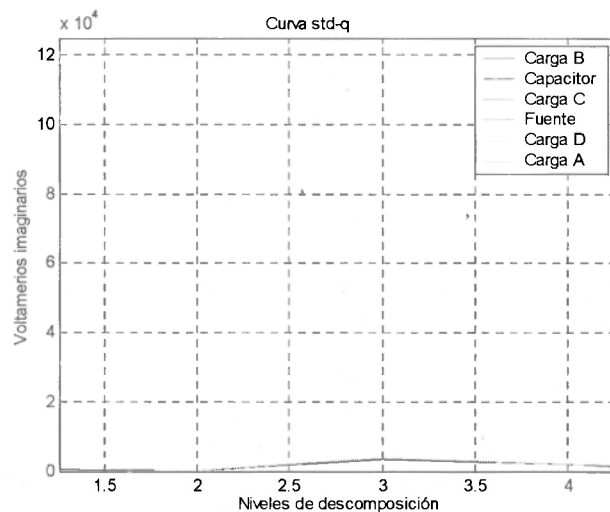


Figura 5.34: Caso 11, curva std-q, la desviación es menor y solamente la observa el banco capacitivo y la barra de la subestación.

En este caso la desviación de los coeficientes falla para la detección del problema de enganche de un capacitor. Esta situación motiva a prestar más atención a las curvas RDD-p y RDD-q que se muestran en las figuras 5.35 y 5.36 respectivamente.

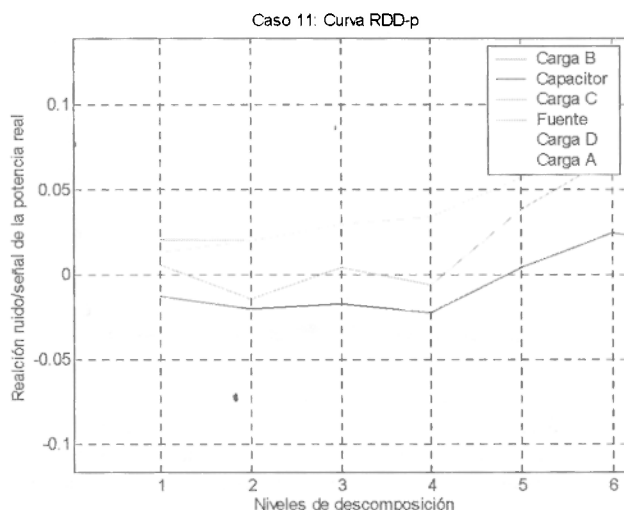


Figura 5.35: Caso 11, curva RDD-p.

La figura 5.35, muestra los primeros niveles de descomposición que conforman la relación ruido/señal, se observa claramente que el flujo en el banco capacitivo de igual forma se ve que la subestación es perturbada con esta oscilación (signo en los niveles 2 y 4). La magnitud registrada en la fuente, es síntoma de poca preocupación para la actuación de una protección. Ninguna carga vio el efecto del flujo.

De los datos proporcionados por la figura 5.35 se concluye que la fuente de perturbación está localizada en el capacitor, que presenta un valor negativo en los niveles 1 al 5, indicando con ello la correcta dirección del flujo. Es interesante notar que el valor final de la energía en el capacitor está dado por $\frac{3}{2}CV_{rms}^2$ y se ve en el nivel 8 de la Energía imaginaria instantánea descompuesta (figura 5.27). La polaridad de estos niveles de descomposición señala la dirección del flujo de la perturbación y se detecta por la relación ruido/señal (figuras 5.34 y 5.35).

Los otros instrumentos de medida en el camino a la subestación tal como el ubicado en la carga C, también muestran una polaridad que es positiva para el flujo de la potencia de perturbación, indicando así que el flujo sigue esta dirección (véase la figura 5.34). Las medidas de los instrumentos que se encuentran fuera del camino, tales como los instrumentos de las cargas B y D no han sufrido un cambio significativo, sin embargo ayudan a la correcta identificación de las bandas afectadas y de su flujo.

Con el primer nivel de descomposición de las figuras 5.26 y 5.27 es posible apreciar el intervalo de tiempo en el que se presenta el fenómeno. Esto se logra

identificando los valores extremos de los coeficientes ondita en este nivel. El intervalo de tiempo permite verificar la duración del reacomodamiento energético y así se puede definir un criterio dentro de los métodos de caracterización [19-21].

La maniobra suele hacerse sincronizada o con el criterio de los 5ms [19], ella presenta un transitorio que no toma más de 10ms, valor que fue considerado en [18].

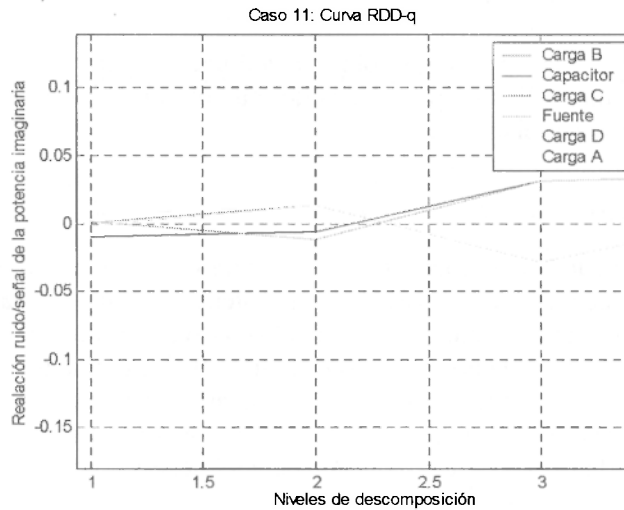


Figura 5.36: Caso 11, curva RDD-q

La carga afectada por el flujo de la perturbación es proveniente de las cargas A, B, C, y D como era de esperarse, en el flujo de la perturbación, el banco capacitivo requiere los reactivos que las carga tiene acumulado, es decir el banco se ve como un camino fácil para el flujo energético en el nivel 3, éste logra abastecer las placas del banco capacitivo.

Conclusión:

El éxito de las curvas RDD-p y RDD-q radica en la posibilidad de entregar información sobre el sentido del flujo de la potencia de distorsión S_D , calculada con las curvas std-p y std-q que no pueden entregar ésta información.

Así también, es importante observar que la magnitud de la deformación es un criterio de juicio para valorar la necesidad de actuación del sistema de protecciones de la red de distribución. *Todos los datos analizados pertenecen a un sistema trifásico, y su tratamiento es compacto, no es necesaria la visualización de las seis formas de onda (tres de tensión y tres de corriente) para evaluar el evento.*

En cuanto al logro de los objetivos propuestos en este caso de simulación se ve de las figuras 5.36 y 5.37 que ellas discriminan el sentido del flujo de la perturbación.

Con el criterio de los 10ms se define un período para caracterizar esta familia de maniobras. A este criterio se le agrega la consideración de saber que se trata de una operación con un bajo contenido energético, lo cual se constata por el hecho de no superarse el 15% en el incremento de los niveles de descomposición de la curva RDD_p y RDD_q.

De esta manera, se concluye que con los valores de duración del evento y el valor en el nivel de descomposición de las curvas RDD_p y RDD_q, se puede definir con claridad si el evento registrado por los instrumentos fue o no, un evento de energización de capacitores.

Aún no se puede decir algo sobre la valoración para tomar decisiones de discriminación entre fallos y operaciones de maniobra (de energización), para ello es necesario introducir el caso 12.

5.2.1.2 Falla de fase a tierra, caso 12:

Al sistema modelado para el caso 11 se le hace una variación, se pretende evaluar una caída de tensión de un ciclo a través de una resistencia de fallo "Z_fallo" en la figura 5.37. Esta resistencia de fallo se irá variando en diversas simulaciones de forma tal que comience en 10 ohms la primera hasta llegar a 50 ohms en la última, en pasos de 10 ohms. Un diagrama del esquema en ATPDraw, se muestra en la figura 5.37. Este fallo se produce en la carga C. Cada simulación se comparará con el objeto de determinar el comportamiento y flujo de la potencia y la energía de perturbación en la carga C y en la fuente.

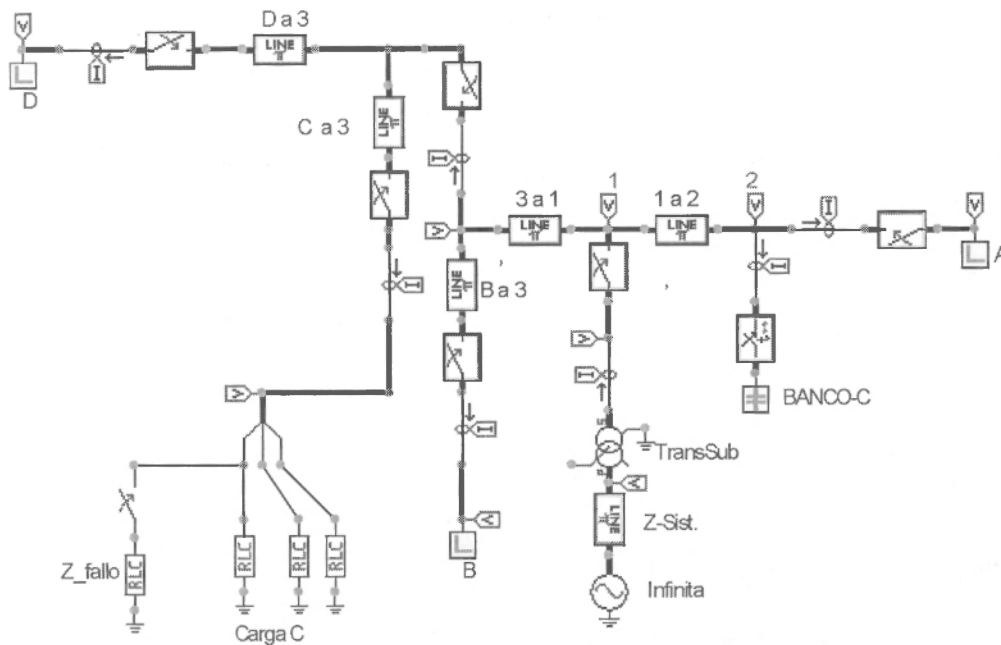


Figura 5.37: Caso 12, diagrama de simulación de un fallo de un ciclo en la carga C

Objetivos de la simulación:

- Hacer relevante el concepto de desbalance cuando se presenta una perturbación producida por un fallo monofásico.
- Aclarar el concepto de evaluación integral (Deformación estacionaria, transitorios y desbalance).
- Poner a prueba la técnica pqAT.
- Complementar un criterio de discriminación entre fallos, energización y desbalance.

La señal de tensión vista por el instrumento de la carga C se muestra en la figura 5.38

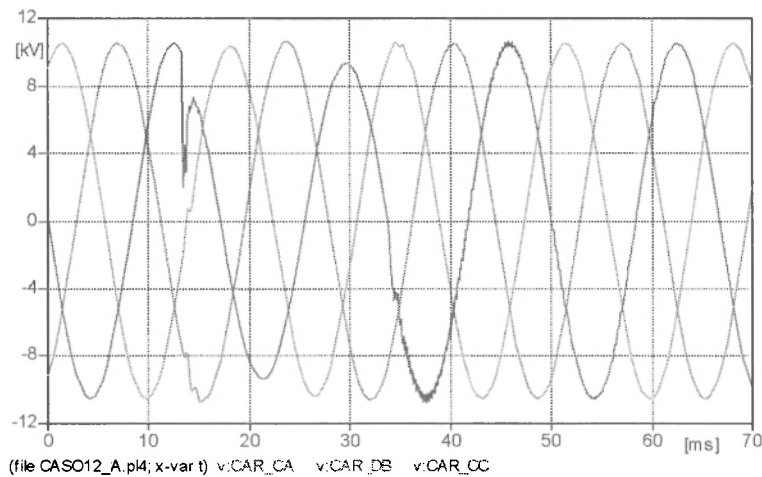


Figura 5.38: Caso 12, fallo en la carga C visto por el instrumento en las tres fases.

Una mirada desprevenida pensaría en una operación de maniobra. El valor de caída de tensión es del 25% durante un ciclo. Es decir estaría ubicado en el percentil 2 del flickemeter propuesto por IEC 61000 [26].

A continuación se hará un recorrido sobre la técnica pqAT, para finalmente hacer el análisis de sensibilidad en el “parámetro resistivo” de la impedancia de falla. Esto a manera de corroboración del flujo del potencia de deformación a través de la curva RDD-p y RDD-q.

Se puede hacer una visualización de la potencia real instantánea en la figura 5.39

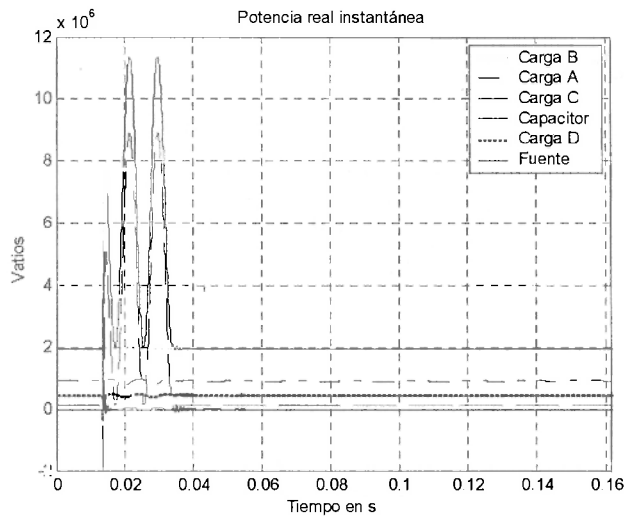


Figura 5.39: Caso 12, potencia real instantánea.

La potencia real imaginaria se muestra en la figura 5.40.

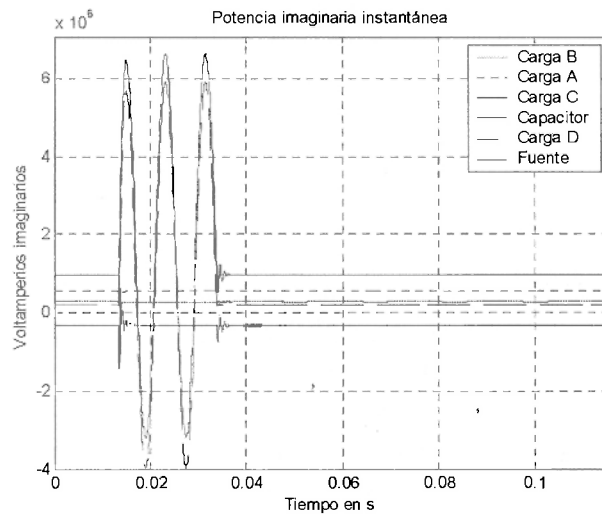


Figura 5.40: Caso 12, potencia imaginaria instantánea

La potencia activa en la carga C ha tenido una variación de un 50% en comparación con el ejercicio anterior (caso 11). Se visualizan en la figura 5.41 las características de potencia del sistema.

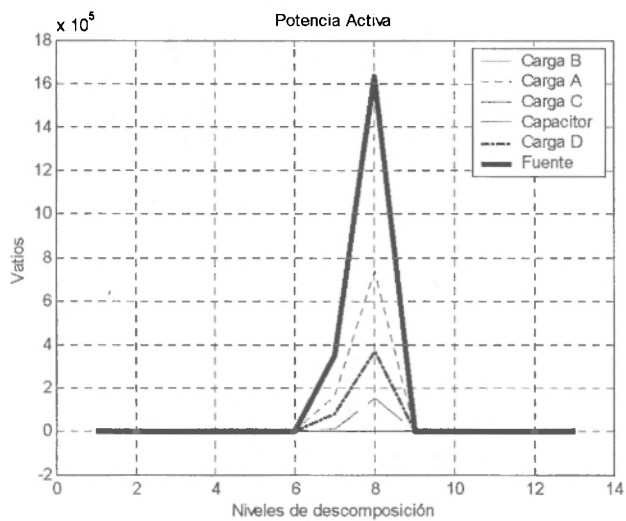


Figura 5.41: Caso 12A, potencia activa medida en cada barra.

La misma consideración se observa en el caso de la potencia reactiva que se visualiza en la figura 5.42.

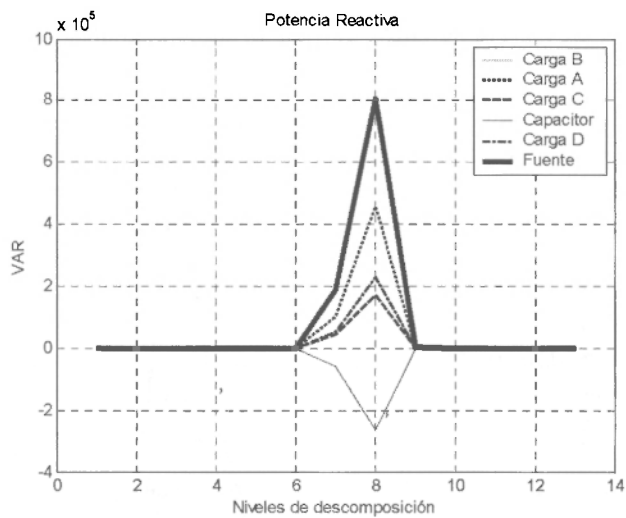


Figura 5.42: Caso 12, potencia reactiva medida en cada barra.

Se muestra la curva de desviación de los coeficientes std-p y std-q en las figuras 5.43 y 5.44 respectivamente.

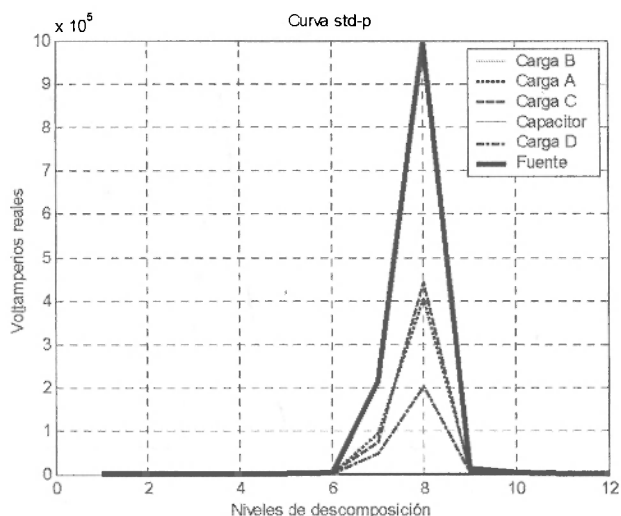


Figura 5.43: Caso 12, curva de desviación de los coeficientes de la potencia real.

El grado de desbalance en la carga C iguala a la potencia de deformación que emite la carga A, aunque la carga A en estado estacionario tiene el doble del valor de la potencia de la carga C.

La desviación de los coeficientes de la energía imaginaria se observa en la figura 5.44

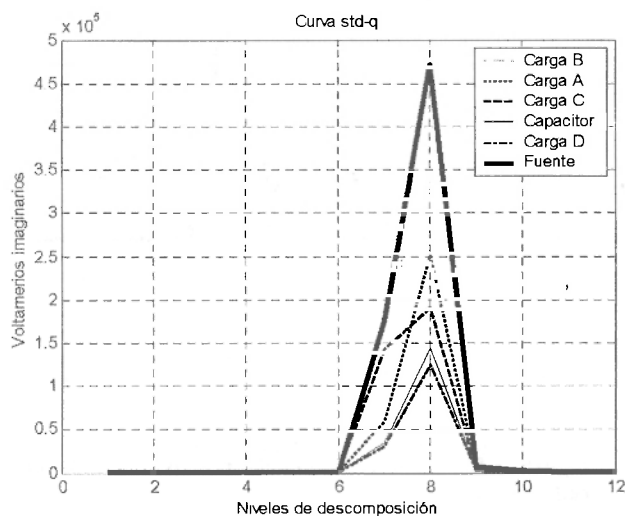


Figura 5.44: Caso 12, niveles de desviación de los coeficientes de la energía imaginaria observados con la curva std-q.

El desbalance de la carga C queda caracterizado pues se esperaba que en condiciones normales de funcionamiento presentase una característica similar a la de las

cargas B y D. No es muy clara esta curva (en la discriminación de perturbaciones de alta y baja frecuencia) para este caso de simulación. Por ello, es necesario evaluar con la curva RDD-p y RDD-q que se muestran en las figuras 5.45 y 5.46.

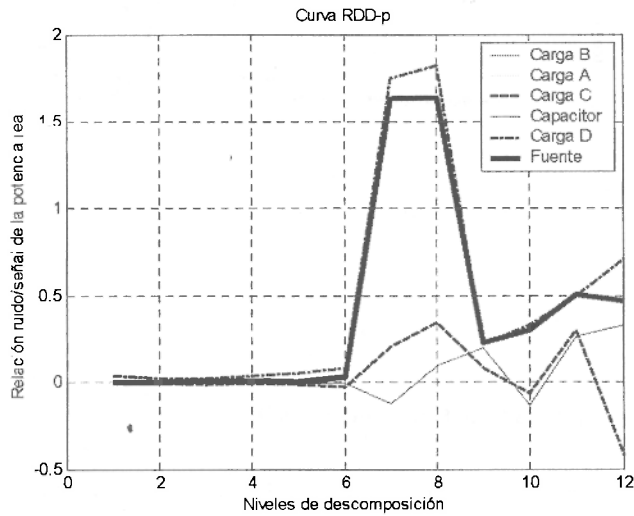


Figura 5.45: Caso 12A, Curva de relación ruido/señal, RDD-p.

En la figura 5.45, se observa claramente una discriminación debida a componentes de baja frecuencia, esto es tradicionalmente conocido con el nombre de “flicker”[26], por la característica de parpadeo que produce en la retina del ojo humano. Las normas Europeas IEC lo analizan en el apartado 610000-4-15 y proponen un instrumento para medirlo. La caracterización en IEC [26] intenta explicar la interacción ojo – retina-cerebro. Esta norma es valiosa en el espectro visible. Para el caso de muy baja frecuencia, que es de interés en la estabilidad electromecánica del sistema de transmisión, poco se propone. La técnica pqAT visualiza este fenómeno en el último nivel de descomposición de la curva RDD-p. La carga objeto del fallo EMITE esta componente energética y el reacomodamiento energético del elemento capacitivo también lo ubica en ése estado. Las otras cargas son elementos que consumen esta potencia de deformación (están siendo afectadas).

Finalmente, la técnica pqAT presenta la curva RDD-q, ésta para el Caso 12 de simulación se presenta en la figura 5.46

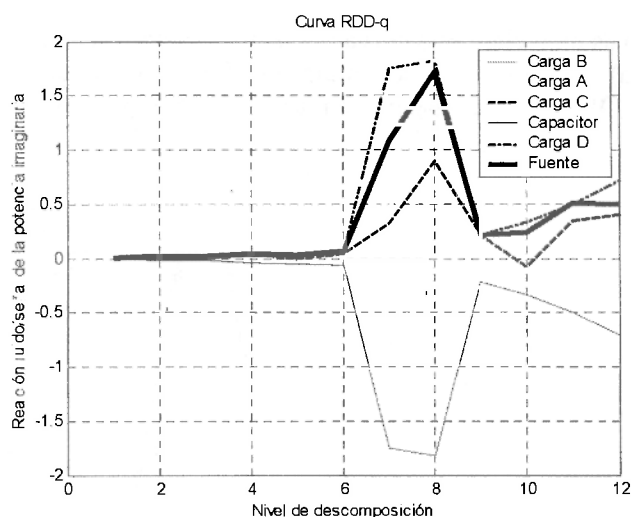


Figura 5.46: Caso 12, curva RDD-q

Todas las cargas en operación normal (A, B, D) se encuentran solapadas en la figura 5.46, que muestra la curva RDD-q. La desviación apreciable se observa en la curva de trazo discontinuo (- - -) que caracteriza la carga C. El banco capacitivo es el elemento que compensa al sistema y por ello es generador de reactivos. Las desviaciones en el décimo nivel muestran algo del fenómeno de baja frecuencia que se caracterizó con la figura 5.45.

Análisis de sensibilidad en la carga C y en la fuente:

A continuación se presenta un caso de análisis de sensibilidad de la curva RDD -p y RDD-q en función del cambio en la impedancia de fallo, tal y como se esbozó en la introducción del caso 12, §5.2.1.2.

En la figura 5.47 se muestra la fase fallada en la carga C. La impedancia varía de acuerdo con los datos de la tabla 5.10

Tabla 5.10: Cambio de parámetros en la resistencia de fallo

Simulación ATP	R	L
Caso 12_A	10 ohms	0,001 mH
Caso 12_b	20 ohms	0,001 mH
Caso 12_c	30 ohms	0,001 mH
Caso 12_d	40 ohms	0,001 mH
Caso 12_e	50 ohms	0,001 mH

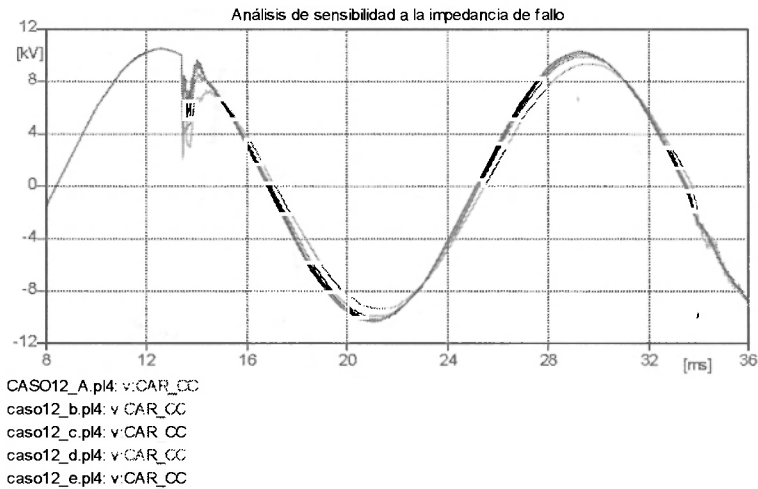


Figura 5.47: variación de la impedancia de fallo de la variable CAR_CC en las simulaciones, Caso12_A hasta el Caso 12_e, variando en pasos de diez ohms.

La fuente presenta variaciones para la curva RDD-q en el séptimo y doceavo nivel como se observa en la figura 5.48.

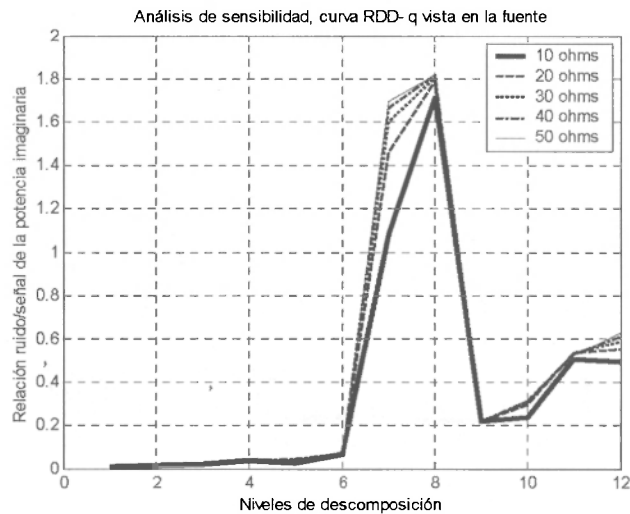


Figura 5.48: análisis de sensibilidad con la curva RDD-q vista en la fuente al cambio de la resistencia de fallo en la carga C.

La curva RDD-p no discrimina, hay una somera variación entre el valor generado por 10 ohms y el de 50 ohms en el nivel 8 y 12, como se puede apreciar en la figura 5.49.

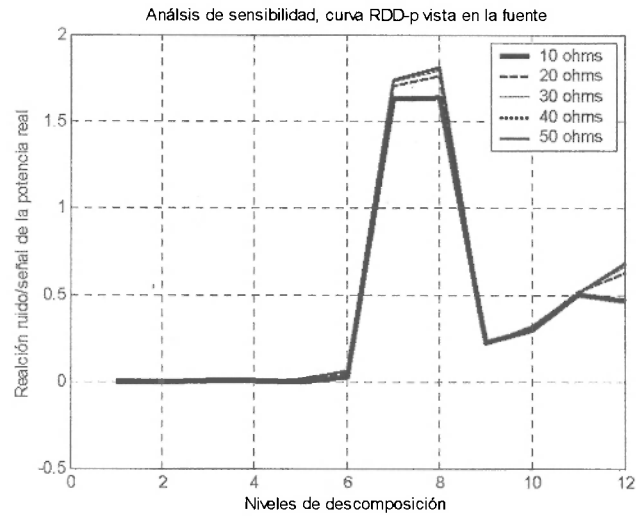


Figura 5.49: Análisis de sensibilidad, curva RDD-p vista en la fuente.

La observación de efecto queda claramente determinada en el instrumento de la carga C, primero por el desbalance que se observa, como se espera, en el cambio del valor de la curva RDD-q en el nivel 8.

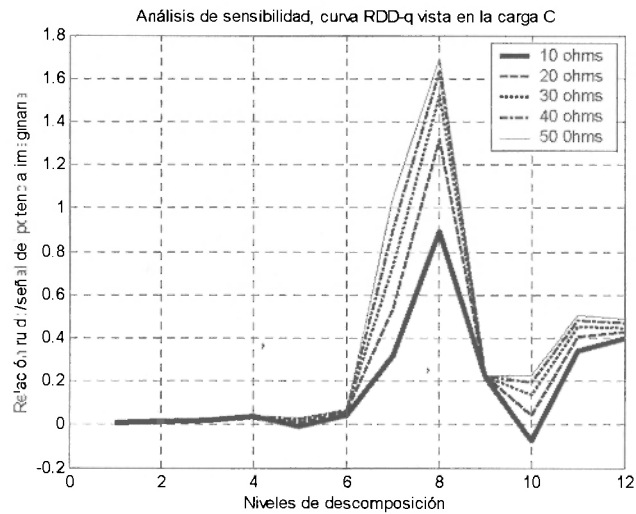


Figura 5.50: análisis de sensibilidad de la curva RDD-q al cambio de resistencia de falla a la carga C, esta curva es vista por el instrumento de medida ubicado en la carga C.

La generación de la perturbación de baja frecuencia (parpadeo) en el nivel 12 se observa en la figura 5.51.

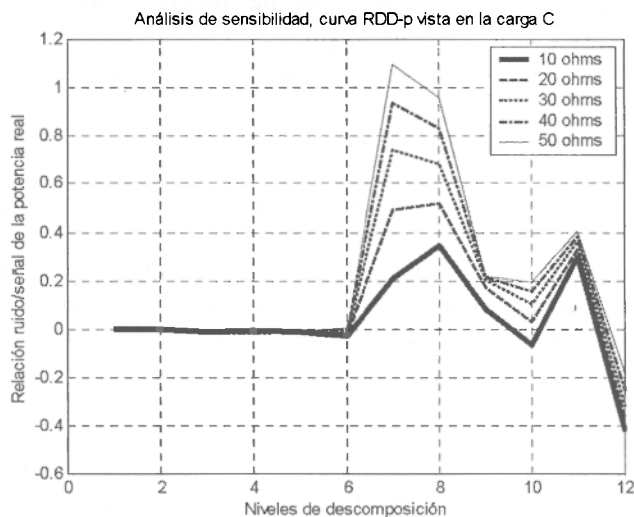


Figura 5.51: análisis de sensibilidad a la variación de la resistencia de falla en la carga C, curva RDD-p vista desde el mismo lugar de la falla barra de la carga C.

La frecuencia del flicker se mantiene constante a un ciclo. Detectada en el nivel 12, el grado de desbalance de la falla se detecta por la amplitud en los niveles 7 y 8 de la curva RDD-p de la figura 5.51. La potencia de perturbación tiene un sentido contrario al flujo normal indicando, la carga C es una fuente emisora de este tipo de perturbaciones en este momento.

Conclusiones del caso 12:

Eventos de duración superior a un ciclo tienen su origen en fallas convencionales del sistema. La protección pertinente en el sistema actuará y el registro de los eventos permitirá verificar la actuación de las protecciones y medir el tiempo de extinción de falla. El método de determinación del intervalo de tiempo a través de los puntos críticos de los coeficientes ondita permite hacer una buena estimación del lugar de ocurrencia de la falla [19]. Importa también destacar que en este tipo de eventos, la energía es muy alta y supera en los niveles de descomposición el 50% de los coeficientes de las curvas RDD_p y RDD_q.

Como se presentó un fallo desbalanceado, éste se observa en el cambio de los niveles 7 y 8 de las curvas RDD-p y RDD-q figuras 5.50 y 5.51 respectivamente.

La presencia y el sentido de la desviación en el nivel 12 de la figura 5.51 es un indicativo además de que el evento es un fallo.

En conclusión, un evento de falla del sistema de transmisión (de fase a tierra) se produce en períodos de tiempo superiores a 10 ms y con desviaciones por encima del 50 % (suma cuarática de los niveles 10 y 12) de los coeficientes ondita en la energía de perturbación medida por las curvas RDD-p y RDD-q.

Las curvas RDD-p y RDD-q evalúan de forma integrada los eventos de transitorios, armónicos y desbalance.

5.3 Reglas:

En la literatura aparecen muchas técnicas para la implementación de reglas para la detección de eventos transitorios anormales, éstas van desde el empleo de redes neuronales [8], lógica difusa [9], hasta métodos de estimación de datos para definir el orden de la frecuencia involucrada [10-17]. Observando estos reportes, surge la idea de buscar simplicidad en las reglas que debe incluir el sistema experto en su algoritmo de clasificación:

- Regla 1: Regla de los 10ms. A partir del análisis de los datos se obtiene esta primera regla básica: Todo evento registrado que tenga un intervalo de duración de 10ms tiene una alta probabilidad de ser un evento de energización, el evento medido se observa en la señal de energía real y de energía imaginaria.
- Regla 2: Ponderación del 20%. En los niveles de descomposición los eventos de energización no superan el 20% de los valores previos a la energización, medido en las curvas RDD_p y RDD_q.
- Regla 3: Es la contraparte de la regla 1 e indica que todo evento superior a 20ms es un fallo del sistema y depende de la velocidad de actuación de las protecciones. Este evento igualmente está acompañado por cambios en los valores de las curvas RDD por encima del 20%. En el flujo de la potencia de perturbación. El signo en el nivel 12 marca la característica del evento y es imperativo en la actuación de la protección.

A partir de las reglas mencionadas, se propone una topología para definir la estructura del sistema clasificador de eventos transitorios. Esta se presenta en la figura 5.52.

El algoritmo de clasificación se detalla a continuación:

- a) Determinar los coeficientes del primer nivel de multirresolución.

Son eventos de muy corta duración (alta frecuencia) y están completamente caracterizados en el primer nivel de descomposición en el algoritmo de multirresolución (figuras 5.26 y 5.27).

- b) Determinar el rango entre los valores extremos de los coeficientes de descomposición del primer nivel (figura 5.36, Bloque 2 de la figura 5.52).
- c) Si este valor está en el rango de los 5ms será una energización de capacitor [18] (Si es afirmativo, pasar al bloque 3 de la figura 5.52).
- d) Si este valor está por encima de los 20ms será una falla y dependerá de la protección. El despeje de la falla indicará una disminución en la potencia

transmitida y el retorno a la normalidad en la tensión registrada [19-21] (si es afirmativo pasar al bloque 4 de la figura 5.52).

- e) En la operación del bloque 3 y 4, en la figura 12, estos efectos se deben visualizar en la descomposición temporal del algoritmo de multiresolución, (pudiéndose observar en las figuras. 5.26, 5.27).
- f) Operación del bloque 5 en la figura 5.52: La curva RDD_p permite hacer una valoración de potencia de consumo para cada nivel de bandas de frecuencia, aumentando con ello la certeza del tipo de evento, éstas están caracterizadas por la norma IEEE 1159 [18].
- g) Clasificación del evento (bloque 6 figura 5.52): Confrontación de resultados del registro del evento con los datos posteriores al evento para clasificarlo y caracterizar la actuación de las protecciones (su desempeño y lugar de de actuación con el signo de los niveles en las curvas RDD_p y RDD_q).

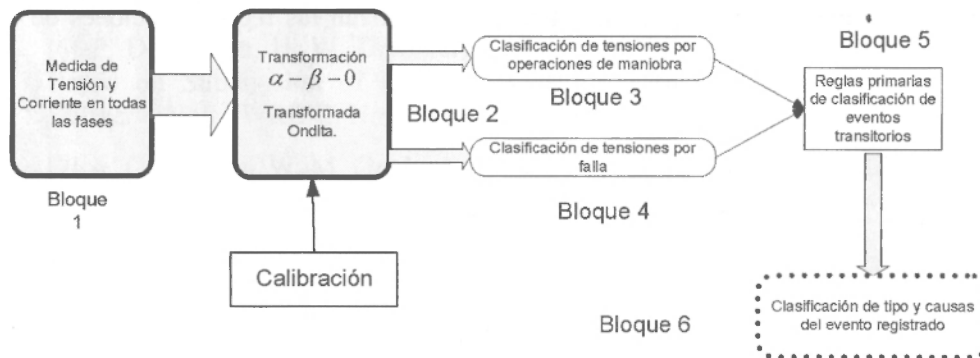


Figura 5.52: Sistema de evaluación de eventos transitorios.

ACLARACIÓN: Calibración

Como las frecuencias de interés, en el caso de eventos transitorios, son de orden superior a la fundamental, en este tipo de eventos se podría trabajar con 7 niveles de descomposición, dejando en la banda del nivel más bajo la banda de frecuencias que contiene a la frecuencia fundamental del sistema.

5.4 Conclusiones:

Se consideró un importante aspecto de los sistemas variadores de velocidad ASD: Se analizó la inclusión del modelo del cable en las simulaciones empleándose dos modelos y logrando con ellos resultados similares en lo concerniente a la reflexión de la onda viajera y su consecuente sobretensión.

El uso del algoritmo de multirresolución probó ser una buena herramienta para la caracterización del tipo de cable utilizado y su respectivo comportamiento. Con él se construyó la curva de relación ruido/señal, que indica el grado de dispersión de los coeficientes ondita respecto de la media de cada nivel, con lo cual se obtiene una curva signada. Esta mostró que la falta de calidad es una desviación de la energía contenida por los coeficientes ondita.

A continuación, se examinaron ejemplos de ondas de tensión y corriente obtenidos de la simulación de un sistema radial con cuatro cargas. Se comprobó que sí es posible comparar los registros de cada usuario en el sistema y luego aplicar la técnica pqAT, se podrá determinar el tipo de perturbación y lugar en que ocurre. Esto se logra examinando el flujo de la potencia de perturbación y su polaridad. Luego, si se dispone de datos de varios instrumentos distribuidos en la red, la fuente de perturbación será localizada con bastante aproximación.

Se han determinado reglas para la clasificación de eventos a partir del tiempo de permanencia del fenómeno. Este tiempo se determinó a partir de los puntos extremos de los coeficientes ondita y con estos tiempos se utilizan las recomendaciones de IEEE [18].

5.5 Referencias Bibliográficas Correspondientes al Capítulo 5:

- [1] E. Cano Plata, H. Tacca, “ Dynamic Damping in ASD Overvoltage Problem” Science & Engineering Journal, Vol. 9 , No 1, pp.128 –135, Janury/June 2000.
- [2] J. H. Sawa K.C. Lee, “ Comparison of Various EMTP Transmission Line Models” EMTP NewsLetter Vol. 2, No. 4, May 1982
- [3] A. Ametani “ A General Formulation of Impedance and Admittance of Cables”, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 3 May/June 1980.
- [4] H. Dommel, EMTP “Theory Book”, Microtran Power System Análisis Corporation, Vancouver, British Columbia 1996.
- [5] A. G. Heaton, M. H. Issa “Transient Response of Cross-bonded Cable Systems”, Proc. IEE, Vol. 117, No. 3, pp. 578 – 586, March 1970.
- [6] P. De Arizon, H. W. Dommel “Computation of Cables Impedances Based on Subdivisión of Conductors” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 1, pp. 21-27, January 1987.
- [7] A. C. Parsons, W. M. Grady, E. J. Powers, J. C. Soward “A Direction Zinder for Power Quality Disturbances Based Upon Disturbance Power and Energy” Proceedings of VIII International Conference on Harmonics and Quality of Powers, ICHPQ-98, Athens Greece, October 1998.
- [8] L. Angrisani, P. Daponte, M. D’Apuzzo, “Wavelet Network- Based Detection and Classification of Transients” IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Vol. 50, No. 5, October 2001.
- [9] C.S. Chang, S. Kumar, B. Liu and A. Khambadkone “Real-time detection using wavelet transform and neural network of short-circuit faults within a train in DC transit systems” IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 148, No.3, pp. 251-257, May 2001.
- [10] G.T. Heydt, E. Gunther “Post-Measurement Processing of Electric Power Quality Data” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No.4,pp. 1853-1859, October 1996.
- [11] L. Satish and B.I. Gururaj, “Wavelet Analysis for Estimation of Mean-Curve of Impulse Waveforms superimposed by Noise, Oscillations and Overshoot” IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 16, No.1, pp. 116-121, January 2001.
- [12] P. D. Welch, “The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms”, IEEE Transactions on Audio and Electroacustics, Vol. AU-15, No. 2, pp. 70-73, June 1967.

- [13] R. O. Schmidt “Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-34, No. 3, pp. 276-280, March 1986.
- [14] P. J. Moore, R.D. Carranza and A.T. Johns “ Model System Test on A New Numeric Method of Power System Frequency Measurement” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No.2, pp. 696-701, April 1996.
- [15] H. Renders, J.S. Schoukens and G. Vilain “High- Accuracy Spectrum Analysis of Sampled Discrete Frequency Signals by Analytical Leakage Compensation” IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Vol. 33, No. 4, pp. 287-292, December 1984.
- [16] F. Attivissimo, M. Savino, a. Trotta “Power Spectra Density Estimation via Overlapping Nonlinear Averaging” IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, vol. 50, No. 5, pp. 1418-1423, October 2001.
- [17] T. P. Zielinski “Joint Time-Frequency Resolution of Signal Analysis Using Gabor Transform”, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, vol. 50, No 5, pp. 1436-1444, October 2001.
- [18] IEEE Std 1159-1995 “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”.
- [19] PAPER C: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.
- [20] PAPER D: 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.
- [21] PAPER E: 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.
- [22] Allan Greenwood, “Electrical Transients in Power Systems”, John Wiley & Sons, 1992.
- [23] “Electric Utility Engineering Reference Book - Distribution systems”. Westinghouse Electric Corporation. 1959.
- [24] National Electrical Code_Handbook, National Fire protection Association, 2002.
- [25] John M. Bertley and Patrick J. Link, “Evaluation of motor power cables for PWM AC Drives”, IEEE – IA, Vol. 33 No. 2, pp. 342-358, March/April 1997.

- [26] IEC 61000 “Electromagnetic compatibility (EMC) – 1995.
- [27] J.P. Carson “Wave propagation in overhead wires with ground return” Bell Systems Technical Journal Vol. 5, pp. 539-554 October 1926.
- [28] Norma Técnica Colombiana NTC 2050, Código eléctrico nacional.

CAPÍTULO 6:

SISTEMA DE PRUEBA PARA LA TÉCNICA PQAT, MODELADO Y SIMULACIÓN USANDO EMTP- ATP

RESUMEN

Se muestra el comportamiento de la técnica pqAT en el sistema para ensayos radial de 13 barras propuesto por el IEEE para estado estacionario.

Este capítulo está dividido en dos partes: La primera compara los resultados del sistema en condiciones normales de operación ante un evento de energización. y la segunda parte involucra dos fallas simultáneas.

Empleando la técnica desarrollada, se discuten los resultados de las simulaciones, analizando las características de las componentes armónicas, el desbalance y los fenómenos transitorios.

CAPÍTULO 6:

Sistema de prueba para la técnica pqAT, modelado y simulación usando EMTP-ATP

6.1 INTRODUCCIÓN

Para ilustrar el tratamiento unificado de armónicas, transitorios y desbalance, mediante una sola metodología integradora, se utilizará el sistema de prueba de 13 barras de la IEEE [4] mostrado en la figura 6.1.

Este circuito, que será el último caso de simulación (caso 13), ha sido modificado con el objeto de crear dos escenarios adicionales: Se agregó la entrada de un puente rectificado en la barra 34 (como ejemplo de puesta en servicio de una carga). Además, se provocó una falla de fase a tierra (en la fase a) en la línea que une las barras 71 y 92 y otra falla similar (fase b) en la línea que une las barras 32 y 45. Esta modificación permite probar la técnica para la identificación de fallas simultáneas.

Este capítulo comienza con una introducción del sistema de prueba 13-IEEE, se modela el sistema y se aplica la técnica pqAT en condiciones de desbalance y contenido armónico (caso 13A) evaluando la propagación de la perturbación en las barras 32, 71 y 75. Luego, se genera el escenario de la entrada de un puente rectificador (caso 13B) de seis pulsos en conmutación natural en la barra 34, se aplica la técnica en las barras 32, 34, 71 y 75 y se visualiza el flujo de la perturbación. Finalmente, la técnica pqAT se aplica al sistema en presencia de las fallas simultáneas (caso 13C) para mostrar que la potencia de perturbación es un indicativo claro para la detección.

6.2 Escenario No.2 de la IEEE para el análisis de armónicos: Sistema de distribución de 13 barras desbalanceado:

Este sistema se basa en el escenario de prueba conformado por 13 barras tipo radial y está pensado para sistemas de distribución [2]. El sistema es desbalanceado y sirve como referencia para el estudio de la propagación de armónicos en tales sistemas. El sistema se utilizó en [1] con propósitos ilustrativos y con algunas modificaciones se propone aquí como un sistema de prueba para desbalance, transitorios y armónicas en sistemas de distribución.

El alimentador se muestra en la figura 6.1. Contiene un regulador de tensión, configuraciones de líneas aéreas trifásicas y monofásicas, capacitores en paralelo y cargas concentradas y distribuidas, así como cargas conectadas entre fase y fase, y entre fase y tierra. El detalle de los datos del sistema se presenta en el apéndice E.

Las cargas contaminantes están caracterizadas por su espectro de corriente y se consideran tres tipos de cargas contaminantes:

- a) bancos de iluminación fluorescente.
- b) variadores de velocidad.

c) carga compuesta del tipo residencial.

Para el análisis de la propagación de componentes armónicas en sistemas de distribución se utilizó la representación en el dominio fasorial (representación de cada componente armónica - módulo y fase - inyectada al sistema trifásico) y su respectiva simulación en el plano temporal.

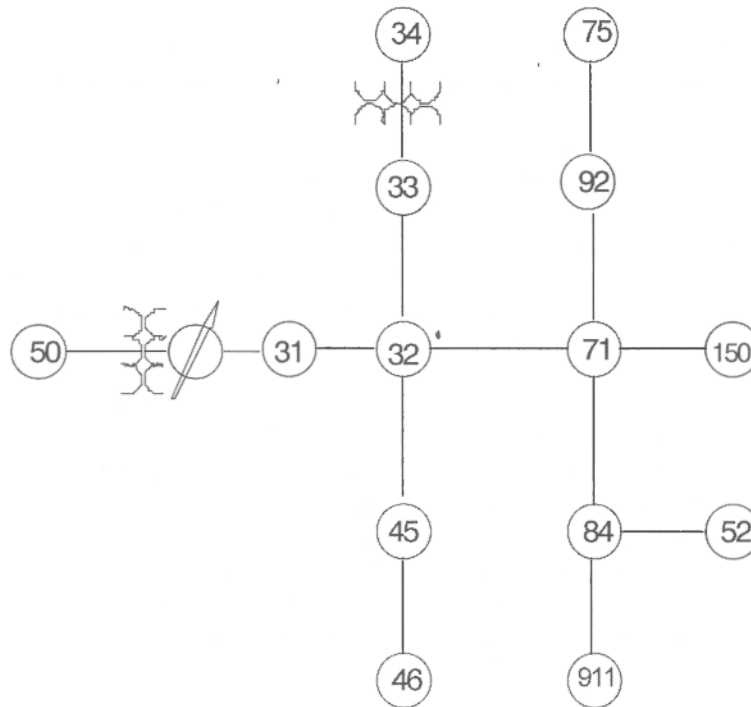


Figura 6.1: Sistema de prueba: Sistema de distribución radial y desbalanceado [4].

Los siguientes aspectos fueron tomados en cuenta para el análisis del sistema de distribución desbalanceado:

- Con las técnicas actuales es difícil especificar o identificar una carga productora de armónicos en los sistemas de alimentación. En general, cuando se tienen varias cargas contaminantes, se presenta una mezcla de cada una de ellas que se ve finalmente reflejada como un elemento resultante de la interacción entre ellas.
- En la mayoría de los sistemas de distribución hay presencia de bancos capacitivos. Con un barrido de frecuencia es posible determinar problemas de resonancia. Sin embargo, y debido al gran número de fuentes armónicas, es muy difícil determinar el barrido en frecuencia para cada barra de un sistema de distribución específico.

- Comúnmente se suponen condiciones balanceadas en los sistemas de distribución, haciendo pensar que la presencia de terceras armónicas es de secuencia cero solamente. Cabe destacar que bajo las condiciones de simulación y análisis, cada una de ellas puede tener componentes de secuencia positiva, negativa y cero (ver el apéndice A). No debe sorprender la presencia de armónicos no característicos.
- El tipo de conexión de la carga y del transformador puede tener un gran impacto en el fenómeno de la propagación de armónicos (tema tratado en los reportes citados en el capítulo 4).

En [2] se reportó que variar moderadamente los modelos de carga, e incluso de las líneas, presenta un impacto sustancial en los resultados de este sistema de prueba. Para el caso de los modelos de líneas utilizados en el apéndice E, se reporta el comportamiento en frecuencia del modelo II y el modelo K.C. Lee. A la luz de estas dificultades, se implementó el sistema de prueba en ATP tal y como fue planteado en [3-6].

Las condiciones de modelado y simulación fueron las siguientes:

Las cargas convencionales fueron modeladas como impedancias R-L constantes obtenidas a partir de los kVA especificados a 60Hz.

- Las cargas contaminantes (en armónicas) fueron modeladas como fuentes de armónicas utilizando su espectro específico a través de “Models”, una herramienta de ATP [10]. Las magnitudes fueron calculadas basándose en la magnitud de la corriente fundamental de la corriente de carga y los ángulos de fase se tomaron a partir del ángulo dado por el flujo a frecuencia fundamental.
- El capacitor y el motor de la barra 34 se supusieron fuera de servicio para el caso estacionario y luego se generó el escenario de entrada de un puente rectificador.
- El regulador de tensión no fue modelado. Sin embargo, el transformador de la subestación cuenta con los taps de secundario +15,+10,+13, respectivamente.

6.2.1 Análisis del flujo de la potencia de perturbación en el sistema IEEE-13:

Caso 13A:

Para el estudio de la potencia de perturbación se modelaron varios componentes, la descripción de estos y el detalle del modelo se muestra en el apéndice E.

Objetivos de la simulación

- Comparar el modelo simulado con los reportes presentados en [1].
- Verificar el estado estacionario del sistema y sus características según pqAT.

Para lograr el primer objetivo fue necesario simular las líneas del sistema de distribución a parámetros distribuidos utilizando el modelo K.C. Lee, como se mostró en el capítulo 4. Este modelo tiene un mejor comportamiento en frecuencia, el apéndice E compara los modelos con parámetros concentrados y con parámetros distribuidos. En este modelo el efecto del retorno por tierra [8] también fue incluido, pero el concepto de puesta a tierra se supuso continuo.

El transformador y su grupo de conexión fue modelado pero la saturación se desprecia (el procedimiento se describe en el apéndice E). En la práctica sobretensiones de 1.1 pu ya ocasionan problemas de saturación pero en la simulación se procuró estar lejos de esta posibilidad (en los tres escenarios).

Las cargas pasivas se modelaron a potencia constante, tomando su valor a la frecuencia fundamental. En el apéndice E se muestra la composición de la carga.

Las cargas productoras de armónicos fueron modeladas como fuente de corriente y según las sugerencias presentadas en [9] su espectro se detalla en el apéndice E. Para las corrientes armónicas se tomó como base de referencia al ángulo de desplazamiento de la corriente fundamental. Este resultado lo entrega el estudio de flujo del primer armónico (este método fue sugerido en [3] con el nombre de escenario S1).

Finalmente, la fuente del sistema se modeló como una fuente ideal, con una impedancia en serie calculada a partir de los datos que arrojan las fallas trifásica y monofásica.

En la figura 6.2 se observan las formas de onda de la tensión (fase a) para las barras 50 y 71.

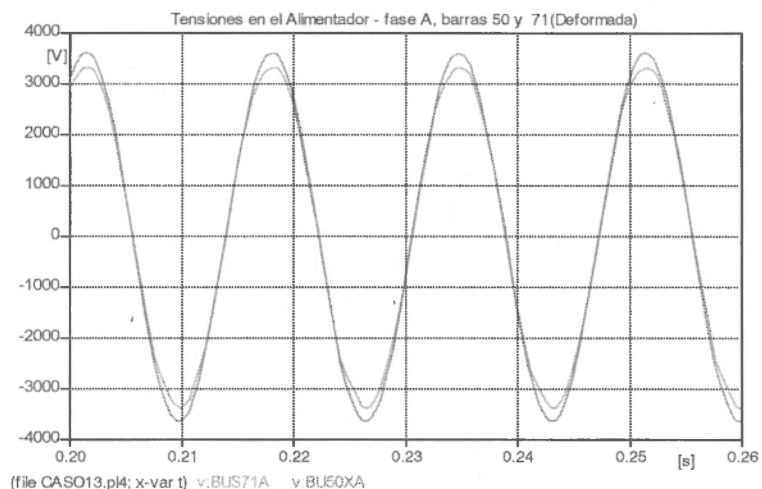


Figura 6.2: Caso 13A, Tensiones en la fase a de las barras 50 y 71.

En la figura 6.2 se observa un nivel de distorsión mínimo en la barra 50, secundario del transformador de alimentación, no así en la barra 71 cuyo tasa de distorsión armónica THD (de sus siglas en inglés) es del 3,23% en la fase a. En el caso de la simulación presentada en [3] este THD fue del 5,386% (la variación en la simulación, se detalla en el apéndice E). La razón de una simulación con menor perturbación es que pondrá mayor exigencia sobre la técnica pqAT.

La tabla 6.1 muestra la tasa de deformación armónica (THD) para la tensión de las fases en cada barra medida. En la figura 6.3 se detalla el espectro de distorsión de la tensión en la barra 71.

Tabla 6.1: THD de la tensión (componente fundamental)

Barra #	Fase A	Fase B	Fase C
32	1,96(1,034)	1,76 (1,038)	1,69(1,007)
33	1,96(1,034)	1,76(1,038)	1,69(1,007)
34	0,96(1,018)	0,96(1,030)	1,04(1,022)
71	3,23(1,010)	2,76(1,045)	2,86(0,969)
75	3,35(1,003)	2,82(1,048)	2,95(0,967)
52	3,30(1,008)		
911			3,00(0,965)

La técnica para medir los armónicos se basó en una ventana rectangular con truncamiento al cruce por cero. La figura 6.3 muestra el espectro en amplitud de las tensiones de fase para la barra 71.

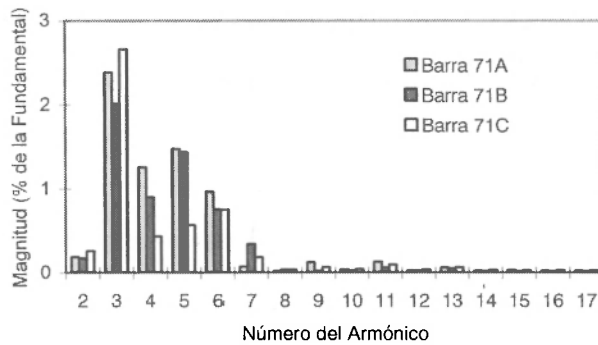


Figura 6.3: Caso 13A, Descomposición en el espectro de amplitud para las tensiones de fase en la barra 71.

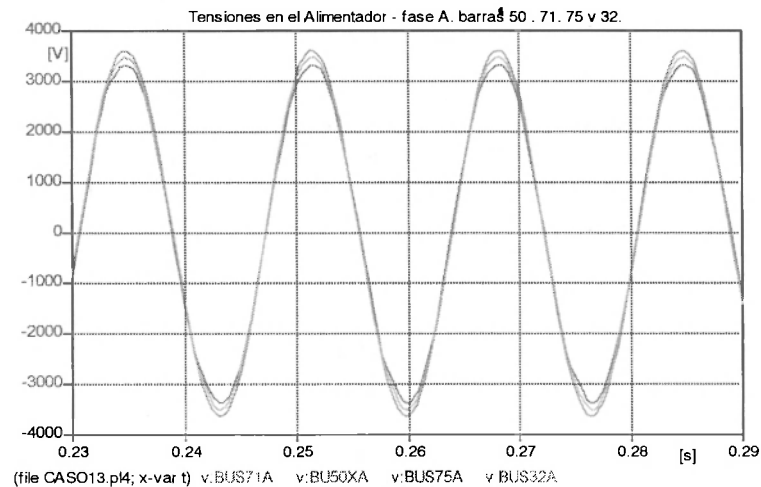


Figura 6.4: Caso 13A, tensiones de la fase a para las barras 32, 50, 71 y 75.

En la figura 6.4 se muestran los valores de tensión en los puntos donde se midió, que fueron las barras 32, 71 y 75 del sistema previamente detallado, correspondiente a una distribución radial, con condiciones de desbalance y contenido armónico. Cada barra presenta una variación tolerable en amplitud, normal en la selección de la tensión de regulación de éste tipo de alimentadores ($\Delta V = 2,5\%$).

Se escogió medir en la barra 32 por ser ésta la fuente de alimentación del sistema, en la barra 75, por tener allí ubicado uno de los bancos capacitivos del sistema. Finalmente, se midió en el último tramo del alimentador 32-71, en razón del desbalance que presenta.

Técnica pqAT aplicada al caso 13A:

Modulo de determinación de las potencias real e imaginaria:

En la figura 6.5 se muestran los resultados del cálculo de la potencia real y en la 6.6 las potencias imaginarias instantáneas para las barras medidas.

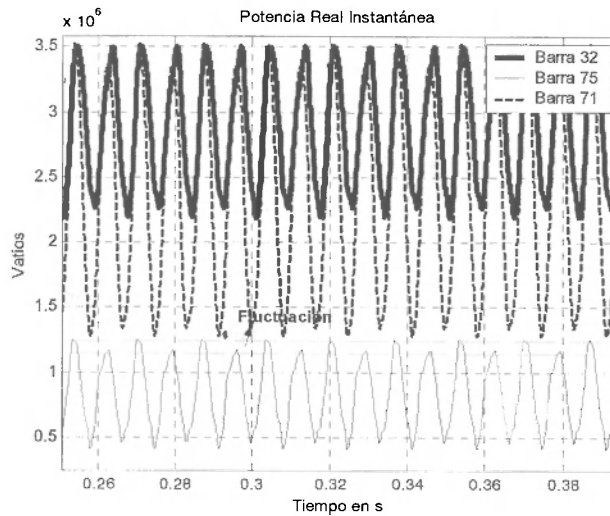


Figura 6.5: Caso 13A, potencia real instantánea en las barras 32, 71 y 75.

Como se observa en las figuras 6.5 y 6.6 hay una fluctuación. Este es el caso propio de cargas desbalanceadas con potencias importantes, donde la mayor parte de la distribución de estas cargas está en el alimentador 32-71 del sistema. El desbalance se manifiesta como una fluctuación en la fuente de alimentación.

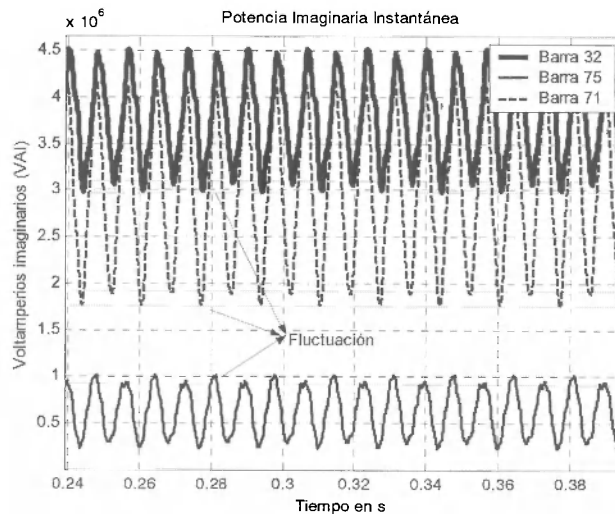


Figura 6.6: Caso 13A, Potencia imaginaria instantánea en las barras 32, 71 y 75.

La compensación de la potencia de desequilibrio puede hacerse siguiendo varias metodologías y en [11] se detallan varios métodos.

La evaluación de las potencias real e imaginarias muestra una potencia fluctuante producto del desbalance como se observa en las figuras 6.5 y 6.6.

Módulo de determinación de las potencias activa y reactiva:

Se presentó en este caso una modificación para flujo de carga original, pues se mantiene fuera de servicio la máquina conectada en la barra 34 y por ello el valor de la potencia activa y reactiva resulta inferior al flujo presentado en [3]. Estos valores de potencia activa y reactiva, (para los nodos medidos) se muestran en la figura 6.7 y 6.8 respectivamente.

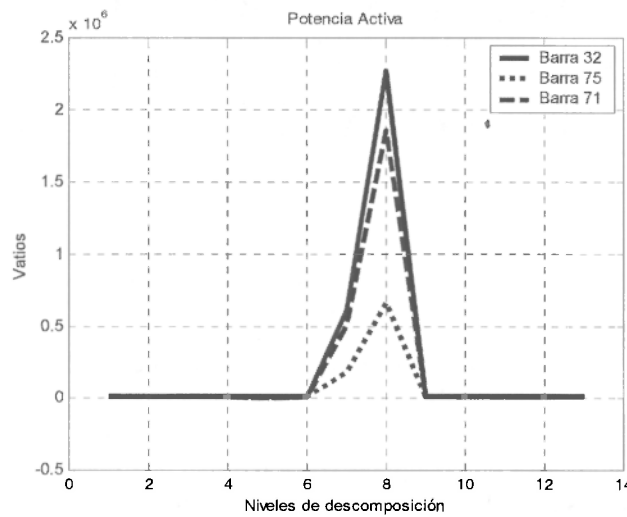


Figura 6.7: Caso 13A, potencia activa medida en las barras 32, 71 y 75.

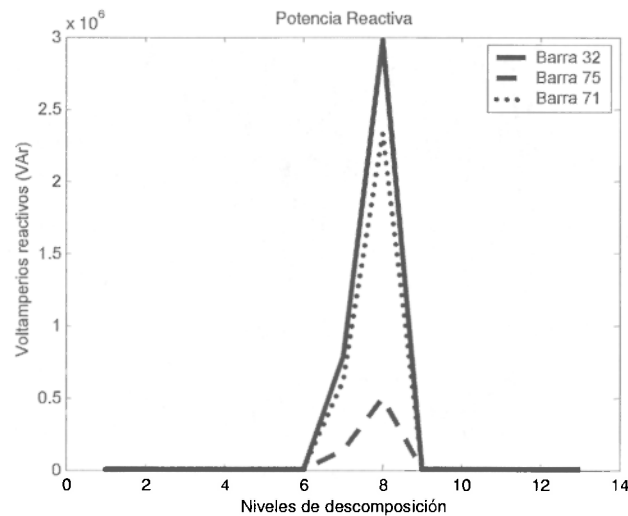


Figura 6.8: Caso 13A, potencia reactiva medida en las barras 32, 71 y 75.

Módulo de determinación de la potencia de deformación, curvas std-p y std-q:

El mayor grado de desviación de los coeficientes se presenta en el nivel 7 y 8 de las curvas std-p y std q que se muestran en las figura 6.9 y 6.10, respectivamente. En ellas, se detalla el problema de la potencia fluctuante que se observó en el modulo anterior. Este parámetro es discriminante y se asocia al problema de desbalance.

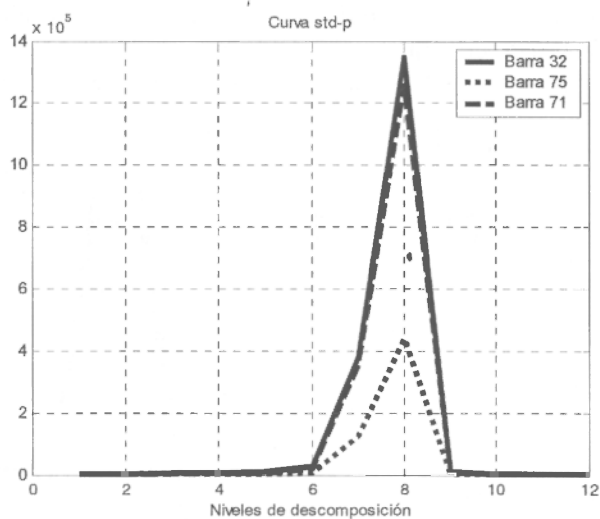


Figura 6.9: Caso 13A, desviación estándar de los coeficientes, curva std- p vista por las barras 32, 71 y 75.

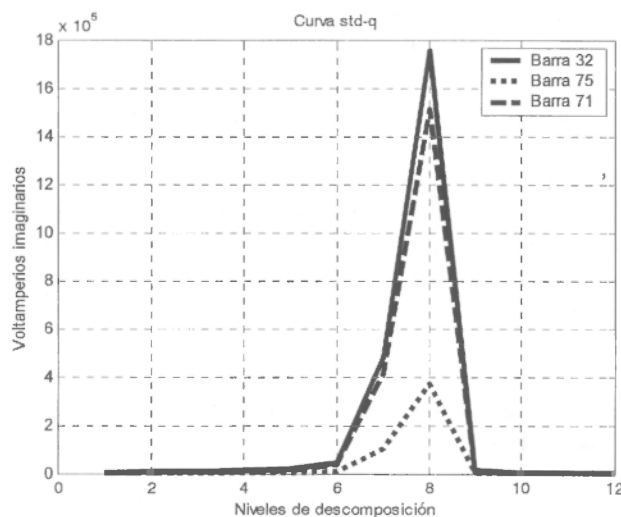


Figura 6.10: Caso 13A, desviación estándar de los coeficientes, curva std- q vista por las barras 32, 71 y 75.

Nótese que la potencia real instantánea en la figura 6.5 (para la barra 71) presenta mayor amplitud de oscilación y una diferencia de fluctuación apreciable, que es discriminada en la figura 6.9, esta fluctuación es comparable en amplitud a la presentada en la barra 32. Las curvas std-p y std-q destacan el problema de desbalance. Estas curvas no aportan información sobre la cantidad de distorsión armónica del sistema, pues la desviación de estos coeficientes es muy pequeña.

Modulo de determinación de la curva de relación ruido/señal RDD:

Al observar la discriminación de desbalance pero la poca discriminación en relación al ruido y a la distorsión, es necesario utilizar las curvas RDD-p y RDD-q con la finalidad de unificar el problema de discriminación de desbalance y armónicos en una sola observación. Esto se aprecia en las figuras 6.11 y 6.12.

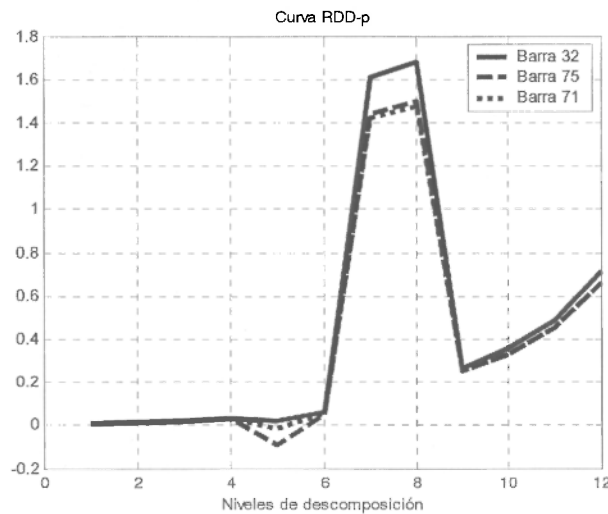


Figura 6.11: Caso 13A, relación ruido/señal, curva RDD- p vista por las barras 32, 71 y 75.

El efecto de truncamiento en la señal provoca el grado de desviación que se presenta en el nivel 11 y 12 de la figura. Pensando en la asociación a un “Black out” del sistema de evaluación, la desviación de la curva RDD en los niveles 10 al 12 se ve como parámetro de identificación de flicker. La simulación se realizó para un tiempo máximo de 2 segundos. La detección que hacen las curvas RDD en los últimos niveles, sirve como referencia para los casos de fallas simultáneas que se presentarán más adelante.

El nivel cinco presenta una desviación negativa en la barra 71 y 75, lo que indica la presencia de una componente armónica superior al 10% (como se determinó en la tabla 6.1).

El cambio de amplitud en los niveles 7 y 8 de la figura 6.11 es un indicativo de desbalance. La barra 75 se alimenta de la barra 71 por lo que es de esperarse el mismo nivel de desviación en la curva RDD-p. No ocurre lo mismo con la curva RDD-q pues ésta discrimina mejor a la barra 75 por el hecho de alimentar ésta un banco capacitivo. Obsérvese en la barra 75 una disminución de amplitud en el