

SELECCIÓN DE LA MEJOR BASE PARA LA CARACTERIZACIÓN DE
PERTURBACIONES EN SEÑALES DE CALIDAD DE POTENCIA USANDO
TRANSFORMACIONES TIEMPO/FRECUENCIA.

ANDRÉS FELIPE LÓPEZ LOPERA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PEREIRA

2013

SELECCIÓN DE LA MEJOR BASE PARA LA CARACTERIZACIÓN DE
PERTURBACIONES EN SEÑALES DE CALIDAD DE POTENCIA USANDO
TRANSFORMACIONES TIEMPO/FRECUENCIA.

ANDRÉS FELIPE LÓPEZ LOPERA

Proyecto de grado presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero
Electricista

Director: Mauricio Alexander Álvarez López, PhD.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PEREIRA

2013

Nota de aceptación:

Firma del director del proyecto

Firma del jurado

Pereira, 17 de octubre de 2014

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor Mauricio A. Álvarez L. por sus constantes aportes y enseñanzas durante la realización de este trabajo. A todos mis docentes y todas aquellas personas a las que he tenido el gusto de conocer y que contribuyeron en mi formación académica.

DEDICADO

A Carmen Elena Lopera y Libardo López Lopera, madre y hermano, quienes fueron los responsables de haber permitido que se diera esta gran oportunidad en mi vida.

Andrés Felipe López Lopera

Índice general

1. Introducción	5
2. Calidad de Potencia	7
2.1. Calidad de Potencia (PQ)	7
2.2. Perturbaciones	9
3. Marco Referencial	13
3.1. Representación Sobrecompleta de Señales	13
3.2. Transformaciones Tiempo/Frecuencia	14
3.2.1. Transformada de Tiempo Corto de Fourier (STFT)	15
3.2.2. Transformada de Gabor (GT)	16
3.2.3. Transformada Wavelet (WT)	17
3.2.4. Transformada S (ST)	17
3.3. Basis Pursuit	18
3.4. Métodos de Puntos Interiores	19
4. Materiales y Métodos	23

4.1. Base de Datos	23
4.2. Implementación STFT	23
4.3. Implementación WT	24
4.4. Implementación ST	24
4.5. Implementación BP	25
5. Pruebas y Resultados	26
5.1. Pruebas con Datos Sintéticos	26
5.2. Pruebas con Bases de Datos Reales	27
6. Conclusiones	33

Índice de figuras

2.1. Ejemplos de perturbación del tipo (a) elevación (swell) (b) reducción (sag) (c) distorsión armónica (harmonic distortion) (d) parpadeo (flicker).	8
2.2. Ejemplos de perturbación del tipo (a) muescas (notch) (b) impulso transitorio (impulsive transient) (c) oscilación transitoria (oscillatory transient).	10
3.1. Se representa el comportamiento de los métodos puntos interiores en \mathbb{R}^2 . Se parte de un punto interior de color naranja dentro de un conjunto de puntos viable (superficie azul), y a través de la dirección del gradiente (flecha blanca), se pretende llegar a un punto próximo al punto minimizador (punto óptimo) pero interior al conjunto de restricciones.	20
5.1. Resultado de perturbación sintética. Se muestra en (a) la señal original (b) la señal reconstruida y finalmente (c) los coeficientes de representación obtenidos por BP. . .	27
5.2. Resultado de perturbación con distorsión armónica. Se muestra en (a) la señal original (b) la señal reconstruida y finalmente (c) los coeficientes de representación obtenidos por BP.	28
5.3. Resultado de perturbación con efecto de reducción. Se muestra en (a) la señal original (b) la señal reconstruida y finalmente (c) los coeficientes de representación obtenidos por BP.	29

5.4. Resultado de perturbación con efecto parpadeo. Se muestra en (a) la señal original (b) la señal reconstruida y finalmente (c) los coeficientes de representación obtenidos por BP.	30
5.5. Resultado de perturbación con efecto transitorio. Se muestra en (a) la señal original (b) la señal reconstruida y finalmente (c) los coeficientes de representación obtenidos por BP.	31

Índice de cuadros

2.1. Relaciona las características cuantitativas de los diferentes tipos de perturbaciones PQ. En el <i>espectro</i> se muestran las restricciones en frecuencia, la <i>duración</i> representa el comportamiento en el tiempo y <i>magnitud</i> representa la variación en amplitud. . .	12
5.1. Resultados promedios del error cuadrático para diez pruebas de BP para cada una de las perturbaciones y diccionarios propuestos. <i>Perturbación</i> define el tipo de perturbación de análisis y <i>Error</i> indica el error cuadrático promedio obtenido entre la perturbación original y la obtenida a través de BP junto con la desviación estándar promedio.	30
5.2. Resultados promedios de sparsity para diez pruebas de BP para cada una de las perturbaciones y diccionarios propuestos. <i>Perturbación</i> define el tipo de perturbación de análisis y <i>Sparsity</i> muestra los porcentajes de dispersión promedio obtenidos por BP para cada tipo de perturbación.	32
5.3. Resultados promedios de tiempo de cómputo para diez pruebas de BP para cada una de las perturbaciones y diccionarios propuestos. <i>Perturbación</i> define el tipo de perturbación de análisis y <i>Tiempo</i> muestra el tiempo necesario promedio obtenidos por BP para cada tipo de perturbación.	32

OBJETIVOS

Objetivo General

Seleccionar bases óptimas de representación tiempo/frecuencia para la caracterización de perturbaciones de calidad de potencia, empleando el principio de optimización Basis Pursuit.

Objetivos Específicos

- Procesar y caracterizar señales de calidad de potencia mediante transformaciones matemáticas tiempo/frecuencia.
- Construir la mejor base para lograr representaciones sobrecompletas (Overcomplete Representation) en señales de calidad de potencia mediante la implementación de Basis Pursuit (*Analysis*).
- Validar los resultados obtenidos a través de la reconstrucción de la señal original (*Synthesis*).

Resumen

En el pasado, el estudio de la ingeniería eléctrica se había estado basado en el análisis de grandes centros de generación para grandes centros de demanda requerida a través de un sistema de transporte. De esta manera, se han ido desarrollando e implementando técnicas de despacho y mercadeo de activos (energía eléctrica producida) ocasionando un gran interés en conceptos nuevos como calidad de potencia y confiabilidad.

Estos conceptos han obligado a las electrificadoras y a los operadores de red, además de lograr una continuidad del suministro de energía (confiabilidad), producir y comercializar con mayor calidad su producto junto con la singularidad de oferta y demanda para una mejor eficiencia en la potencia entregada en la carga y así manejar estándares de calidad en el momento de tratar con estos activos.

El análisis de señales de calidad de potencia se ha convertido en tema de total interés en la eficiencia y comercialización de la energía eléctrica. Éste análisis define con qué calidad se transmite la energía, incrementando tanto la eficiencia como la vida útil de los elementos que se encuentren conectados a la red o sistema eléctrico. Frecuentemente, se presentan diversos tipos de perturbaciones tales como variaciones en tensión, niveles de armónicos, efecto parpadeo, muescas y efectos transitorios.

La preocupación del tratamiento de estos tipos de perturbaciones, ha impulsado la necesidad de detectar y clasificar dichas perturbaciones mediante el uso de transformaciones tiempo/frecuencia. Existen una gran variedad de técnicas propuestas en el estado del arte para caracterizar este tipo de representaciones tiempo/frecuencia, cada una con sus ventajas y desventajas en el momento de su implementación a los diferentes tipos de perturbaciones. Por tanto, surge la necesidad de seleccionar técnicas más adecuadas para caracterizar las perturbaciones de un sistema eléctrico y esto ha conllevado a tratar de lograr caracterizaciones completas a través de la unión de algunas de

las transformaciones tiempo/frecuencia para así lograr representaciones sobrecompletas de dichas perturbaciones, mediante procesos de caracterización y de optimización, los cuales permitan abordar y clasificar en conjunto o de manera independiente, el análisis de las mismas.

Este proyecto plantea una metodología, a través de transformaciones tiempo/frecuencia, basada en el principio de optimización de bases adaptativas (Basis Pursuit) para promover sparsity en los coeficientes de representación, y así lograr finalmente representaciones sobrecompletas de los diferentes tipos de perturbaciones ya mencionadas mediante diversos diccionarios completos como por ejemplo la transformada en tiempo corto de Fourier, transformada Gabor, transformada Wavelet y transformada S; llenando así un vacío investigativo en el momento en el que se requiera estudiar dichas caracterizaciones óptimas para encontrar posibles soluciones e interpretaciones de las mismas mediante el tratamiento de sus formas de onda. Finalmente se consignan los resultados obtenidos de los experimentos de caracterización y optimización realizados sobre la base de datos con la que se dispone.

Notación

Se tomará, por notación, en letras mayúsculas y en negrita las variables asociadas a matrices. De igual forma, los vectores se notarán en letras minúsculas y en negrita.

<i>Símbolo</i>	<i>Definición</i>
\cong	igualdad que actúa como aproximación
\triangleq	igualdad que actúa como definición
\mathbb{R}	los números reales
\mathbb{Z}	los números enteros
\mathbf{A}	matriz \mathbf{A}
\mathbf{b}	vector \mathbf{b}
c	escalar c
$\mathbf{0}$	vector de ceros
\mathbf{b}^\top	transpuesta del vector \mathbf{b}
$ \mathbf{A} $	determinante de la matriz \mathbf{A}
$\ \mathbf{b}\ $	norma euclidiana del vector \mathbf{b}
$\ \mathbf{b}\ _1$	norma de orden 1 del vector \mathbf{b}
$ c $	valor absoluto del escalar c
$\mathbf{b} \in \mathbb{R}^n$	el vector \mathbf{b} pertenece al espacio \mathbb{R}^n
\mathbf{I}	matriz identidad

Capítulo 1

Introducción

El análisis de señales de calidad de potencia (PQ) se ha convertido en tema de total interés para los estudios en eficiencia y procesos de comercialización de la energía eléctrica. Este define con qué calidad se transmite la energía, incrementando tanto la eficiencia como la vida útil de los elementos que se encuentren conectados a la red (sistema eléctrico) donde el procesamiento de señales ha permitido caracterizar para un mejor análisis de estos problemas presentes en señales de calidad de potencia para luego, a través de herramientas brindadas por la electrónica, proponer alternativas para la corrección de los mismos.

Frecuentemente, se presentan diversos tipos de problemas en las señales de calidad de potencia (perturbaciones), tales como variaciones en tensión (swells y sags), contenido de armónicos (THD), efecto parpadeo (flicker), muescas (notch) y efectos transitorios [1][2][3][4].

Se han logrado grandes aportes en el concepto de calidad de potencia y su importancia en un sistema eléctrico de potencia, y así se han ido implementando definiciones y conceptos empleados en este contexto [5][6][7], recopilando una gran cantidad de metodologías de procesamiento de señales y técnicas de clasificación de perturbaciones [8][9]. Lo anterior ha permitido detectar y clasificar diferentes tipos de perturbaciones en señales de calidad de potencia mediante el uso de transformaciones tiempo/frecuencia para así obtener representaciones completas de las mismas.

En el contexto PQ, se ha logrado implementar transformaciones tiempo/frecuencia para la detección de perturbaciones tales como la transformada en tiempo corto de Fourier (STFT) [10], transfor-

mada Gabor (GT) [11], transformada Wavelet (WT) [12][13], transformada S (ST) [14][15], entre otras [16][17], logrando así diccionarios que permiten obtener representaciones completas de perturbaciones. La combinación de este tipo de diccionarios, han permitido lograr caracterizaciones sobrecompletas de dichas perturbaciones mediante procesos de caracterización y de optimización usando métodos de programación lineal, permitiendo abordar y clasificar en conjunto o de manera independiente el análisis de PQ de un sistema eléctrico y caracterizaciones óptimas de perturbaciones [18][19], lo cual hasta ahora no ha sido estudiado.

Con esta propuesta se demuestra que a través de transformaciones tiempo/frecuencia, para lograr una mejor resolución tanto en el tiempo como en la frecuencia, y un análisis de bases adaptativas Basis Pursuit (BP), es posible lograr representaciones sobrecompletas de los diferentes tipos de perturbaciones ya mencionadas mediante diversos diccionarios completos como STFT, GT, WT y ST a través de sus componentes más representativas obtenidas por BP usando el método de puntos interiores primal-dual de barrera logarítmica, y así obtener la representación sobrecompleta más óptima promoviendo la condición de sparsity en el conjunto de coeficientes de representación utilizado y así fortalecer los aspectos de caracterización y tratamiento de perturbaciones en problemas PQ.

El capítulo 2 contiene toda la teoría que envuelve el concepto de PQ (sección 2.1), tipos de perturbaciones y características de los mismos (sección 2.2). En el capítulo 3 se definen los criterios para obtener representaciones sobrecompletas (sección 3.1) y los diccionarios tiempo/frecuencia propuestos para lograr dichas representaciones (sección 3.2). Además, se explica el principio de BP (sección 3.3) y se describe el método de punto interior primal-dual de barrera logarítmica (sección 3.4). En el capítulo 4, se describen los materiales y métodos requeridos para la realización de la propuesta. Finalmente, en los capítulos 5 y 6 se muestran los resultados obtenidos al implementar el principio BP y las conclusiones obtenidas por el proyecto.

Capítulo 2

Calidad de Potencia

En el capítulo 2 se recopilan conceptos y definiciones del estado del arte de el término de *calidad de potencia* (sección 2.1) y las características de los diferentes tipos de perturbaciones presentes en un sistema eléctrico de potencia (sección 2.2).

2.1. Calidad de Potencia (PQ)

El análisis de señales de calidad de potencia se ha convertido en tema de total interés en la eficiencia y comercialización de la energía eléctrica. El término de *calidad de potencia* ha sido uno de los términos más utilizados hoy día a pesar de no tener definiciones consolidadas y estandarizadas según el estado del arte [1][2][3][4][20]. Por simplicidad, se adoptará la siguiente definición:

“La calidad de potencia de un sistema eléctrico se encarga de medir los problemas que ‘desvían’ una señal de tensión, corriente y/o frecuencia de la deseada. Normalmente, las perturbaciones que se presentan en un sistema de potencia son: Elevación (Swell), Reducción (Sag), Distorsión Armónica (Harmonic Distortion), Parpadeo (Flicker), Muesca (Notch) o Transitorios (Transients).” [1][2]

Donde se entenderá por “desviar” a la distorsión o diferencia existente entre la forma de onda de tensión, corriente o frecuencia ideal (armónico fundamental), y la forma de onda medida en un

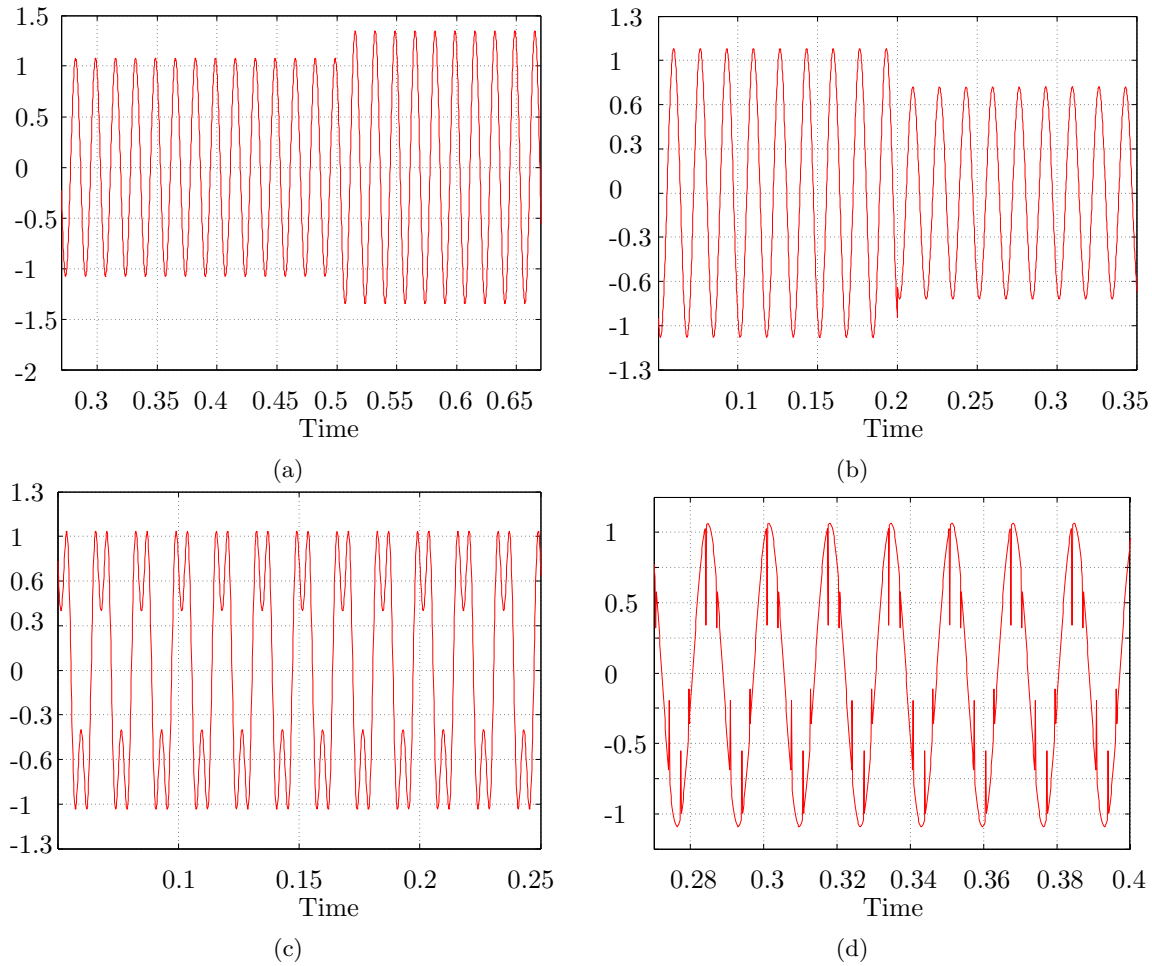


Figura 2.1: Ejemplos de perturbación del tipo (a) elevación (swell) (b) reducción (sag) (c) distorsión armónica (harmonic distortion) (d) parpadeo (flicker).

sistema eléctrico determinado. A este fenómeno se denominará *perturbaciones* [6]. Por tanto, es posible definir el término de *calidad de potencia* como la capacidad de un sistema para conservar la calidad de la forma de onda de una señal eléctrica, sin perturbaciones, cuando este la transmite. Un sistema eléctrico o red con una buena calidad de potencia permite incrementar tanto la eficiencia como la vida útil de los elementos y equipos que se encuentren conectados al mismo debido a que las perturbaciones son fenómenos no deseados para el normal funcionamiento de los mismo.

2.2. Perturbaciones

Ya definida una perturbación como la distorsión de una señal eléctrica de su forma de onda ideal, éstas pueden clasificarse en *eventos* y *variaciones*. Se dice que un evento es una perturbación que ocurre de manera eventual y repentina con un comienzo y un fin claramente definido. Una variación, al contrario, es una perturbación en estado estacionario o cuasi-estacionario que requieren de mediciones continuas [5].

Frecuentemente, se presentan diversos tipos de perturbaciones tales como variaciones en tensión (swells y sags), niveles de armónicos (THD), efecto flicker, muescas y efectos transitorios. De igual manera, se recopilarán un conjunto de definiciones para los diferentes tipos de perturbaciones mencionadas anteriormente para un mejor entendimiento.

Elevación (Swell): Incremento entre el 110 % y 180 % del valor eficaz de tensión o corriente para un intervalo de tiempo entre 10 ms hasta 1 minuto considerados de corta duración y mayores a 1 minuto para larga duración [4]. Normalmente se deben a fallas y por cambio de taps en subestaciones [2].

Reducción (Sag): disminución entre 10 % y 90 % del valor eficaz de tensión o corriente para un intervalo de tiempo entre 10 ms hasta 1 minuto considerados de corta duración y mayores a 1 minuto para larga duración [4]. Normalmente se deben a fallas, cambio de taps en subestaciones y energización de grandes cargas [2].

Distorsión Armónica (Harmonic Distortion): Presencia de frecuencias de valores múltiplos enteros entre 2 y 40 (armónicos) de la frecuencia fundamental propia de la señal [1][3]. Se mide a través de la Distorsión Armónica Total (THD)

$$\%THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n V_k^2}}{V_1} \%,$$

donde V_k es la tensión eficaz del k-ésimo armónico y V_1 es la tensión eficaz de la componente fundamental. El valor de THD máximo permitido para las tensiones en un sistema de potencia es

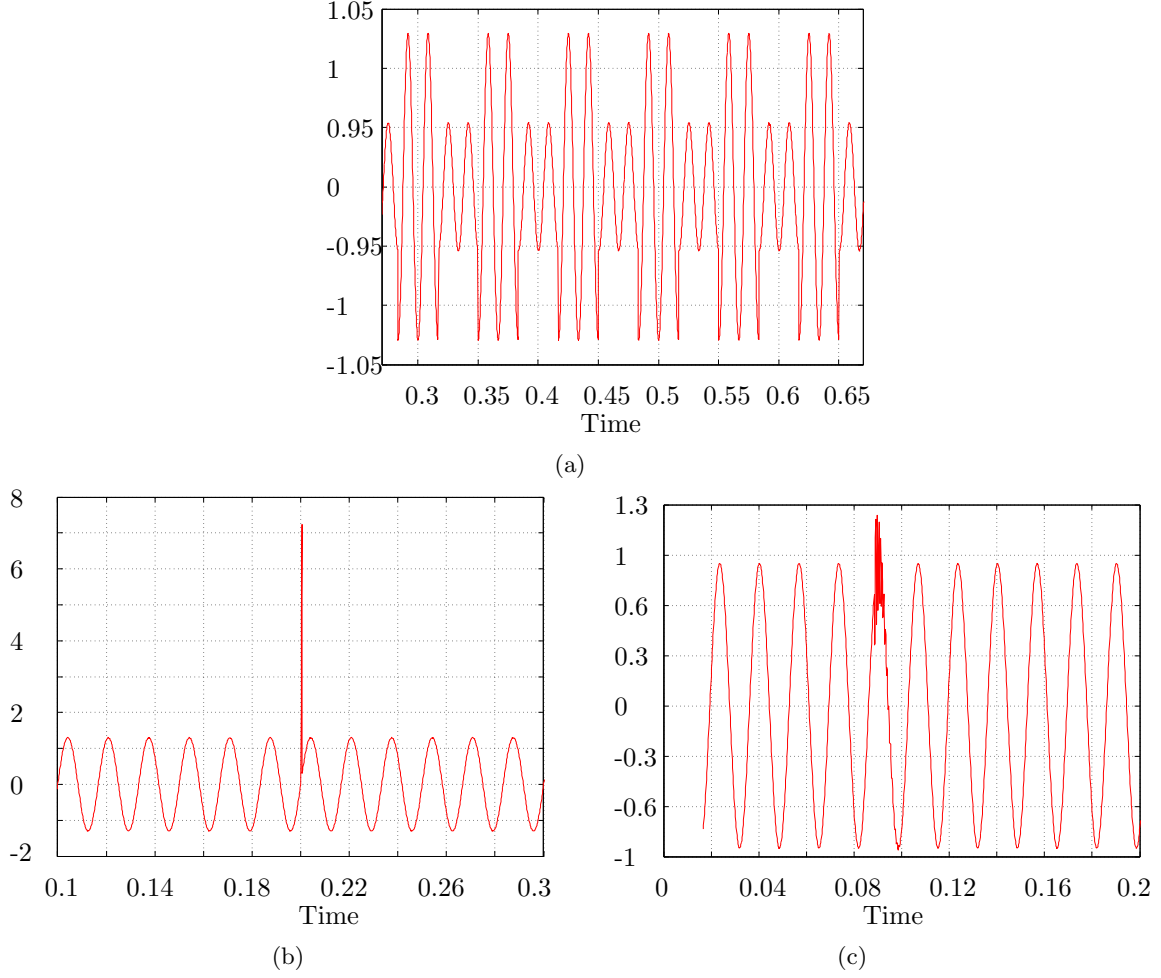


Figura 2.2: Ejemplos de perturbación del tipo (a) muescas (notch) (b) impulso transitorio (impulsive transient) (c) oscilación transitoria (oscillatory transient).

del 5.0 % para 2.3-69 kV, 2.5 % para 69-138 kV y 1.5 % para valores mayores de 138 kV [20]. De igual manera, se puede determinar la cantidad de THD para la corriente

$$\%THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n I_k^2}}{I_1} \%,$$

donde I_k es la corriente eficaz del k-ésimo armónico e I_1 es la corriente eficaz de la componente fundamental. El valor de THD máximo permitido para las corrientes es del 20 % [4]. Se deben normalmente a dispositivos no lineales conectados a la red [21].

Muestras (Notch): Variación que se presentan como pequeños ruidos o hendiduras debido al normal funcionamiento de los dispositivos conectados a la red cuando se presentan conmutaciones de corriente de una fase a otra [2][21].

Efecto Parpadeo (Flicker): fluctuaciones entre $\pm 0,1\%$ hasta $\pm 7\%$ del valor eficaz de tensión o corriente a una frecuencia normalmente menores a 25 Hz usualmente por cicloconvertidores, hornos de arcos y otros sistemas que arrastran altas corriente no sincronizadas en frecuencia con la red [2][4][3].

Transitorios (Transient): Son variaciones de la señal de análisis durante un intervalo de tiempo definido en un único ciclo o en múltiples ciclos. Se clasifican generalmente en dos tipos: transitorios del tipo impulso (Impulsive Transients) y transitorios oscilatorios (Oscillatory Transients).

Los transitorios del tipo impulso son variaciones unidireccionales de tensión, de corriente o de ambos que ocurren en un intervalo entre 50 ns hasta 1 ms debido usualmente por descargas eléctricas, conmutaciones de cargas inductivas (motores) o por cambios en el sistema de distribución de energía [2][3].

Los transitorios oscilatorios son variaciones bidireccionales en tensión, de corriente o de ambos en un intervalo entre 5 μs y 0.3 ms debido usualmente por conmutaciones de bancos de capacitores utilizados para la corrección del factor de potencia (fp) [2][3].

En las figuras 2.1 y 2.2 se ilustran ejemplos típicos de los diferentes tipos de perturbaciones PQ presentes en un sistema eléctrico de potencia, y además, en la tabla 2.1 se muestran las características cuantitativas de los mismos con sus respectivas interpretaciones en la frecuencia (Espectro), duración en el tiempo (Tiempo) y las variaciones en amplitud (Magnitud).

Categoría	Espectro	Duración	Magnitud
Elevación (Swell)		10 ms - 1 min	110-180 %
Reducción (Sag)		10 ms - 1 min	10-90 %
Distorsión Armónica (Harmonic Distortion)	k=2~40	Estacionario	0-20 %
Muecas (Notch)		Estacionario	
Parpadeo (Flicker)	<25 Hz	Estacionario	0.1-7 %
Transitorio Tipo Impulso (Impulsive Transients)		50 ns - 1 ms	
Transitorio con Oscilaciones (Oscillatory Transients)		5 μ s - 0.3 ms	

TABLA 2.1: Relaciona las características cuantitativas de los diferentes tipos de perturbaciones PQ. En el *espectro* se muestran las restricciones en frecuencia, la *duración* representa el comportamiento en el tiempo y *magnitud* representa la variación en amplitud.

Capítulo 3

Marco Referencial

En el capítulo 3 se definen los criterios para obtener representaciones sobrecompletas (sección 3.1) y los diccionarios tiempo/frecuencia propuestos para lograr dichas representaciones (sección 3.2). Además, se explica el principio de BP (sección 3.3) y se describe el método de punto interior primal-dual de barrera logarítmica (sección 3.4).

3.1. Representación Sobrecompleta de Señales

Definiendo $x(t)$, una expresión matemática que caracteriza un conjunto de información obtenida que describe un fenómeno físico a través del tiempo, de ahora en adelante llamada como una señal o función [22], y $\phi_k(t)$, con $k \in \mathbb{Z}$, se dice que el conjunto de señales $\phi_k(t)$ representan la señal $x(t)$ si es posible expresar a $x(t)$ como una suma ponderada del conjunto de señales $\phi(t)$ de la forma

$$x(t) = \sum_k \alpha_k \phi_k(t) + \varepsilon(t), \quad (3.1)$$

donde α_k se denominan los coeficientes de representación y $\varepsilon(t)$ la función de error obtenida al realizar la representación de $x(t)$ para un conjunto $\phi_k(t)$. Ahora bien, un conjunto de señales $\phi_k(t)$ es un conjunto mutuamente ortogonal, si se cumple que

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi_i(t) \phi_j(t) dt = \begin{cases} E_{\phi_i}, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}, \quad (3.2)$$

donde $\phi_i(t)$ y $\phi_j(t)$ pertenecen al conjunto de señales $\phi_k(t)$ y E_{ϕ_i} se denomina la *energía* de $\phi_i(t)$ [22]. A la expresión (3.2) se le conoce como el *producto interno*, o *producto punto*, entre las señales ortogonales $\phi_i(t)$ y $\phi_j(t)$. Si se cumple que el valor de energía E_{ϕ_i} es de norma unitario, $|E_{\phi_i}| = 1$, se dice que las señales son mutuamente *ortonormales*. Para un conjunto $\phi_k(t)$ mutuamente ortogonal, los coeficiente de representación α_k pueden expresarse de la forma

$$\alpha_k = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x(t)\phi_k(t)dt}{E_{\phi_k}},$$

con $k \in \mathbb{Z}$. La representación de una señal $x(t)$ en términos de un conjunto de señales mutuamente ortogonal $\phi_k(t)$ permite minimizar el error obtenido en la representación, es decir, a medida que se incrementa el número de funciones bases $\phi_k(t)$, disminuye la función error obtenida [22]. Ahora bien, se dice que un conjunto ortogonal $\phi_k(t)$, forma una *base*, cuando la representación permite caracterizar de manera completa la señal de análisis $x(t)$ [19], dicho de otra forma, la función de error es igual a cero, $\varepsilon(t) = 0$, por tanto la expresión (3.1) se puede reescribir de la forma

$$x(t) = \sum_k \alpha_k \phi_k(t), \quad (3.3)$$

donde (3.3) se considera una *representación completa* de $x(t)$. Finalmente, si el conjunto $\phi_k(t)$ está compuesto por señales representativas, bases de una clase dada (e.g. funciones cosenos, exponenciales complejas, deltas de Dirac), se dice que el conjunto forma un *espacio funcional* o *diccionario* [19].

Después de haber definido algunas propiedades relevantes para la representación de una señal, es posible definir ahora el término de *representación sobrecompleta* como la representación completa de una señal mediante la combinación de diferentes diccionarios [19][23].

3.2. Transformaciones Tiempo/Frecuencia

Las transformaciones tiempo/frecuencia son transformaciones basadas en la transformada de Fourier calculada para intervalos de tiempos definidos a través de una función ventana la cual es una función móvil en el dominio del tiempo. Este tipo de transformaciones permiten un análisis del comportamiento de una señal tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia

permitiendo obtener una mayor información de la señal comparada con la información que se podría obtener con el análisis de la misma directamente en el dominio del tiempo o a través del análisis de su espectro (compartimiento en frecuencia). Este tipo de transformaciones permiten interpretar, de mejor manera, señales no estacionarias en el sentido de que trata directamente con las variables independientes, tiempo y frecuencia, en conjunto.

3.2.1. Transformada de Tiempo Corto de Fourier (STFT)

La transformada de tiempo corto de Fourier (STFT) es uno de los algoritmos más utilizados en el análisis de calidad de potencia debido a que maneja una mejor resolución tanto en el tiempo como en la frecuencia permitiendo una mejor interpretación para perturbaciones no estacionarias tales como elevaciones/reducciones y efectos transitorios. Este algoritmo se basa en la transformada de Fourier centrada en cada instante de tiempo deseado según las características de la función ventana seleccionada para describir el comportamiento de la señal original. La STFT puede expresarse como

$$STFT\{x(t)\} = X(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)h(t - \tau)e^{-j\omega t}dt, \quad (3.4)$$

donde $x(t)$ es la señal de análisis en el dominio del tiempo, $h(t)$ es la función ventana utilizada, con un factor de traslación τ , la cual se encargará de suprimir $x(t)$ para ciertos valores por fuera de su región de aplicación obteniendo así la transformada de Fourier, $X(\tau, \omega)$, para un valor de tiempo local, permitiendo el cálculo del espectro para intervalos de tiempo de muy corta duración de la señal original [10][24]. La versión discreta de la STFT se describe como

$$STFT\{x[n]\} = X[n, \omega] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x[n]h[n - m]e^{-j\omega m}, \quad (3.5)$$

donde n es un valor discreto en el tiempo. La principal desventaja de esta transformación es que a mayor resolución en el tiempo requerida, peor es la resolución en la frecuencia, y viceversa. Además, el tamaño de la función ventana seleccionada es fijo para toda valor de frecuencia ω_i [12].

La STFT normalmente da por resultado valores complejos, por tanto, muchas veces se procede a graficar el espectrograma, definido como una representación bi-direccional de la magnitud de la $X(\tau, \omega)$ obtenida para los diferentes valores de tiempos y frecuencias, con el fin de poder realizar

un análisis cualitativo y/o cuantitativo de la misma

$$\text{SPECTROGRAM}\{x(t)\} = |X(\tau, \omega)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} x(t)h(t - \tau)e^{-j\omega t} dt \right|^2. \quad (3.6)$$

Una de sus ventajas se encuentra en su habilidad para caracterizar perturbaciones de carácter estacionarias tales como distorsiones armónicas de la señal de análisis para un intervalo de tiempo específico de acuerdo a la función ventana seleccionada [10]. Algunas ventanas utilizadas para la STFT son las tipo hamming, hann, gaussiana y rectangular.

3.2.2. Transformada de Gabor (GT)

Un caso particular de la STFT ampliamente difundido es la transformada de Gabor (GT) que se caracteriza por tener una función ventana del tipo gaussiana, $g(t)$

$$\text{GT}\{x(t)\} = \text{GT}_x(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)g(t - \tau, \sigma)e^{-j\omega t} dt, \quad (3.7)$$

Siendo

$$g(t, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} e^{-t^2/2\sigma^2}, \quad (3.8)$$

donde σ define la escala de apertura de la función ventana tipo gaussiana y τ el factor de traslación. Entre más suave sean las atenuaciones de la función ventana, más precisa será la representación tiempo/frecuencia [25]. Una alternativa para calcular el centro de la función gaussiana μ_t junto con su radio de apertura Δ_t es

$$\mu_t = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} t|g(t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |g(t)|^2 dt} \quad \Delta_t = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} (t - \mu_t)^2 |g(t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |g(t)|^2 dt}}, \quad (3.9)$$

de acuerdo a los anterior se tiene una cobertura en el tiempo por la función ventana desde $\mu_t - \Delta_t$ hasta $\mu_t + \Delta_t$ obteniendo un ancho de la ventana de $2\Delta_t$, valor suficientemente pequeño para un análisis más detallado de la señal permitiendo observar tendencias de distorsiones armónicas introducidas en la señal original [11]. Para propósito aproximados

$$g(t, \sigma) = \frac{1}{\pi^{1/4}\sqrt{\sigma}} e^{-t^2/2\sigma^2}, \quad (3.10)$$

siendo $\Delta_t = \sigma/\sqrt{2}$.

3.2.3. Transformada Wavelet (WT)

La transformada wavelet (WT) es el siguiente paso de las transformadas tiempo/frecuencia que se caracteriza por tener ventanas irregulares que pueden variar con el tiempo permitiendo obtener una mejor resolución tanto en el tiempo como en la frecuencia cuando se requiera mientras que para GT las ventanas gaussianas no lo permiten. [25]. Para este caso, las funciones ventanas se denominan wavelets [13]

$$\text{CWT}\{x(t)\} = \text{CWT}_x(\tau, d) = \frac{1}{\sqrt{d}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{d}\right) dt, \quad (3.11)$$

donde $\psi(t)$ se denomina la wavelet madre, τ el factor de traslación y d el factor de dilatación el cual se encargará de comprimir o expandir la wavelet madre (wavelets), y así permitir una mejor resolución cuando se requiera. Las funciones $\psi(t)$ utilizadas para caracterizar perturbaciones a muy altas frecuencias son angostas para mayor detalle, mientras que las utilizadas para caracterizar perturbaciones de baja frecuencia pueden ser mucho más amplias ya que no requieren el mismo nivel de detalle en intervalos de tiempo pequeños. Para un análisis computacional, se utiliza la transformada de wavelet discreta (DWT)

$$\text{DWT}\{x[n]\} = \text{DWT}_x[a, b] = \frac{1}{\sqrt{d_o^a}} \sum_n x[n] \psi\left[\frac{b - n\tau_o d_o^a}{d_o^a}\right], \quad (3.12)$$

donde a y b son valores enteros, $d_o > 1$ es la constante de dilatación y τ_o es la constante de traslación. La WT ha sido de gran uso para caracterizar perturbaciones como variaciones de tensión (elevaciones y reducciones) [13] y para estudios de transitorios (impulsos y oscilaciones) ya que permite una resolución adecuada tiempo/frecuencia para ciertos intervalos de tiempo definidos [12]. Algunas wavelets madres utilizadas en son las tipo Daubechies, Diádicas, Coiets, Morlets y Symlets.

3.2.4. Transformada S (ST)

Transformada S (ST) es una extensión de la CWT que, a parte de la traslación y la dilatación de la wavelet madre del tipo gaussiana, considera señales sinusoidales moduladas fijas respecto al tiempo (factor de corrección) [14]

$$\text{ST}\{x(t)\} = \text{ST}_x(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) g(t - \tau, f) e^{-2j\pi ft} dt, \quad (3.13)$$

Siendo

$$g(t) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{\left(-t^2 f^2 / 2\right)}, \quad (3.14)$$

donde el factor de escala $\sigma = 1/|f|$. Debido a que la parte exponencial oscilante permanece inmóvil, este factor de corrección o corrección de fase, permite a la ST caracterizar las componentes reales e imaginarias del espectro de manera independiente, localizando tanto el espectro de fase como el espectro de magnitud y así determinar el espectro de la transformada de Fourier (información de referencia de fase absoluta) [14]. La ST ha permitido caracterizar un amplio rango de perturbaciones de manera fiel tales como elevaciones/reducciones, muescas, efectos transitorios y combinaciones de las mismas debido a la capacidad detectar e identificar perturbaciones de corta duración [14][15].

3.3. Basis Pursuit

Basis Pursuit, con diccionarios altamente sobrecompletas, es un principio que conduce a la optimización de problemas a gran escala. Estos problemas pueden ser abordados con éxito mediante avances recientes en la programación lineal tales como el método de puntos-interiores. Basis Pursuit es un principio de descomposición de señales en superposiciones “óptimas” de diccionarios elementales (bases) (3.15) o una descomposición aproximada (3.16)

$$x(t) = \sum_n \alpha_n \phi_n(t) \quad (3.15)$$

$$x(t) = \sum_{n=1}^m \alpha_n \phi_n + R^{(m)}, \quad (3.16)$$

donde $R^{(m)}$ es el error o residuo de la representación realizada. Con BP se busca representar completamente una señal $x(t)$ mediante el menor número de coeficientes representativos posibles logrando así representaciones sobrecompletas convirtiéndose en un problema de optimización al pretender minimizar el número de coeficientes α , de manera matricial [19]

$$\begin{aligned} \min \quad & \|\alpha\|_1 \\ \text{sujeto a} \quad & \Phi\alpha = \mathbf{x}, \end{aligned} \quad (3.17)$$

donde la norma de orden 1 garantizará que muchos de los coeficientes del problema de minimización sean nulos. Muchos de los diccionarios son sobrecompletos (bases), pero al combinarlos se

puede obtener un nuevo “mega diccionario” compuesto de diferentes bases (STFT, WT, WVD, entre otros). La no singularidad brinda la posibilidad de adaptación, es decir, de elegir de entre muchas representaciones la más adecuada para nuestros propósitos. Se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- **Sparsity:** Se obtiene la representación sobrecompleta posible de la señal con el menor número de coeficientes significativos (disperso o Ralo).
- **Superresolución:** Se tiene una mejor resolución comparada a la obtenida mediante métodos tradicionales no adaptativos.
- **Velocidad:** Se obtiene una representación en orden de tiempo de $O(n)$ o $O(n\log(n))$.

Cuando se requiere reconstruir una señal a través de Basis Pursuit, se utiliza el proceso de *Synthesis* (3.18), mientras que si se requiere asociar una representación sobrecompleta a una señal, se utiliza el proceso de *Analysis* (3.19)

$$\mathbf{x} = \Phi \alpha \quad (3.18)$$

$$\tilde{\alpha} = \Psi \mathbf{x}, \quad (3.19)$$

siendo α el conjunto de coeficientes representativos, Φ la matriz característica compuesta por el conjunto de funciones bases de los diccionarios seleccionados y Ψ la matriz de asociación utilizada para determinar los coeficientes α para una representación sobrecompleta.

3.4. Métodos de Puntos Interiores

El método de puntos interiores consiste en iniciar la búsqueda del punto minimizador \mathbf{x}^* a través de un punto de partida $\mathbf{x}^{(0)}$ que se encuentre dentro de la región del conjunto de puntos viables, interior, y luego ir en búsqueda de \mathbf{x}^* dentro del mismo, por tanto, el método de puntos interiores converge, en la iteración $\mathbf{x}^{(k)}$ que se aproxime a la frontera del conjunto de puntos viables [19]. Ahora bien, si $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^m$, el conjunto de puntos viables $\{\mathbf{x} : \mathbf{Ax} = \mathbf{b}, \mathbf{x} \leq \mathbf{0}\}$ es un poliedro en \mathbb{R}^m debido a que el conjunto de restricciones es un conjunto lineal. Este método es de gran utilidad para problema de alta dimensionalidad, m muy grande, debido a que no se recorren todos los extremos

del poliedro en \mathbb{R}^m . En la figura 3.1 se ilustra el comportamiento del método de puntos interiores para un problema con $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2$

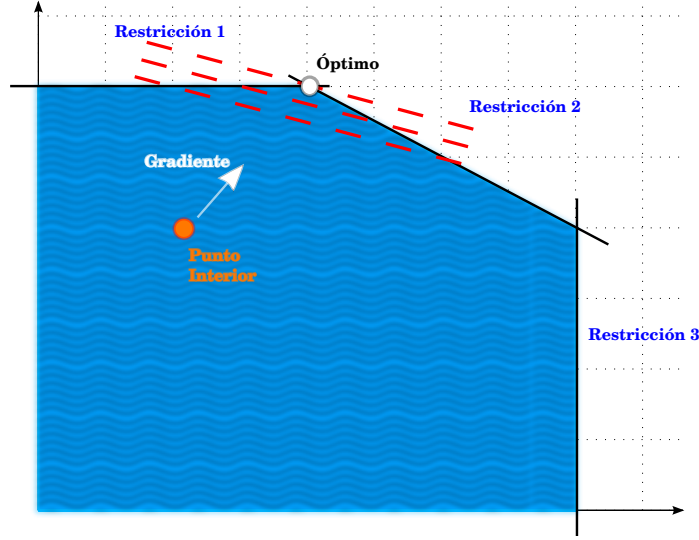


Figura 3.1: Se representa el comportamiento de los métodos puntos interiores en \mathbb{R}^2 . Se parte de un punto interior de color naranja dentro de un conjunto de puntos viable (superficie azul), y a través de la dirección del gradiente (flecha blanca), se pretende llegar a un punto próximo al punto minimizador (punto óptimo) pero interior al conjunto de restricciones.

Para el caso de BP, el problema de representación sobrecompleta se inicia a través de $\Phi \boldsymbol{\alpha}^{(0)} = \mathbf{s}$ con $\boldsymbol{\alpha}^{(0)} > 0$. Iterativamente, los coeficientes de representación $\boldsymbol{\alpha}^{(k)} > 0$ cambian satisfaciendo $\Phi \boldsymbol{\alpha}^{(k)} = \mathbf{s}$ donde se satisface la condición *sparse* de los coeficientes de representación.

Ahora bien, matemáticamente, mediante los métodos de puntos interiores, el problema de decisión dual de la selección de la mejor base de representación sobrecompleta, brindada por Basis Pursuit en (3.17), se puede describir de la forma

$$\begin{aligned} &\text{minimizar} && \mathbf{c}^\top \mathbf{x} + \frac{1}{2} \|\gamma \mathbf{x}\|^2 + \frac{1}{2} \|\mathbf{p}\|^2, \\ &\text{sujeto a} && \mathbf{A} \mathbf{x} + \delta \mathbf{p} = \mathbf{b} \end{aligned} \quad (3.20)$$

donde \mathbf{x} se conoce como la variable *primal* (vector de $\boldsymbol{\alpha}$), \mathbf{y} y \mathbf{z} se denominan las variables *duales*, γ y δ son parámetros de regularización del problema (e.g., 10^{-4}). A la expresión (3.20) se le conoce como el método de programación lineal primal-dual de barrera logarítmica [18]. a los términos

primal infeasibility y *dual infeasibility* se refieren a las cantidades $\|\mathbf{b} - \mathbf{Ax}\|_2$ y $\|\mathbf{c} - \mathbf{z} - \mathbf{A}^\top \mathbf{y}\|_2$ respectivamente. El término *duality gap* se refiere a la diferencia entre la función objetivo del problema primal y la función objetivo del problema dual: $\mathbf{c}^\top \mathbf{x} - \mathbf{b}^\top \mathbf{y}$ [19]. En 1 se muestra el algoritmo para la implementación del métodos de puntos interiores en BP. Es de notar, que para cada iteración, se requiere el uso del método del gradiente conjugado para determinar una solución aproximada del conjunto de ecuaciones centrales.

Algorithm 1 Se muestra el algoritmo del método de punto interior primal-dual de barrera logarítmica implementado a Basis Pursuit

Requiere: FeaTol, PDGapTol, γ , δ

1: Iniciar $\mathbf{x} > \mathbf{0}$, $\mathbf{y} = \mathbf{0}$, $\mathbf{z} > \mathbf{0}$ y $\mu > 0$.

2: Calcular

$$\begin{aligned}\mathbf{t} &= \mathbf{c} + \gamma^2 \mathbf{x} - \mathbf{z} - \mathbf{A}^\top \mathbf{y}, & \mathbf{r} &= \mathbf{b} - \mathbf{A} \mathbf{x} - \delta^2 \mathbf{y}, \\ \mathbf{v} &= \mu \mathbf{e} - \mathbf{Z} \mathbf{x}, & \mathbf{D} &= (\mathbf{X}^{-1} \mathbf{Z} + \gamma^2 \mathbf{I})^{-1},\end{aligned}$$

donde \mathbf{X} y \mathbf{Z} son matrices diagonales cuyas diagonales son \mathbf{x} y \mathbf{z} respectivamente; \mathbf{e} y \mathbf{c} son vectores de 1s.

3: Resolver para $\Delta \mathbf{y}$

$$(\mathbf{A} \mathbf{D} \mathbf{A}^\top + \delta^2 \mathbf{I}) \Delta \mathbf{y} = \mathbf{r} + \mathbf{A} \mathbf{D} (\mathbf{t} - \mathbf{X}^{-1} \mathbf{v}),$$

4: Calcular

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{D} (\mathbf{A}^\top \Delta \mathbf{y} + \mathbf{X}^{-1} \mathbf{v} - \mathbf{t}), \quad \Delta \mathbf{z} = \mathbf{X}^{-1} (\mathbf{v} - \mathbf{Z} \Delta \mathbf{x}).$$

5: Calcular los pasos del *primal* y del *dual*, ρ_p y ρ_d respectivamente

$$\rho_p = 0,99 \max\{\rho : \mathbf{x} + \rho \Delta \mathbf{x} \geq \mathbf{0}\}, \quad \rho_d = 0,99 \max\{\rho : \mathbf{z} + \rho \Delta \mathbf{z} \geq \mathbf{0}\}.$$

6: Actualizar variables

$$\mathbf{x} = \mathbf{x} + \rho_p \Delta \mathbf{x}; \quad \mathbf{y} = \mathbf{y} + \rho_d \Delta \mathbf{y}; \quad \mathbf{z} = \mathbf{z} + \rho_d \Delta \mathbf{z}$$

$$\mu = (1 - \min(\rho_p, \rho_d, 0,99)) \mu.$$

7: Cálculo de tolerancias

$$\text{Primal Infeasibility} = \frac{\|\mathbf{r}\|_2}{1 + \|\mathbf{x}\|_2} < \text{FeaTol}.$$

$$\text{Dual Infeasibility} = \frac{\|\mathbf{t}\|_2}{1 + \|\mathbf{y}\|_2} < \text{FeaTol}.$$

$$\text{Duality Gap} = \frac{\mathbf{z}^\top \mathbf{x}}{1 + \|\mathbf{z}\|_2 \|\mathbf{x}\|_2} < \text{PDGapTol}.$$

8: **if** Se cumplen las codiciones Primal infeasibility, Dual Infeasibility y Duality Gap

9: Parar.

10: **else** Volver a 2.

11: **end if**

Capítulo 4

Materiales y Métodos

En el capítulo 4, se describen los materiales y métodos requeridos para la realización de la propuesta. Los algoritmos desarrollados y los resultados obtenidos por este proyecto fueron implementados en la versión 2012a de Matlab con referencia al toolbox Atomizer propuesto en [19].

4.1. Base de Datos

Para el desarrollo de esta propuesta, se dispuso de una base de datos compuesta por 2800 señales características de perturbaciones, 400 por cada tipo de perturbación, tales como elevaciones, reducciones, distorsión armónica, efecto parpadeo, muescas y transitorios del tipo impulso o con oscilaciones. Además, es de notar que la frecuencia fundamental de las perturbaciones es $f_o = 60\text{Hz}$ y que la señal se encuentra muestreada a frecuencia de $f_m = 6000\text{Hz}$. Se seleccionaron perturbaciones cuyo tamaño fuese de 1000 puntos para menor costo computacional en el momento de hacer las pruebas.

4.2. Implementación STFT

Para el análisis obtenido para cada uno de los tipos de perturbaciones, a parte de la construcción de los diccionarios tiempo/frecuencia propuestos en la sección 3.2, se tuvo en cuenta los siguiente

aspectos:

- Se seleccionó como funciones ventanas una superficie gaussiana de media τ y varianza σ^2 (GT).
- Se escogió como distancia entre ventanas, $\tau = 0,005$ ms.
- Se eligió como factor de apertura de la ventana gaussiana, $\sigma = 0,05$.
- Se tuvo en cuenta un contenido armónico, $n = 1, 2, \dots, 15$.

4.3. Implementación WT

Para el análisis obtenido para cada uno de los tipos de perturbaciones, a parte de la construcción de los diccionarios tiempo/frecuencia propuestos en la sección 3.2, se tuvo en cuenta los siguiente aspectos:

- Se seleccionó como wavelet madre la función *sombrero mexicano* (Mexican Hat Wavelet Transform) [13]
- Se escogió como distancia entre ventanas, $\tau = 0,005$ ms.
- Se eligió como factor de dilatación de la wavelet, $d = 0,05$.
- Se tuvo en cuenta un número de dilataciones proporcionales a d , $Nd = 30$.

4.4. Implementación ST

Para el análisis obtenido para cada uno de los tipos de perturbaciones, a parte de la construcción de los diccionarios tiempo/frecuencia propuestos en la sección 3.2, se tuvo en cuenta los siguiente aspectos:

- Se seleccionó como funciones ventanas una superficie gaussiana de media τ y varianza σ^2 (ST).
- Se escogió como distancia entre ventanas, $\tau = 0,005$ ms.

- Se eligió como factor de dilatación de la función ventana gaussiana, $d = 0,05$.
- Se tuvo en cuenta un número de dilataciones proporcionales a d , $Nd = 30$.

4.5. Implementación BP

Además del algoritmo propuesto en 1, se tuvo en cuenta los siguientes criterios:

- Se normalizó los diferentes tipos de perturbaciones a analizar para una mayor fidelidad en la reconstrucción de las mismas.
- Se ortogonalizó el conjunto de funciones base a través del método de Gram-Schmidt para disminuir el error producido en la representación sobrecompleta.
- Se fijaron como criterios de convergencia los siguientes parámetros

$$\begin{aligned} \text{Featol} &= 1 \times 10^{-1}, & \text{PDGapTol} &= 1 \times 10^{-1}, & \text{CGAccuracy} &= 1 \times 10^{-5} \\ \text{BPMaxIter} &= 200. \end{aligned}$$

- Se asumieron los parámetros de regularización como $\gamma = 1 \times 10^{-2}$ y $\delta = 1 \times 10^{-2}$.
- Para una rápida convergencia, se determinó a través de un método de gradiente conjugado, los valores iniciales para los vectores \mathbf{x} (parámetro primal), \mathbf{y} y \mathbf{z} (parámetros duales).

Capítulo 5

Pruebas y Resultados

5.1. Pruebas con Datos Sintéticos

Para la implementación del principio Basis Pursuit, se realizó una prueba de validación para una señal sintética conocida compuesta por funciones trigonométricas de la forma

$$x(t) = -5 \cos(5\omega t) - 3 \sin(\omega t) + 4 \cos(\omega t),$$

y un diccionario compuesto en sus primeras 50 primeras columna por un diccionario de funciones cosenos y las últimas 50 columnas por un diccionario de funciones senos de la forma

$$\Phi_{\cos|\sin} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_1 t_1) & \cdots & \cos(\omega_{50} t_1) & \sin(\omega_1 t_1) & \cdots & \sin(\omega_{50} t_1) \\ \cos(\omega_1 t_2) & \cdots & \cos(\omega_{50} t_2) & \sin(\omega_1 t_2) & \cdots & \sin(\omega_{50} t_2) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \cos(\omega_1 t_m) & \cdots & \cos(\omega_{50} t_m) & \sin(\omega_1 t_m) & \cdots & \sin(\omega_{50} t_m) \end{bmatrix},$$

con $\omega_i = 2\pi f_i$ y $i = 1, 2, \dots, 50$. En la figura 5.1, se observa tanto el proceso de análisis como el proceso de síntesis del BP. Se puede observar que se obtuvo los coeficientes de representación α de manera acertada con $\|\alpha\|_1 = 12$ concluyendo así que el método funciona y con coeficiente de representación dispersos (97 % sparse).

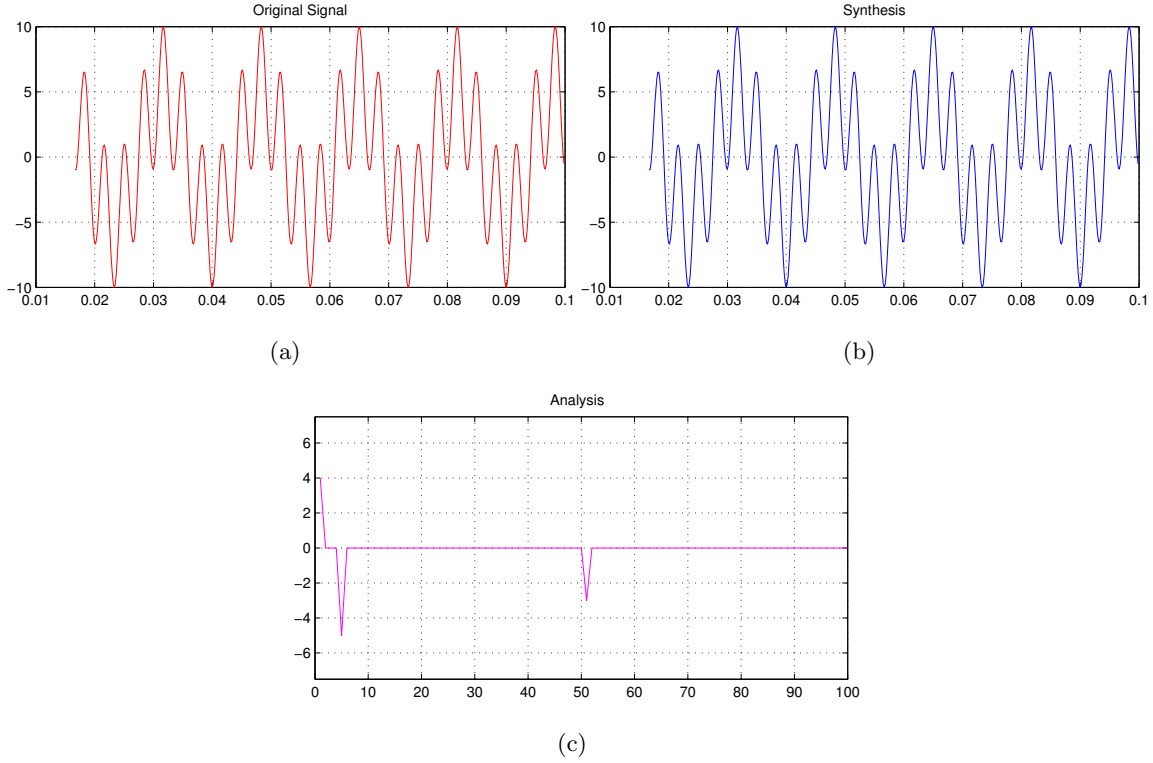


Figura 5.1: Resultado de perturbación sintética. Se muestra en (a) la señal original (b) la señal reconstruida y finalmente (c) los coeficientes de representación obtenidos por BP.

5.2. Pruebas con Bases de Datos Reales

A continuación, en las figuras 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5 se muestra un conjunto de resultados gráficos obtenidos debido a la implementación de Basis Pursuit para un mega diccionario compuesto por los diccionarios GT, MHWT y ST propuestos anteriormente.

En las figuras 5.2 y 5.3, se muestran ejemplos para perturbaciones con contenido armónico y con tendencia de reducción respectivamente. Se puede observar que se logró la reconstrucción de las perturbaciones propuestas con un alto nivel de acierto (synthesis) donde se obtuvo porcentajes de sparsity en los coeficiente de representación del 68,33 % y 75,55 % para la señal con contenido armónico y la señal con tendencia de reducción o caída respectivamente.

Se puede observar que BP logra, en la mayoría de los casos, la reconstrucción de la perturbación dadas con un comportamiento *sparse* en el conjunto de coeficiente de representación α . Se muestran

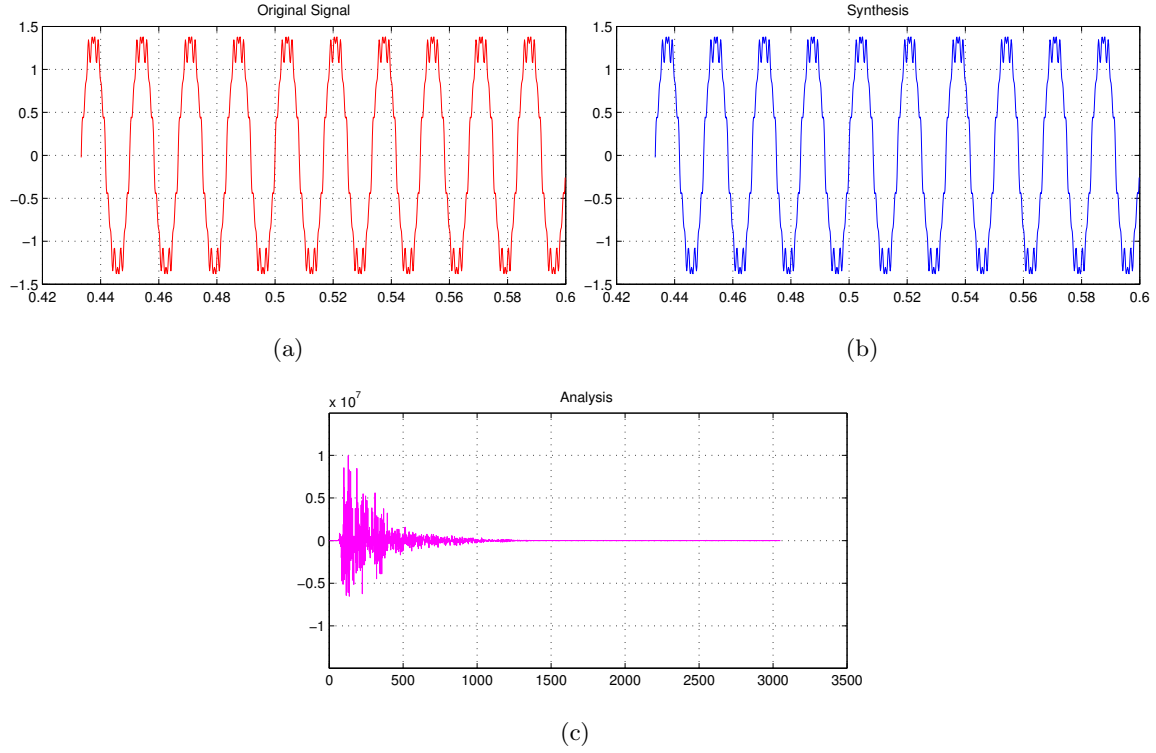


Figura 5.2: Resultado de perturbación con distorsión armónica. Se muestra en (a) la señal original (b) la señal reconstruida y finalmente (c) los coeficientes de representación obtenidos por BP.

casos particulares en las en las figuras 5.3 y 5.4 donde, para el caso de las perturbaciones del tipo parpadeo o transitorios respectivamente, se observa que el vector de coeficientes de representación no tiende a ser dispersos y esto se debe a que ninguno de los diccionario propuestos logra representar de manera completa y sparse a este tipo de perturbaciones, concluyendo así que se deben condicionar nuevamente los parámetros de los diccionarios propuesto para una mayor precisión como por ejemplo aumentando el número de ventanas de representación y disminuyendo el ancho de las mismas para una mayor resolución en el tiempo o elegir nuevos diccionarios más adecuados para lograr así una mejor representación sobrecompleta.

Es de notar que la reconstrucción de la figura 5.5 contiene un alto nivel de distorsión y esto se debe a que el contenido armónico es de muy alta frecuencia y los diccionarios propuestos en capítulo 4 no se encuentran condicionados precisamente para eventos o variaciones de alta resolución por tanto es requerida una mayor resolución en el tiempo para la detección de este tipo de variaciones.

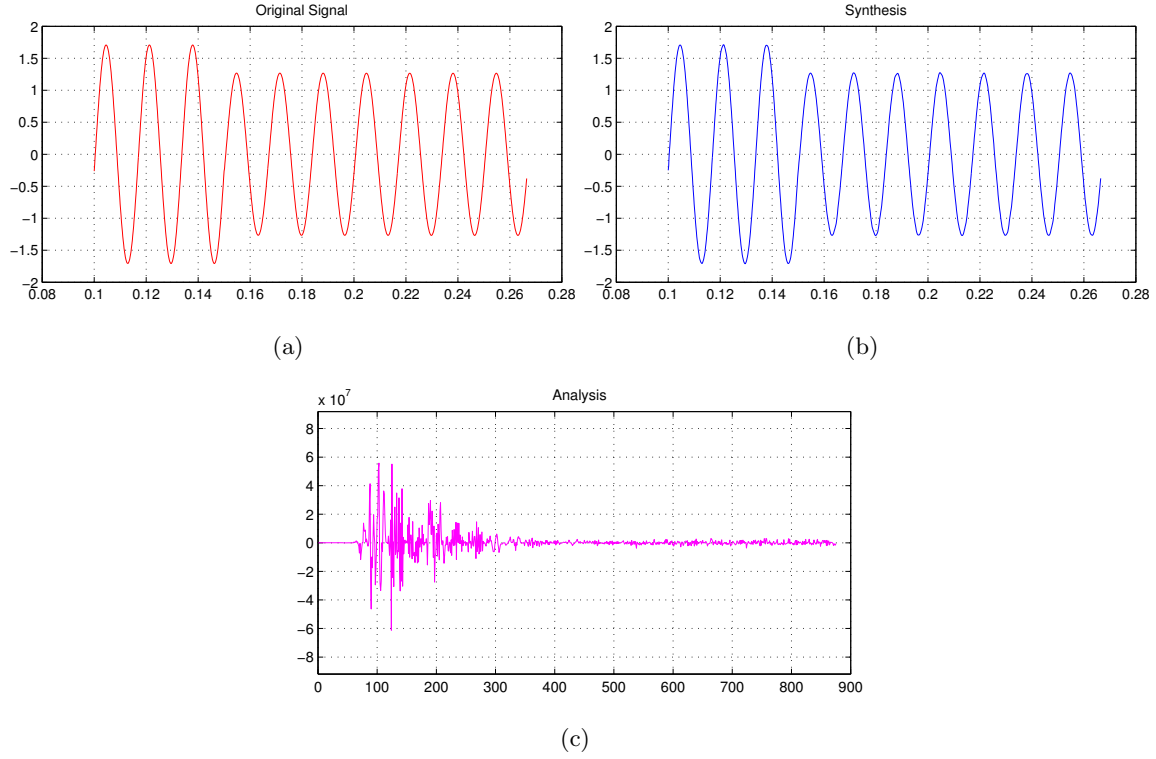


Figura 5.3: Resultado de perturbación con efecto de reducción. Se muestra en (a) la señal original (b) la señal reconstruida y finalmente (c) los coeficientes de representación obtenidos por BP.

Para una mejor interpretación de los resultados obtenidos por BP, se muestra a continuación en la tabla 5.1 los valores promedios obtenidos del error cuadrático para diez pruebas por cada una de las perturbaciones dadas por la base de datos propuesta para un diccionario GT, MHWT, ST y un mega diccionario compuesto por los tres diccionarios anteriores denominado GT+MHWT+ST. Se observa en general que la reconstrucción obtenida por BP es bastante precisa a la señal de análisis.

Es de notar, una gran precisión en la reconstrucción para las perturbaciones del tipo distorsión armónica, elevación, reducción, efectos parpadeos y muescas y poca varianza entre los resultados obtenidos. Para lo efectos transitorios, el error cuadrático medio es mayor que los obtenidos para los demás casos y esto se debe a que los diccionarios propuestos en el capítulo 4 no se encuentran condicionados precisamente para eventos o variaciones de alta resolución.

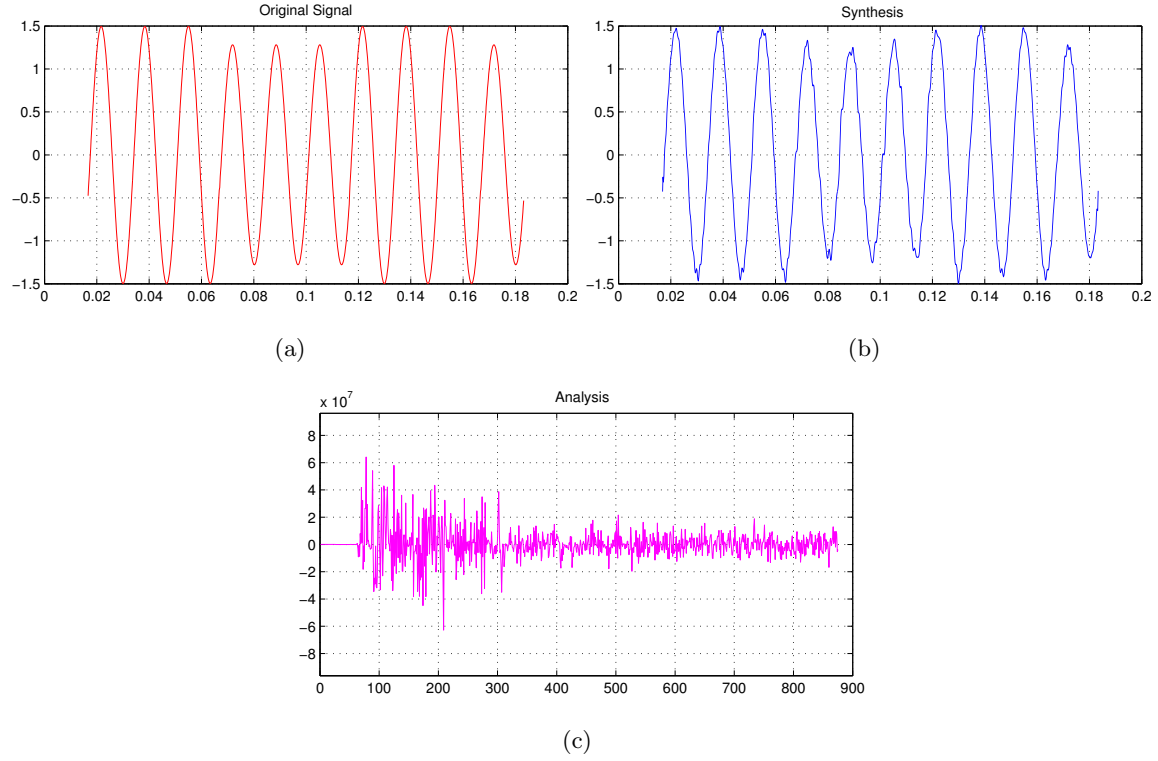


Figura 5.4: Resultado de perturbación con efecto parpadeo. Se muestra en (a) la señal original (b) la señal reconstruida y finalmente (c) los coeficientes de representación obtenidos por BP.

	GT	MHWT	ST	GT+MHWT+ST
Perturbación	Error (1×10^{-5})	Error (1×10^{-5})	Error (1×10^{-5})	Error (1×10^{-5})
Armónicos	$3,04 \pm 0,62$	$52,7 \pm 20,8$	$133 \pm 72,6$	$35,2 \pm 5,17$
Elevación	268 ± 102	3700 ± 2830	282000 ± 151000	$59,9 \pm 55,0$
Reducción	654 ± 347	18500 ± 10200	316000 ± 271000	243 ± 150
Parpadeo	$82,7 \pm 58,8$	79200 ± 33000	22800 ± 12600	$43,4 \pm 12,3$
Muestras	1420 ± 1090	753000 ± 445000	208000 ± 110000	2020 ± 822
Transitorios	32200 ± 30100	18600 ± 17400	1574000 ± 2453000	16300 ± 7460

TABLA 5.1: Resultados promedios del error cuadrático para diez pruebas de BP para cada una de las perturbaciones y diccionarios propuestos. *Perturbación* define el tipo de perturbación de análisis y *Error* indica el error cuadrático promedio obtenido entre la perturbación original y la obtenida a través de BP junto con la desviación estándar promedio.

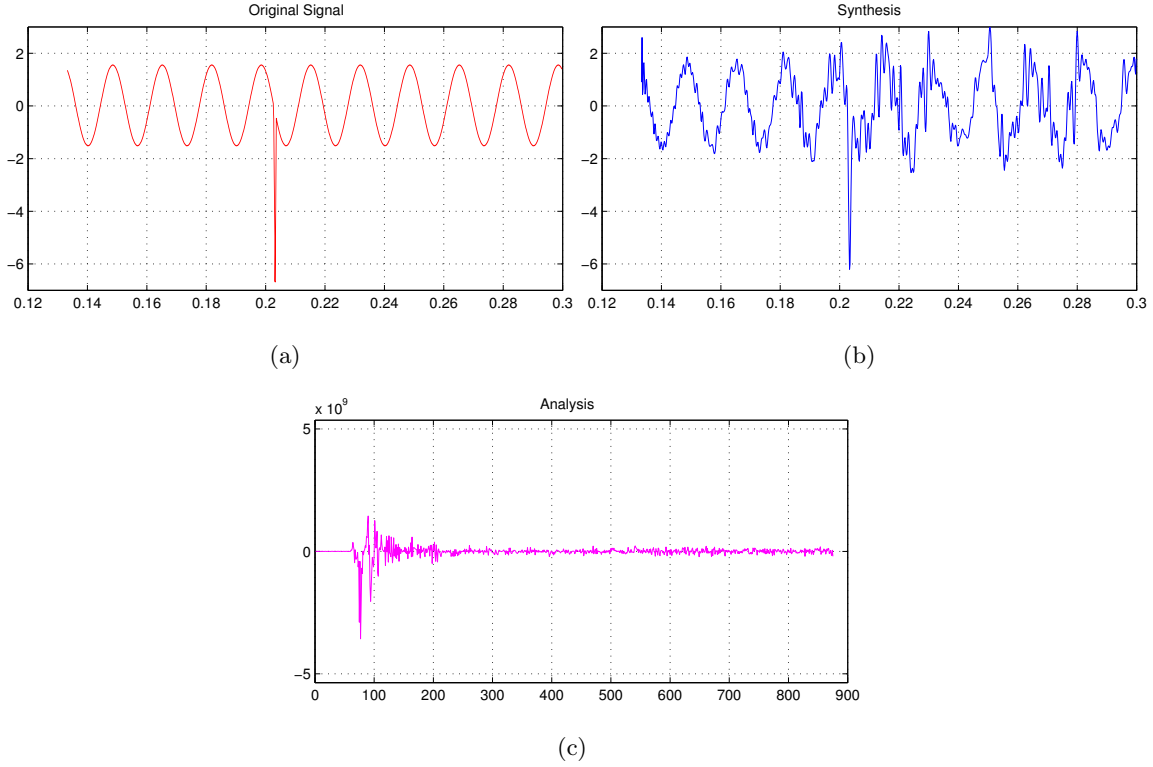


Figura 5.5: Resultado de perturbación con efecto transitorio. Se muestra en (a) la señal original (b) la señal reconstruida y finalmente (c) los coeficientes de representación obtenidos por BP.

De igual manera, en la tabla 5.2 se muestran los porcentajes de sparsity obtenidos para las mismas diez pruebas utilizadas para la determinación del error cuadrático medio para los mismo diccionarios propuestos GT, MHWT, ST y GT+MHWT+ST de la tabla 5.1. Se observa que los porcentajes de sparsity del mega diccionario GT+MHWT+ST son, para todos los caso, mayores que los obtenidos por cada uno de los diccionarios utilizados de manera independiente concluyendo así que BP es un principio que permite obtener representaciones sobrecompletas de señales del tipo sparse.

A continuación, se muestra en la tabla 5.3, el tiempo promedio requerido en segundos para las pruebas anteriores. Se puede observar que el método converge en mayor tiempo para GT+MHWT+ST que para los demás diccionarios (GT, MHWT y ST) y estos se debe a la complejidad computacional debido al incremento de las dimensiones de la matriz de funciones base Φ , ya que esta contiene los demás diccionarios propuestos. Sin embargo, el algoritmo converge rápidamente y esto lo hace mucho más eficiente en el momento de su implementación.

	GT	MHWT	ST	GT+MHWT+ST
Perturbación	Sparsity (%)	Sparsity (%)	Sparsity (%)	Sparsity (%)
Armónicos	54	47,65	50,35	60,32
Elevación	23,41	38,46	12,14	72,22
Reducción	25,67	41,81	10,09	68,35
Parpadeo	5,13	10,49	9,28	38,88
Muecas	47,62	38,21	36,98	73,15
Transitorios	2,19	5,15	4,27	10,03

TABLA 5.2: Resultados promedios de sparsity para diez pruebas de BP para cada una de las perturbaciones y diccionarios propuestos. *Perturbación* define el tipo de perturbación de análisis y *Sparsity* muestra los porcentajes de dispersión promedio obtenidos por BP para cada tipo de perturbación.

	GT	MHWT	ST	GT+MHWT+ST
Perturbación	Tiempo (s)	Tiempo (s)	Tiempo (s)	Tiempo (s)
Armónicos	3,1080	0,2447	0,3145	5,5784
Elevación	7,0921	6,5387	6,6245	7,5992
Reducción	6,9576	6,6622	6,6871	7,4922
Parpadeo	3,1311	1,5037	1,5900	6,3109
Muecas	3,1113	1,6074	1,5013	5,5738
Transitorios	3,1209	1,1738	1,0925	5,2824

TABLA 5.3: Resultados promedios de tiempo de cómputo para diez pruebas de BP para cada una de las perturbaciones y diccionarios propuestos. *Perturbación* define el tipo de perturbación de análisis y *Tiempo* muestra el tiempo necesario promedio obtenidos por BP para cada tipo de perturbación.

Capítulo 6

Conclusiones

- Fue posible encontrar representaciones sobrecompleta a través de diversos diccionarios tiempo/frecuencia para la caracterización de perturbaciones de calidad de potencia, empleando el principio de optimización Basis Pursuit.
- Se procesaron y caracterizaron señales de calidad de potencia mediante transformaciones matemáticas tiempo/frecuencia. Se debe tener en cuenta la alta dimensionalidad en que puede llegar a ser problema debido a un gran número de funciones base y una señal de gran tamaño para así implementar algoritmos óptimos y eficientes.
- Se observó que el principio de Basis Pursuit garantiza una alta dispersión, sparsity, en la determinación de los coeficientes de representación óptimos para lograr la representación sobrecompleta.
- Se observó que la precisión del algoritmo BP es bastante alta para perturbaciones estacionarias o quasi-estacionarias. Para aquellas perturbaciones transitorias, se requiere una mayor resolución en el dominio del tiempo.

Bibliografía

- [1] S. S. Surajit Chattopadhyay, Madhuchhanda Mitra, *Electric Power Quality*, 1st ed., ser. Power Systems. Springer, 2011. [Online]. Available: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=F5F0DDB0DC6470EEA198CAEF94840ACE>
- [2] M. T. Alexander Kusko, *Power Quality in Electrical Systems*, 1st ed. McGraw-Hill Professional, 2007. [Online]. Available: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=EF58A612914C4883C4AAC15F44D5BCA6>
- [3] G. B. M. Pasko, *Power theories for improved power quality*, ser. Power systems. Springer, 2012. [Online]. Available: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=FA6F2BA6F6B3750F41137072E12D1AAB>
- [4] N. Patcharaprakiti, K. Kirtikara, D. Chenvidhya, V. Monyakul, and B. Muenpinij, “Modeling of single phase inverter of photovoltaic system using system identification,” in *Computer and Network Technology (ICCNT), 2010 Second International Conference on*, 2010, pp. 462–466.
- [5] M. Bollen, I.-H. Gu, S. Santoso, M. McGranaghan, P. Crossley, M. Ribeiro, and P. Ribeiro, “Bridging the gap between signal and power,” *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 26, no. 4, pp. 12–31, 2009.
- [6] M. H. Bollen and I. Gu, *Signal processing of power quality disturbances*. Wiley-IEEE Press, 2006, vol. 30.
- [7] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, and H. W. Beaty, *Electrical power systems quality*. McGraw-Hill New York, 1996, vol. 2.

- [8] D. Granados-Lieberman, R. Romero-Troncoso, R. Osornio-Rios, A. Garcia-Perez, and E. Cabal-Yepez, “Techniques and methodologies for power quality analysis and disturbances classification in power systems: a review,” *Generation, Transmission Distribution, IET*, vol. 5, no. 4, pp. 519–529, 2011.
- [9] A. Abdullah, A. Sha’ameri, A. Sidek, and M. Shaari, “Detection and classification of power quality disturbances using time-frequency analysis technique,” in *Research and Development, 2007. SCOReD 2007. 5th Student Conference on*, 2007, pp. 1–6.
- [10] G. K. Sharma, A. Kumar, C. B. Rao, T. Jayakumar, and B. Raj, “Short time fourier transform analysis for understanding frequency dependent attenuation in austenitic stainless steel,” *{NDT} & E International*, vol. 53, no. 0, pp. 1 – 7, 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869512001223>
- [11] S. Huang, C. Huang, and C. Hsieh, “Application of gabor transform technique to supervise power system transient harmonics,” *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, vol. 143, no. 5, pp. 461–466, 1996.
- [12] T. Vega, V. Roig, and H. San Segundo, “Evolution of signal processing techniques in power quality,” in *Electrical Power Quality and Utilisation, 2007. EPQU 2007. 9th International Conference on*, 2007, pp. 1–5.
- [13] H. Eristi and Y. Demir, “Automatic classification of power quality events and disturbances using wavelet transform and support vector machines,” *Generation, Transmission Distribution, IET*, vol. 6, no. 10, pp. 968–976, 2012.
- [14] C. Naik and P. Kundu, “Identification of short duration power quality disturbances employing s-transform,” in *Power and Energy Systems (ICPS), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 1–5.
- [15] N. Huang, L. Lin, W. Huang, and J. Qi, “Review of power-quality disturbance recognition using s-transform,” in *Control, Automation and Systems Engineering, 2009. CASE 2009. IITA International Conference on*, 2009, pp. 438–441.

- [16] C. F. Drummond and D. Sutanto, “Classification of power quality disturbances using the iterative hilbert huang transform,” in *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010 14th International Conference on*, 2010, pp. 1–7.
- [17] A. Abdullah, N. A. M. Said, A. Sha’ameri, and F. Ali, “Power quality analysis using frequency domain smooth-windowed wigner-ville distribution,” in *Signal and Image Processing Applications (ICSIPA), 2011 IEEE International Conference on*, 2011, pp. 28–33.
- [18] S. Chen and D. Donoho, “Basis pursuit,” in *Signals, Systems and Computers, 1994. 1994 Conference Record of the Twenty-Eighth Asilomar Conference on*, vol. 1, 1994, pp. 41–44 vol.1.
- [19] S. S. Chen, D. L. Donoho, Michael, and A. Saunders, “Atomic decomposition by basis pursuit,” *SIAM Journal on Scientific Computing*, vol. 20, pp. 33–61, 1998.
- [20] A. Polycarpou, “Power quality and voltage sag indices in electrical power systems,” in *Electrical Generation and Distribution Systems and Power Quality Disturbances*, 2011, pp. 139–160. [Online]. Available: <http://www.intechopen.com/books/electrical-generation-and-distribution-systems-and-power-quality-disturbances/power-quality-and-voltage-sag-indices-in-electrical-power-systems>
- [21] L. Monroy, “Caracterización y clasificación de distorsiones en el sistema eléctrico usando máquinas de soporte vectorial: Eventos perturbadores de la calidad de energía eléctrica,” Master’s thesis, Universidad Tecnológica de Pereira, 2011.
- [22] B. Lathi, *Principles Of Linear Systems And Signals*. Oxford University Press, 2009. [Online]. Available: <http://books.google.com.co/books?id=n4accQAACAAJ>
- [23] R. V. Balan, Y. C. Eldar, and T. Strohmer, “Frames and overcomplete representations in signal processing, communications, and information theory.” *EURASIP J. Adv. Sig. Proc.*, vol. 2006, 2006. [Online]. Available: <http://dblp.uni-trier.de/db/journals/ejasp/ejasp2006.html#BalanES06>
- [24] A. Mertins, *Signal analysis: wavelets, filter banks, time-frequency transforms and applications*, revised ed. Wiley, 1999. [Online]. Available: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=6A5A7A97D1200A81B1F212F386FD47D2>

- [25] J. Echeverry, “Caracterizaciónn acústica de bioseñales empleando transformaciones tiempo frecuencia y modelado paramétrico: Representación de bioseñales,” Master’s thesis, Universidad Tecnológica de Pereira, 2006.