

VIABILIDAD DEL MÉTODO MUSIC PARA SU APLICACIÓN EN RELEVADORES DE PROTECCIÓN DE ALTA VELOCIDAD

VIABILIDAD DEL MÉTODO MUSIC PARA SU APLICACIÓN EN RELEVADORES DE PROTECCIÓN DE ALTA VELOCIDAD.

VIABILITY OF THE MUSIC METHOD FOR APPLICATION IN HIGH-SPEED PROTECTION RELAYS.

Miguel Ángel Becerra Olguín¹
Luis Enrique Corral Perales²
Luis Alonso Trujillo Guajardo³
Paz Vicente Cantú Gutiérrez⁴

RESUMEN

Este artículo busca analizar la viabilidad de utilizar el método MUSIC para su aplicación en relevadores de protección de alta velocidad, utilizándolo para la estimación de las frecuencias de las señales principales en un sistema eléctrico, llevando a cabo diversos casos de análisis con diferentes variables, con el fin de determinar los límites del método. Además de verificar el impacto que tiene cada variable en los resultados obtenidos.

Palabras claves: MUSIC, relevador de alta velocidad, frecuencia de muestreo, estimación paramétrica, armónicos, interarmónicos, subarmónicos, estimación de frecuencia, estimación de magnitud, sobrecorriente.

Fecha de recepción: 03 de septiembre, 2019.

Fecha de aceptación: 15 de octubre, 2019.

¹ Ing. Mecánico Electricista. Depto. Ingeniería CT, PROLEC GE. miguelbecerraolguin@gmail.com

² Ing. Mecánico Electricista. Depto. Ingeniería CT, PROLEC GE. luisenr.corral@gmail.com

³ Profesor Investigador y Coordinador Académico. Maestría en Ingeniería con Orientación en Eléctrica. FIME UANL Posgrado. luis.trujillojir@uanl.edu.mx

⁴ Profesor. Jefe de Depto. de Iluminación y Alta Tensión. FIME UANL. vcantugt@yahoo.com



VIABILIDAD DEL MÉTODO MUSIC PARA SU APLICACIÓN EN RELEVADORES DE PROTECCIÓN DE ALTA VELOCIDAD

ABSTRACT.

This article seeks to analyze the feasibility of using the MUSIC method for application in high-speed protection relays, using it to estimate the frequencies of the main signals in a power signal, with various cases of analysis with different variables in order to determine the limits of the method were carried out. The impact that each variable has on the obtained results was verified.

Keywords: MUSIC, high speed relay, sample frequency, parametric estimation, harmonics, inter-harmonics, sub harmonics, frequency estimation, magnitude estimation, overcurrent.

INTRODUCCIÓN

El método MUSIC (*multiple signal classification*, o clasificación de señales múltiples) es un estimador de la frecuencia del ruido en un subespacio. Cuatro de los principales métodos para la descomposición de un determinado subespacio son el método Pisarenko para la descomposición de armónicas, MUSIC (*multiple signal classification*, o clasificación de señales múltiples), ESPRIT (*estimation of signal parameters via rotational invariance techniques*, o estimación de parámetros de señal mediante técnicas de invarianza rotacional) y el método Prony (Ribeiro, da Silveira, Duque & Cerqueira, 2013).

Los métodos no-paramétricos son relativamente simples, bien entendidos y fácilmente implementados vía la transformada rápida de Fourier (FFT o fast Fourier transform). Sin embargo, estos métodos necesitan ventanas de tiempo muy largas para una resolución adecuada (Ribeiro, da Silveira, Duque & Cerqueira, 2013), por lo que su implementación en sistemas de protección eléctrica no es deseable. Por este motivo, la utilización de técnicas paramétricas para el monitoreo de sistemas eléctricos es un tema que se ha estado explorando en la actualidad. En este artículo, se tratará de estimar la magnitud fundamental de la señal de corriente medida en un sistema de protección eléctrica, con el fin de poder determinar si el método MUSIC es el adecuado para su implementación en la detección rápida de sobrecorriente. Además de su aplicación en sobrecorriente, también se tratará de evaluar el desempeño del método en la detección de armónicos

Esta investigación se llevó a cabo durante el programa de Estancia de Investigación Semestral de licenciatura de de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, en San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, utilizando los casos de análisis que se describirán a continuación.

JUSTIFICACIÓN.

La creciente digitalización y automatización de sistemas eléctricos en la actualidad ha fomentado la utilización e implementación de diversas herramientas auxiliares para el monitoreo y registro en tiempo real de parámetros críticos para el funcionamiento adecuado del sistema eléctrico que se esté monitoreando, con el fin de optimizar cualquier variable no favorable para el sistema, como, por ejemplo, inestabilidad, desbalance, sobrecorriente (o sobrevoltaje), presencia de armónicos, subarmónicos e interarmónicos, entre otras condiciones perjudiciales a dicho sistema eléctrico.

La implementación de estas herramientas auxiliares, sin embargo, debe llevarse a cabo con un cuidado especial en los sistemas de protección eléctrica, aunado a que una falla no controlada (en estos sistemas) puede tener consecuencias devastadoras para los equipos conectados a la red eléctrica de cualquier sistema en particular. Por este motivo, es importante brindar un análisis detallado y específico para los métodos y/o temas relacionados a los sistemas de protección eléctrica que se desean implementar en aplicaciones actuales.



VIABILIDAD DEL MÉTODO MUSIC PARA SU APLICACIÓN EN RELEVADORES DE PROTECCIÓN DE ALTA VELOCIDAD

METODOLOGÍA

Resultados del método MUSIC para la estimación de frecuencias.

El objetivo de las siguientes pruebas es determinar si el método MUSIC es apto para determinar la frecuencia fundamental de una señal, además de las frecuencias de sus armónicos principales. Además, se determinará si MUSIC puede estimar correctamente las frecuencias de los interarmónicos y subarmónicos de una señal.

Para llevar a cabo la prueba de estimación de frecuencias con MUSIC, se utilizó una señal sintética que consiste en subarmónicos, armónicos e interarmónicos, con una ventana total de análisis de 3 ciclos (considerando un relevador de alta velocidad), con una frecuencia fundamental de 60 ciclos por segundo y una frecuencia de muestreo de 32 muestras por ciclo. No se consideró ningún desfase angular. Se consideró un ruido Gaussiano con desviación estándar de 0.5%. Las magnitudes de los armónicos (y la fundamental) se pueden observar en la tabla 1.

Es extremadamente importante recalcar que el método MUSIC para estimación de frecuencias pierde algo de su efectividad al momento de trabajar con magnitudes de corriente muy bajas. El caso anterior se trabajó con una corriente fundamental de 100 A (100 A = 100%), pero, al momento de hacer la prueba con valores de 1 A o menores, el método MUSIC comienza a desplegar un porcentaje de error elevado.

Tabla 1. Valores de armónicos para su análisis con el método MUSIC.

Armónico	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
Magnitud (%)	30	100	35	30	25	20	15	10	8	5	3.5	2

Los resultados de esta estimación por el método MUSIC se pueden observar en la figura 1 y los resultados de esta estimación de frecuencias se pueden resumir en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados de la nueva estimación de frecuencias por MUSIC.

Armónico	Frecuencia (Hz)	Frecuencia de MUSIC (Hz)	Porcentaje de error
0.5	30	No detectado	N/A
1	60	52.5	12.5%
1.5	90	82.5	8.333%
2	120	120	0%
2.5	150	150	0%
3	180	187.5	4.167%
3.5	210	210	0%
4	240	247.5	3.125%
4.5	270	277.5	2.778%
5	300	315	5%
5.5	330	337.5	2.273%
6	360	No detectado	N/A

Como se puede observar, el porcentaje de error más alto fue de 12.5%, con la frecuencia fundamental, mientras que el más bajo fue de 0% con dos interarmónicos y un armónico. Sin embargo, hubo dos casos en los que el método MUSIC no pudo obtener las frecuencias deseadas: el primer valor, el único subarmónico, y el último armónico.

El armónico que no fue detectado tenía un valor de únicamente 2% (2 A) del valor de la señal fundamental, por lo que es más difícil para el método MUSIC detectar su frecuencia. Por este motivo, es importante tomar en cuenta que, mientras que el método MUSIC puede estimar frecuencias de



VIABILIDAD DEL MÉTODO MUSIC PARA SU APLICACIÓN EN RELEVADORES DE PROTECCIÓN DE ALTA VELOCIDAD

una manera relativamente confiable y exitosa, hay ciertos casos aislados en los que se puede encontrar dificultad.

Los tiempos registrados para la estimación de frecuencias de armónicos enteros tomó aproximadamente 1.22 segundos en concluir. En cambio, la estimación de frecuencias en la que se incluyeron armónicos y subarmónicos tomó aproximadamente 1.24 segundos en concluir (utilizando el mismo hardware y software computacional detallado en la sección de conclusiones).

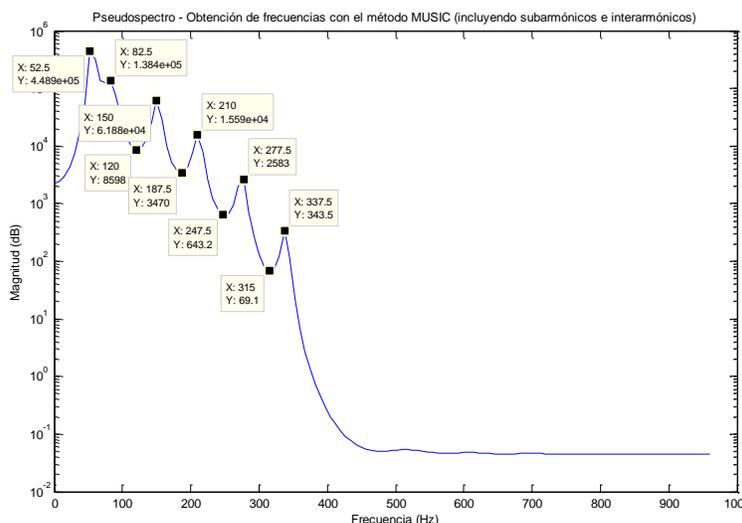


Figura 1. Obtención de nuevas frecuencias con el método MUSIC.

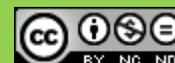
Evaluación del método MUSIC para estimación de magnitud de la corriente fundamental.

El objetivo de este primer caso es obtener la magnitud de la corriente fundamental de una señal de alimentación, en donde la señal tiene las características descritas por la tabla 3:

Tabla 3. Características para considerar en el primer caso de estimación de magnitud con MUSIC.

Parámetro	Valor
Magnitud fundamental a buscar	50 A
Muestras por ciclo a utilizar	16, 20, 32 (3 estimaciones)
Ventana de análisis	3 ciclos
Ciclos totales a analizar	20 ciclos
Frecuencia fundamental	60 Hz
Cantidad de ruido	N/A (sin ruido)
Armónicos considerados	N/A (sin armónicos)
Sinusoides complejas (p)	12

El método realizará el análisis con cada ventana solicitada, en donde cada resultado será graficado para analizar sus posibles variaciones. La gráfica con los resultados de los análisis MUSIC para 16, 20 y 32 muestras se pueden observar en la figura 2. También se agrega una línea para cada frecuencia de muestreo que muestra el promedio obtenido para cada una, tratando de representar el resultado final.



VIABILIDAD DEL MÉTODO MUSIC PARA SU APLICACIÓN EN RELEVADORES DE PROTECCIÓN DE ALTA VELOCIDAD

Analizando la señal, se puede notar que el método MUSIC fue exitoso en determinar (con el promedio) el valor de la corriente fundamental de la señal de alimentación. Sin embargo, también se puede observar a simple vista que hay algunos picos en todas las pruebas (16, 20 y 32 muestras) que presentan un valor de amperaje muy elevado. Esto significa que, al menos en esas muestras, el método MUSIC no pudo determinar con exactitud la magnitud deseada, lo cual puede presentar muchas problemáticas al querer aplicar el método en aplicaciones en las que se necesita una precisión elevada.

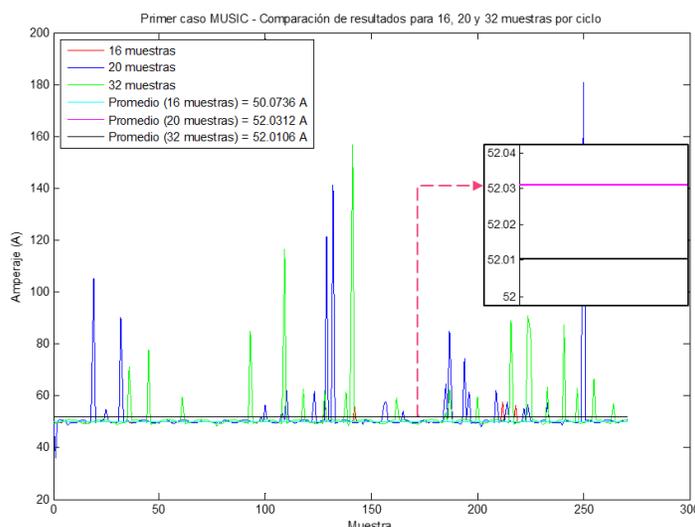


Figura 2. Gráfica de análisis para el primer caso incluyendo promedios.

La tabla 4 resume los resultados del primer caso analizado, incluyendo los picos más altos encontrados, los valores finales con su porcentaje de error (con respecto al valor teórico de 50 A), además del tiempo requerido para el análisis de cada señal (16, 20 y 32 muestras).

Tabla 4. Resumen de los resultados obtenidos en el segundo caso.

	Valor teórico (A)	Valor promedio (real) (A)	% de error del valor promedio	Pico más alto (A)	% de error del pico más alto	Tiempo de análisis (s)
16 muestras	50	50.07	0.147%	59.65	19.30 %	10.66
20 muestras	50	52.03	4.062%	180.62	261.23 %	12.96
32 muestras	50	52.01	4.021%	157.05	214.10 %	21.18

El objetivo del segundo caso es obtener la magnitud de la corriente fundamental de una señal de alimentación, en donde la señal tiene las características descritas por la tabla 5:



VIABILIDAD DEL MÉTODO MUSIC PARA SU APLICACIÓN EN RELEVADORES DE PROTECCIÓN DE ALTA VELOCIDAD

Tabla 5. Características para considerar en el segundo caso de estimación de magnitud con MUSIC.

Parámetro	Valor
Magnitud fundamental a buscar	50 A
Muestras por ciclo a utilizar	16, 20, 32 (3 estimaciones)
Ventana de análisis	3 ciclos
Ciclos totales a analizar	20 ciclos
Frecuencia fundamental	60 Hz
Cantidad de ruido	N/A (sin ruido)
Armónicos considerados	Armónicos enteros
Sinusoides complejas (p)	12

La magnitud de los armónicos, en porcentaje, se puede observar en la tabla 6.

La gráfica con los resultados de los análisis MUSIC para 16, 20 y 32 muestras se pueden observar en la figura 3, en donde se realizó la misma metodología que en el caso anterior, donde la única diferencia es, como se explicó anteriormente, la presencia de armónicos enteros. Se agregaron leyendas con los valores promedio (resultados finales) del análisis MUSIC en cada prueba (16, 20 y 32 muestras por ciclo). Asimismo, debido a que las formas de onda en la gráfica varían más, se agregó una línea representando el valor teórico que se buscaba en el análisis (50 A).

Tabla 6. Magnitud de los armónicos a utilizar en el segundo caso de análisis de magnitud con MUSIC.

Armónico	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
Magnitud (%)	0	100	0	30	0	20	0	10	0	5	0	2

Como se puede observar a simple vista, los resultados son mucho más inexactos que los obtenidos en el caso anterior. Esto se puede atribuir a la presencia de armónicos enteros en la señal de alimentación. Además, se puede observar que, mientras mayor cantidad de muestras por ciclo, menor fue el porcentaje de error de la señal analizada.

La tabla 7 resume los resultados del segundo caso analizado, incluyendo los picos más altos encontrados, los valores finales con su porcentaje de error (con respecto al valor teórico de 50 A), además del tiempo requerido para el análisis de cada señal (16, 20 y 32 muestras).

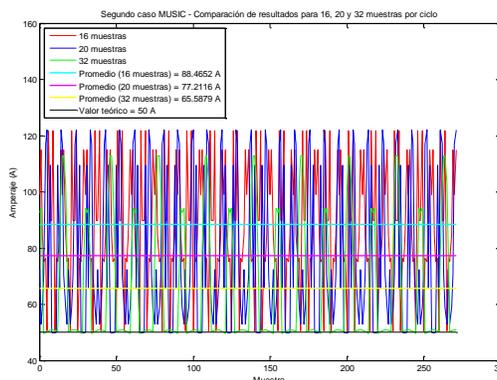


Figura 3. Gráfica de análisis para el segundo caso de estimación con MUSIC



VIABILIDAD DEL MÉTODO MUSIC PARA SU APLICACIÓN EN RELEVADORES DE PROTECCIÓN DE ALTA VELOCIDAD

Tabla 7. Resumen de los resultados obtenidos en el segundo caso.

	Valor teórico (A)	Valor promedio (real) (A)	% de error del valor promedio	Pico más alto (A)	% de error del pico más alto	Tiempo de análisis (s)
16 muestras	50	88.47	76.93%	121.70	143.41%	10.25
20 muestras	50	77.21	54.423%	122.05	144.10%	12.82
32 muestras	50	65.59	31.176%	112.80	125.59%	19.85

El objetivo del tercer caso es obtener la magnitud de la corriente fundamental de una señal de alimentación, en donde la señal tiene las características descritas por la tabla 8.

La magnitud de todos los tipos de armónicos, en porcentaje, se puede observar en la tabla 9.

La presencia de subarmónicos e interarmónicos ocasionó picos muy elevados en las señales de 16 y 20 muestras por ciclo. Sin embargo, la señal de 32 muestras por ciclo presenta resultados más precisos que las demás señales, demostrando parcialmente que, mientras más muestras por ciclo, más precisa es la señal y, por lo tanto, más preciso es el análisis de dicha señal.

Tabla 8. Características para considerar en el tercer caso de estimación de magnitud con MUSIC.

Parámetro	Valor
Magnitud fundamental a buscar	50 A
Muestras por ciclo a utilizar	16, 20, 32 (3 estimaciones)
Ventana de análisis	3 ciclos
Ciclos totales a analizar	20 ciclos
Frecuencia fundamental	60 Hz
Cantidad de ruido	N/A (sin ruido)
Armónicos considerados	Armónicos enteros, subarmónicos, interarmónicos
Sinusoides complejas (p)	12

Tabla 9. Magnitud de los armónicos a utilizar en el tercer caso de análisis de magnitud con MUSIC.

Armónico	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
Magnitud (%)	30	100	35	30	25	20	15	10	8	5	3.5	2

En la figura 4, se pueden observar los resultados en un formato similar al caso anterior.

De acuerdo con lo que se mencionó anteriormente, se puede observar que las señales de 16 y 20 muestras por ciclo presentan resultados inexactos, mientras que la señal de 32 muestras por ciclo presenta resultados relativamente precisos.



VIABILIDAD DEL MÉTODO MUSIC PARA SU APLICACIÓN EN RELEVADORES DE PROTECCIÓN DE ALTA VELOCIDAD

La tabla 10 resume los resultados del tercer caso analizado, incluyendo los picos más altos encontrados, los valores finales con su porcentaje de error (con respecto al valor teórico de 50 A), además del tiempo requerido para el análisis de cada señal (16, 20 y 32 muestras).

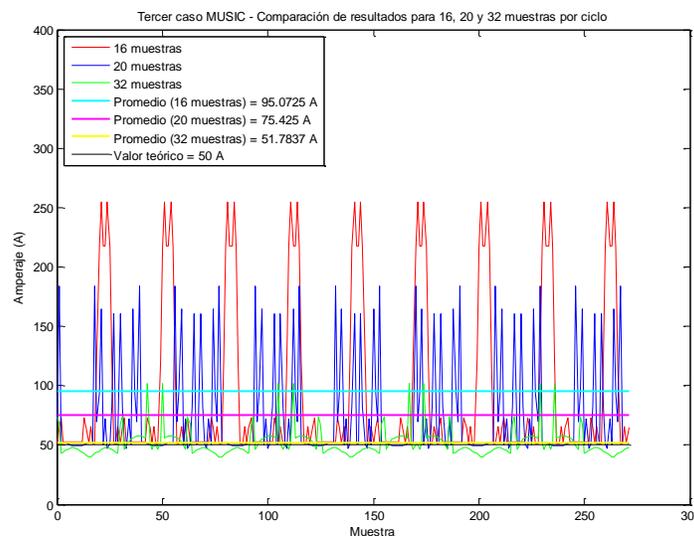


Figura 4. Gráfica de análisis para el tercer caso de estimación con MUSIC.

Tabla 10. Resumen de los resultados obtenidos en el tercer caso con el método MUSIC.

	Valor teórico (A)	Valor promedio (real) (A)	% de error del valor promedio	Pico más alto (A)	% de error del pico más alto	Tiempo de análisis (s)
16 muestras	50	95.07	90.14%	254.48	408.96%	10.33
20 muestras	50	75.42	50.85%	183.66	267.31%	13.04
32 muestras	50	51.78	3.57%	102.05	104.09%	19.11

De acuerdo con la tabla 10, se puede concluir que el tercer caso de estimación de magnitud con MUSIC no fue exitoso. Aunque la señal de 32 muestras por ciclo tuvo un resultado relativamente preciso, con un porcentaje de error promedio de 3.567%, los otros casos tuvieron porcentajes de error extremadamente elevados. Si se toma en consideración el porcentaje de error y el valor de los picos más altos, se encuentra que la estimación de MUSIC no fue para nada exitosa, llegando a resultados completamente inexactos.

El objetivo del caso 4 es obtener la magnitud de la corriente fundamental de una señal de alimentación, en donde la señal tiene las características descritas por la tabla 11.



VIABILIDAD DEL MÉTODO MUSIC PARA SU APLICACIÓN EN RELEVADORES DE PROTECCIÓN DE ALTA VELOCIDAD

La diferencia principal de este caso de análisis, en comparación con los casos anteriores, es la introducción de niveles variables de ruido en la señal, se evaluará 4 veces para cada nivel de ruido, es decir, la señal de 16 muestras por ciclo se evaluará con 10, 20, 30 y 40 dB de ruido, al igual que las señales de 20 y 32 muestras por ciclo. Al igual que el caso anterior, se introducen armónicos enteros, subarmónicos e interarmónicos en la señal de alimentación.

Tabla 11. Características para considerar en el cuarto caso de estimación de magnitud con MUSIC.

Parámetro	Valor
Magnitud fundamental a buscar	50 A
Muestras por ciclo a utilizar	16, 20, 32 (3 estimaciones)
Ventana de análisis	3 ciclos
Ciclos totales a analizar	20 ciclos
Frecuencia fundamental	60 Hz
Cantidad de ruido	10 dB, 20 dB, 30 dB, 40 dB
Armónicos considerados	Armónicos enteros, subarmónicos, interarmónicos
Sinusoides complejas (p)	12

Al igual que el caso anterior, la magnitud de todos los tipos de armónicos, en porcentaje, se puede observar en la tabla 12.

Tabla 12. Magnitud de los armónicos a utilizar en el cuarto caso de análisis de magnitud con MUSIC.

Armónico	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
Magnitud (%)	30	100	35	30	25	20	15	10	8	5	3.5	2

Debido a la cantidad elevada de análisis para este caso, se resumirán los resultados en 4 gráficas, una para cada nivel de ruido: 10 dB (Figura 5), 20 dB (Figura 6), 30 dB (Figura 7) y 40 dB (Figura 8).

Como se puede observar en la tabla 13, la presencia de ruido en diversos niveles (10, 20, 30 o 40 dB) provoca cambios significativos en la señal de alimentación y, por lo tanto, en los resultados obtenidos por el método MUSIC. Es claro que la distorsión provocada por el ruido resultó en resultados mucho más imprecisos que en los casos anteriores. Se puede observar que los picos más altos, junto con su porcentaje de error, son mucho más elevados que en casos anteriores. De acuerdo con los resultados obtenidos de los picos más altos y de los valores reales obtenidos (promedios), se puede considerar que este caso de análisis no fue un caso exitoso.



VIABILIDAD DEL MÉTODO MUSIC PARA SU APLICACIÓN EN RELEVADORES DE PROTECCIÓN DE ALTA VELOCIDAD

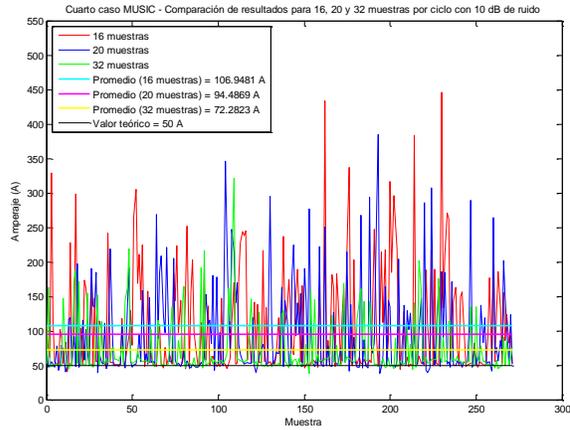


Figura 5. Gráfica de análisis para el cuarto caso de estimación con MUSIC, 10 dB, incluyendo resultados

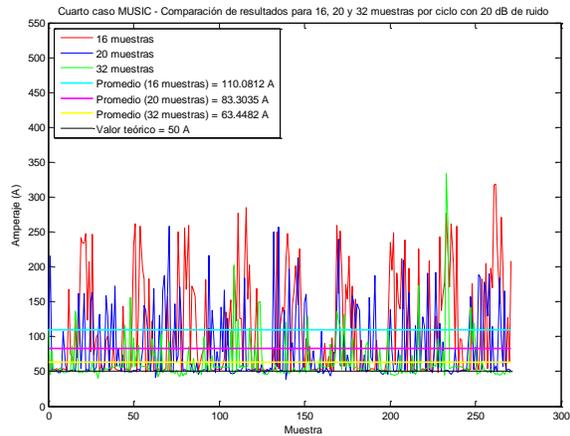


Figura 6. Gráfica de análisis para el cuarto caso de estimación con MUSIC, 20 dB, incluyendo resultados

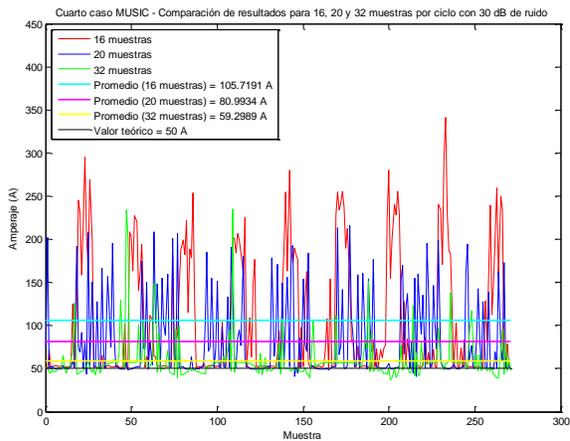


Figura 7. Gráfica de análisis para el cuarto caso de estimación con MUSIC, 30 dB, incluyendo resultados.

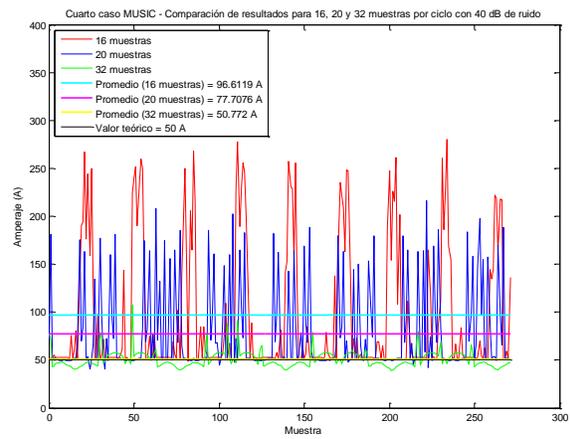


Figura 8. Gráfica de análisis para el cuarto caso de estimación con MUSIC, 40 dB, incluyendo resultados.

Es interesante tomar en cuenta que, mientras más muestras por ciclo en la señal de alimentación, menor fue la magnitud del porcentaje de error de los valores reales obtenidos con respecto al valor teórico, e incluso se tuvo una medición precisa con porcentaje de error de 1.544%. Sin embargo, esta medición no justifica la falta de precisión de las demás mediciones y, aunque la señal de 32 muestras por ciclo mostró los porcentajes de error con menor magnitud, los resultados no fueron adecuados para considerar utilizar el método en aplicaciones de relevadores de protección de alta velocidad.



VIABILIDAD DEL MÉTODO MUSIC PARA SU APLICACIÓN EN RELEVADORES DE PROTECCIÓN DE ALTA VELOCIDAD

Tabla 13. Resumen de los resultados obtenidos en el cuarto caso con el método MUSIC.

Señal de prueba	Nivel de ruido (dB)	Valor teórico (A)	Valor promedio (real) (A)	% de error del valor promedio	Pico más alto (A)	% de error del pico más alto	Tiempo de análisis (s)
16 muestras	10 dB	50	106.95	113.9%	446.44	792.9%	10.2555
	20 dB	50	110.08	120.2%	318.21	536.4%	9.6110
	30 dB	50	105.71	111.4%	341.15	582.3%	9.7746
	40 dB	50	96.61	93.2%	280.19	460.4%	9.4761
20 muestras	10 dB	50	94.49	88.9%	384.15	668.3%	12.1729
	20 dB	50	83.30	66.6%	258.13	416.3%	11.9975
	30 dB	50	80.99	61.9%	216.35	332.7%	12.1326
	40 dB	50	77.71	55.4%	216.45	332.9%	12.3213
32 muestras	10 dB	50	72.28	44.6%	321.41	542.8%	19.5032
	20 dB	50	63.45	26.9%	333.77	567.5%	20.8534
	30 dB	50	59.30	18.6%	234.81	369.6%	19.5869
	40 dB	50	50.77	1.5%	107.53	115.1%	19.3238

DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

En la estimación de frecuencias con MUSIC, inicialmente se tuvieron resultados extremadamente exitosos, en los cuales se determinó que el método puede encontrar las frecuencias fundamentales de los armónicos enteros en una señal (incluyendo la señal fundamental). Estos resultados fueron positivos, pues su ventana de análisis fue de 3 ciclos. El poder estimar armónicos enteros convierte al método MUSIC en una poderosa herramienta. Sin embargo, el método MUSIC se encontró con complicaciones al momento de introducir subarmónicos e interarmónicos a la señal de alimentación, particularmente con los subarmónicos.

Asimismo, no se pudo estimar un armónico entero con éxito, pero ese caso en particular se atribuye a que el método MUSIC encuentra más dificultades cuando trata de estimar frecuencias cuya señal posee una magnitud pequeña. De acuerdo con los resultados obtenidos, el método MUSIC no se puede utilizar para estimar subarmónicos o interarmónicos de una manera confiable.

Después de la estimación de frecuencias, que se determinó exitosa en algunos casos particulares, se llevó a cabo la estimación de magnitud con MUSIC. En el primer caso de estimación de magnitud con MUSIC, se obtuvieron resultados relativamente precisos, los cuales tenían bajos porcentajes de error.

En el segundo caso, se introdujeron diversos armónicos enteros a la señal de alimentación, lo cual resultó en porcentajes de error mucho más elevados que los del primer caso, demostrando que la distorsión de la señal debido a los armónicos fue un factor importante en el análisis del método MUSIC, además de demostrar que con estas características el método no es del todo confiable.

En el tercer caso con la introducción de subarmónicos e interarmónicos se tuvieron porcentajes de error elevados con el análisis del método MUSIC. Aunque se obtuvo un resultado que se podría



VIABILIDAD DEL MÉTODO MUSIC PARA SU APLICACIÓN EN RELEVADORES DE PROTECCIÓN DE ALTA VELOCIDAD

considerar relativamente preciso, no es suficiente para considerar exitoso el análisis de MUSIC en este caso.

En el cuarto y último caso, se aunó la variable del ruido. Los resultados de este caso presentaron porcentajes de error extremadamente altos, por lo que el análisis MUSIC tampoco se puede considerar exitoso para estas condiciones.

CONCLUSIONES.

Se encontró que el método MUSIC no es adecuado para la estimación de la corriente fundamental de una señal de alimentación con una ventana de análisis de 3 ciclos, ya que sus resultados no fueron lo suficientemente precisos como para considerarse un método confiable para diagnosticar y aislar una falla en un sistema eléctrico por medio de la utilización de relevadores de protección eléctrica de alta velocidad. Sin embargo, se encontró que el método MUSIC puede utilizarse de una manera efectiva para estimar las frecuencias de los armónicos principales de una señal de alimentación. Sin tomar en cuenta la señal fundamental, que usualmente ya se conoce (50 o 60 Hz), MUSIC exitosamente diagnosticó los armónicos enteros en las pruebas realizadas. Si se utilizan estos conocimientos para aplicar el método MUSIC en equipos eléctricos actuales, se pueden encontrar aplicaciones de medición de calidad de la energía y de monitoreo en tiempo real de las señales de corriente de sistemas eléctricos de potencia, donde en ambas aplicaciones es deseable conocer los armónicos que están presentes.

Además de mejorar la precisión de los resultados obtenidos por el método MUSIC, una variable importante que comúnmente se desea optimizar es el tiempo de análisis. Todas las pruebas efectuadas se realizaron en una computadora personal con un procesador Intel® Core™ 2 Duo T6400 @ 2.00 GHz con 4 GB de RAM, por lo que el tiempo de análisis se puede mejorar al trabajar con equipo electrónico de mejores características.

Se puede concluir que el análisis realizado cumplió su objetivo, es decir, verificar la viabilidad del método MUSIC como técnica de análisis espectral para su utilización en relevadores de protección de alta velocidad y, aunque los resultados no se encontraron inmediatamente exitosos, se lograron descubrir diversas áreas de oportunidad para el método, las cuales, al ser desarrolladas y optimizadas en un futuro, podrían convertir a MUSIC en una técnica masivamente implementada en los dispositivos de monitoreo eléctrico en tiempo real.

Finalmente, se encontró que la mejor instancia de análisis fue en el primer caso, el cual consistía únicamente en la señal simulada (sin armónicos, subarmónicos, interarmónicos o ruido), en la prueba que se realizó con una frecuencia de muestreo de 16 muestras por ciclo, donde el porcentaje de error fue de 0.147%. Por lo tanto, se puede concluir que, mientras más distorsión sufre la señal de entrada, mayor discrepancia tendrán los resultados de MUSIC con respecto al valor buscado.

BIBLIOGRAFÍA

Ribeiro, P.F., da Silveira, P.M., Duque, C.A. & Cerqueira, A.S. (2013). *Power Systems Signal Processing for Smart Grids*. Chichester, Inglaterra: John Wiley and Sons, Ltd. Primera edición

Ribeiro, P.F., Duque, C.A., Ribeiro, P.M., & Cerqueira, A.S. (2013). *Power Systems Signal Processing for Smart Grids*. Chichester, Inglaterra: John Wiley and Sons, Ltd. Primera edición

**VIABILIDAD DEL MÉTODO MUSIC PARA SU APLICACIÓN EN RELEVADORES DE
PROTECCIÓN DE ALTA VELOCIDAD**

Fidan, M. S. (2007). Multiple Signal Classification Method in Direction of Arrival Estimation. Hacettepe University: Electrical-Electronics Engineering Department.

Blackburn, J.L. & Domin, T.J. (2006). Protective Relaying: Principles and Applications. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, LLC. Tercera edición.

De la Rosa, F.C. (2006). Harmonics and Power Systems. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, LLC. Primera edición.

Interharmonics (2001). Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). Recuperado de: <http://grouper.ieee.org/groups/harmonic/iharm/ih519b.pdf>

Parametric Methods. MathWorks. Recuperado de: <https://www.mathworks.com/help/signal/ug/parametric-methods.html>

