

Implementação e análise de métodos de estimação de frequência no DSP F2877s

Caison R. Ramos* Gustavo Marchesan**
 Laura L. C. Santos*** Adriano P. Moraes****

* *Campus Cachoeira do Sul, Universidade Federal de Santa Maria, RS,
 (e-mail: caisonrr@hotmail.com).*

** *Departamento de Eletromecânica Sistemas de Potência,
 Universidade Federal de Santa Maria, RS (e-mail:
 gutomarchesan@gmail.com)*

*** *Campus Cachoeira do Sul, Universidade Federal de Santa Maria,
 RS, (e-mail: laura.santos@ufsm.br).*

**** *Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, RS, (e-mail:
 adriano@ctism.ufsm.br).*

Abstract: The Electric Power Systems (SEPs) frequency is a high importance characteristic because it directly affects the network performance and the supplied power quality. This article presents the implementation of frequency estimation algorithms in Digital Signal Processor (DSP) F28377s to be used in simulations of electrical power systems in real-time simulators. The algorithms presented are based on Zero Crossing Direction, Fast Fourier Transform (FFT), and Discrete Fourier Transform (DFT). The methods were tested in cases with constant frequency signal, with the varied frequency in step, in ramp, with addition of harmonics, and presence of Gaussian noise. The methods results were compared by analyzing the convergence time and steady-state estimation error. The results of the presented methods were satisfactory and showed the advantage of the algorithms used in the Fourier Transform.

Resumo: A frequência elétrica, em Sistemas Elétricos de Potência (SEPs), é uma característica de elevada importância, pois influencia diretamente no funcionamento dos equipamentos presentes na rede e na qualidade de energia elétrica fornecida. Esse artigo apresenta a implementação de algoritmos de estimação de frequência em um *Digital Signal Processor* (DSP) F28377s com intuito de utilização em simulações de tempo real. Os algoritmos apresentados são baseados em Detecção por Passagem de Sinal por Zero (DPSZ), Transformada Rápida Fourier (FFT) e Transformada Discreta Fourier (DFT). Os métodos foram submetidos a casos de sinal com frequência contante, com frequência variável em degrau, em rampa, com adição de harmônicas e na presença de Ruído Gaussiano Branco. Os resultados apresentados pelos métodos foram comparados pela análise dos índices de tempo de convergência, erro de estimação em regime permanente e comportamento gráfico dos sinais de frequência. Os resultados dos métodos aqui apresentados foram satisfatórios e evidenciaram vantagem dos algoritmos baseados em Transformada de Fourier.

Keywords: Frequency estimation; detection by passing through zero; Discrete Fourier Transform; Fast Fourier Transform; Digital Signal Processor.

Palavras-chaves: Estimação de frequência; Detecção por passagem por zero; Transformada Discreta de Fourier; Transformada Rápida de Fourier; Processador digital de sinais.

1. INTRODUÇÃO

Em Sistemas Elétricos de Potência (SEP), a frequência é altamente conexa a qualidade de energia elétrica e a estabilidade da rede. Para uma qualidade de fornecimento boa, as tensões e frequências devem ser constantes, além de não possuírem distorções harmônicas (Stalter et al., 2017). De acordo com a (ONS, 2008), a frequência de um SEP em regime permanente não deve apresentar desvio maior que 0,5Hz em relação a nominal.

A estimação de frequência é de suma importância pois a variação desse parâmetro do SEP é um indicativo de anomalias, como por exemplo, a ocorrência de ilhamentos não intencionais (Coury et al., 2011). Esses distúrbios resultam em problemas na qualidade de processos da rede, no mal funcionamento de equipamentos e risco a vida de trabalhadores da manutenção. Portanto, é necessário que suas detecções ocorram com agilidade e precisão, de forma a serem sanados sem danos substanciais (Stalter, 2014).

Nesse contexto, para manter a qualidade de energia elétrica e minimizar possíveis danos causados por anormalidades é necessário aperfeiçoar os algoritmos responsáveis

* O presente artigo possui suporte financeiro da FAPERGS.

pela estimação de frequência. Diversos métodos foram propostos na literatura, porém nenhum apresenta imunidade a todos os tipos de distorções e ruídos presentes no sistema. Assim sendo, nenhum método se consolidou. Os métodos mais utilizados atualmente são algoritmos simples baseados em Detecção de Passagem de Sinal por Zero (DPSZ). Entretanto, trabalhos recentes vêm demonstrando as dificuldades desses algoritmos quando defronte a diferentes condições de operação do SEP.

Uma maneira de aperfeiçoar e conhecer as limitações de cada método de estimação são as simulações em tempo real. Esses ensaios permitem simular SEPs em situações mais próximas da realidade.

Esse trabalho tem o intuito de implementar algoritmos de estimação de frequência em um *Digital Signal Processor* (DSP) F28377s, propiciando assim uma ferramenta capaz de facilitar as simulações em tempo real. Três algoritmos foram utilizados: DPSZ, Transformada Discreta de Fourier (DFT) e Transformada Rápida de Fourier (FFT).

Entre as demais possibilidades, os algoritmos propostos neste artigo serão implementados em relés de detecção de ilhamento em trabalhos posteriores. Para a validação dos algoritmos em um SEP, desejava-se utilizar a simulação em tempo real, no entanto, devido a suspensão das atividades presenciais por decorrência do Covid-19, foi utilizado sinais gerados no próprio DSP com diferentes comportamentos de frequência.

O presente artigo será dividido da seguinte maneira: na segunda seção ocorrerá uma breve revisão sobre os métodos de detecção propostos; a terceira seção apresentará as metodologias de implementação e casos simulados; na quarta seção serão demonstrados os resultados e comparação dos métodos apresentados e a quinta seção apresentará as considerações finais do trabalho.

2. ALGORITMOS DE ESTIMAÇÃO DE FREQUÊNCIA PROPOSTOS

Nesse capítulo ocorrerá uma breve introdução dos três métodos de estimação propostos por este artigo: DPSZ, DFT e FFT. Posteriormente, será apresentado o algoritmo de Lavopa et al. (2007) utilizado como complemento aos métodos que utilizam Transformada de Fourier.

2.1 Detecção de Passagem do Sinal por Zero

O método de DPSZ baseia-se na medição do intervalo de tempo entre duas passagens de zero pelo sinal analisado, relacionando o período desse intervalo a frequência do sinal amostrado. O período de intersecção com o eixo das abcissas é resultado da interpolação linear entre a amostra anterior e posterior à passagem por zero, representada por (1) (Marchesan, 2013). A frequência (f_k) é calculada por (2) a cada momento em que a amostra de sinal anterior é um valor abaixo de zero e amostra atual é um valor acima de zero (detecção por subida).

$$t_{dpsz} = \frac{t_{k-1} * V_{k+1} - t_{k+1} * V_{k-1}}{V_{k+1} - V_{k-1}} \quad (1)$$

$$f_k = \frac{1}{t_{dpszAtual} - t_{dpszAnterior}} \quad (2)$$

Onde:

V_{k+1} e t_{k+1} são respectivamente a tensão em volts e o tempo em segundos da amostra posterior a passagem do sinal por zero.

V_{k-1} e t_{k-1} são respectivamente a tensão em volts e o tempo em segundos da amostra anterior a passagem do sinal por zero.

$t_{dpszAtual}$ período (em segundos) da última passagem por zero

$t_{dpszAnterior}$ período (em segundos) da passagem anterior por zero

A técnica de DPSZ é o método de estimação de frequência mais usual em SEP. A vantagem em sua utilização está na sua simplicidade e na facilidade de implementação. Contudo, o método tem seu desempenho prejudicado na presença de ruídos.

2.2 Transformada Discreta de Fourier

A Transformada de Fourier de Tempo Discreto (DTFT) é uma transformada conexa a Transformada de Fourier e a Transformada Z. A DTFT pode ser representada pelo somatório apresentado em (3).

$$F(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X[n]e^{-i\omega n} \quad (3)$$

Sendo:

X sinal discreto de tensão.

F sinal de frequência

ω frequência angular normalizada do sinal.

A DFT é um caso especial de DTFT, pois é aplicada quando a função contínua original é periódica. Esse método obtém excelentes resultados na presença de ruídos e harmônicas, entretanto possuem problemas de vazamento espectral quando as frequências estimadas não são conhecidas.

Para seu cálculo numérico é necessária uma sequência finita de amostras, portanto o somatório infinito é decomposto em pequenas sequências de comprimento N . Logo, é possível calcular o sinal em um número de N frequências uniformemente espaçadas ao longo do período (2π), sendo composto assim, o espectro de frequências do sinal, conforme demonstrado em (4). Ao adaptarmos as condições do sinal a (3) obtêm-se (5).

$$\omega_k = \frac{2\pi k}{N}, \quad (4)$$

Sendo que:

k representa a frequência desejada a partir do espectro de frequências criado, assumindo valores $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$.

$$F(f) = \sum_{n=0}^{N-1} X[n]e^{-i2\pi \frac{k}{N}n} \quad (5)$$

Seguindo a Fórmula de Euler e considerando a simplificação em (6), é possível modificar a (5) para (7). Esse novo formato facilita o cálculo do módulo da amplitude transformada do sinal, apresentada em (8), necessário para o funcionamento do algoritmo por Lavopa.

$$\alpha = 2\pi \frac{k}{N}n \quad (6)$$

$$F(f) = \sum_{n=0}^{N-1} \{X[n] (\cos \alpha - i \sin \alpha)\} \quad (7)$$

$$|F(f)| = \sqrt{\left(\sum_{n=0}^{N-1} X[n] \cos \alpha\right)^2 + \left(\sum_{n=0}^{N-1} X[n] \sin \alpha\right)^2} \quad (8)$$

2.3 Transformada Rápida de Fourier

A FFT é um algoritmo de processamento de sinal capaz de calcular Transformadas de Fourier com maior rapidez. Os algoritmos de DFT convencionais propostos na seção 2.2 possuem uma complexidade de cálculo de $O(N^2)$ enquanto os algoritmos de FFTs tem complexidade de $O(N \log N)$.

Existem muitos métodos diferentes de FFTs, dentre eles destaca-se o de Cooley-Tukey. A idéia básica desse algoritmo é a divisão da janela de coeficiente do sinal em dois vetores, sendo computado recursivamente o DFT para cada um deles e combinado os resultados para calcular o polinômio completo. Como consequência da divisão, a largura deve ser 2^p , sendo p um número inteiro positivo.

Na Figura 1, é demonstrado de forma simplificada o funcionamento do algoritmo de Cooley-Tukey. Um vetor de sinal no domínio do tempo com 8 amostras, é dividido em dois vetores de 4 fatores, o primeiro possuindo amostras pares e o segundo com amostras ímpares. Os vetores resultantes transformam-se em sinais no domínio da frequência após a realização da DFT. Os sinais pares são somados as amostras ímpares que são multiplicados por um senoide (W) com frequência selecionada adequadamente.

2.4 Algoritmo de Lavopa

Esse algoritmo permite a estimação de frequência utilizando as amplitudes de sinal transformado e o espectro de frequências gerados na FFT e DFT. Devido as transformadas serem discretas, a frequência fundamental do sinal amostrado pode não coincidir com a localização da amostra de amplitude máxima apresentada pelos métodos citados acima. Com isso, Lavopa et al. (2007) determinou que a frequência que possui máxima amplitude deve ser adicionada de um Δ de correção. O Δ é definido a partir da amplitude máxima (A_{mx}) e das suas adjacentes anterior (A_{antmx}) e posterior (A_{proxmx}).

$$\Delta = \frac{1,5 * df * A_{mx} * (A_{antmx} - A_{proxmx})}{(A_{mx} + A_{antmx}) * (A_{mx} + A_{proxmx})}, \quad (9)$$

Onde df é definido pelo inverso do período da janela amostrado e representado por (10).

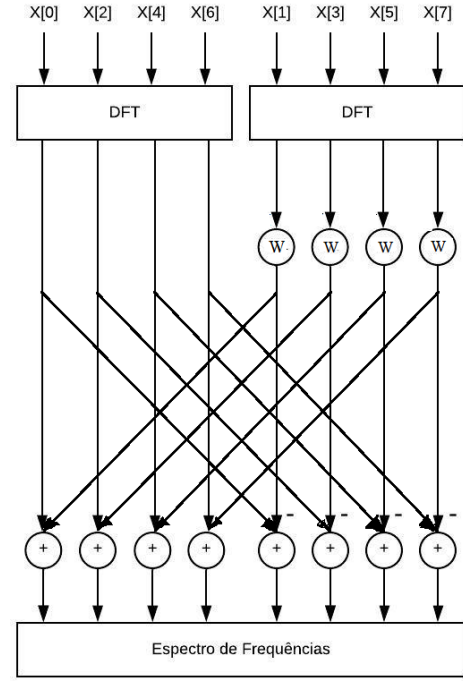


Figura 1. Esquemático simplificado do algoritmo de Cooley-Tukey.

$$df = \frac{1}{T_a}, \quad (10)$$

A partir da revisão apresentada, é proposta a metodologia aplicada a implementação dos algoritmos no DSP F2877s.

3. METODOLOGIA APLICADA

Os sinais utilizados como base para comparação foram criados no próprio DSP. A amostragem dos sinais gerados, em todos os algoritmos de detecção foi de 7,68 kHz, portanto, 128 amostras em um sinal de tensão de 60 Hz. Os métodos de FFT e DFT foram realizados com valores amostrados em 4 ciclos de onda em uma frequência de 60Hz. O DPSZ foi realizado a cada ciclo de onda.

Os resultados foram obtidos a partir dos casos de resposta a estimação de frequência uniforme, ao degrau, a rampa, a distorção harmônicas de segunda, terceira e quinta ordem, e sinal com presença de Ruído Gaussiano Branco.

Os códigos correspondentes a cada método foram implementados na plataforma *Code Composer Studio* e embarcados no F28377s. As aquisições de resultados ocorreram entre 400 e 900 milissegundos (ms) de simulação. Não foram utilizadas técnicas de pré e pós filtragem dos sinais envolvidos nos métodos.

Com o intuito de facilitar a análise dos algoritmos foram utilizados três indicadores de qualidade: tempo de convergência, erro médio em regime permanente e comportamento gráfico do sinal de frequência.

O tempo de convergência, ou acomodação, é o período entre a ocorrência do evento e a estabilização da frequência em uma faixa de operação. Nesse artigo considerou-se a faixa de ± 100 mHz da resposta ideal. A convergência é atingida quando o sinal se mantém dentro da faixa de frequência por mais de 100 ms.

O erro médio em regime permanente, representado em (11) é a média dos valores absolutos de erro de estimação da frequência após a convergência (Stalter, 2014). Quanto menor o valor desse índice melhor o estimador de frequência.

$$E_{med} = \sum_{n=1}^m \left(\frac{|erro(n)|}{m} \right), \quad (11)$$

Sendo:

m o número total de amostras após a convergência

Com a metodologia de implementação do algoritmo e a descrição dos índices de desempenho descritos acima foi realizada a aquisição e análise dos resultados apresentados na seção 4.

4. RESULTADOS

Para a análise dos algoritmos propostos foram realizados cinco casos de comportamento de frequência.

4.1 Caso I: Frequência constante em 60 Hz

No primeiro caso a frequência da senoide criada é constante em 60 Hz, sem ruídos gaussiano ou harmônicas. É possível verificar na Fig. 2 e na Tabela 1, respectivamente as respostas dos métodos propostos e o erro médio de estimação em regime permanente. Os três métodos propostos apresentaram resultados satisfatórios de estimação, sendo que, o DPSZ demonstrou menor erro médio em regime permanente.

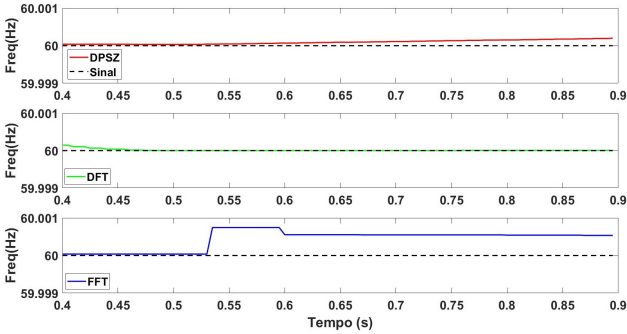


Figura 2. Resposta a frequência constante.

Tabela 1. Erro médio em sinal de frequência constante (Hz).

DPSZ	DFT	FFT
1.98E-04	5.73E-04	4.35E-04

4.2 Caso II: Resposta a degrau de frequência

Variações de frequência ocorrem no sistema elétrico. Portanto, para determinar a velocidade dos métodos propostos utilizou-se um sinal com variação de frequência em degrau. Geralmente as variações no SEP ocorrem de maneira relativamente suave, porém tal simulação extrema permite analisar a convergência dos algoritmos de estimação propostos.

Neste caso, o sinal de tensão criado possui frequência constante de 60 Hz até o tempo de simulação de 0,6 segundo (s). A partir dessa ocorrência, foi gerado um degrau negativo de 1 Hz, demonstrado na Fig. 3.

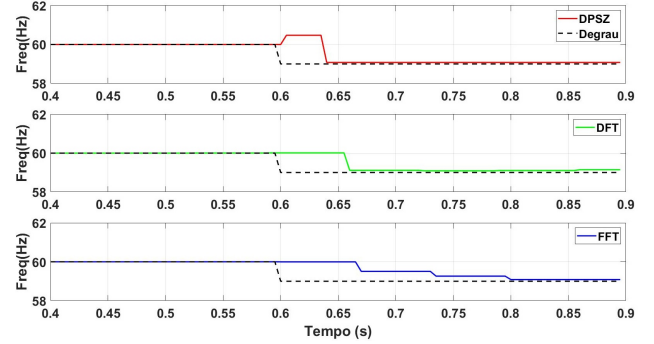


Figura 3. Resposta ao degrau de frequência.

De forma geral, os métodos simulados conseguiram rastrear a súbita variação. É possível notar que o método de DPSZ, rastreia de rapidamente a variação de frequência e com menor erro médio.

Tabela 2. Erro médio em sinal com variação de frequência em degrau (Hz).

	DPSZ	DFT	FFT
Erro médio (Hz)	4.01E-02	4.92E-03	5.56E-03
Tempo conv. (s)	4.00E-02	1.94E-01	1.94E-01

4.3 Caso III: Resposta a rampa de frequência

Os algoritmos de estimação podem sofrer imprecisões quando a frequência varia. Neste caso foi simulado sinais variação na frequência em rampa. A rampa foi implementada com amplitude de 1 Hz, ocorrendo a partir do 0,6 s e se estendendo até o 0,8 s de simulação. Após o 0,8 s a frequência do sinal é estabilizada.

Conforme demonstrado na Fig. 4, todos os métodos conseguem rastrear a variação de frequência, acomodando-se apenas quando o sinal permanece constante (após 0,8 s). Esse fenômeno evidencia a necessidade e a importância da utilização de filtros nos sinais.

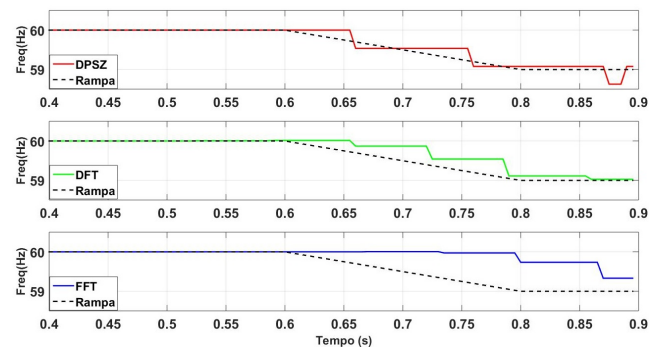


Figura 4. Resposta a rampa de frequência.

4.4 Caso IV: Resposta a harmônica de segunda, terceira e quinta ordem

Para a realização desse caso foram realizados testes com componentes harmônicas de segunda, terceira e quinta ordem.

As simulações consistiram na adição de três por cento de distorção harmônica no sinal com frequência fundamental igual a 60 Hz.

Com a adição da segunda harmônica, representada pela Fig. 5, foi possível notar que todos os métodos obtiveram resultados satisfatórios obtendo pequenos níveis de erro médio, conforme demonstrado na Tabela 3.

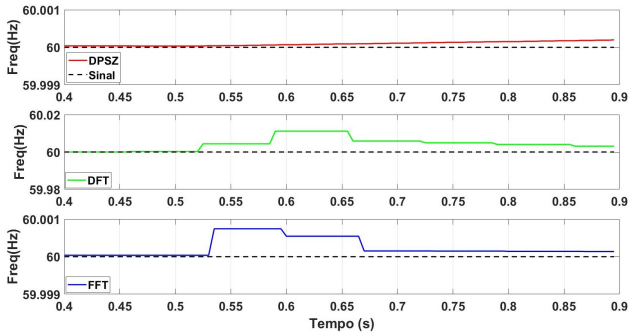


Figura 5. Resposta a adição de harmônica de segunda ordem.

Tabela 3. Erro médio em sinal de frequência com adição de segunda harmônica (Hz).

DPSZ	DFT	FFT
1.31E-04	9.93E-04	1.48E-04

Nas simulações de adição da terceira harmônica, ilustradas pela Fig. 6, os métodos baseados em Transformada de Fourier obtiveram resultados excelentes, possuindo baixo erro médio de frequência, entretanto o algoritmo de DPSZ possui grande erro médio e 0,5 Hz de variação. Os erros médios de cada método podem ser analisados na Tabela 4.

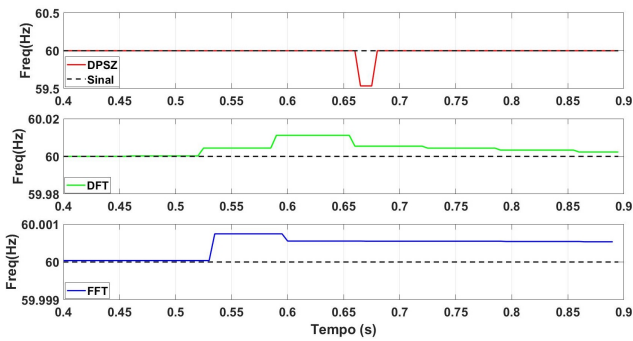


Figura 6. Resposta a adição de terceira harmônica.

Tabela 4. Erro médio em sinal de frequência com adição de terceira harmônica (Hz).

DPSZ	DFT	FFT
1.42E-02	7.55E-03	3.31E-04

As simulações e os erros médios de frequência referentes a adição de quinta harmônica são representadas, respectivamente, pelas Fig. 7 e pela Tabela 5. Nestas simulações ambos métodos obtiveram ótimos resultados em suas estimações, com destaque para o DPSZ que apresentou menor erro médio.

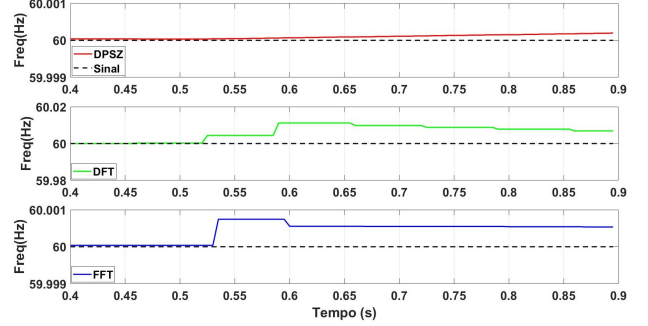


Figura 7. Resposta a adição de quinta harmônica.

Tabela 5. Erro médio em sinal de frequência com adição de quinta harmônica (Hz).

DPSZ	DFT	FFT
1.31E-04	7.36E-03	4.30E-04

4.5 Caso V: Resposta ao ruído

Algoritmos de estimação de frequência podem ser sensíveis a interferências causadas por ruídos presentes nos sinais estimados. Contudo em SEP, essas anomalias estão presentes em todo o sistema, podendo ser geradas pela própria amostragem do sinal ou por equipamentos próximos.

Neste caso os métodos propostos foram submetidos, a partir do 0,6 s de simulação, a adição do sinal de 60 Hz a um Ruído Gaussiano de relação sinal-ruído (RSR) de 40 dB, calculado a partir das amplitudes de sinal (A_{Sinal}) e de ruído (A_{Rudo}), representado em (12).

$$RSR_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{Sinal}}{A_{Rudo}} \right), \quad (12)$$

É possível verificar pela Fig. 8 e pela Tabela 6 que apenas DPSZ sofre alterações significativas em sua estimação. Esse fenômeno ocorre pelas múltiplas passagens por zero causadas pela interferência.

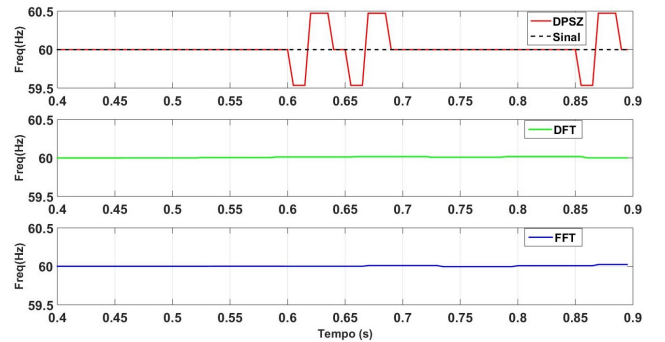


Figura 8. Resposta ao ruído gaussiano.

Tabela 6. Erro médio em sinal com ruído gaussiano (Hz).

DPSZ	DFT	FFT
Não Conv.	4.48E-03	8.64E-03

5. CONCLUSÃO

O presente artigo apresentou metodologias aplicadas a microcontroladores, no qual têm por objetivo estimar frequência em simulações em tempo real de Sistemas Elétricos de Potência. Tais métodos foram testados computacionalmente com intuito de analisar o desempenho quando defronte a diferentes situações.

Os resultados obtidos nesse artigo possibilitará a utilização do DSP F28377s em simulação de tempo real e na implementação de relés de proteção.

O algoritmo de DPSZ apresenta, na maioria dos casos, melhores resultados em tempo de convergência e erro médio. Contudo é evidenciado nesse artigo que o algoritmo é confiável somente em sinais com baixo nível de ruído. É possível verificar também que na presença de terceira harmônica o DPSZ apresenta grandes variações. Em sistemas reais, a presença de ruído é algo constante. Além disso, os grandes picos de erros podem prejudicar, por exemplo, na detecção de ilhamento, já que essa falha no método pode fazer com que o dispositivo de anti-ilhamento atue indevidamente.

Os métodos baseados na Transformada de Fourier se mostraram precisos mesmo na presença de ruído e harmônicas, entretanto, necessitam de táticas afim de aumentar sua precisão em casos de vazamento espectral.

Visto que nenhum dos métodos tem desempenho absoluto em todas as situações demonstradas, devendo assim, ser escolhido o algoritmo de modo que o mesmo tenha melhor desempenho em situação mais recorrentes ao sistema avaliado.

Conclui-se pelos resultado apresentados, que em aplicações em sistemas reais deve-se escolher os métodos que utilizem a Transformada de Fourier. Nesse contexto, o método FFT apresentou melhor desempenho comparado ao DFT. Com o intuito de utiliza-los juntamente a algoritmos de anti-ilhamento esse se destaca devido a sua boa precisão apresentada nos casos simulados, menores distorções por harmônicas e por possui menor esforço computacional do que o algoritmo baseado em DFT.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pelo financiamento a este trabalho vinculado ao projeto 19/2551-0001285-3 contemplado no edital 04/2019 do programa Auxílio Recém-Doutor.

REFERÊNCIAS

Coury, D., Oleskovicz, M., Barbosa, D., Delbem, A., Simoes, E., and Carvalho, J. (2011). Algoritmo evolutivo para a estimação da frequência em sistemas elétricos utilizando fpgas. *Revista Controle e Automação*, 22, 495–505.

Lavopa, E., Summer, M., Zanchetta, P., Ladisa, C., and Cupertino, F. (2007). Real-time estimation of fundamental frequency and harmonics for active power filters applications in aircraft electrical systems. *European Conference on Power Electronics and Application*, 1–10.

Marchesan, G. (2013). *Estimadores de frequência aplicados a sistemas elétricos de potência*. Mestrado em engenharia elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

ONS (2008). Procedimento de rede, submódulo 25.6. indicadores de qualidade de energia elétrica – frequência e tensão.

Stalter, M.d.C. (2014). *Análise de Estimadores de Frequência Sob Condições Transitórias*. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Pampa.

Stalter, M., Santos, E., Saldanha, J., Fagundes, A., and Itczak, A. (2017). Estimadores de frequência: uma abordagem aplicada a sistemas elétricos de potência. *The 12th Latin-American Congress on Electric Generation and Transmission*, 1–8.