

DETECÇÃO DE BARRAS QUEBRADAS EM MOTORES DE INDUÇÃO COM CANCELAMENTO ADAPTIVO DA COMPONENTE FUNDAMENTAL

FELIPE SADAMI*, GILSON CESAR†, LUIZ A. L. ALMEIDA‡

**Mestrado em
Engenharia Elétrica
Universidade Federal do ABC
Santo Andre, Brazil, CEP 09210-580*

*†Mestrado em
Engenharia da Informação
Universidade Federal do ABC
Santo Andre, Brazil, CEP 09210-580*

*‡Departamento de Instrumentação
Automação e Robótica
Universidade Federal do ABC
Santo Andre, Brazil, CEP 09210-580*

Emails: oiwa.costa@ufabc.edu.br, gil.iar@aluno.ufabc.edu.br, luiz.almeida@ufabc.edu.br

Abstract— Based on motor current signature analysis (MCSA) it is possible point faults in induction motors, as broken bars through the analysis of the stators current imbalances, where in frequency domain these imbalances generate sidebands around the fundamental frequency. Nevertheless, due the difficulty and the high computational cost to handle the differences between the sidebands and fundamental frequency magnitudes, a technique which suppresses the fundamental frequency via Recursive Discrete Fourier Transform was proposed by (Costa et al., 2004) in order to improve the sidebands spectrum generation. However, the proposed technique estimates the fundamental component based on a fixed frequency (60Hz), without considering the grid oscillations which can directly affect the result of the fundamental cancellation. It is proposed in this paper an improvement in the fundamental component cancelling technique by the implementation of a grid oscillations compensator system composed by a Zero-Crossing Frequency Estimator and a Numerically Controlled Oscillator. It will result in low computational cost, increasing the data control efficiency and reliability, but above all taking in consideration the current reduction cost context, it could be implemented in low cost hardware.

Keywords— Recursive Discrete Fourier Transform (RDFT), Fundamental Frequency Cancelling Technique, Induction Motor, Broken Bars, Zero-Crossing Frequency Estimator, Numerically Controlled Oscillator (NCO)

Resumo— Baseado na análise da assinatura da corrente do motor (MCSA) é possível apontar falhas em motores de indução, como barras quebradas, através da análise de variações na corrente do estator, onde no domínio da frequência estas variações geram bandas laterais à frequência fundamental. Porém, devido a dificuldade e alto custo computacional para se lidar com a grande diferença entre as magnitudes das bandas laterais e a frequência fundamental, foi proposto por (Costa et al., 2004) uma técnica que atenua a componente da frequência fundamental via Transformada Recursiva Discreta de Fourier (RDFT) com objetivo de melhorar os espectros de bandas laterais gerados. Entretanto, a técnica proposta estima a componente fundamental baseando-se em uma frequência fixa (60Hz), sem considerar as oscilações da rede que podem diretamente afetar o resultado do cancelamento. É proposto neste artigo uma melhoria na técnica de cancelamento da componente fundamental através da implementação de um sistema compensador das oscilações da rede composto por um estimador de frequência do tipo “Zero-Crossing” e um oscilador controlado numericamente (NCO). Isto acarreta em um baixo custo computacional, aumentando a eficiência e confiabilidade do controle dos dados, mas acima de tudo levando em conta o contexto atual de redução de custos, poderá ser implementado em hardwares de baixo custo.

Palavras-chave— Transformada Recursiva Discreta de Fourier (RDFT), Técnica de Cancelamento da Frequência Fundamental, Motores de Indução Trifásicos, Barras Quebradas, Estimador de Frequência “Zero-Crossing”, Oscilador Controlado Numericamente (NCO)

1 Introdução

Os motores elétricos de indução são responsáveis por uma vasta gama de utilização em indústrias no mundo todo. Na sua maioria executam funções indispensáveis nos processos produtivos exigindo extenuantes ciclos de trabalho. Isto significa que paradas inesperadas destes equipamentos podem resultar em grandes perdas as companhias, sejam na quebra do motor ou mesmo danificando outros componentes do sistema, na qual a substitui-

ção ou conserto acarretariam em elevados custos ou mesmo pela paralisação das atividades. (Ayhan et al., 2008).

As falhas nos motores podem ocorrer por diversas causas, desde problemas no processo de fabricação dos componentes até deformações mecânicas causadas por variações no ambiente, temperatura e eletromagnetismo. (Ying, 2009)

Atualmente, com o objetivo de manter os motores livre de falhas, técnicas de monitoramento baseados na condição (RBM) e confiabi-

lidade (CBM) são implementadas em conjunto a manutenção preventiva. Entretanto, uma importante técnica baseada na análise da assinatura da corrente dos motores conhecida como MCSA, que diagnóstica em tempo real a saúde do motor e pode antecipadamente apontar falhas como barras quebradas através da análise das variações na corrente do estator, vem sendo desenvolvida e aperfeiçoada por sua eficácia. (Thomson and Fenger, 2001)

Estas variações na corrente do estator geradas pelas barras quebradas revelam no domínio da frequência a presença de bandas laterais a frequência fundamental conforme mostrado na Fig.1. Estas bandas laterais podem ser descritas pela equação (Thomson and Fenger, 2001),

$$f_{sb} = f_1 \cdot (1 \pm 2s) \quad (1)$$

onde f_{sb} é a frequência da banda lateral, f_1 é a frequência fundamental da rede e s é a unidade por rotação do motor de indução.

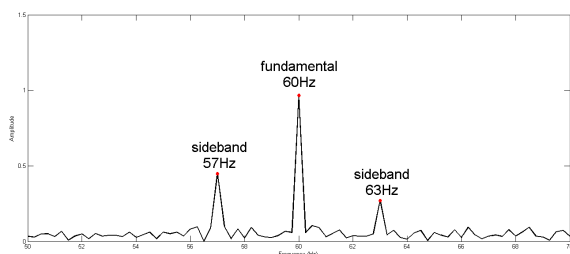


Figura 1: Espectro de uma barra quebrada gerado digitalmente

O sistema de análise da assinatura da corrente do motor (MCSA) foi possível devido a evolução tecnológica que nos permitiu a utilização de algoritmos capazes de analisar as informações no domínio da frequência. Embora ainda nos dias atuais, um dos grandes obstáculos que esta técnica enfrenta é o alto custo computacional para lidar com a grande diferença entre as magnitudes da componente fundamental e as bandas geradas pelas falhas, como apresentado na Fig. 1, exigindo hardwares de conversão dos dados analógicos para digital de alta capacidade. Um típico sistema MCSA consistia basicamente de um sensor (filtro analógico) que era responsável pelo monitoramento da corrente do estator e um terminal responsável pela aquisição e análise dos dados (Thomson and Fenger, 2001).

Entretanto, devido a massiva utilização de motores de indução nas mais variadas áreas e a grande vantagem do sistema MCSA ser não invasivo gerou um grande crescimento no número de estudos e novas técnicas baseadas neste sistema. Um destes estudos é a base deste artigo e foi proposto por (Costa et al., 2004) onde os autores apresentam uma versão híbrida analógica/digital do sistema MCSA que possibilitou

a implementação de um algoritmo que sintetiza uma réplica estimada via Transformada Discreta Recursiva de Fourier (RDFT) da componente fundamental para posterior cancelamento com a original, gerando um espectro contendo somente as bandas laterais. De forma a contextualizar e elencar as potencialidades deste estudo podemos observar que, ainda nos dias atuais, existem vários estudos sendo desenvolvidos e publicados nos mais renomados congressos e periódicos nacionais e internacionais, pois o sistema MCSA tem sua eficiência comprovada e ainda apresenta problemas a serem superados como o alto custo e complexidade computacional. Dentre os inúmeros estudos desenvolvidos internacionalmente podemos destacar a técnica baseada na transformada de Wavelet em conjunto com um banco de filtros de resposta finita (FIR) proposta por (Eren et al., 2016) que trata a MCSA através da decomposição em multibandas visando melhorar a complexidade computacional sem afetar a precisão da técnica, publicada no renomado periódico *Measurement*. Podemos mencionar o interessante trabalho nacional proposto por (Palácios et al., 2016) que propõe o uso de um sistema multi-agente inteligente para identificação de falhas no rotor, estator e anéis dos motores de indução onde os parâmetros de entrada são a amplitude e fase da corrente fornecida para a máquina, já considerando distúrbios de tensão e cargas no motor, publicado também no renomado periódico *Applied Soft Computing*. Ambos estudos bastante atuais os quais contextualizam a motivação e reforçam a potencialidade devido ao grande ganho computacional apresentado neste estudo.

Este artigo desenvolve uma técnica similar a apresentada por (Costa et al., 2004) implementando-se uma melhoria no cancelamento da componente fundamental uma vez que a técnica de cancelamento da frequência fundamental proposta apresenta o problema de que a réplica sintetizada é estimada por um algoritmo que não considera as oscilações presentes na rede e isto pode afetar completamente o resultado da técnica. Com a implementação de um NCO e um estimador de frequência *Zero Crossing* é possível corrigir estas variações, além de apresentar uma significativa redução no custo computacional necessário uma vez que torna possível a utilização de conversores de até 8 bits presentes na maioria dos hardwares.

2 Técnica Proposta

Esta proposta visa a melhoria na detecção de barras quebradas em motores de indução apresentando uma melhoria na técnica de supressão da componente da frequência fundamental. Foi incluso um estimador de frequência do tipo “*Zero-Crossing*” e um oscilador controlado numericamente.

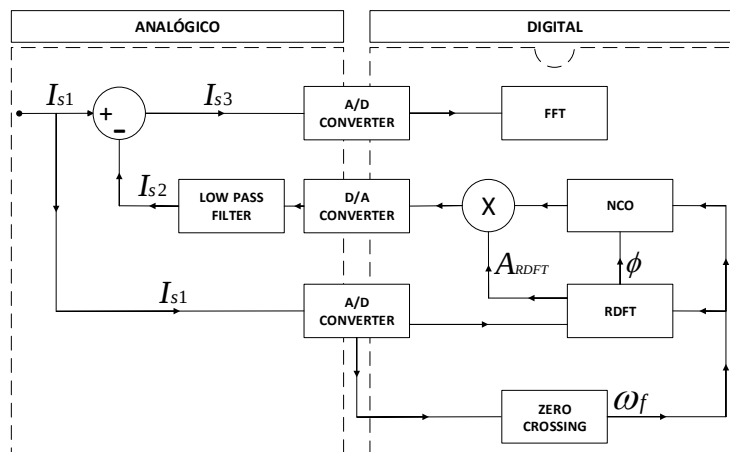


Figura 2: Funcionamento Proposto

mente (NCO) para compensação das oscilações da rede, gerando uma réplica o mais próximo possível da componente fundamental real fazendo com que a supressão seja efetiva melhorando o espectro das bandas laterais geradas pelas barras quebradas. A melhoria tecnológica substitui os filtros analógicos devido a sua fragilidade a mudanças de temperatura e sua dependência de componentes passivos que podem afetar sua precisão e confiabilidade com o tempo, por um sistema digital baseado na plataforma Arduino que segue a evolução tecnológica e os novos padrões de análise inteligente das informações, apresenta maior velocidade, eficiência e confiabilidade no controle dos dados, além de menores custos de instalação, manutenção e da crescente aplicação industrial.

3 Funcionamento Proposto

O esquema completo pode ser visto na Fig. 2. A corrente do estator, medida através de um sensor nos terminais do estator do motor como pode ser visto na Fig. 4, I_{s1} segue em duas diferentes direções, sendo uma para o somador e outra para o microcontrolador onde será convertido de sinal analógico para digital. O estimador de frequência Zero-Crossing recebe o sinal e estima a frequência da rede (ω_f). A RDFT recebe o sinal da rede e com a frequência fornecida pelo “Zero-Crossing” calcula os valores da amplitude (A_{RDFT}) e do ângulo inicial (ϕ). O NCO recebe a frequência ω_f encontrada e o ângulo ϕ fornecido pela RDFT para sintetizar uma réplica do sinal com mesma frequência e fase da rede. As Amplitudes encontradas pela RDFT e do NCO seguem para um comparador para correção, uma vez que o NCO gera um sinal com amplitude unitária. O sinal resultante I_{s2} gerado possui então a mesma frequência, amplitude e fase que o sinal gerado

pela rede I_{s1} . O sinal segue para conversão de digital para analógico e passa por um filtro passa baixa para eliminação de qualquer ruído seguindo finalmente para o somador, onde o sinal I_{s2} será subtraído do sinal I_{s1} , ou seja, cancelando a frequência fundamental do sinal da rede. O sinal resultante I_{s3} é convertido de analógico para digital e para frequência pela Transformada Rápida de Fourier (FFT), onde o resultado poderá ser posteriormente analisado.

3.1 Estimador de frequência “Zero Crossing”

São vários os métodos para a estimação da frequência de um sinal tais como Zero-Crossing, Fourier, Prony, Kalman, PLL, dentre outros. Para a proposta deste projeto a aquisição da frequência da rede foi efetuado por um estimador de frequência “Zero-Crossing” devido a sua robustez e sua simplicidade. A técnica zero-crossing estima a frequência do sinal através da medição do intervalo entre as passagens por zero relacionando a frequência (f_n) com o período (T). A formula para cálculo da frequência é dada por (Marchesan, 2013)

$$f_n = \frac{1}{2(t_n - t_{n-1})}, \quad (2)$$

onde t_n é o tempo da passagem do sinal em zero para o instante n e t_{n-1} é o tempo da passagem do sinal em zero anterior ao instante n . O instante t em que o sinal passa em zero pode ser obtido através da interpolação linear entre duas amostras e é dado por (Marchesan, 2013)

$$t_n = \frac{t_{n-1}V_n - t_nV_{n-1}}{V_n - V_{n-1}}, \quad (3)$$

onde n é o instante da amostra da passagem em zero, sendo $n - 1$ o momento do instante anterior e V é a tensão do sinal.

3.2 Oscilador Numericamente Controlado (NCO)

O oscilador numericamente controlado (NCO) é um oscilador que pode ser controlado computacionalmente (numericamente) e que quando utilizado em conjunto com conversores digital/analógico (DAC) pode ser utilizado como um sintetizador digital de sinais (DDS) flexível e de alta resolução, ambas características essenciais neste estudo (Devices, 2009).

Um sintetizador NCO é composto de uma fonte de frequência de clock (processador) de alta precisão, um acumulador de fase, um conversor de fase para amplitude a ser armazenado na memória PROM e um conversor digital para analógico (DAC) (Devices, 2009).

O sintetizador pode ser visualizado como um sistema circular onde uma volta completa neste sistema corresponde a um ciclo de uma onda senoidal e cada ponto corresponde a uma determinada fase. O acumulador de fase nada mais é que um contador que incrementa a cada pulso de clock do sistema uma magnitude do tamanho da palavra de incremento M. O acumulador de fase é utilizado para gerar o equivalente à rotação do vetor em volta do círculo onde as posições do vetor correspondem aos pontos de um ciclo desta onda senoidal. O número de pontos é determinado pela resolução N do acumulador de fase em bits (Devices, 2009).

A saída do acumulador de fase não pode ser diretamente utilizada para gerar uma onda senoidal. Devido a isto é adicionado ao sistema uma tabela seno com a relação entre a fase e amplitude de um seno de amplitude unitária para converter a fase obtida pelo acumulador de fase em uma amplitude para então ser enviado ao DAC para conversão de digital para analógico. A frequência de saída pode ser descrita conforme equação (4)

$$f_s = \frac{M f_{clk}}{2^N} \quad (4)$$

onde f_s é a frequência de saída, M é a palavra de incremento f_{clk} é a frequência de clock do sistema e N é o comprimento em bits do acumulador de fase (Devices, 2009).

3.3 Transformada Recursiva Discreta de Fourier (RDFT)

Através da Transformada de Fourier é possível analisar um sinal no domínio da frequência. A Transformada Recursiva Discreta de Fourier é uma equivalente da transformada contínua, porém em N instantes de um tempo amostrado T . O algoritmo permite, uma vez que a amostra seja múltipla da frequência fundamental, estimar a fase e amplitude da mesma. Assumindo que o cálculo é dado por (Costa et al., 2004),

$$y(n) = A_{re} \cos(w_0 \Delta_t n) + A_{im} \sin(w_0 \Delta_t n) \quad (5)$$

onde Δ_t é a amostra de tempo e o tempo $t = \Delta_t n$, para amostras $n = 1, 2, 3, \dots, N_p$, onde N_p é o número total de amostras por período a ser determinado pelo estimador de frequência. A amplitude A_{re} e A_{im} , partes real e imaginária da amplitude, podem ser estimas por (Costa et al., 2004),

$$A_{re}(n) = A_{re}(n-1) + \dots + \frac{2}{N_p} [y(n) - y(n-N_p)] \cos\left(\frac{2\pi n}{N_p}\right) \quad (6)$$

$$A_{im}(n) = A_{im}(n-1) + \dots + \frac{2}{N_p} [y(n) - y(n-N_p)] \sin\left(\frac{2\pi n}{N_p}\right) \quad (7)$$

Assim é possível obter a amplitude calculada pela RDFT (A_{RDFT}) e fase (ϕ) necessárias para nosso estudo, onde os mesmos são dados por (Costa et al., 2004),

$$A_{RDFT} = \sqrt{A_{re}^2 + A_{im}^2} \quad (8)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{A_{re}}{A_{im}}\right) \quad (9)$$

4 Modelagem e Simulação

Foram analisados via simulação no Matlab os impactos gerados pelas oscilações da rede na técnica de cancelamento da frequência fundamental e a melhoria proposta neste artigo. Foi utilizado como base de simulação um sinal conforme abaixo,

$$y(t) = A_1 \sin(2\pi f_1 t + \theta_1) + A_2 \sin(2\pi f_2 t + \theta_2) + A_3 \sin(2\pi f_3 t + \theta_3) - A_4 \sin(2\pi f_4 t + \theta_4) + e(t) \quad (10)$$

onde A_x , f_x e θ_x são as amplitudes, frequências e fases de cada sinal respectivamente. O sinal 1 e 2 representam as bandas laterais geradas pelas barras quebradas, onde para as amplitudes foi considerado valor unitário (A_1 e $A_2 = 1$), para as frequências $f_1 = 57Hz$ e $f_2 = 63Hz$ e fases θ_1 e θ_2 alinhadas com o sinal da rede para facilitar a visualização dos impactos na simulação. O sinal 4 corresponde ao sinal ideal da rede, com frequência fundamental $f_4 = 60Hz$, fase $\theta = 0$ graus e amplitude $A_2 = 100$, que será cancelado com o sinal 3 correspondente rede com oscilações onde os valores da amplitude, frequência e fase foram alterados a simular as oscilações da mesma e poder assim observar o impacto de cada uma delas em relação ao espectro gerado. Já $e(t)$ é um valor randômico gerado no Matlab para simulação de ruído branco gaussiano (AWGN) comumente presente nestes sistemas.

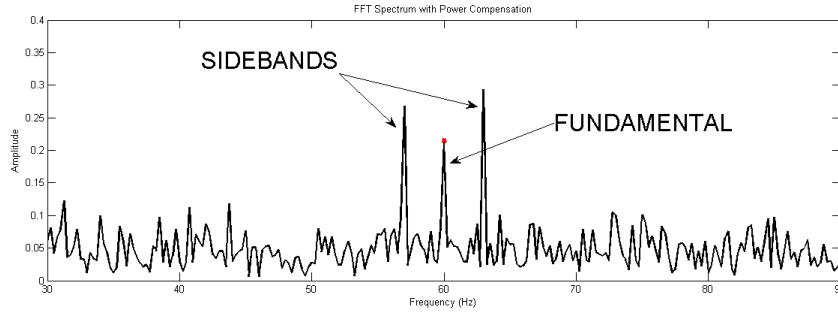


Figura 3: Espectro do cancelamento da frequência fundamental considerando as oscilações da rede.

Foi adotado para avaliação da qualidade do espectro de frequência a relação de proporção entre as amplitudes das frequências de banda lateral (A_{bl}) e fundamental (A_{fu}) com a capacidade do processador,

$$\frac{A_{bl}}{A_{fu}} 100 = E \begin{cases} 8\text{-bits} & E \leq 10\% \\ 10\text{-bits} & E \leq 2.5\% \\ 12\text{-bits} & E \leq 0.625\% \end{cases} \quad (11)$$

ou seja, para que o espectro gerado possa ser analisado corretamente a amplitude da frequência resultante do cancelamento não deve ser 10 vezes maior que a das bandas laterais para um processador de 8-bits. Com uma maior capacidade de processamento a diferença aceitável   maior, a exemplo do processador de 10-bits onde é aceitável uma relação de 40 vezes.

4.1 Diferença de Frequência

Os desvios na frequência após efetuado o cancelamento da frequência fundamental foi o que apresentou maior impacto na geração dos espectros de bandas laterais. Através de vários testes a simulação apresentou uma variação máxima de frequência de 0.00818Hz para que um processador de 8-bits seja capaz de fazer a análise dos dados, ou seja, para que a relação entre as bandas laterais e a frequência fundamental sejam de no máximo 10 vezes uma da outra. Para um processador de 10-bits a máxima variação de frequência   de 0.132Hz para que seja possível análise, ou sejam, uma frequência fundamental no máximo 40 vezes maior que a banda lateral. Assim podemos considerar que a máxima variação entre as frequências no cancelamento deve ser,

$$\Delta f_{\max} \begin{cases} 8\text{-bits} & \Delta f_{\max} \approx 0.00818Hz \\ 10\text{-bits} & \Delta f_{\max} \approx 0.132Hz \end{cases} \quad (12)$$

onde $\Delta f_{\max}$ é a diferença entre a frequência fundamental teórica (60Hz) e a frequência fundamental da rede com oscilação.

4.2 Diferença de Fase

A simulação apontou 5.7 graus como o máximo desvio de fase para que um processador de 8-bits ser capaz de analisar o espectro. Para um processador de 10-bits a variação de fase permitida aumentou para 23.05 graus.

$$\Delta \theta_{\max} \begin{cases} 8\text{-bits} & \Delta \theta_{\max} \approx 5.70^\circ \\ 10\text{-bits} & \Delta \theta_{\max} \approx 23.05^\circ \end{cases} \quad (13)$$

onde $\Delta \theta_{\max}$ é a diferença entre a fase do sinal teórico (0 graus) e a fase da rede com oscilação.

4.3 Diferença de Amplitude

A diferença de amplitude apresentada entre o sinal teórico e o sinal com oscilação da rede será, uma vez que não haja variações na frequência nem na fase, igual a diferença apresentada no cancelamento. O  nico fator que influenciaria este resultado seria causado pelo ruído, porém como o objetivo deste estudo é demonstrar o impacto apenas das diferenças entre os sinais com e sem oscilações e pelo impacto do ruído ser pequeno, ele não foi considerado.

4.4 Resultados Gerais

A modelagem da técnica apresentada neste artigo gerou a Fig.3 onde é possível observar que a frequência fundamental foi devidamente cancelada fazendo com que as bandas laterais, referentes as falhas nas barras quebradas, tenham magnitude suficiente para análise. Isto significa que a aplicação de um estimador de frequência Zero-crossing em conjunto com a RDFT e o NCO foram capazes de sintetizar um sinal relativamente próximo a sinal da rede, assim o cancelamento da frequência fundamental obteve resultados satisfatórios. Toda a modelagem foi desenvolvida no Matlab. O sinal da Fig.1 foi digitalmente gerada conforme sinal abaixo,

$$y(t) = \sin(2\pi f_1 t + \frac{\pi}{5}) + 0.0316 \sin(2\pi f_2 t + \frac{2\pi}{5}) + \dots \\ \dots + 0.01 \sin(2\pi f_3 t + \frac{\pi}{3}) + e(t) \quad (14)$$

onde f_1 é a frequência fundamental (60Hz), f_2 e f_3 são as bandas laterais resultantes das falhas nas barras quebradas e e é uma função randômica a fim de simular o ruído Gaussiano branco (AWGN).

5 Implementação Experimental

O esquema geral da implementação a ser feita pode ser vista na Fig.4. A ideia principal é desenvolver um hardware já embutido no motor. Este hardware irá analisar em tempo real a existência de barras quebradas onde na presença da mesma alertará o operador responsável. Para fins de teste da funcionalidade da melhoria apresentada neste estudo foram escolhidos componentes baseados na tecnologia Arduino para facilitar a implementação. Para gerenciamento do sensor de corrente e do módulo Wi-Fi foi escolhido o módulo Arduino DUE. Este módulo foi escolhido por possuir um processador Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 64-bits, portas de conversão digital/análogo necessárias para este projeto além do baixo custo. Para medição da corrente foi escolhido o sensor Arduino AC/DC ACS712ELECT-30A, com capacidade de medição de até 30 amperes. O qual foi escolhido devido a fácil implementação em conjunto com Arduino DUE e ao custo reduzido. O módulo para transmissão dos dados via Wi-Fi escolhido foi o modelo ESP-8266 bastante comum e de baixo custo. O terminal para interface com o operador consiste de um computador conectado a um roteador Wi-Fi. Futuramente, após verificado funcionalidade do projeto, pretende-se desenvolver um hardware próprio.

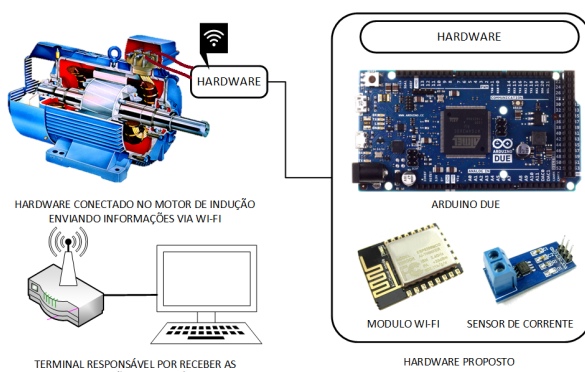


Figura 4: Funcionamento Experimental Proposto

6 Conclusões

Foi apresentado neste artigo uma melhoria na técnica de detecção de barras quebradas através da análise da corrente do estator via cancelamento da frequência fundamental, onde as oscilações da rede foram levadas em consideração. Através a implementação de um estimador de frequência em conjunto da RDFT e de um NCO é possível sintetizar

um sinal relativamente próximo ao da rede e assim efetuar o correto cancelamento da frequência fundamental. Além da grande vantagem de que o modelo pode ser implementado digitalmente com baixo custo computacional dado que o mesmo não necessita de alta capacidade e resolução para processamento das informações, já que a correta supressão da componente fundamental diminui para um patamar aceitável, conforme adotado neste estudo, a diferença entre as magnitudes da componente fundamental e as bandas laterais tornando o resultado deste trabalho satisfatório e um potencial produto.

Referências

- Ayhan, B., Trussell, H. J., Chow, M. Y. and Song, M. H. (2008). On the use of a lower sampling rate for broken rotor bar detection with DTFT and AR-based spectrum methods, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **55**(3): 1421–1434.
- Costa, F. F., de Almeida, L. a. L., Naidu, S. R. and Braga-Filho, E. R. (2004). Improving the signal data acquisition in condition monitoring of electrical machines, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **53**(4): 1015–1019.
- Devices, A. (2009). Fundamentals of direct digital synthesis (dds), *Analog Devices MT-085 Tutorial*, see <http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-085.pdf>.
- Eren, L., Aşkar, M. and Devaney, M. J. (2016). Motor current signature analysis via four-channel fir filter banks, *Measurement* **89**: 322–327.
- Marchesan, G. (2013). *Estimadores de frequência aplicados a sistemas elétricos de potência*, PhD thesis, Universidade Federal de Santa Maria.
- Palácios, R. H. C., da Silva, I. N., Goedtel, A. and Godoy, W. F. (2016). A novel multi-agent approach to identify faults in line connected three-phase induction motors, *Applied Soft Computing* **45**: 1–10.
- Thomson, W. T. and Fenger, M. (2001). Current signature analysis to detect induction motor faults, *IEEE Industry Applications Magazine* **7**(4): 26–34.
- Ying, X. (2009). Characteristic Performance Analysis of Squirrel Cage Induction Motor With Broken Bars, *IEEE Transactions on Magnetics* **45**(2): 759–766.