

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

THAINA DUNAISKI DE SOUZA

VITOR FLECK DE ALMEIDA

**PROCESSAMENTO DE SINAIS APLICADOS AO
MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE DE MOTORES DE
INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

CURITIBA

2025

**THAINA DUNAISKI DE SOUZA
VITOR FLECK DE ALMEIDA**

**PROCESSAMENTO DE SINAIS APLICADOS AO
MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE DE MOTORES DE
INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

**SIGNAL PROCESSING APPLIED TO THE INTEGRITY
MONITORING OF THREE-PHASE INDUCTION MOTORS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado (a) como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador(a): Dr. Narco Afonso Ravazzoli Maciejewski

Coorientador(a): Dr. Thiago de Paula Machado Bazzo

CURITIBA

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**THAINA DUNAISKI DE SOUZA
VITOR FLECK DE ALMEIDA**

**PROCESSAMENTO DE SINAIS APLICADOS AO
MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE DE MOTORES DE
INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação apresentado (a) como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Controle e Automação
do Curso de Engenharia de Controle e
Automação da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná.

Data de aprovação: 01 / Dezembro / 2025

Narco Afonso Ravazzoli Maciejewski
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Thiago de Paula Machado Bazzo
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Bruno Akihiro Tanno Iamamura
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Uilian José Dreyer
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA
2025**

RESUMO

Este trabalho investiga o uso de técnicas clássicas de processamento de sinais para o monitoramento da integridade de motores de indução trifásicos, com ênfase na detecção de defeitos em barras do rotor. A análise foi conduzida a partir de sinais teóricos, obtidos por modelagem matemática, e sinais reais coletados experimentalmente, possibilitando comparar o comportamento idealizado do modelo com medições sujeitas a ruído, variações de carga e alargamento espectral decorrente de oscilações mecânicas e efeitos de janela. Foram aplicadas a Transformada de Fourier (FT), a Transformada de Hilbert (TH), a Transformada de Hilbert–Huang (HHT), a Transformada Wavelet (TW), a análise de envelope e o espectrograma, além de ferramentas auxiliares como a Transformada Rápida de Fourier (FFT) e a Decomposição Empírica de Modos (EMD). Cada técnica foi avaliada considerando sua capacidade de evidenciar a modulação associada ao escorregamento (s) e as bandas laterais características do defeito em barras do rotor, cuja frequência modulante teórica é dada por $f_m = 2sf_0$. Essas bandas laterais representam a assinatura típica de barras quebradas, simuladas neste estudo por perfurações no rotor. A análise quantitativa empregou métricas consolidadas, incluindo a razão banda lateral/fundamental (STC), a proeminência espectral, o erro quadrático médio (EQM), o coeficiente de determinação (R^2) e o tempo de processamento, permitindo comparar o desempenho das técnicas nos sinais teóricos e reais. Os resultados indicaram que todas as abordagens identificam o defeito, porém com desempenhos complementares: FT, TH e análise de envelope apresentam baixo custo computacional e boa aderência ao modelo teórico, enquanto HHT, TW e espectrograma fornecem maior detalhamento tempo-frequência, ao custo de maior sensibilidade ao ruído e maior esforço computacional. Os achados reforçam a aplicabilidade do processamento de sinais no diagnóstico de barras defeituosas em motores de indução, evidenciando que a escolha da técnica depende do equilíbrio entre precisão, robustez e viabilidade computacional.

Palavras-chave: Processamento de Sinais. Motores de Indução Trifásicos. Defeitos em Barras do Rotor. Diagnóstico de Máquinas Elétricas.

ABSTRACT

This work investigates classical signal processing techniques applied to condition monitoring of three-phase induction motors, with emphasis on rotor bar fault detection. The analysis was conducted using theoretical signals obtained through mathematical modeling and real experimental signals, enabling a comparison between the idealized model behavior and measurements affected by noise, load variations, and spectral broadening caused by mechanical oscillations and windowing effects. The techniques applied include the Fourier Transform (FT), the Hilbert Transform (TH), the Hilbert–Huang Transform (HHT), the Wavelet Transform (WT), envelope analysis, and spectrogram analysis, as well as auxiliary tools such as the Fast Fourier Transform (FFT) and Empirical Mode Decomposition (EMD). Each technique was evaluated according to its ability to highlight the modulation associated with the slip (s) and the characteristic sidebands of rotor bars defects, whose theoretical modulating frequency is given by $f_m = 2sf_0$. These sidebands constitute the typical signature of broken bars, simulated in this study by perforations applied to the rotor. The quantitative analysis employed consolidated metrics, including the sideband-to-fundamental ratio (STC), spectral prominence, mean squared error (MSE), coefficient of determination (R^2), and processing time, enabling a comparative assessment of the techniques applied to both theoretical and real signals. The results indicate that all approaches detect the defect, albeit with complementary performance characteristics: FT, TH, and envelope analysis exhibit low computational cost and strong adherence to the theoretical model, while HHT, WT, and spectrogram analysis provide richer time–frequency detail at the expense of higher sensitivity to noise and greater computational effort. The findings reinforce the applicability of signal processing to the diagnosis of rotor bar defects in induction motors, demonstrating that the choice of technique depends on the balance between accuracy, robustness, and computational feasibility.

Keywords: Signal Processing. Three-Phase Induction Motors. Rotor Bar Faults. Electrical Machine Diagnosis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 – Classificação de defeitos em Motor de Indução Trifásicos (MITs)	23
Quadro 2 – Principais defeitos elétricos nos componentes de um motor de indução trifásico	23
Quadro 3 – Comparação entre técnicas de análise de sinais	37
Quadro 4 – Métricas utilizadas na avaliação quantitativa das técnicas aplicadas.....	45
Quadro 5 – Avaliação das técnicas aplicadas ao sinal real com defeito	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vista em corte de um Motor de Indução Tipo Gaiola (MIRGE), evidenciando seus principais componentes internos	17
Figura 2 – Estator bobinado, mostrando as ranhuras para os enrolamentos	17
Figura 3 – Rotor tipo gaiola de esquilo, evidenciando as barras e os anéis de curto-circuito.....	18
Figura 4 – Visão geral do conjunto motor elétrico, incluindo estator, rotor, carcaça de proteção e ventoinha	18
Figura 5 – Curva típica de torque em função da velocidade	20
Figura 6 – Circuito equivalente de um MIT	21
Figura 7 – Rotor com barra perfurada, simulando a quebra	24
Figura 8 – Sinal original no intervalo analisado pela Transformada de Fourier (FT)	26
Figura 9 – Sinal replicado periodicamente pela FT.....	26
Figura 10 – Motor saudável	28
Figura 11 – Motor com 2% de espiras em curto-circuito	28
Figura 12 – Motor com 32% de espiras em curto-circuito	29
Figura 13 – Projeção da Transformada de Hilbert (TH) (1), sinal real (2), sinal analítico (3) e fasor no plano complexo (4)	30
Figura 14 – Exemplo de sinal senoidal e sinal wavelet mãe utilizados na Transformada Wavelet (TW)	33
Figura 15 – Corrente do estator e envelope: (a) condição saudável; (b) condição com defeito	35
Figura 16 – Comparação entre condição saudável (esquerda) e condição com defeito (direita): (a), (b) correntes de alimentação e binário eletromagnético; (c), (d) espectrogramas da corrente da fase R.....	36
Figura 17 – A) Banda lateral esquerda para escorregamento de 0,66%; B) Banda lateral esquerda para escorregamento de 1,33%, ambas obtidas com FT	38
Figura 18 – A) Banda lateral esquerda com escorregamento de 0,66%, obtida com FT + TH; B) Banda lateral esquerda com escorregamento de 1,33% com a mesma combinação	39
Figura 19 – a) sinal teórico ideal b) Sinal Teórico com Defeito	46
Figura 20 – Sinal real obtido em condição normal de operação (sem defeito)	47
Figura 21 – Transformada Rápida de Fourier (FFT) aplicada ao sinal teórico ideal.....	49
Figura 22 – FFT aplicada ao sinal teórico com duas barras quebradas	50
Figura 23 – Magnitude em dB do espectro do sinal teórico ideal.....	50
Figura 24 – Magnitude em dB do espectro do sinal teórico com defeito	51
Figura 25 – TH aplicada ao sinal teórico ideal: (a) Envoltória do sinal sem componente DC; (b) Espectro ampliado entre 0 e 20 Hz	52
Figura 26 – TH aplicada ao sinal teórico com duas barras quebradas: (a) Envoltória do sinal sem componente DC; (b) Espectro ampliado entre 0 e 20 Hz, mostrando o pulso da frequência de modulação.....	53
Figura 27 – Espectro de Hilbert do sinal teórico ideal, apresentando linha estável em 60 Hz, alta amplitude e ausência de modulação	54

Figura 28 – Espectro de Hilbert do sinal teórico com defeito, mostrando oscilações periódicas de frequência, variação de amplitude e presença de bandas laterais associadas ao defeito de barras quebradas.....	54
Figura 29 – TW aplicada diretamente ao sinal teórico ideal	55
Figura 30 – TW aplicada diretamente ao sinal teórico com defeito	56
Figura 31 – TW aplicada ao envelope do sinal teórico ideal.....	57
Figura 32 – TW aplicada ao envelope do sinal teórico com defeito	58
Figura 33 – Análise do envelope do sinal teórico ideal: (superior) forma de onda senoidal e envelope praticamente constante; (inferior) espectro do envelope com baixa amplitude e ausência de picos característicos de defeito.....	59
Figura 34 – Análise do envelope do sinal teórico com defeito: (superior) forma de onda modulada e envelope com picos periódicos; (inferior) espectro do envelope com picos harmônicos equidistantes e frequência característica de defeito em aproximadamente 5,6 Hz	60
Figura 35 – Espectrograma do sinal teórico ideal.....	61
Figura 36 – Espectrograma do sinal teórico com duas barras quebradas....	61
Figura 37 – FFT do sinal real em condição normal de operação	62
Figura 38 – Espectro em magnitude (dB) do sinal real saudável	63
Figura 39 – Ampliação do espectro de 0 a 200 Hz do sinal real saudável ..	63
Figura 40 – FFT do sinal real com defeito de barras no rotor	64
Figura 41 – Espectro em magnitude (dB) do sinal real com defeito	64
Figura 42 – Ampliação do espectro de 0 a 200 Hz do sinal real com defeito	65
Figura 43 – TH aplicada ao sinal real sem defeito: (a) Envoltória do sinal real saudável; (b) Ampliação do espectro entre 0 e 20 Hz	66
Figura 44 – TH aplicada ao sinal real com defeito de barras quebradas: (a) Envoltória do sinal; (b) Ampliação do espectro entre 0 e 20 Hz	66
Figura 45 – Transformada de Hilbert-Huang (HHT) aplicada ao sinal real saudável.....	67
Figura 46 – HHT aplicada ao sinal real com defeito de barras quebradas .	68
Figura 47 – TW aplicada diretamente ao sinal real saudável	69
Figura 48 – TW aplicada diretamente ao sinal real com defeito	70
Figura 49 – TW aplicada ao envelope do sinal real saudável.....	71
Figura 50 – TW aplicada ao envelope do sinal real com defeito	72
Figura 51 – Envelope do sinal real saudável.....	73
Figura 52 – Envelope do sinal real com defeito de barras quebradas	74
Figura 53 – Espectrograma do sinal real saudável.....	75
Figura 54 – Espectrograma do sinal real com defeito de barras quebradas	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites globais de tensão	27
Tabela 2 – Parâmetros dos sinais teóricos e reais analisados	41
Tabela 3 – Frequências esperadas das bandas laterais e da frequência de modulação para o sinal analisado	48
Tabela 4 – Resultados quantitativos para cada técnica aplicada ao sinal real com defeito	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AE	Análise de Envelope
CCTs	Curtos-Circuitos Temporários
CCMV	Cross-Correlation Maximum Value
DHT	Distorção Harmônica Total
DWT	Transformada Wavelet Discreta
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EMD	Decomposição em Modos Empíricos
EQM	Erro Quadrático Médio
ESP	Espectrograma
FFT	Transformada Rápida de Fourier
f.e.m.	Força eletromotriz
FT	Transformada de Fourier
HHT	Transformada de Hilbert-Huang
IMF	Função de Modo Intrínseco
LAIPS	Laboratório de Automação Inteligente de Processos e Sistema
LACIME	Laboratório de Controle Inteligente de Máquinas Elétricas
MCSA	Motor Current Signature Analysis
MIRGE	Motor de Indução Tipo Gaiola
MIT	Motor de Indução Trifásico
PCA	Análise de Componentes Principais
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
STC	Razão Banda Lateral/Fundamental
STFT	Transformada de Fourier de Curto Tempo
TDC	Taxa de Detecção Correta
TFP	Taxa de Falsos Positivos
TH	Transformada de Hilbert
TW	Transformada Wavelet
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

$a(t)$	Amplitude instantânea do sinal	
A_{fund}	Amplitude da componente fundamental da corrente	
A_{pico}	Amplitude máxima observada no espectro ou no sinal	
A_{sb}	Amplitude da banda lateral característica do defeito	
A_n	Amplitude da n-ésima harmônica	
$baseline$	Nível médio de referência do ruído no espectro	
$B_A(t)$	Componente do campo magnético gerado pela fase A	
$B_B(t)$	Componente do campo magnético gerado pela fase B	
$B_C(t)$	Componente do campo magnético gerado pela fase C	
B_m	Amplitude máxima do campo magnético	
\vec{B}	Densidade de fluxo magnético	[T]
$c_1(t)$	Primeira Função de Modo Intrínseco (IMF)	
DP	Desvio padrão	
Δf	Deslocamento de frequência devido aos defeitos	[Hz]
\mathcal{E}	Força eletromotriz induzida	[V]
f	Frequência da rede elétrica	[Hz]
f_n	Frequência da n-ésima harmônica	[Hz]
f_r	Frequência da corrente no rotor	[Hz]
f_s	Frequência de amostragem	[Hz]
f_{mod}	Frequência de modulação associada aos defeito	[Hz]
f_{sb}	Frequência das bandas laterais causadas por defeitos	[Hz]
$H(x)$	Transformada de Hilbert de $x(t)$	
$h_1(t)$	Componente do peneiramento	
$i(t)$	Corrente instantânea	[A]
$i_A(t)$	Corrente instantânea da fase A	[A]
$i_B(t)$	Corrente instantânea da fase B	[A]
$i_C(t)$	Corrente instantânea da fase C	[A]
I_n	Amplitude da n-ésima harmônica da corrente	[A]
$m_1(t)$	Média dos envelopes superior e inferior	
n	Velocidade do rotor / ordem da harmônica	[RPM]
n_s	Velocidade síncrona	[RPM]
N	Número de amostras	
$\nabla \times \vec{E}$	Rotacional do campo elétrico	[V/m ²]
p	Número de polos	
π	Constante matemática ($\approx 3,1416$)	
Φ	Fluxo magnético	[Wb]

R^2	Coeficiente de determinação	
R_2	Resistência do rotor	$[\Omega]$
$r_1(t)$	Resíduo do peneiramento	
s	Escorregamento	
$S_{real}(f)$	Espectro do sinal real	
$S_{teo}(f)$	Espectro do sinal teórico	
$S_{t,f}$	Espectrograma do sinal	
t	Tempo contínuo	$[s]$
t_{proc}	Tempo médio de processamento	$[s]$
T_e	Torque eletromagnético	$[Nm]$
τ	Constante de tempo / atraso temporal	$[s]$
$X(\omega)$	Transformada de Fourier de $x(t)$	
X_2	Reatância do rotor	$[\Omega]$
$x(t)$	Sinal no domínio do tempo	
$z(t)$	Sinal analítico	
$ z(t) $	Módulo do sinal analítico	
θ	Fase instantânea	
$\psi(t)$	Função wavelet mãe	
ω	Velocidade angular	$[rad/s]$
$\omega(t)$	Frequência instantânea	$[rad/s]$
$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	Derivada temporal da densidade de fluxo magnético	$[T/s]$
Γ	Letra grega gama	
λ	Comprimento de onda	
\in	Pertence	

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	14
1.1.1	Objetivo Geral	14
1.1.2	Objetivos Específicos.....	15
1.2	Justificativa	15
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	Motor de Indução Tipo Gaiola	16
2.1.1	Características Construtivas do Motor de Indução Tipo Gaiola	16
2.2	Fenômenos Associados e Desempenho do Motor	19
2.2.1	Escorregamento	19
2.2.2	Perdas e Eficiência	19
2.2.3	Curvas de Torque-Velocidade.....	20
2.2.4	Circuito Equivalente e Influência dos Defeitos na Corrente do Estator ...	21
2.2.5	Justificativa para o Monitoramento pela Corrente do Estator	22
2.3	Defeitos em Motores de Indução	22
2.3.1	Defeitos Elétricos e Mecânicos.....	23
2.3.2	Diagnóstico e Monitoramento Baseados em Processamento de Sinais.....	24
2.4	Técnicas de Processamento de Sinais para Detectar Defeitos ...	25
2.4.1	Transformada de Fourier	25
2.4.2	Transformada de Hilbert	29
2.4.3	Transformada de Hilbert-Huang.....	31
2.4.4	Transformada Wavelet	32
2.4.5	Análise de Envelopes.....	33
2.4.6	Espectrograma	35
2.4.7	Comparação entre Técnicas de Processamento de Sinais para Detecção de defeitos	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1	Sinais Utilizados.....	40
3.1.1	Sinal Teórico	40
3.1.2	Sinal Real.....	41
3.2	Implementação das Técnicas de Processamento de Sinais	42
3.2.1	Transformada de Fourier	42
3.2.2	Transformada de Hilbert	42
3.2.3	Transformada de Hilbert-Huang.....	42
3.2.4	Transformada Wavelet	43
3.2.5	Análise de Envelopes.....	43
3.2.6	Espectrograma	43
3.3	Avaliação de Desempenho	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1	Resultados do Sinal Teórico	49
4.1.1	Resultado da Transformada de Fourier no Sinal Teórico.....	49
4.1.2	Resultado da Transformada de Hilbert no Sinal Teórico.....	51
4.1.3	Resultado da Transformada de Hilbert-Huang no Sinal Teórico	53
4.1.4	Resultados da Transformada de Wavelet no Sinal Teórico.....	55
4.1.5	Resultado da Análise do Envelope no Sinal Teórico	59
4.1.6	Resultado do Espectrograma no Sinal Teórico	60

4.2	Resultados do Sinal Real	62
4.2.1	Resultado da Transformada de Fourier no Sinal Real	62
4.2.2	Resultado da Transformada de Hilbert no Sinal Real	65
4.2.3	Resultado da Transformada de Hilbert-Huang no Sinal Real	67
4.2.4	Resultados da Transformada de Wavelet no Sinal Real	68
4.2.5	Resultado da Análise do Envelope no Sinal Real	72
4.2.6	Resultado do Espectrograma no Sinal Real.....	74
4.3	Comparação entre os Resultados Teóricos e Reais com defeito .	76
4.4	Análise Quantitativa dos Resultados.....	77
4.5	Análise Qualitativa dos Resultados	78
4.6	Síntese e Implicações Práticas	80
5	CONCLUSÃO	82
	REFERÊNCIAS.....	84

1 INTRODUÇÃO

Os MITs desempenham um papel crucial em praticamente todas as indústrias, sendo as máquinas mais utilizadas para a conversão de energia elétrica em energia mecânica (Suetake, 2012). Sua eficiência, robustez e simplicidade de operação garantem sua ampla adoção no ambiente industrial. Esses motores são responsáveis por cerca de 70% do consumo de energia elétrica no setor industrial mundial, constituindo elementos essenciais para linhas de produção e processos automatizados (Souza, 2022). Nesse cenário, defeitos podem gerar paradas não programadas, prejuízos financeiros e danos à infraestrutura, tornando o diagnóstico precoce fundamental para a redução de custos e o aumento da confiabilidade operacional.

O desgaste natural, sobrecargas e condições operacionais adversas podem ocasionar diferentes defeitos em MITs. Aproximadamente 50% desses problemas estão associados a rolamentos e ao rotor, com destaque para os defeitos estruturais relacionados a barras quebradas do rotor, que geram vibrações, aquecimento excessivo e assimetria eletromagnética (Suetake, 2012). Defeitos elétricos nos enrolamentos também podem ocorrer, embora em menor proporção, geralmente decorrentes de envelhecimento do isolamento e esforços térmicos (Santos, 2008; da Cruz, 2004). Esses fenômenos alteram diretamente variáveis elétricas importantes, produzindo distorções na corrente do estator e assimetrias no fluxo magnético (Silva, 2019).

O monitoramento de sinais como corrente elétrica, vibração e temperatura constitui uma abordagem eficaz para acompanhar o comportamento dos MITs, permitindo identificar variações que indiquem defeitos ainda em estágio inicial. Essa estratégia possibilita a adoção de práticas de manutenção preventiva e preditiva, reduzindo intervenções corretivas, custos associados e a probabilidade de paradas inesperadas (Bazan *et al.*, 2021).

As técnicas de processamento de sinais têm sido amplamente utilizadas para identificar assinaturas de defeitos em máquinas elétricas, destacando-se pela capacidade de realçar padrões sutis associados a irregularidades estruturais. No caso específico de defeitos em barras do rotor, métodos como FT, TH, HHT, TW, análise de envelope e espectrograma têm apresentado resultados promissores. A aplicação dessas técnicas contribui diretamente para o diagnóstico precoce e para a melhoria da confiabilidade operacional.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho de métodos de processamento de sinais nos domínios do tempo, da frequência e do tempo-frequência aplicados ao monitoramento da integridade de MITs, utilizando sinais teóricos e reais em condições saudáveis e com defeito de barras no rotor.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o funcionamento dos MITs, descrevendo seus principais componentes, fenômenos eletromagnéticos associados e seus defeitos mais recorrentes, com ênfase nos defeitos de barras do rotor.
- Realizar uma revisão da literatura contemplando as principais técnicas de processamento de sinais empregadas no diagnóstico de defeitos em MITs, destacando fundamentos, aplicações e limitações.
- Gerar sinais teóricos representando as condições saudável e com defeito de barras, incorporando harmônicas e parâmetros equivalentes aos sinais experimentais.
- Implementar e aplicar as técnicas de processamento de sinais aos sinais teóricos e reais.
- Comparar os resultados obtidos entre sinais teóricos e reais, identificando a correspondência das bandas laterais, da frequência de modulação e das assinaturas características do defeito.
- Avaliar quantitativamente o desempenho das técnicas por meio de métricas como Razão Banda Lateral/Fundamental (STC), Erro Quadrático Médio (EQM), proeminência espectral, coeficiente de determinação e tempo de processamento.
- Validar as técnicas considerando critérios qualitativos e quantitativos, subsidiando a seleção de métodos eficazes para monitoramento contínuo.

1.2 Justificativa

Com o avanço da Indústria 4.0, técnicas de processamento de sinais como FT, TH e TW, entre outras, têm se destacado como ferramentas promissoras para o diagnóstico de defeitos em MITs. No entanto, é necessário avaliar sistematicamente o desempenho dessas técnicas em diferentes representações do sinal, especialmente em condições reais de operação.

Esta pesquisa se justifica pela necessidade de identificar as técnicas de processamento que oferecem maior sensibilidade à detecção de defeitos de barras, contribuindo para a implementação de soluções práticas na indústria. Ao aplicar essas técnicas a sinais teóricos e reais, o estudo busca aumentar a confiabilidade e a disponibilidade dos motores, prolongar sua vida útil e apoiar estratégias de manutenção preditiva alinhadas às demandas da Indústria 4.0.

A comparação entre diferentes métodos permite otimizar a escolha da técnica mais adequada para identificar assinaturas específicas do defeito de barras, oferecendo suporte à tomada de decisão em sistemas de monitoramento contínuo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Motor de Indução Tipo Gaiola

O MIRGE é amplamente empregado em aplicações industriais pela robustez, simplicidade construtiva e baixo custo. Por não possuir escovas, anéis coletores ou comutadores, apresenta reduzida necessidade de manutenção (Narain, 2013).

Seu funcionamento baseia-se na indução eletromagnética: correntes trifásicas aplicadas ao estator produzem um campo magnético girante que atravessa o entreferro e corta as barras condutoras do rotor. De acordo com a Lei de Faraday, a variação do fluxo magnético relativo entre estator e rotor induz correntes elétricas nas barras, que interagem com o campo magnético e geram o torque eletromagnético (Hughes, 2014; Chapman, 2012).

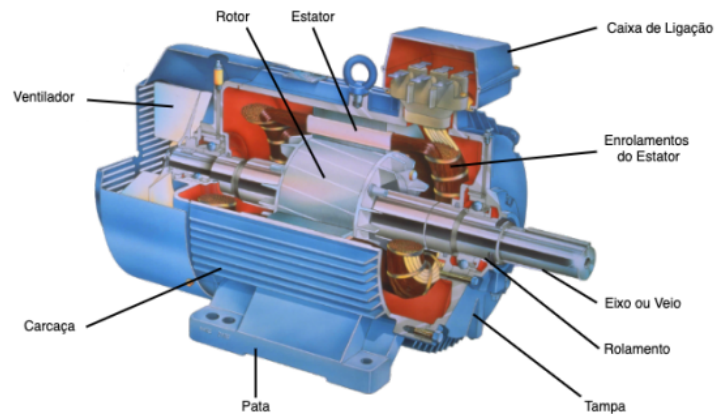
O rotor é constituído por barras de alumínio ou cobre inseridas em ranhuras longitudinais de um núcleo de aço laminado, conectadas por anéis de curto-circuito nas extremidades, estrutura conhecida como gaiola de esquilo (Fusco; Gomes; Souza, 2015). O torque é produzido pela diferença entre a velocidade síncrona do campo magnético e a velocidade do rotor, fenômeno denominado escorregamento.

Esse tipo de motor é amplamente utilizado em acionamentos de cargas rotativas, como sistemas de bombeamento, ventilação, compressores, transporte de materiais e processos contínuos nas indústrias de mineração e metalurgia (Silva; Almeida; Cunha, 2010). Entre suas principais vantagens destacam-se a alta eficiência, o baixo custo de fabricação, a ampla faixa de operação e a grande disponibilidade comercial (Pereira, 2017).

2.1.1 Características Construtivas do Motor de Indução Tipo Gaiola

A estrutura interna dos MIRGEs pode ser compreendida pela análise de seus principais componentes, os quais são responsáveis pelo acoplamento eletromecânico e pelo funcionamento da máquina. A Figura 1 apresenta uma vista em corte que ilustra essa configuração. Os elementos que compõem o motor, incluindo o estator, o rotor tipo gaiola, o circuito magnético e a carcaça com o sistema de ventilação, são apresentados a seguir, cada um com suas funções e características específicas.

Figura 1 – Vista em corte de um MIRGE, evidenciando seus principais componentes internos



Fonte: Antunes (2021).

- Estator: parte fixa do motor composta por um núcleo de aço laminado empilhado, com ranhuras longitudinais que abrigam os enrolamentos trifásicos. Quando alimentados por tensões defasadas de 120° , esses enrolamentos criam o campo magnético girante que viabiliza o funcionamento da máquina. O uso de chapas laminadas reduz perdas por correntes parasitas (Hughes, 2014). A Figura 2 ilustra um estator bobinado.

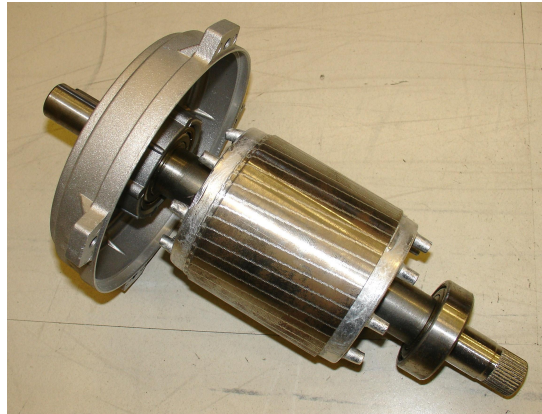
Figura 2 – Estator bobinado, mostrando as ranhuras para os enrolamentos



Fonte: Hughes (2014).

- Rotor tipo gaiola: componente móvel formado por barras condutoras de alumínio ou cobre inseridas em ranhuras no núcleo laminado, conectadas por anéis de curto-circuito em ambas as extremidades, que formam a configuração de gaiola (Chapman, 2012). Essa estrutura permite a circulação das correntes induzidas e a consequente geração de torque. A Figura 3 apresenta um exemplo de rotor tipo gaiola de esquilo.

Figura 3 – Rotor tipo gaiola de esquilo, evidenciando as barras e os anéis de curto-circuito

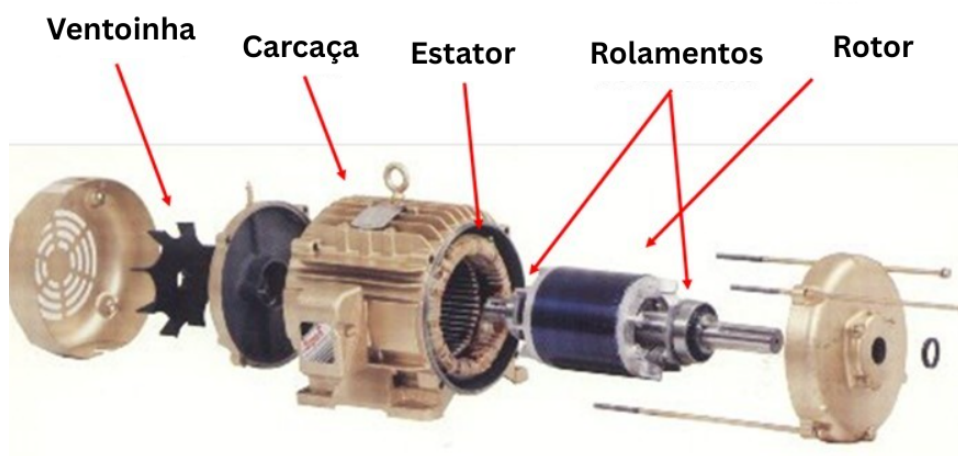


Fonte: Zureks (2007).

- Circuito magnético: formado pelo núcleo do estator, o entreferro e o núcleo do rotor. O fluxo magnético gerado no estator atravessa o entreferro e corta as barras do rotor, permitindo o acoplamento eletromagnético responsável pela conversão de energia elétrica em energia mecânica (Chapman, 2012).
- Carcaça e sistema de ventilação: estrutura responsável pela proteção dos componentes internos e pela dissipação térmica. A ventilação adequada é essencial para evitar o superaquecimento e garantir a durabilidade do motor (Pereira, 2017).

A Figura 4 apresenta uma visão geral de um motor elétrico, destacando o estator, o rotor, a carcaça e a ventoinha, evidenciando a disposição dos componentes no conjunto final.

Figura 4 – Visão geral do conjunto motor elétrico, incluindo estator, rotor, carcaça de proteção e ventoinha



Fonte: Adaptado de Aroeira (2025).

Esses elementos atuam de forma integrada para garantir confiabilidade, eficiência e durabilidade, características que justificam a ampla utilização dos motores de indução tipo gaiola em sistemas industriais modernos.

2.2 Fenômenos Associados e Desempenho do Motor

O desempenho do MIRGE é determinado por diversos fenômenos elétricos e mecânicos que influenciam diretamente sua eficiência, vida útil e adequação a diferentes aplicações industriais. A compreensão desses fenômenos é essencial para otimizar o uso do motor, prever defeitos e orientar estratégias de manutenção.

2.2.1 Escorregamento

O escorregamento é um fenômeno característico dos motores de indução, decorrente da diferença entre a velocidade síncrona do campo magnético do estator e a velocidade real do rotor. Essa diferença é necessária para a indução de corrente no rotor e para a geração de torque. Em condições normais de carga, o escorregamento apresenta valores reduzidos, geralmente entre 1% e 5%, aumentando à medida que a carga cresce, elevando a corrente induzida e o torque produzido (Chapman, 2012).

Valores adequados de escorregamento permitem o desenvolvimento de torque com perdas reduzidas, enquanto valores elevados provocam aquecimento e reduzem a eficiência global do motor (Pereira, 2017). O escorregamento é expresso pela Equação 1, que relaciona a velocidade síncrona do campo magnético (n_s) com a velocidade real do rotor (n).

$$S = \frac{n_s - n}{n_s}. \quad (1)$$

O escorregamento pode ser expresso em valor adimensional ou percentual, conforme a convenção adotada.

2.2.2 Perdas e Eficiência

As perdas em um MIRGE podem ser agrupadas em três categorias principais: perdas no núcleo magnético, perdas resistivas nos condutores e perdas mecânicas. As perdas no núcleo resultam de correntes parasitas e da histerese magnética nas chapas de aço laminado do estator, podendo ser reduzidas com o uso de materiais de menor perda magnética e geometrias otimizadas (Narain, 2013).

As perdas resistivas, também conhecidas como perdas por efeito Joule, ocorrem nos enrolamentos de cobre do estator e nas barras e anéis de curto-circuito do rotor, que podem ser de alumínio ou de cobre, dependendo da construção da máquina. Já as perdas mecânicas estão associadas ao atrito nos mancais e à resistência aerodinâmica do sistema de ventilação (Silva; Almeida; Cunha, 2010).

A eficiência do motor é definida como a razão entre a potência mecânica útil (torque multiplicado pela rotação) e a potência elétrica de entrada. Melhorias nessa eficiência podem ser alcançadas por meio do uso de condutores de maior qualidade, otimizações no projeto magnético e sistemas de ventilação mais eficazes (Fusco; Gomes; Souza, 2015).

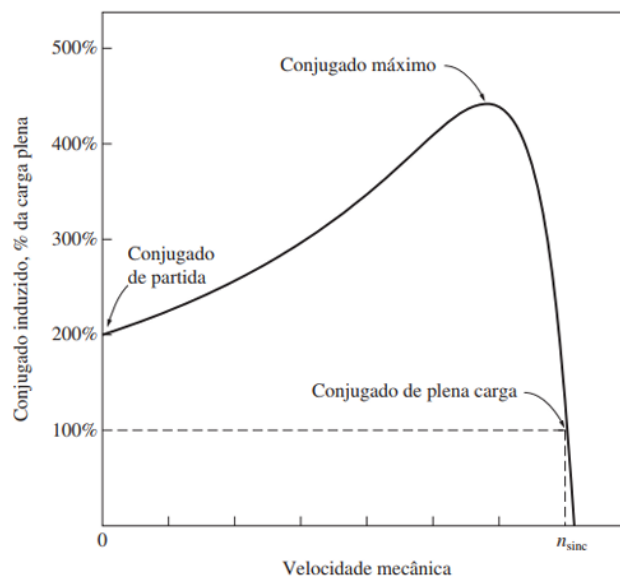
2.2.3 Curvas de Torque–Velocidade

A curva torque–velocidade de um MIRGE descreve a relação entre o torque eletromagnético e a velocidade do rotor sob diferentes condições de carga. Em baixos valores de escorregamento, o torque é aproximadamente proporcional ao escorregamento, pois a corrente induzida no rotor aumenta linearmente com a diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade mecânica. À medida que o rotor se aproxima da velocidade síncrona, a tensão induzida no rotor e a corrente correspondente diminuem, o que reduz o torque disponível. Com o aumento da carga, o escorregamento cresce e o torque se eleva até atingir o torque máximo, conhecido como torque de ruptura (Villas-Boas, 2014).

Essa curva é fundamental para avaliar a adequação do motor a aplicações que exigem alto torque de partida, como bombas, ventiladores e compressores. Motores de indução tipo gaiola operam com elevada eficiência em ampla faixa de carga, sendo o ponto de melhor desempenho aquele em que o torque fornecido atende à carga com perdas reduzidas (Hughes, 2014).

A Figura 5 apresenta a curva típica de torque em função da velocidade, indicando os principais pontos característicos, como torque de partida, torque de ruptura e regime nominal.

Figura 5 – Curva típica de torque em função da velocidade



Fonte: Adaptado de Alnasir e Almarhoon (2012).

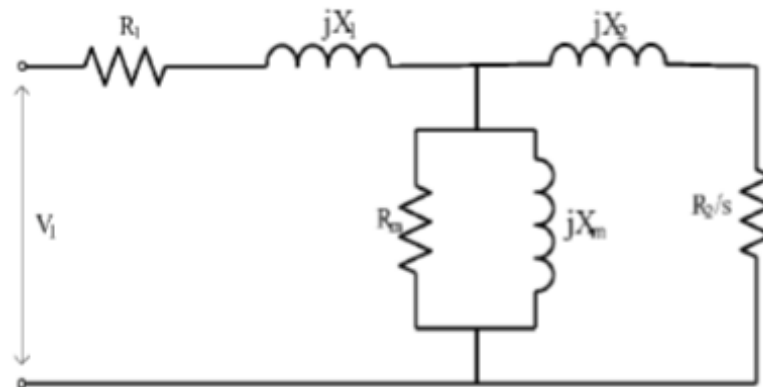
2.2.4 Circuito Equivalente e Influência dos Defeitos na Corrente do Estator

O circuito equivalente de um MIT é uma representação analítica que descreve o comportamento eletromagnético do motor e permite relacionar defeitos físicos a variações observáveis na corrente do estator. Nessa modelagem, os efeitos elétricos e magnéticos são concentrados em elementos resistivos e reativos, facilitando a análise quantitativa do desempenho da máquina.

Conforme mostrado na Figura 6, o modelo inclui:

- R_1 e jX_1 : resistência e reatância de dispersão do estator;
- R_m e jX_m : ramo de magnetização, representando as perdas no ferro e o fluxo magnetizante;
- R'_2/s e jX'_2 : parâmetros do rotor referenciados ao estator, dependentes do escorregamento s .

Figura 6 – Circuito equivalente de um MIT



Fonte: Adaptado de Santos (2016).

A resistência R_1 representa as perdas resistivas nos enrolamentos do estator, enquanto X_1 corresponde ao fluxo de dispersão não acoplado ao rotor. O ramo de magnetização (R_m e X_m) modela as perdas no ferro e o acoplamento magnético. O rotor referenciado ao estator é descrito por R'_2/s e X'_2 , sendo o escorregamento s a variável que expressa a diferença entre a velocidade do campo girante e a velocidade mecânica do rotor (Fitzgerald; Kingsley; Umans, 2006; Chapman, 2012).

Defeitos no estator, como curtos entre espiras, alteram R_1 e X_1 , reduzindo o número efetivo de espiras e modificando a impedância da fase. Isso ocasiona desequilíbrio nas correntes trifásicas, aquecimento localizado e surgimento de componentes harmônicas características (Fitzgerald; Kingsley; Umans, 2006).

Defeitos no rotor, como barras quebradas ou trincas nos anéis de curto-circuito, aumentam a resistência equivalente R'_2 e afetam o escorregamento s . Essa assimetria compromete a simetria do campo magnético girante, produzindo modulações periódicas

na corrente do estator. Essas modulações manifestam-se como bandas laterais no espectro de frequência, deslocadas de $f(1 \pm 2s)$ em torno da componente fundamental, característica diretamente associada à presença de barras rompidas ou defeitos no rotor. Esse comportamento é documentado na literatura clássica de máquinas elétricas como em Fitzgerald, Kingsley e Umans (2003), Thomson e Fenger (2001).

Além disso, assimetrias no estator e distorções do campo magnético resultam na intensificação de harmônicos predominantemente ímpares, fenômeno descrito em estudos técnicos e normas aplicáveis ao desempenho de máquinas rotativas (Hughes, 2013).

Tais assinaturas são amplamente exploradas em técnicas de diagnóstico baseadas em corrente, permitindo correlacionar defeitos físicos a padrões espectrais específicos.

2.2.5 Justificativa para o Monitoramento pela Corrente do Estator

O monitoramento da corrente do estator é amplamente adotado devido à sua natureza não intrusiva, ao baixo custo e à facilidade de implementação. Toda a interação eletromagnética entre estator e rotor, incluindo variações de torque, defeitos nos enrolamentos e assimetrias no rotor, reflete-se diretamente na corrente elétrica absorvida.

Assim, o estator atua como um “sensor elétrico natural” que fornece informações sobre a integridade do sistema sem necessidade de instrumentação adicional. Diferentemente de sensores mecânicos ou térmicos, a medição de corrente pode ser realizada com dispositivos simples e facilmente integráveis a sistemas de automação industrial.

Com o apoio de técnicas modernas de processamento de sinais, como a Transformada Wavelet Discreta (DWT), a TH e a Análise de Componentes Principais (PCA), é possível identificar assinaturas sutis de defeitos incipientes mesmo em ambientes ruidosos e sob variações de carga. Estudos demonstram que o monitoramento por corrente é uma abordagem consolidada e eficaz para diagnóstico automatizado e manutenção preditiva em motores de indução (Filho; Mariano; dos Santos, 2018; Suetake, 2012).

2.3 Defeitos em Motores de Indução

Neste trabalho, adota-se o termo *defeito* como referência principal, conforme apresentado no Quadro 1. Embora o termo *falha* também seja utilizado na literatura, considera-se aqui que defeito designa qualquer anomalia ou imperfeição que comprometa o desempenho, a eficiência ou a durabilidade do motor de indução. Quando não tratados, esses defeitos podem evoluir para falhas críticas e resultar na perda total de funcionalidade do equipamento.

Os motores de indução estão sujeitos a diferentes tipos de defeitos, classificados como elétricos, mecânicos ou mistos. Tais anomalias afetam grandezas fundamentais como corrente, torque, temperatura e fluxo magnético, sendo detectáveis por meio da análise dos sinais elétricos do motor.

Os defeitos do rotor variam de acordo com o tipo de máquina: motores tipo gaiola apresentam barras fundidas, enquanto motores de anéis possuem enrolamentos trifásicos.

Quadro 1 – Classificação de defeitos em MITs

Aspecto	Defeito
Estado	Anomalia ou imperfeição que compromete o desempenho ou a durabilidade do motor
Impacto	Reduz a eficiência, provoca aquecimento e vibrações, podendo evoluir para falha total
Detectabilidade	Pode ser identificado por técnicas de monitoramento antes de causar danos críticos
Exemplo	Barra quebrada no rotor, curto entre espiras, excentricidade

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

2.3.1 Defeitos Elétricos e Mecânicos

Os defeitos elétricos afetam principalmente os enrolamentos do estator e do rotor. O envelhecimento do isolamento, esforços dielétricos e fatores ambientais reduzem a rigidez dielétrica, favorecendo curtos entre espiras, bobinas ou fases. Essas condições provocam desequilíbrios de corrente, aquecimento localizado e redução da eficiência global da máquina (Silva, 2019; Santos, 2008).

Outros defeitos elétricos incluem descargas parciais e correntes circulantes na carcaça, sintomas de degradação progressiva do isolamento ou de assimetrias eletromagnéticas. Tais anomalias se manifestam como distorções na forma de onda de corrente e tensão. O Quadro 2 sintetiza os principais defeitos observados no estator e no rotor.

Quadro 2 – Principais defeitos elétricos nos componentes de um motor de indução trifásico

ESTATOR	ROTOR	
	GAIOLA	ANÉIS
Curto-circuito entre espiras, bobinas ou fases Circuito aberto Bobinas aterradas Descargas parciais Correntes circulantes na carcaça	Fissuras ou trincas nas barras Ruptura dos anéis terminais ou barras de ligação	Curto-circuito entre espiras Circuito aberto Mau contato entre escovas e anéis

Fonte: Adaptado de Misari (1997).

Entre os defeitos mecânicos, destacam-se o desgaste de rolamentos, a excentricidade e desalinhamentos, que geram vibrações excessivas e reduzem a vida útil da máquina. Esse problema provoca desequilíbrio no campo magnético, sobrecarga nas barras adjacentes e aquecimento localizado, podendo evoluir para danos mais severos. A Figura 7 ilustra um rotor com barra perfurada, utilizado para simular esse tipo de defeito em estudos experimentais.

Figura 7 – Rotor com barra perfurada, simulando a quebra



Fonte: Adaptado de S. Moreira *et al.* (2020).

A quebra de barras gera assinaturas características na corrente do estator, observadas como bandas laterais em torno da frequência fundamental ($f \pm 2sf$), onde s é o escorregamento e f a frequência da rede. Essas assinaturas podem ser detectadas por técnicas de processamento de sinais, permitindo o diagnóstico precoce e a adoção de estratégias de manutenção preditiva.

2.3.2 Diagnóstico e Monitoramento Baseados em Processamento de Sinais

Os defeitos elétricos e mecânicos descritos anteriormente manifestam-se como alterações nos sinais elétricos e magnéticos do motor, resultando em distorções harmônicas, modulações de amplitude e componentes laterais no espectro de frequência. Tais variações podem ser monitoradas de forma não intrusiva por meio das medições de corrente e tensão do estator, que refletem diretamente o comportamento interno da máquina (Filho; Mariano; dos Santos, 2018; Silva, 2019).

O processamento de sinais é essencial para a identificação e correlação dessas assinaturas com os fenômenos físicos associados aos defeitos. Técnicas como a FT, TH, TW, análise de envelope, HHT e PCA permitem reconhecer padrões anômalos mesmo em estágios iniciais e sob a presença de ruído, constituindo uma base robusta para diagnóstico (Suetake, 2012; Leão, 2022; Zaparoli *et al.*, 2021).

A detecção de assinaturas específicas, como as bandas laterais associadas à quebra de barras, viabiliza estratégias eficazes de manutenção preditiva, aumenta a confiabilidade operacional e prolonga a vida útil dos motores de indução.

2.4 Técnicas de Processamento de Sinais para Detectar Defeitos

O estudo de técnicas de processamento de sinais aplicadas a motores de indução tem avançado com o objetivo de identificar anomalias de forma precisa e possibilitar manutenções preditivas. Essas técnicas permitem analisar sinais elétricos e mecânicos em diferentes domínios (tempo, frequência e tempo–frequência) destacando padrões relacionados aos defeitos, como a quebra de barras do rotor (Bando, 2024).

As principais ferramentas empregadas incluem a Transformada de Fourier (FT), utilizada para análise espectral contínua, e a transformada discreta de Fourier. O cálculo é realizado de forma eficiente por meio do algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (FFT); ambas permitem identificar componentes espectrais e bandas laterais. Também se emprega a Transformada de Hilbert (TH), adequada para extração de envoltória e análise de fase local; a Transformada Wavelet (TW), indicada para análise tempo–frequência localizada; a análise de envoltória, particularmente eficiente na detecção de sinais modulados; a Transformada de Hilbert-Huang (HHT), voltada à decomposição adaptativa de sinais não estacionários; e a Análise de Componentes Principais (PCA), usada para redução de dimensionalidade e realce de padrões (Suetake, 2012; Leão, 2022; Zaparoli *et al.*, 2021).

Cada técnica apresenta vantagens e limitações, sendo sua escolha dependente do tipo de defeito e das condições de operação. A literatura aponta que combinações de métodos tendem a aumentar a confiabilidade do diagnóstico, principalmente em ambientes reais de aplicação onde os ruídos de fundo podem mascarar as assinaturas de defeitos. Detalhes práticos de implementação e parâmetros serão apresentados na seção de Materiais e Métodos.

2.4.1 Transformada de Fourier

A Transformada de Fourier (FT) é uma técnica matemática que converte sinais do domínio do tempo para o domínio da frequência, sendo definida pela Equação (2). Na prática, a transformada é aplicada apenas a intervalos finitos de observação, de modo que o comportamento do sinal fora desse intervalo não pode ser determinado (Suetake, 2012). Essa limitação dá origem ao fenômeno de periodicidade implícita.

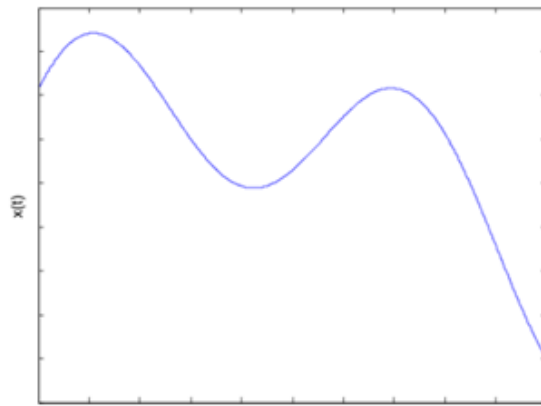
A transformada de Fourier de um sinal contínuo é definida por

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt, \quad (2)$$

onde $x(t)$ representa o sinal no domínio do tempo, t é a variável temporal, ω corresponde à frequência angular em rad/s, $X(\omega)$ é o espectro de frequência resultante e j denota a unidade imaginária. As componentes de maior magnitude em $X(\omega)$ indicam as frequências predominantes no intervalo analisado.

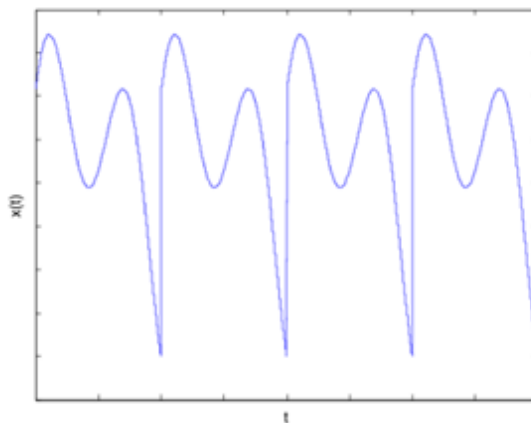
A FT assume que o sinal analisado se repete indefinidamente no tempo, uma consequência direta do uso de uma janela finita do sinal real. Essa suposição cria descontinuidades nas extremidades do intervalo observado, o que introduz componentes artificiais de alta frequência, fenômeno conhecido como *leakage* espectral. A Figura 8 mostra o segmento original do sinal utilizado como entrada na transformada, limitado ao intervalo de análise. Já a Figura 9 ilustra como esse mesmo segmento é replicado periodicamente pela FT, evidenciando a presença de descontinuidades quando as bordas do intervalo não se conectam de forma suave. Essas descontinuidades são justamente as responsáveis pelo surgimento das componentes espúrias no espectro.

Figura 8 – Sinal original no intervalo analisado pela FT



Fonte: Adaptado de Suetake (2012).

Figura 9 – Sinal replicado periodicamente pela FT



Fonte: Adaptado de Suetake (2012).

Apesar de fornecer resolução em frequência dependente da taxa de amostragem e do tamanho da janela temporal, a FT não indica o instante em que cada componente ocorre, pois utiliza funções senoidais de duração infinita. Essa limitação compromete a análise de transientes ou eventos localizados no tempo. Além disso, a implementação direta da transformada possui alto custo computacional, o que motivou o desenvolvimento da FFT, permitindo sua aplicação eficiente em grandes volumes de dados ou em monitoramento em tempo real.

A análise espectral por meio da FFT desempenha papel central no diagnóstico de defeitos em MITs. Barras rompidas no rotor produzem modulações na corrente do estator, resultando em bandas laterais ao redor da frequência fundamental, descritas por $f(1 \pm 2s)$, em que s representa o escorregamento e f a frequência da rede. Essas bandas laterais também surgem nos harmônicos ímpares da fundamental, uma vez que a assimetria causada pelo defeito afeta todo o espectro associado ao campo magnético. Irregularidades nos enrolamentos do estator, por sua vez, introduzem harmônicas específicas que igualmente podem ser identificadas no domínio da frequência. Por utilizar apenas a corrente do estator, o procedimento permite monitoramento sem necessidade de intervenção mecânica no motor (S. Moreira *et al.*, 2020).

A designação “Rápida” da FFT decorre da redução significativa do custo computacional. Enquanto a implementação direta exige $2N^2$ operações, a FFT reduz o esforço para $2N \log_2(N)$ (Bando, 2024) ao empregar uma decomposição recursiva que elimina cálculos redundantes.

Segundo Cassimiro (2013), o funcionamento da FFT ocorre em três etapas: decomposição do sinal em partes menores, cálculo dos espectros parciais e recombinação dos resultados conforme a estrutura conhecida como diagrama borboleta (*butterfly*).

Um índice complementar relevante é a Distorção Harmônica Total (DHT), utilizada para avaliar o nível de distorção harmônica total em relação à componente fundamental. Essa métrica pode ser aplicada tanto à corrente quanto à tensão elétrica (Ribeiro, 2017). No Brasil, os limites admissíveis são definidos pelo Módulo 8 do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) (Oliveira, 2017), que estabelece valores máximos para componentes harmônicas individuais de acordo com a faixa de tensão do sistema. Esses limites, apresentados na Tabela 1, especificam percentuais permitidos para harmônicos ímpares e pares em sistemas abaixo e acima de 69 kV, servindo como referência para garantir a qualidade da tensão fornecida.

Tabela 1 – Limites globais de tensão

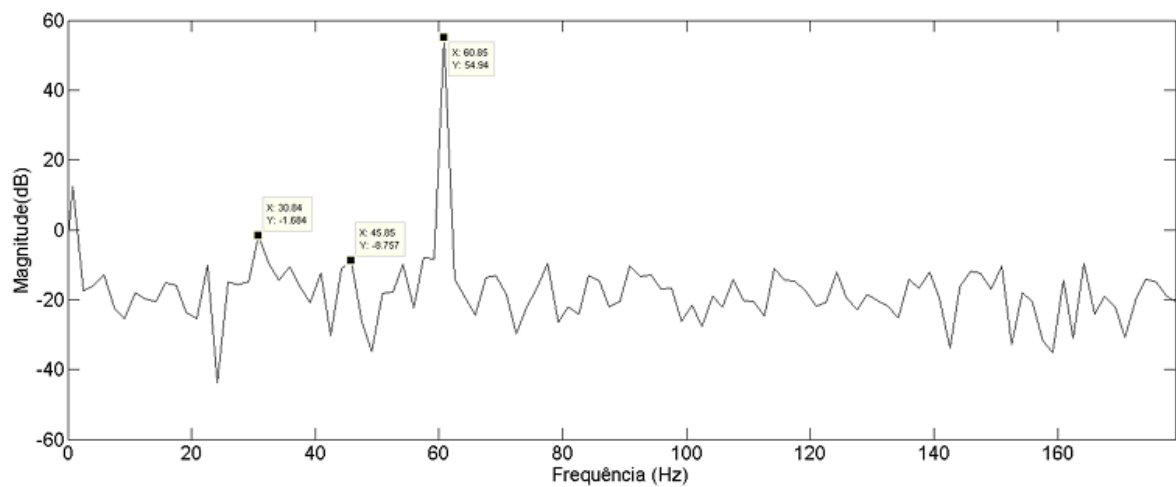
V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3,5,7	5			3,5,7	2		
		2,4,6	2			2,4,6	1
9,11,13	3			9,11,13	1,5		
		≥ 8	1			≥ 8	0,5
15 a 25	2			15 a 25	1		
≥ 27	1			≥ 27	0,5		

Fonte: adaptado de Oliveira (2017).

Para complementar a análise espectral, a PCA pode ser aplicada aos dados obtidos pela FFT, reduzindo a dimensionalidade e facilitando a identificação de padrões associados a defeitos, mesmo sob variações de carga (Suetake, 2012; Oliveira Zaparoli, 2018).

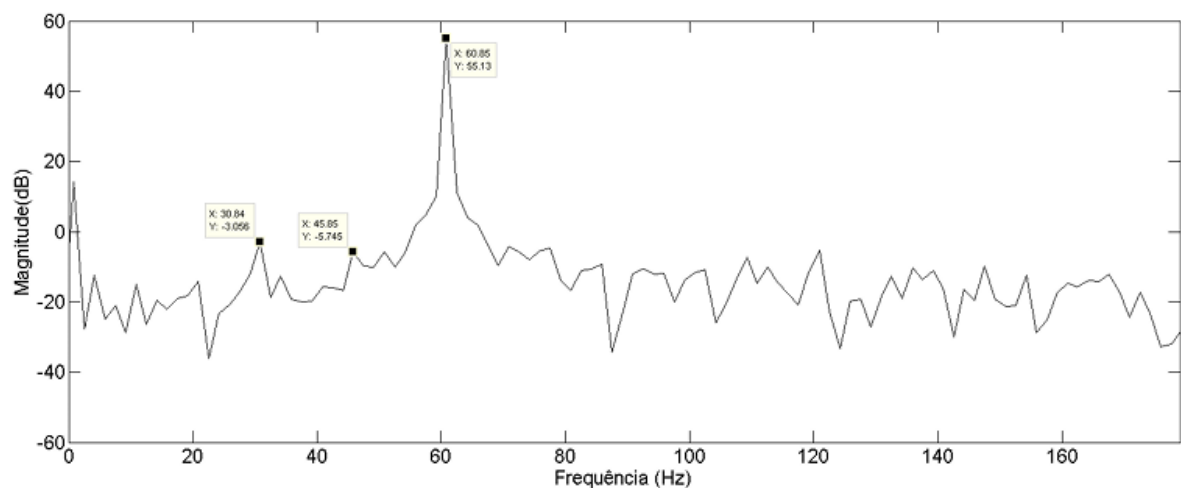
Estudos como Menegat (2014) demonstram que a FFT permite distinguir diferentes severidades de curto-circuito em enrolamentos. A Figura 10 apresenta o espectro de um motor saudável, usado como referência para comparação. Quando aproximadamente 2% das espiras estão em curto, observam-se alterações discretas no espectro, conforme ilustrado na Figura 11, as quais indicam o início de assimetrias no circuito magnético. Em condições mais severas, como mostrado na Figura 12, motores com cerca de 32% de espiras em curto exibem mudanças significativas na magnitude das componentes relacionadas ao defeito, tornando a identificação do defeito mais evidente.

Figura 10 – Motor saudável



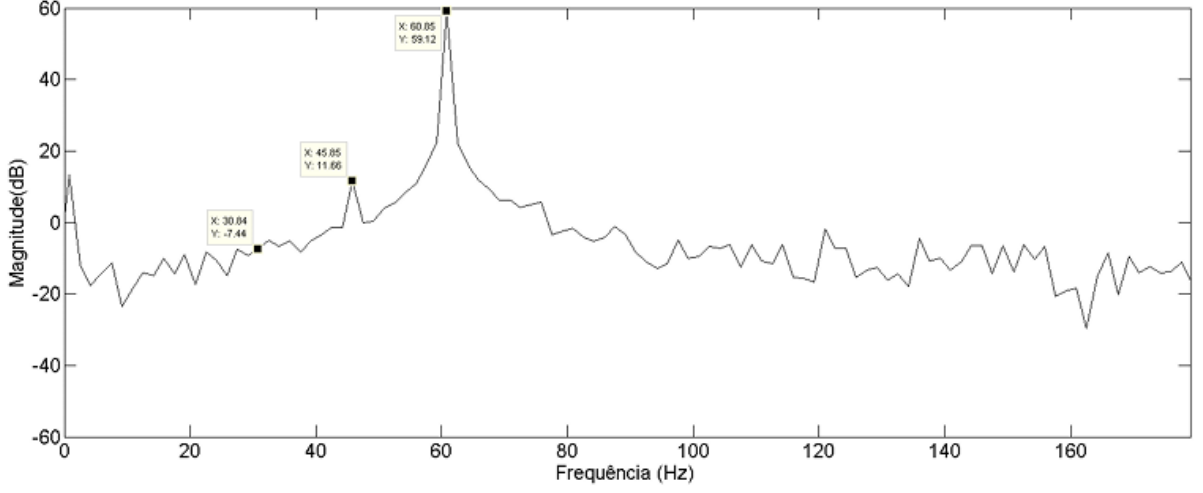
Fonte: Menegat (2014).

Figura 11 – Motor com 2% de espiras em curto-circuito



Fonte: Menegat (2014).

Figura 12 – Motor com 32% de espiras em curto-circuito



Fonte: Menegat (2014).

Para superar as limitações de resolução temporal da FT e da FFT, técnicas como a TW e a HHT fornecem representação tempo–frequência, permitindo identificar o instante em que cada componente espectral se manifesta no sinal.

2.4.2 Transformada de Hilbert

A Transformada de Hilbert (TH) é uma técnica de processamento que permite gerar um sinal analítico $z(t)$ a partir de um sinal real $x(t)$. Esse sinal analítico combina o sinal original na parte real e sua transformada na parte imaginária, possibilitando uma representação complexa do sinal, conforme a Equação (3).

$$z(t) = x(t) + j \cdot y(t). \quad (3)$$

Nessa expressão, $y(t)$ corresponde ao sinal obtido pela aplicação da TH. Essa representação possibilita extrair propriedades locais do sinal, como amplitude instantânea e fase instantânea, úteis em diagnósticos de defeitos (Bando, 2024).

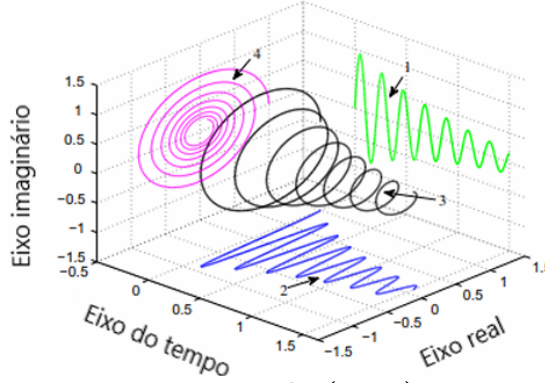
Segundo S. Moreira *et al.* (2020), a definição matemática da TH de um sinal $x(t)$ no domínio do tempo é dada pela Equação (4):

$$H\{x(t)\} = \frac{1}{\pi} \text{p.v.} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau. \quad (4)$$

O termo “p.v.” indica o valor principal de Cauchy. Essa formulação corresponde à aplicação de um filtro que introduz um deslocamento de fase de -90° para componentes de frequência positiva e $+90^\circ$ para componentes de frequência negativa, sem alterar suas amplitudes.

A Figura 13 ilustra os sinais obtidos após a aplicação da técnica. O sinal 1 representa a projeção da transformada, o sinal 2 corresponde ao sinal real, o sinal 3 representa o sinal analítico e o sinal 4 mostra o fasor no plano complexo.

Figura 13 – Projeção da TH (1), sinal real (2), sinal analítico (3) e fasor no plano complexo (4)



Fonte: Bando (2024).

De acordo com Jesus (2019), a aplicação prática da TH pode ser descrita pelos seguintes passos:

1. Medição da corrente do estator: o sinal $x(t)$ é obtido em uma das fases.
2. Cálculo da TH: o sinal transformado $y(t)$ é obtido a partir de $x(t)$.
3. Construção do sinal analítico: o sinal complexo $z(t)$ é formado conforme a Equação (3).
4. Cálculo do módulo: o módulo é obtido com a Equação (5).

$$|z(t)| = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)}. \quad (5)$$

5. Remoção da componente DC: subtrai-se a média do módulo, conforme a Equação (6).

$$\text{Modsemcdc}(t) = \text{Mod}(t) - \text{média}. \quad (6)$$

6. Análise espectral: aplica-se a FFT ao sinal $\text{Modsemcdc}(t)$, identificando componentes indicadoras de defeitos.

A TH pode ser interpretada como um filtro de fase ideal, pois desloca a fase de cada componente espectral em $\pm 90^\circ$ sem modificar as amplitudes. Essa característica preserva a energia do sinal e evita distorções na magnitude espectral (Maia, 2021).

Na prática, a TH é amplamente associada à análise de envelope. Defeitos mecânicos ou elétricos, como barras rompidas, roletes danificados, excentricidade ou desequilíbrios, produzem modulações lentas na amplitude do sinal principal. A extração do envelope

evidencia essas variações e, após a aplicação da FFT, permite identificar as frequências de modulação associadas ao defeito (Jesus, 2019; Cassimiro, 2013).

A TH é utilizada principalmente em sinais estacionários, mas também apresenta bom desempenho em sinais não estacionários, como partidas, paradas e variações de carga (Bando, 2024). Além disso, quando a FFT é aplicada diretamente ao sinal analítico, obtém-se um espectro unilateral, pois a TH garante que toda a energia do sinal seja concentrada nas frequências positivas. Essa propriedade é especialmente útil em diagnósticos de defeitos no rotor de motores de indução tipo gaiola (Lucas, 2020).

2.4.3 Transformada de Hilbert-Huang

A Transformada de Hilbert-Huang (HHT) é uma técnica amplamente empregada na detecção de defeitos em sinais não estacionários e não lineares. Trata-se de um método empírico que combina a Decomposição em Modos Empíricos (EMD) com a TH, permitindo obter informações tempo-frequência de forma totalmente adaptativa aos dados (Alves, 2017). Essa característica distingue a HHT de métodos que dependem de bases fixas, como a FT ou a TW.

O método EMD decompõe o sinal original em um conjunto finito de funções chamadas Função de Modo Intrínseco (IMF)s. Cada IMF é uma componente monocomponente que apresenta variações lentas de amplitude e frequência ao longo do tempo, o que a torna adequada para a aplicação da TH. A EMD não utiliza funções base pré-definidas; sua decomposição é orientada exclusivamente pelas oscilações do próprio sinal. O processo, denominado *sifting*, envolve: identificar máximos e mínimos locais; construir os envelopes superior e inferior por interpolação cúbica; calcular a média desses envelopes; subtrair essa média do sinal atual, originando um candidato a IMF; e repetir o procedimento até que o componente satisfaça os critérios formais de IMF (número de cruzamentos por zero compatível com o número de extremos e envelopes aproximadamente simétricos). O resíduo resultante é novamente processado até que não contenha oscilações significativas ou atinja um limiar de desvio padrão (Bórnea, 2022; Duarte, 2024).

Cada IMF representa uma oscilação simples do sinal, apropriada para a aplicação da TH. A transformada é aplicada individualmente em cada IMF para determinar suas frequências e amplitudes instantâneas. A combinação dessas informações forma o Espectro de Hilbert, uma representação tempo-frequência altamente localizada, capaz de evidenciar fenômenos transitórios e assinaturas relacionadas a defeitos elétricos e mecânicos.

A frequência instantânea é obtida pela derivada temporal da fase do sinal analítico:

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}. \quad (7)$$

Nessa expressão, $\theta(t)$ representa a fase instantânea do modo correspondente. A amplitude instantânea, por sua vez, está associada ao módulo do sinal analítico e permite avaliar a energia local de cada IMF ao longo do tempo (Bórnea, 2022).

A formulação da TH utilizada na HHT é dada por:

$$H\{x(t)\} = \frac{1}{\pi} p \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \right\}, \quad (8)$$

em que p representa o valor principal de Cauchy, empregado para lidar com a singularidade no ponto $\tau = t$. Essa formulação assegura a correta fundamentação física da transformada, essencial para preservar a precisão no cálculo das frequências instantâneas (Duarte, 2024).

A HHT se destaca por identificar, com precisão temporal, as frequências associadas ao defeitos incipientes em sinais não estacionários e transitórios, apresentando resolução tempo-frequência superior à de técnicas baseadas em janelas fixas, como a FFT ou a Transformada de Fourier de Curto Tempo (STFT). Enquanto a FFT distribui a energia do sinal em bandas largas e não localiza eventos no tempo, a HHT fornece uma decomposição sensível à mudanças locais, permitindo observar padrões de modulação relacionados a barras rompidas, excentricidade e variações dinâmicas de carga (Alves, 2017; Bórnea, 2022).

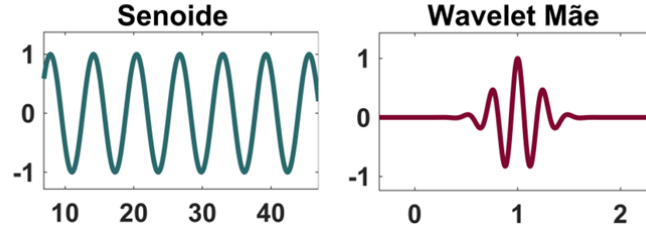
2.4.4 Transformada Wavelet

A Transformada Wavelet (TW) destaca-se na análise de sinais não estacionários, nos quais o conteúdo espectral se modifica ao longo do tempo. Diferentemente da FFT, que apresenta apenas a distribuição global de frequências dentro da janela de observação, a TW fornece uma decomposição multirresolução que combina informações temporais e espectrais em um único domínio. Componentes de alta frequência são representadas por wavelets mais estreitas (baixa escala), garantindo boa resolução temporal, enquanto componentes de baixa frequência são analisadas por wavelets mais dilatadas (alta escala), favorecendo a resolução em frequência (Lucas, 2020). Essa capacidade de localizar variações instantâneas torna a técnica adequada para identificar eventos transitórios e assinaturas de defeitos incipientes, como impactos em rolamentos e modulações associadas a barras rompidas no rotor (Silva, 2019).

O núcleo da TW é a *wavelet mãe*, uma função de curta duração e energia finita que é escalada e deslocada no tempo para gerar versões multirresolução do sinal. A escolha da wavelet mãe influencia diretamente o desempenho da análise, devendo refletir características compatíveis com os padrões presentes no sinal. Entre as opções disponíveis, destaca-se a família Daubechies, amplamente empregada devido à capacidade de representar transientes, descontinuidades e variações rápidas, além de apresentar regularidade adequada no domínio

do tempo (Rocha, 2022). A Figura 14 ilustra a diferença entre um sinal senoidal e uma wavelet mãe, destacando o caráter localizado desta última.

Figura 14 – Exemplo de sinal senoidal e sinal wavelet mãe utilizados na TW



Fonte: Lucas (2020).

Matematicamente, a TW contínua é definida por:

$$W_{(a,b)} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}(t) dt, \quad (9)$$

em que a wavelet escalada e transladada é dada por:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (10)$$

sendo a o parâmetro de escala, inversamente proporcional à frequência analisada, e b o deslocamento temporal. Essa formulação reforça a relação entre a TW e a decomposição espectral: ambas segmentam o sinal em faixas de frequência, porém a TW produz uma representação tempo-frequência não uniforme, ajustada ao conteúdo local do sinal, o que técnicas baseadas em janelas fixas, como a STFT, não conseguem igualar (Silva, 2019).

2.4.5 Análise de Envelopes

A análise de envelopes tem papel relevante na identificação de assinaturas moduladas em MIT, pois destaca variações lentas de amplitude que se sobrepõem a uma portadora de maior frequência, geralmente ligada à componente fundamental ou a outras estruturas espectrais do sinal. Irregularidades mecânicas, como danos em rolamentos, desgastes em engrenagens e barras rompidas no rotor, assim como anomalias elétricas relacionadas à excentricidade ou assimetrias magnéticas, geram pulsos periódicos ou modulações de baixa frequência que influenciam a forma de onda. Sem o processo de demodulação, essas assinaturas permanecem encobertas pelas componentes de maior energia presentes no espectro, dificultando a detecção do defeito.

A demodulação por envelope permite extrair essas variações de baixa frequência, realçando assinaturas características de defeitos. O envelope resultante destaca flutuações de amplitude associadas à condição operacional da máquina, constituindo uma técnica simples, robusta e amplamente consolidada em aplicações industriais (Oliveira Zaparoli, 2018).

Entre as abordagens disponíveis, a mais utilizada baseia-se na aplicação da TH. A TH gera o sinal analítico, cujo módulo corresponde ao envelope matemático da forma de onda. Em seguida, aplica-se a FFT ao envelope para identificar, no domínio da frequência, componentes relacionadas à modulação, como as bandas laterais típicas de barras rompidas no rotor, usualmente observadas em torno de $f(1 \pm 2s)$, além de outras harmônicas associadas ao defeito (Silva, 2019). Essa metodologia possibilita a detecção de defeitos em estágios iniciais, incluindo condições pré-ruptura e sinais de excentricidade incipiente.

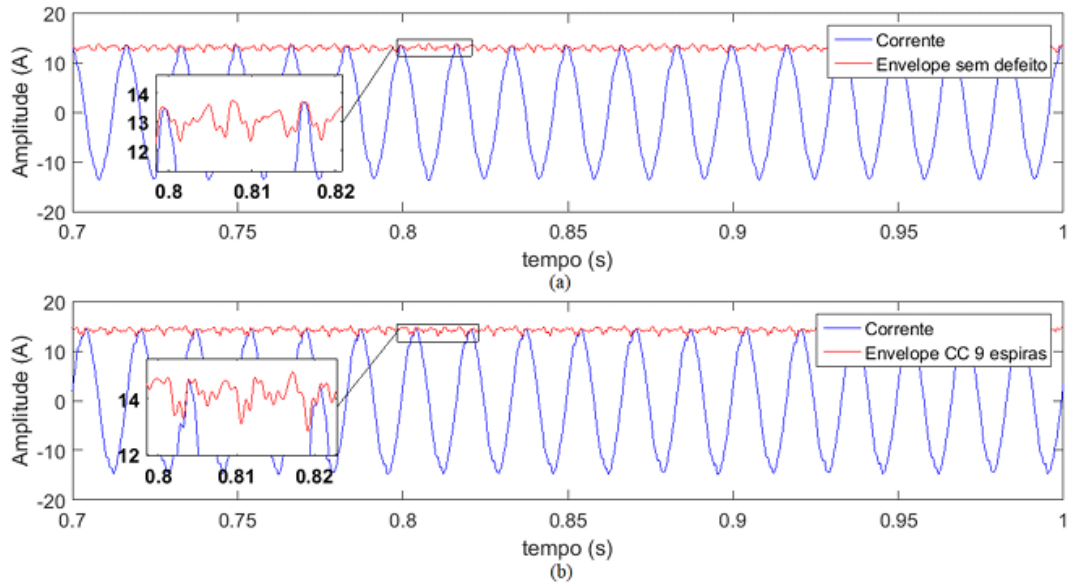
Além dos sinais de corrente, a análise de envelope também é aplicada a sinais de vibração e tensão. Defeitos nos enrolamentos do estator, por exemplo, produzem variações características na amplitude, sobretudo sob cargas elevadas, resultando em envelopes que revelam assinaturas elétricas antes que evoluam para curtos de maior severidade (Zaparoli *et al.*, 2021). Dessa forma, a técnica contribui para estratégias eficazes de manutenção preditiva.

De acordo com Antunes (2021), o procedimento típico da análise de envelopes compreende três etapas principais:

1. Filtragem passa-banda: o sinal é inicialmente filtrado para isolar a faixa de interesse, geralmente uma região onde as modulações apresentam maior evidência.
2. Extração do envelope: a TH é aplicada ao sinal filtrado para obtenção do sinal analítico, cujo módulo corresponde ao envelope.
3. Análise espectral: a FFT é então aplicada ao envelope, revelando componentes harmônicas associadas ao defeito, como frequências de passagem de elementos rolantes, bandas laterais ou componentes vinculadas ao escorregamento.

A Figura 15 ilustra um exemplo experimental comparando o sinal de corrente do estator para as condições saudável e defeituosa. Observa-se que, na presença de defeito, o envelope apresenta variações acentuadas e harmônicas adicionais que não aparecem no motor saudável, evidenciando a capacidade da técnica em realçar assinaturas de defeito.

Figura 15 – Corrente do estator e envelope: (a) condição saudável; (b) condição com defeito



Fonte: Zaparoli *et al.* (2021).

2.4.6 Espectrograma

O espectrograma é uma representação tempo–frequência que descreve a distribuição da energia do sinal ao longo do tempo. Ele é obtido por meio da aplicação sucessiva da STFT em janelas sobrepostas, permitindo observar a evolução temporal do conteúdo espectral à medida que o sinal se modifica. Essa característica torna o espectrograma especialmente adequado para a análise de sinais não estacionários, como eventos transitórios, regimes de partida, variações de carga e defeitos cujas assinaturas sofrem alterações no tempo.

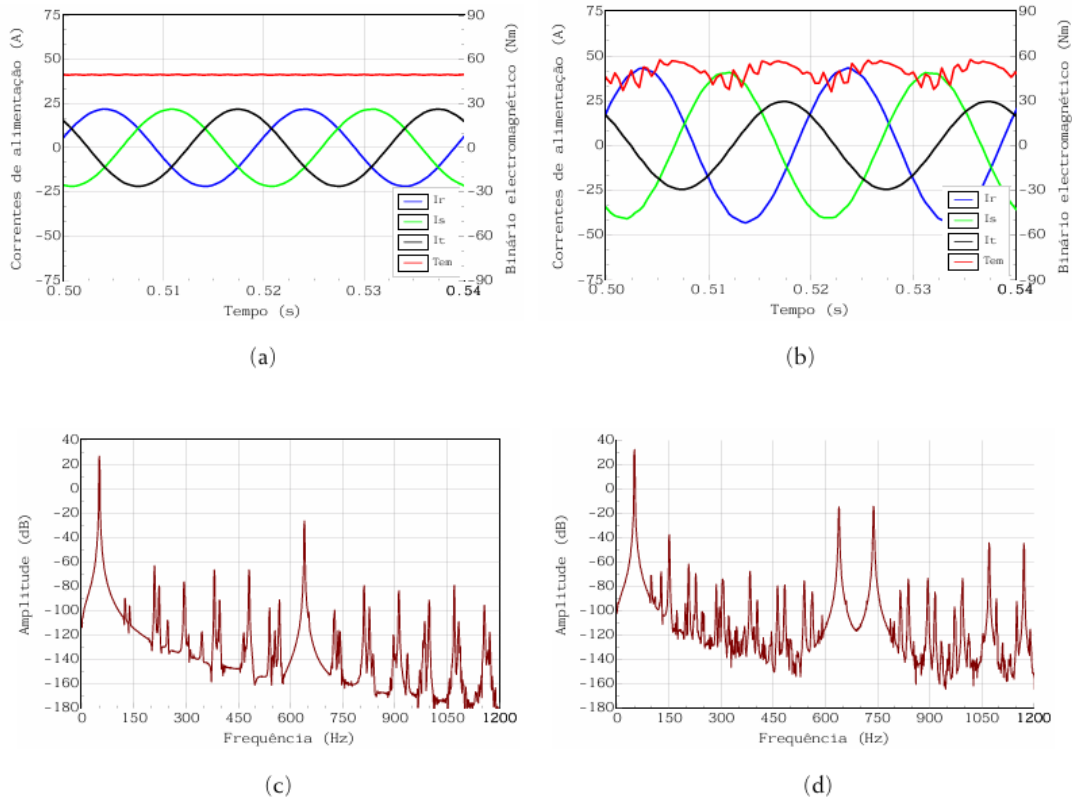
Essa abordagem permite visualizar a amplitude relativa das componentes de frequência ao longo da duração do sinal, facilitando a identificação de padrões associados a defeitos. Mesmo em baixas velocidades, quando as assinaturas de defeito podem se sobrepor às harmônicas fundamentais ou serem mascaradas por ruído, a representação tempo–frequência evidencia essas componentes com maior clareza. Além disso, o espectrograma diferencia ruídos de curta duração que poderiam dificultar o diagnóstico quando analisados exclusivamente no domínio da frequência (Bruno, 2020).

Embora o espectrograma seja tradicionalmente obtido pela STFT, técnicas como a FFT segmentada em janelas e a TW também podem ser utilizadas para gerar representações tempo–frequência. O objetivo permanece o mesmo: analisar a evolução das componentes harmônicas em sinais saudáveis e defeituosos. Em condições normais, as correntes das três fases tendem a apresentar espectros simétricos e estáveis. Na presença de defeitos, como curto-circuito parcial nas espiras do estator, surgem componentes adicionais e flutuações

temporais associadas às assimetrias eletromagnéticas produzidas no estator e no rotor (da Cruz, 2004).

Essa diferença pode ser observada na Figura 16, que compara o comportamento da corrente e o respectivo espectrograma para condições saudável e com defeito.

Figura 16 – Comparação entre condição saudável (esquerda) e condição com defeito (direita): (a), (b) correntes de alimentação e binário eletromagnético; (c), (d) espectrogramas da corrente da fase R



Fonte: Adaptado de da Cruz (2004).

2.4.7 Comparação entre Técnicas de Processamento de Sinais para Detecção de defeitos

A diversidade de técnicas de processamento de sinais aplicadas à detecção de defeitos em MITs reforça a necessidade de avaliar não apenas suas características individuais, mas também seu potencial de integração. Cada método possui aplicações específicas e tende a ser mais adequado para determinados tipos de sinais e condições de operação. O Quadro 3 apresenta uma comparação entre as principais técnicas discutidas, destacando seus domínios de aplicação, vantagens, limitações e as assinaturas de defeitos que cada uma é capaz de evidenciar.

Quadro 3 – Comparação entre técnicas de análise de sinais

Técnica	Domínio de Aplicação	Principais Aplicações	Vantagens	Desvantagens	Assinaturas de defeito Evidenciadas
FFT	Frequência	Assimetrias, defeitos no rotor e estator	Alta eficiência computacional; implementação simples	Baixa sensibilidade a transientes e sinais não estacionários	Bandas laterais $f(1 \pm 2s)$ em defeitos no rotor; harmônicas ímpares em defeitos do estator
TH	Tempo-frequência local	Defeitos em rotores, excentricidade e vibrações	Realce de modulações de amplitude; base para análise de envelope	Sensível a ruídos de baixa frequência; requer filtragem adequada	Modulações lentas associadas a barras rompidas e excentricidade
TW	Tempo-frequência localizada	Detecção de transientes, partida e impactos mecânicos	Alta resolução tempo-frequência; análise multi-escala	Sensível à escolha da wavelet; possibilidade de artefatos	Variações rápidas de amplitude e frequência; impulsos e assimetrias dinâmicas
Análise de Envelopes	Amplitude-tempo-frequência	Defeitos em enrolamentos, rotor e enrolamentos	Alta sensibilidade a modulações; aplicação consolidada	Dependente de filtragem passa-banda adequada	Componentes de modulação de barras quebradas e BPFO/BPFI
HHT	Tempo-frequência	Sinais não lineares e não estacionários	Alta resolução instantânea; adaptativa aos dados	Alto custo computacional; IMFs espúrias	Evolução temporal de amplitudes e frequências associadas ao Defeitos incipientes
Espectrograma	Tempo-frequência visual	Variações sob carga, transientes, partidas	Visualização clara da evolução espectral	Resolução limitada pela janela da STFT	Harmônicas emergentes, deslocamento ou desaparecimento de bandas laterais

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Sistemas de diagnóstico para MITs tendem a utilizar abordagens híbridas, integrando diferentes técnicas para explorar suas vantagens complementares. Dessa forma, a escolha

da técnica não deve se limitar a identificar “a mais eficiente”, mas sim a combinação mais apropriada para cada tipo de Defeito e condição operacional.

A análise comparativa auxilia na seleção do método mais adequado, considerando aspectos como precisão, robustez ao ruído, custo computacional e capacidade de tratar sinais estacionários ou não estacionários. A combinação FFT-TW, por exemplo, permite identificar componentes harmônicas estáveis por meio da FFT e analisar transientes ou eventos localizados utilizando a TW. De forma semelhante, a aplicação da TH como pré-processamento aumenta a sensibilidade às modulações associadas aos defeitos incipientes, conforme demonstrado por Menegat (2014).

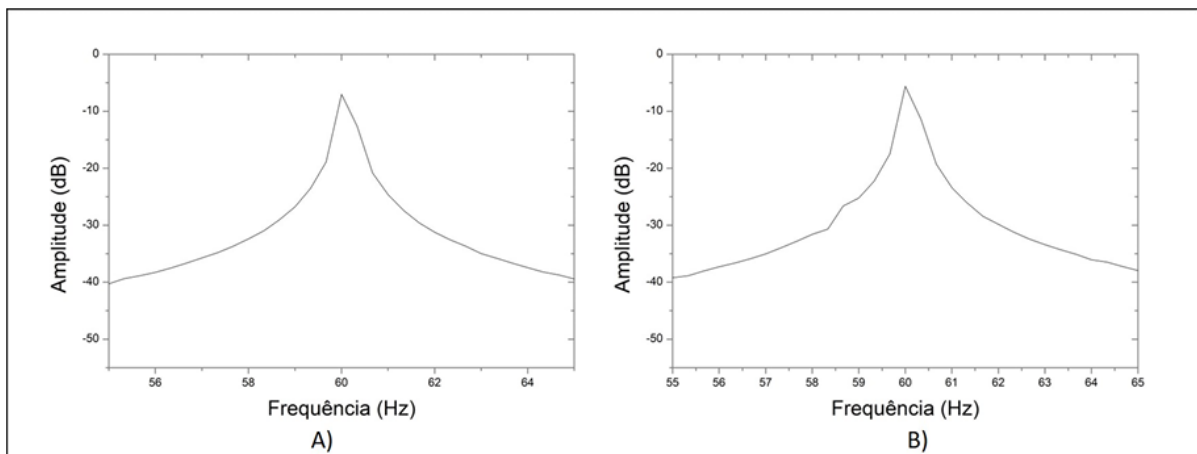
A integração dessas técnicas contribui para diagnósticos mais robustos e precisos. Ao explorar as complementaridades entre os métodos, é possível melhorar a detecção precoce, reduzir defeitos não identificados e aumentar a confiabilidade dos sistemas de manutenção.

Nesse contexto, destaca-se o Motor Current Signature Analysis (MCSA), amplamente utilizado na análise espectral da corrente do estator com base na FT. O método analisa o espectro de frequência para identificar alterações provocadas por defeitos. Na presença de avarias, o espectro apresenta mudanças de amplitude e o surgimento de bandas laterais (Antunes, 2021).

Com o objetivo de aumentar a sensibilidade, Jesus (2019) propôs combinar FT e TH. Foram realizados testes com motores operando sob diferentes escorregamentos, aplicando inicialmente apenas a FT e, posteriormente, a combinação FT-TH.

A Figura 17 apresenta os resultados obtidos com a aplicação isolada da FT ao sinal de corrente para escorregamentos de 0,66% e 1,33%. Nota-se, em ambos os casos, a presença da banda lateral esquerda associada ao componente $f(1 - 2s)$, característica de defeitos no rotor (Jesus, 2019).

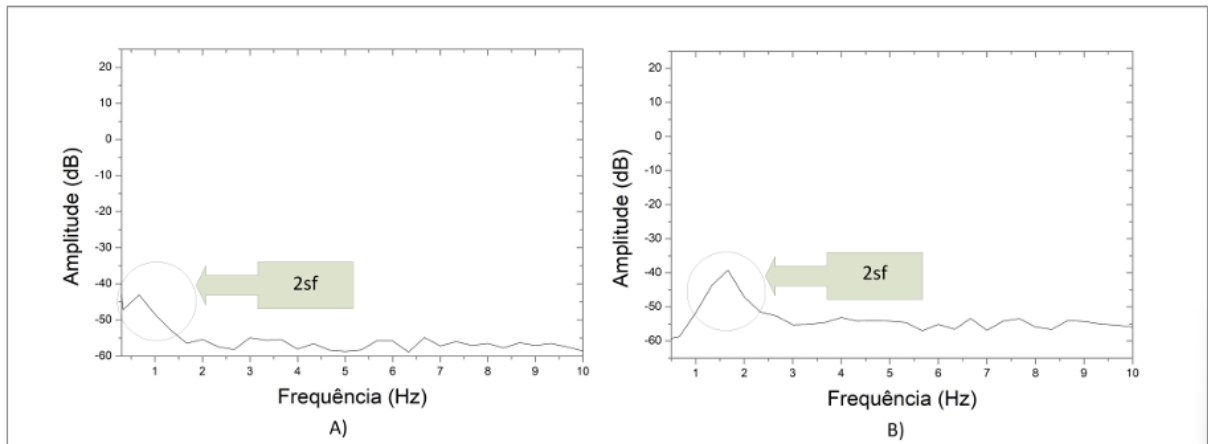
Figura 17 – A) Banda lateral esquerda para escorregamento de 0,66%; B) Banda lateral esquerda para escorregamento de 1,33%, ambas obtidas com FT



Fonte: Jesus (2019).

A Figura 18 apresenta os resultados obtidos com a combinação FT-TH. Nessa abordagem, a TH atua como demoduladora, destacando modulações características de defeitos e aumentando o contraste espectral (Jesus, 2019).

Figura 18 – A) Banda lateral esquerda com escorregamento de 0,66%, obtida com FT + TH; B) Banda lateral esquerda com escorregamento de 1,33% com a mesma combinação



Fonte: Jesus (2019).

Comparando os resultados, observa-se que a combinação das técnicas evidencia de forma mais clara o componente associado a $2sf$. O aumento do escorregamento de 0,66% para 1,33% resultou em maior amplitude da componente e no surgimento de componentes secundárias, comportamento esperado para defeitos incipientes no rotor (Jesus, 2019). Assim, embora a aplicação isolada da FT já permita diagnósticos relevantes, sua integração com a TH aumenta a sensibilidade e a clareza da análise espectral, contribuindo para diagnósticos mais precisos e confiáveis.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com base nas técnicas de processamento de sinais apresentadas no Capítulo 2, foram analisados sinais teóricos e sinais reais obtidos experimentalmente, com o objetivo de avaliar o desempenho dos métodos na detecção de defeitos em MITs.

3.1 Sinais Utilizados

Foram utilizados dois tipos de sinais: sinais teóricos gerados em MATLAB a partir de um modelo matemático da corrente do estator e sinais reais adquiridos em bancada sob condições controladas. A comparação entre ambos permitiu avaliar o comportamento das técnicas diante de ruído, variações de carga, dispersão espectral e imperfeições inerentes a medições experimentais.

3.1.1 Sinal Teórico

Os sinais teóricos foram gerados a partir de um modelo harmônico que representa o comportamento da corrente do estator de um MIT. A formulação geral é dada por:

$$x(t) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot \sin(2\pi f_n t + \varphi_n), \quad (11)$$

onde $x(t)$ é o sinal no domínio do tempo, A_n corresponde à amplitude da n -ésima componente harmônica, $f_n = n f_0$ representa a frequência da n -ésima harmônica baseada na fundamental $f_0 = 60$ Hz, φ_n é a fase associada a essa componente e n indica exclusivamente a *ordem harmônica*. Nesse modelo, Foram incluídas harmônicas de amplitude 0,2, com base na amplitude observado no sinal real. Ademais, as harmônicas foram inseridas até a 30ª ordem, que aparecem nos gráficos do sinal teórico com defeito em frequências múltiplas de 60 Hz, como 120 Hz e 180 Hz (2ª e 3ª harmônicas), mas neste estudo são mostradas nos gráficos apenas até a 8ª ordem (480 Hz).

Para a simulação dos defeitos, foram adicionadas bandas laterais associadas ao efeito de duas barras perfuradas no rotor. Essas bandas não são representadas por n , pois não constituem novas harmônicas, mas sim *deslocamentos em torno das harmônicas existentes*. As frequências laterais foram calculadas por:

$$f_{sb} = n f_0 (1 \pm 2s), \quad (12)$$

em que s representa o escorregamento. Assim, cada harmônica de ordem n gera duas bandas laterais, situadas em $n f_0 - 2s n f_0$ e $n f_0 + 2s n f_0$. Esse mecanismo faz com que as frequências características associadas ao defeito apareçam tanto em harmônicas

ímpares quanto em ordens mais elevadas, de acordo com a profundidade da modulação e da severidade do defeito.

Portanto, n identifica unicamente a harmônica central, enquanto as bandas laterais surgem em torno dessa harmônica devido à modulação introduzida pela assimetria do rotor. A inclusão dessas bandas produz exatamente a assinatura espectral típica de barras rompidas. Por simetria entre as fases, apenas uma fase foi considerada na análise.

3.1.2 Sinal Real

Os sinais reais foram obtidos no banco de dados da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC)/Universidade de São Paulo (USP), produzidos em bancada dedicada ao estudo de defeitos em MITs. O conjunto experimental inclui:

- MIT WEG W22, 1 CV, 220/380 V, 4 polos, rotor gaiola com 34 barras;
- Máquina CC para aplicação de carga mecânica;
- Torquímetro rotativo;
- Variac;
- Oscilógrafo Yokogawa DL750;
- Transdutores de corrente e tensão.

Durante os ensaios, o motor foi operado em oito níveis diferentes de torque, variando de 0,5 N.m a 4,0 N.m em passos de 0,5 N.m. Para esta análise, foram utilizados apenas os sinais correspondentes ao torque nominal de 4,0 N.m, garantindo condições representativas do funcionamento real. Foram realizados ensaios com remoção controlada de barras do rotor, em que o defeito de barra quebrada foi simulado através de perfurações nas barras. Os sinais foram adquiridos a uma taxa de 50 kHz durante 20 s. Os principais parâmetros são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros dos sinais teóricos e reais analisados

Parâmetro	Sinal Teórico	Sinal Real
Frequência	60 Hz	60 Hz
Amostragem	50 kHz	50 kHz
Duração	20 s	20 s
Escorregamento	0,0472	0,0472 (sob velocidade nominal)
Defeito Simulado	Adição de bandas laterais	Perfurações na barra do rotor

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

3.2 Implementação das Técnicas de Processamento de Sinais

As técnicas descritas no Capítulo 2 foram implementadas em MATLAB e aplicadas aos sinais teórico e real. Cada método passou pelas mesmas etapas gerais: pré-processamento, extração de componentes relevantes e análise espectral.

3.2.1 Transformada de Fourier

A FT foi implementada a partir da FFT. Antes da aplicação, os sinais foram normalizados. Em seguida:

1. O espectro foi normalizado pela amplitude da fundamental;
2. O módulo foi analisado em escala linear e em dB;
3. A banda de 0-200 Hz foi utilizada para identificar as bandas laterais.

A preparação foi idêntica para sinais teóricos e reais, exceto pela necessidade de selecionar o trecho em regime permanente nos sinais experimentais. O sinal foi simulado por 5 s, totalizando 250000 pontos.

3.2.2 Transformada de Hilbert

A TH foi implementada via FFT e filtro de Hilbert. O sinal analítico foi utilizado para extrair o envelope, cuja FFT destacou a modulação associada ao defeito.

Para os sinais reais, etapas adicionais foram aplicadas:

1. Seleção do regime permanente;
2. Filtragem suave para reduzir ruído;
3. Normalização espectral após a extração da envoltória.

3.2.3 Transformada de Hilbert-Huang

A HHT foi aplicada conforme o fluxo:

1. Remoção da tendência contínua;
2. Decimação para reduzir custo computacional;
3. Filtragem passa-faixa na região da fundamental e bandas laterais;
4. Decomposição por EMD;

5. Seleção das IMFs próximas da fundamental;
6. Cálculo de amplitude e frequência instantânea via Hilbert;
7. Construção do mapa tempo-frequência e espectro marginal.

O sinal teórico usado como referência passou pelas mesmas etapas de filtragem e decimação, permitindo comparação direta.

3.2.4 Transformada Wavelet

A TW foi aplicada ao envelope obtido pela TH. Para garantir comparabilidade entre os resultados:

1. Utilizou-se a wavelet-mãe Morlet complexa;
2. Foram definidas 1024 escalas logarítmicas;
3. Os coeficientes foram normalizados pela energia da wavelet.

Nos sinais reais, aplicaram-se filtragem na região 50-70 Hz, remoção de média, filtragem passa-baixa em 10 Hz e decimação antes da análise.

3.2.5 Análise de Envelopes

A análise de envelopes empregou a demodulação via TH. Para os sinais reais, foram acrescentadas:

1. Decimação para reduzir conteúdo de alta frequência;
2. Decomposição por EMD para separar osciladores concorrentes;
3. Filtragem passa-faixa centrada em 60 Hz;
4. FFT da envoltória para identificar componentes de modulação.

3.2.6 Espectrograma

A análise por STFT utilizou:

1. Janela Hann de 2048 amostras;
2. Sobreposição de 50%;
3. FFT de 4096 pontos;

4. Limitação espectral ao intervalo 50-70 Hz.

Para os sinais reais, aplicaram-se remoção de tendência, normalização e decimação para 2 kHz antes da geração do espectrograma.

3.3 Avaliação de Desempenho

A avaliação de desempenho teve como objetivo comparar como cada técnica respondeu às condições saudável e com defeito, tanto nos sinais teóricos quanto nos sinais reais. A aplicação prévia das técnicas ao sinal saudável permitiu estabelecer um padrão de referência, o que facilitou a identificação das modificações introduzidas pela presença das bandas laterais associadas ao defeito de barras do rotor.

A análise considerou quatro aspectos principais:

1. Capacidade de evidenciar componentes associadas ao defeito no domínio da frequência;
2. Necessidade de filtragem ou etapas adicionais de pré-processamento;
3. Clareza visual dos resultados;
4. Resistência a ruído e distorções presentes no sinal real.

Além da avaliação qualitativa, também foram aplicadas métricas quantitativas padronizadas para todas as técnicas analisadas. Para facilitar a compreensão, estas métricas estão resumidas de forma organizada no Quadro 4, permitindo identificar rapidamente o significado e o cálculo de cada uma delas.

Quadro 4 – Métricas utilizadas na avaliação quantitativa das técnicas aplicadas

Métrica	Descrição / Cálculo
Razão Banda Lateral/-Fundamental (STC)	Relação entre a amplitude da banda lateral característica e a da fundamental, $STC = A_{sb}/A_{fund}$ (Pineda-sánchez <i>et al.</i> , 2023; Onuka, 2021).
Prominência do Pico Espectral	Diferença entre o pico da banda lateral e o nível médio de ruído, normalizada pelo desvio padrão do ruído: $(A_{pico} - baseline)/\sigma_{ruído}$ (Sobrinho <i>et al.</i> , 2021).
Erro Quadrático Médio (EQM)	Diferença média quadrática entre os espectros teórico e real, $EQM_{esp} = \frac{1}{N} \sum (S_{teo}(f) - S_{real}(f))^2$ (Santos, 2013).
Coefficiente de Determinação (R^2)	Mede o grau de aderência entre duas curvas, avaliando o quanto o espectro analisado se aproxima do espectro de referência por meio da distância euclidiana normalizada (Montgomery; Peck; Vining, 2012).
Tempo de Processamento	Tempo necessário para executar todas as etapas da técnica no MATLAB. A máquina utilizada foi um notebook com processador AMD Ryzen 7 7840HS (8 cores/16 threads; 3,8–5,1 GHz), 32 GB de RAM DDR5 (5600 MT/s), SSD NVMe Lexar NM790 2 TB (7400/6500 MB/s) e GPU RTX 4070 laptop 8 GB.

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

As métricas foram calculadas de forma uniforme para todas as técnicas. O procedimento envolveu:

1. Normalização do espectro obtido pela FFT;
2. Identificação do pico na frequência fundamental e na banda lateral inferior, usando uma janela de busca de $\pm 0,5$ Hz;
3. Definição de uma região de ruído (10–30 Hz) para estimar o nível de fundo;
4. Comparação entre o espectro do sinal analisado e o espectro teórico usado como referência;
5. Cálculo do EQM, da STC, da prominência do pico e do coeficiente de determinação.

Esse procedimento foi implementado em MATLAB, seguindo as etapas apresentadas no bloco de código responsável pelo cálculo das métricas. O script identifica as componentes de interesse, calcula o nível de ruído médio, compara os espectros no intervalo de 0–200 Hz, definido apenas como recorte operacional do script, e organiza os resultados em uma estrutura única para facilitar a comparação entre as técnicas. O tempo total de processamento de cada método também foi registrado automaticamente.

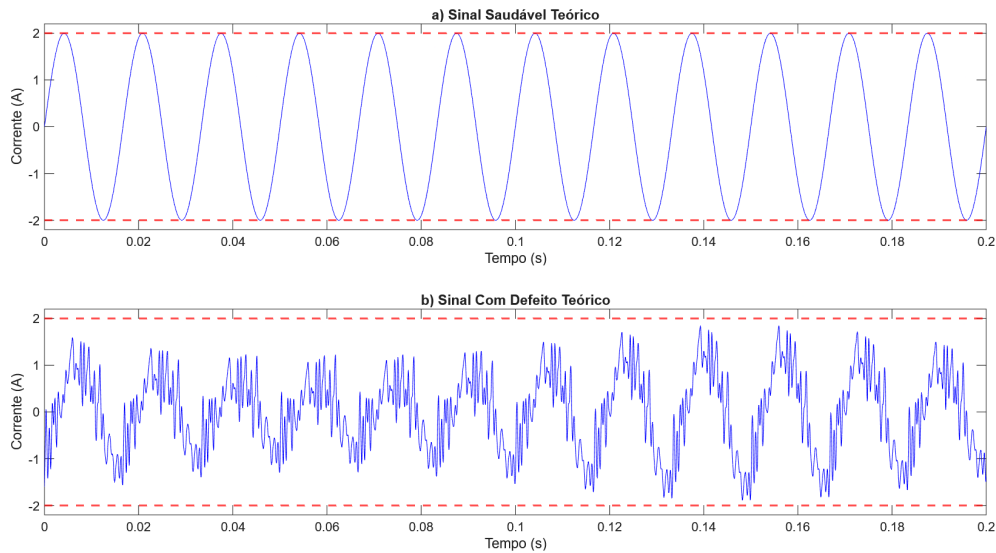
A combinação entre avaliação visual, análise qualitativa das técnicas e resultados quantitativos permitiu comparar o desempenho de forma consistente, considerando as particularidades dos sinais teóricos e reais. Essa abordagem garantiu uma avaliação equilibrada, destacando tanto a capacidade de detecção dos defeitos quanto a robustez e a complexidade computacional de cada técnica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise das técnicas de processamento foi iniciada a partir dos sinais teóricos. Primeiramente, cada método foi aplicado ao sinal ideal, de modo a observar o comportamento esperado em uma condição saudável, sem a presença de defeitos ou ruídos. Essa etapa serviu como referência para comparar os resultados obtidos quando as mesmas técnicas foram aplicadas ao sinal teórico com defeito.

A Figura 19 apresenta o sinal senoidal ideal, utilizado como ponto de partida das análises e o sinal teórico contendo o defeito simulado correspondente à quebra de duas barras no rotor. Essa modificação introduz variações periódicas e pequenas distorções na amplitude do sinal, representando o comportamento típico da presença de defeito.

Figura 19 – a) sinal teórico ideal b) Sinal Teórico com Defeito



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

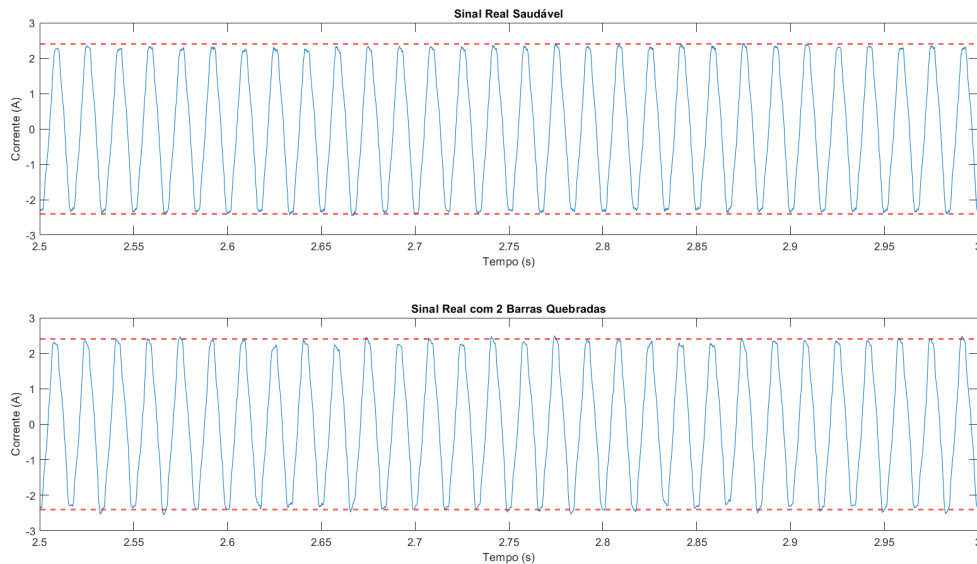
A comparação entre a) e b) da Figura 19 mostra que o sinal teórico com defeito apresenta oscilações não uniformes e variações de amplitude ao longo do tempo. Essas alterações resultam da adição de componentes secundárias e bandas laterais associadas ao escorregamento, simulando a presença de barras rompidas. O padrão de modulação observado reflete a interação entre a frequência fundamental e as frequências introduzidas pelo defeito.

Essas modificações no domínio do tempo representam o impacto da quebra das barras sobre o fluxo magnético e a corrente do estator, produzindo variações periódicas características desse tipo de defeito. Esse comportamento serve como referência para as análises subsequentes, nas quais as técnicas de processamento de sinais são aplicadas para realçar essas componentes tanto no domínio da frequência quanto no domínio tempo-frequência.

Após a análise dos sinais teóricos, a mesma abordagem foi realizada para os sinais reais, com o objetivo de verificar a correspondência entre o comportamento teórico e o comportamento experimental. Da mesma forma que nos sinais teóricos, foram analisados os sinais reais obtidos do banco de dados experimental. O sinal real sem defeito foi utilizado como referência, e em seguida foi analisado o sinal real com defeito. Também foi feita uma comparação direta entre os sinais teóricos e reais, que foram considerados sob o mesmo escorregamento adotado para as análises.

A Figura 20 apresenta o sinal real obtido em condição normal de operação e o sinal real adquirido sob condição de defeito no rotor.

Figura 20 – Sinal real obtido em condição normal de operação (sem defeito)



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A comparação entre gráficos da Figura 20 evidencia que, no domínio do tempo, as diferenças entre o sinal real saudável e o sinal sob defeito são extremamente sutis. O sinal em condição normal apresenta forma de onda predominantemente senoidal, com pequenas distorções e baixo ruído.

No sinal real com defeito, observam-se apenas leves assimetrias e pequenas variações de amplitude, que indicam a presença de modulação associada ao escorregamento. Contudo, essas alterações possuem amplitude significativamente reduzida em relação aos 60Hz, permanecendo amplamente mascaradas pela componente fundamental e pelos ruídos presentes no ambiente experimental. Dessa forma, no domínio temporal, tais diferenças não permitem uma distinção clara e inequívoca entre as duas condições.

Embora o sinal teórico apresente distorções mais evidentes ao simular o defeito, o sinal real reproduz o mesmo padrão de modulação, porém com intensidade significativamente menor. Assim, as assinaturas de defeito, modulação e bandas laterais, só se tornam inequivocamente observáveis após a aplicação das técnicas adequadas, como o cálculo do

envelope via Hilbert e a análise espectral deste envelope, onde essas componentes emergem de maneira clara e quantificável.

As análises dos resultados foram realizadas com base na equação que define as bandas laterais associadas ao defeito de barras quebradas:

$$f_{sb} = f_0(1 \pm 2s). \quad (13)$$

Considerando o escorregamento adotado, $s = 0,0472$, as bandas laterais esperadas são:

$$f_{sb1} = 54,33 \text{ Hz}, \quad f_{sb2} = 65,67 \text{ Hz}.$$

A frequência de modulação associada ao escorregamento é dada por:

$$f_{\text{mod}} = 2sf_0. \quad (14)$$

Substituindo o valor adotado, obtém-se:

$$f_{\text{mod}} = 5,67 \text{ Hz}.$$

A Tabela 3 apresenta os valores calculados para as bandas laterais e para a frequência de modulação. Como o sinal teórico foi simulado utilizando os mesmos parâmetros do sinal real, as assinaturas de defeito analisadas são equivalentes.

Tabela 3 – Frequências esperadas das bandas laterais e da frequência de modulação para o sinal analisado

Frequência	Valor (Hz)	Descrição
f_{sb1}	54,33	Banda lateral inferior
f_{sb2}	65,67	Banda lateral superior
f_{mod}	5,67	Frequência de modulação

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Pequenas variações podem ser observadas entre as frequências calculadas e as obtidas nas análises dos sinais, e estão associadas às condições reais de operação do motor, à presença de ruídos, vibrações e às oscilações de carga durante a aquisição. Esses fatores provocam leves deslocamentos das componentes espectrais, mantendo a coerência com o comportamento previsto pelo modelo.

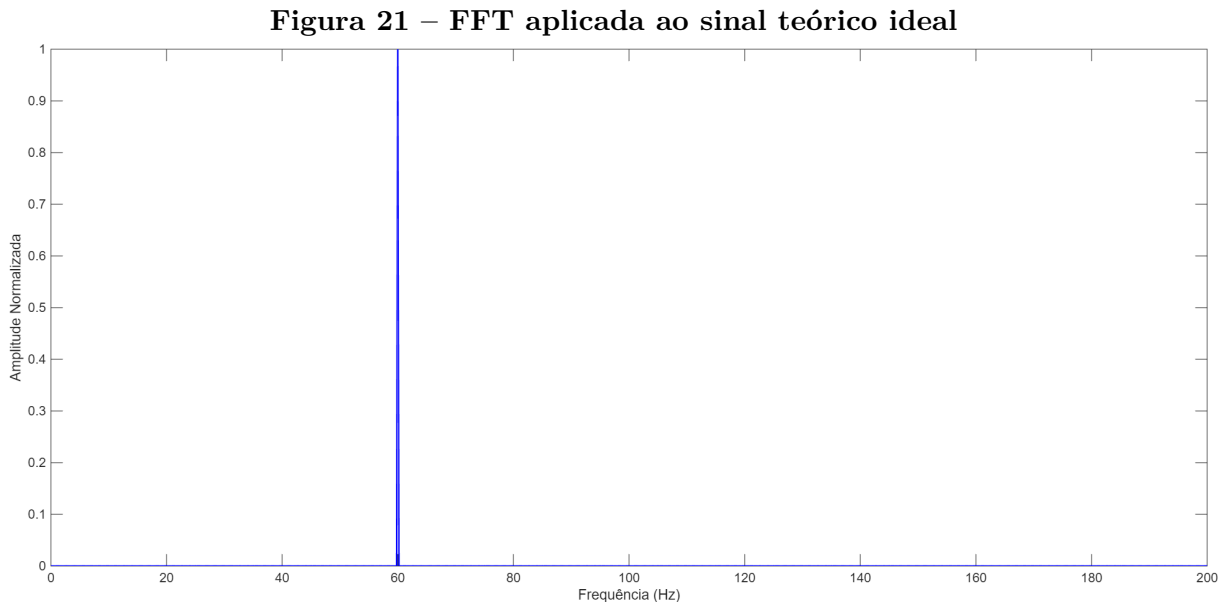
O valor de escorregamento adotado foi definido com base no escorregamento estimado diretamente a partir do sinal real.

4.1 Resultados do Sinal Teórico

Antes da apresentação das técnicas aplicadas, faz-se necessária uma breve contextualização sobre o propósito desta seção. O sinal teórico foi desenvolvido de modo a reproduzir, de forma controlada, os principais mecanismos físicos associados à presença de defeito de barra quebrada no rotor, permitindo a comparação direta entre o comportamento idealizado e o comportamento experimental. A seguir, são apresentadas as etapas de processamento, bem como os resultados obtidos nas diferentes representações do sinal e de modo estruturado. Apenas após a exposição completa dos gráficos e análises será realizada a discussão comparativa entre o modelo teórico e os dados reais, incluindo eventuais diferenças observadas e sua interpretação física.

4.1.1 Resultado da Transformada de Fourier no Sinal Teórico

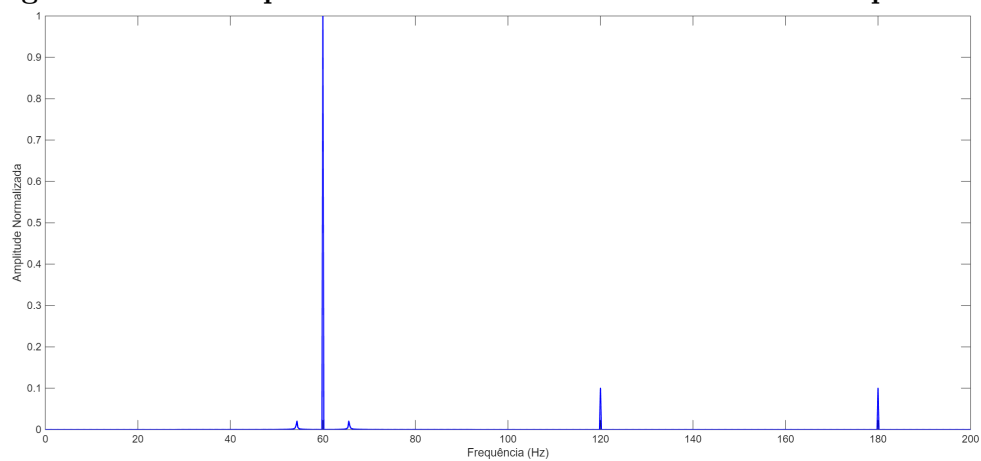
A FT foi aplicada primeiro ao sinal teórico ideal, sem nenhum harmônico adicionado. O espectro apresentado na Figura 21 mostra apenas a frequência fundamental em 60 Hz, sem bandas laterais ou componentes extras. Esse resultado confirma que o sinal ideal é estritamente senoidal e serve como referência para comparação com o sinal com defeito.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A Figura 22 mostra o espectro do sinal teórico com duas barras quebradas e o harmônicos adicionados, no intervalo de 0 Hz a 200 Hz. Nesse caso surgem novas componentes relacionadas ao escorregamento. Essas componentes representam a modulação gerada pelo defeito e não aparecem no sinal ideal.

Figura 22 – FFT aplicada ao sinal teórico com duas barras quebradas

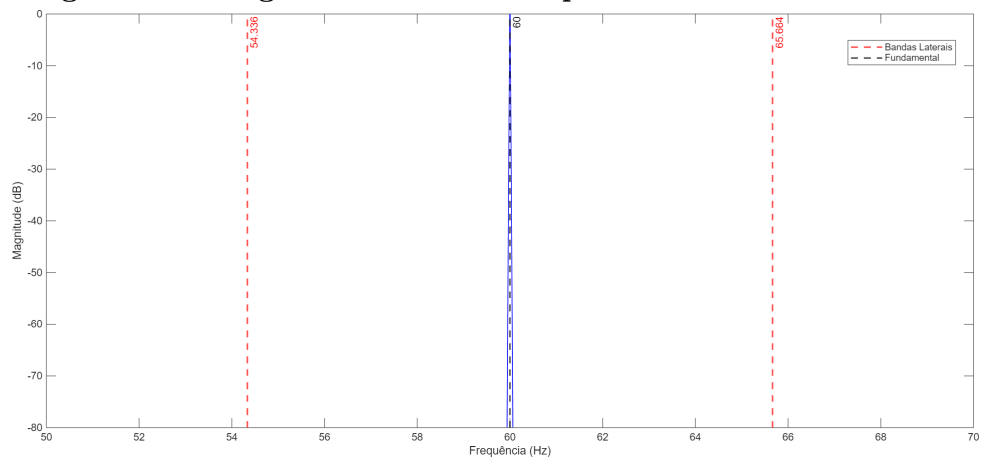


Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Além da amplitude normalizada, também foram gerados espectros na escala em decibéis. A escala em dB ajuda a destacar componentes pequenas, que podem passar despercebidas na escala linear. Isso é útil porque as bandas laterais produzidas pelo defeito têm amplitude menor que a frequência principal.

A Figura 23 mostra o espectro do sinal ideal em dB. A frequência fundamental aparece, com pico em 0 dB e não há outros picos visíveis, o que confirma que o sinal não possui componentes adicionais.

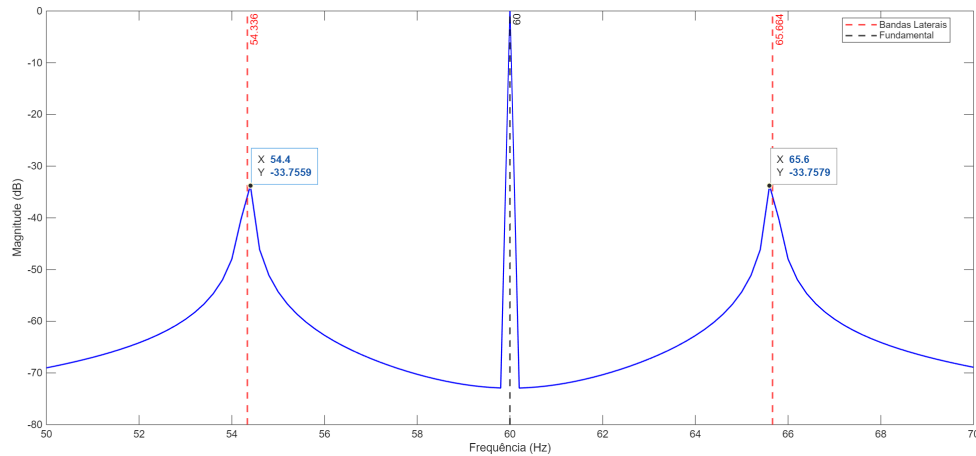
Figura 23 – Magnitude em dB do espectro do sinal teórico ideal



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A Figura 24 apresenta o espectro em dB do sinal com defeito. Aqui as bandas laterais aparecem com mais clareza, próximas de -33,76 dB, isoladas de qualquer interferência.

Figura 24 – Magnitude em dB do espectro do sinal teórico com defeito



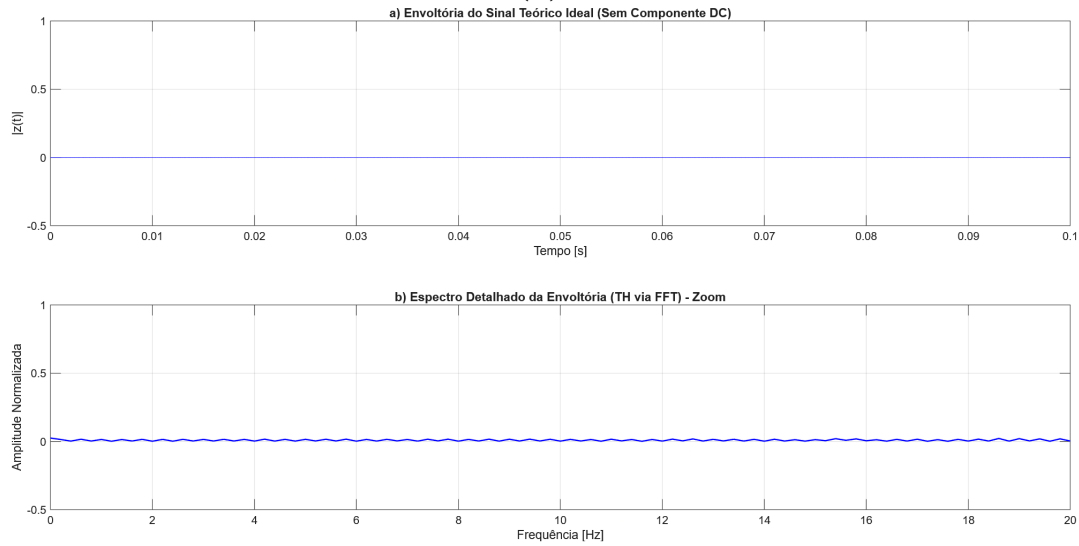
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Comparando os dois sinais teóricos, nota-se que o sinal ideal apresenta apenas a frequência fundamental tanto na escala linear quanto na escala em dB. Já o sinal com defeito mostra bandas laterais próximas da frequência principal nas duas escalas. Na escala linear elas aparecem com amplitude pequena, enquanto na escala em dB ficam bem destacadas devido à diferença entre esses picos e o nível de ruído. A apresentação em dB, portanto, facilita a identificação do defeito e confirma a presença das componentes associadas as bandas laterais.

4.1.2 Resultado da Transformada de Hilbert no Sinal Teórico

A Figura 25 apresenta o resultado da TH aplicada ao sinal teórico ideal. Observa-se a componente fundamental em 60 Hz, correspondente à frequência da rede elétrica ou de alimentação do motor. A análise foca no espectro da envoltória, que deve mostrar as frequências de modulação e não a fundamental. No caso do sinal saudável, a ausência de modulações caracteriza a condição normal de operação do motor, evidenciada pela ausência de picos no gráfico (b) do espectro detalhado.

Figura 25 – TH aplicada ao sinal teórico ideal: (a) Envoltória do sinal sem componente DC; (b) Espectro ampliado entre 0 e 20 Hz

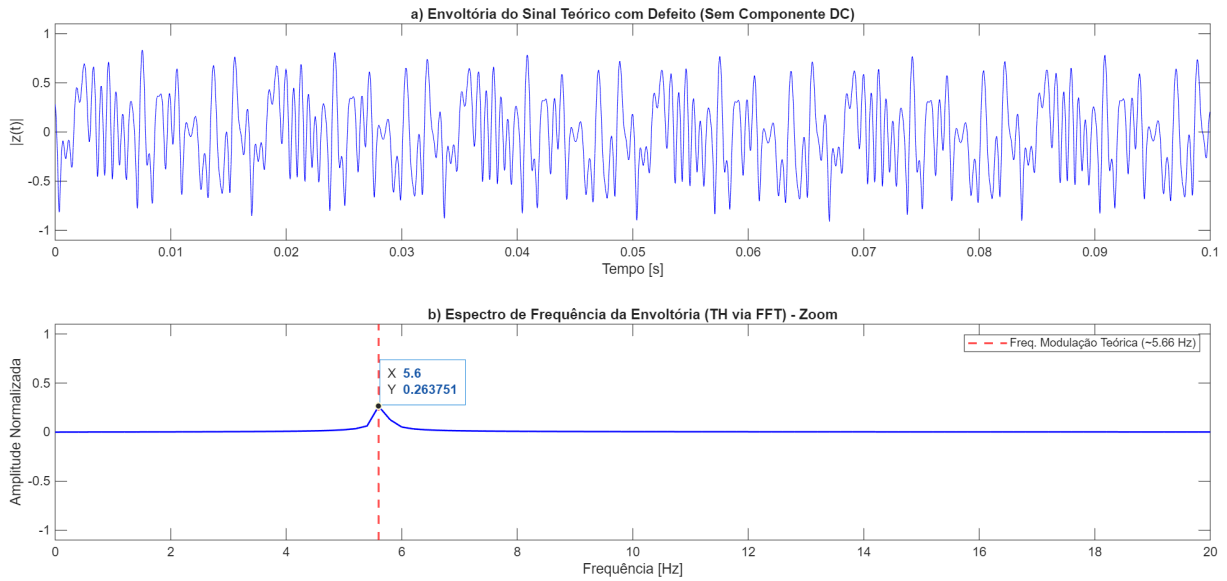


Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Na Figura 26, que corresponde ao sinal teórico com defeito, a envoltória apresenta variações periódicas de amplitude, resultado da modulação gerada pela quebra das barras do rotor. A aplicação da FFT sobre a envoltória revela o pulso da frequência de modulação, o valor esperado para esse pulso já foi definido na Equação 14 e está resumido na Tabela 3.

Essa análise evidencia que pequenas alterações periódicas na corrente do estator estão relacionadas a imperfeições físicas no rotor, como barras quebradas. A combinação da TH com a FFT forma uma ferramenta eficaz para a detecção precoce de defeitos e permite ações preventivas antes que danos maiores ocorram.

Figura 26 – TH aplicada ao sinal teórico com duas barras quebradas: (a) Envoltória do sinal sem componente DC; (b) Espectro ampliado entre 0 e 20 Hz, mostrando o pulso da frequência de modulação



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A comparação entre as Figuras 25 e 26 evidencia claramente as diferenças entre o sinal ideal e o sinal com defeito. Enquanto a envoltória do sinal ideal permanece estável, a do sinal com defeito apresenta modulação periódica, associada às bandas laterais presentes. A FFT aplicada sobre a envoltória revela o pulso da frequência de modulação (Equação 14), indicando de forma precisa a presença do defeito.

4.1.3 Resultado da Transformada de Hilbert-Huang no Sinal Teórico

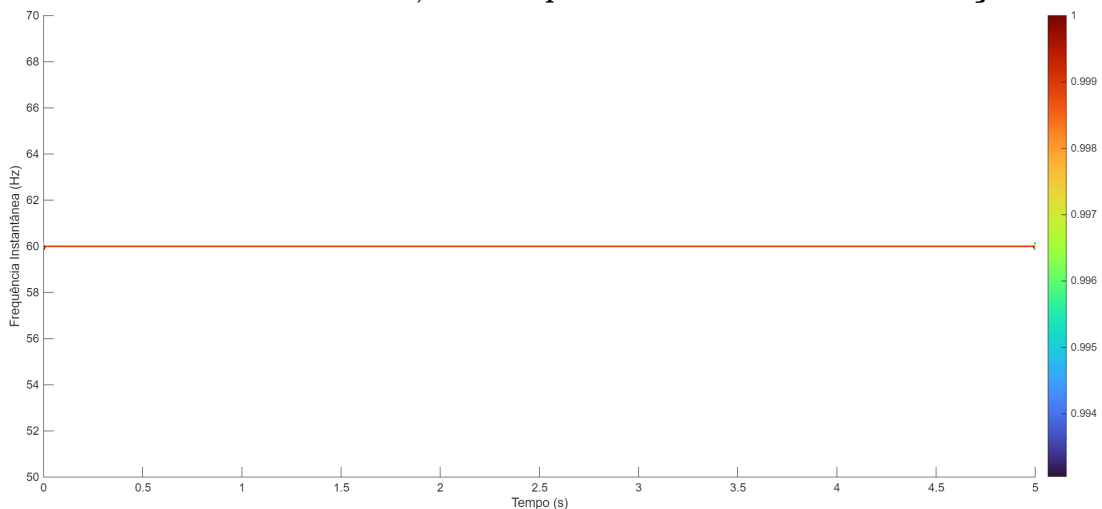
A EMD permite observar a complexidade do sinal e identificar assinaturas de defeito por meio das IMFs. No sinal ideal, apenas uma IMF relevante é gerada, apresentando amplitude constante ao longo do tempo e ausência de modulação, o que indica uma operação estável. No sinal com defeito surgem múltiplas IMFs (6 ou mais), especialmente de ordem baixa (3 a 6), que apresentam variações periódicas de amplitude e isolam a modulação gerada pela quebra das barras do rotor. A IMF de ordem mais alta (IMF 6) destaca a frequência de modulação associada ao escorregamento. Esse comportamento mostra a utilidade da HHT em separar componentes oscilatórias e evidenciar a influência do defeito ao longo do tempo.

A análise do espectro de Hilbert reforça essas diferenças. Para facilitar essa comparação, as Figuras 27 e 28 apresentam os espectros gerados para o sinal ideal e para o sinal com defeito. No sinal saudável, observa-se uma linha estável em 60 Hz, com amplitude constante durante todo o intervalo de 5 s. No sinal com defeito, a frequência deixa de formar uma linha única e passa a ocupar uma faixa que varia aproximadamente entre 55 Hz e 65 Hz. Essa variação ocorre devido à interação entre a frequência fundamental do

estator e a modulação causada pelo rotor defeituoso. A amplitude também muda ao longo do tempo, criando regiões de maior e menor intensidade, o que indica a presença de ruído e bandas laterais associadas ao defeito.

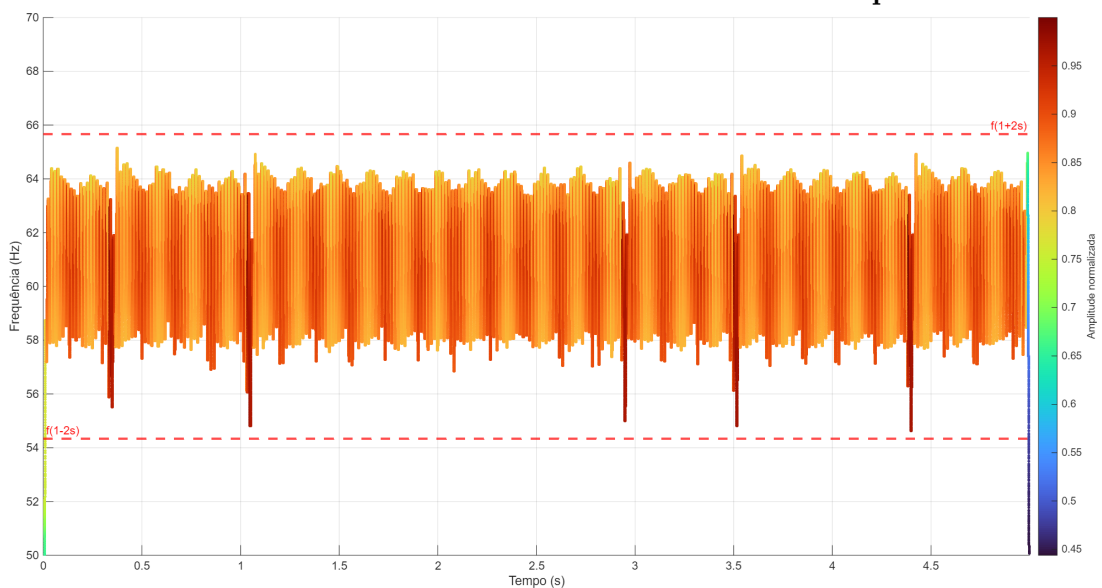
As oscilações observadas ao longo de toda a janela temporal mostram que o comportamento não é momentâneo. A repetição dos padrões de frequência e amplitude indica uma característica persistente do defeito. Esses picos e vales formam a assinatura típica do defeito de barras quebradas, visível tanto nas IMFs quanto no espectro de Hilbert.

Figura 27 – Espectro de Hilbert do sinal teórico ideal, apresentando linha estável em 60 Hz, alta amplitude e ausência de modulação



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 28 – Espectro de Hilbert do sinal teórico com defeito, mostrando oscilações periódicas de frequência, variação de amplitude e presença de bandas laterais associadas ao defeito de barras quebradas



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

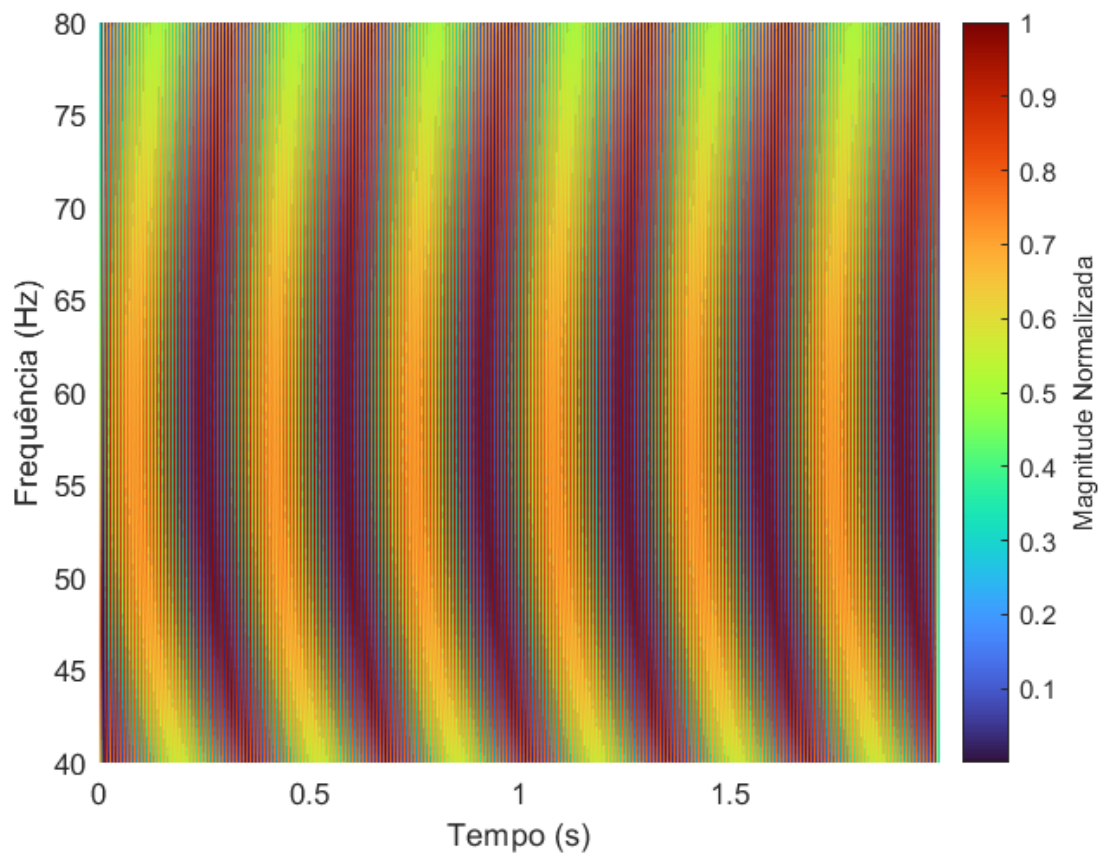
O sinal saudável mantém estabilidade nas IMFs e no espectro de Hilbert. Já o sinal com defeito apresenta modulação e uma distribuição espectral mais ampla. Essa

diferença aparece de forma clara no comportamento temporal da frequência. Além disso, a HHT mostra como essas oscilações evoluem ao longo do tempo, algo que não é possível visualizar apenas com a FFT. Essa característica torna a HHT uma ferramenta eficiente para observar o comportamento típico do defeito de barras no rotor.

4.1.4 Resultados da Transformada de Wavelet no Sinal Teórico

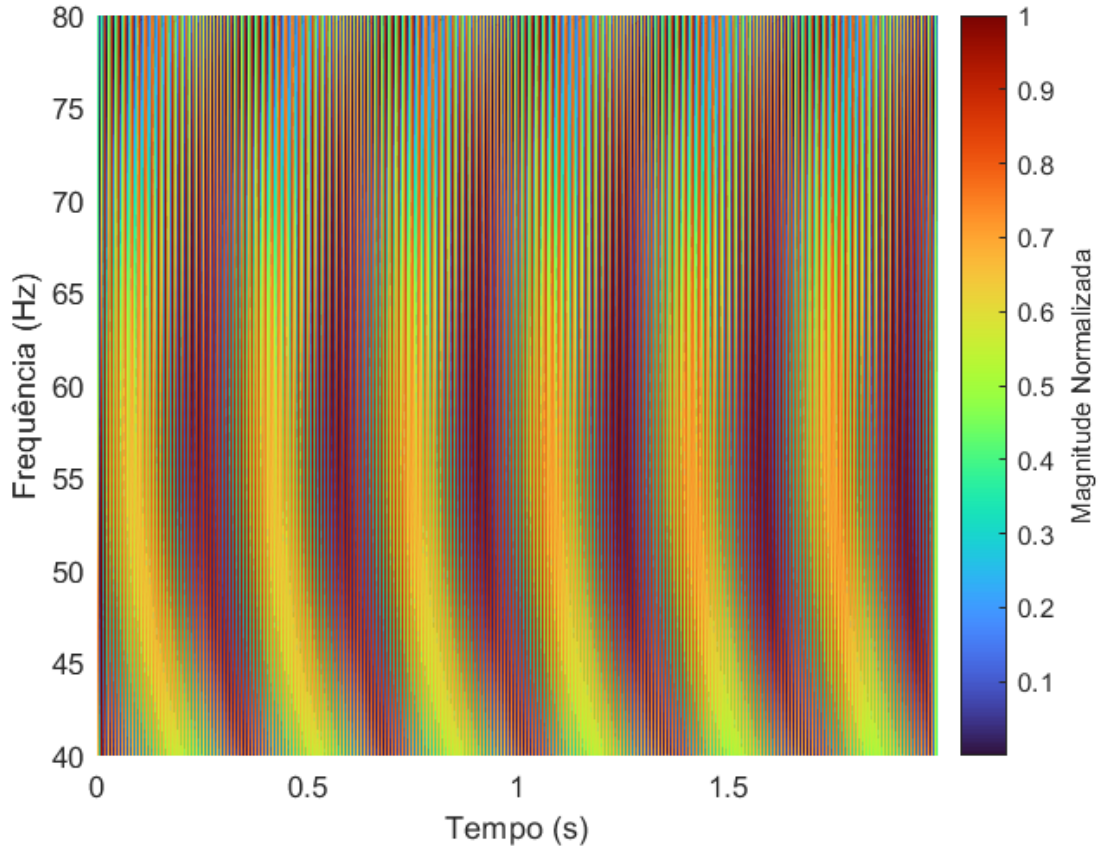
A aplicação inicial da Transformada Wavelet (TW) foi realizada diretamente sobre os sinais teóricos saudável e com defeito. Nessa primeira abordagem, a modulação causada pelo defeito tornou-se bastante evidente porque as bandas laterais foram simuladas com amplitude elevada, aproximadamente 50% da amplitude da fundamental. Esse procedimento permitiu visualizar claramente a diferença entre os sinais, além de facilitar a identificação do padrão de modulação no mapa tempo-frequência. As Figuras 29 e 30 ilustram os resultados dessa primeira aplicação.

Figura 29 – TW aplicada diretamente ao sinal teórico ideal



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 30 – TW aplicada diretamente ao sinal teórico com defeito



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Ao comparar as Figuras 29 e 30, é possível visualizar uma diferença acentuada entre os sinais. O sinal ideal apresenta energia concentrada em torno da fundamental, enquanto o sinal com defeito exibe pulsos periódicos bem definidos, permitindo a identificação imediata da modulação. Essa diferenciação ocorreu principalmente porque as bandas laterais possuíam magnitude elevada. Pela teoria apresentada no Capítulo 2, quanto menor for a amplitude das bandas laterais em relação à fundamental, mais difícil se torna identificar o efeito modulador no mapa da TW. Quando a amplitude das bandas laterais foi reduzida, o resultado dessa primeira aplicação passou a se assemelhar ao do sinal ideal, impossibilitando diferenciar as duas condições.

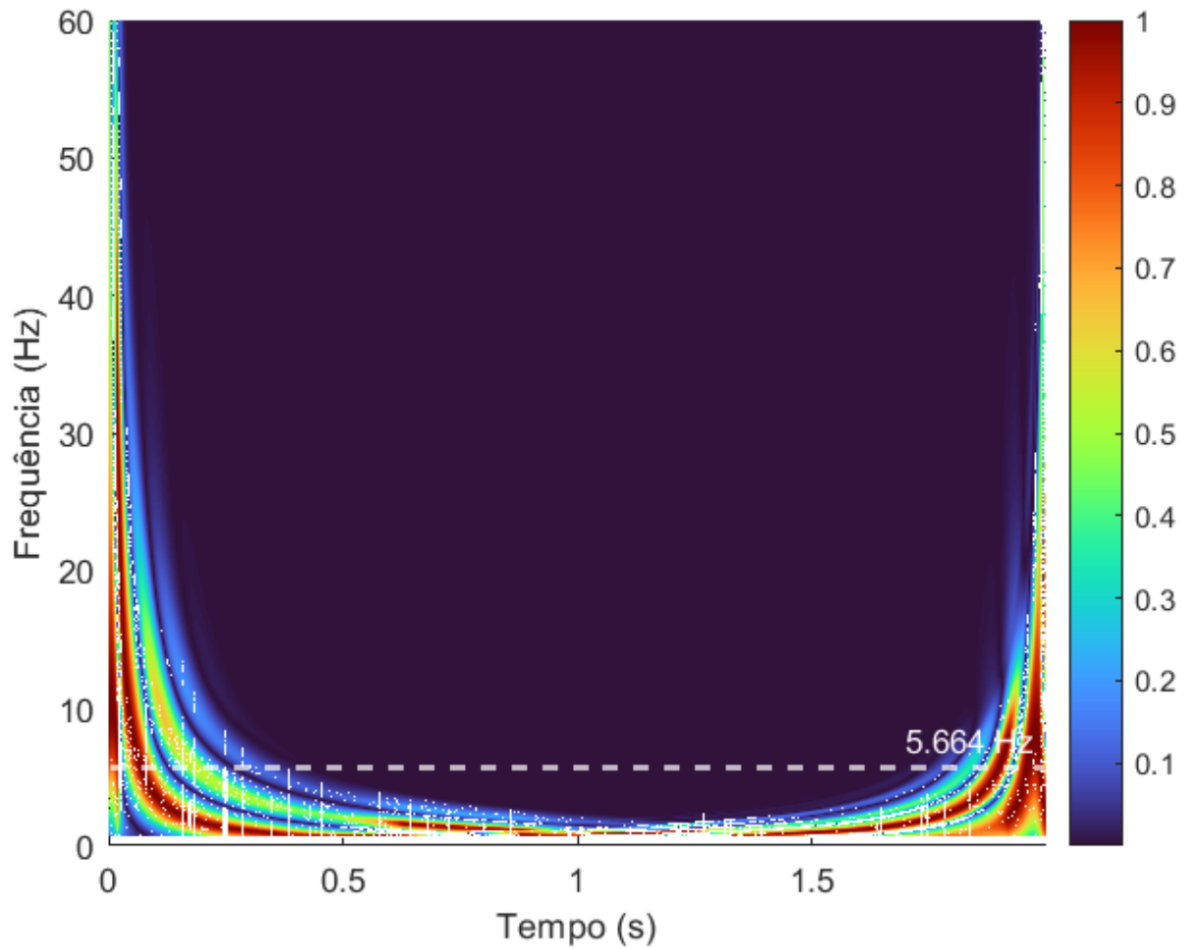
Esse comportamento também refletiu o caso real analisado, no qual as bandas laterais possuem aproximadamente 2% da amplitude da fundamental. Nessa condição, a aplicação direta da TW não evidenciou modulação, pois a energia associada ao defeito tornou-se pequena em relação à energia da componente fundamental.

Para contornar essa limitação, passou-se a utilizar a análise do envelope, que realça a componente moduladora de baixa frequência associada ao fenômeno de defeito, permitindo evidenciar oscilações que não aparecem de forma clara na aplicação direta da transformada.

As Figuras 31 e 32 apresentam os resultados desta segunda aplicação. No sinal ideal, é possível visualizar uma distribuição contínua de energia, sem padrão modulante.

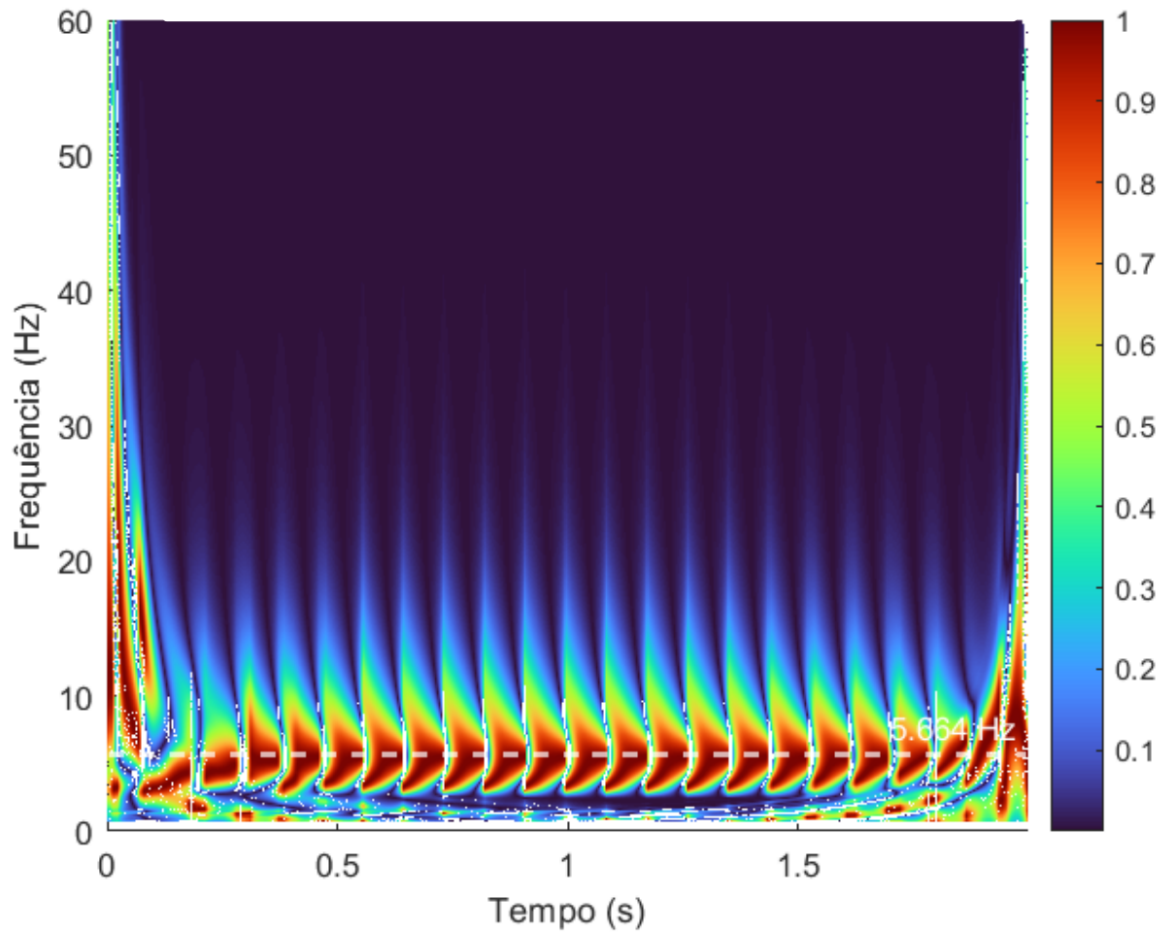
Já no sinal com defeito, surgem picos periódicos de energia, caracterizando uma frequência moduladora próxima de 5,6 Hz, coerente com os parâmetros do defeito simulado. Essa frequência está de acordo com os resultados obtidos na análise de envelope e no espectro de Hilbert, evidenciando a consistência entre as diferentes técnicas de processamento de sinais aplicadas.

Figura 31 – TW aplicada ao envelope do sinal teórico ideal



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 32 – TW aplicada ao envelope do sinal teórico com defeito



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Comparando as Figuras da primeira forma de aplicação com as da segunda, é possível visualizar que a abordagem inicial produzia um contraste artificial entre os sinais devido à amplitude exagerada das bandas laterais. Já a aplicação da TW ao envelope resultou em um comportamento compatível com a baixa magnitude das bandas laterais e coerente com as observações experimentais.

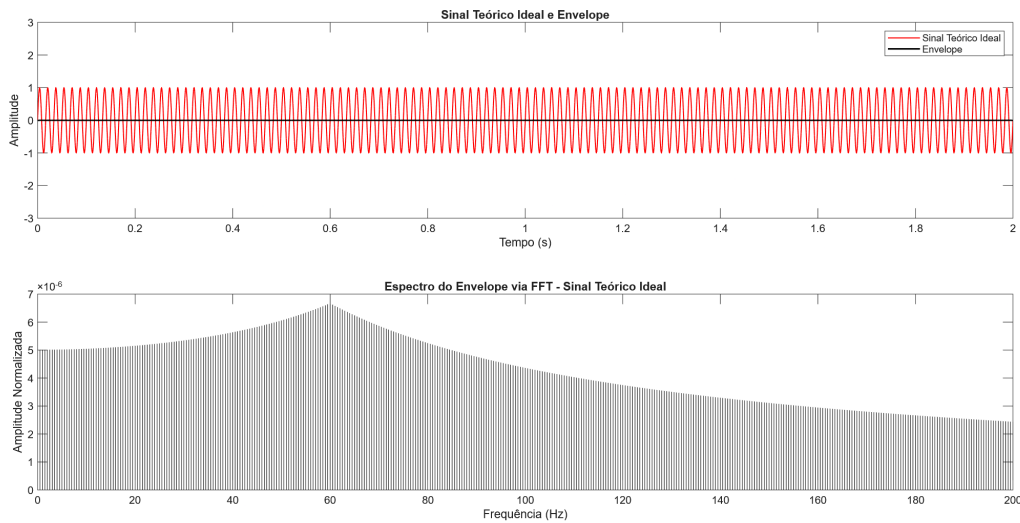
Por fim, a comparação entre as Figuras corretas (Figuras 31 e 32) evidencia o comportamento esperado: o sinal ideal mantém energia contínua e não modulada, enquanto o sinal com defeito apresenta picos periódicos associados ao mecanismo de modulação introduzido pelo defeito. Essa abordagem mostrou-se essencial para diferenciar adequadamente as duas condições considerando magnitudes realistas das bandas laterais, alinhando os resultados simulados, teóricos e experimentais e reforçando a coerência entre as técnicas de análise de sinais.

4.1.5 Resultado da Análise do Envelope no Sinal Teórico

A análise do envelope foi aplicada para identificar a frequência de modulação ($f_{mod} = 2sf_0$), associada às variações de amplitude causadas por defeitos no rotor. Essa técnica evidencia componentes de baixa frequência que surgem quando há variações periódicas na energia do sinal, permitindo a detecção precoce de defeitos estruturais.

O sinal teórico foi simulado por 2 s, tempo suficiente para garantir boa visualização do comportamento do sinal e de sua envoltória. A Figura 33 mostra o sinal ideal e seu envelope. No domínio do tempo, observa-se uma forma de onda senoidal estável, com envelope praticamente constante e de baixa amplitude, indicando ausência de modulação. No domínio da frequência, obtido através da FFT, o espectro do envelope apresenta amplitude significativamente baixa ($\sim 10^{-6}$) e sem picos definidos, confirmando a condição normal de operação do motor.

Figura 33 – Análise do envelope do sinal teórico ideal: (superior) forma de onda senoidal e envelope praticamente constante; (inferior) espectro do envelope com baixa amplitude e ausência de picos característicos de defeito



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

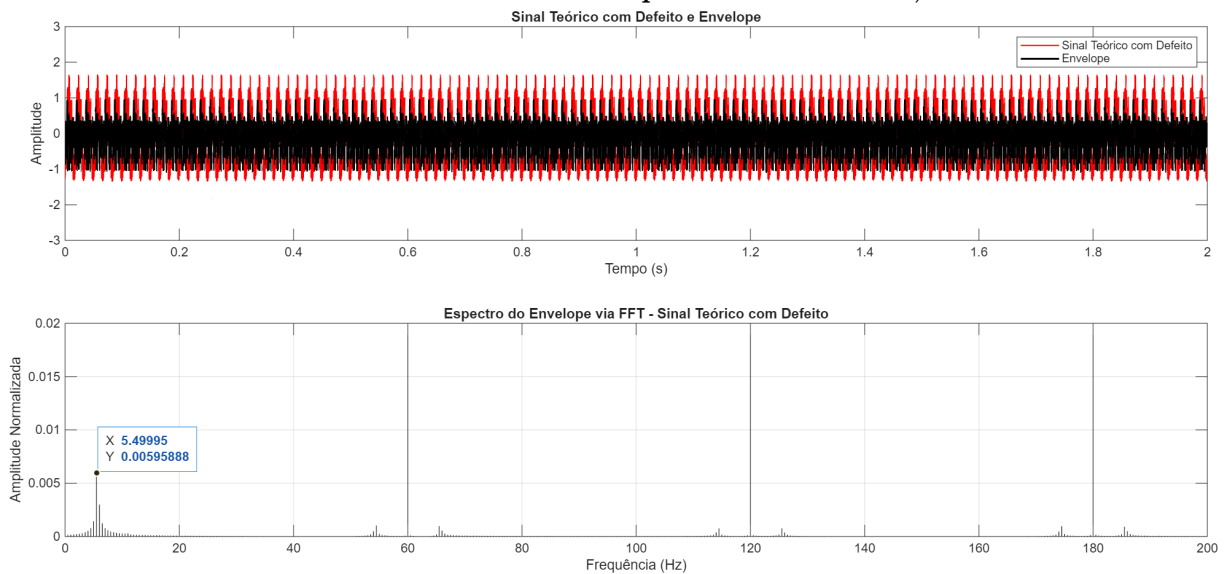
Vale destacar que a amplitude do envelope do sinal ideal é extremamente baixa ($\sim 10^{-6}$), enquanto no sinal com defeito atinge valores da ordem de 10^{-3} . Essa diferença decorre do fato de que o sinal teórico ideal é uma senoide perfeita, sem ruído ou modulação, resultando em um envelope significativamente pequeno. Já o sinal com defeito apresenta modulação real, gerando picos de maior amplitude, permitindo a detecção da frequência característica de defeito.

A Figura 34 apresenta o sinal teórico com defeito e seu envelope. No domínio do tempo, a forma de onda apresenta variações periódicas de amplitude, com picos regulares, resultado da modulação causada pelo defeito no rotor. O envelope acompanha essas

oscilações, evidenciando impactos periódicos e variações cíclicas de energia, característica do defeito de barras quebradas.

No domínio da frequência, o espectro do envelope apresenta amplitude mais elevada ($\sim 10^{-3}$), com picos bem definidos e equidistantes. O principal pico ocorre em aproximadamente 5,6 Hz, com múltiplos próximos de 60 Hz, 120 Hz e 180 Hz, correspondendo à frequência característica do defeito e refletindo a taxa de repetição dos impactos no rotor. A presença desses harmônicos confirma a modulação periódica do sinal.

Figura 34 – Análise do envelope do sinal teórico com defeito: (superior) forma de onda modulada e envelope com picos periódicos; (inferior) espectro do envelope com picos harmônicos equidistantes e frequência característica de defeito em aproximadamente 5,6 Hz



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Os resultados confirmam que a análise do envelope é eficiente para identificar a frequência de modulação associada aos defeitos no rotor. A presença de picos periódicos no tempo e de harmônicos bem definidos no espectro evidencia a modulação do sinal e permite detectar o defeito simulado de forma clara. Essa técnica complementa a TH e é fundamental para monitoramento preditivo de motores, possibilitando a identificação precoce de defeitos mesmo em sinais ruidosos.

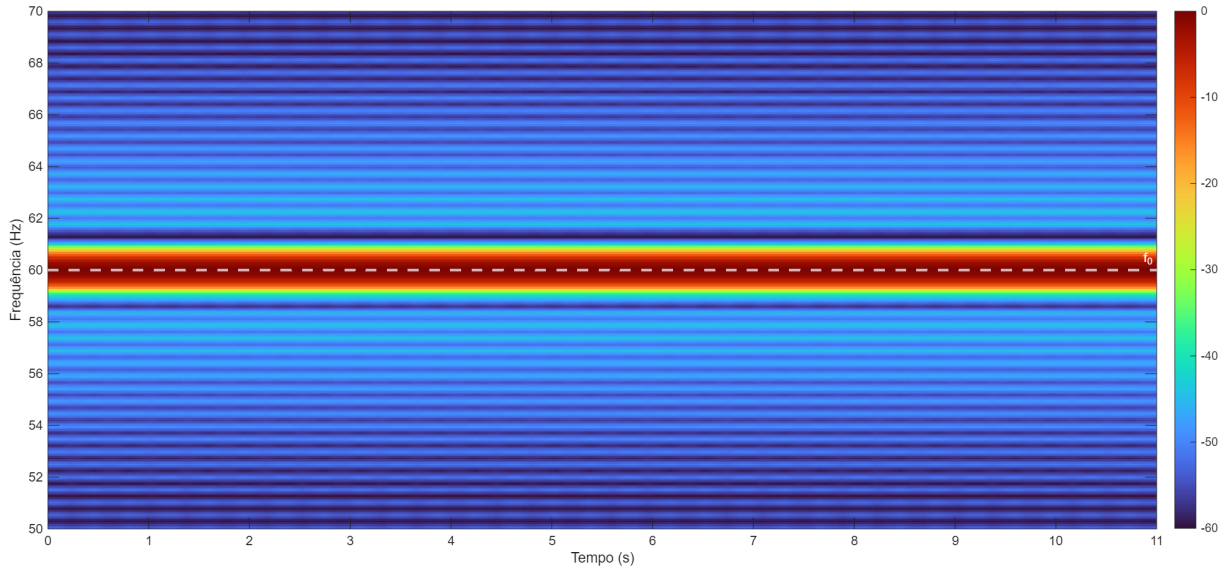
4.1.6 Resultado do Espectrograma no Sinal Teórico

O espectrograma foi utilizado para analisar simultaneamente o comportamento do sinal em função do tempo e da frequência, permitindo identificar variações associadas aos defeitos. Essa representação tempo-frequência complementa as análises anteriores, destacando modulações que não são evidentes apenas no domínio do tempo ou da frequência.

Na Figura 35 é apresentado o espectrograma do sinal teórico ideal. Observa-se que quase toda a energia do sinal permanece concentrada na frequência fundamental em torno

de 60 Hz, com intensidade uniforme ao longo do tempo, refletindo estabilidade e ausência de defeitos.

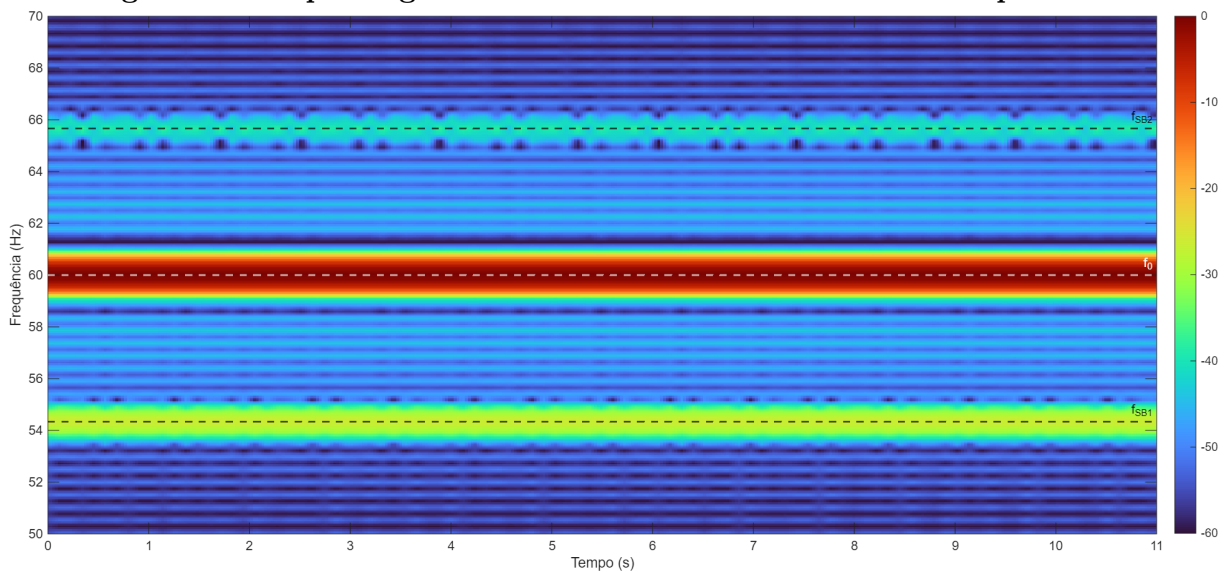
Figura 35 – Espectrograma do sinal teórico ideal



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A Figura 36 mostra o espectrograma do sinal teórico com defeito de duas barras do rotor. Além da faixa principal em 60 Hz, surgem bandas laterais de menor intensidade, simetricamente distribuídas acima e abaixo da frequência fundamental. Essas bandas refletem a modulação introduzida pelo escorregamento do rotor, característica típica do defeito de barras quebradas.

Figura 36 – Espectrograma do sinal teórico com duas barras quebradas



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A comparação entre os espectrogramas evidencia que, no sinal saudável, a energia permanece concentrada em f_0 , enquanto no sinal com defeito ocorre distribuição da energia

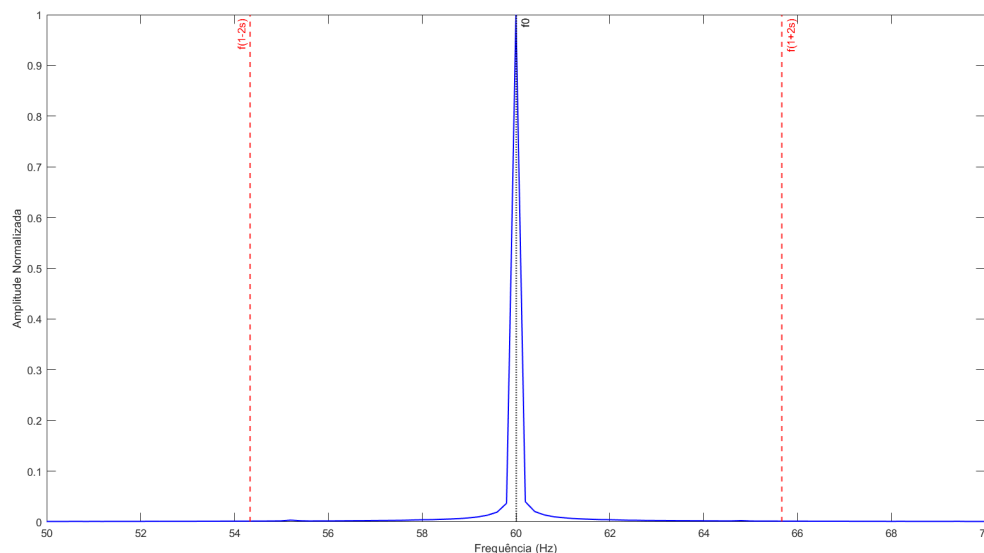
entre a frequência fundamental e as bandas laterais. A diferença de aproximadamente 5,6 Hz entre f_0 e cada banda lateral corresponde a um escorregamento de 4,72%, indicando a presença consistente do defeito ao longo do tempo, como esperado. Esses resultados confirmam a eficácia do espectrograma para detectar e acompanhar defeitos em MITs.

4.2 Resultados do Sinal Real

4.2.1 Resultado da Transformada de Fourier no Sinal Real

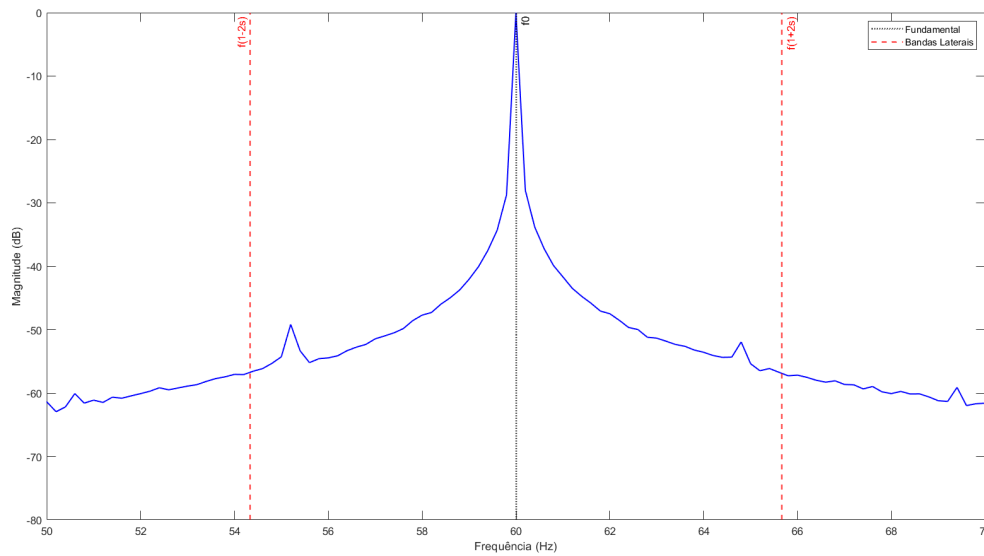
A análise do sinal real saudável mostra um comportamento coerente com a referência teórica. A energia permanece concentrada na frequência fundamental de 60 Hz, sem a presença de bandas laterais. A Figura 37 apresenta o espectro completo obtido pela aplicação da FFT, enquanto a Figura 38 mostra sua representação em dB, onde conseguimos ver o aparecimento de pequenos picos não vistos no sinal ideal. Isso ocorre devido a natureza real do sinal, pois o rotor gaiola de esquilo não é completamente contínuo, ele possui espaços entre suas barras, o que causa um efeito similar ao de barras quebradas, porém em menor magnitude. A ampliação do intervalo de 0 a 200 Hz, exibida na Figura 39, confirma a ausência de componentes adicionais próximas da fundamental, como esperado para um motor operando sem defeitos.

Figura 37 – FFT do sinal real em condição normal de operação



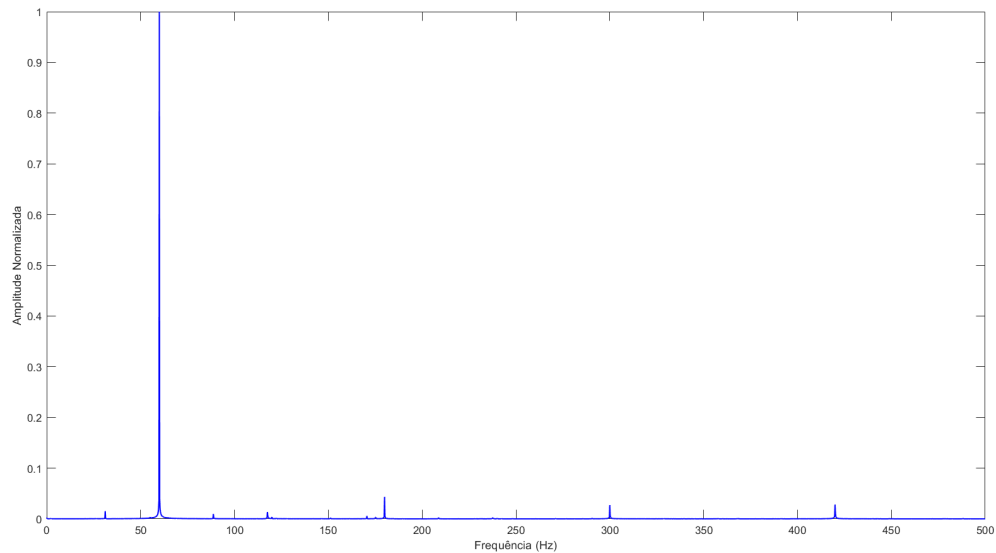
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 38 – Espectro em magnitude (dB) do sinal real saudável



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 39 – Ampliação do espectro de 0 a 200 Hz do sinal real saudável

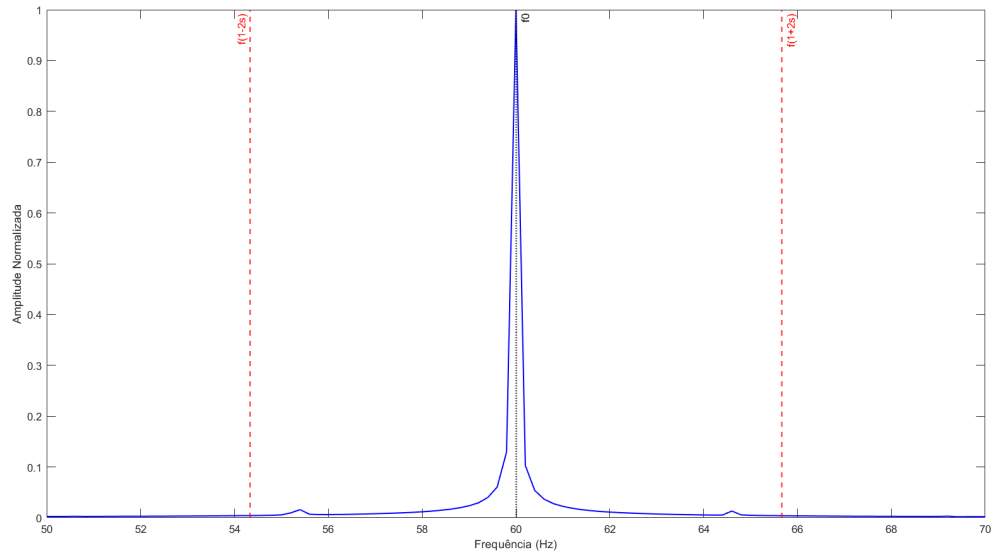


Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

No sinal real com defeito de barras, surgem as mesmas assinaturas previstas no estudo teórico. Duas bandas laterais aparecem próximas às frequências calculadas anteriormente, agora em aproximadamente 55,4 Hz e 64,6 Hz. As Figuras 40, 41 e 42 mostram o espectro completo obtido pela FFT, o espectro em dB e a ampliação de 0 a 200 Hz, respectivamente. Na Figura 42 também é importante comentar sobre o aparecimento das harmônicas e que elas não impactam a nossa análise.

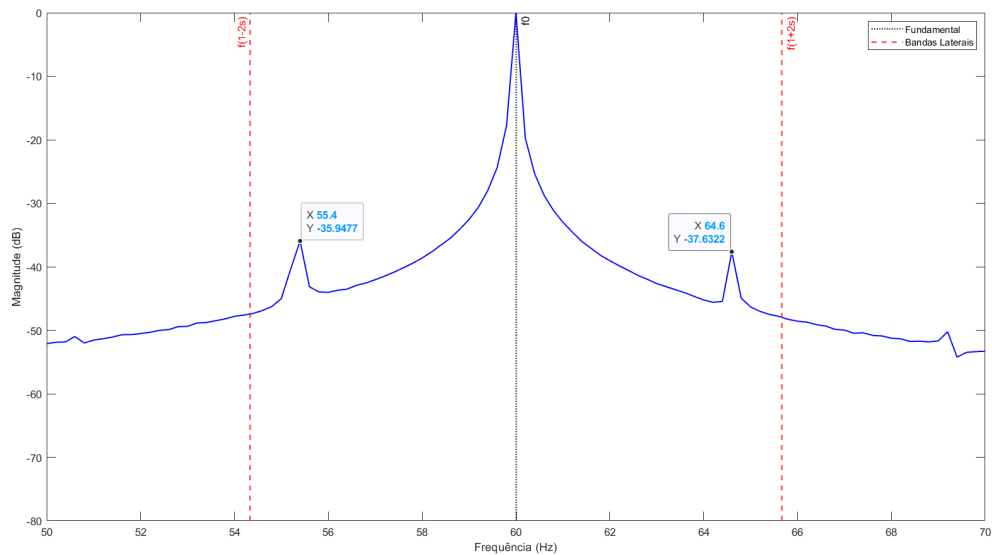
Além das bandas laterais, observa-se um pico adicional de baixa amplitude na faixa de 30–40 Hz, ausente no sinal saudável. Embora pequeno, esse componente reforça a diferença entre as condições de operação.

Figura 40 – FFT do sinal real com defeito de barras no rotor



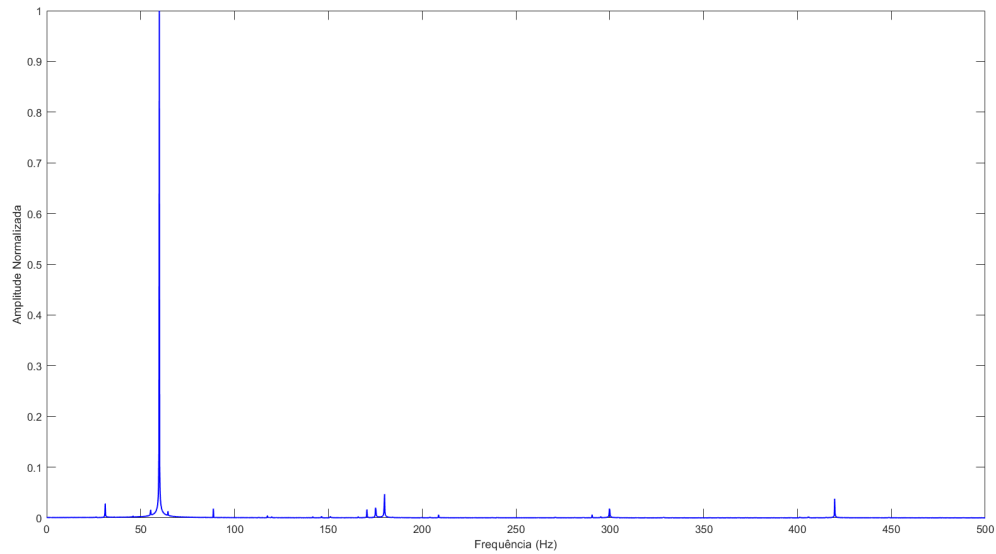
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 41 – Espectro em magnitude (dB) do sinal real com defeito



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 42 – Ampliação do espectro de 0 a 200 Hz do sinal real com defeito



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Na escala linear, as bandas laterais apresentam amplitude normalizada de aproximadamente 0,0159 (inferior) e 0,0131 (superior), valores compatíveis com o sinal teórico e coerentes com a modulação típica do defeito. Na escala em dB, essas componentes aparecem em torno de -36 dB, destacando-se do ruído de fundo.

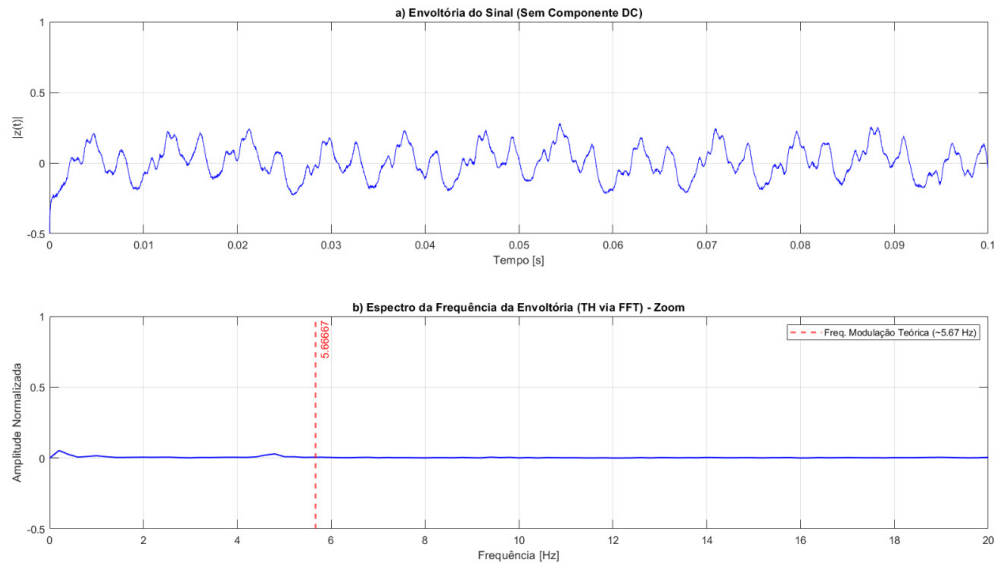
A separação entre as bandas laterais indica um escorregamento real de aproximadamente 3,9%, valor próximo ao previsto teoricamente de 4,72%. Esse resultado reforça a consistência entre o comportamento observado no sinal real e a modelagem teórica do defeito de barras quebradas.

É importante destacar que a FT fornece uma representação espectral estática, baseada na energia média ao longo da janela analisada. Portanto, embora seja apropriada para comparação com o espectro teórico, sua capacidade de evidenciar a modulação de baixa frequência é limitada quando a amplitude das bandas laterais é reduzida, como ocorre em sinais experimentais.

4.2.2 Resultado da Transformada de Hilbert no Sinal Real

A aplicação da TH aos sinais reais permite avaliar como a modulação causada pelo defeito aparece em condições práticas, onde ruído, variações de carga e pequenas oscilações de velocidade influenciam a resposta medida. As Figuras 43 e 44 apresentam os resultados obtidos para o sinal saudável e o sinal com defeito.

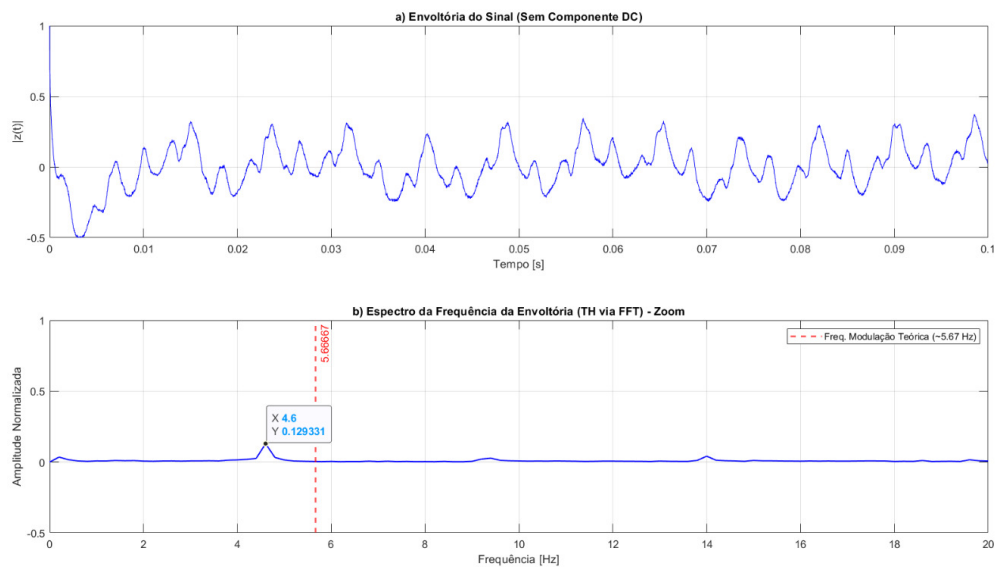
Figura 43 – TH aplicada ao sinal real sem defeito: (a) Envoltória do sinal real saudável; (b) Ampliação do espectro entre 0 e 20 Hz



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

No sinal real saudável, a envoltória apresenta baixa amplitude e oscilações discretas, comportamento esperado devido ao ruído de medição e às pequenas flutuações normais da operação. O espectro apresenta apenas o pico dominante em 120 Hz e harmônicos associados ao sistema elétrico, sem componentes relevantes na faixa de 0 a 20 Hz.

Figura 44 – TH aplicada ao sinal real com defeito de barras quebradas: (a) Envoltória do sinal; (b) Ampliação do espectro entre 0 e 20 Hz



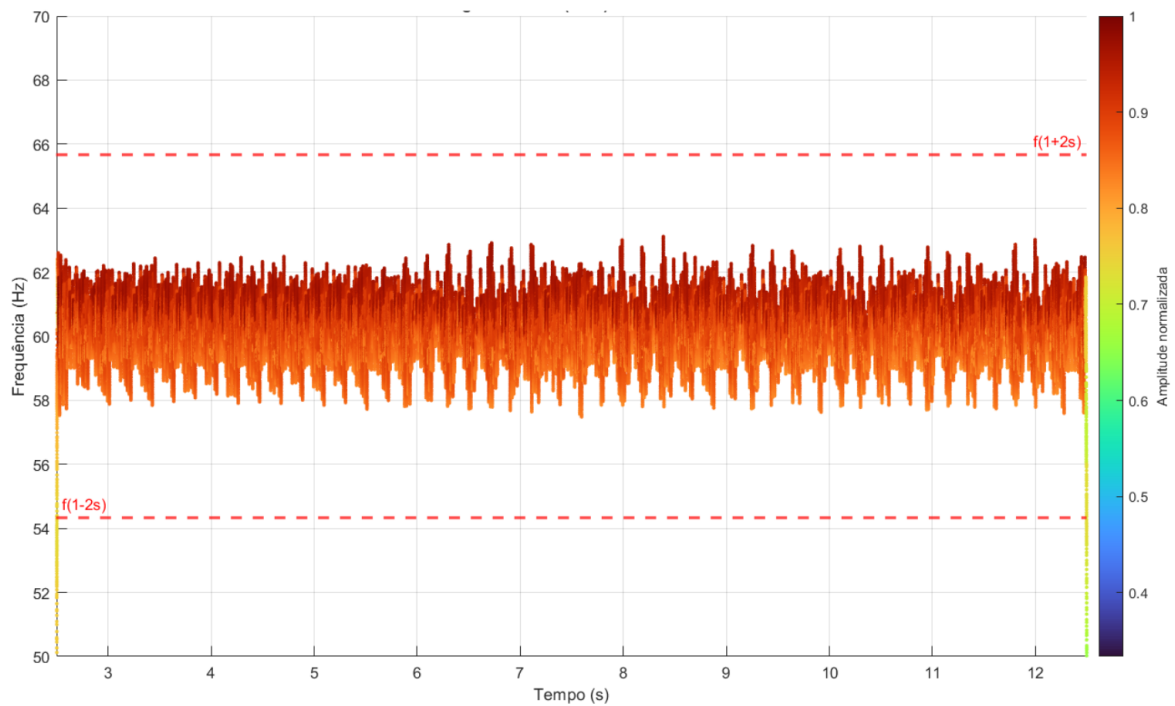
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Para o sinal com defeito, a envoltória apresenta amplitude significativamente maior, refletindo a modulação induzida pela assimetria no rotor. O espectro mostra um pico bem definido em aproximadamente 4,6 Hz, valor obtido a partir dos dados reais. O valor teórico previsto era de cerca de 5,6 Hz.

4.2.3 Resultado da Transformada de Hilbert-Huang no Sinal Real

A Figura 45 apresenta o espectro da HHT aplicado ao sinal real saudável. A frequência instantânea permanece concentrada entre aproximadamente 58 Hz e 63 Hz.

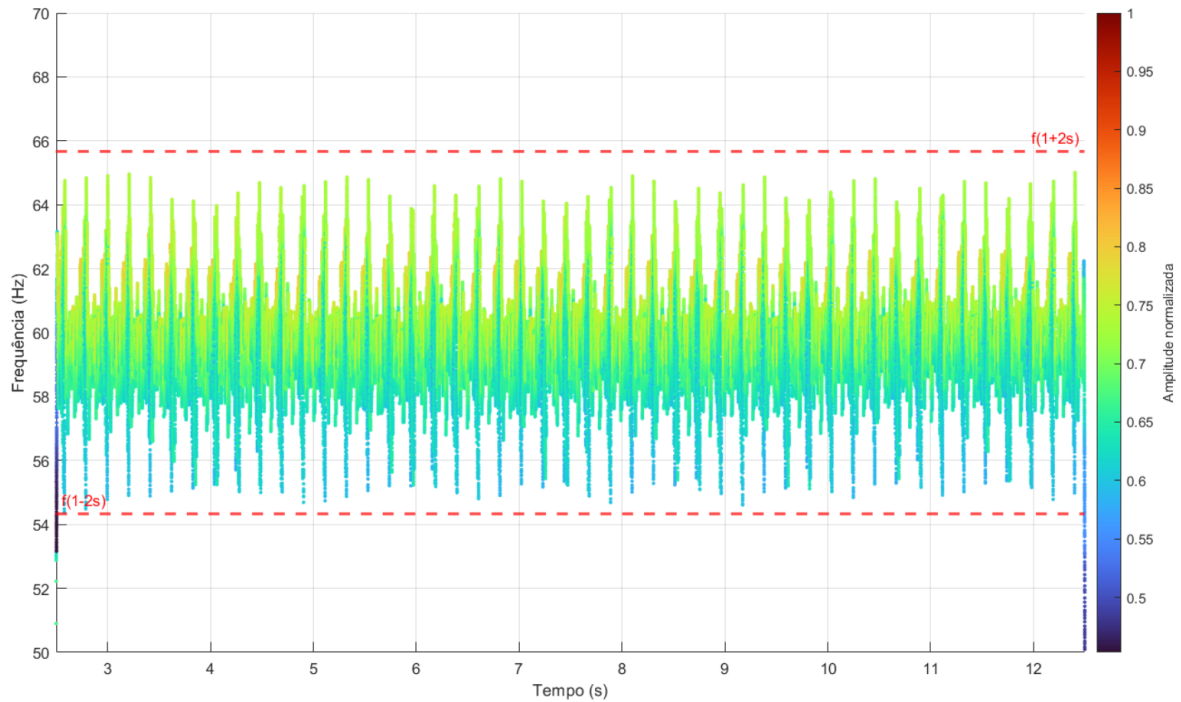
Figura 45 – HHT aplicada ao sinal real saudável



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A Figura 46 apresenta o espectro da HHT aplicado ao sinal real com defeito. A faixa de frequência se amplia de 54 Hz a 65 Hz e a energia passa a se distribuir em bandas finas que oscilam no tempo, refletindo a modulação associada ao escorregamento.

Figura 46 – HHT aplicada ao sinal real com defeito de barras quebradas



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Como a HHT depende das IMFs obtidas por decomposição adaptativa, sua representação tempo–frequência não é diretamente comparável ao espectro estático da FFT.

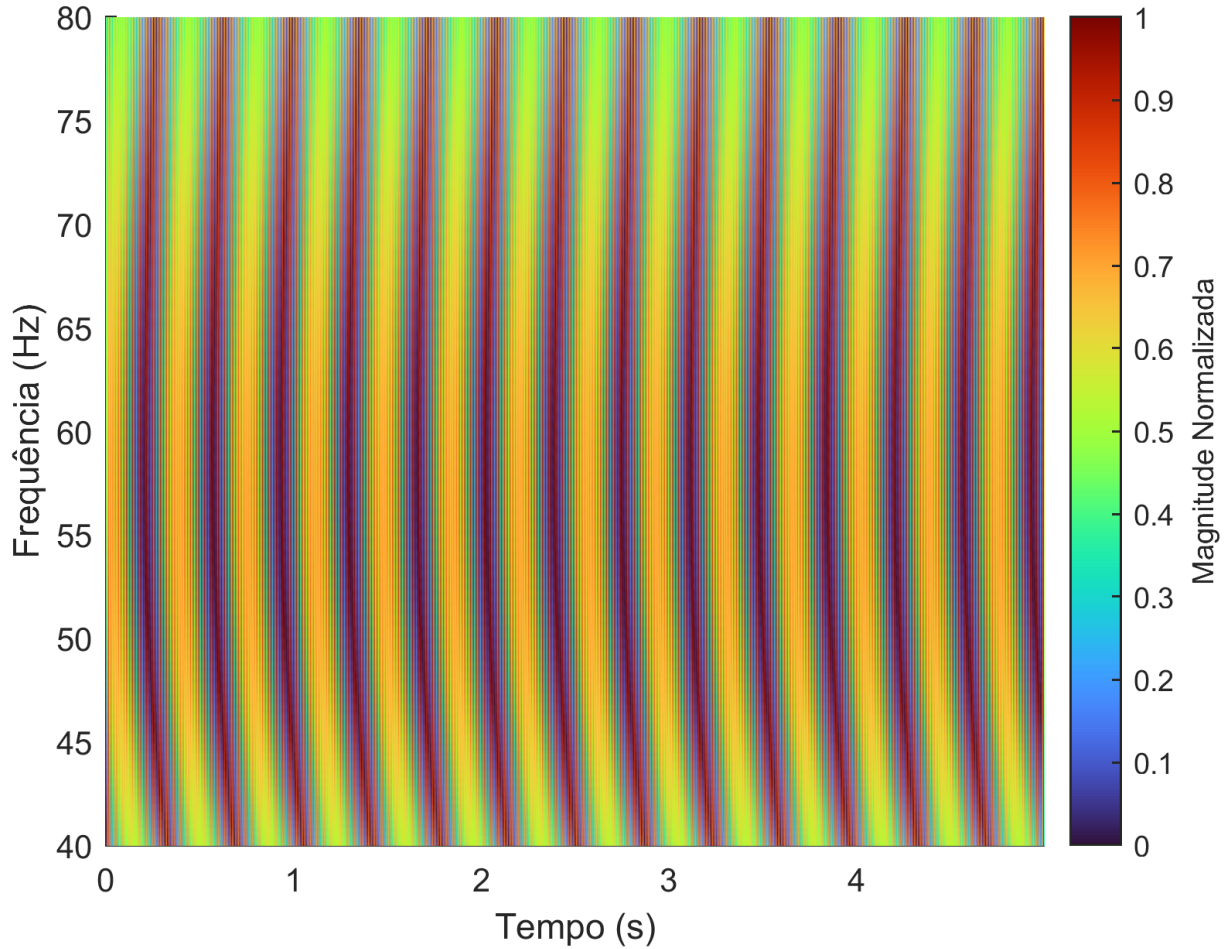
4.2.4 Resultados da Transformada de Wavelet no Sinal Real

A aplicação inicial da TW ao sinal real seguiu o mesmo procedimento adotado para o sinal teórico. Entretanto, conforme amplamente documentado em estudos experimentais com máquinas de indução, a baixa amplitude das bandas laterais dificulta a evidência da modulação quando a TW é aplicada diretamente ao sinal bruto. Essa limitação é observada em diagnósticos baseados em corrente, nos quais a energia associada às componentes moduladas é significativamente inferior à energia da fundamental, fenômeno discutido em trabalhos clássicos de detecção de barras quebradas e curtos entre espiras (Suetake, 2012; Santos, 2008; Zapparoli *et al.*, 2021; Silva, 2019).

Essa dificuldade decorre da própria natureza da decomposição em multi-escala. Estudos experimentais mostram que, em motores de indução, a energia do sinal tende a concentrar-se nas escalas associadas à componente fundamental, enquanto moduladores de baixa amplitude, característicos de defeitos incipientes, são distribuídos em coeficientes de menor intensidade (Silva; Caramori; Costa, 2023; Menegat, 2014; Reis *et al.*, 2016). Assim, quando a modulação representa uma fração reduzida da amplitude total, a TW aplicada diretamente ao sinal tende a mascarar os efeitos moduladores.

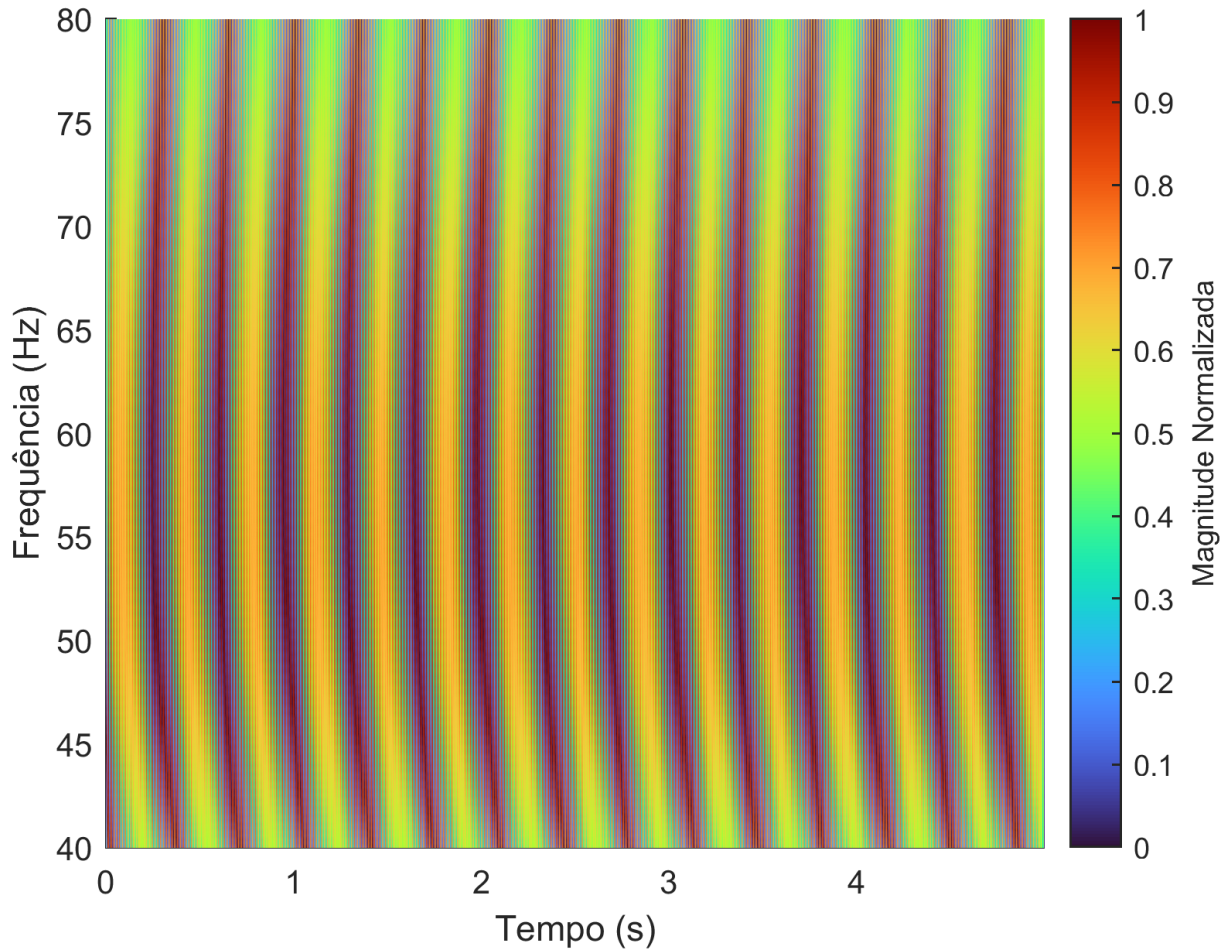
Esse comportamento está alinhado com análises de corrente e vibração em motores industriais, nas quais a identificação de assinaturas fracas exige técnicas capazes de isolar previamente a componente moduladora (da Cruz, 2004; S. Moreira *et al.*, 2020; Bando, 2024). A partir dessas constatações, explica-se porque a TW direta no sinal real produz mapas tempo-escala com fraca distinção entre condição saudável e defeituosa, como representado nas Figuras 47 e 48.

Figura 47 – TW aplicada diretamente ao sinal real saudável



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 48 – TW aplicada diretamente ao sinal real com defeito



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A reconstrução espectral da TW ocorre no domínio tempo-escala, não sendo equivalente ao espectro de Fourier. A concentração da energia nas escalas dominantes explica o EQM elevado observado na análise quantitativa, conforme também relatado em estudos recentes sobre defeitos em motores (Silva; Caramori; Costa, 2023; Menegat, 2014; Reis *et al.*, 2016).

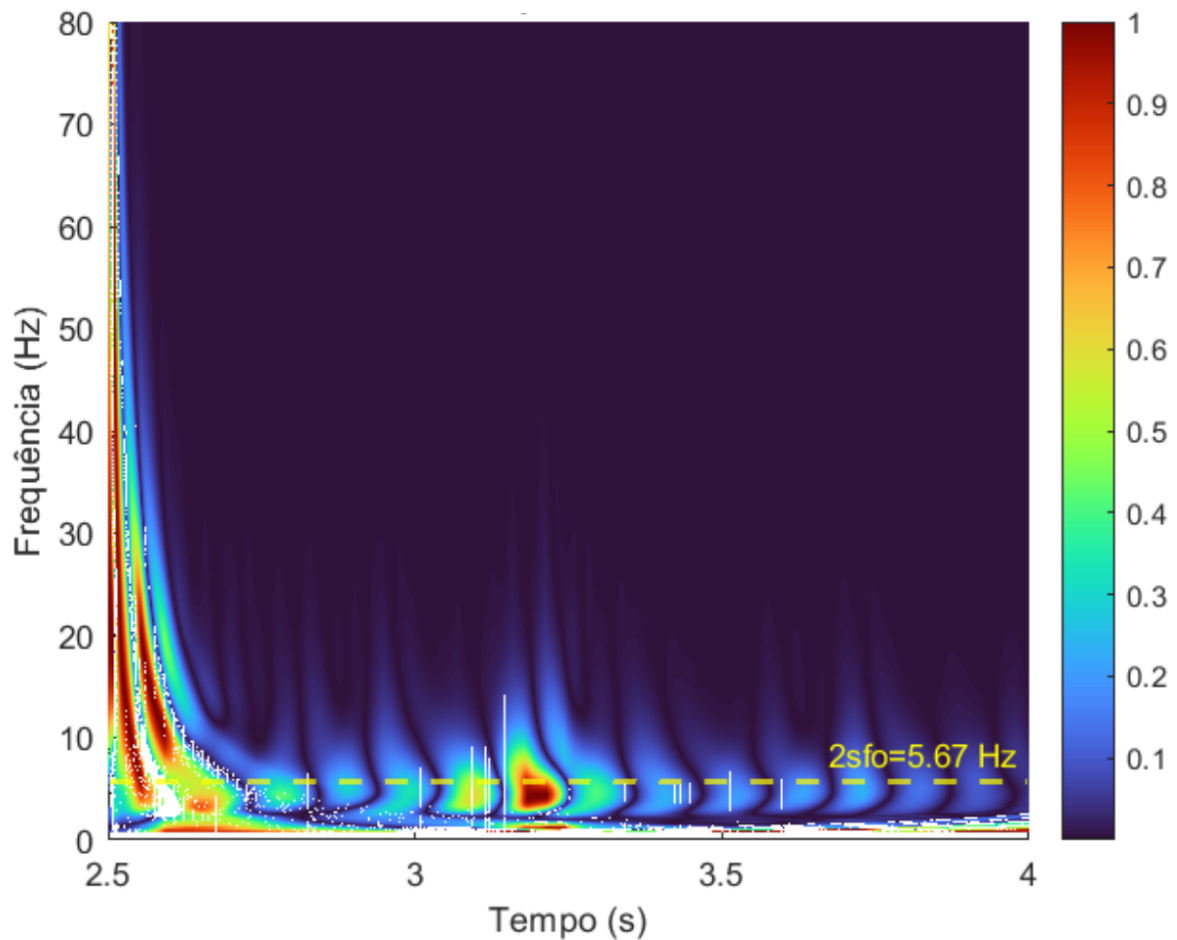
Para contornar essa limitação, aplica-se uma etapa de demodulação via envelope antes da TW. A demodulação é amplamente recomendada em diagnósticos baseados em corrente, pois permite isolar a função de amplitude do sinal modulado, facilitando a visualização de assinaturas periódicas associadas aos defeitos (Zaparoli *et al.*, 2021; Oliveira Zaparoli, 2018; Barcelos; Mazonni; Cardoso, 2019). Esses autores demonstram que a envoltória captura diretamente as variações lentas de amplitude, onde a modulação causada pela quebra de barras se manifesta, eliminando a competição energética com a componente fundamental.

Além disso, trabalhos especializados em defeitos incipientes descrevem que a aplicação de técnicas tempo-frequência sobre o envelope amplifica significativamente a sensibilidade do método (Silva, 2019; da Cruz, 2004; Leão, 2022). A literatura nacional também demonstra que a extração da envoltória é etapa essencial quando se busca revelar

componentes moduladoras mascaradas pela fundamental, tanto em defeitos de barras quanto em defeitos de rolamentos (Reis *et al.*, 2016; Barcelos; Mazonni; Cardoso, 2019; Souza, 2022).

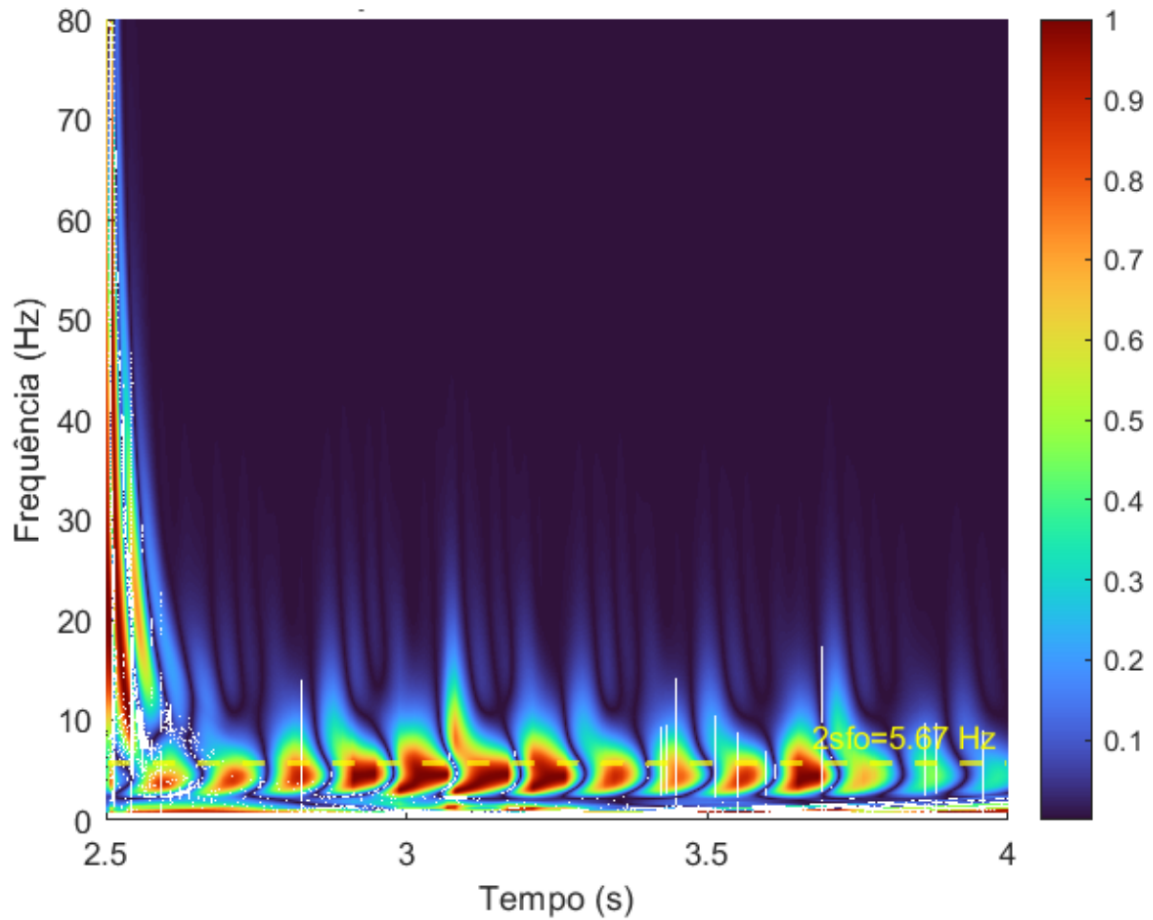
Assim, ao aplicar a TW sobre o envelope, e não sobre o sinal original, obtém-se um mapa tempo-frequência mais eficaz na detecção da oscilação moduladora produzida pelo defeito, como representado nas Figuras 49 e 50.

Figura 49 – TW aplicada ao envelope do sinal real saudável



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 50 – TW aplicada ao envelope do sinal real com defeito



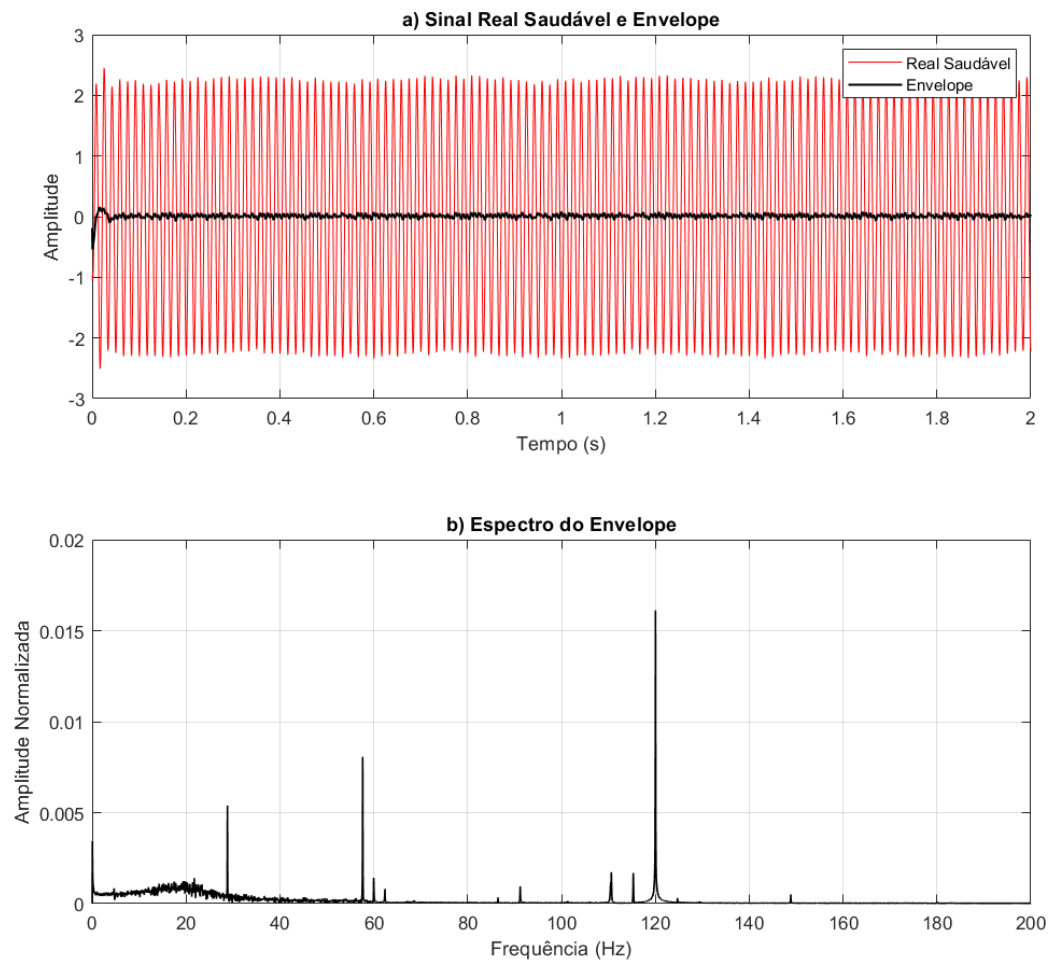
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A aplicação da TW ao envelope evidenciou pulsos periódicos consistentes com a frequência de modulação observada nas demais análises, garantindo coerência entre os métodos e demonstrando, com base sólida na literatura nacional e internacional, que a demodulação constitui etapa indispensável na análise wavelet de defeitos de baixa energia em motores de indução.

4.2.5 Resultado da Análise do Envelope no Sinal Real

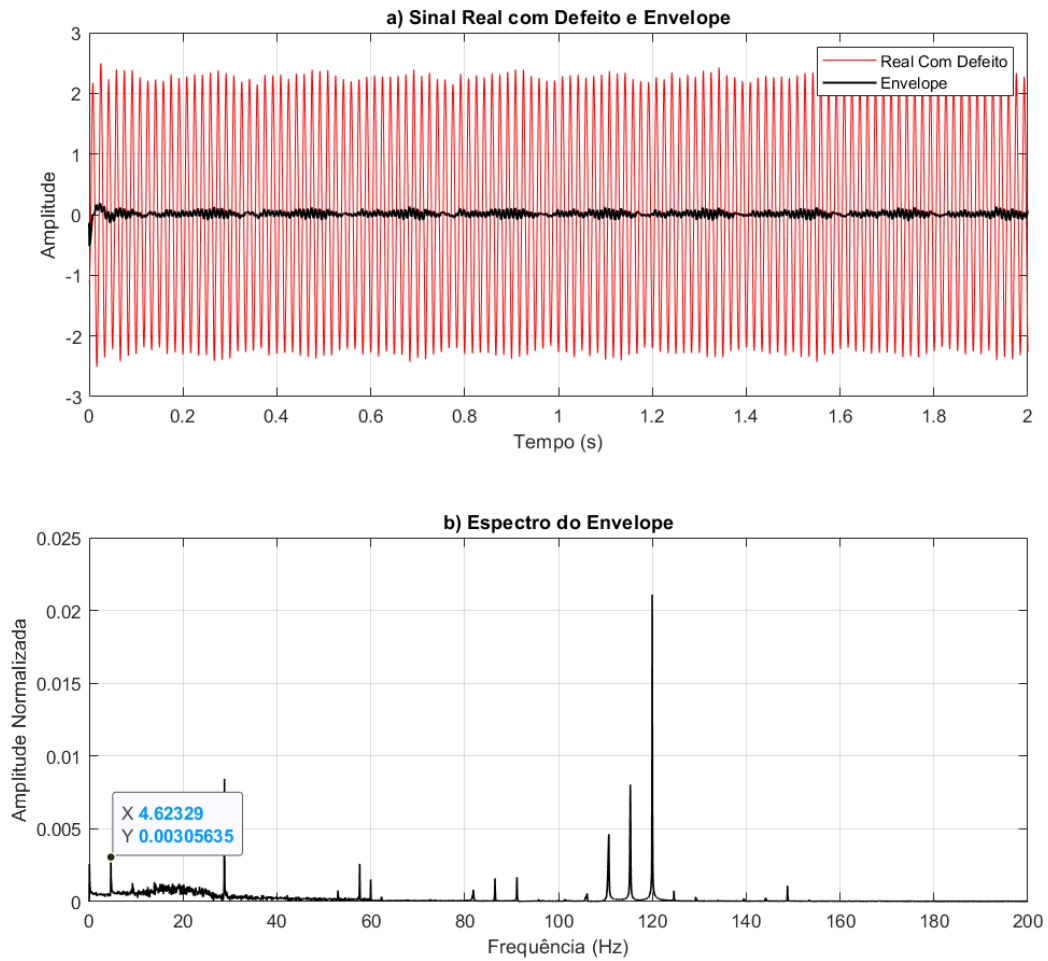
A análise do envelope foi aplicada ao sinal real filtrado entre 0 e 200 Hz, permitindo evidenciar a modulação associada ao defeito. Conforme ilustrado na Figura 51, o envelope do sinal saudável permanece praticamente constante, enquanto o envelope do sinal com defeito (Figura 52) apresenta oscilações periódicas compatíveis com a presença de modulação de amplitude.

Figura 51 – Envelope do sinal real saudável



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 52 – Envelope do sinal real com defeito de barras quebradas



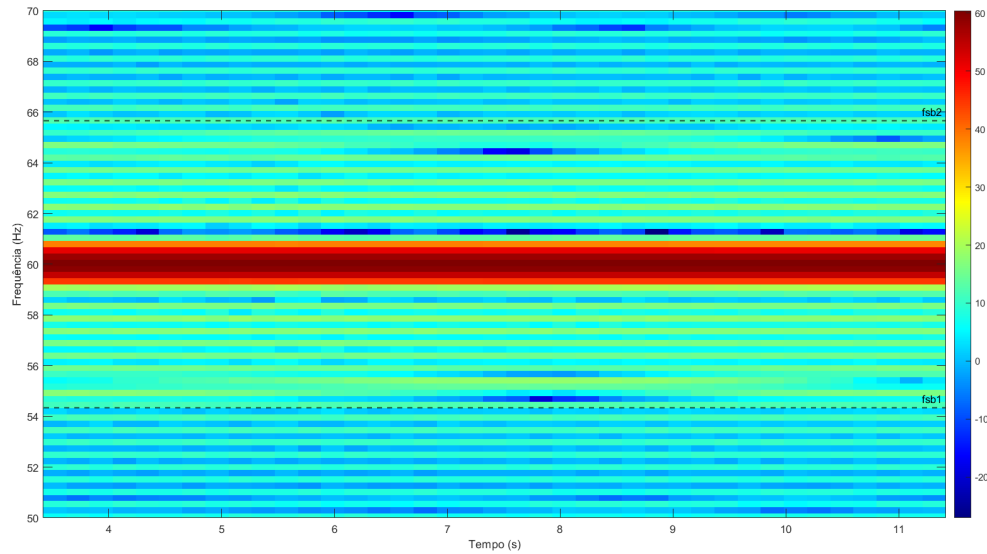
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

O espectro do envelope reflete apenas a modulação de amplitude do sinal analítico, e não o espectro energético original. Assim, suas métricas devem ser interpretadas como medidas da qualidade da demodulação, não da semelhança direta com o modelo teórico.

4.2.6 Resultado do Espectrograma no Sinal Real

O espectrograma do sinal real fornece uma análise da evolução temporal da energia. No sinal saudável, a energia permanece concentrada na fundamental, como mostrado na Figura 53.

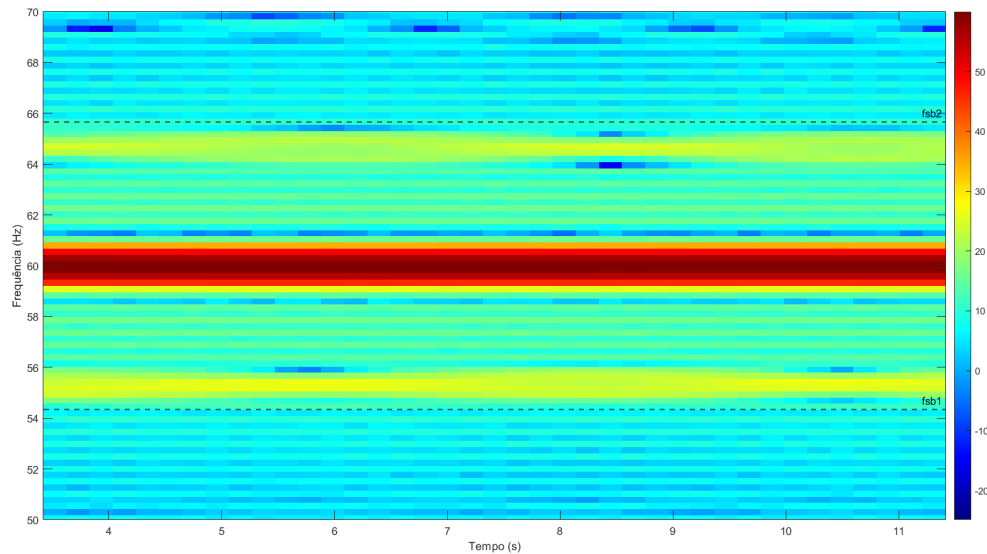
Figura 53 – Espectrograma do sinal real saudável



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

No espectrograma do sinal com defeito (Figura 54), a frequência fundamental em 60 Hz continua presente, porém faixas adicionais de energia passam a surgir nas regiões onde se manifestam as assinaturas típicas do defeito. Observa-se também um ligeiro aumento do ruído de fundo fora das regiões de interesse.

Figura 54 – Espectrograma do sinal real com defeito de barras quebradas



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Como o espectrograma é uma representação matricial tempo–frequência, métricas lineares como R^2 tendem a ser dominadas pela fundamental e não representam fidelidade

espectral direta. Ainda assim, o espectrograma evidencia de forma clara a evolução temporal das bandas laterais e confirma o diagnóstico de defeito.

4.3 Comparação entre os Resultados Teóricos e Reais com defeito

A análise comparativa entre o sinal teórico e o sinal real com defeito evidencia como a assinatura de barras quebradas se manifesta nos dois casos, apontando as diferenças e suas causas.

No domínio do tempo, o sinal teórico apresenta modulação de amplitude periódica bem definida. No sinal real, a amplitude também é periódica e a modulação é menos evidente visualmente. Essa diferença possivelmente se dá à presença de ruído de medição, pequenas variações de velocidade do motor e flutuações de carga durante a aquisição do sinal, que suavizam as oscilações periódicas, embora estas ainda sejam perceptíveis.

Pela FFT, o sinal teórico apresenta a fundamental em 60 Hz, com bandas laterais simétricas em 54,33 Hz e 65,67 Hz, correspondentes à frequência de modulação $f_{\text{mod}} = 5,67$ Hz. No sinal real, a fundamental ocorre em 59,986 Hz, e as bandas laterais aparecem em 55,4 Hz e 64,6 Hz, com picos mais largos e magnitudes ligeiramente diferentes. Estas alterações refletem o efeito do ruído, harmônicos adicionais e pequenas variações no escorregamento durante a operação real do motor, justificando o deslocamento e o alargamento observados.

Na análise pelo método de Hilbert e pelo envelope, a frequência moduladora é de 5,67 Hz no sinal teórico e 4,6 Hz no sinal real. O deslocamento possivelmente se deve a variações de velocidade e pequenas flutuações de carga, bem como ao ruído presente na aquisição. Apesar disso, a modulação permanece detectável nos dois sinais.

A TW do envelope mostra comportamento consistente no domínio tempo-frequência. No sinal teórico, a energia se concentra próxima a 5,67 Hz, com repetições periódicas típicas do defeito de barras quebradas. No sinal real, a energia se concentra próxima a 4,6 Hz e as repetições são um pouco mais irregulares quanto a sua energia. Porém, ainda sim é bem nítido a evidência do defeito presente.

O Espectrograma também mostra comportamento consistente no domínio tempo-frequência. No sinal teórico, a energia se concentra próxima a 60 Hz, com a presença de energia concentrada próximo as barras laterais em aproximadamente 54,33 Hz e 65,67 Hz. No sinal real, a energia também se concentra próximo a 60 Hz e as bandas laterais em 55,4 Hz e 66,4 Hz.

Esses resultados mostram que tanto o sinal teórico quanto o real apresentam a modulação da corrente e das bandas laterais ao redor de 60 Hz, características típicas do defeito de barras quebradas. As diferenças observadas entre os sinais teóricos e reais são justificadas pelas condições experimentais e não comprometem a detecção do defeito. O comportamento principal previsto teoricamente se mantém consistente em todas as

técnicas aplicadas (FFT, TH, HHT, TW, análise do envelope e espectrograma), validando o modelo e sua aplicação prática.

4.4 Análise Quantitativa dos Resultados

A análise quantitativa foi realizada a partir das métricas apresentadas no Quadro 4. Essas métricas permitem avaliar de forma objetiva o desempenho das técnicas aplicadas ao sinal real com defeito, complementando a análise qualitativa realizada anteriormente.

Os cálculos foram executados diretamente no MATLAB, utilizando o mesmo código do processamento dos sinais. Assim, cada métrica foi obtida a partir dos resultados gerados por cada técnica, mantendo consistência entre as etapas de análise. A Tabela 4 apresenta os valores obtidos para cada método, possibilitando comparação direta entre eles.

Tabela 4 – Resultados quantitativos para cada técnica aplicada ao sinal real com defeito

Técnica	STC	Prominência do Pico	EQM	R^2	Tempo de Processamento
FT	0,0049	20,8446	6,02E-05	0,9449	0,014 s
TH	0,2589	20,8711	6,02E-05	0,9449	0,297 s
HHT	0,7397	31,3452	0,00012	0,8081	17,147 s
TW	0,8592	3,6893	5,8202	0,6373	97,304 s
Análise de envelope	0,3946	0,0445	6,53E-06	0,7031	0,329 s
Espectrograma	0,0109	17,7092	5,88E-05	0,9966	11,314 s

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A interpretação das métricas permite avaliar o desempenho de cada técnica com maior precisão. O valor de STC próximo de 1 indica boa separação entre a frequência fundamental e a banda lateral associada ao defeito. O EQM quantifica a discrepância entre o espectro obtido e o espectro teórico. O coeficiente R^2 quantifica o quão similar o sinal real e sinal teórico são entre si, o valor sendo próximo de 1 indica maior similaridade, e o tempo de processamento reflete o custo computacional envolvido.

Os resultados mostram que a FT apresenta STC significativamente baixo (0,0049), em relação as demais técnicas, o que indica que, embora a fundamental seja bem identificada, a separação entre as bandas laterais e o pico central não é expressiva no sinal real. Assim, a FT não apresenta boa identificação da modulação característica do defeito quando avaliada por STC, sendo limitada na evidência da banda lateral. A TH apresenta melhora parcial nesse aspecto (STC = 0,589), mas ainda insuficiente para destacar a modulação de baixa frequência de maneira robusta.

A HHT e a TW apresentam os maiores valores de STC, o que indica melhor capacidade de separar componentes moduladoras no sinal real. Entretanto, a TW apresenta um

EQM significativamente maior que todas as outras técnicas (5,8202). Esse comportamento decorre da diferença estrutural entre o domínio tempo-frequência e o espectro estático utilizado como referência: a decomposição multi-escala e a normalização interna da wavelet amplificam valores locais, o que aumenta diretamente o EQM mesmo quando a modulação é corretamente evidenciada.

O espectrograma apresenta o maior R^2 (0,9966). Esse valor elevado não indica necessariamente melhor fidelidade física ao modelo teórico, mas é consequência direta da densidade espectral distribuída em uma matriz tempo-frequência. A comparação linear com o espectro teórico tende a ser dominada pela componente fundamental estacionária, produzindo R^2 artificialmente alto. Portanto, o espectrograma não deve ser interpretado como o método com maior semelhança espectral, mas sim como uma ferramenta útil para observar a evolução temporal dos componentes do sinal.

A análise de envelope apresenta baixo EQM e STC intermediário em relação as demais, refletindo boa sensibilidade à modulação de baixa frequência, ainda que com proeminência reduzida devido ao ruído e à filtragem aplicada.

Em conjunto, os resultados quantitativos mostram que cada técnica oferece um conjunto distinto de vantagens e limitações: FT e TH são eficientes computacionalmente, mas pouco sensíveis à separação da banda lateral; HHT e TW fornecem maior separação espectral, ao custo de tempo de processamento mais elevado; a análise de envelope apresenta bom compromisso entre custo e sensibilidade; e o espectrograma, apesar do R^2 alto, deve ser interpretado com cautela devido à natureza matricial da STFT.

Dessa forma, a escolha da técnica mais adequada depende diretamente do equilíbrio desejado entre resolução espectral, custo computacional e robustez frente ao ruído do sinal real. Porém, visando uma detecção precoce do defeito, as soluções mais viáveis seriam FFT, TH e Análise de envelope por terem um baixo custo computacional e uma boa detecção, permitindo com que possam ser implementadas de forma embarcada, fazendo um monitoramento contínuo do motor, detectando o defeito no momento que ele ocorre.

4.5 Análise Qualitativa dos Resultados

A aplicação das técnicas ao sinal real com defeito exigiu ajustes específicos de pré-processamento para garantir resultados consistentes. A necessidade de filtragem, remoção de transientes e decimação decorre diretamente da elevada taxa de amostragem e da presença de componentes espúrias típicas de medições em motores em operação.

As principais observações do processamento do sinal real incluem:

- Uso de *downsampling*: necessário para estabilizar a execução de técnicas sensíveis, como HHT e TW, reduzindo o custo computacional sem prejuízo da faixa espectral de interesse.

- Sensibilidade ao transitório inicial: representações tempo–frequência apresentaram picos artificiais no início do sinal, exigindo remoção desse trecho.
- Ajuste de filtros: a filtragem precisou preservar a região das bandas laterais associadas ao defeito, evitando distorções no cálculo da modulação.
- Comportamento real do sinal: observou-se maior espalhamento espectral e presença de harmônicos residuais, ausentes no sinal teórico, o que impactou métricas como STC e proeminência.
- Limitações computacionais: técnicas baseadas em matrizes extensas, como HHT, TW e espectrograma, demandaram processamento significativamente maior.

Do ponto de vista qualitativo, as técnicas apresentaram comportamentos distintos:

- Transformada de Fourier (FT): simples e rápida, porém pouco eficaz em evidenciar a banda lateral associada à modulação do defeito, o que é coerente com seu STC extremamente baixo.
- Transformada de Hilbert (TH): melhora parcialmente a separação das componentes moduladas em relação à FT, mas ainda não destaca a banda lateral de forma robusta.
- Análise de Envelope: apresentou boa sensibilidade à modulação de baixa frequência, embora a proeminência reduzida do pico modulante resulte de ruído e filtragem necessárias à extração da envoltória.
- Transformada de Hilbert–Huang (HHT): evidenciou a modulação com maior clareza que os métodos anteriores, refletido no STC elevado, mas com custo computacional alto e maior sensibilidade ao ruído.
- Transformada Wavelet (TW): forneceu as melhores separações entre a fundamental e a banda lateral, porém a reconstrução e normalização da wavelet geraram alto EQM, tornando sua métrica menos comparável diretamente ao espectro teórico.
- Espectrograma: permitiu observar a evolução temporal dos componentes, mas seu alto R^2 não representa fidelidade espectral direta e sim dominância da componente fundamental na comparação linear.

De forma geral, FT, TH e análise de envelope destacam-se pela aplicação direta e baixo custo computacional, enquanto métodos tempo–frequência como HHT, TW e espectrograma apresentam maior capacidade de evidenciar componentes moduladas. O Quadro 5 resume comparativamente o desempenho das técnicas analisadas segundo critérios quantitativos e qualitativos.

Quadro 5 – Avaliação das técnicas aplicadas ao sinal real com defeito

Métrica	FT	TH	HHT	TW	AE	ESP
STC						
Proeminência						
EQM						
R^2						
Tempo						
Evidência de Defeito						
Facilidade						
Pré-processamento						
Robustez a Ruído						
Legenda de desempenho: melhor, intermediário, pior. Siglas: FT = Fourier; TH = Transformada de Hilbert; HHT = Transformada de Hilbert–Huang; TW = Transformada de Wavelet; AE = Análise de Envelope; ESP = Espectrograma.						

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Assim, a análise qualitativa confirma os resultados quantitativos: nenhuma técnica é superior em todos os critérios, e a escolha depende do equilíbrio entre resolução espectral, robustez a ruído e viabilidade computacional.

4.6 Síntese e Implicações Práticas

A análise integrada das técnicas de processamento de sinais confirmou que a assinatura típica de defeito por barras quebradas, modulação em baixa frequência e bandas laterais em torno de 60 Hz, foi detectada tanto no modelo teórico quanto no sinal real. No modelo teórico, a frequência moduladora estimada foi de aproximadamente 5,67 Hz, enquanto no sinal real observou-se cerca de 4,6 Hz. Essa diferença é compatível com a variação natural de escorregamento e com efeitos de ruído e dispersão espectral presentes em ensaios experimentais.

A análise quantitativa evidenciou que nenhuma técnica apresenta desempenho uniforme em todas as métricas. A FT apresentou STC extremamente baixo, confirmando sua limitação na separação das bandas laterais no sinal real, embora mantenha excelente custo computacional. A TH melhorou a identificação da modulação, mas sua sensibilidade ao ruído limitou a proeminência da banda lateral.

A análise de envelope demonstrou bom equilíbrio entre robustez e custo computacional, fornecendo identificação clara da modulação característica do defeito, ainda que com degradação esperada devido às etapas de filtragem. As técnicas tempo-frequência, HHT e TW, apresentaram maior capacidade de evidenciar a separação entre fundamental e bandas laterais (STC elevado), porém com custo computacional significativamente superior e com métricas como EQM influenciadas pela natureza não estacionária e multi-escala dessas representações.

O espectrograma forneceu uma visão temporal bem satisfatória, mas o valor elevado de R^2 deve ser interpretado com cautela, pois decorre da dominância da componente fundamental na correlação linear e não representa fidelidade espectral ao modelo teórico.

As diferenças verificadas entre STC, proeminência, EQM e R^2 mostraram-se fortemente dependentes de parâmetros de pré-processamento, como filtragem, normalização e janela de análise. Assim, recomenda-se que trabalhos futuros incluam estudos de sensibilidade e validação cruzada para consolidar a robustez das métricas.

Em síntese, os resultados confirmam que todas as técnicas analisadas são capazes de identificar defeitos de barras em MITs, porém com desempenhos complementares. A escolha da técnica mais adequada deve considerar o compromisso entre detalhamento espectral, robustez frente ao ruído, custo computacional e o nível de precisão exigido pela aplicação de monitoramento ou diagnóstico.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou, de forma sistemática, diferentes técnicas de processamento de sinais aplicadas ao monitoramento da integridade de motores de indução trifásicos, com foco específico na detecção de defeitos em barras do rotor. A investigação contemplou tanto sinais teóricos, derivados de modelagem matemática, quanto sinais reais provenientes de uma base experimental completa, permitindo analisar a aderência entre o modelo e o comportamento observado em operação prática.

A base de dados utilizada continha medições em oito condições distintas de torque, diferentes severidades de defeito (0 a 4 barras quebradas), correntes das três fases (A, B e C) e registros completos de vibração na carcaça, no corpo do motor e na mesa de ensaio. Entretanto, para garantir foco e comparabilidade direta com o modelo teórico, o presente estudo empregou exclusivamente a corrente da fase A, em condição saudável e com duas barras quebradas, ambas sob torque nominal. Essa seleção foi intencional para isolar a assinatura clássica do defeito de barras e analisar a consistência das técnicas na condição de maior relevância diagnóstica.

Os resultados confirmaram que a assinatura característica do defeito, modulação em baixa frequência e bandas laterais simétricas em torno de 60 Hz, foi identificada de forma consistente em todas as técnicas aplicadas. Para o modelo teórico, a frequência moduladora estimada foi de aproximadamente 5,67 Hz. Nos sinais reais, a modulação observada foi de cerca de 4,6 Hz, diferença coerente com variações naturais de escorregamento, ruído e dispersão espectral típicos de medições experimentais. A concordância entre valores teóricos e experimentais reforça a validade física da modelagem e a capacidade das técnicas de detectar o defeito.

Os métodos de domínio da frequência (FFT e TH) apresentaram baixo custo computacional e execução estável, sendo adequados para sistemas de monitoramento contínuo com restrição de recursos. A análise de envelope demonstrou excelente sensibilidade à modulação, mantendo baixa complexidade computacional e configurando-se como uma alternativa eficiente para aplicações de manutenção preditiva.

As técnicas tempo-frequência (HHT, TW e espectrograma) evidenciaram com maior clareza a natureza não estacionária do defeito, permitindo observar a evolução temporal das bandas laterais. No entanto, demandaram maior custo computacional e maior dependência de parâmetros como janelas, escalas e decomposições, o que torna sua utilização mais adequada a diagnósticos off-line ou a sistemas com poder de processamento superior.

As diferenças observadas entre as métricas quantitativas, STC, proeminência, EQM e R^2 , refletem principalmente as divergências estruturais entre as representações empregadas. Métodos lineares são dominados pela componente fundamental, enquanto métodos tempo-frequência amplificam variações locais e dispersões espectrais, o que altera

diretamente o comportamento das métricas. Assim, comparações diretas entre métricas de técnicas de naturezas distintas devem ser interpretadas com cautela.

Entre as limitações do presente estudo, destacam-se: (i) a utilização deliberada de apenas duas condições específicas do banco de dados, fase A, torque nominal, condição saudável e com duas barras quebradas, mesmo havendo medições com múltiplos torques, severidades e sensores; (ii) dependência de escolhas de pré-processamento, como filtragem e decimação; e (iii) ausência de uma análise sistemática sobre o impacto dessas escolhas na robustez das métricas. Essas limitações não decorrem da base experimental, mas da estratégia metodológica adotada para garantir comparabilidade direta com o modelo teórico.

Para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Explorar integralmente o banco de dados, incluindo as diferentes condições de torque, severidades de defeito e demais fases e sensores disponíveis;
- Aplicar técnicas de aprendizado de máquina para classificação automática das assinaturas de defeito;
- Investigar estratégias otimizadas de filtragem e normalização para padronização das métricas;
- Avaliar implementações embarcadas das técnicas de menor custo (FFT, TH e envelope) visando monitoramento preditivo em tempo real.

Em síntese, os resultados obtidos demonstram que todas as técnicas avaliadas são eficazes na detecção de defeitos de barras em motores de indução trifásicos, cada uma apresentando vantagens e limitações específicas. Métodos de domínio da frequência destacam-se em aplicações contínuas e de baixo custo computacional, enquanto técnicas tempo-frequência oferecem maior detalhe para diagnósticos aprofundados. A convergência entre os resultados teóricos e experimentais reforça a aplicabilidade do processamento de sinais como ferramenta essencial em estratégias modernas de diagnóstico e manutenção preditiva.

REFERÊNCIAS

- ALNASIR, Z. A.; ALMARHOON, A. H. Design of direct torque controller of induction motor (dte). **International Journal of Engineering and Technology (IJET)**, IJET v. 4, n. 2, p. 1–5, 2012.
- Alves, D. A. Universidade Federal de São João del-Rei **Técnicas de detecção de falhas em barras do rotor nos motores de indução trifásicos**. São João del-Rei, MG, 2017.
- Antunes, H. R. **Aplicação Web de Diagnóstico e Análise de falhas em MIT e Marcadores Visuais**. 2021. Dissertação (Mestrado) — Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC) Coimbra, Portugal 2021. Mestrado em Engenharia Eletromecânica, Orientadores: Doutor Inácio de Sousa Adelino da Fonseca e Doutor José Manuel Torres Farinha.
- Aroeira, C. Princípio de funcionamento do motor de indução, „, jan. 2025. Artigo técnico publicado em 20 de janeiro de 2025. Disponível em: <https://www.seusite.com.br/artigos/principio-de-funcionamento-do-motor-de-inducao>.
- Bando, J. V. M. **Aplicação de Técnicas de Processamento de Sinais na Detecção e Diagnóstico de Barras Quebradas em Rotores de Motores de Indução**. 2024. Monografia de Graduação — Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) Foz do Iguaçu 2024. CECE - Centro de Engenharia e Ciências Exatas, Engenharia Mecânica.
- Barcelos, A. da S.; Mazonni, F. M.; Cardoso, A. J. M. Análise de avarias em rolamentos, utilizando algoritmos de inteligência artificial. **Anais do Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**, Universidade Federal Fluminense Rio de Janeiro, Brasil,, 2019.
- Bazan, G. H. *et al.* Multi-fault diagnosis in three-phase induction motors using data optimization and machine learning techniques. **Electronics**, MDPI v. 10, n. 12, p. 1462, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/12/1462>.
- Bruno, G. P. **Caracterização de Defeitos no Rolamento em um Motor de Indução Trifásico Utilizando a Emissão Acústica**. novembro 2020. Dissertação (Mestrado) — Instituto Federal da Paraíba (IFPB), Campus João Pessoa João Pessoa, PB novembro 2020. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE).
- Bórnea, Y. P. **Desenvolvimento de sistema para detecção de falhas em rolamentos de motores de indução a partir de seus sinais de vibração**. Cornélio Procópio, 2022. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Engenharia Elétrica.
- Cassimiro, I. J. G. **Identificação de Falhas em Máquinas Elétricas Rotativas Usando Sistemas Inteligentes**. 2013. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos São Carlos 2013. Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação.
- Chapman, S. J. **Máquinas Elétricas**. 4th. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2012.
- da Cruz, S. M. Ângelo. **Diagnóstico e Análise de Avarias nos Enrolamentos Estatóricos de Motores de Indução Trifásicos Através da Aplicação do Método dos Referenciais Múltiplos**. 2004. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade de

Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia Coimbra, Portugal 2004. Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores.

Duarte, E. J. B. **Deteção de constituinte prejudicial sigma em um aço inoxidável duplex do tipo SAF 2205 pela aplicação da decomposição empírica de modos.** João Pessoa, PB, 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Instituto Federal da Paraíba (IFPB).

Filho, J. F. G.; Mariano, A.; dos Santos, T. A. A review on fault diagnosis techniques for induction motors using stator current analysis. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, v. 29, n. 6, p. 865–875, 2018.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. **Electric Machinery**. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2003. ISBN 9780073660097.

Fitzgerald, A. E.; Kingsley, C.; Umans, S. D. **Máquinas Elétricas**. 6. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

Fusco, J. C.; Gomes, L. P.; Souza, A. L. **Motores de indução: Fundamentos e aplicações industriais**. 2nd. ed. São Paulo: Editora Tech, 2015.

HUGHES, A. **Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications**. 4. ed. Oxford: Newnes, 2013. ISBN 9780080983325.

Hughes, A. **Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications**. 5th. ed. Oxford: Newnes, 2014.

Jesus, R. C. de. Universidade Nove de Julho - UNINOVE, Programa de Pós-Graduação em Informática e Gestão do Conhecimento - PPGI **Um Estudo Comparativo entre Técnicas de Aprendizagem de Máquina e Processamento de Sinais para Detectar Barras Quebradas em um Motor de Indução Trifásico com Rotor do Tipo gaiola de esquilo**. São Paulo: , 2019.

Leão, J. V. F. **Identificação e Caracterização de Curtos-Circuitos Temporários em Motores de Indução Trifásicos por meio de Emissão Acústica, Análise de Corrente e Técnicas Avançadas de Processamento de Sinais**. 2022. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Bauru 2022.

Lucas, G. B. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"(UNESP), Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB) **Uma Nova Técnica para Monitoramento e Diagnóstico de Desequilíbrios de Tensão Aplicada em Motores de Indução Trifásicos Empregando Sensores de Emissão Acústica e Transformada Wavelet**. Bauru: , 2020.

Maia, D. D. F. **Instrumento virtual para implementação e testes de algoritmos de extração de parâmetros de ECG através da transformada Wavelet**. Campo Mourão, 2021. Trabalho de Conclusão de Curso.

Menegat, J. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) **Estudo de Falhas Incipientes em Motores de Indução Trifásicos Utilizando a Transformada Discreta de Wavelet**. Porto Alegre, 2014.

Misari, J. A. U. **Análise de defeitos no motor de indução trifásico para predição de falhas incipientes**. 1997. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo São Paulo 1997.

MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. **Introduction to Linear Regression Analysis**. 5. ed. Hoboken: Wiley, 2012.

Narain, G. **Sistemas de Controle de Máquinas Elétricas**. 3rd. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

Oliveira, D. J. de. **Diagnóstico de Distorções Harmônicas em um Sistema Elétrico Industrial**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal de Ouro Preto João Monlevade, MG 2017.

OLIVEIRA Zaparoli, I. **Análise do Envelope do Transitório da Corrente para a Detecção de Curto entre Espiras em Motores de Indução Trifásicos**. set. 2018. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) / CEFET-MG São João del-Rei set. 2018. Orientador: Lane Maria Rabelo Baccarini; Coorientador: Paulo César Monteiro Lamin Filho.

ONUKA, R. M. B. Diagnóstico de avarias em motores de indução trifásicos utilizando técnica de assinatura de corrente elétrica. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). 2021. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/34429>.

Pereira, M. G. **Engenharia de Máquinas Elétricas e Eletrônicas**. 4th. ed. Campinas: Editora Atlas, 2017.

PINEDA-SÁNCHEZ, M. *et al.* Condition monitoring of induction machines: Quantitative analysis and comparison. **Sensors**, MDPI v. 23, n. 2, p. 1046, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/2/1046>.

Reis, R. de A. *et al.* Emprego da transformada de wavelet na detecção de falhas em rolamentos. **VÉRTICES, Campos dos Goytacazes/RJ**, v. 18, n. 3, p. 157–171, set./dez. 2016. ISSN: 1809-2667.

Ribeiro, L. R. B. Centro Universitário de Brasília - UniCEUB, Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas - FATECS, Curso de Engenharia Elétrica **Análise de Harmônicos em Cargas Não Lineares**. Brasília: , 2017. Orientador: Prof. MSc. Luciano Henrique Duque.

Rocha, M. A. **Identificação e classificação de curto entre espiras e desbalanço de tensão em motores de indução trifásicos utilizando sensores de corrente, emissão acústica e vibração com emprego de transformada Hilbert e transformada Wavelet**. Bauru, 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", 2022.

S. Moreira, J. *et al.* Análise da decimação no processamento de sinais de corrente para detecção de barras quebradas em motores de indução. **Revista Técnica (substitua aqui pelo nome da revista, se disponível)**, São João Del-Rei, Brasil,, 2020. Laboratório de Máquinas Elétricas e Transformadores (LAMET), Departamento de Engenharia Elétrica, UFSJ.

SANTOS, A. Estudo da influência da tensão na partida e operação dos motores de indução, utilizando o atpdraw, ,,. 07 2016.

SANTOS, F. M. d. C. **Identificação de Falhas em Motores de Indução Trifásicos Usando Sistemas Inteligentes**. 2013. Dissertação (Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)) — Universidade de São Paulo (USP) São Carlos 2013. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18153/tde-29042013-114436/pt-br.php>.

Santos, S. P. dos. **Aplicação de Sistemas Multi-classificadores no Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos**. abril 2008. Dissertação (Dissertação

de Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte Natal, RN abril 2008. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Silva, F. H. Q.; Caramori, R. M.; Costa, C. D. Análise de falhas em máquinas elétricas rotativas de indução utilizando a transformada de wavelet. *In: VIII ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO*, IFSP - CAMPUS SÃO PAULO. 2023, São Paulo, Brasil. **Anais [...]** São Paulo, Brasil: [s.n.], 2023. Página 1.

Silva, F. J.; Almeida, L. A.; Cunha, R. P. **Fundamentos dos Motores Elétricos**. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 2010.

Silva, L. C. da. **Uma Abordagem Baseada em Histograma de Gradientes Orientados para a Detecção de Barras Rompidas em Motores de Indução com Rotor Gaiola de Esquilo**. 2019. Dissertação (Mestrado) — Universidade Nove de Julho - UNINOVE São Paulo 2019. Programa de Pós-Graduação em Informática e Gestão do Conhecimento (PPGI).

SOBRINHO, C. A. N. *et al.* Estratégias para detecção de falhas em rolamentos de motores de indução trifásicos. **Revista Principia**, v. 56,, p. 74–82, 2021. ISSN 1517-0306. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/4154>.

Souza, W. G. d. **Identificação de Falhas em Rolamentos Aplicados em Motores de Indução por meio de Sensores de Corrente de Efeito Hall, Técnicas de Processamento de Sinais e Sistemas Inteligentes**. 2022. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)) — Universidade Estadual Paulista (UNESP) Bauru - SP 2022. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Suetake, M. **Sistemas Inteligentes para Monitoramento e Diagnósticos de Falhas em Motores de Indução Trifásicos**. 2012. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos São Carlos 2012. Departamento de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

THOMSON, W. T.; FENGER, M. Current signature analysis to detect induction motor faults. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 7, n. 4, p. 26–34, 2001.

Villas-Boas, M. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 3rd. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

Zaparoli, I. O. *et al.* Análise do envelope da corrente para diagnóstico de falhas em mits. **Anais do Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)**, v. 2, n. 1,, 2021.

ZUREKS. **Wirnik (Rotor)**, . 2007. Wikimedia Commons. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wirnik_by_Zureks.jpg.