



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Análise das Variações de Tensão de Curta e Longa Duração no Domínio da Frequência

Osmar Lucas Dias Aires

Campina Grande, Paraíba

Dezembro/2019

Osmar Lucas Dias Aires

Análise das Variações de Tensão de Curta e Longa Duração no Domínio da Frequência

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica

Orientadora:

Professora Núbia Silva Dantas Brito, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Dezembro/2019

Osmar Lucas Dias Aires

Análise das Variações de Tensão de Curta e Longa
Duração no Domínio da Frequência

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a obtenção do
grau de Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica*

Aprovado em / /

Professor Karcus Marcelus Colaço Dantas
Universidade Federal de Campina Grande

Professora Núbia Silva Dantas Brito, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientadora

Campina Grande, Paraíba
Dezembro/2019

*Este trabalho é dedicado a todos meus familiares que contribuíram, cada um de sua forma,
para que eu atingisse esse objetivo.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, escritor da minha vida e companheiro de todas as horas. Sem Ele, eu não chegaria aqui.

Aos meus pais, Milena Carneiro Dias Aires e Osmar da Silva Aires, por todo apoio e cuidado.

A todos os meus demais familiares, por toda torcida e incentivo. Em especial, agradeço a meu avô materno Milton Carneiro de Farias, minha referência desde criança.

Agradeço a todos os meus amigos e colegas de curso, pelo companheirismo e por todo carinho. Muitos desafios enfrentamos juntos e muitos desafios vencemos juntos.

Agradeço a todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) que de alguma forma contribuíram para o meu crescimento profissional. Em especial, agradeço a professora Núbia Silva Dantas Brito por toda orientação e compreensão na realização deste trabalho.

Agradeço também a Rodrigo de Almeida Coelho pela orientação, compreensão e incentivo na realização deste trabalho.

Agradeço, por fim, a todos aqueles que de forma direta ou indireta contribuíram para que eu atingisse este objetivo.

Resumo

A Qualidade da Energia Elétrica é uma área de estudo que vem atraindo muita atenção dos pesquisadores nos últimos anos. Conseqüentemente, técnicas de identificação a variações indesejadas nos sinais (distúrbios) como afundamento, elevação e interrupção de tensão, sejam de longa duração (VTLD) ou de curta duração (VTCD), estão sendo desenvolvidas e aprimoradas. Para o desenvolvimento desta pesquisa, um estudo comparativo do comportamento dos distúrbios no domínio do tempo e da frequência foi realizado, utilizando a Transformada de Fourier (TF) e a Transformada de Fourier de Tempo Curto (TFTC). Modificações no tipo de janela utilizada na TFTC e no número de amostras mostraram resultados significativos e relevantes.

Palavras chave: Qualidade da Energia Elétrica, Distúrbios, Transformada de Fourier, Transformada de Fourier de Tempo Curto, Janelas.

Sumário

Capítulo 1	Introdução.....	1
Capítulo 2	Fundamentação Teórica.....	3
2.1	Qualidade da Energia Elétrica.....	3
2.2	Distúrbios.....	3
2.3	Transformada de Fourier	7
2.4	Transformada de Fourier de Tempo Curto	8
2.5	Janelas	9
Capítulo 3	Metodologia.....	11
3.1	Códigos dos Distúrbios.....	12
Capítulo 4	Apresentação e Discussão dos Resultados	13
4.1	Distúrbios (VTCD e VTLD)	13
4.1.1	Sinal de Tensão Senoidal Ideal	13
4.1.2	Sinal de Tensão com Afundamento	17
4.1.3	Sinal de Tensão com Elevação	23
4.1.4	Sinal de Tensão com Interrupção	29
Capítulo 5	Conclusões	36
	Referências Bibliográficas	37
	Anexos	39

Lista de Figuras

Figura 1 - Janelas no domínio da frequência.....	10
Figura 2 - Janelas no domínio do tempo	10
Figura 3 - Fluxograma.....	12
Figura 4 - Sinal Ideal de Tensão no domínio do tempo	13
Figura 5 - TF de um Sinal Ideal.....	14
Figura 6 - TFTC do Sinal Ideal (Janela Retangular com 32 amostras).....	14
Figura 7 - TFTC do Sinal Ideal (Janela Blackman com 32 amostras).....	15
Figura 8 - TFTC do Sinal Ideal (Janela Retangular com 512 amostras).....	16
Figura 9 - TFTC do Sinal Ideal (Janela Blackman com 512 amostras).....	16
Figura 10 - Sinal com Afundamento de Tensão no domínio do tempo.....	17
Figura 11 - TF de um Sinal com Afundamento de Tensão	17
Figura 12 - TFTC do Sinal com Afundamento (Janela Retangular com 32 amostras)	18
Figura 13 - TFTC do Sinal Ideal (Janela Blackman com 32 amostras).....	18
Figura 14 - TFTC do Sinal Ideal (Janela Retangular com 512 amostras).....	19
Figura 15 - TFTC do Sinal Ideal (Janela Blackman com 512 amostras).....	20
Figura 16 - Sinal com Afundamento (VTLD) no domínio do tempo.....	21
Figura 17 - TF de um Sinal com Afundamento de Tensão (VTLD)	21
Figura 18 - TFTC do Sinal com Afundamento - VTLD - (Janela Retangular com 32 amostras).....	22
Figura 19 - TFTC do Sinal com Afundamento - VTLD - (Janela Retangular com 512 amostras).....	22
Figura 20 - Sinal com Elevação de Tensão no domínio do tempo	23
Figura 21 - TF de um Sinal com Elevação de Tensão.....	24
Figura 22 - TFTC do Sinal com Elevação (Janela Retangular com 32 amostras).....	24
Figura 23 - TFTC do Sinal com Elevação (Janela Blackman com 32 amostras).....	25
Figura 24 - TFTC do Sinal com Elevação (Janela Retangular com 512 amostras)...	26
Figura 25 - TFTC do Sinal com Elevação (Janela Blackman com 512 amostras).....	26
Figura 26 - Sinal com Elevação (VTLD) no domínio do tempo.....	27
Figura 27 - TF de um Sinal com Elevação de Tensão (VTLD).....	28

Figura 28 - TFTC do Sinal com Elevação - VTLD - (Janela Retangular com 32 amostras).....	28
Figura 29 - TFTC do Sinal com Elevação - VTLD - (Janela Retangular com 512 amostras).....	29
Figura 30 - Sinal com Interrupção de Tensão no domínio do tempo.....	29
Figura 31 - TF de um Sinal com Interrupção de Tensão.....	30
Figura 32 - TFTC do Sinal com Interrupção (Janela Retangular com 32 amostras)	30
Figura 33 - TFTC do Sinal com Interrupção (Janela Blackman com 32 amostras) ..	31
Figura 34 - TFTC do Sinal com Interrupção (Janela Retangular com 512 amostras)	32
Figura 35 - TFTC do Sinal com Interrupção (Janela Blackman com 512 amostras)	32
Figura 36 - Sinal com Interrupção (VTLD) no domínio do tempo	33
Figura 37 - TF de um Sinal com Interrupção de Tensão (VTLD)	34
Figura 38 - TFTC do Sinal com Interrupção - VTLD - (Janela Retangular com 32 amostras).....	34
Figura 39 - TFTC do Sinal com Interrupção - VTLD - (Janela Retangular com 512 amostras).....	35

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD)	6
Tabela 2 - Distúrbios avaliados e parâmetros simulados	11

Lista de Símbolos/Siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PRODIST	Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TF	Transformada de Fourier
TFTC	Transformada de Fourier de Tempo Curto
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração
VTLD	Variação de Tensão de Longa Duração

Capítulo 1 Introdução

A operação ideal de um sistema elétrico de potência (SEP) em regime permanente requer tensões e correntes puramente senoidais com amplitudes e frequências constantes, equilíbrio entre fases para sistemas trifásicos, fator de potência unitário e perdas nulas. Na prática, entretanto, é impossível um sistema real satisfazer as condições supracitadas, visto que o SEP e as cargas a ele conectadas são suscetíveis às falhas e perturbações que podem afetar as condições de operação (COELHO, 2018). Nesse contexto, surge o conceito de Qualidade da Energia Elétrica (QEE), que pode ser definida como qualquer problema de desvio nas formas de onda da tensão, corrente ou frequência que resulta em uma falha no equipamento (DUGAN *et al.*, 2004).

No Brasil, a normatização da QEE é incumbência da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que elaborou os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST), os quais atualmente estão divididos em dez módulos responsáveis por normatizar e padronizar as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE). Dentre eles, destaca-se aqui o Módulo 8, o qual é dedicado exclusivamente aos aspectos relacionados com a QEE, como (BRASIL/ANEEL, 2019):

- A qualidade do produto, onde são estabelecidos os parâmetros relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda da tensão.
- A qualidade do serviço prestado, onde são estabelecidos os procedimentos relativos aos indicadores de continuidade e aos tempos de atendimento.

O Módulo 8 apresenta também, a caracterização dos diversos distúrbios, dentre os quais destacam-se aqui, as classes denominadas de Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) e Variações de Tensão de Longa Duração (VTLD). O estudo desses distúrbios é de extrema importância para o setor e constitui uma das áreas de pesquisas de grande interesse da comunidade científica especializada (JUNQUEIRA, 2017).

Com o objetivo de identificação desses distúrbios e posterior análise no domínio da frequência, algumas ferramentas matemáticas podem ser utilizadas, como: a Transformada de Fourier (TF), a Transformada de Fourier de Tempo Curto (TFTC),

a Transformada Discreta de Wavelet e a Transformada de Stockwell.

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) insere-se nesse contexto e apresenta o estudo desses distúrbios, no domínio da frequência, via TF e TFTC (LIMA, 2016). A meta é fazer uma análise comparativa do desempenho dessas ferramentas, destacando vantagens e desvantagens.

O relatório foi estruturado conforme a seguir:

- Capítulo 2: apresentação da fundamentação teórica requerida para o desenvolvimento do trabalho;
- Capítulo 3: apresentação da metodologia adotada;
- Capítulo 4: exposição e discussão dos resultados obtidos;
- Capítulo 5: apresentação das conclusões finais.
- Referências bibliográficas

Capítulo 2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo, são abordados por meio de uma breve fundamentação teórica os temas mais importantes para a elaboração do TCC.

2.1 Qualidade da Energia Elétrica

Para avaliar o quanto um sistema está operando fora de suas condições nominais, duas grandezas elétricas básicas podem ser empregadas. Estas são a tensão e a frequência.

No Brasil, a frequência do sistema interligado situa-se na faixa de $60 \pm 0,5\text{Hz}$ (OLESKOVICZ *et al*, 2006). No caso da tensão, devem-se avaliar três fatores: a forma de onda (quanto mais próximo de uma senoide, melhor), as amplitudes das tensões (que devem estar dentro de limites aceitáveis) e a simetria de fases do sistema.

No entanto, existem fenômenos no sistema elétrico, que são intrínsecos ou aleatórios, que podem fazer com que os fatores acima mencionados sofram alterações, prejudicando a qualidade do fornecimento de energia elétrica. Dentre os fenômenos podemos citar: afundamentos e/ou elevações de tensões, as interrupções, distorções harmônicas, flutuações de tensão, transitórios oscilatórios ou impulsivos, ruídos, sobretensões e subtensões (DUGAN *et al.*, 2004).

Assim, QEE constitui a área de estudo relacionada com o desenvolvimento de produtos e serviços voltados à manutenção da qualidade do produto/serviço energia elétrica, seja na rede de transmissão, distribuição ou em consumidores industriais.

2.2 Distúrbios

No contexto dos distúrbios de tensão, pode-se classificá-los em duas categorias: as Variações de Tensão de Curta Duração e as Variações de Tensão de Longa Duração.

De acordo com o Módulo 8 do PRODIST, Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) são desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos. Portanto, distúrbios com duração superior a três minutos são chamados de Variações de Tensão de Longa Duração (VTLD).

Conclusões similares são observadas no ANT n° 0029/2011-SRD/ANEEL de 30/06/2011, que diz: “afundamento, elevação e interrupção momentânea ou temporária de tensão integram os fenômenos referentes à classe das VTCD; e subtensão, sobretensão e interrupção sustentada são alocadas à classe das VTLD. Além das amplitudes envolvidas e frequência (60 Hz) destas variações, quando comparadas à componente fundamental, o tempo de permanência destas sobre o sistema é o fator primordial para classificá-las entre VTCD e VTLD. No primeiro caso, o tempo associado é menor ou igual a três minutos, e em consequência deste, para o segundo caso, maior do que três minutos.”

Os termos técnicos e suas definições relativas à VTCD constantes do Módulo 1 do PRODIST são apresentadas a seguir e resumidos na Tabela 1:

- **Afundamento momentâneo de tensão:** Evento em que o valor eficaz da tensão do sistema se reduz, momentaneamente, para valores abaixo de 90% e acima de 10% da tensão nominal de operação, durante intervalo superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a 3 (três) segundos.
- **Afundamento temporário de tensão:** Evento em que o valor eficaz da tensão do sistema se reduz, momentaneamente, para valores abaixo de 90% e acima de 10% da tensão nominal de operação, durante intervalo superior a 3 (três) segundos e inferior a 3 (três) minutos.
- **Amplitude da variação de tensão de curta duração:** Corresponde ao valor extremo do valor eficaz da tensão em relação à tensão de referência no ponto considerado.
- **Elevação momentânea de tensão:** Evento em que o valor eficaz da tensão do sistema se eleva, momentaneamente, para valores acima de 110% da tensão nominal de operação, durante intervalo superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a 3 (três) segundos.

- **Elevação temporária de tensão:** Evento em que o valor eficaz da tensão do sistema se eleva, momentaneamente, para valores acima de 110% da tensão nominal de operação, durante intervalo superior a 3 (três) segundos e inferior a 3 (três) minutos.
- **Interrupção:** Descontinuidade do neutro ou da tensão disponível em qualquer uma das fases de um circuito elétrico que atende a unidade consumidora ou ponto de conexão.
- **Interrupção de longa duração:** Toda interrupção do sistema elétrico com duração maior ou igual a 3 (três) minutos.
- **Interrupção momentânea de tensão:** Toda interrupção do sistema elétrico com duração menor ou igual a 3 (três) segundos.
- **Interrupção temporária de tensão:** Toda interrupção do sistema elétrico superior a 3 (três) segundos e inferior a 3 (três) minutos.
- **Variação momentânea de tensão:** Abrange os eventos com duração inferior ou igual a 3 (três) segundos, na forma de interrupção, afundamento e elevação de tensão.
- **Variação temporária de tensão:** Compreende os eventos com duração superior a 3 (três) segundos e inferior a 3 (três) minutos, na forma de interrupção, afundamento e elevação de tensão.

Tabela 1 – Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD)

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 pu
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 pu
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 pu
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 pu
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 pu
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 pu

2.3 Transformada de Fourier

No século XVII, Jean Baptiste Joseph Fourier demonstrou que qualquer forma de onda pode ser representada por um somatório infinito de senóides e cossenóides de diferentes amplitudes, frequências e fases, como apresentado na Equação 1. A sua motivação inicial para desenvolvimento desse estudo estava ligada à termodinâmica com o problema da propagação de calor em um sólido.

$$f(t) = a_0 + a_1 \text{sen}(t) + a_2 \text{sen}(2t) + a_3 \text{sen}(3t) + \dots + b_1 \text{cos}(t) + b_2 \text{cos}(2t) + b_3 \text{cos}(3t) + \dots \quad (1)$$

Usualmente, a Equação 1 é conhecida como Série de Fourier, a qual é caracterizada de forma mais completa de acordo com as Equações 2, 3, 4 e 5.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{n\pi t}{T}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(\frac{n\pi t}{T}\right). \quad (2)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(t) dt. \quad (3)$$

$$a_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(t) \cos\left(\frac{n\pi t}{T}\right) dt. \quad (4)$$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(t) \sin\left(\frac{n\pi t}{T}\right) dt. \quad (5)$$

A Série de Fourier é definida para sinais periódicos. Para sinais não periódicos, aplica-se a TF, de acordo com a Equação 6. No entanto, é importante estabelecer que a Série de Fourier é um caso especial da TF.

Para melhor se compreender essa transformada, deve-se apresentar as equações de análise e de síntese. A equação de análise, apresentada na Equação 6, é também conhecida como Transformada Direta de Fourier e descreve a composição do sinal no domínio da frequência.

$$X(w) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (6)$$

A equação de síntese, apresentada na Equação 7, é também conhecida como Transformada Inversa de Fourier e permite recuperar o sinal a partir de $X(w)$.

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(w) e^{j\omega t} dw. \quad (7)$$

De acordo com Pupin (2011), “A Transformada de Fourier apresenta várias operações geralmente calculadas em funções, por exemplo: combinações lineares, diferenciação, translação, dilatação, multiplicação por polinômios e convolução.”

Em sua versão de tempo discreto, utiliza-se um número finito de pontos no domínio do tempo e se define uma representação discreta do sinal no domínio da frequência. Para isso, algoritmos rápidos conhecidos como *Fast Fourier Transform (FFT)* são utilizados.

2.4 Transformada de Fourier de Tempo Curto

A TF apresenta resultados satisfatórios apenas para sinais estacionários, ou seja, sinais cujas características não se modificam ao longo do tempo. Para contornar esse problema, uma variante, conhecida como Transformada de Fourier de Tempo Curto (TFTC), é utilizada.

A principal característica desta transformada é que ela segmenta o sinal em subsequências por intermédio do uso de janelas. Matematicamente, a TFTC é definida conforme a Equação 8.

$$X_{TFTC}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \omega(\tau - t) e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (8)$$

Na sua forma discreta, tem-se:

$$X_{TFTC}[k, n] = \sum_{m=0}^{N-1} x[n + m] \omega[m] e^{\frac{-j2\pi km}{N}}. \quad (9)$$

A ideia básica da TFTC consiste na multiplicação de um sinal de entrada $f(t)$

por uma dada função janela $\omega(t)$ cuja posição varia no tempo, isto é, dividindo o sinal em pequenos segmentos no tempo. Deste modo, cada espectro de frequência apresenta o conteúdo de frequência durante um tempo curto. A totalidade de tais espectros contém a evolução do conteúdo de frequência com o tempo do sinal em análise (SOUZA, 2004).

Essa transformada fornece como resultado um “espectrograma”: um gráfico planar no qual o eixo das ordenadas representa a frequência, o eixo das abcissas representa o tempo e a intensidade da densidade espectral de energia do sinal, em decibéis por Hertz (db/Hz), é representada por diferentes cores variando de cores frias (violeta, azul) às cores quentes (amarelo, laranja) à medida que a intensidade cresce (LIMA, 2016).

2.5 Janelas

Como o uso da TFTC consiste em aplicar a TF ao produto da função janela pelo segmento do sinal, a escolha da janela irá afetar decisivamente a estimação espectral, hajam vistos os harmônicos nela presentes (LIMA 2016).

Portanto, a TFTC é realizada deslocando uma janela de tamanho constante ao longo do eixo do tempo de um sinal, para que o sinal seja dividido em segmentos nos quais é considerado estacionário, permitindo que a TF seja aplicada (LIMA 2016).

Existem vários tipos de janelas que podem ser utilizadas na TFTC. Neste trabalho, foram selecionadas cinco tipos (Retangular, Blackman, Hamming, Hanning e Gaussiana), as quais são apresentadas nas Figuras 1 e 2.

Figura 1 - Janelas no domínio da frequência

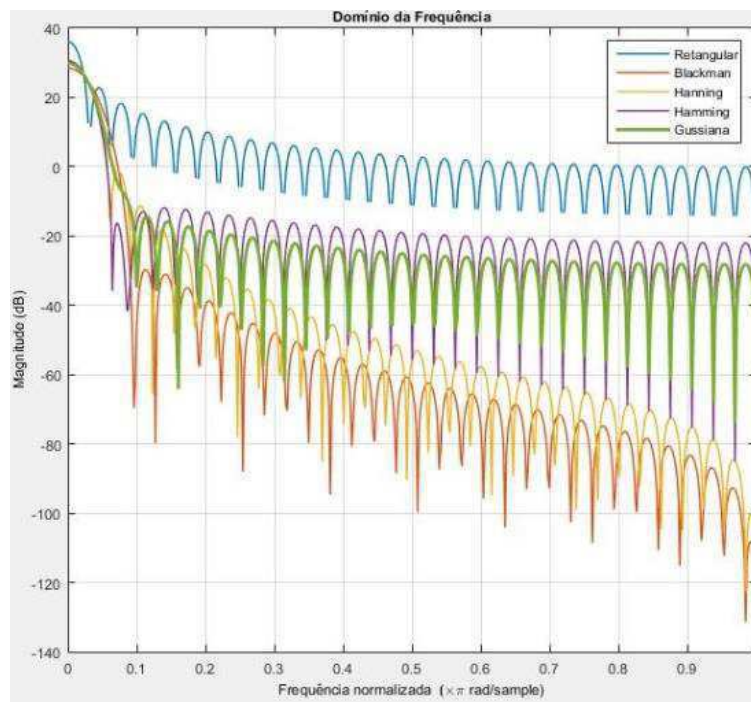
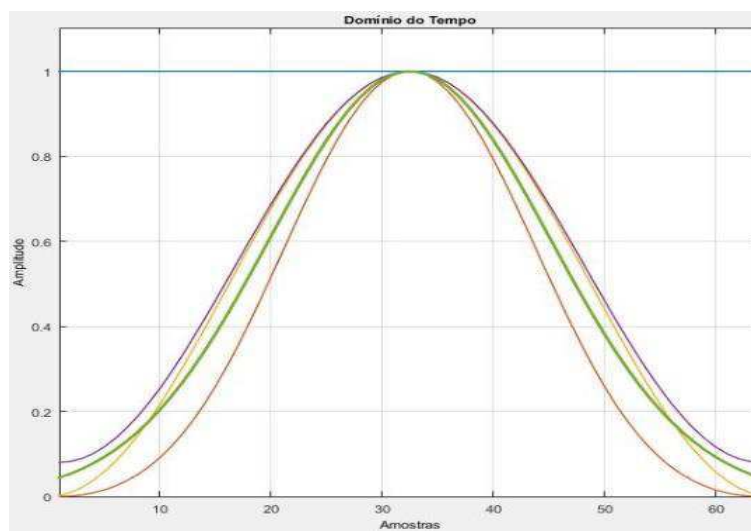


Figura 2 - Janelas no domínio do tempo



Capítulo 3 Metodologia

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi desenvolvido no Laboratório de Simulação de Sistemas de Potência (LabSim). Como recurso didático para a obtenção dos sinais simulados, foi utilizado o *software* MATLAB®.

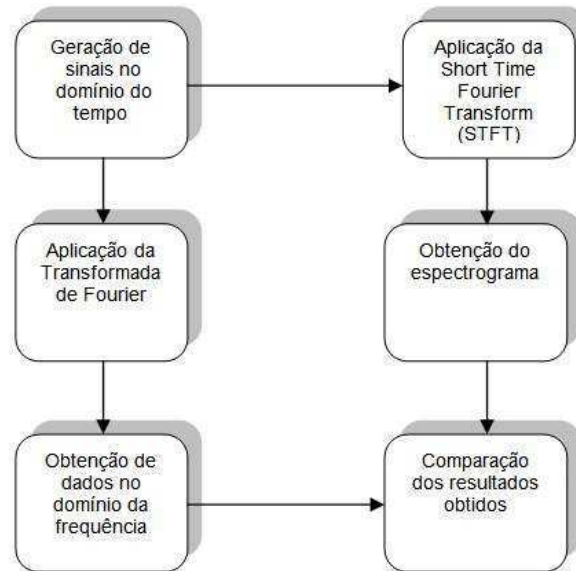
Na Tabela 2 são listados e identificados os distúrbios avaliados neste trabalho, como também os parâmetros adotados para efeito de simulação. A frequência de amostragem utilizada para cada sinal foi de 15360 Hz. O parâmetro A representa a amplitude do sinal, o parâmetro f representa a frequência do sinal, α indica a quantidade, em pu, que deve ser a variação do distúrbio. Por fim, t_1 e t_2 representam os intervalos de duração de cada distúrbio (t_1 é o tempo inicial e t_2 é o tempo final).

Tabela 2 - Distúrbios avaliados e parâmetros simulados

Distúrbio Avaliado	Modelo matemático	Parâmetros Simulados
Senoide Ideal	$v(t) = A * \sin (wt)$	$A = 1 \text{ V}$ $f = 60 \text{ Hz}$
Afundamento de Tensão (VTCD)	$v(t) = (1 - \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2))) * \sin (wt)$	$\alpha = 0.3$ $t_1 = 0.10 \text{ s } t_2 = 0.20 \text{ s}$
Elevação de Tensão (VTCD)	$v(t) = (1 + \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2))) * \sin (wt)$	$\alpha = 0.3$ $t_1 = 0.10 \text{ s } t_2 = 0.20 \text{ s}$
Interrupção de Tensão (VTCD)	$v(t) = (1 - \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2))) * \sin (wt)$	$\alpha = 0.95$ $t_1 = 0.10 \text{ s } t_2 = 0.20 \text{ s}$
Afundamento de Tensão (VTLD)	$v(t) = (1 - \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2))) * \sin (wt)$	$\alpha = 0.3$ $t_1 = 5.00 \text{ s } t_2 = 185 \text{ s}$
Elevação de Tensão (VTLD)	$v(t) = (1 + \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2))) * \sin (wt)$	$\alpha = 0.3$ $t_1 = 5.00 \text{ s } t_2 = 185 \text{ s}$
Interrupção de Tensão (VTLD)	$v(t) = (1 - \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2))) * \sin (wt)$	$\alpha = 0.95$ $t_1 = 5.00 \text{ s } t_2 = 185 \text{ s}$

O fluxograma a seguir expõe, de forma concisa, as etapas da metodologia adotada.

Figura 3 - Fluxograma



Inicialmente, foram gerados sinais no domínio do tempo com os parâmetros apresentados na Tabela 2. Os códigos utilizados para cada distúrbio são apresentados no item Anexo.

As janelas escolhidas na utilização da TFTC foram a Blackman e a Retangular, pois a primeira apresenta melhor atenuação entre o lobo principal e o lobo secundário, enquanto a última apresenta pior atenuação de acordo com as Figuras 1 e 2.

3.1 Códigos dos Distúrbios

Os códigos utilizados para a simulação dos distúrbios estão apresentados no item ANEXOS deste TCC. No caso dos distúrbios classificados como VTLD, apenas foram alterados os seus parâmetros conforme especificados na Tabela 2, tendo como estrutura os códigos utilizados no caso de VTCD, não havendo necessidade, portanto, da repetição dos mesmos.

Capítulo 4 Apresentação e Discussão dos Resultados

Nesta seção serão apresentados e analisados os resultados obtidos de acordo com a metodologia apresentada no Capítulo 3.

4.1 Distúrbios (VTCD e VTLD)

A seguir, serão analisados alguns distúrbios referentes às VTCD e VTLD. Para efeito de comparação, inicialmente será apresentado e analisado nos domínios do tempo e da frequência um sinal considerado ideal, o qual, como descrito no Capítulo 3, apresenta amplitude igual a 1 V e frequência igual a 60 Hz.

4.1.1 Sinal de Tensão Senoidal Ideal

O sinal de tensão senoidal ideal nos domínios do tempo e da frequência é apresentado respectivamente nas Figuras 4 e 5.

Figura 4 - Sinal Ideal de Tensão no domínio do tempo

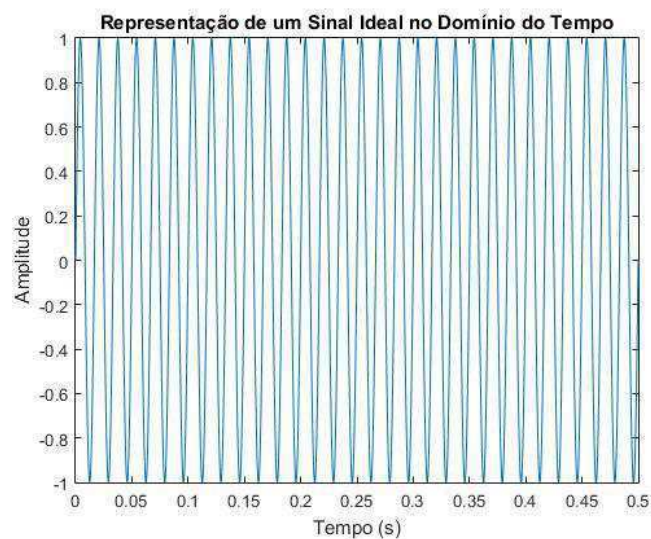
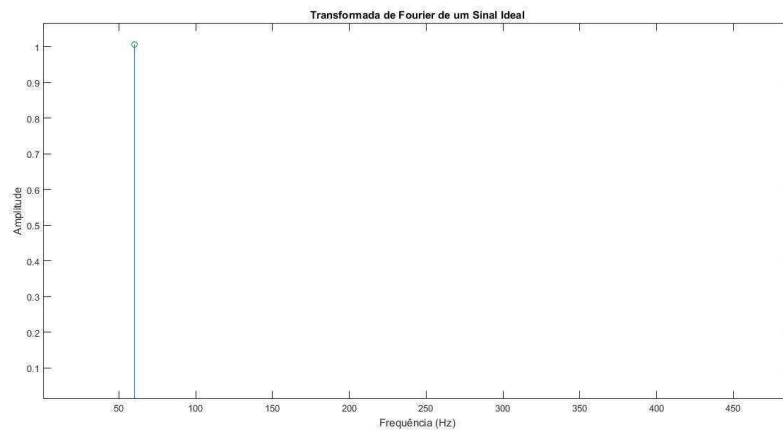


Figura 5 - TF de um Sinal Ideal



Como já esperado, observa-se um pico na frequência fundamental do sinal (60 Hertz). Com relação à amplitude, verifica-se que não houve alteração no domínio da frequência quando comparado ao domínio do tempo.

Aplicando agora a TFTC e utilizando dois diferentes tipos de janelas (Retangular e Blackman) com 32 amostras, tem-se o gráfico da Figura 6.

Figura 6 - TFTC do Sinal Ideal (Janela Retangular com 32 amostras)

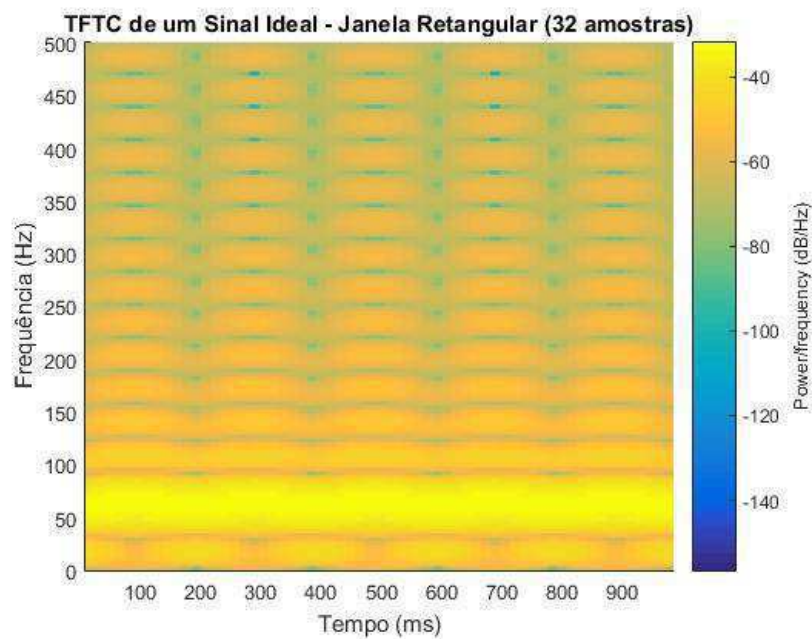
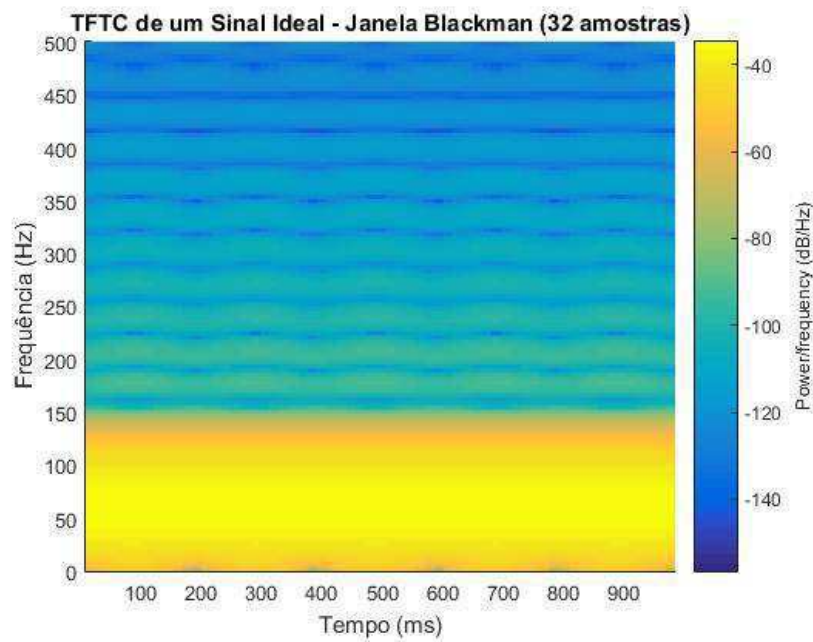


Figura 7 - TFTC do Sinal Ideal (Janela Blackman com 32 amostras)



Verifica-se em ambos os casos que próximo à frequência fundamental, as cores dos espectrogramas são intensificadas e ficam “mais quentes”, significando que naquela faixa há uma frequência predominante, que neste caso é a frequência fundamental. Entretanto, a Janela Blackman é capaz de filtrar mais que a Janela Retangular e, portanto, fora da faixa próxima à frequência fundamental (entre 0 e 140 Hz), nota-se que as cores se tornam mais frias (ficam com o tom mais em azul).

Como esperado, nenhum distúrbio foi identificado nos espectrogramas, pois se trata de um sinal ideal. Para efeito comparativo, quando se aumenta o número de amostras das janelas para 512 amostras, tem-se o resultado apresentado nas Figuras 8 e 9.

Figura 8 - TFTC do Sinal Ideal (Janela Retangular com 512 amostras)

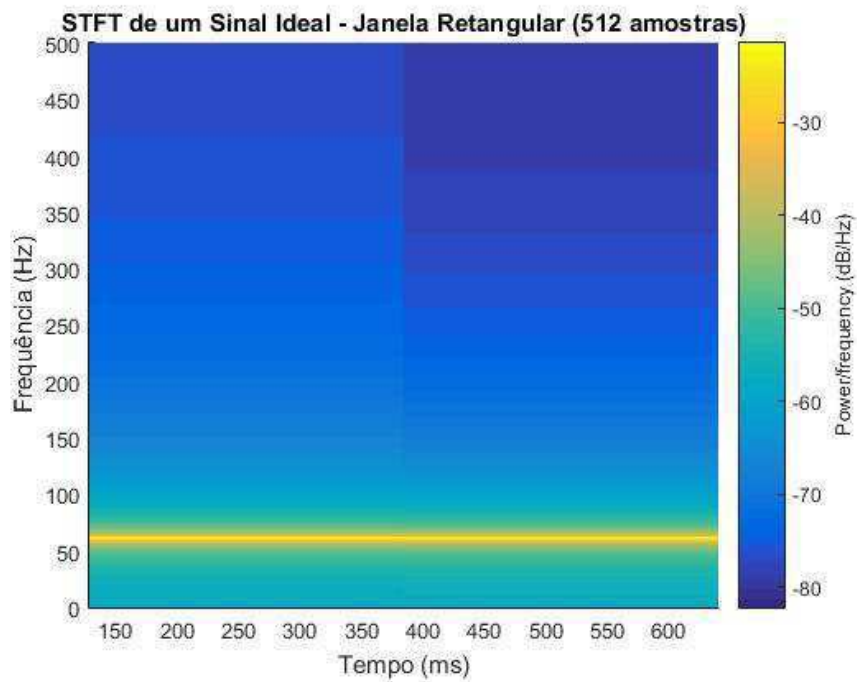
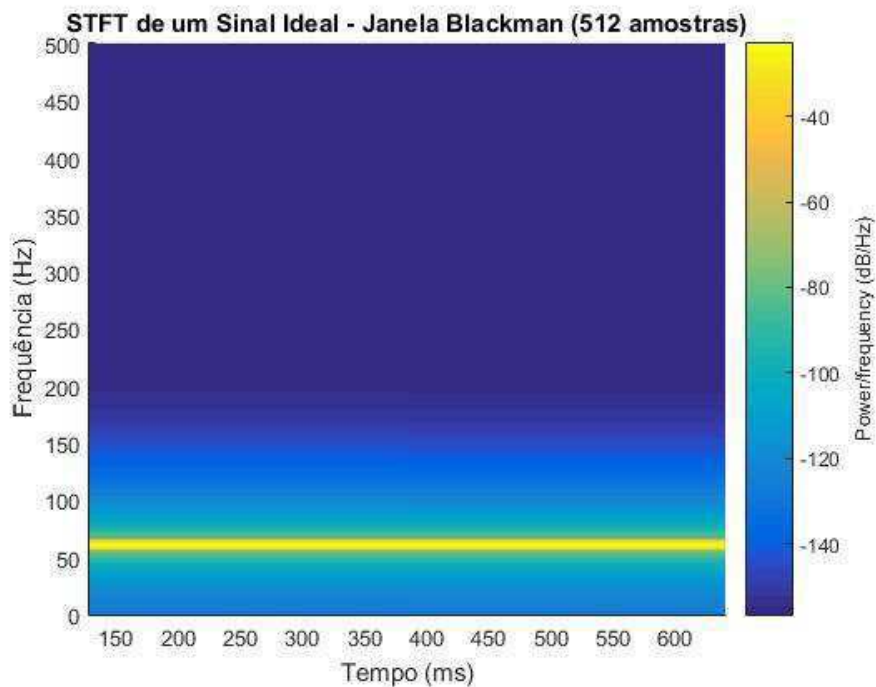


Figura 9 - TFTC do Sinal Ideal (Janela Blackman com 512 amostras)



Com o aumento do número de amostras, nota-se que a frequência fundamental é melhor identificada, seja utilizando a Janela Retangular ou a Janela Blackman.

4.1.2 Sinal de Tensão com Afundamento

Um sinal de tensão senoidal com afundamento nos domínios do tempo e da frequência é apresentado respectivamente nas Figuras 10 e 11.

Figura 10 - Sinal com Afundamento de Tensão no domínio do tempo

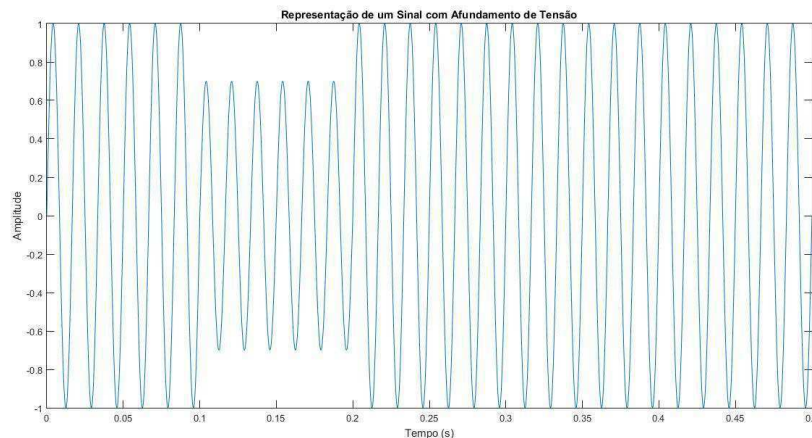
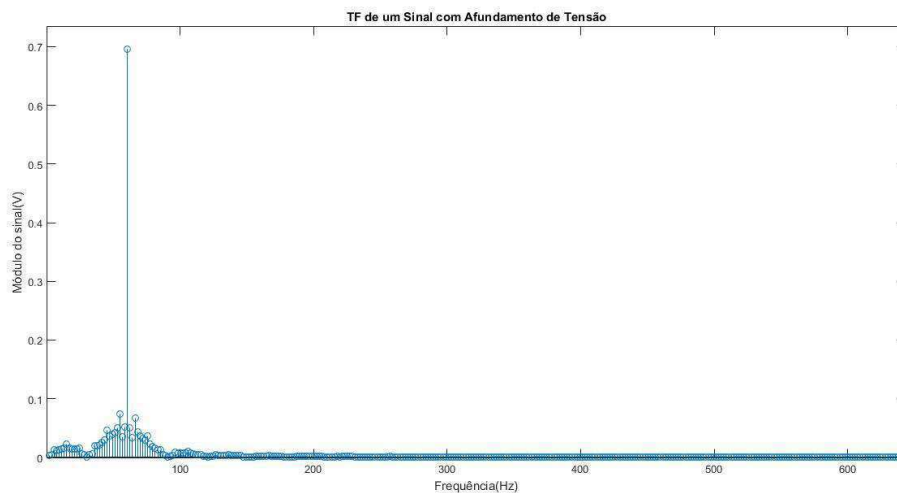


Figura 11 - TF de um Sinal com Afundamento de Tensão



Novamente, o resultado obtido está conforme o esperado. Nota-se no domínio da frequência um pico de tensão na frequência fundamental com amplitude igual a 0,7 V, além do surgimento de componentes de baixas frequências e baixas amplitudes próximas à componente fundamental.

Aplicando novamente a TFTC e utilizando as Janelas Retangular e Blackman com 32 amostras, tem-se os gráficos das Figuras 12 e 13:

Figura 12 - TFTC do Sinal com Afundamento (Janela Retangular com 32 amostras)

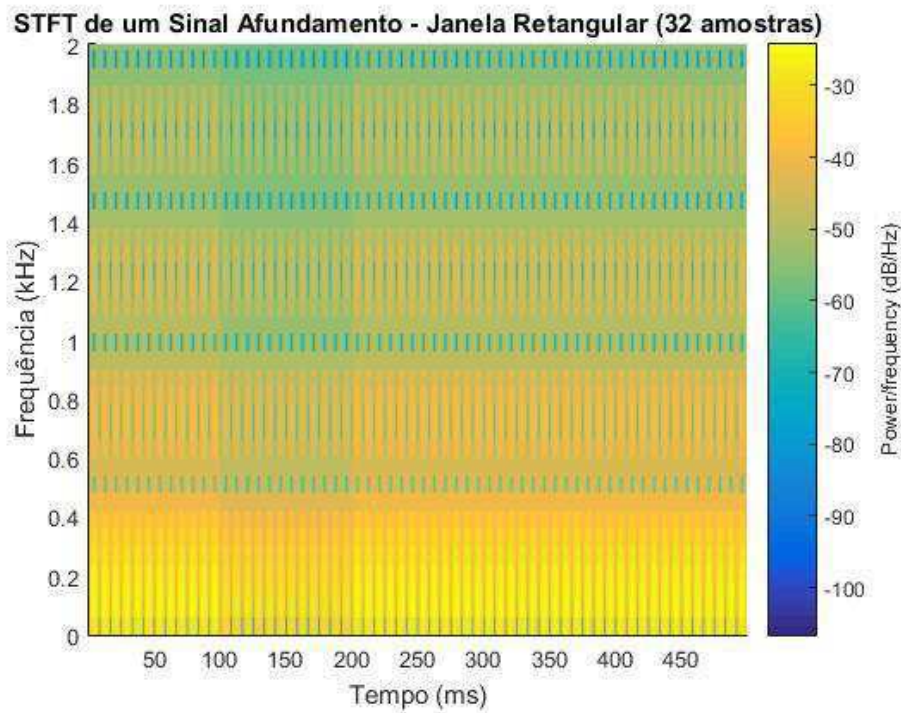
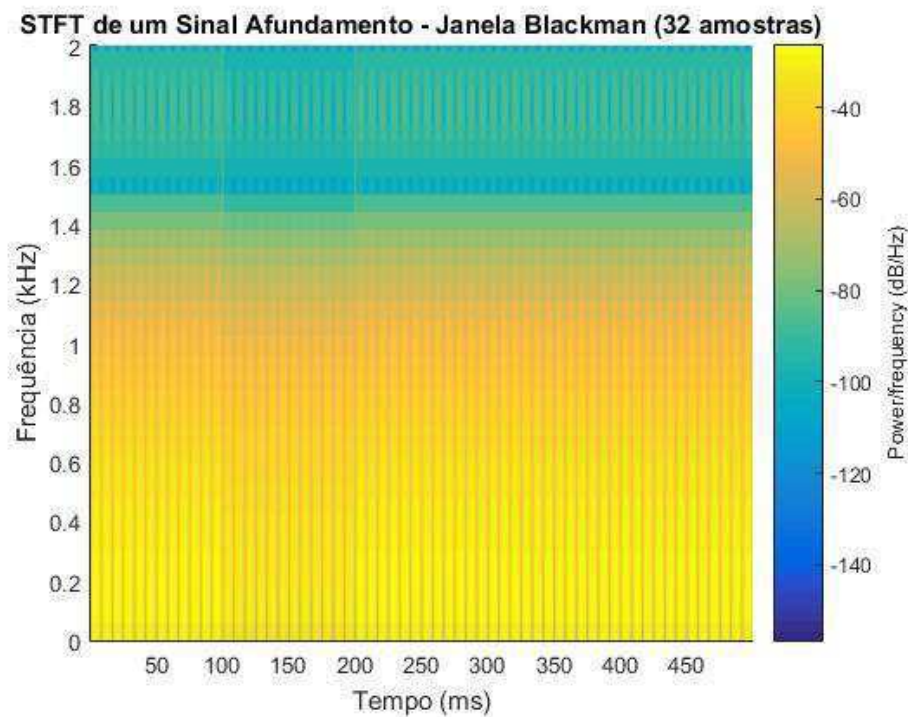


Figura 13 - TFTC do Sinal Ideal (Janela Blackman com 32 amostras)



Neste caso, observou-se para ambos os tipos de janelas que próximo à frequência fundamental (60 Hz), as cores dos espectrogramas são intensificadas e

ficam “mais quentes”, significando que naquela faixa há uma frequência predominante, a qual no caso é a frequência fundamental. Observou-se que a Janela Blackman foi capaz de filtrar mais o sinal quando comparado com a Janela Retangular, por conta de suas características internas.

Outra constatação foi que entre 100 ms e 200 ms, em ambos os casos, há perda da uniformidade do espectrograma, caracterizando a presença de um distúrbio naquele intervalo. Esse resultado está conforme esperado, pois se trata de um sinal com afundamento, o qual, conforme exposto anteriormente, apresenta queda de tensão entre 100 ms e 200 ms.

Mais uma vez, com o intuito de realizar uma análise comparativa, o número de amostras das janelas é aumentado para 512, cujos resultados são apresentados nas Figuras 14 e 15.

Figura 14 - TFTC do Sinal Ideal (Janela Retangular com 512 amostras)

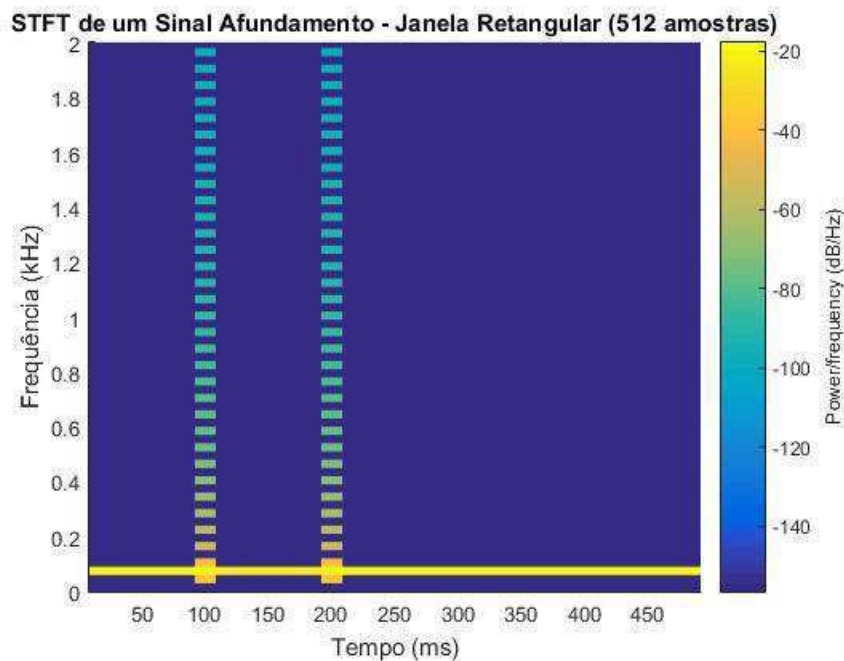
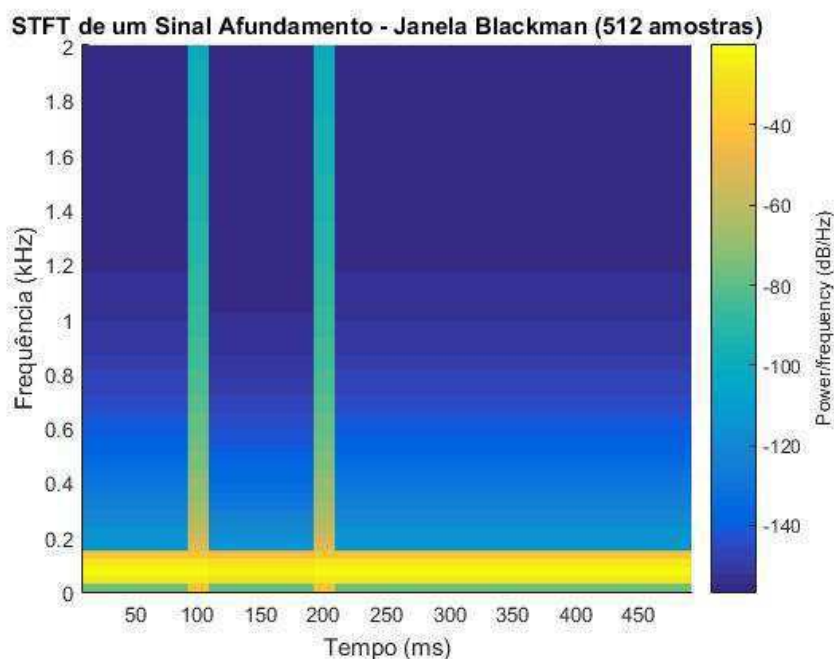


Figura 15 - TFTC do Sinal Ideal (Janela Blackman com 512 amostras)



Com o aumento do número de amostras, observa-se que a frequência fundamental é melhor identificada e que a Janela Retangular, apesar de ter menor capacidade de filtragem do sinal, também se mostra satisfatória na identificação do distúrbio.

Apesar das vantagens citadas anteriormente com o aumento do número de amostras, é importante citar uma desvantagem observada, a qual pode ser importante no estudo dos distúrbios nos sinais: entre o intervalo inicial e final do distúrbio, o espectrograma se comporta como se não houvesse nenhum distúrbio, ou seja, se apresenta de forma idêntica aos intervalos de tempo fora do distúrbio.

Em outras palavras, quando se aumenta o número de amostras, identifica-se com maior facilidade o tempo inicial e final do distúrbio, no entanto, não se tem nenhuma comprovação, baseando-se apenas no espectrograma, que entre aquele intervalo realmente ocorreu um distúrbio.

Com o objetivo de analisar também um sinal de tensão com distúrbio caracterizado como VTLD, o intervalo de tempo do código da seção 3.1.2 para afundamento de tensão é modificado para $t_1 = 5$ s e $t_2 = 185$ s conforme apresentado na seção 3.1.5, resultando em um intervalo igual a 3 minutos (180 segundos). Os gráficos no domínio do tempo e da frequência são apresentados a seguir.

Figura 16 - Sinal com Afundamento (VTLD) no domínio do tempo

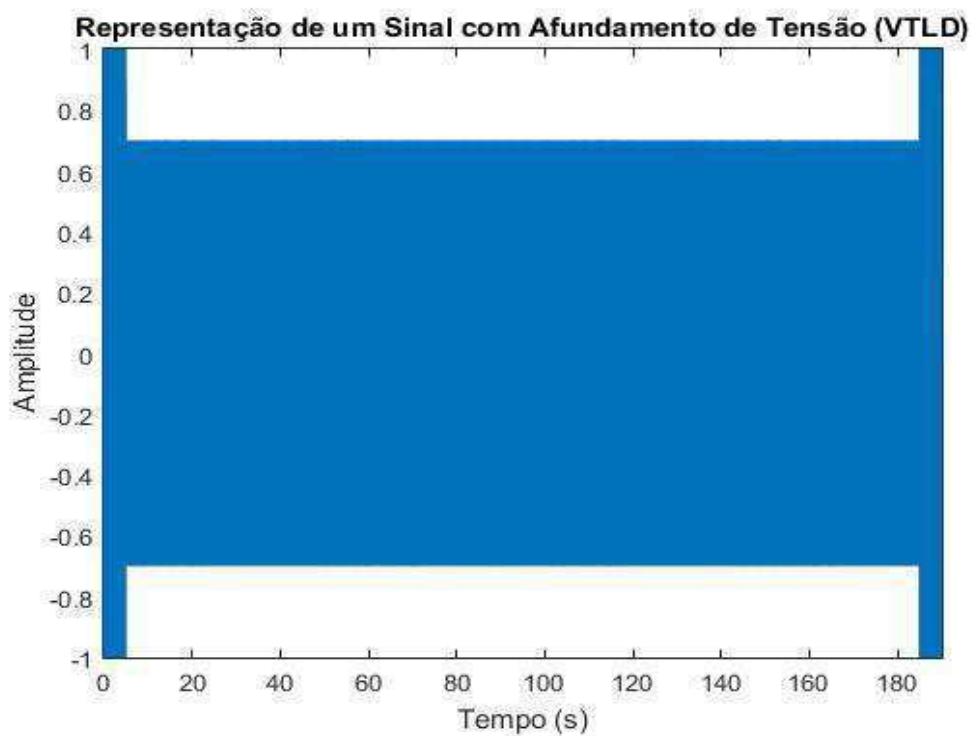
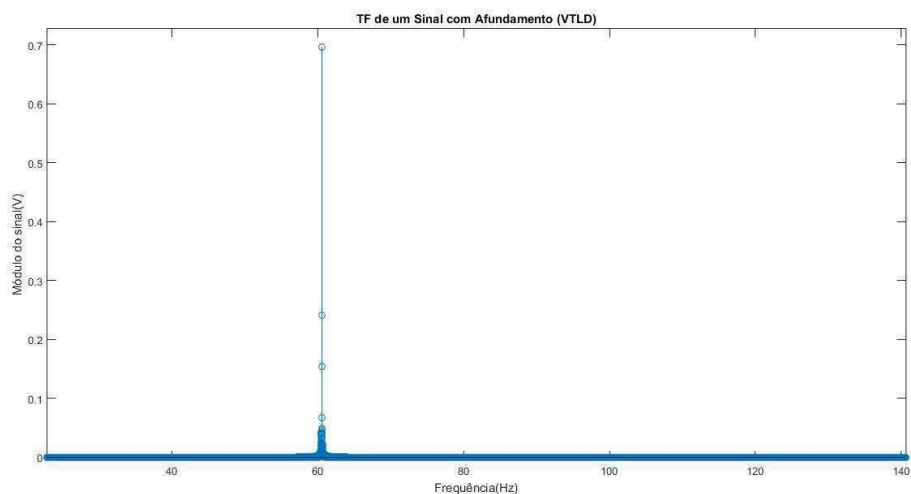


Figura 17 - TF de um Sinal com Afundamento de Tensão (VTLD)



O comportamento observado do sinal no domínio da frequência foi o esperado, visto que ele apresenta um pico de tensão com amplitude 0,7 V e centrado na frequência fundamental.

Analisando este mesmo sinal por meio da TFTC com janela retangular de 32 e 512 amostras, respectivamente, obtiveram-se as figuras 18 e 19.

Figura 18 - TFTC do Sinal com Afundamento - VTLD - (Janela Retangular com 32 amostras)

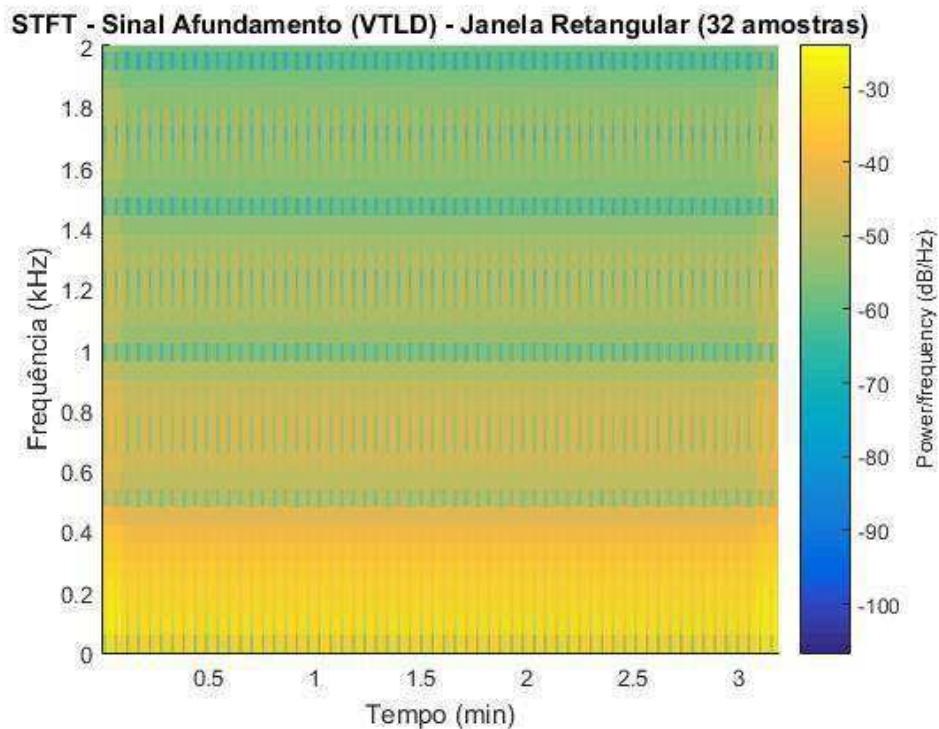
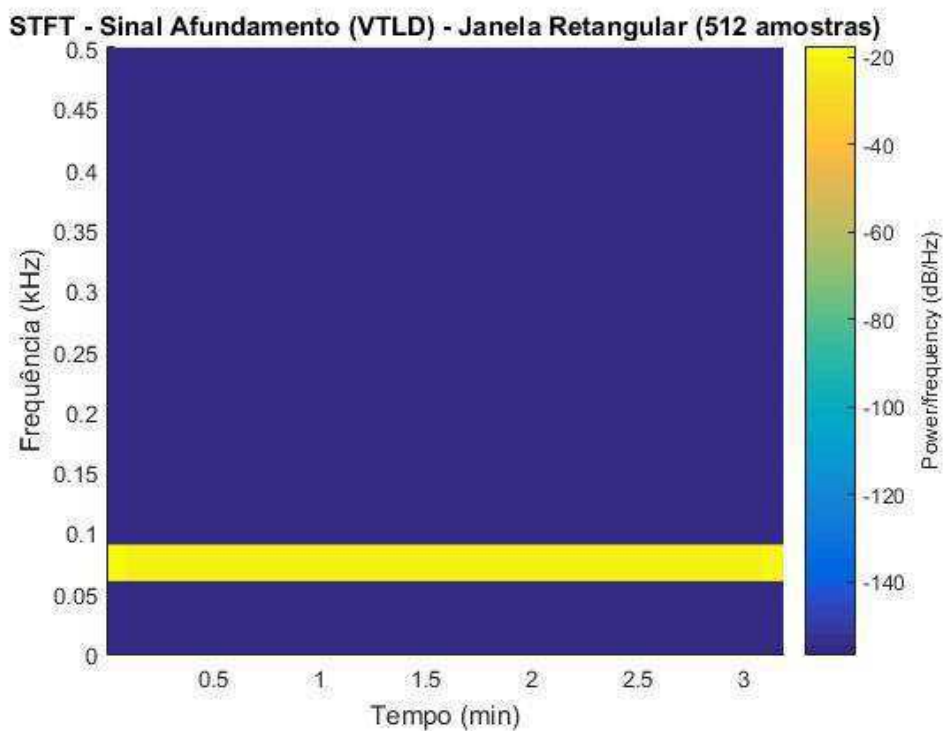


Figura 19 - TFTC do Sinal com Afundamento - VTLD - (Janela Retangular com 512 amostras)



Verifica-se, portanto, que com o aumento do número de amostras da janela,

fica bem mais difícil a identificação do distúrbio e de seu intervalo no espectrograma.

4.1.3 Sinal de Tensão com Elevação

O sinal de tensão com elevação é representado nos domínios do tempo e da frequência nas Figuras 20 e 21.

Figura 20 - Sinal com Elevação de Tensão no domínio do tempo

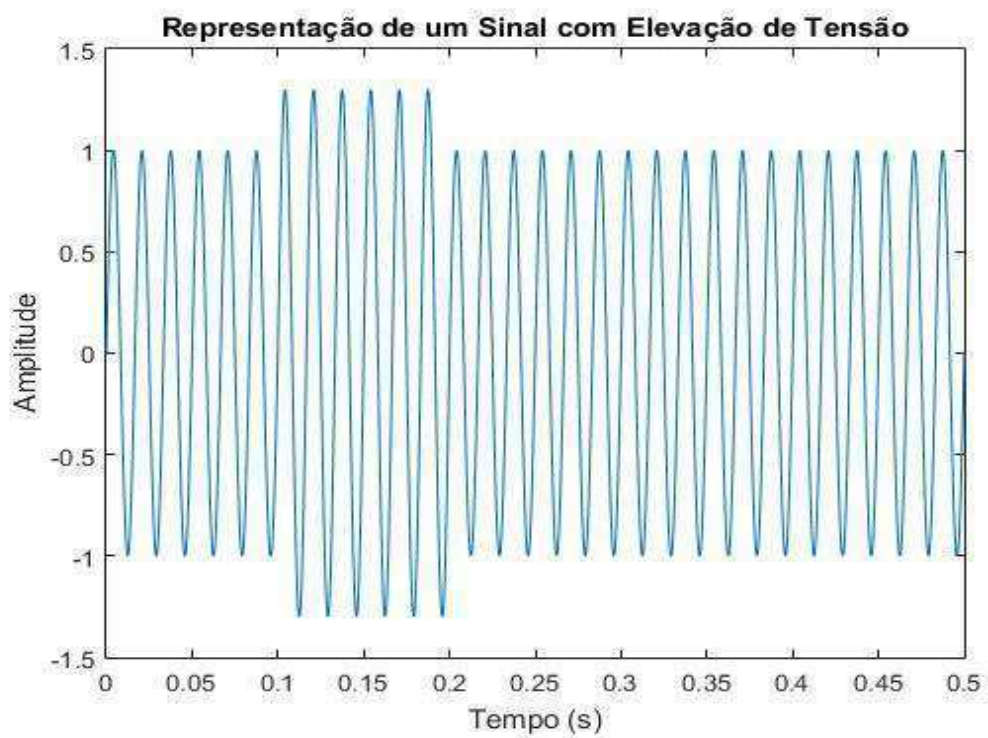
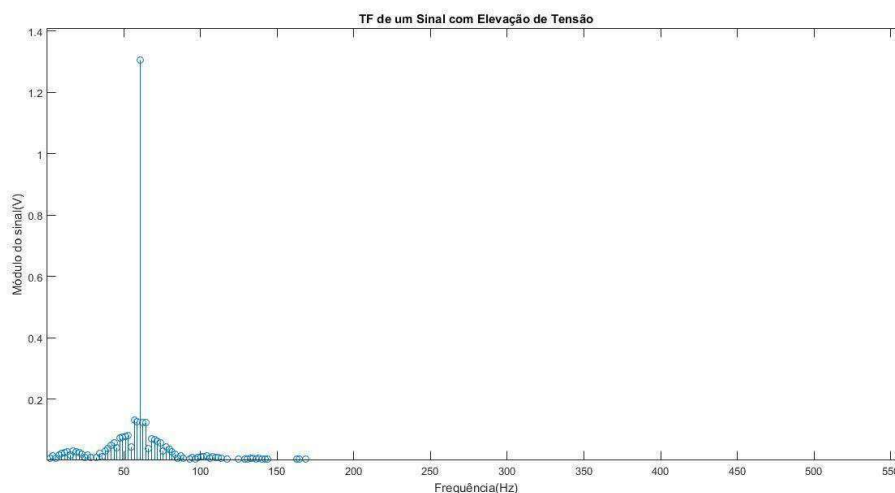


Figura 21 - TF de um Sinal com Elevação de Tensão



Novamente, assim como observado para o afundamento de tensão, o resultado obtido foi conforme o esperado. Nota-se no domínio da frequência um pico de tensão na frequência fundamental com amplitude igual a aproximadamente 1,3 V, além do surgimento de componentes de baixas frequências e baixas amplitudes próximas à componente fundamental.

Avaliando agora o distúrbio por intermédio da TFTC e utilizando as Janelas Retangular e Blackman com 32 amostras, obtiveram-se as Figuras 22 e 23.

Figura 22 - TFTC do Sinal com Elevação (Janela Retangular com 32 amostras)

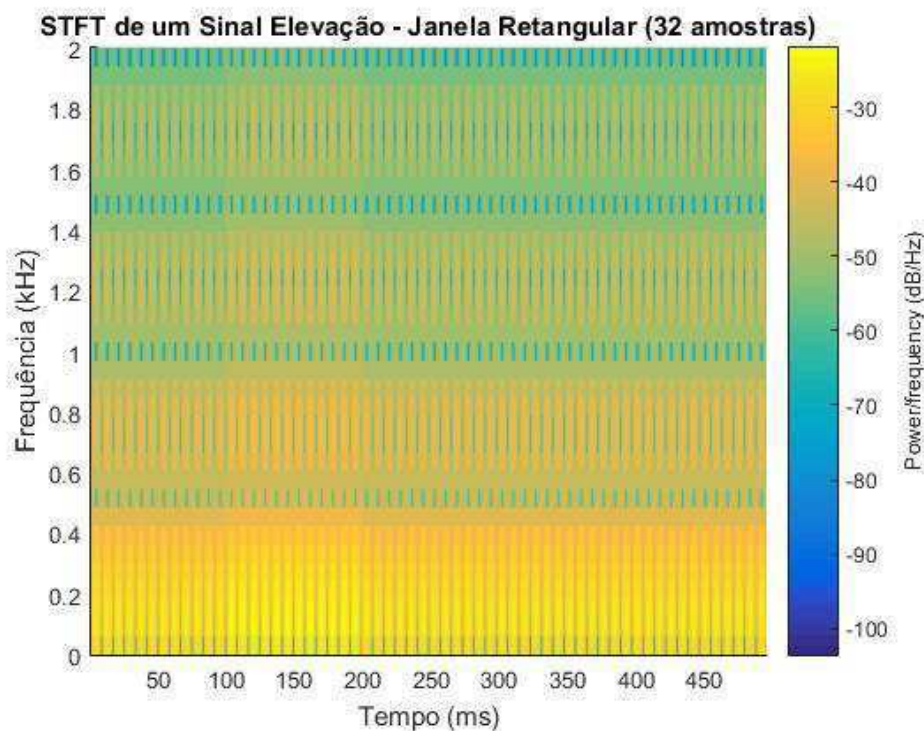
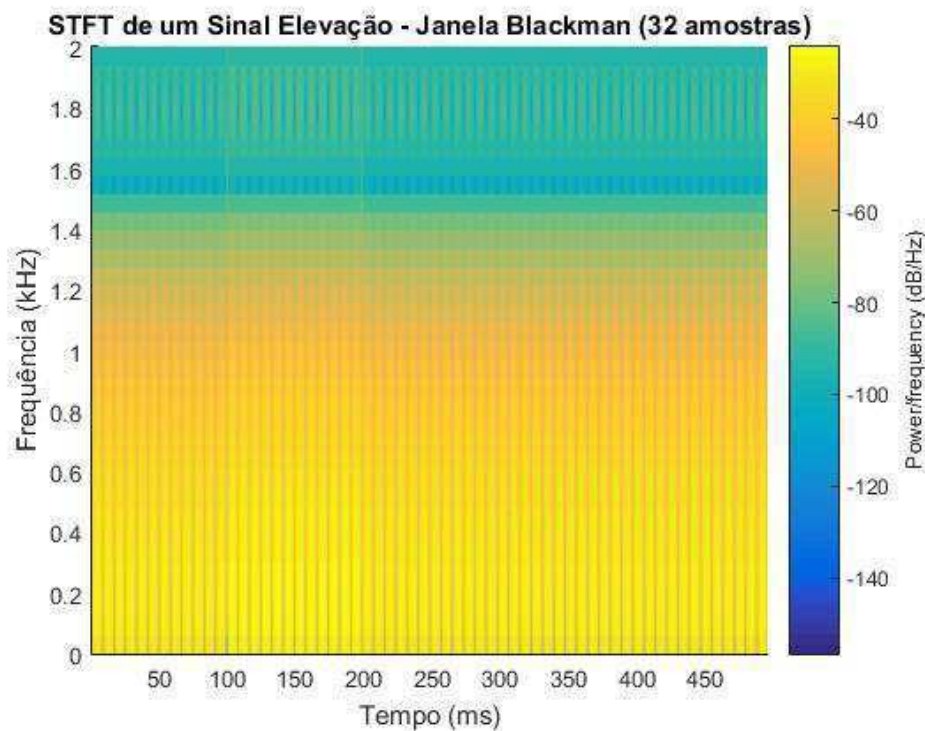


Figura 23 - TFTC do Sinal com Elevação (Janela Blackman com 32 amostras)



Semelhante aos resultados obtidos para o caso do afundamento de tensão, comprova-se que a Janela Blackman foi capaz de filtrar mais o sinal quando comparado com a Janela Retangular, de forma que próximo à frequência fundamental do sinal as cores do espectrograma são mais “quentes” (com tom mais próximo ao amarelo).

Entre 100 ms e 200 ms, nota-se perda na uniformidade do espectrograma, identificando, portanto, que naquele intervalo há um distúrbio no sinal. Esse resultado está conforme esperado, pois se trata de um sinal com elevação de tensão, o qual, conforme exposto anteriormente, apresenta alta no valor da tensão no período compreendido entre 100 ms e 200 ms.

Quando se aumenta o número de amostras das janelas avaliadas, obtêm-se os resultados mostrados nas Figuras 24 e 25.

Figura 24 - TFTC do Sinal com Elevação (Janela Retangular com 512 amostras)

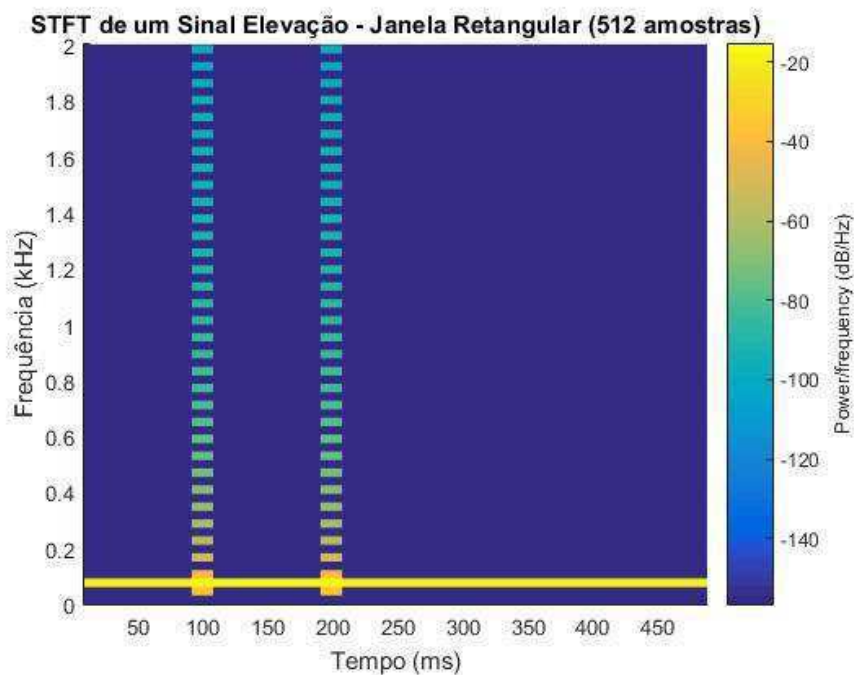
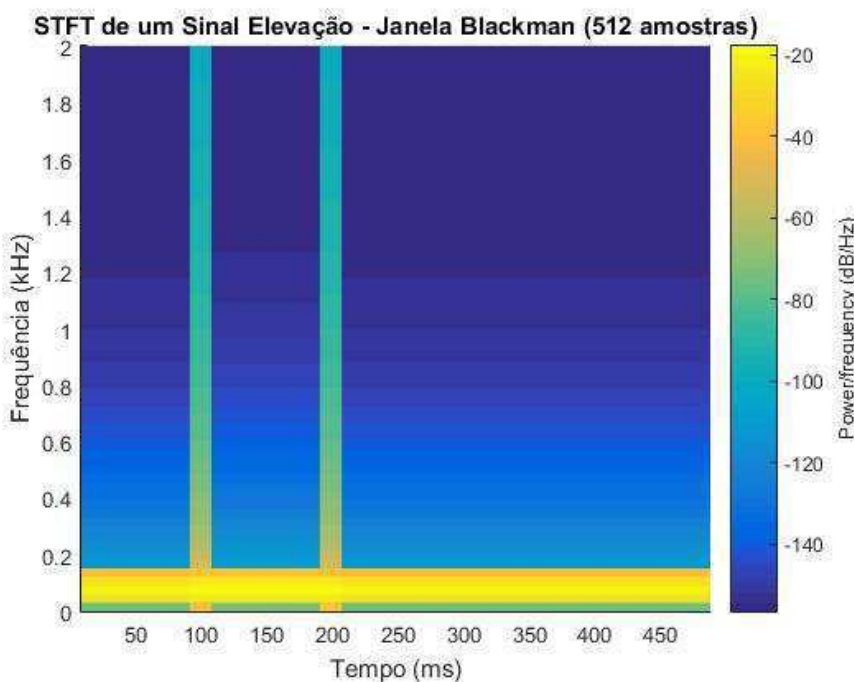


Figura 25 - TFTC do Sinal com Elevação (Janela Blackman com 512 amostras)



Nota-se que a identificação do intervalo do distúrbio, com o aumento do número de amostras para 512, fica mais evidente. A frequência fundamental do sinal também é identificada com maior facilidade.

No entanto, assim como ocorreu para a situação de afundamento de tensão entre o intervalo inicial e final do distúrbio, o espectrograma se comporta como se não

houvesse nenhum distúrbio, ou seja, se apresenta de forma idêntica aos intervalos de tempo fora do distúrbio.

Com o objetivo de analisar também um sinal de tensão com distúrbio caracterizado como VTLD, o intervalo de tempo do código da seção 3.1.3 para elevação de tensão é modificado para $t_1 = 5$ e $t_2 = 185$ conforme salientado na seção 3.1.5, resultando em um intervalo igual a 3 minutos (180 segundos). Neste caso, tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência (TF), é representado nas Figuras 26 e 27.

Figura 26 - Sinal com Elevação (VTLD) no domínio do tempo

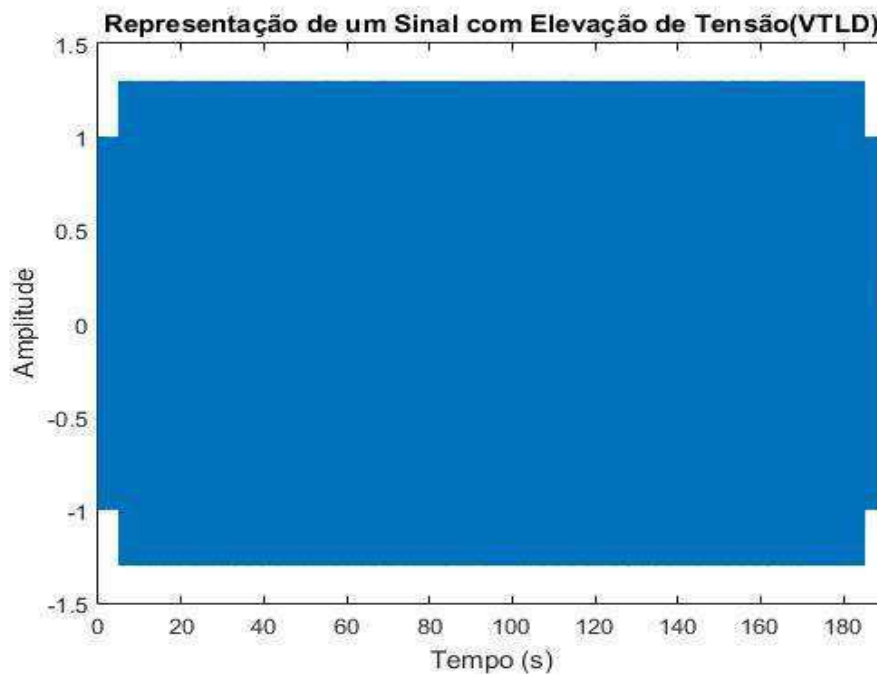
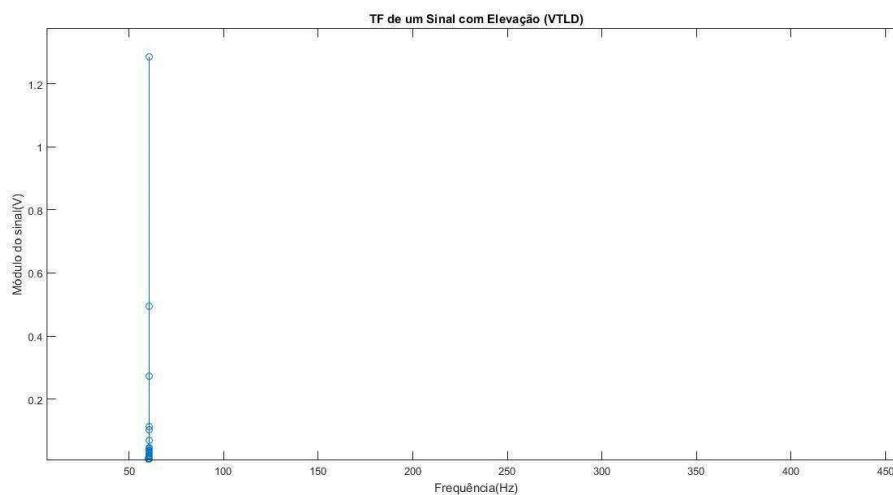


Figura 27 - TF de um Sinal com Elevação de Tensão (VTLD)



O comportamento observado do sinal no domínio da frequência foi o esperado, visto que ele apresenta um pico de tensão com amplitude de aproximadamente 1,3 V e centrado na frequência fundamental.

Analisando este mesmo sinal por meio da TFTC com janela retangular de 32 e 512 amostras, respectivamente, obtiveram-se as Figuras 28 e 29:

Figura 28 - TFTC do Sinal com Elevação - VTLD - (Janela Retangular com 32 amostras)

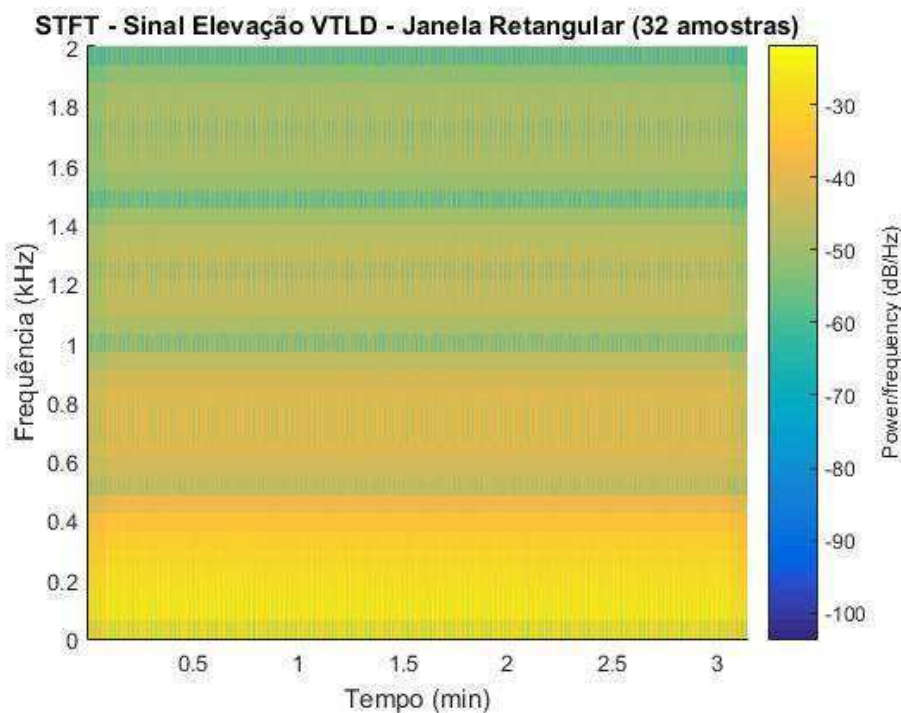
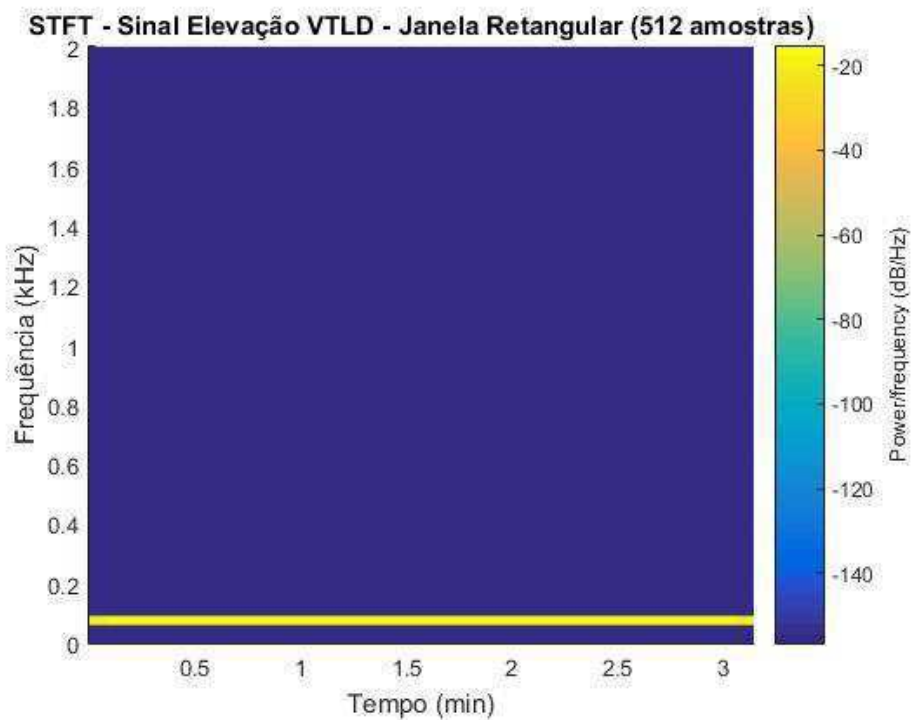


Figura 29 - TFTC do Sinal com Elevação - VTLD - (Janela Retangular com 512 amostras)



Com isso, pode-se estabelecer que com o aumento do número de amostras das janelas, o distúrbio elevação de tensão também ficou mais difícil de ser identificado.

4.1.4 Sinal de Tensão com Interrupção

O sinal de tensão com interrupção nos domínios do tempo e da frequência são apresentados, respectivamente, nas Figuras 30 e 31.

Figura 30 - Sinal com Interrupção de Tensão no domínio do tempo

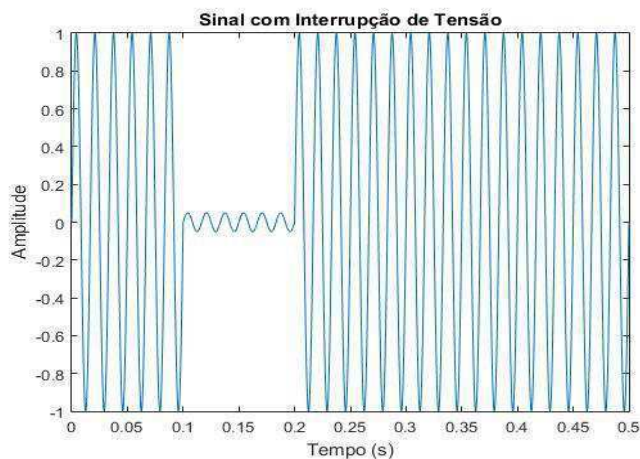
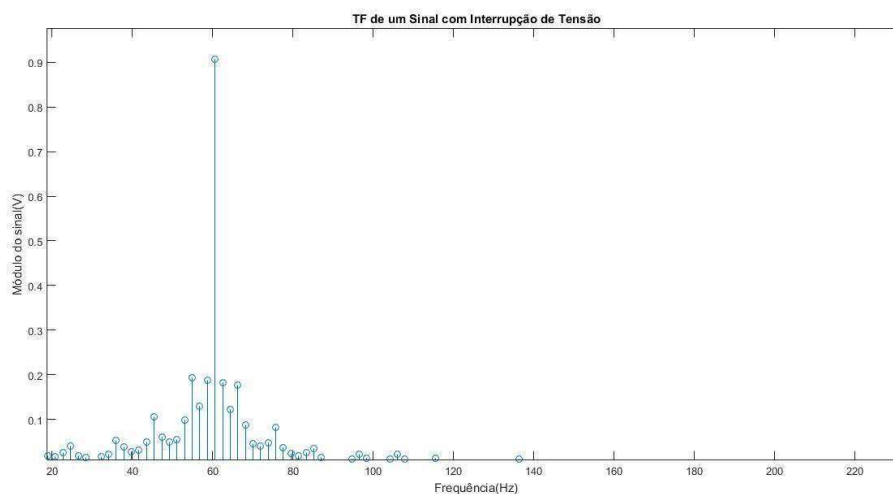


Figura 31 - TF de um Sinal com Interrupção de Tensão



Novamente, a análise no domínio da frequência revela o surgimento de componentes de baixa frequência e baixa amplitude, próximos à frequência fundamental, relacionados ao início do distúrbio. Esse fenômeno é causado devido ao espreadimento de tensão.

Aplicando novamente a TFTC e utilizando as Janelas Retangular e Blackman com 32 amostras, obtiveram-se as Figuras 32 e 33.

Figura 32 - TFTC do Sinal com Interrupção (Janela Retangular com 32 amostras)

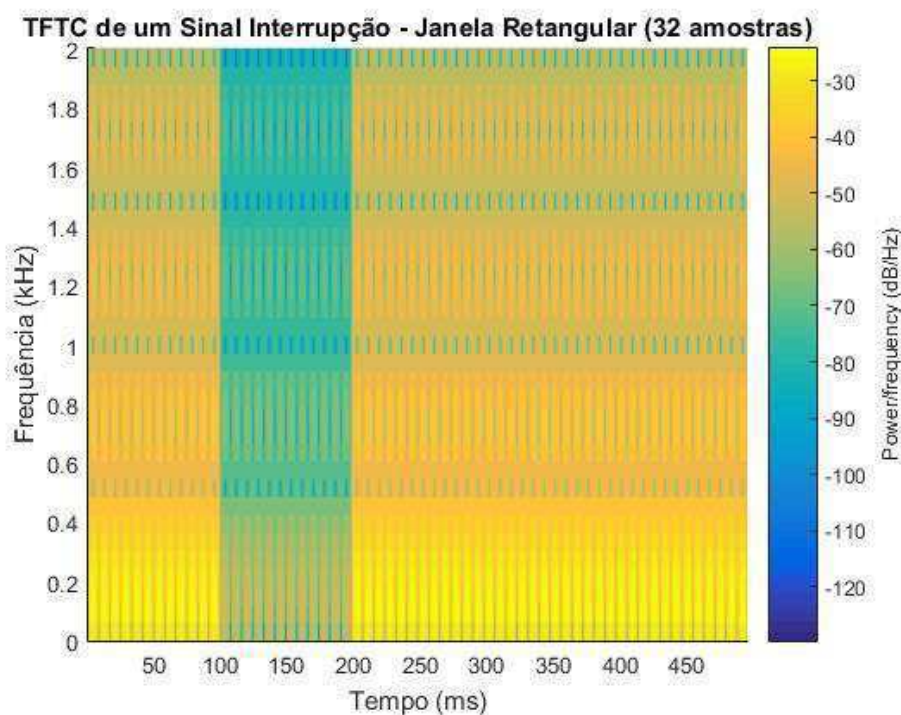
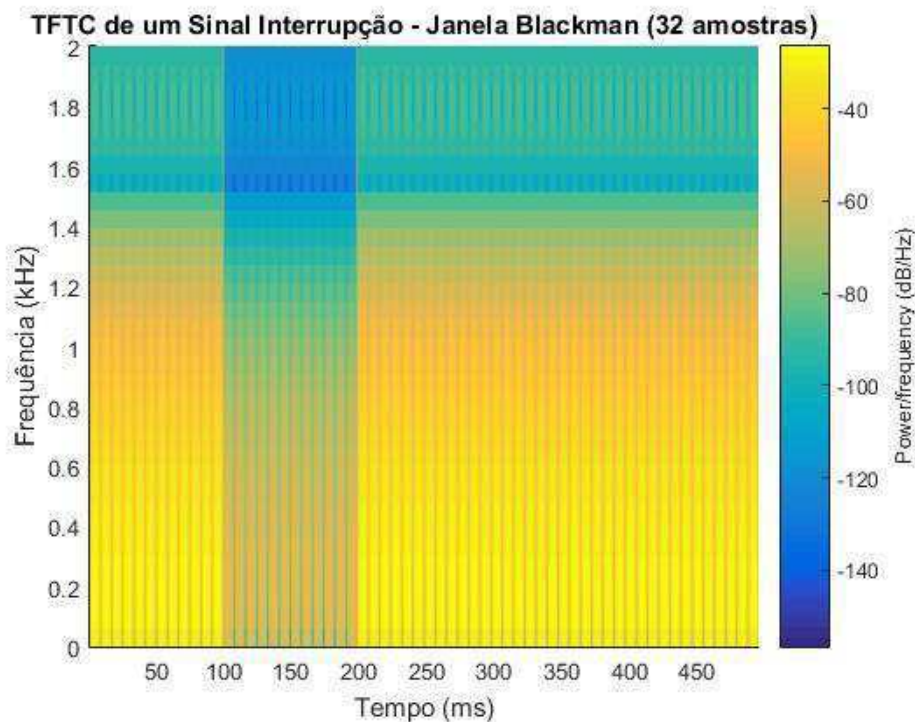


Figura 33 - TFTC do Sinal com Interrupção (Janela Blackman com 32 amostras)



Semelhante aos resultados obtidos para o caso do afundamento e de elevação de tensão, verifica-se novamente que a Janela Blackman foi capaz de filtrar mais o sinal quando comparado com a Janela Retangular, de forma que próximo à frequência fundamental do sinal as cores do espectrograma são mais “quentes” (com tom mais próximo ao amarelo).

Entre 100ms e 200ms, nota-se perda na uniformidade do espectrograma, identificando, portanto, que naquele intervalo há um distúrbio no sinal. Esse resultado está conforme esperado, pois se trata de um sinal com interrupção de tensão, o qual, conforme exposto anteriormente, apresenta um distúrbio no período compreendido entre 100 ms e 200 ms.

Realizando a análise do sinal aumentando o número de amostras das janelas utilizadas, obtêm-se os resultados mostrados nas Figuras 34 e 35.

Figura 34 - TFTC do Sinal com Interrupção (Janela Retangular com 512 amostras)

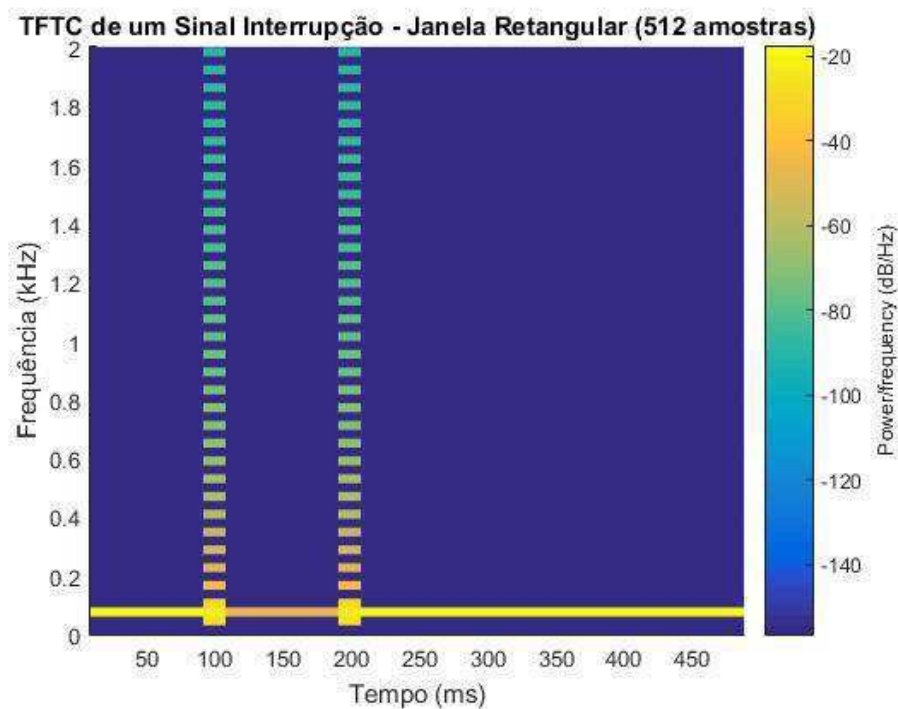
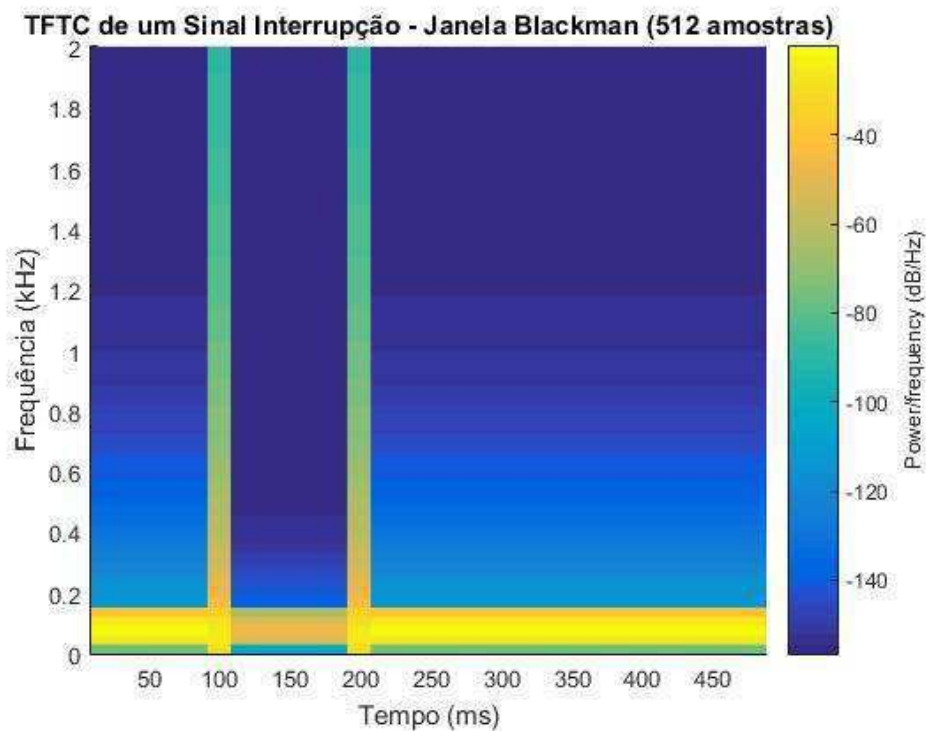


Figura 35 - TFC do Sinal com Interrupção (Janela Blackman com 512 amostras)



Nota-se que a identificação do intervalo do distúrbio, com o aumento do número de amostras, fica mais evidente. A frequência fundamental do sinal também é identificada com maior facilidade.

No entanto, assim como ocorreu para a situação de afundamento e elevação de

tensão entre o intervalo inicial e final do distúrbio, o espectrograma se comporta como se não houvesse nenhum distúrbio, ou seja, se apresenta de forma idêntica aos intervalos de tempo fora do distúrbio.

Com o objetivo de analisar também um sinal de tensão com distúrbio caracterizado como VTLD, o intervalo de tempo do código da seção 3.1.4 para interrupção de tensão é modificado para $t_1 = 5$ e $t_2 = 185$ conforme salientado na seção 3.1.5, resultando em um intervalo igual a 3 minutos (180 segundos). Essa situação, tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência (TF) é apresentada nas Figuras 36 e 37, respectivamente:

Figura 36 - Sinal com Interrupção (VTLD) no domínio do tempo

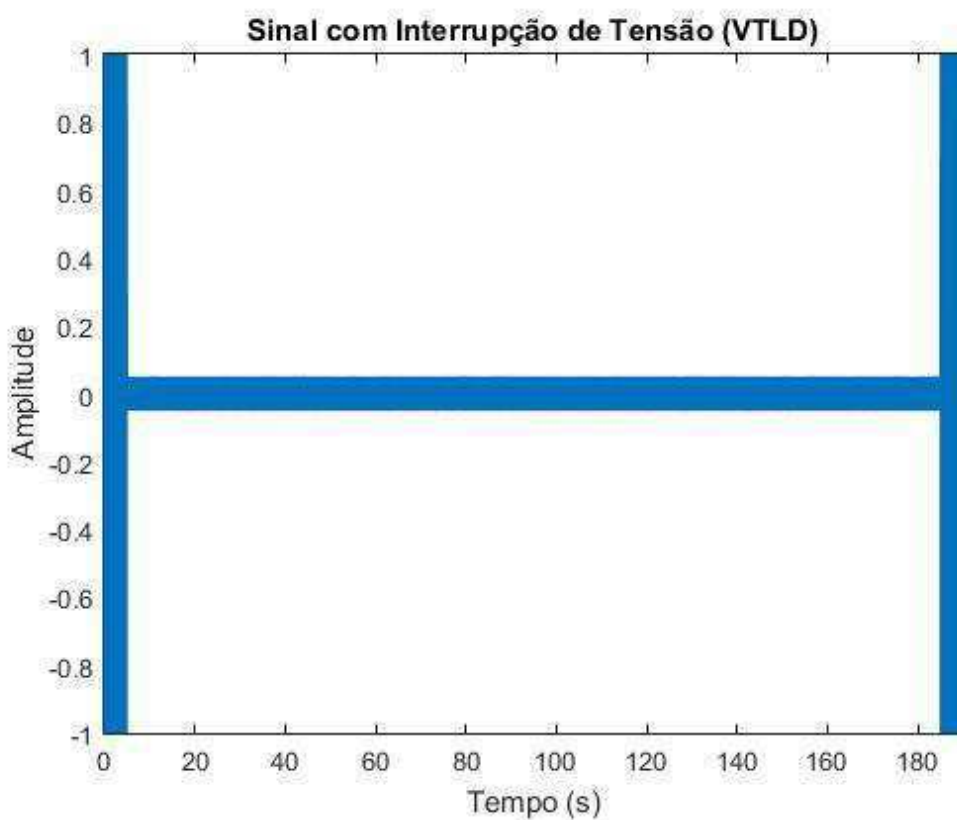
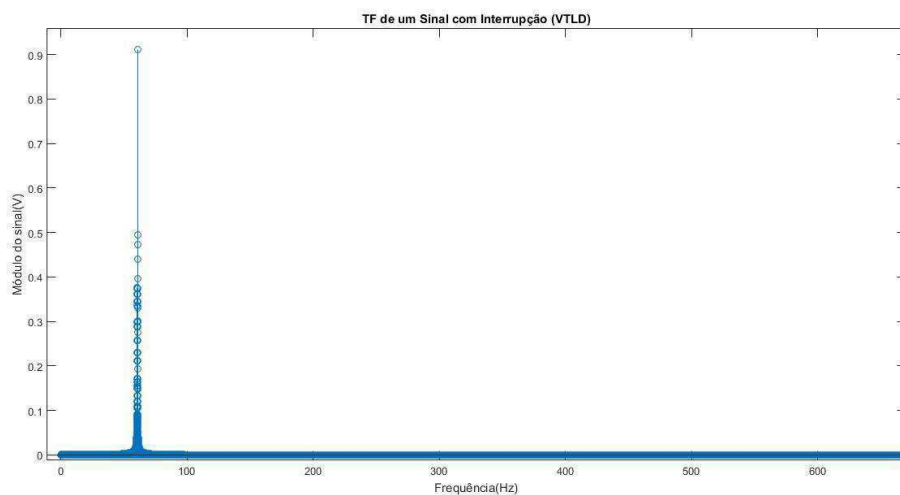


Figura 37 - TF de um Sinal com Interrupção de Tensão (VTLD)



O comportamento observado do sinal no domínio da frequência foi o esperado, visto que ele apresenta um pico de tensão com amplitude de aproximadamente 0,9 V e centrado na frequência fundamental.

Analisando este mesmo sinal por meio da TFTC com janela retangular de 32 e 512 amostras, respectivamente, obtiveram-se as Figuras 38 e 39.

Figura 38 - TFTC do Sinal com Interrupção - VTLD - (Janela Retangular com 32 amostras)

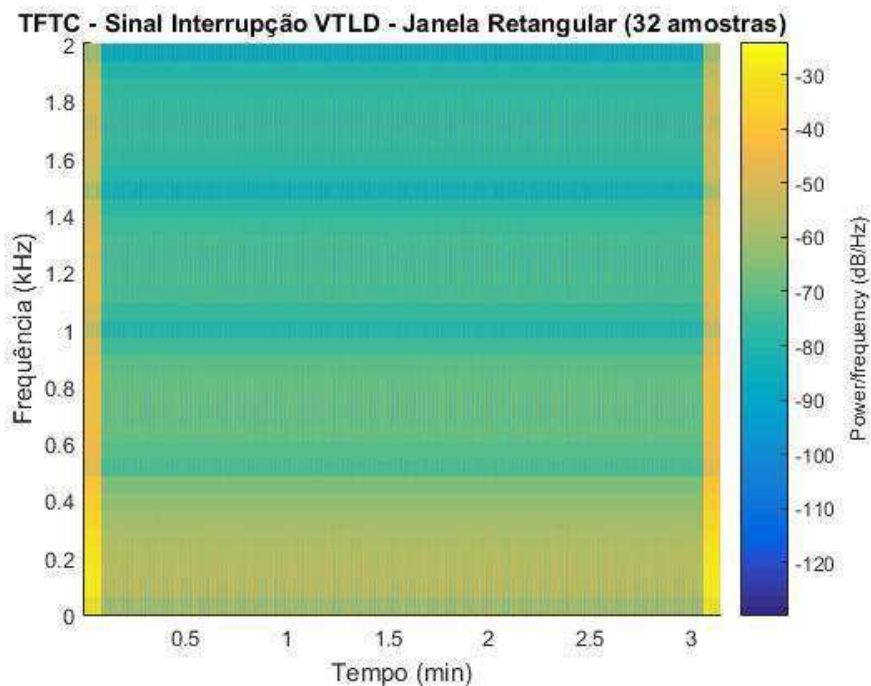
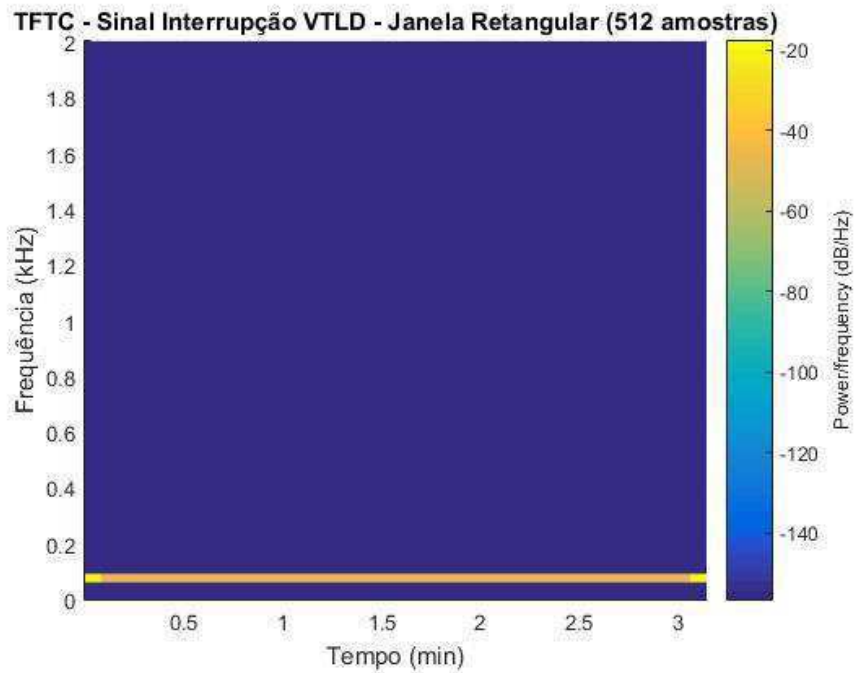


Figura 39 - TFTC do Sinal com Interrupção - VTLD - (Janela Retangular com 512 amostras)



Portanto, pode-se estabelecer que com o aumento do número de amostras das janelas, o distúrbio interrupção de tensão, assim como os demais, também ficou mais difícil de ser identificado.

Capítulo 5 Conclusões

O estudo e desenvolvimento realizado neste TCC possibilitou o aprimoramento do conhecimento a respeito de Qualidade da Energia Elétrica (QEE), como também dos distúrbios que afetam os sinais, como o afundamento, a elevação e a interrupção de tensão.

Algumas ferramentas podem ser utilizadas na tentativa de identificação e reconhecimento do distúrbio em um sinal de tensão. Neste trabalho, foram apresentadas duas dessas ferramentas: a Transformada de Fourier (TF) e a Transformada de Fourier de Tempo Curto (TFTC).

A TFTC apresenta um grande diferencial em relação à TF que é o fornecimento de um espectrograma, o qual auxilia na identificação do intervalo de tempo em que ocorreu o distúrbio, como também possibilita a análise do sinal por meio de sua energia, indicando por meio das “cores quentes” (em tom mais amarelo) a presença da frequência fundamental.

Verificou-se também que o número de amostras de uma janela e o seu tipo influencia significativamente na identificação e análise do distúrbio. Quanto maior o número de amostras da janela, melhor fica a identificação da frequência fundamental do sinal.

Espera-se que este trabalho possa auxiliar futuras pesquisas sobre o tema e como continuação do estudo realizado, sugere-se realizar os seguintes pontos:

- Aplicar e comparar outros tipos de janelas na TFTC;
- Estudo de outras ferramentas matemáticas como a Transformada Discreta de Wavelet e a Transformada de Stockwell;
- Aplicar os métodos analisados neste TCC para sinais reais.

Referências Bibliográficas

ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST. Módulos 1 a 8. 2011.

COELHO, R. A. Análise comparativa de métodos para cálculo de potência elétrica. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, 2018.

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F. & WAYNE BEATY, H. Electrical Power Systems Quality, Second Edition, MCGRAWHILL, 2004.

JUNQUEIRA, C. M. S. Um algoritmo para alocação ótima de detectores de afundamentos de tensão. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, 2017.

LIMA, E. M. Proposição de um método de detecção de FAI baseado nos componentes harmônicos de baixa frequência. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, 2016.

MICHELIN, C. (1998). Transformada de Fourier e Transformada de Fourier Rápida. Ribeirão Preto. 125 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo.

OLESKOVICZ, M.; Arruda, E. F; Delmont Filho, O.; Coury, D. V. e Carneiro, A F. M. (2003). “Análise da Qualidade da Energia utilizando transformadas wavelet combinadas às redes neurais artificiais”, XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE, Uberlândia, MG, Brasil, Anais do Congresso (CD).

OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S.; NAWAB, S. H. (Colab.). Sinais e sistemas. 2. ed.

SANKARAN, C. Power quality, CRC Press LLC, 2002.

SOUZA A, S. A. (2004). Utilização da Transformada de Fourier Janelada para Caracterização de Distúrbios na Qualidade da Energia Elétrica. São Carlos. 124 p. Dissertação (Mestrado) – EESC, Universidade de São Paulo.

WEAVER, H. JOSEPH. (1983). Applications of Discrete and Continuous Fourier Analysis. John Wiley & Sons.

Anexos

ANEXO A - CÓDIGO BASE UTILIZADO PARA SIMULAR UM SINAL DE TENSÃO SENOIDAL IDEAL

```
function [S1] = Sinal_Ideal(f,A)

%Parâmetros
T = 1/f;
tmin = 0;
tmax = 30*T;
n_amostras_ciclo = 256;
fs = f*n_amostras_ciclo;
ts = 1/fs;
t = tmin:1/fs:tmax;
w = (2*pi*f);

%Modelo Matemático
S1 = A*sin(w*t)
end
```

ANEXO B - CÓDIGO BASE UTILIZADO PARA SIMULAR UM SINAL DE TENSÃO COM AFUNDAMENTO

```
function [S2] = Sinal_Afundamento(f)
%Parâmetros
T = 1/f;
tmin = 0;
tmax = 30*T;
n_amostras_ciclo = 256;
fs = f*n_amostras_ciclo;
t = tmin:1/fs:tmax;
t1 = 0.10;
t2 = 0.20;
w = (2*pi*f);
alpha = 0.3;
degrau = d_unit(t, t1, t2);
%Modelo Matemático
k = 1-(alpha.*degrau);
S2 = k.*sin(w*tempo);
end
```

ANEXO C – CÓDIGO BASE UTILIZADO PARA SIMULAR UM SINAL DE TENSÃO COM ELEVAÇÃO

```
function [S3] = Sinal_Elevacao(f)
%Parâmetros
T = 1/f;
tmin = 0;
tmax = 30*T;
n_amostras_ciclo = 256;
fs = f*n_amostras_ciclo;
t = tmin:1/fs:tmax;
t1 = 0.10;
t2 = 0.20;
w = (2*pi*f);
alpha = 0.3;
degrau = d_unit(t, t1, t2);
%Modelo Matemático
k = 1+(alpha.*degrau);
S3 = k.*sin(w*tempo);
end
```

ANEXO D – CÓDIGO BASE UTILIZADO PARA SIMULAR UM SINAL DE TENSÃO COM INTERRUPÇÃO

```
function [S4] = Sinal_Interrupcao(f)
%Parâmetros
T = 1/f;
tmin = 0;
tmax = 30*T;
n_amostras_ciclo = 256;
fs = f*n_amostras_ciclo;
t = tmin:1/fs:tmax;
t1 = 0.10;
t2 = 0.20;
w = (2*pi*f);
alpha = 0.95;
degrau = d_unit(t, t1, t2);
%Modelo Matemático
k = 1-(alpha.*degrau);
S4 = k.*sin(w*tempo);
end
```

ANEXO E - CÓDIGO BASE UTILIZADO PARA O CÁLCULO DA TRANSFORMADA DE FOURIER DOS SINAIS

```
function [P] = TFourier(Sinal_Tempo,Fs)

Y = fft(Sinal_Tempo);
P=Y.*conj(Y)/(length(Sinal_Tempo));
N=length(Sinal_Tempo);
f=(0:N-1)*Fs/N;
plot(f,P)

end
```

ANEXO F – CÓDIGO BASE UTILIZADO PARA O CÁLCULO DA TRANSFORMADA DE FOURIER DE TEMPO CURTO DOS SINAIS

```
[s,f,t] = spectrogram(Sinal_Tempo,[],[],freq,fs);
figure,
spectrogram(Sinal,Tipo_Janela(amostras),[],[],fs,'yaxis')
```