



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

Análise nos domínios do tempo e da
frequência dos distúrbios de Qualidade da
Energia Elétrica

Laís Martins de Andrade Fortunato

Campina Grande, Paraíba

Outubro/2016

Laís Martins de Andrade Fortunato

Análise nos domínios do tempo e da frequência
dos distúrbios de Qualidade da Energia Elétrica

*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

Outubro/2016

Laís Martins de Andrade Fortunato

Análise nos domínios do tempo e da frequência
dos distúrbios de Qualidade da Energia Elétrica

*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 Benemar Alencar de Souza, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

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

Campina Grande, Paraíba
Outubro/2016

Este trabalho é dedicado ao meu avô José e às minhas tias Salete e Iracy (in memoriam).

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pela sabedoria dada para enfrentar os desafios, a força e perseverança para vencê-los e conseguir chegar ao fim do curso.

Aos meus pais, que se dedicaram e abdicaram de tempo e de muitos projetos pessoais para que eu tivesse a oportunidade de ter uma boa formação profissional e pessoal.

Aos meus irmãos e ao meu namorado, pelos conselhos, companheirismo e carinho inexplicável.

Aos meus familiares, pelo apoio, cuidado e estímulo.

Agradeço a todos os meus amigos e colegas, pelo companheirismo e pelos momentos compartilhados na universidade.

Agradeço a todos os meus professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, em especial à minha orientadora Professora Núbia Silva Dantas Brito, pelo incentivo, pela compreensão e pela orientação durante a execução deste trabalho.

Agradeço também em especial a minha coorientadora Érica Manguiera Lima, pelo apoio e incentivo que foram essenciais na realização desse sonho.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para minha formação.

Essa conquista, partilho com cada um de vocês.

Resumo

As ideias iniciais para a construção de uma impressão digital que caracterize alguns dos principais distúrbios de qualidade de energia presentes em um sistema de distribuição de energia elétrica são apresentadas neste trabalho. Para o desenvolvimento da pesquisa, um estudo minucioso do comportamento dos distúrbios nos domínios do tempo e da frequência foi realizado. A construção de uma base de dados permitiu a simulação de diversos fenômenos, bem como o cálculo da energia em ambos os domínios. Os resultados obtidos mostraram a importância do uso das curvas de energia no processo de caracterização de fenômenos.

Palavras chave: Distúrbios, Qualidade da Energia Elétrica, Transformada de Fourier, Impressão Digital.

Lista de Figuras

Figura 3.1 – Fluxograma de dados	24
Figura 4.1 – Representações nos domínios do tempo e da frequência de um sinal de tensão senoidal ideal.	26
Figura 4.2 – Representações nos domínios do tempo e da frequência de um sinal de tensão com afundamento.	27
Figura 4.3 – Representações nos domínios do tempo e da frequência de um sinal de tensão com elevação.	28
Figura 4.4 – Representações nos domínios do tempo e da frequência de um sinal de tensão com interrupção.....	29
Figura 4.5 – Representações nos domínios do tempo e da frequência de um sinal de tensão com flutuação.....	30
Figura 4.6 – Representações nos domínios do tempo e da frequência de um sinal de tensão com transitório oscilatório.	31
Figura 4.7 – Representações nos domínios do tempo e da frequência de um sinal de tensão com transitório impulsivo.....	32
Figura 4.8 – Representações nos domínios do tempo e da frequência de um sinal de tensão com harmônicos.	33
Figura 4.9 – Representações nos domínios do tempo e da frequência de um sinal de tensão com <i>notch</i>	34
Figura 4.10 – Representações nos domínios do tempo e da frequência de um sinal de tensão com <i>spike</i>	35
Figura 4.11– Energias de um sinal de tensão senoidal ideal nos domínios do: (a) tempo e da (b) frequência.	38
Figura 4.12 – Energias de um sinal de tensão com afundamento nos domínios do: (a) tempo e da (b) frequência.....	39
Figura 4.13 – Energias de um sinal de tensão com elevação nos domínios do: (a) tempo e da (b) frequência.	40
Figura 4.14 – Energias de um sinal de tensão com interrupção nos domínios do: (a) tempo e da (b) frequência.....	41

Figura 4.15 - Energias de um sinal de tensão com flutuação nos domínios do: (a) tempo e da (b) frequência.	42
Figura 4.16 - Energias de um sinal de tensão com transitório oscilatório nos domínios do: (a) tempo e da (b) frequência.....	43
Figura 4.17 - Energias de um sinal de tensão com transitório impulsivo nos domínios do: (a) tempo e da (b) frequência.....	44
Figura 4.18 - Energias de um sinal de tensão com harmônicos nos domínios do: (a) tempo e da (b) frequência.	45
Figura 4.19 - Energias de um sinal de tensão com <i>notching</i> nos domínios do: (a) tempo e da (b) frequência.	46
Figura 4.20 - Energias de um sinal de tensão com <i>spike</i> nos domínios do: (a) tempo e da (b) frequência.	47

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Modelo matemático dos distúrbios (IEEE Std., 2009).....	20
Tabela 3.1 – Parâmetros adotados.	23
Tabela 4.1 – Impressão Digital dos Distúrbios.	49

Sumário

1.	Introdução.....	11
2.	Fundamentação Teórica	13
2.1	Qualidade da Energia Elétrica	13
2.2	Distúrbios.....	14
Sinal Ideal.....	14	
Afundamento de Tensão.....	15	
Elevação de Tensão.....	16	
Interrupção de Tensão.....	16	
Flutuação de Tensão	17	
Transitórios	17	
Harmônicos.....	18	
Notching.....	19	
Spike	19	
Modelo Matemático	19	
2.3	Transformada de Fourier	20
2.4	Energia de um Sinal.....	21
3.	Metodologia.....	23
4.	Apresentação e Análise dos Resultados	25
4.1	Transformada de Fourier	25
4.2	Construção da Base de Dados	25
Sinal de Tensão Senoidal Ideal.....	26	
Sinal de Tensão com Afundamento.....	27	
Sinal de Tensão com Elevação.....	28	
Sinal de Tensão com Interrupção.....	29	
Sinal de Tensão com Flutuação	30	
Sinal de Tensão com Transitório Oscilatório.....	31	
Sinal de Tensão com Transitório Impulsivo	32	
Sinal de Tensão com Harmônicos.....	33	
Notching.....	34	
Spike	35	
4.3	Cálculo da Energia.....	36
Sinal de Tensão Senoidal Ideal.....	38	
Sinal de Tensão com Afundamento.....	39	
Sinal de Tensão com Elevação.....	40	
Sinal de Tensão com Interrupção.....	41	
Sinal de Tensão com Flutuação	42	
Sinal de Tensão com Transitório Oscilatório.....	43	

Sinal de Tensão com Transitório Impulsivo	44
Sinal de Tensão com Harmônicos.....	45
Sinal de Tensão com <i>Notching</i>	46
Sinal de Tensão com <i>Spike</i>	47
4.4 Síntese.....	48
5. Conclusões	50
6. Referências Bibliográficas	51

1. Introdução

Em um sistema elétrico de potência (SEP), tão importante quanto a continuidade do fornecimento da energia é a sua qualidade, a qual é avaliada primordialmente através do monitoramento de dois parâmetros, que são: tensão e frequência. No sistema ideal, as formas de onda (tensões e/ou correntes trifásicas) deveriam ser puramente senoidais, com amplitudes constantes e contendo apenas a frequência fundamental. Entretanto, a ocorrência de inúmeros distúrbios elétricos no SEP, resulta em sinais com formas de onda que diferem das ideais, o que resulta em redução na qualidade do serviço prestado (ARRILLAGA et al.,1985). Esse fato inclui os sinais presentes nos sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE)¹. Para se adequarem aos requisitos de qualidade impostos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), tais sistemas passaram a investir na melhoria das suas instalações, buscando melhoria da confiabilidade, eficiência, segurança e aumento dos lucros (MINUSSI, 2007).

Dentre os diversos distúrbios aos quais os SDEE estão submetidos, foram objeto de estudo neste trabalho os seguintes: afundamentos e/ou elevações de tensões, interrupções, distorções harmônicas, flutuações de tensão, transitórios oscilatórios ou impulsivos, *notching* e *spike* (DUGAN et al, 1996). Segundo BRITO et al. (2012), a primeira etapa em um processo de minimização dos impactos causados pelos distúrbios é a busca por informações seguras e concisas acerca dos distúrbios.

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) insere-se nesse contexto, apresentando um estudo do comportamento dos principais distúrbios que afetam a qualidade da energia dos SDEE, almejando introduzir as ideias para construção de um tipo de impressão digital que caracterize os distúrbios.

Resumidamente, o TCC teve como objetivo geral realizar um estudo do comportamento dos distúrbios nos SDEE e como objetivos específicos:

¹ Porção do SEP que conecta fisicamente o sistema de transmissão aos consumidores finais da energia elétrica.

- Criar uma base de dados de distúrbios de Qualidade da Energia Elétrica no domínio do tempo.
- Aplicar a transformada de Fourier para análise dos distúrbios no domínio da frequência.
- Construir gráficos de energia dos distúrbios nos domínios do tempo e da frequência.
- Elaborar o “embrião” da impressão digital dos distúrbios.

O TCC foi desenvolvido no Laboratório de Sistemas de Potência (LSP) do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), sob a orientação da professora Núbia Silva Dantas Brito e supervisão da doutoranda Érica Manguiera Lima.

O relatório foi estruturado em 6 (seis) seções, incluindo esta seção introdutória, conforme a seguir. Na seção 2 apresenta-se uma breve introdução sobre Qualidade da Energia Elétrica, distúrbios, transformada de Fourier e energia. A metodologia desenvolvida é apresentada na seção 3 e logo em seguida, são apresentados e analisados os resultados obtidos. O trabalho é finalizado com as conclusões e referências bibliográficas.

2. Fundamentação Teórica

Uma breve fundamentação acerca dos temas mais relevantes para o desenvolvimento do estudo é apresentada a seguir.

2.1 Qualidade da Energia Elétrica

Segundo o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), Qualidade da Energia Elétrica (QEE) é “O conceito de fornecer e estabelecer a alimentação de um equipamento elétrico sensível de forma adequada ao seu funcionamento”. Ou seja, qualidade de energia está relacionada com o fornecimento ininterrupto de tensões senoidais, equilibradas e com amplitude e frequência constantes (PAULILO, 2013).

A importância crescente desse tema aliada aos avanços tecnológicos, em especial os relacionados a eletrônica de potência, tornam o fornecimento de energia como sendo um dos serviços mais desafiantes. O simples ato do consumidor dispor de energia no momento em que aciona um interruptor ou conecta um aparelho elétrico na tomada requer um vasto aparato apto a operar de forma sincronizada. Devido ao fato da tecnologia atual não dispor de formas de armazenamento de energia elétrica economicamente viáveis, é preciso que sincronização contínua da produção de energia com o consumo em tempo real, o que requer ajustes contínuos da operação do SEP às oscilações no consumo de energia, a fim de evitar desequilíbrios que, em casos extremos, podem conduzir o SEP ao colapso, com consequências severas para os consumidores (WHITEPAPER, 2014).

Como resultado, QEE constitui um tema atual e preocupante, principalmente porque (PAULILO, 2013):

- Os equipamentos modernos estão cada vez mais sensíveis às variações na qualidade do sinal elétrico. Muitos deles possuem controles baseados em microprocessadores e dispositivos eletrônicos sensíveis a muitos tipos de distúrbios;

- O crescente interesse pela racionalização e conservação da energia elétrica, com vistas a otimizar a sua utilização, tem aumentado o uso de equipamentos que, em muitos casos, aumentam os níveis de distorções harmônicas e podem levar o sistema a condições de ressonância;
- Maior conscientização dos consumidores em relação aos fenômenos ligados à qualidade da energia, visto que aqueles, estão se tornando mais informados a respeito de fenômenos como interrupções, subtensões, transitórios de chaveamentos, etc., passando a exigir que as concessionárias melhorem a qualidade da energia fornecida;
- Integração dos processos, significando que a falha de qualquer componente tem consequências muito mais importantes para o sistema elétrico.

Visando melhoria da confiabilidade, eficiência e segurança dos seus sistemas, as concessionárias² passaram a investir em suas instalações, visando automatizar, modernizar e melhorar os seus processos (MINUSSI, 2007).

Uma questão importante quando se trata do tema QEE é o discernimento de que o nível de qualidade almejado pelos consumidores deve ser compatível com as receitas tarifárias requeridas para prover o serviço (WHITEPAPER, 2014).

2.2 Distúrbios

Dentre os muitos distúrbios aos quais um SDEE pode estar sujeito, destacam-se neste TCC os tipos apresentados a seguir, tomando como base a Norma IEEE 1159-2009 (IEEE Std., 2009).

Sinal Ideal

Em um SEP, o sinal ideal deve ser representado por uma forma de onda puramente

² Agente titular de serviço público federal delegado pelo poder concedente mediante licitação (concorrência). As concessionárias podem ser geradoras, distribuidoras ou transmissoras de energia.

senoidal, com amplitude constante e contendo apenas a frequência fundamental (60 Hz no Brasil). Matematicamente, tem-se:

$$x(t) = A\sin(\omega t). \quad (2.1)$$

Sendo:

- $x(t)$: sinal contínuo no tempo.
- t : tempo (s).
- $\omega = 2\pi f$: frequência angular do sinal (rad/s).
- $f = 1/T$: frequência do sinal (Hz).
- T : período do sinal (s).
- A : amplitude do sinal.

Para se adequarem às exigências de qualidade requeridas pela ANEEL, os SDEE e as instalações de geração a eles conectadas devem, em condições normais de operação e de regime permanente, operar dentro dos limites de **frequência** situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. Em relação à **tensão** a ser contratada nos pontos de conexão pelos consumidores atendidos em tensão nominal de operação superior a 1 kV, deve situar-se entre 95% e 105% da tensão nominal de operação do sistema no ponto de conexão e, ainda, coincidir com a tensão nominal de um dos terminais de derivação previamente exigido ou recomendado para o transformador da unidade consumidora (ANEEL,2011).

Afundamento de Tensão

Também denominado de *sag*, do inglês *voltage sag*, é um fenômeno caracterizado pela redução no valor eficaz da tensão a valores compreendidos na faixa [0,1 pu; 0,9 pu] e duração no tempo a valores compreendidos no intervalo [0,5 ciclo; 1min].

É normalmente associado com falhas do sistema, mas também pode ser causado por comutação de cargas pesadas ou partida de motores. Nesse caso, motores de indução podem atingir até dez vezes o valor da sua corrente de carga durante a partida, podendo provocar quedas de tensão significativas se a amplitude da corrente de

partida for considerável em relação a corrente do sistema (IEEE Std., 2009).

O afundamento de tensão pode provocar perda de dados e erros de processamento, desligamento de equipamentos e oscilações em motores, reduzindo sua vida útil. (FRANCO, 2015)

Elevação de Tensão

Também denominada de *swell*, do inglês *voltage swell*, é um fenômeno caracterizado pelo aumento no valor eficaz da tensão a valores compreendidos na faixa [1,1 pu; 1,2 pu] e duração no tempo a valores compreendido no intervalo [0,5 ciclo; 1min], chegando até 1,8 pu em alguns casos.

Da mesma forma com afundamentos, elevações de tensão são normalmente, associadas com condições de falha do sistema, sendo o segundo bem menos usual que o primeiro.

A gravidade de uma elevação de tensão para o sistema é função da localização do defeito, da impedância do sistema e do aterramento. Uma situação extrema ocorre, por exemplo, na ocorrência de uma falta monofásica em um sistema não aterrado. Neste caso, as tensões nas fases não afetadas podem chegar até quase 1,8 pu. Isso não acontece em sistemas solidamente aterrados e com defeitos próximos a subestação, pois, o transformador da subestação é usualmente ligado em delta-estrela, fornecendo um caminho de baixa impedância para a corrente de sequência zero (IEEE Std., 2009).

Interrupção de Tensão

Fenômeno que ocorre quando a amplitude da tensão de alimentação ou da corrente de carga diminui para menos de 0,1 pu por um período de tempo com duração de 0,5 ciclo a 1 min. Pode ser resultado de falhas no sistema de energia, falhas nos equipamentos e avarias no sistema de controle.

Algumas interrupções podem ser precedidas por uma queda de tensão, geralmente quando ocorrem falhas no sistema. Neste caso, as cargas conectadas ao alimentador afetado vão experimentar uma queda de tensão, seguida imediatamente por uma

interrupção. A duração da interrupção irá depender da capacidade de religamento do dispositivo de proteção, que geralmente elimina uma falha não permanente em menos de 30 ciclos.

Como principais consequências, tem-se: queda do sistema (apagões), danificação de componentes e perda de produção. (FRANCO, 2015)

Flutuação de Tensão

Também conhecida como de *flicker*, é uma variação sistemática de tensão ou uma série de variações de tensões aleatórias, cuja magnitude normalmente, não excede a faixa [0,95 pu; 1,05 pu], com comportamento intermitente e espectro de frequência tipicamente menor que 25 Hz.

Tais flutuações de tensão podem ser perceptíveis por seres humanos por variações incomodas na intensidade da luz, inclusive, o termo *flicker* é derivado do impacto da flutuação de tensão sobre a iluminação. Logo, a flutuação de tensão é o fenômeno eletromagnético e *flicker* é o resultado indesejável desse fenômeno.

A principal causa desse distúrbio são cargas que tenham variações cíclicas significativas, especialmente dos componentes reativos.

Transitórios

O termo “transitório” vem sendo utilizado na análise dos SEP há muitos anos e evoca a noção de um evento indesejável e de natureza momentânea. De modo geral, os distúrbios transitórios são classificados em duas categorias: impulsivos e oscilatórios, cujos termos refletem a forma de onda resultante do fenômeno.

- Oscilatório

Evento súbito que afeta o comportamento da tensão ou da corrente no regime permanente, o que provoca uma mudança rápida na polaridade. É descrito pela

variação da amplitude e duração no tempo nas faixas [0,0 pu; 8 pu] e [5 μ s; 50 ms], respectivamente, e espectro de frequência típico é de 0, 5 a 5 MHz. Os transitórios oscilatórios são frequentemente, resultado da resposta do sistema local a um transitório impulsivo ou devido à presença de dispositivos eletrônicos de potência.

- **Impulsivo**

Evento caracterizado por uma mudança súbita na condição normal de operação da tensão, corrente ou ambos, sendo de natureza unidirecional na polaridade (positivo ou negativo). É caracterizado principalmente pelos seus tempos de subida e descida, com duração podendo durar de 1ns a 1ms. As causas mais comuns dos transitórios impulsivos são descargas atmosféricas devido às altas frequências envolvidas nesse fenômeno, diferentes das existentes nas redes elétricas. Tais eventos podem provocar ressonâncias naturais do sistema elétrico e transitórios oscilatórios.

Harmônicos

Fenômeno constituído por sinais de tensões ou correntes contendo componentes de frequência que são múltiplos inteiros da frequência com a qual o sistema de abastecimento é projetado para operar (chamado de frequência fundamental) (UIE-DWG-3-92-G, 1994).

Harmônicos podem produzir distorções na forma de onda, com variações de espectro típico até a 50^o componente, amplitude variando de 0,0 a 0,1% e com período de duração permanente. O fenômeno da distorção harmônica é uma preocupação crescente, tanto para os consumidores quanto para o SEP.

A principal fonte de harmônicos são os equipamentos eletrônicos, em particular, reatores eletrônicos, inversores de frequência, retificadores e cargas não lineares (FRANCO, 2015).

Os componentes harmônicos presentes no sistema podem provocar o sobreaquecimento de caos e equipamentos, a diminuição da performance de motores e a operação errônea de disjuntores, relés e fusíveis (FRANCO, 2015).

Notching

Evento caracterizado como sendo uma perturbação de tensão periódica provocada pela operação normal de dispositivos eletrônicos de potência, quando a corrente é comutada de uma fase para outra. Tem duração inferior a 0,5 ciclos, duração contínua e componentes de frequências muito elevadas.

Spike

Evento caracterizado por uma variação muito rápida no valor da tensão, podendo chegar a algumas unidades de kV, mesmo em baixa tensão, por períodos de alguns microssegundos à alguns milissegundos (ALMEIDA et al, 2003).

Tem-se como principais causas: relâmpago, chaveamento de linhas ou capacitores de correção do fator de potência, desconexão de cargas pesadas e faltas bifásicas ou monofásicas.

O termo *spike* foi retirado da versão mais atual da Norma IEEE 1159, revisada em 2009 (IEEE Std., 2009), por ser um termo geral que tem mais de um significado, sendo atualmente considerado um caso especial do *notching*. Foi analisado separadamente neste trabalho a fim de gerar uma impressão digital mais completa.

Modelo Matemático

A modelagem dos distúrbios estudados foi feita seguindo os modelos matemáticos, parâmetros e valores de controle propostos pela Norma IEEE-1159, conforme apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Modelo matemático dos distúrbios (IEEE Std., 2009)

Distúrbio	Modelo	Parâmetro IEEE
Senóide Pura	$V(t) = A * \sin (wt)$	$w = 2\pi f$
Afundamento de Tensão	$V(t) = (1 - \alpha (u(t - t_1) - u(t - t_2))) * \sin (wt)$	$0.1 \leq \alpha \leq 0.9$ $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$
Elevação de Tensão	$V(t) = (1 + \alpha (u(t - t_1) - u(t - t_2))) * \sin (wt)$	$0.1 \leq \alpha \leq 0.8$ $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$
Interrupção	$V(t) = (1 - \alpha (u(t - t_1) - u(t - t_2))) * \sin (wt)$	$0.9 \leq \alpha \leq 1.0$ $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$
Flutuação de Tensão	$V(t) = (1 - \alpha_f \sin(\beta wt)) * \sin (wt)$	$0.1 \leq \alpha_f \leq 0.2$ $5 \leq \beta \leq 20Hz$
Transitório Oscilatório	$V(t) = (\sin(wt) + (\alpha e^{\frac{(t-t_1)}{\tau}}) * \sin (w_n(t - t_2))) * (u(t_2 - t_1))$	$0.1 \leq \alpha \leq 0.8$ $0.05T \leq t_2 - t_1 \leq 3T$ $8ms \leq \tau \leq 40ms$ $300 \leq f_n \leq 900Hz$
Transitório Impulsivo	$V(t) = (\sin(wt) - \alpha e^{\frac{(t-t_1)}{\tau}}) * (u(t_2 - t_1))$	$1 \leq \alpha \leq 10$ $0.05T \leq t_2 - t_1 \leq 3T$ $8ms \leq \tau \leq 40ms$
Harmônicos	$V(t) = \alpha_1 \sin(wt) + \alpha_2 \sin (wt) + \alpha_3 \sin (wt) + \alpha_4 \sin (wt) + \alpha_5 \sin (wt) + \alpha_6 \sin (wt) + \alpha_7 \sin (wt)$	$0.1 \leq \alpha_3, \alpha_5, \alpha_7 \leq 0.15$
Notching	$V(t) = \sin(wt) - \text{sign}(\sin(wt)) * \left[\sum_{n=0}^9 K * \{u(t - (t_1 + 0.02n)) - u(t - (t_2 + 0.02n))\} \right]$	$0.1 \leq K \leq 0.4$ $0 \leq t_1, t_2 \leq 0.5T$ $0.01T \leq t_2 - t_1 \leq 0.05T$
Spike	$V(t) = \sin(wt) + \text{sign}(\sin(wt)) * \left[\sum_{n=0}^9 K * \{u(t - (t_1 + 0.02n)) - u(t - (t_2 + 0.02n))\} \right]$	$0.1 \leq K \leq 0.4$ $0 \leq t_1, t_2 \leq 0.5T$ $0.01T \leq t_2 - t_1 \leq 0.05T$

2.3 Transformada de Fourier

Dentre as muitas ferramentas matemáticas utilizadas na área de QEE, uma das mais importantes é sem dúvida, a transformada de Fourier (TF). Matematicamente, a transformada de Fourier $\mathcal{F}(\omega)$ de uma função $f(t)$ é definida conforme Equação (2.2):

$$\mathcal{F}(\omega) = \mathcal{F}\{f(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (2.2)$$

A transformada inversa de Fourier é definida por:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{F}(\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (2.3)$$

Considera-se $f(t)$ como sendo a representação da função no domínio do tempo e $\mathcal{F}(\omega)$ a representação no domínio da frequência. Portanto, a TF mapeia uma função do

domínio do tempo para o domínio da frequência.

Na maioria das aplicações práticas, predomina a versão discreta denominada de transformada discreta de Fourier, representada pela Equação (2.4):

$$\mathcal{F}\{x[n]\} = X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-jk\omega_0 n}, \text{ para } k = 0, 1, \dots, N - 1. \quad (2.4)$$

Sendo:

$x[n]$: sinal discreto no tempo.

n : amostras do sinal.

$\omega_0 = 2\pi/N$: frequência fundamental do sinal.

N : período da frequência fundamental.

Na prática, a implementação computacional da transformada discreta de Fourier é realizada através do uso de um conjunto de algoritmos denominados de *Fast Fourier Transform* (FFT).

2.4 Energia de um Sinal

No contexto da área de Processamento dos Sinais, uma das informações mais importantes dos sinais é a sua energia.

No domínio do tempo, matematicamente, a energia de um sinal (OPPENHEIM, 2010):

- Contínuo no tempo $x(t)$ é definida conforme Equação (2.5):

$$E_x \triangleq \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt. \quad (2.5)$$

- Discreto no tempo $x[n]$ é definida conforme Equação (2.6):

$$E_x \triangleq \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=-N}^{+N} |x[n]|^2 = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} |x[n]|^2. \quad (2.6)$$

No domínio da frequência, recorre-se ao Teorema de Parseval que diz o seguinte: “A soma do quadrado de uma função no tempo é igual à soma do quadrado de sua transformada” (LATHI, 2007).

Desta forma, tem-se que no domínio de frequência, a energia de um sinal (OPPENHEIM, 2010):

- Contínuo no tempo $x(t)$ é definida conforme Equação (2.7):

$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2 df . \quad (2.7)$$

- Discreto no tempo $x[n]$ é definida conforme Equação (2.8):

$$E_x = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} |x[n]|^2 = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} |X[f]|^2 . \quad (2.8)$$

Sendo $X(f)$ a TF contínua de $x(t)$ e f , o componente da frequência (em Hertz) de x .

3. Metodologia

Para o desenvolvimento do TCC utilizou-se como recurso didático o *software* MATLAB®, no qual se construiu a base de dados referente aos distúrbios simulados e implementou-se as ferramentas matemáticas necessárias para o estudo.

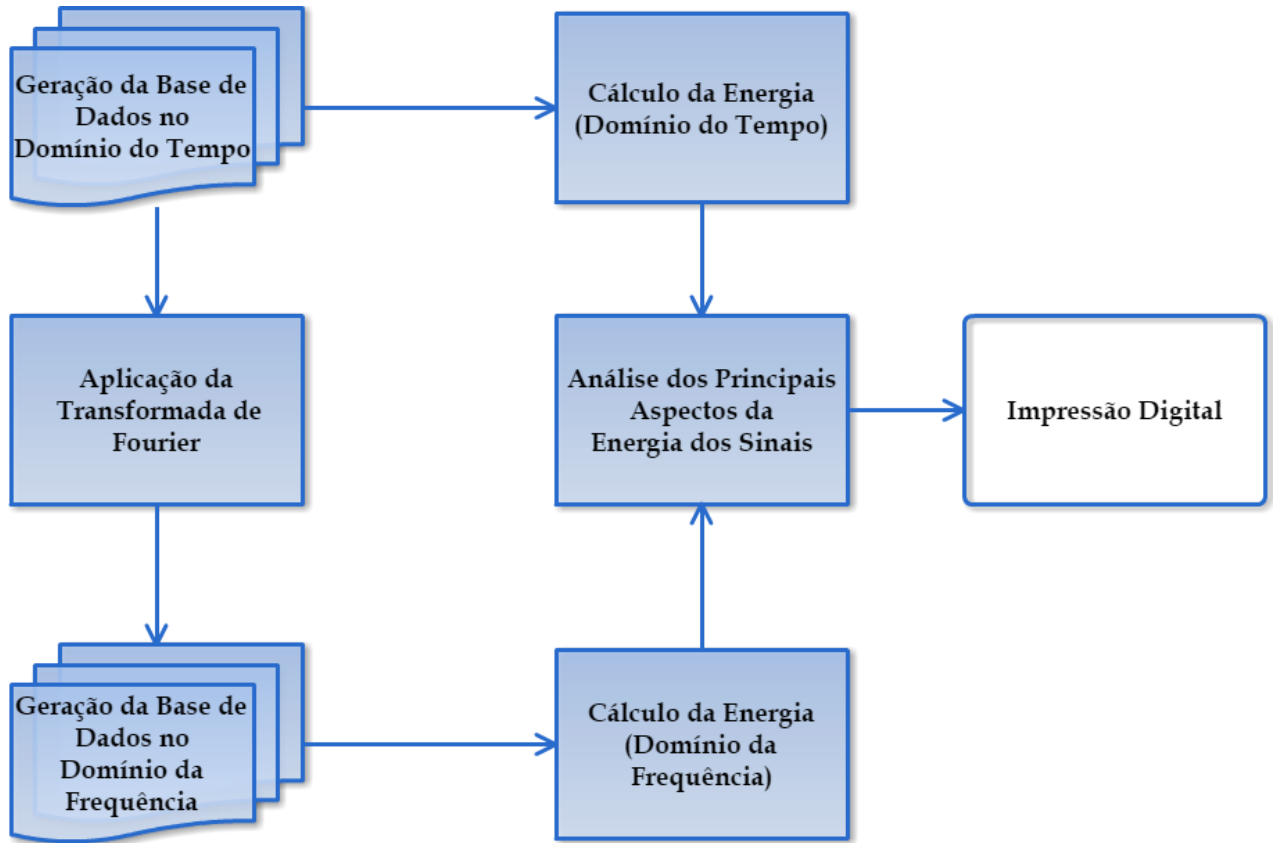
A base de dados foi gerada usando o modelo matemático apresentado na Seção 2.2.10 e adotando-se os parâmetros conforme apresentado na tabela 3.1, conforme os intervalos sugeridos pela Norma IEEE-1159. Utilizou-se um identificador para enumerar os distúrbios (D1 a D10), visando auxiliar o entendimento dos trechos de código apresentados ao longo do texto nas seções subsequentes. A frequência de amostragem utilizada foi 15,36 kHz, que é a frequência usual dos Registradores Digitais de Perturbação (RDP), buscando facilitar a comparação dos sinais gerados com uma base de dados real.

Tabela 3.1 – Parâmetros adotados.

Distúrbio	Identificação	Parâmetros Simulados
Senóide Pura	D1	$A = 1, f = 60Hz$
Afundamento de Tensão	D2	$\alpha = 0.3, t_1 = 0.06,$ $t_2 = 0.14$
Elevação de Tensão	D3	$\alpha = 0.3, t_1 = 0.06,$ $t_2 = 0.14$
Interrupção	D4	$\alpha = 0.95, t_1 = 0.06,$ $t_2 = 0.14$
Flutuação de Tensão	D5	$\alpha_f = 0.15, \beta = 15$
Transitório Oscilatório	D6	$\alpha = 0.8, t_1 = 0.08,$ $t_2 = 0.1, \tau = 0.02$
Transitório Impulsivo	D7	$\alpha = 2, t_1 = 0.085,$ $t_2 = 0.088, \tau = 0.02$
Harmônicos	D8	$\alpha_3 = 0.05, \alpha_5 = 0.10,$ $\alpha_7 = 0.15$
Notching	D9	$K = 0.4, t_1 = 0.006,$ $t_2 = 0.0065$
Spike	D10	$K = 0.4, t_1 = 0.002,$ $t_2 = 0.0023$

O fluxograma da Figura 3.1 apresenta, de forma resumida, as etapas requeridas para o desenvolvimento da impressão digital, o qual será detalhado na próxima seção.

Figura 3.1- Fluxograma de dados



4. Apresentação e Análise dos Resultados

Nesta seção será descrito o processo de construção da base de dados, implementação computacional das ferramentas matemáticas, cálculo das energias e elaboração da impressão digital.

4.1 Transformada de Fourier

Inicialmente, implementou-se a TF executando o código abaixo, no qual, o parâmetro `sinalTempo` representa o vetor de tensão correspondente a cada distúrbio no domínio do tempo, o parâmetro `Fs` representa a frequência de amostragem e `L`, o tamanho do vetor `sinalTempo`.

Código: transformada de Fourier.

```
function [modulo, fase, f] = transFourierFFT(sinalTempo, Fs, L )
    NFFT = 2^nextpow2(L);
    sinalFrequencia = fft(sinalTempo, NFFT)/(L/2);
    f = Fs/2 * linspace(0,1,NFFT/2 + 1);
    modulo = abs(sinalFrequencia(1:NFFT/2 + 1));
    fase = angle(sinalFrequencia(1:NFFT/2 + 1));
end
```

4.2 Construção da Base de Dados

A base de dados foi construída de modo a conter sinais de tensão em ambos os domínios (tempo e frequência), referentes aos distúrbios cujos modelos matemáticos foram descritos na Tabela 2.1, seção 2.2. Os detalhes da implementação de cada distúrbio são apresentados a seguir.

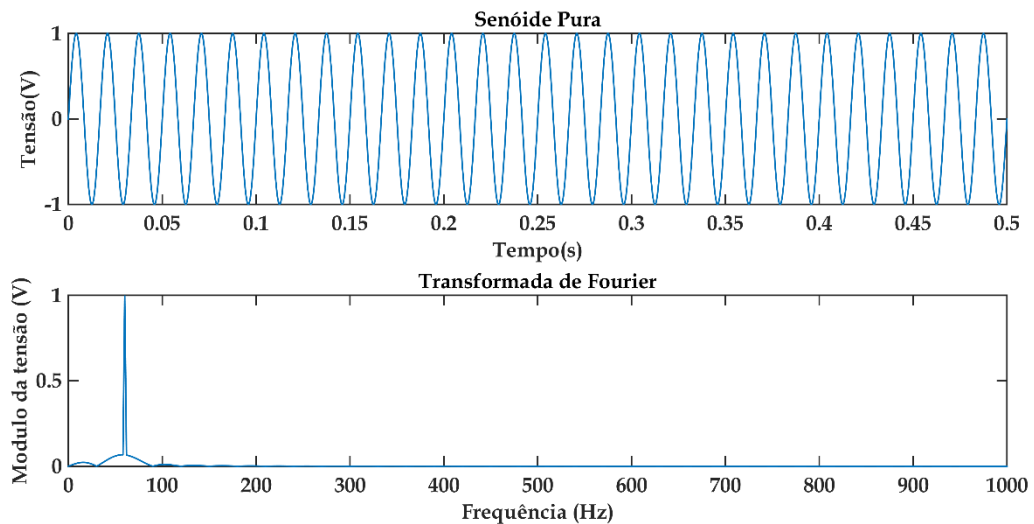
Sinal de Tensão Senoidal Ideal

Código Senóide Ideal (distúrbio **D1**).

```
function D1 = pureSine(t, f, Amplitude)
%Parâmetros
A=1;
w = A*(2*pi*f);
%Modelo Matemático
D1 = A*sin(w*t);
end
```

O parâmetro A indica a amplitude da tensão do sinal. O resultado em ambos os domínios (tempo e frequência) é apresentado na Figura 4.1,

Figura 4.1 – Representações nos domínios do tempo e da frequência de um sinal de tensão senoidal ideal.



Como esperado, observa-se um pico na frequência fundamental do sinal. O comprimento limitado do sinal é interpretado como uma janela retangular no domínio do tempo. Ao se aplicar a TF ao produto de uma janela retangular de tamanho igual ao do sinal pela senoide ideal, o resultado no domínio da frequência se assemelha a uma função *sample* (OPPENHEIM, 2010).

Sinal de Tensão com Afundamento

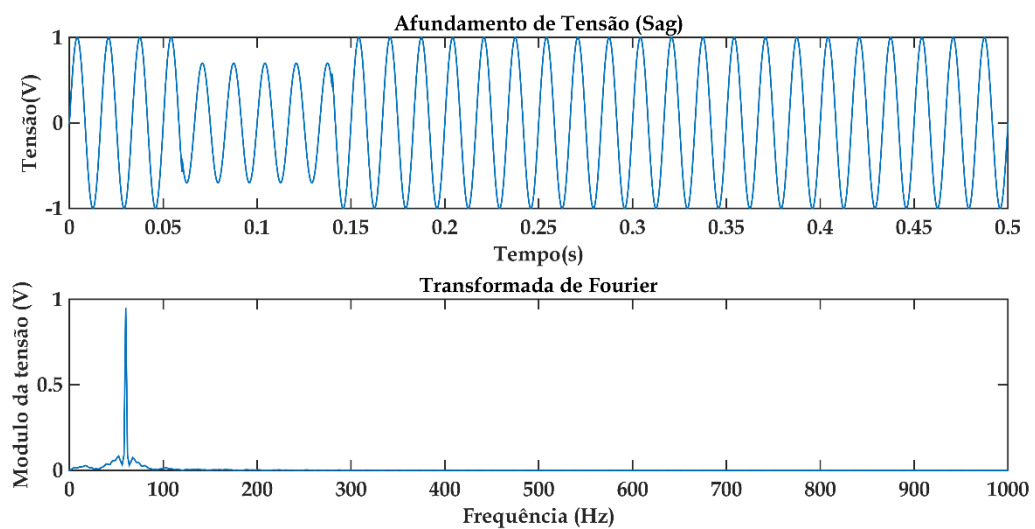
Código Afundamento (distúrbio D2).

```
function D2 = voltageSag(t, f)
%Parâmetros
alpha = 0.3;
t1 = 0.06;
t2 = 0.14;
w = 2*pi*f;
u1 = degrau(t1, t);
u2 = degrau(t2, t);
%Modelo Matemático
D2 = (1 - alpha.*(u1-u2)).*sin(w*t);
end
```

O parâmetro α indica a quantidade em pu (por unidade) que deve ser a queda de tensão; os parâmetros t_1 e t_2 representam o intervalo de tempo durante o qual ocorre o distúrbio. O resultado em ambos os domínios (tempo e frequência) é apresentado na Figura 4.2.

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.

Figura 4.2 – Representações nos domínios do tempo e da frequência de um sinal de tensão com afundamento.



Sinal de Tensão com Elevação

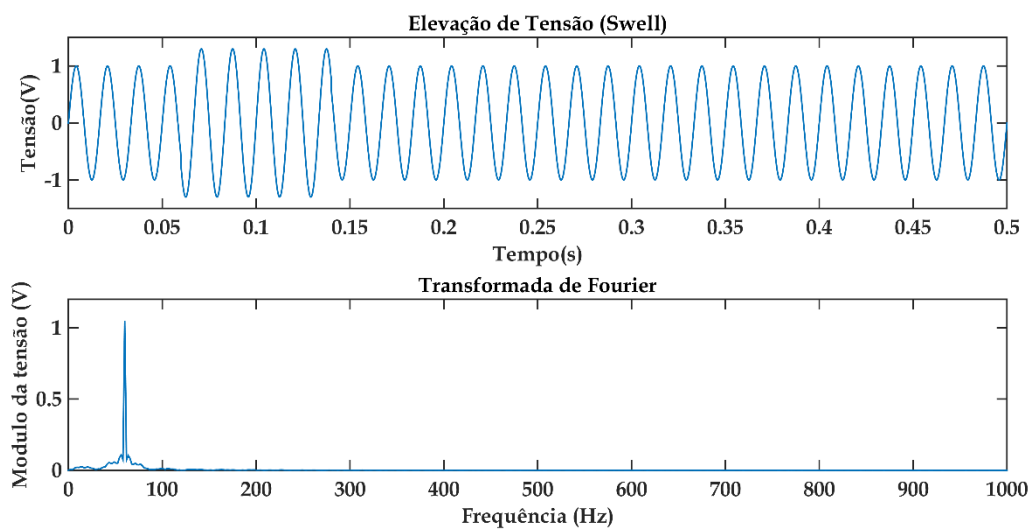
Código Elevação (distúrbio D3).

```
function D3 = voltageSwell(t, f)
%Parâmetros
alpha = 0.3;
t1 = 0.06;
t2 = 0.14;
w = 2*pi*f;
u1 = degrau(t1, t);
u2 = degrau(t2, t);
%Modelo Matemático
D3 = (1 + alpha.*(u1-u2)).*sin(w*t);
end
```

O parâmetro α indica a quantidade em pu (por unidade) que deve ser a elevação de tensão; os parâmetros t_1 e t_2 representam o intervalo de tempo durante o qual ocorre o distúrbio. O resultado em ambos os domínios (tempo e frequência) é apresentado na Figura 4.3.

Análise no domínio da frequência revela também, neste caso, o surgimento de componentes de baixa frequência e baixa amplitude, próximos à frequência fundamental, relacionados ao início do distúrbio.

Figura 4.3 – Representações nos domínios do tempo e da frequência de um sinal de tensão com elevação.



Sinal de Tensão com Interrupção

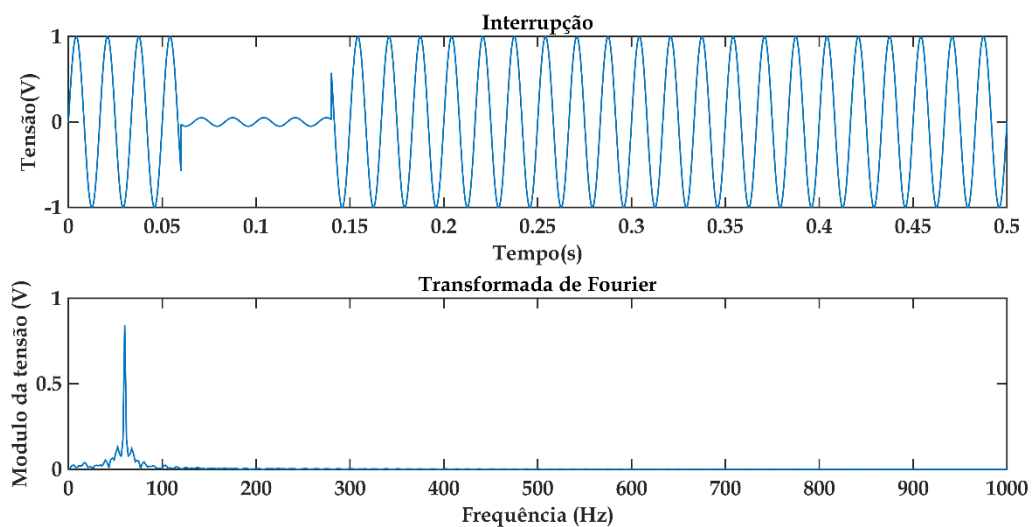
Código Interrupção (distúrbio D4).

```
function D4 = interruption(t, f)
%Parâmetros
alpha = 0.95;
t1 = 0.06;
t2 = 0.14;
w = 2*pi*f;
u1 = degrau(t1, t);
u2 = degrau(t2, t);
%Modelo Matemático
D4 = (1 - alpha.*(u1-u2)).*sin(w*t);
end
```

O que diferencia esse distúrbio dos dois anteriores é o valor do parâmetro α , que foi escolhido como sendo 0,95 pu. O resultado em ambos os domínios (tempo e frequência) é apresentado na Figura 4.4.

Novamente, 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.

Figura 4.4 - Representações nos domínios do tempo e da frequência de um sinal de tensão com interrupção.



Sinal de Tensão com Flutuação

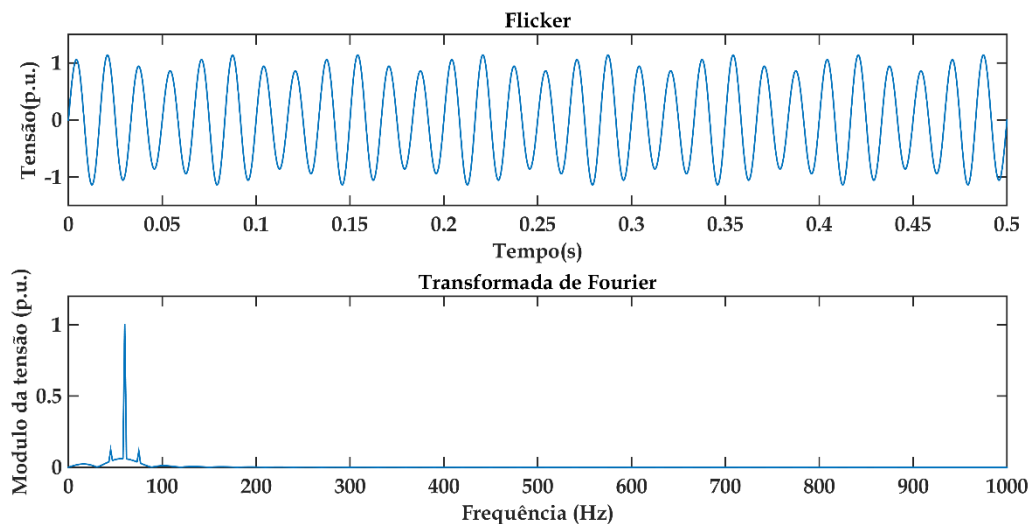
Código Flutuação (distúrbio D5).

```
function D5 = flicker(t, f)
%Parâmetros
alpha = 0.15;
beta = 15;
w = 2*pi*f;
%Modelo Matemático
D5 = (1 + (alpha.*sin(beta*2*pi*t))).*sin(w*t);
end
```

O distúrbio **D5** foi construído adicionando à amplitude do sinal, uma senoide de amplitude α bem menor do que 1,0 pu (neste caso: 0,15 pu) e frequência $\beta = 15\text{Hz}$. O resultado em ambos os domínios (tempo e frequência) é apresentado na Figura 4.5.

Análise no domínio: i) do tempo, mostra que o distúrbio está presente no sinal em todo o tempo; ii) da frequência, revela o surgimento de componentes de baixa frequência, em especial em 45 Hz e 75 Hz, que correspondem exatamente a frequência fundamental somada e subtraída do parâmetro β .

Figura 4.5 – Representações nos domínios do tempo e da frequência de um sinal de tensão com flutuação.



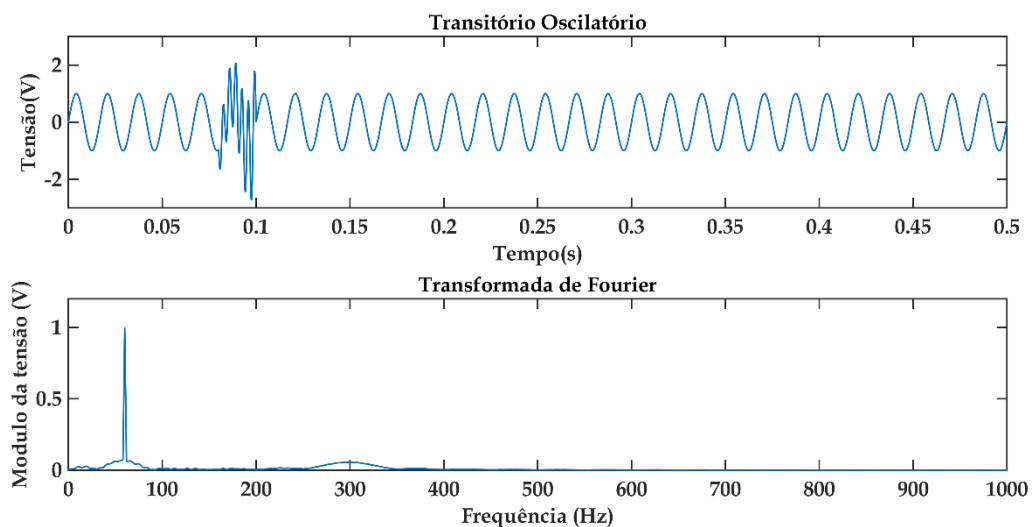
Sinal de Tensão com Transitório Oscilatório

Código Transitório Oscilatório (distúrbio D6).

```
function D6 = oscillatoryTransient(t, f)
%Parâmetros
alpha = 0.8;
t1 = 0.08;
t2 = 0.10;
tau = 0.02;
w = 2*pi*f;
fn = 300;
wn = 2*pi*fn;
u1 = degrau(t1, t);
u2 = degrau(t2, t);
u6= u2-u1;
%Modelo Matemático
D6 = sin(w*t) + alpha.*(exp((t-t1)/tau)).*sin(wn*(t-t1)).*u6;
end
```

O distúrbio **D6** foi construído adicionando ao sinal, uma senoide de frequência f_n e amplitude α , modulado por uma função exponencial com constante de tempo τ . O resultado em ambos os domínios (tempo e frequência) é apresentado na Figura 4.6. Análise no domínio da frequência revela o surgimento de componentes de baixa frequência próximas a frequência fundamental, provocadas pelo início do distúrbio, bem como um pico de baixa amplitude na frequência de oscilação (300 Hz).

Figura 4.6 – Representações nos domínios do tempo e da frequência de um sinal de tensão com transitório oscilatório.



Sinal de Tensão com Transitório Impulsivo

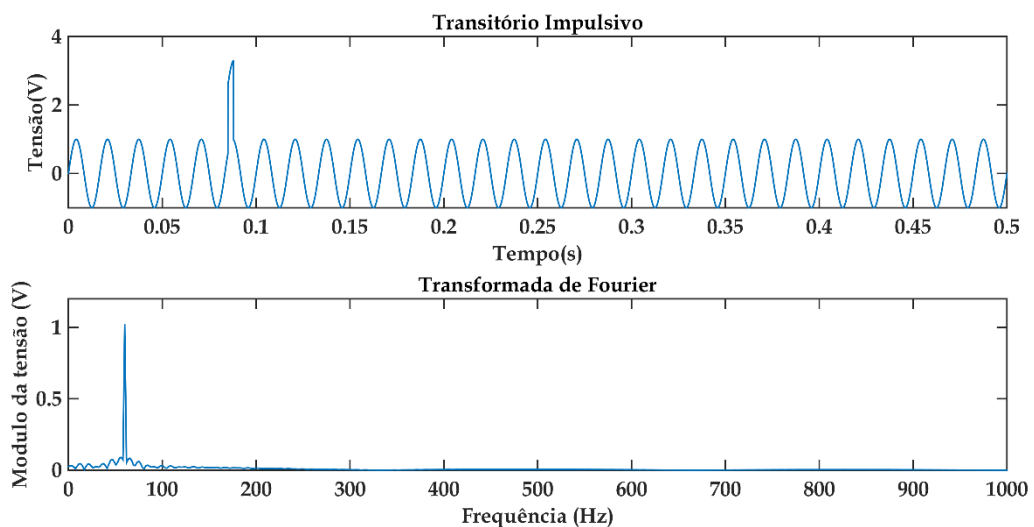
Código Transitório Impulsivo (distúrbio D7).

```
function D7 = impulsiveTransient(t, f)
%Parâmetros
alpha= 2;
t1=0.085;
t2=0.088;
tau=0.02;
w = 2*pi*f;
y=((t-t1)/tau);
u1 = degrau(t1, t);
u2 = degrau(t2, t);
u7= u1-u2;
%Modelo Matemático
D7 = sin(w*t) + (alpha*exp(y)).*u7;
end
```

O distúrbio **D7** foi construído adicionando ao sinal uma função exponencial de amplitude α , de valor alto (2,0 pu) e curta duração (intervalo t_2-t_1) para representar a função impulso. O resultado em ambos os domínios (tempo e frequência) é apresentado na Figura 4.7.

Análise no domínio da frequência revela o surgimento de componentes de baixa frequência próximas a frequência fundamental, provocadas pelo início do distúrbio.

Figura 4.7 – Representações nos domínios do tempo e da frequência de um sinal de tensão com transitório impulsivo.



Sinal de Tensão com Harmônicos

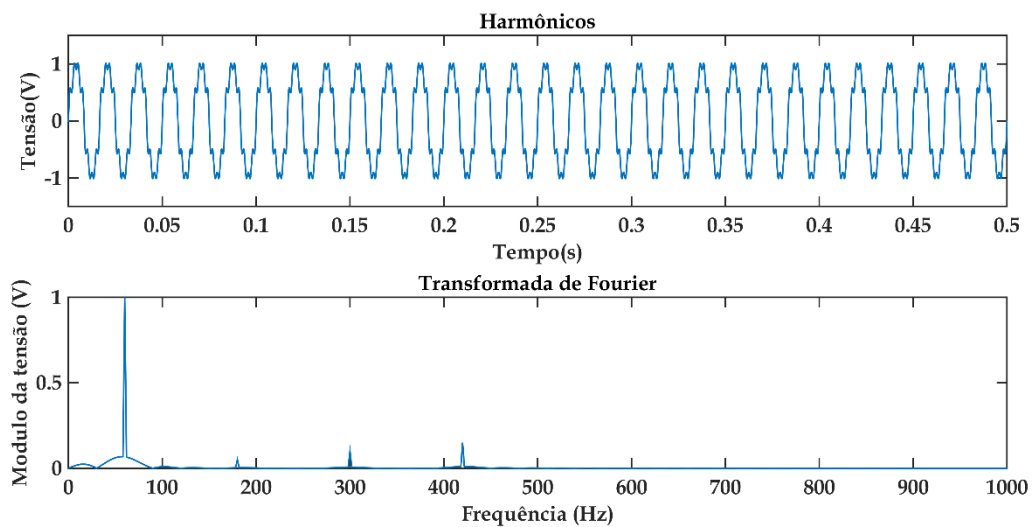
Código Harmônicos (distúrbio D8).

```
function D8 = harmonics(t, f)
%Parâmetros
a1 = 1;
a2 = 0;
a3 = 0.05;
a4 = 0;
a5 = 0.1;
a6 = 0;
a7 = 0.15;
w = 2*pi*f;
%Modelo Matemático
D8 = a1*sin(w*t) + a2*sin(2*w*t) + a3*sin(3*w*t) + a4*sin(4*w*t) ...
      + a5*sin(5*w*t) + a6*sin(6*w*t) + a7*sin(7*w*t);
end
```

Os parâmetros a_3 , a_5 e a_7 referem-se às amplitudes dos componentes harmônicos inseridos no sinal. O resultado em ambos os domínios (tempo e frequência) é apresentado na Figura 4.8.

Análise no domínio: i) do tempo, mostra que o distúrbio está presente no sinal em todo o tempo; ii) da frequência, revela que os componentes harmônicos podem ser facilmente visualizados através dos picos nas frequências de 180 Hz, 300 Hz e 420 Hz que correspondem respectivamente aos 3^o, 5^o e 7^o harmônicos.

Figura 4.8 – Representações nos domínios do tempo e da frequência de um sinal de tensão com harmônicos.



Notching

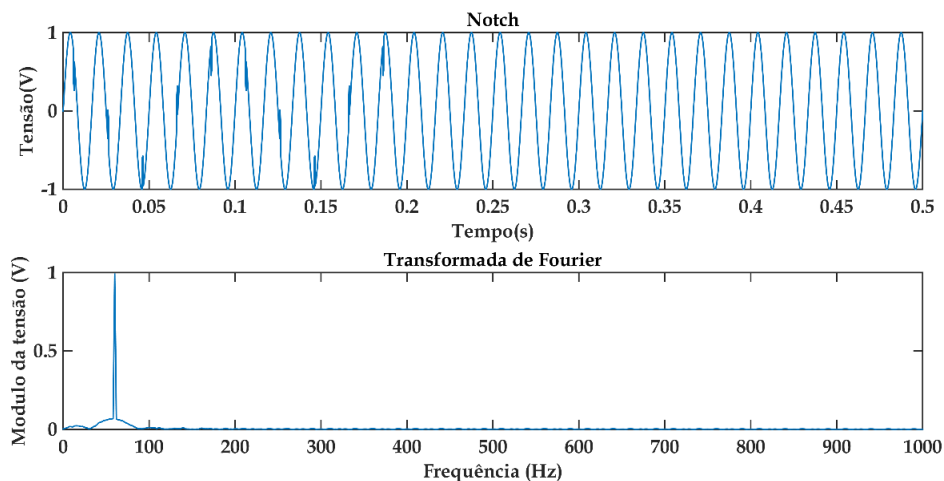
Código *Notching* (distúrbio D9).

```
function D9 = Notch(t, f)
%Parâmetros
t1=0.006;
t2=0.0065;
w=2*pi*f;
K = 0.4;
soma = 0;
for n=0:9

    u1 = degrau(t1+0.02*n, t);
    u2 = degrau(t2+0.02*n, t);
    u9= u1-u2;
    soma = soma + K.* u9;
end
%Modelo Matemático
D9 = sin(w*t) - sign(sin(w*t)).*soma;
```

No código: i) o laço `for` gera um trem de pulsos com amplitudes máxima zero e mínima igual ao parâmetro `K`; ii) cada pulso tem duração aproximada de $t_2 - t_1$; iii) `n` delimita o intervalo no qual o distúrbio está presente no sinal, ou seja, de zero até 0,18 s ($0,02 \times n_{\max}$); iv) a função `sign` quando aplicada à função senoidal provoca uma redução no módulo da tensão nos instantes definidos pela função `soma`, mesmo no semiciclo negativo da tensão. O resultado em ambos os domínios (tempo e frequência) é apresentado na Figura 4.9 e conforme se vê, não ocorrem alterações significativas quando se compara com a senoide ideal.

Figura 4.9 – Representações nos domínios do tempo e da frequência de um sinal de tensão com *notch*.



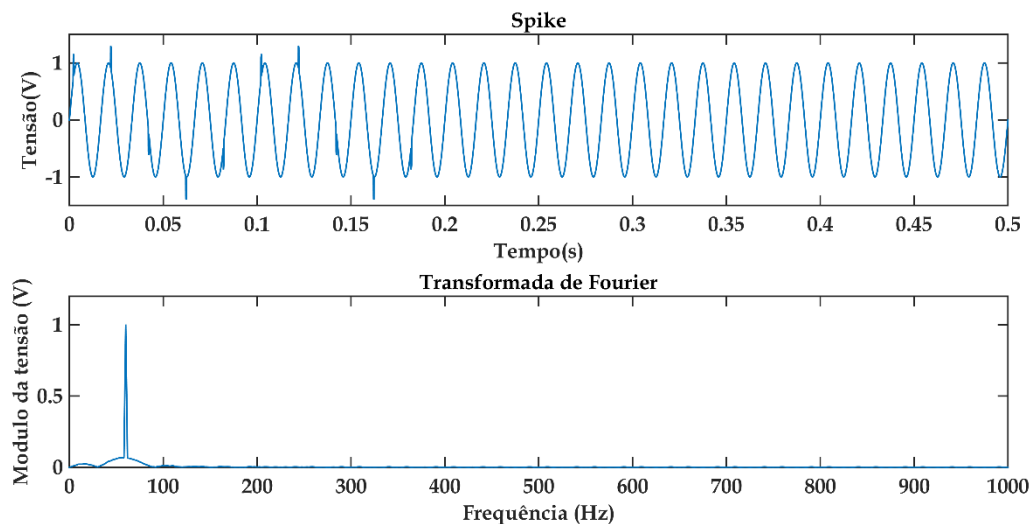
Spike

Código *Spike* (distúrbio **D10**).

```
function D10 = Spike(t, f)
%Parâmetros
t1=0.002;
t2=0.0023;
K=0.4;
w=2*pi*f;
soma = 0;
for n=0:9
    u1 = degrau(t1+0.02*n, t);
    u2 = degrau(t2+0.02*n, t);
    u10= u1-u2;
    soma = soma + K.* u10;
end
%Modelo Matemático
D10 = sin(w*t) + sign(sin(w*t)).*soma;
end
```

Por se tratar de um caso particular do *notching*, o fenômeno foi implementado da mesma forma, diferenciando-se apenas por se tratar de picos de curta duração na tensão, modelado pela adição da função `sign` (sinal), multiplicada por um trem de pulsos. O resultado em ambos os domínios (tempo e frequência) é apresentado na Figura 4.10. Também neste caso, observa-se comportamento idêntico ao fenômeno *notching* e ao da função senoidal ideal. Portanto, para esses dois casos (*notching* e *spike*), a TF do sinal não fornece informações suficientes para diferenciação dos distúrbios.

Figura 4.10 - Representações nos domínios do tempo e da frequência de um sinal de tensão com *spike*.



4.3 Cálculo da Energia

Conforme demonstrado pelas análises preliminares realizadas na sessão anterior, as informações fornecidas em ambos os domínios não são suficientes para caracterização e distinção dos diversos distúrbios. Desta forma, é necessário o uso de outros parâmetros para que se possa construir uma **impressão digital para cada distúrbio**. Neste sentido, recorreu-se às informações fornecidas pela energia do sinal em ambos os domínios.

- Domínio do Tempo

A energia no domínio do tempo foi computada implementando o código a seguir.

Código Energia no Domínio do Tempo - p1.

```
function [energia] = calculaEnergia(sinal)
    [j, tam_sinal] = size(sinal);
    energia = zeros(j, tam_sinal);
    for n = 1:j
        energia(n,1:end) = sinal(n,1:end).^2;
    end
    %transformação para dB
    energia = 10*log10(energia);
end
```

A energia é calculada amostra por amostra e em seguida, transformada para decibéis (db) a fim de facilitar a comparação entre os diversos distúrbios. Como no cálculo da energia, tais números são elevados ao quadrado e transformados em dB, nos pontos correspondentes ao cruzamento por zero da tensão, a energia será aproximadamente -300 dB.

Outro fato importante observado foi que esses picos negativos de energia não correspondem às características típicas dos sinais, então, a fim de que na impressão digital estivessem presentes apenas as características mais relevantes do distúrbio, as linhas de código mostradas a seguir foram adicionadas ao cálculo da energia. Dessa forma, não são considerados os pontos referentes ao cruzamento por zero da tensão.

Código Energia no Domínio do Tempo – p2.

```

for n = 1:10
    for i = 2:length(energiat)
        if energiat(n, i) < -250
            energiat(n,i) = energiat(n, i-1);
        end
    end
end
end

```

- Domínio da Frequência

O cálculo da energia no domínio da frequência foi realizado através do uso de uma função do Matlab chamada `periodogram`, que fornece a densidade de energia espectral do sinal, cujo código é apresentado a seguir.

Função `periodogram`/Matlab.

```

periodogram(x, window(length(x)),length(x), Fs, 'power');

```

Sendo:

`x`: sinal de entrada (vetor de tensão correspondente a cada distúrbio gerado na seção 4.1).

`length(x)`: tamanho do sinal `x`.

`window`: tipo de janela usada. Neste trabalho escolheu-se a janela Kaiser devido ao fato de ser uma janela flexível e sua forma poder ser alterada pelo ajuste do parâmetro β (usualmente, quanto menor o seu valor mais se aproxima de uma janela retangular), possibilitando o controle da perda espectral (ANDRADE et al, 2015). Aqui selecionou-se $\beta = 4\pi$.

`Fs`: frequência de amostragem. Aqui selecionou-se 15,36 kHz.

`Power`: indica que o retorno da função deve ser a energia do sinal em dB.

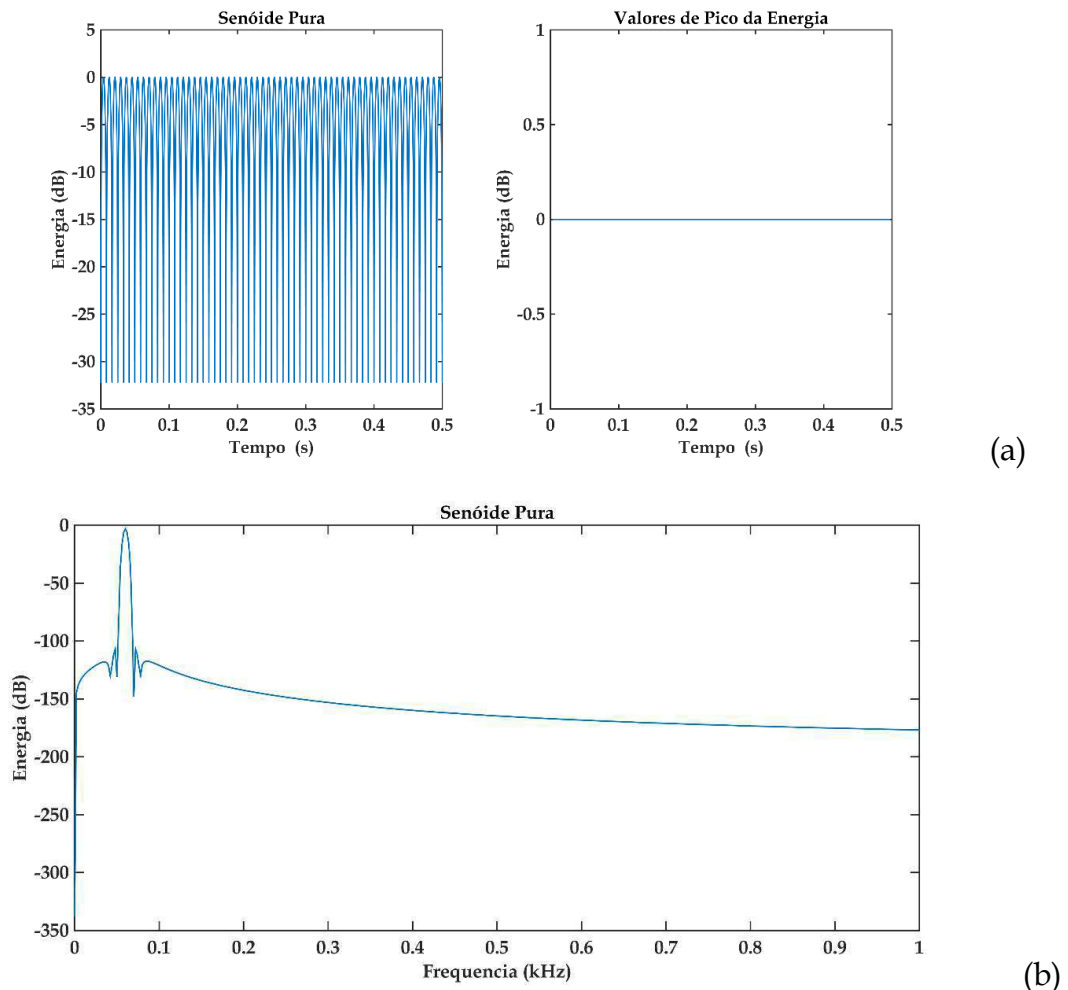
Apresentam-se a seguir as principais características da energia nos domínios do tempo e da frequência para cada distúrbio. O sinal senoidal ideal foi considerado como referência, ou seja, a análise dos foi feita considerando o quanto as características de um dado distúrbio se desviam das características da senóide ideal.

Sinal de Tensão Senoidal Ideal

Domínio do tempo: observa-se que a energia varia periodicamente entre 0 e -30 dB, sem oscilações, pulsos ou valores acima de 0 dB.

Domínio da frequência: observam-se: i) apenas um pico de energia na frequência fundamental de valor próximo a 0 dB; ii) que a energia se mantém em torno de -150 dB para as demais frequências até 1 kHz; iii) ausência de oscilação.

Figura 4.11- Energias de um sinal de tensão senoidal ideal nos domínios do: (a) tempo e da (b) frequência.

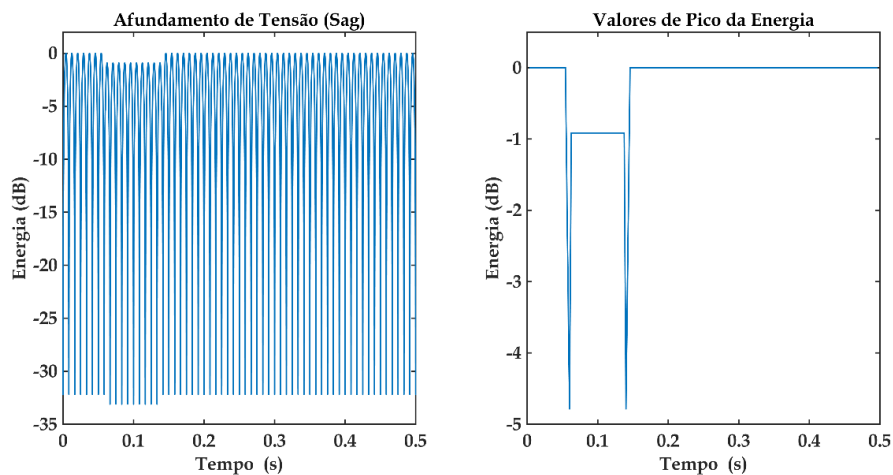


Sinal de Tensão com Afundamento

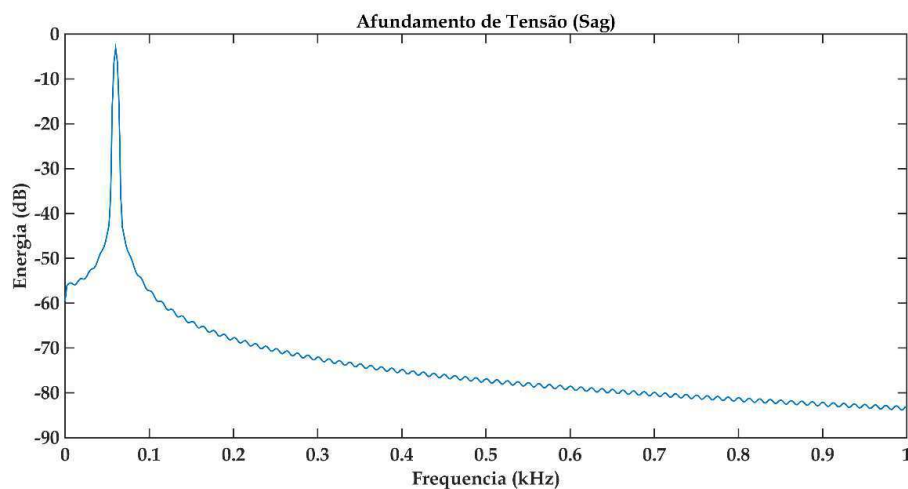
Domínio do tempo: observam-se: i) queda de ≈ 3 dB durante o distúrbio, o qual é proporcional ao valor da queda de tensão (parâmetro $\alpha = 0,3$ pu); ii) valores de até -5 dB nos instantes de chaveamento do distúrbio; iii) nos instantes pré e pós distúrbio, a energia se comporta exatamente como na senoide ideal.

Domínio da frequência: observam-se: i) apenas um pico de energia na frequência fundamental; ii) oscilações ao longo do espectro de frequências; iii) valor mínimo de ≈ -85 dB.

Figura 4.12 - Energias de um sinal de tensão com afundamento nos domínios do: (a) tempo e da (b) frequência.



(a)



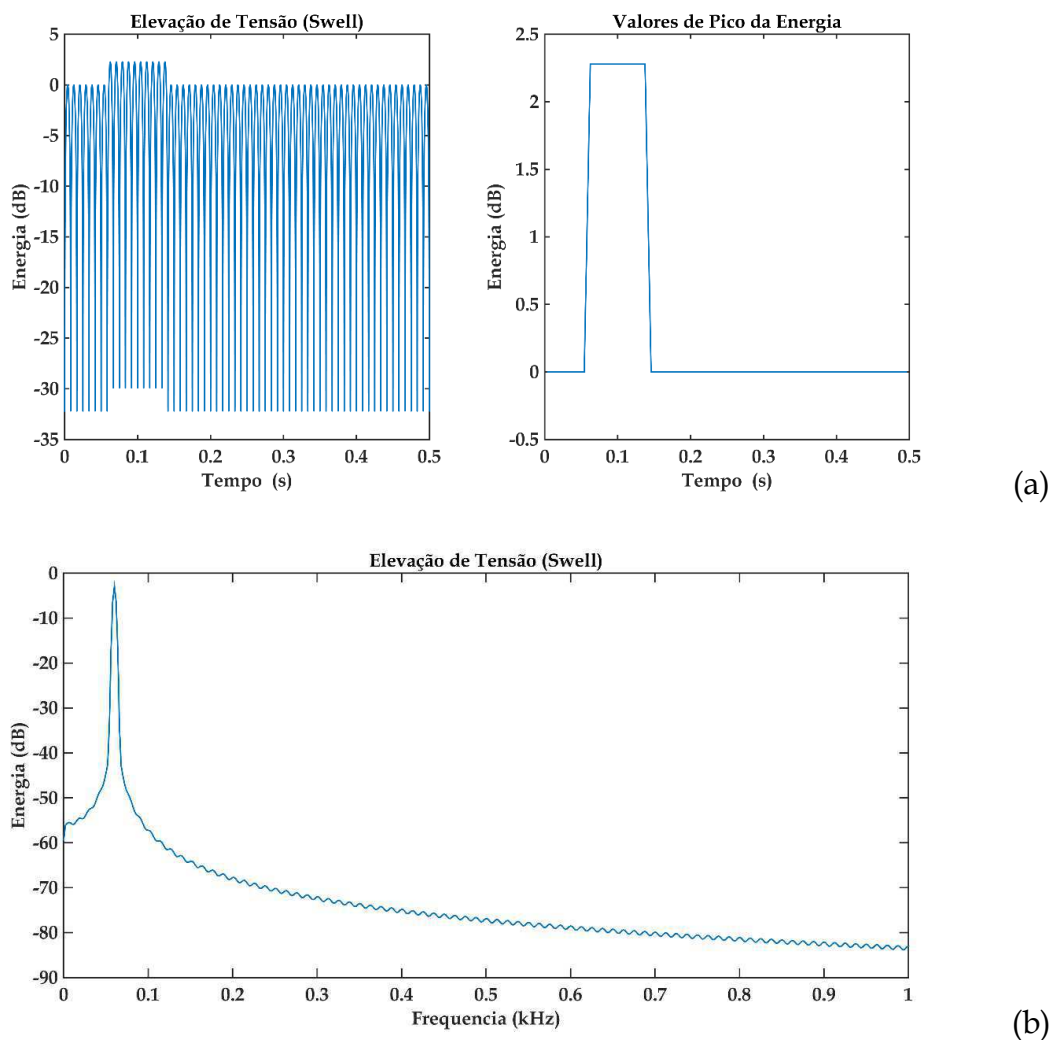
(b)

Sinal de Tensão com Elevação

Domínio do tempo: observam-se: i) aumento de ≈ 3 dB durante o distúrbio, o qual é proporcional ao valor da queda de tensão em pu (parâmetro $\alpha=0,3$ pu); iii) nos instantes pré e pós distúrbio, a energia se comporta exatamente como na senoide ideal.

Domínio da frequência: observam-se: i) um pico na frequência fundamental; ii) oscilações ao longo do espectro de frequências; iii) valor mínimo de ≈ -85 dB.

Figura 4.13 – Energias de um sinal de tensão com elevação nos domínios do: (a) tempo e da (b) frequência.

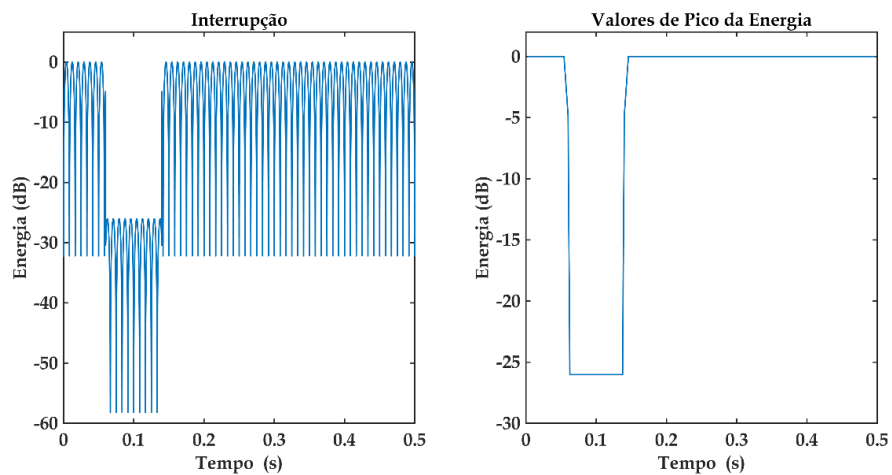


Sinal de Tensão com Interrupção

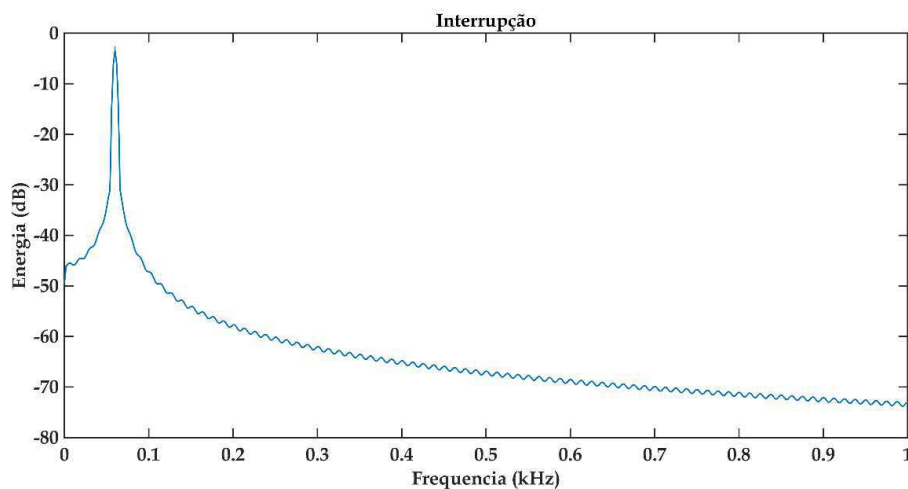
Domínio do tempo: observam-se: i) queda brusca de ≈ -25 dB, o qual é proporcional à queda de tensão durante a interrupção (a tensão durante a interrupção é de $\approx 0,05$ pu, elevando ao quadrado e aplicando a transformação para decibéis, tem-se 25 dB); ii) nos instantes pré e pós distúrbio, a energia se comporta exatamente como na senoide ideal.

Domínio da frequência: observam-se: i) pico de energia na frequência fundamental; ii) oscilações ao longo de todo o espectro de frequências; iii) valor mínimo de ≈ -75 dB.

Figura 4.14 – Energias de um sinal de tensão com interrupção nos domínios do: (a) tempo e da (b) frequência.



(a)



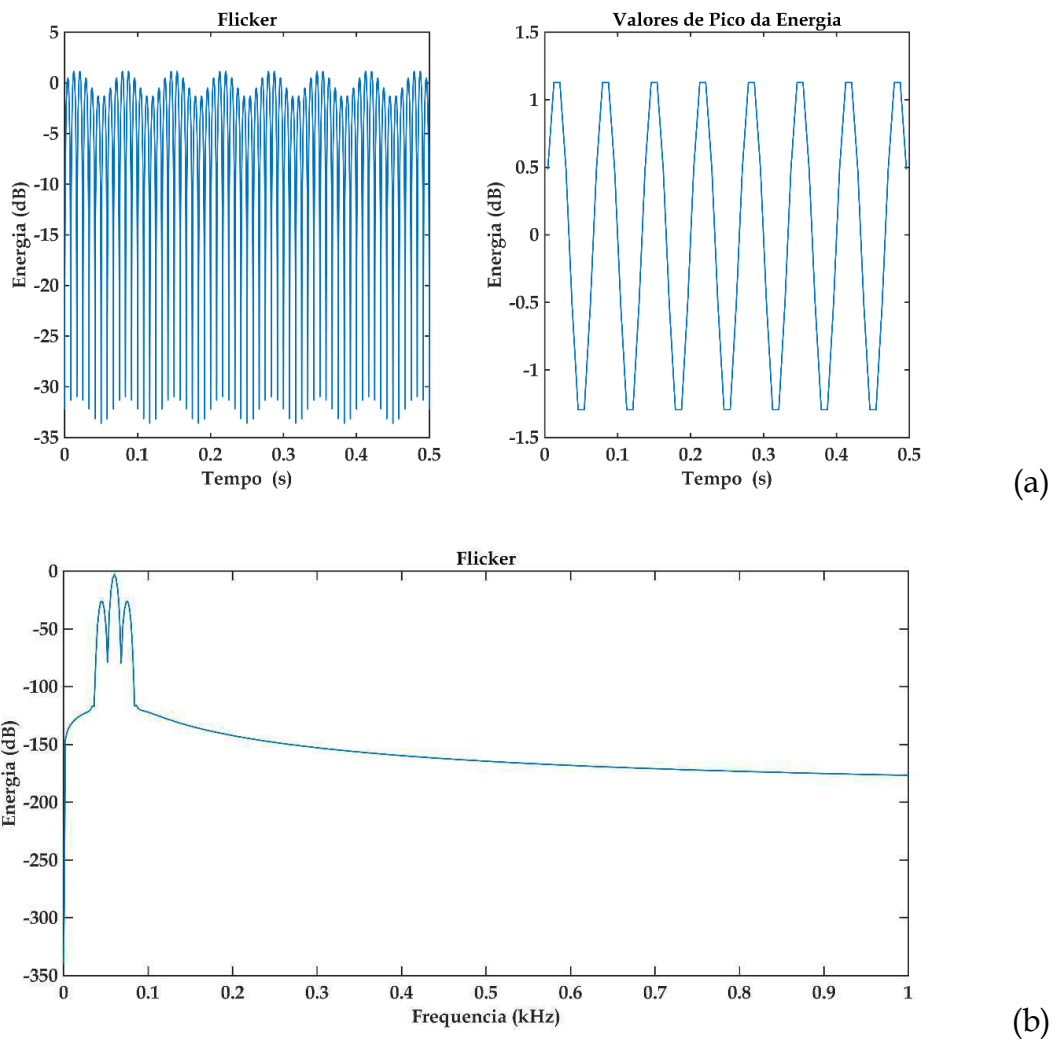
(b)

Sinal de Tensão com Flutuação

Domínio do tempo: observam-se oscilações nos picos entre 1,1 dB e -1,3 dB.

Domínio da frequência: observam-se: i) um pico de energia na frequência fundamental; ii) picos referentes aos harmônicos presentes no sinal (45 Hz e 75 Hz); iii) valor mínimo de -150 dB nas demais frequências, que quando comparando com a senoide ideal, esse valor indica que não existem outros componentes de frequência presentes no sinal.

Figura 4.15 – Energias de um sinal de tensão com flutuação nos domínios do: (a) tempo e da (b) frequência.

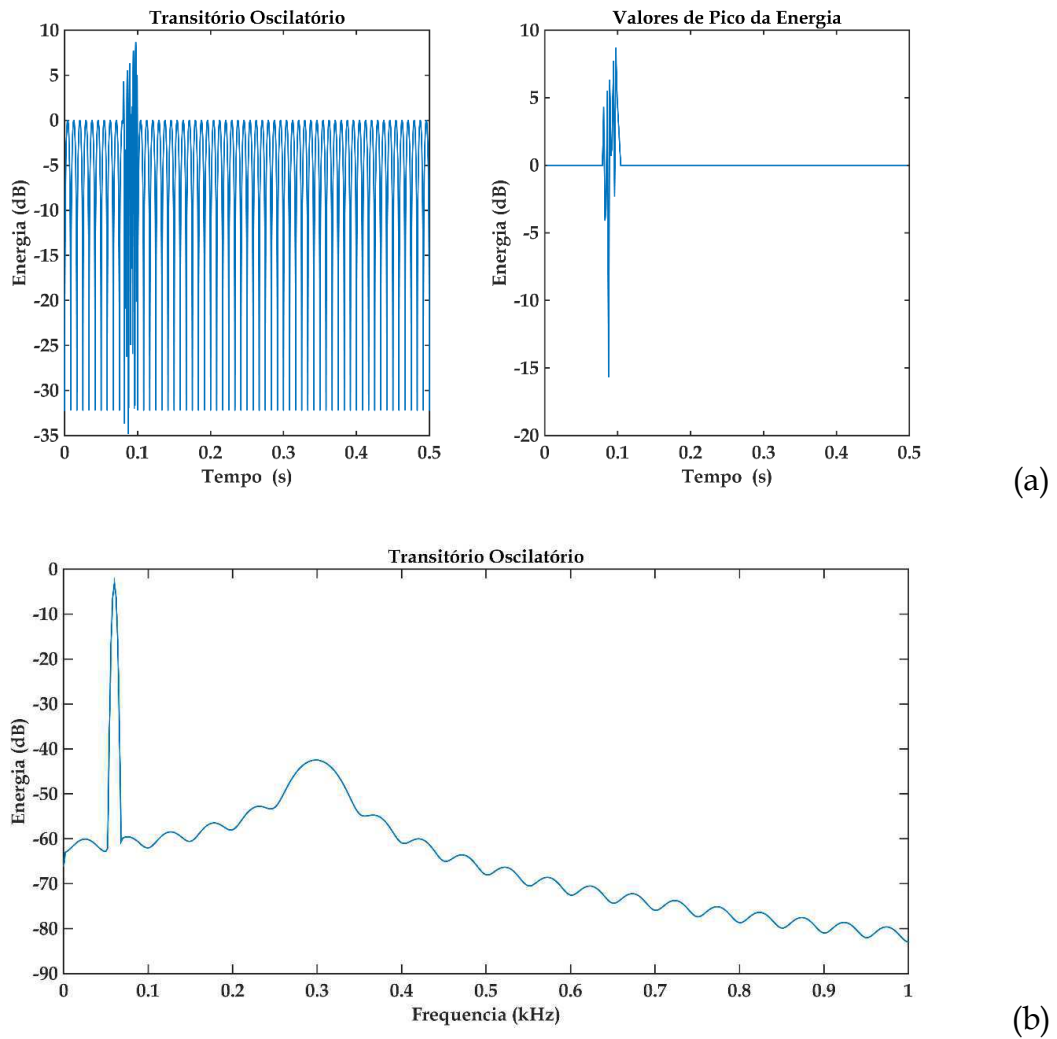


Sinal de Tensão com Transitório Oscilatório

Domínio do tempo: observam-se: i) oscilações significativas; ii) crescimento da amplitude atingindo picos de ≈ 9 dB.

Domínio da frequência: observam-se: i) um pico de energia na frequência fundamental; ii) oscilações significativas ao longo de todo o espectro de frequência; iii) crescimento da energia em torno de ≈ -35 dB no 5º harmônico; iii) valor mínimo de ≈ -85 dB.

Figura 4.16 – Energias de um sinal de tensão com transitório oscilatório nos domínios do: (a) tempo e da (b) frequência.

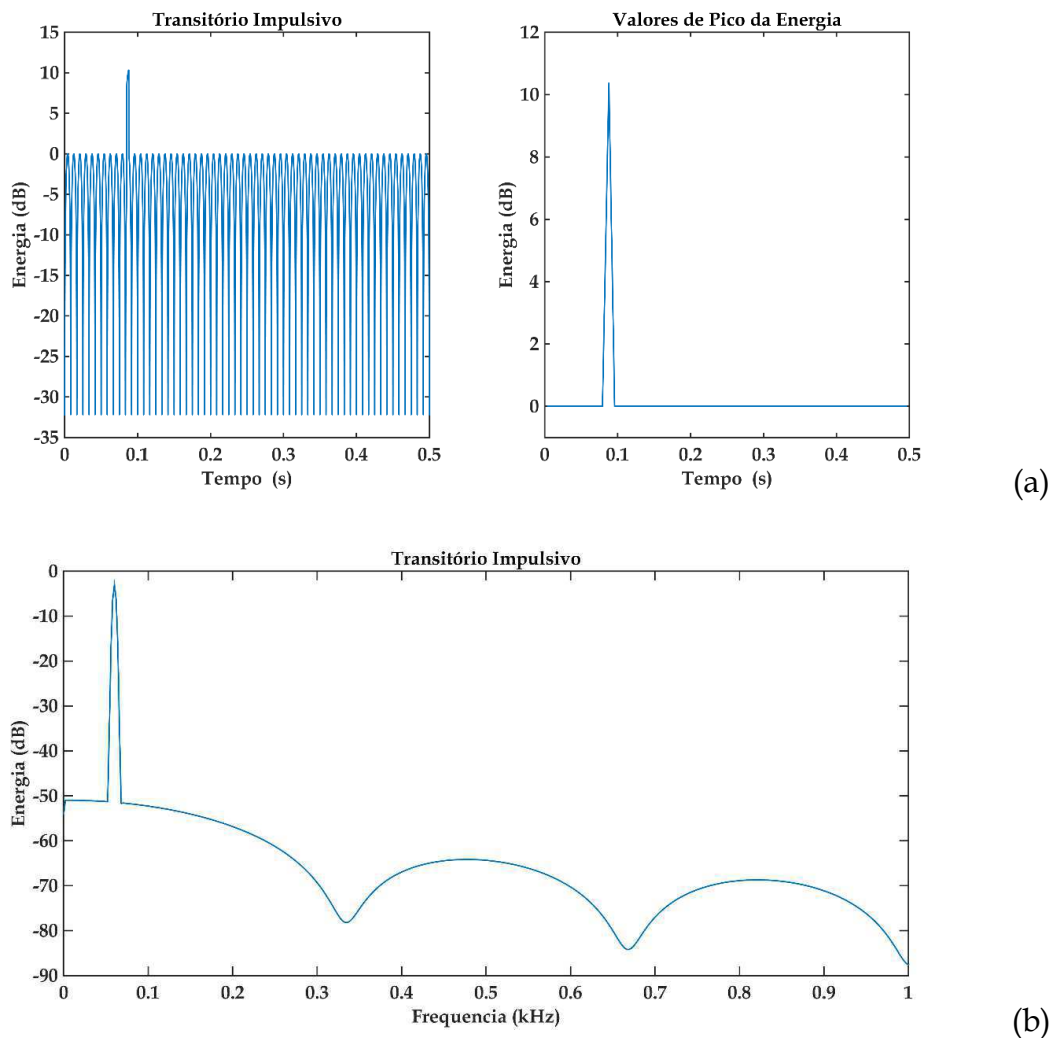


Sinal de Tensão com Transitório Impulsivo

Domínio do tempo: observa-se um crescimento de ≈ 10 dB durante um curto período de tempo.

Domínio da frequência: observam-se: i) um pico de energia na frequência fundamental; ii) energia distribuída em faixas de frequência (100 Hz a 300 Hz, 400 Hz a 600 Hz, 700 Hz a 1 kHz) com valores entre -60 dB e -85 dB.

Figura 4.17 – Energias de um sinal de tensão com transitório impulsivo nos domínios do: (a) tempo e da (b) frequência.

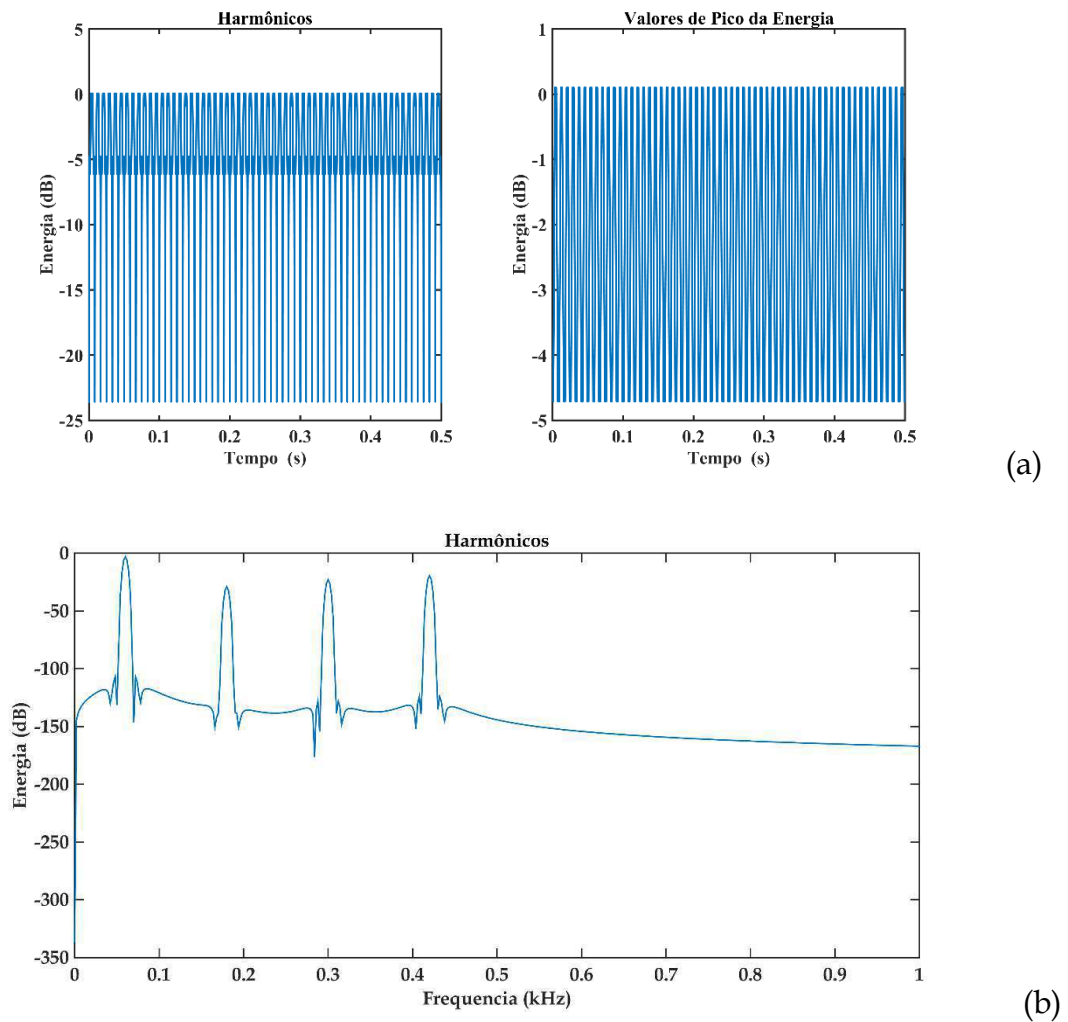


Sinal de Tensão com Harmônicos

Domínio do tempo: observam-se: i) distorções na forma de onda da energia; ii) oscilações nos picos entre -5 dB e 0 dB.

Domínio da frequência: observam-se: i) presença do 3º, 5º e 7º harmônicos; ii) valor mínimo nas demais frequências de ≈ -150 dB.

Figura 4.18 – Energias de um sinal de tensão com harmônicos nos domínios do: (a) tempo e da (b) frequência.

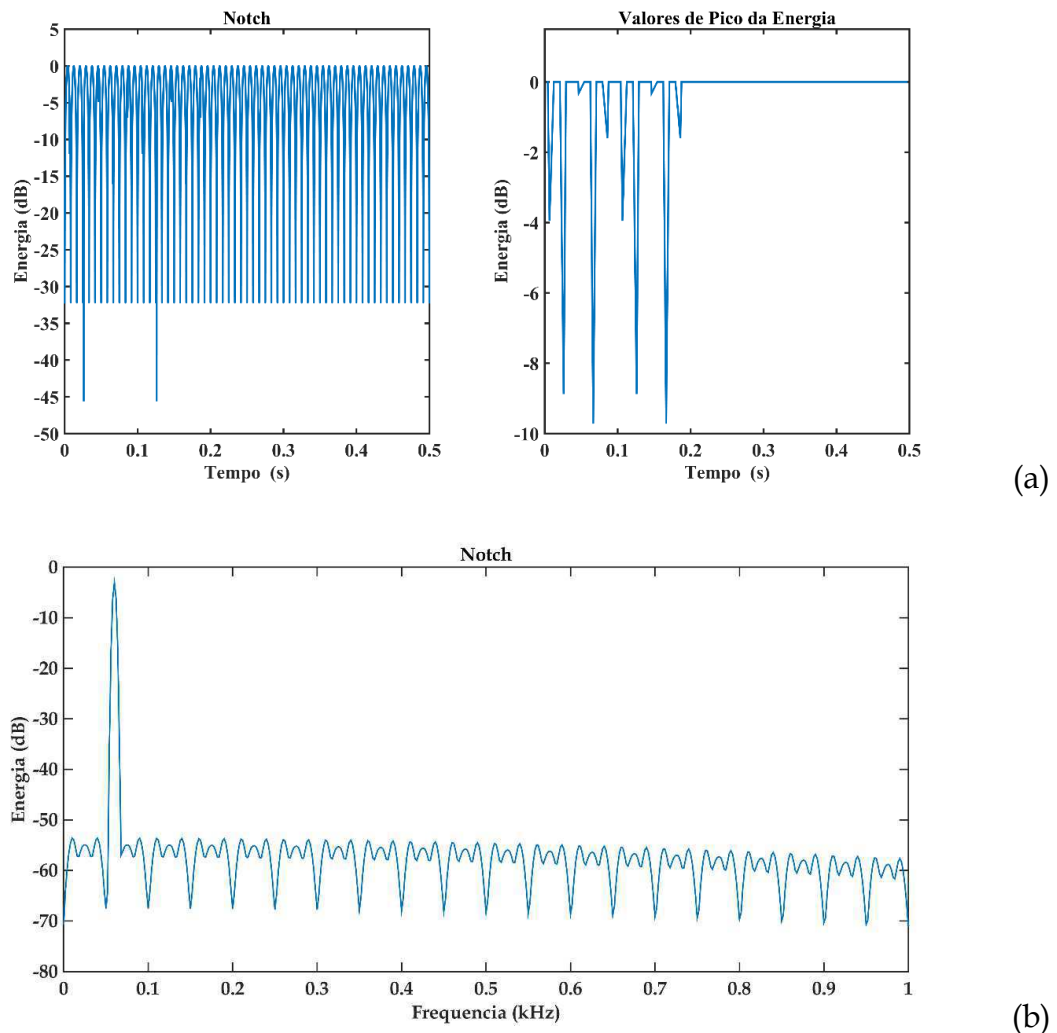


Sinal de Tensão com *Notching*

Domínio do tempo: observam-se: i) instantes em que a energia cai bruscamente, atingindo ≈ -10 dB; ii) que a energia nunca ultrapassa os 0 dB.

Domínio da frequência: observam-se oscilações entre -70 dB e -65 dB para todas as demais frequências diferentes da fundamental.

Figura 4.19 – Energias de um sinal de tensão com *notching* nos domínios do: (a) tempo e da (b) frequência.

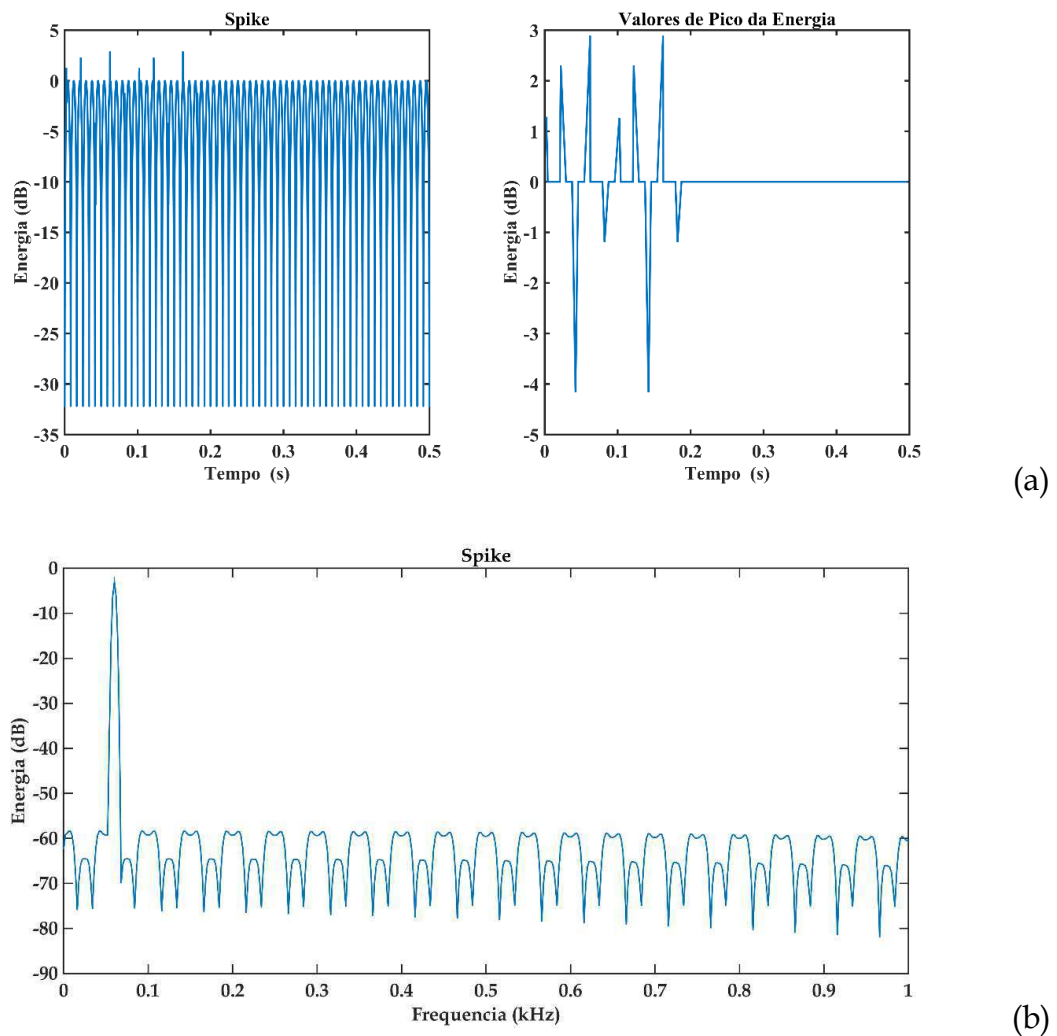


Sinal de Tensão com Spike

Domínio do tempo: observam-se: i) instantes em que a energia cai bruscamente, atingindo ≈ -5 dB; ii) picos com valores de até ≈ 3 dB.

Domínio da frequência: observam-se oscilações entre ≈ -75 dB e ≈ -60 dB para todas as frequências diferentes da fundamental.

Figura 4.20 – Energias de um sinal de tensão com *spike* nos domínios do: (a) tempo e da (b) frequência.



4.4 Síntese

Após estudo minucioso, construiu-se a Tabela 4.1, que representa uma síntese das principais características observadas nos distúrbios analisados. A meta é que essas observações possam ser a base processo de construção de uma impressão digital para cada distúrbio. Em relação à essa tabela, pode-se afirmar o seguinte:

- Os valores em decibéis apresentados são em sua maioria proporcionais as características dos distúrbios, como por exemplo os valores em pu da queda de tensão.
- O conteúdo harmônico depende do distúrbio.
- Todos os valores variáveis estão destacados em negrito. Os demais valores deverão se manter se as tensões analisadas tiverem frequência fundamental de 60 Hz e a amplitude estiver em valores por unidade (pu).
- Todos os distúrbios apresentam um pico na frequência fundamental no domínio da frequência.
- A construção de uma impressão digital para os distúrbios constitui uma informação importante para um diagnóstico rápido e eficiente, aumentando a confiabilidade do sistema, beneficiando tanto as concessionárias como os consumidores finais.
- Embora a tabela apresente valores dependentes dos parâmetros adotados, ela fornece informações pertinentes com relação aos distúrbios, como: i) crescimento da energia nos domínios do tempo e da frequência; ii) descrição das formas de onda apresentadas em ambos os domínios.
- Um estudo minucioso desta tabela, em conjunto com as curvas e informações apresentadas ao longo deste trabalho, possibilitou um maior entendimento das características essenciais de cada distúrbio.

Tabela 4.1 – Impressão Digital dos Distúrbios.

Distúrbio	Tempo	Frequência
Senóide Pura	<ul style="list-style-type: none"> Valores entre 0 e 30 dB Não há distorções nem picos acima de 0 dB 	<ul style="list-style-type: none"> Pico em 60 Hz (fundamental) Valor mínimo -150 dB (demais frequências)
Afundamento de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> Queda proporcional a queda de tensão Exemplo: 0,3 pu → 3 dB Atinge -5 dB no chaveamento do distúrbio. 	<ul style="list-style-type: none"> Oscilações ao longo do espectro Valor mínimo de -85 dB.
Elevação de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> Aumento proporcional ao crescimento da tensão Exemplo: 0,3 pu → 3 dB. 	<ul style="list-style-type: none"> Oscilações ao longo de todo o espectro Valor mínimo de -85 dB.
Interrupção	<ul style="list-style-type: none"> Queda proporcional a tensão remanescente Exemplo: 0,05 dB → 25 dB 	<ul style="list-style-type: none"> Oscilações ao longo de todo o espectro Valor mínimo de -75 dB
Flutuação de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> Oscilações visíveis na forma de onda Picos oscilando entre 1.1 e - 1.3 dB 	<ul style="list-style-type: none"> Harmônicos de baixa frequência: 45 Hz e 75 Hz Valor mínimo de -150 dB
Transitório Oscilatório	<ul style="list-style-type: none"> Grandes oscilações nos picos da energia atingindo até 9 dB 	<ul style="list-style-type: none"> Presença do 5º harmônico (300 Hz) com aproximadamente -35 dB. Oscilações notáveis Valor mínimo de -85 dB.
Transitório Impulsivo	<ul style="list-style-type: none"> Crescimento brusco de quase 10 dB durante um curto período de tempo 	<ul style="list-style-type: none"> Energia distribuída em faixas de frequência Valores entre -60 dB e -85 dB.
Harmônicos	<ul style="list-style-type: none"> Distorções na forma de onda Oscilações nos picos entre -5dB e 0 dB. 	<ul style="list-style-type: none"> Picos de energia nos harmônicos presentes Neste caso: 3º (180 Hz), 5º (300 Hz) e 7º (420 Hz) harmônico.
Notching	<ul style="list-style-type: none"> Quedas bruscas nos picos da energia de quase -10 dB por curtos intervalos de tempo. Energia não ultrapassa 0 dB. 	<ul style="list-style-type: none"> Oscilações entre -70 dB e -65 dB ao longo do espectro.
Spike	<ul style="list-style-type: none"> Crescimento brusco nos picos da energia de até 3 dB e quedas de no máximo -5 dB por pequenos intervalos de tempo. 	<ul style="list-style-type: none"> Oscilações ao longo do espectro entre -75 dB e -60 dB.

5. Conclusões

O desenvolvimento deste TCC possibilitou o estudo de um tema importante e atual que é a Qualidade Da Energia Elétrica e o aprofundamento da transformada de Fourier.

Apesar do domínio do tempo constituir o domínio tradicional de análise, o estudo comprovou que as informações por ele fornecidas, são insuficientes para lidar com o “mundo real”. Como consequência, foi crucial a busca por informações adicionais, que neste trabalho, foram provenientes do domínio da frequência.

A necessidade do uso da transformada de Fourier mostrou a importância e o grande potencial dessa ferramenta matemática. Outro fato que merece destaque foi o estudo do comportamento da energia dos sinais, o que possibilitou uma compreensão maior das características de cada distúrbio.

O estudo realizado foi concluído com o levantamento das principais características observadas nos distúrbios analisados, que se espera, possa auxiliar no processo de construção de uma impressão digital para cada distúrbio.

Como continuação do estudo realizado neste TCC, sugere-se aprofundar o estudo dos distúrbios de modo a consolidar a impressão digital, para isso propõe-se:

- Gerar uma base dados de distúrbios simulados usando um sistema-teste do IEEE.
- Comparar as características dos sinais simulados no TCC com os do sistema-teste do IEEE.
- Avaliar a impressão digital quando aplicada aos sinais provenientes do sistema-teste do IEEE.
- Avaliar a impressão digital quando aplicada a sinais reais.

6. Referências Bibliográficas

- ALMEDIA, A.; MOREIRA, L.; DELGADO, J. Power Quality problems and new solutions" International conference on renewable energies and power quality. 03, Vigo, Spain Vol.1,2003.
- ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no sistema elétrico nacional - PRODIST. Módulos 1 a 8. 2011.
- ANDRADE, A. O. E SOARES, A. B. Técnicas de Janelamento de Sinais. Universidade Federal de Uberlândia, 2015.
- ARRILLAGA, J.; BRADLEY, D. A.; BODGER, P. S. Power system harmonics, John Wiley & Sons Ltd., 1985.
- BRITO, N.S.D.; COSTA, F.B.; SOUZA, B. A. Proposição de uma impressão digital para os distúrbios. Congresso Brasileiro de Automática, 2012.
- DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; WAYNE BEATY, H. Electrical power systems quality, MCGRAWHILL, 1996.
- FRANCO, E. Qualidade de Energia elétrica, 2015. Disponível em: <http://www.ess-br.com.br/qualidade-de-energia-eletrica/>. Acesso em setembro, 2016.
- HENSLEY, G. et al. Applications of the windowed FFT to electric power quality assessment. IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 14, Issue: 4, October 1999.
- IEEE Std. 1159-1995. Recommended practice for monitoring electric power quality. Revision of June 2009.
- IEEE Std C62.41. Surge Protection Standards Collection., 1992.
- LATHI, B. P. Sinais e sistemas lineares. 2. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2007. 856 p.
- MINUSSI, C. R. Desenvolvimento de um sistema especialista para a automação e apoio à tomada de decisão em ambiente de subestações de sistemas de distribuição de energia elétrica. Projeto ANEEL-Grupo Rede-FEPISA, Relatório Técnico Científico, Março 2007.
- OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S.; NAWAB, S. H. (Colab.). Sinais e sistemas. 2. ed.

Revisão Técnica de M. Eisenkraft e M. D. Miranda; Tradução de D. Vieira e R. Bettoni. São Paulo: Pearson, 2010.

UIE-DWG-3-92-G. UIE Guide to Quality of Electrical Supply for Industrial Installations – Part 1: General Introduction to Electromagnetic Compatibility (EMC), Types of Disturbances and Relevant Standards, 1994.

WHITEPAPER. Qualidade do fornecimento de energia elétrica: confiabilidade, conformidade e prestação. Instituto Acende Brasil, Edição 14, 2014.