



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA



**KELLY NATALY CUNHA SILVA**

**ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DE HARMÔNICAS DE ALTA  
FREQUÊNCIA EM CIRCUITOS SECUNDÁRIOS DE  
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Uberlândia, Agosto de 2023

**KELLY NATALY CUNHA SILVA**

**Análise da propagação de harmônicas de alta frequência em circuitos secundários de distribuição de energia elétrica.**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Rubens Macedo Junior

Uberlândia, Agosto de 2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S586 2023	<p>Silva, Kelly Nataly Cunha, 1996- Análise da propagação de harmônicas de alta frequência em circuitos secundários de distribuição de energia elétrica [recurso eletrônico] / Kelly Nataly Cunha Silva. - 2023.</p> <p>Orientador: José Rubens Macedo Junior. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: <a href="http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.486">http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.486</a> Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia elétrica. I. Macedo Junior, José Rubens, 1972-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.3</p>
--------------	---

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:  
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

**KELLY NATALY CUNHA SILVA**

**ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DE HARMÔNICAS DE ALTA FREQUÊNCIA EM  
CIRCUITOS SECUNDÁRIOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

**Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do título de Mestre em Ciências.**

**Comissão examinadora:**

**Prof. Dr. José Rubens Macedo Junior  
(Orientador – UFU)**

**Prof. Dr. Isaque Nogueira Gondim  
(Examinador – UFU)**

**Prof. Dr. Fernando Nunes Belchior  
(Examinador – UFG)**

**Uberlândia, 28 de agosto de 2023**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
 Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 788, PPGEELT				
Data:	Vinte e oito de agosto de dois mil e vinte e três	Hora de início:	15:30	Hora de encerramento:	17:30
Matrícula do Discente:	12112EEL002				
Nome do Discente:	Kelly Nataly Cunha Silva				
Título do Trabalho:	Análise da propagação de harmônicas de alta frequência em circuitos secundários de distribuição de energia elétrica				
Área de concentração:	Sistemas de Energia Elétrica				
Linha de pesquisa:	Sistemas Elétricos de Potência				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: Prof. Dr. José Rubens Macedo Junior. Título do projeto: P&D ANEEL - Desenvolvimento de sistemas de GD fotovoltaica remota e armazenamento de energia de forma distribuída ao longo de alimentadores, com funções de arbitragem de preços (HFP-HP) e prestação de serviços ancilares locais para melhoria da QEE. Agência financiadora: P&D ANEEL / Energisa S.A. Número do processo na agência financiadora: P&D 00032-2204/2022. Vigência do projeto: até 28/08/2024.				

Reuniu-se por meio de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores:

Isaque Nogueira Gondim - UFU, Fernando Nunes Belchior - UFG e José Rubens Macedo Junior - FEELT/UFU; orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. José Rubens Macedo Junior, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando a candidata:

**Aprovada.**

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme, foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **José Rubens Macedo Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/08/2023, às 17:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Isaque Nogueira Gondim, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/08/2023, às 17:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **FERNANDO NUNES BELCHIOR, Usuário Externo**, em 29/08/2023, às 08:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4775291** e o código CRC **AC41385F**.

*Dedico este trabalho aos meus pais Ataíde e Maria Dolores.*

*Minhas irmãs Priscila, Keila e Ellen.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus, em primeiro lugar, pelo dom da vida, pela saúde e fé, que me proporcionou resiliência para persistir em meio as dificuldades.

Ao meu professor e orientador, José Rubens Macedo Junior, que se faz presente na minha trajetória acadêmica desde 2016, obrigada por acreditar em mim, pelos ensinamentos, colaboração, paciência e tempo dedicado.

Aos meus pais, pelo amor incondicional, pelos bons exemplos e por investirem no bem mais essencial que tenho: a educação.

Às minhas irmãs, pela ajuda, motivação e encorajamento que sempre me proporcionaram.

Ao meu namorado Luiz Gustavo, por estar sempre presente me incentivando, pelo companheirismo, amor, respeito e cuidado de sempre.

Aos meus avós que são a base de tudo o que sou e do que carrego em meu coração.

Aos meus familiares e amigos, por todo suporte e encorajamento que sempre demonstraram.

Aos meus colegas do Laboratório de Distribuição de Energia Elétrica – LADEE que compartilharam comigo os desafios e aprendizados, obrigada pela partilha, parceria e amizade.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG pela bolsa de fomento.

Ao Grupo Energisa pelas bolsas de fomento por meio dos Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento realizados junto ao LADEE.

## RESUMO

O entendimento de como a rede elétrica vem se transformando nos últimos anos é essencial para prever problemas e evitar danos aos equipamentos, tanto da distribuidora de energia elétrica local como de consumidores. Nesse contexto, essa dissertação investiga um tema recente no setor elétrico que envolve o aparecimento das harmônicas de alta frequência (na faixa de 2 a 150 kHz) emitidas por inversores de painéis fotovoltaicos, carregadores de veículos elétricos e outros equipamentos baseados em eletrônica de potência, comumente encontrados nos circuitos secundários de baixa tensão.

As emissões de alta frequência, também conhecidas como supra-harmônicas, podem afetar a qualidade da energia elétrica dos sistemas de distribuição. Pesquisas recentes mostram que as supra-harmônicas podem causar interferências em dispositivos de comunicação e outros equipamentos conectados à rede elétrica. A investigação e análise de como as correntes de alta frequência se propagam em circuitos secundários de distribuição é importante para diagnóstico e atenuação de quaisquer distúrbios que podem ser causados por elas.

O enfoque dessa dissertação é analisar como as injeções de correntes supra-harmônicas se refletem na tensão e como elas se propagam entre diferentes pontos de um sistema de distribuição. Para isso, foram realizadas modelagens e simulações através do *software* MATLAB *Simulink*®, considerando-se um circuito secundário de baixa tensão, modelado conforme modelo PI, e fontes emissoras de correntes supra-harmônicas. As análises foram feitas alocando as fontes de correntes supra-harmônicas em barras distintas da rede.

Os resultados mostraram que os níveis de distorção harmônica de tensão dependem da frequência e da impedância da rede. Os resultados também exploraram os cenários potenciais deste tipo de rede, mostrando a consideração de seis sistemas de geração distribuída conectados à rede e injetando correntes supra-harmônicas de diferentes frequências e amplitudes. Em suma, os valores da taxa de distorção de tensão foram pequenos e não ultrapassaram 0,6%. Constatou-se que as emissões de correntes supra-harmônicas não se propagam pela rede devido ao caminho de baixa impedância das capacitâncias intrínsecas dos condutores elétricos e por meio do elemento capacitivo contido nas estruturas dos filtros de compatibilidade eletromagnética (EMC) presentes nos equipamentos emissores das correntes de alta frequência.

**Palavras-chave:** supra-harmônicas; propagação de supra-harmônicas; emissão em alta frequência; sistemas de distribuição; qualidade da energia elétrica.

## ABSTRACT

Understanding how the power grid has been changing in recent years is essential to predict problems and avoid damage to equipment, both at the utility and consumers. In this context, this dissertation investigates a recent topic in the electricity sector, which involves the appearance of harmonics in the range of 2 to 150 kHz emitted by equipment such as photovoltaic panel inverters, electric vehicle chargers and other equipment controlled by power electronics present in low voltage secondary circuits.

High frequency emissions, also known as supra harmonics, can affect the power quality of distribution systems. Research shows that supra harmonics can cause interference in communication devices and equipment connected to the grid. The investigation and analysis of how high frequency currents propagate in distribution secondary circuits is important for diagnosing and mitigating any disturbances that may be caused by them.

The focus of this dissertation is to analyze how the supra harmonic current injections are reflected in the voltage and how they propagate in different points of a secondary distribution system. For this, simulations were performed using MATLAB Simulink® software, where a secondary distribution circuit was modeled including its lines in PI model and sources emitting supra harmonic currents. The analyses were made by allocating these sources in different bars of the system.

The results showed that voltage harmonic distortion levels depend on the frequency and grid impedance. The results also explored the potential scenarios of this type of grid, showing the consideration of six distributed generation systems connected to the network and injecting supra harmonic currents of different frequencies. In summary, the values of the voltage distortion rate were small and did not exceed 0.6%. It was found that the supra-harmonic emissions caused by the high frequency currents do not propagate through the network due to the low impedance path of the intrinsic capacitances of the electrical conductors and through the capacitive element contained in the structures of the electromagnetic compatibility (EMC) filters present in the equipment emitting the high frequency currents.

**Keywords:** supraharmonic; supraharmonic propagation; high frequency emission; electric power distribution; power quality.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Publicações sobre supra-harmônicas ao longo da última década. ....	19
Figura 2 - Exemplo de um sinal de 60 Hz a 1pu com dois sinais sobrepostos a 30 kHz e 70 kHz, no domínio do tempo (superior) e o espectro resultante (inferior).....	24
Figura 3 - Exemplo de um sinal de banda larga sobreposto a uma componente fundamental de 60 Hz. No domínio do tempo (superior) e no domínio da frequência (inferior). ....	25
Figura 4 - Sinal sintetizado mostrando oscilações recorrentes. No domínio do tempo (superior) e no domínio da frequência (inferior).....	26
Figura 5 - Principais tipos de interferência entre equipamentos na faixa de frequência de 2 kHz a 150 kHz [11]. ....	27
Figura 6 - Diagrama em bloco de um osciloscópio digital [23]. ....	29
Figura 7 - Diferença na medição para um instrumento de 16 bits em relação a um de 3 bits de resolução. ....	30
Figura 8 - Bandas de frequência para medição na faixa acima de 2 kHz até 9 kHz [32]. ....	34
Figura 9 - Esquema para a propagação de emissões primárias e secundárias em uma rede elétrica. ....	38
Figura 10 - Modelo simplificado para a análise de supra-harmônicas com um dispositivo conectado à rede. ....	38
Figura 11 - Modelo simplificado para a análise de supra-harmônicas com dois dispositivos conectados à rede. ....	39
Figura 12 - Diagrama esquemático do sistema de distribuição de baixa tensão utilizado para o estudo de propagação das supra-harmônicas. ....	42
Figura 13 – Bloco Segmento de rede de seção PI trifásico <i>Simulink</i> . ....	44
Figura 14 – Parâmetros de resistências próprias e mútuas ( $R_s$ , $R_m$ ), indutâncias próprias e mútuas ( $L_s$ , $L_m$ ), capacitâncias de fase $C_p$ e as capacitâncias de terra $C_g$ , consideradas na seção PI de uma linha trifásica. ....	44
Figura 15 – Inversor trifásico e filtro LCL conectado à rede [45]. ....	45
Figura 16 - Diagrama esquemático do sistema de distribuição de baixa tensão considerando as GDFV. ....	47
Figura 17 – Modelagem do circuito BT em ambiente <i>Simulink</i> . ....	48
Figura 18 – Fonte de corrente supra-harmônica + Filtro LCL em ambiente <i>Simulink</i> . ....	48

Figura 19 – Fonte de corrente da GDFV + fonte de corrente supra-harmônica + filtro LCL em ambiente <i>Simulink</i> . .....	49
Figura 20 – Modelagem de uma GDFV, uma fonte SH e um filtro LCL trifásico em ambiente .....	49
Figura 21 – Distorção harmônica de tensão da fase A em cada barra do circuito, para diferentes frequências, no caso da fonte SH alocada na barra P1. ....	51
Figura 22 – Espectro de frequências na barra P1 para SH = 50 kHz. ....	51
Figura 23 – Distorção harmônica de alta frequência ao longo da rede, no caso em que a fonte SH está localizada na barra P1. ....	52
Figura 24 – Distorção harmônica de tensão da fase A em cada barra do circuito, para diferentes frequências, no caso da fonte SH alocada na barra P2. ....	53
Figura 25 – Espectro de frequências na barra P2 para SH = 50 kHz, caso B.....	54
Figura 26 – Distorção harmônica de alta frequência ao longo da rede para o caso em que a fonte SH está localizada na barra P2. ....	54
Figura 27 – Distorção harmônica de tensão da fase A em cada barra do circuito, para diferentes frequências, no caso da fonte SH alocada na barra P3. ....	55
Figura 28 – Espectro de frequências na barra P3 para SH = 50 kHz, caso C.....	56
Figura 29 – Distorção harmônica de alta frequência ao longo da rede para o caso em que a fonte SH está localizada na barra P3. ....	56
Figura 30 – Distorção harmônica de tensão da fase A em cada barra do circuito, para diferentes frequências, no caso da fonte SH alocada na barra P4. ....	57
Figura 31 – Espectro de frequências na barra P4 para SH = 50 kHz, caso D. ....	58
Figura 32 – Distorção harmônica de alta frequência ao longo da rede para o caso em que a fonte SH está localizada na barra P4. ....	58
Figura 33 – Distorção harmônica de tensão da fase A em cada barra do circuito, para diferentes frequências, no caso da fonte SH alocada na barra P5. ....	59
Figura 34 – Espectro de frequências na barra P5 para SH = 50 kHz, caso E.....	60
Figura 35 – Distorção harmônica de alta frequência ao longo da rede para o caso em que a fonte SH está localizada na barra P5. ....	60
Figura 36 – Distorção harmônica de tensão da fase A em cada barra do circuito, para diferentes frequências, no caso da fonte SH alocada na barra P6. ....	61
Figura 37 – Espectro de frequências na barra P6 para SH = 50 kHz, caso F. ....	62
Figura 38 – Distorção harmônica de alta frequência ao longo da rede para o caso em que a fonte SH está localizada na barra P6 .....	62

Figura 39 - Distorção harmônica de alta frequência em cada barra para a fontes SH alocadas nas barras P0 e P6. ....	63
Figura 40 – Espectro de frequências na barra P6 para SH = 50 kHz, caso G. ....	64
Figura 41 – Distorção harmônica de alta frequência ao longo da rede para o caso em que a fonte SH está localizada nas barras P0 e P6. ....	64
Figura 42 – Distorção harmônica de tensão da fase A em cada barra do circuito, para diferentes frequências, no caso da fonte SH alocada na barra P6. ....	65
Figura 43 – Espectro de frequências na barra P6 para SH = 50 kHz, caso H. ....	66
Figura 44 – Distorção harmônica de alta frequência ao longo da rede para o caso em que há duas fontes SH localizadas na barra P6. ....	66
Figura 45 – Resposta em frequência barra P6 para os casos: A (superior esquerda), B (superior direita), C (inferior esquerda) e D (inferior direita).....	68
Figura 46 – Resposta em frequência barra P6 para os casos: E (superior esquerda), F (superior direita), G (inferior esquerda) e H (inferior direita). ....	68
Figura 47 – Distorção harmônica de alta frequência em cada barra para as fontes SH provindas de seis sistemas de GDFV. ....	70
Figura 48 – Forma de onda da tensão na fase A e espectro na barra P3 considerando os seis sistemas fotovoltaicos conectados ao circuito. ....	71
Figura 49 – Forma de onda da tensão na fase B e espectro na barra P3 considerando os seis sistemas fotovoltaicos conectados ao circuito ....	72
Figura 50 – Forma de onda da tensão na fase C e espectro na barra P3 considerando os seis sistemas fotovoltaicos conectados ao circuito ....	73
Figura 51 – Resposta em frequência para a barra P6 considerando a inserção dos seis sistemas de GDFV, caso 1. ....	74
Figura 52 – Distorção harmônica de alta frequência em cada barra para as fontes SH provenientes de seis sistemas de GDFV.....	75
Figura 53 – Forma de onda da tensão na fase C e espectro na barra P4 considerando os seis sistemas fotovoltaicos conectados ao circuito. ....	76
Figura 54 – Forma de onda da tensão na fase B e espectro na barra P6 considerando os seis sistemas fotovoltaicos conectados ao circuito. ....	76
Figura 55 – Forma de onda da tensão na fase B e espectro na barra P6 considerando os seis sistemas fotovoltaicos conectados ao circuito. ....	77
Figura 56 – Resposta em frequência para a barra P6 considerando a inserção dos seis sistemas de GDFV, caso 2. ....	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Efeitos dependendo do tipo de interferência [11].	27
Tabela 2 - Níveis de compatibilidade para distorção de tensão de 2,4 kHz a 150 kHz.	33
Tabela 3 – Detalhes das características da seção do circuito.	43
Tabela 4 – Detalhes das potências das cargas do circuito.	43
Tabela 5 - Parâmetros do segmento de rede PI trifásico.	44
Tabela 6 – Casos simulados	46
Tabela 7 – Potência e consumidores onde as GDFV foram conectadas	46
Tabela 8 – Valores dos parâmetros dos filtros LCL para cada potência de GDFV e frequências de chaveamento consideradas.	47
Tabela 9 – Valores percentuais de THD de tensão da fase A em cada barra e para cada frequência no caso A.	50
Tabela 10 – Distâncias entre as barras da referência P0.	52
Tabela 11 – Valores percentuais de THD de tensão da fase A em cada barra e para cada frequência no caso B.	53
Tabela 12 – Valores percentuais de THD de tensão da fase A em cada barra e para cada frequência no caso C.	55
Tabela 13 – Valores percentuais de THD de tensão da fase A em cada barra e para cada frequência no caso D.	57
Tabela 14 – Valores percentuais de THD de tensão da fase A em cada barra e para cada frequência no caso E.	59
Tabela 15 – Valores percentuais de THD de tensão da fase A em cada barra e para cada frequência no caso F.	61
Tabela 16 – Valores percentuais de THD de tensão da fase A em cada barra e para cada frequência no caso G.	63
Tabela 17 – Valores percentuais de THD de tensão da fase A em cada barra e para cada frequência no caso H.	65
Tabela 18 – Relação em porcentagem entre o THD do caso H em relação ao caso F, em cada barra e para cada frequência.	67
Tabela 19 – Frequências de chaveamento consideradas para cada GDFV para o caso 1.	69
Tabela 20 – Valores de THD por fase e por barra considerando a inserção das GDFV, caso 1.	70

Tabela 21 – Frequências de chaveamento consideradas para cada GDFV para o caso 2. ....	74
Tabela 22 – Valores de THD por fase e por barra considerando a inserção das GDFV, caso 2. .....	75

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>18</b>
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	18
1.2 OBJETIVOS.....	20
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	20
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>22</b>
<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	<b>22</b>
2.1 ESTADO DA ARTE.....	22
2.2 ORIGENS DAS EMISSÕES SH .....	22
2.3 CARACTERÍSTICAS DOS SINAIS SH .....	23
2.3.1 <i>Sinais de banda estreita</i> .....	23
2.3.2 <i>Sinais de banda larga</i> .....	24
2.3.3 <i>Oscilações recorrentes</i> .....	25
2.4 IMPACTOS DAS DISTORÇÕES SH.....	26
2.5 MEDIÇÕES DE TENSÕES E CORRENTES SH.....	29
2.6 MÉTODOS DE ATENUAÇÃO .....	31
2.7 NORMATIZAÇÃO EXISTENTE.....	32
2.8 MÉTODOS DE MEDIÇÃO.....	33
2.8.1 <i>IEC 61000-4-7</i> .....	33
2.8.2 <i>CISPR 16</i> .....	35
2.8.3 <i>IEC 61000-4-30</i> .....	35
2.9 MODELOS PARA EMISSÃO E PROPAGAÇÃO DE SH .....	36
2.9.1 <i>Emissões primárias e secundárias</i> .....	36
2.9.2 <i>Propagação entre equipamentos</i> .....	39
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>42</b>
<b>MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL</b> .....	<b>42</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO .....	42
3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS CARGAS EMISSORAS DE SH .....	45
3.3 CASOS SIMULADOS.....	46
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>50</b>

<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>50</b>
4.1 CASO A .....	50
4.2 CASO B.....	52
4.3 CASO C.....	55
4.4 CASO D .....	57
4.5 CASO E.....	59
4.6 CASO F .....	61
4.7 CASO G .....	63
4.8 CASO H .....	65
4.9 INSERÇÃO DAS GDFV .....	69
4.9.1 <i>Caso 1</i> .....	69
4.9.2 <i>Caso 2</i> .....	74
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>79</b>
<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>79</b>
5.1 TRABALHOS FUTUROS.....	80
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>81</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O crescimento da geração distribuída foi uma das maiores mudanças na rede elétrica nas últimas décadas. Somando-se a isso, o aumento da frota de veículos elétricos e seus carregadores já começaram a impactar o sistema elétrico mundial e brasileiro. Segundo estudo de 2023, a previsão é que no Brasil esse tipo de automóvel represente 20% de toda a frota nacional até 2040, demandando investimentos na área da infraestrutura de recarga e energia [1].

A recente revolução no setor elétrico só foi possível devido ao desenvolvimento da eletrônica de potência que possibilitou controlar o fluxo de energia elétrica com alta precisão e eficiência. Graças a ela foi possível desenvolver fontes de alimentação chaveadas e inversores de potência, que são a base para as aplicações fotovoltaicas, carregadores de veículos elétricos e outros dispositivos eletrônicos presentes no ambiente residencial e comercial.

Se por um lado tais equipamentos trazem avanços, por outro, eles apresentam características que promovem efeitos indesejados na rede de distribuição de energia, como a piora de sua qualidade através do aparecimento de distorções harmônicas de tensão e corrente. Por muito tempo, o estudo e a medição das distorções de tensão e corrente se baseavam em uma faixa de frequência de até 3 kHz (50<sup>a</sup> ordem harmônica) para os sistemas com frequência fundamental de 60 Hz, visto que, para ordens superiores suas magnitudes eram consideradas irrelevantes. Contudo, com o passar dos anos e o desenvolvimento de fontes de alimentação chaveadas ainda mais eficientes, com custo, tamanho e peso reduzidos, as emissões de altas frequências, podendo chegar à 150 kHz, se tornaram cada vez mais presentes na rede elétrica.

Em 2013, as distorções harmônicas de alta frequência foram designadas como supra-harmônicas (SH) por A. Emanuel e A. McEachern durante a conferência *Power & Energy Society (PES) General Meeting*, do IEEE [2]. O termo foi definido de modo a representar componentes harmônicas cujas frequências estão contidas na faixa entre 2 e 150 kHz.

Assim como a nomenclatura, são recentes os estudos que buscam entender os reais impactos dessas emissões na rede elétrica e em equipamentos adjacentes. Devido a disseminação massiva de equipamentos eletrônicos nos sistemas elétricos, o número de estudos

visando compreender melhor e quantificar as consequências das supra-harmônicas na rede cresceu consideravelmente a partir da última década, conforme mostra a Figura 1.

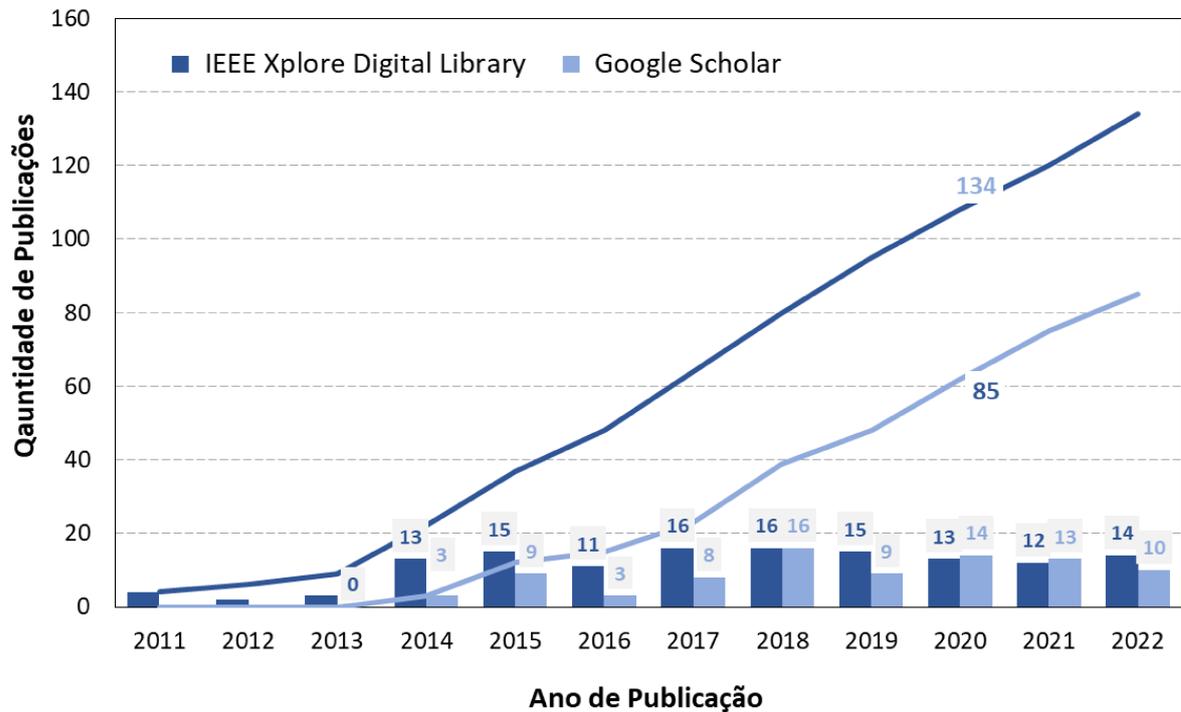


Figura 1 - Publicações sobre supra-harmônicas ao longo da última década.

Dentre os temas mais pesquisados estão as origens e consequências das emissões SH, assim como os métodos de medição e as características da propagação na rede elétrica. Apesar disso, o número de publicações relacionadas ao tema ainda é pequeno se comparado com outros temas da qualidade da energia elétrica.

Diante do exposto, o presente trabalho visa contribuir com a temática da propagação de correntes supra-harmônicas a partir da modelagem e simulação de uma rede elétrica de baixa tensão. As simulações foram feitas usando o *software* MATLAB *Simulink*® para modelagem de um circuito secundário de distribuição, cujos dados foram disponibilizados por uma distribuidora de energia elétrica nacional. As fontes de emissão de supra-harmônicas foram modeladas como fontes de corrente em alta frequência com filtros EMC devidamente projetados para esse propósito. Na simulação, o comportamento foi analisado alocando as fontes de SH em diferentes barras (postes) da rede de baixa tensão. Adicionalmente, de acordo com os dados da distribuidora, foram inseridos seis sistemas de geração distribuída fotovoltaica (GDFV) conectados em consumidores específicos, os quais representam as fontes emissoras de correntes supra-harmônicas.

A relevância do trabalho se baseia no fato de que se a questão da propagação das supra-harmônicas for mais bem compreendida, será possível diagnosticar, prevenir e atenuar eventuais distúrbios causados por elas. Conseqüentemente, será possível quantificar os impactos associados e evitar eventual subestimação ou superestimação do problema, além de substanciar futuras discussões sobre a necessidade de se estabelecer parâmetros regulatórios a fim de impor limites de emissão para o fenômeno, seja de forma individual ou coletiva.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa é analisar a propagação de harmônicas de alta frequência através de um sistema real de distribuição de energia elétrica em baixa tensão. O enfoque é analisar como as injeções de correntes supra-harmônicas se refletem na tensão e como elas se propagam entre diferentes pontos de um sistema secundário de distribuição.

Para isso, modelou-se no *Simulink* um circuito secundário de distribuição de uma determinada distribuidora de energia elétrica brasileira. Num primeiro momento foi simulada a injeção de fontes de corrente emissoras de supra-harmônicas localizadas em diferentes barras do sistema. Posteriormente, as fontes de SH foram consideradas como sendo os seis pontos de geração distribuída fotovoltaica com (GDFV), que seriam conectados ao sistema.

Para simular a propagação das altas frequências com um modelo mais próximo do real considerou-se a interação entre os efeitos capacitivos dos cabos e equipamentos, logo adotou-se segmentos de rede de seção PI e filtros EMC para as fontes emissoras das harmônicas de alta frequência.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Além das considerações iniciais aqui apresentadas, esse trabalho foi estruturado em outros quatro capítulos, conforme estrutura apresentada a seguir:

### **CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

Aborda os fundamentos teóricos que contribuem para o desenvolvimento da dissertação. Inicialmente, foram apresentadas as definições e conceitos relevantes ao tema das supra-harmônicas. Dentre os tópicos abordados, estão as origens, as características e os impactos das

emissões de harmônicas de alta frequência na rede. Além disso, são apresentados os métodos e dificuldades relativas as medições do fenômeno e os métodos de atenuação propostos, assim como as normas existentes e quais faixas harmônicas elas abrangem. Por último, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre pesquisas relacionadas à propagação de supra-harmônicas na rede elétrica. Também foram definidos os conceitos de emissão primária e secundária, além do desenvolvimento de um modelo matemáticos simplificado que visa descrever o comportamento da propagação das emissões SH na rede elétrica.

### **CAPÍTULO 3 - MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

O terceiro capítulo descreve a metodologia utilizada nas simulações realizadas. Foi apresentada a caracterização do sistema elétrico utilizado, assim como a modelagem do filtro LCL presente entre a rede a fonte emissora de supra-harmônicas. Por último, são descritos os casos simulados.

### **CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Esse capítulo apresenta os resultados da simulação computacional realizada, analisando o comportamento da propagação das correntes de alta frequência ao longo do circuito nos casos simulados. Analisa como as correntes supra-harmônicas se refletem na tensão em função da localização e da frequência de emissão.

### **CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES**

Apresenta as conclusões obtidas através dos resultados e discussões, indicando quais foram as contribuições dessa dissertação, assim como a proposição de trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 2.1 ESTADO DA ARTE

Apesar do termo supra-harmônica ter sido cunhado recentemente [2], o tema da distorção de tensão e corrente em altas frequências têm sido alvo de pesquisas há várias décadas. No ano de 1984, ruídos conduzidos foram medidos na faixa de frequência de 5-100 kHz em cargas domésticas, como moduladores de intensidade de luz (*dimmers*), receptores de televisão, fontes de alimentação e motores universais.

Apesar disso, o objetivo e preocupação dessas pesquisas se limitavam aos projetos de sistemas de comunicação e questões de compatibilidade eletromagnética (EMC - *Electromagnetic Compatibility*) [3].

Com o passar do tempo, o tema ganhou mais destaque pelo fato das distorções harmônicas de tensão e corrente começarem a aumentar e impactar circuitos secundários de distribuição e outros equipamentos conectados a eles.

#### 2.2 ORIGENS DAS EMISSÕES SH

Os dois principais grupos de equipamentos emissores de supra-harmônicas são os dispositivos que se utilizam da comunicação via rede elétrica PLC (*Power Line Communication*) e equipamentos eletrônicos que realizam chaveamento ativo ou passivo [4].

O primeiro grupo faz parte da infraestrutura de medição inteligente da rede, transportando dados em alta frequência e são considerados os principais responsáveis por essas emissões, também conhecidas como emissões "intencionais". Apesar disso, a presença de equipamentos de comunicação PLC acontece na rede por um período limitado e com uma regulamentação já bem estruturada [5].

O segundo grupo pertence aos equipamentos eletrônicos que realizam chaveamento e são denominados emissores "não intencionais". A presença deles na rede se intensificou a partir da evolução da eletrônica de potência que permitiu avanços na tecnologia de comutação criando as chamadas fontes SMPS (*Switched-Mode Power Supply*) que operam em frequências de chaveamento na ordem de kHz. Com o passar dos anos, essas fontes estão substituindo as fontes

de alimentação convencionais por serem mais compactas, leves e eficientes. Existe uma ampla variedade de dispositivos eletrônicos que utilizam as fontes chaveadas SMPS, tais como: computadores, televisores, monitores, carregadores de dispositivos portáteis, inversores fotovoltaicos e carregadores de veículos elétricos [6].

Outro fator que contribuiu para o aumento da emissão supra-harmônica é o uso difundido de circuitos APFC (*Automatic Power Factor Correction*) em cargas eletrônicas. O objetivo desses circuitos é melhorar o fator de potência de um sistema elétrico e, adicionalmente, possuem como vantagem a redução dos níveis de harmônicas de baixa frequência (abaixo de 2 kHz). Por consequência, esses dispositivos contribuíram com a elevação dos níveis de harmônicas de alta frequência na rede elétrica [7]. Alguns exemplos comuns de cargas que podem se beneficiar do uso de um circuito APFC incluem motores elétricos, equipamentos de iluminação, de ar-condicionado e sistemas de aquecimento [6].

As fontes emissoras “não intencionais” são responsáveis por uma menor parcela de emissão supra-harmônica. Entretanto, a presença dessas fontes acontece por um período prolongado e sem regulação estruturada para a conexão à rede elétrica [5].

## 2.3 CARACTERÍSTICAS DOS SINAIS SH

As características das emissões supra-harmônicas são diferentes das harmônicas de baixa frequência. Enquanto essas últimas possuem um espectro discreto, o espectro de frequência para supra-harmônicas é usualmente contínuo [6]. Pesquisas e experimentos identificaram três padrões diferentes de emissão de componentes de alta frequência: banda estreita, banda larga e oscilações recorrentes [7].

### 2.3.1 Sinais de banda estreita

Os sinais de banda estreita são normalmente emitidos por equipamentos que utilizam de comunicação via rede elétrica (PLC). Eles utilizam a faixa de frequência de 3 kHz a 500 kHz para comunicação de longo alcance. São aplicados tanto em sistemas de medição inteligente como em monitoramento da qualidade de energia [8]. São considerados os principais responsáveis pela geração de emissões intencionais de SH, mas não são os únicos, existem também certos tipos de cargas eletrônicas que podem gerar emissões de banda estreita [9]. Um sinal de banda estreita aparece na forma de frequências individuais, conforme a Figura 2.

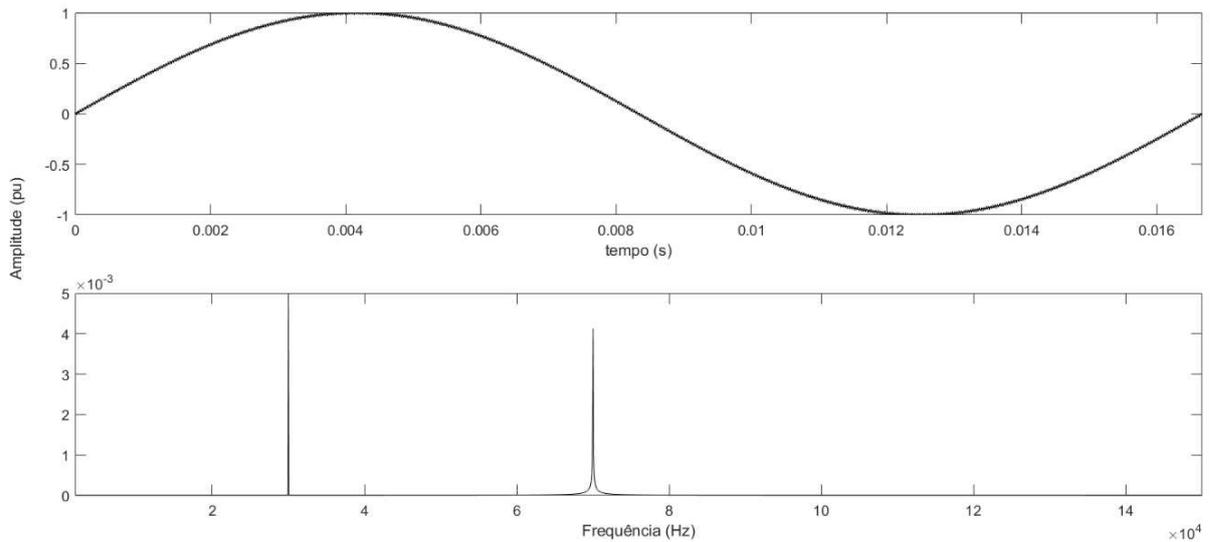


Figura 2 - Exemplo de um sinal de 60 Hz a 1pu com dois sinais sobrepostos a 30 kHz e 70 kHz, no domínio do tempo (superior) e o espectro resultante (inferior).

### 2.3.2 Sinais de banda larga

A comunicação PLC em banda larga opera dentro de uma faixa de alcance mais curta, mas em uma faixa de frequência acima das supra-harmônicas (1,8 - 250 MHz) [8]. Dessa forma, a maioria dos sinais de banda larga observados na rede são provenientes de fontes de alimentação e equipamentos que possuem reatores de alta frequência com correção ativa do fator de potência (APFC) [9]. Os sinais de banda larga aparecem na forma de frequências que abrangem uma determinada faixa como ilustra a Figura 3.

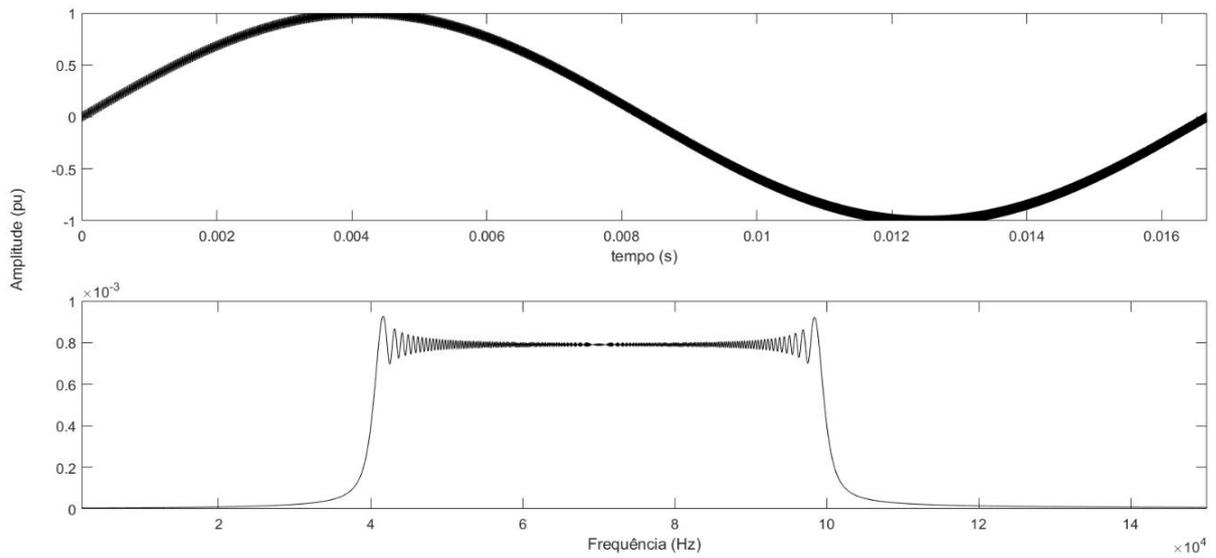


Figura 3 - Exemplo de um sinal de banda larga sobreposto a uma componente fundamental de 60 Hz. No domínio do tempo (superior) e no domínio da frequência (inferior).

### 2.3.3 Oscilações recorrentes

As oscilações recorrentes, também conhecidas como distorção de cruzamento por zero (*zero crossing distortion*) acontecem tipicamente a cada meio ciclo da fundamental, 8,33 ms para sistemas cuja frequência é 60 Hz. Acontecem devido às limitações dos conversores eletrônicos de potência em torno do cruzamento por zero [9]. A Figura 4 ilustra oscilações recorrentes em um sinal sintetizado.

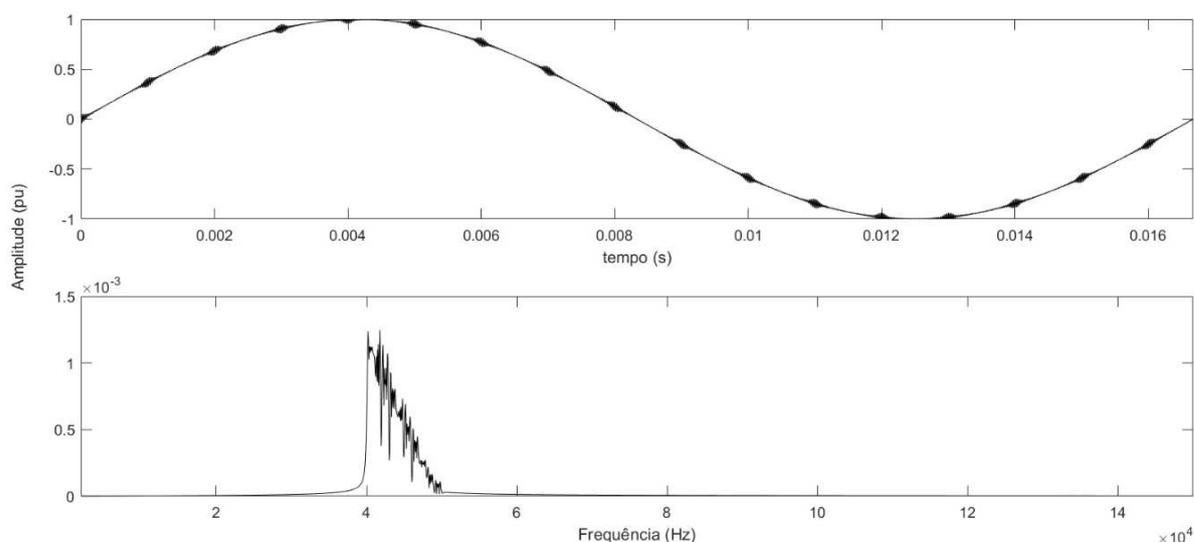


Figura 4 - Sinal sintetizado mostrando oscilações recorrentes. No domínio do tempo (superior) e no domínio da frequência (inferior).

## 2.4 IMPACTOS DAS DISTORÇÕES SH

A crescente utilização de equipamentos emissores de SH em circuitos secundários de distribuição resultou em uma maior preocupação sobre o potencial impacto na qualidade de energia de tais componentes espectrais [10]. Conhecer os reais impactos dessas distorções na rede elétrica e nos equipamentos vizinhos é um dos aspectos mais relevantes no estudo das supra-harmônicas.

No que diz respeito às interferências entre dispositivos com emissão intencional e não intencional, quatro tipos gerais são especificados a seguir (A-D) e são ilustrados na Figura 5.

- A - Interferência entre dispositivos com PLC;
- B - Interferência de dispositivos sem comunicação PLC por dispositivos com PLC;
- C - Interferência de dispositivos com comunicação PLC por dispositivos sem PLC;
- D- Interferência entre dispositivos sem PLC .

Os efeitos mais comuns provenientes dessas interferências estão resumidos na Tabela 1.

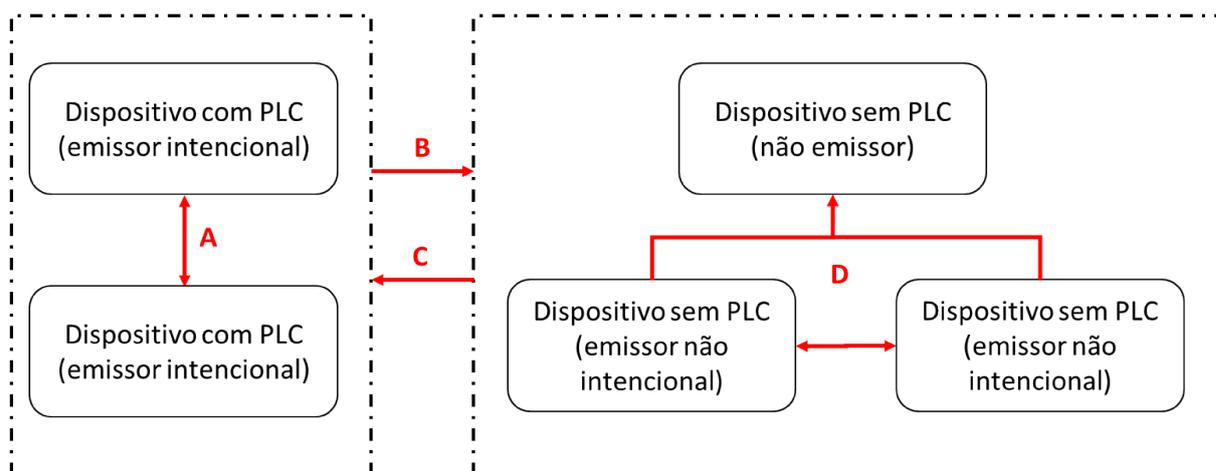


Figura 5 - Principais tipos de interferência entre equipamentos na faixa de frequência de 2 kHz a 150 kHz [11].

Tabela 1 – Efeitos dependendo do tipo de interferência [11].

Efeitos	Tipo de interferência		
	B	C	D
Aquecimento	X		X
Ruído audível			X
Mau funcionamento do equipamento	X		X
Mau funcionamento do PLC		X	

A interação do tipo A não foi considerada, pois geralmente apenas um tipo de sistema de comunicação principal é usado dentro de uma rede BT. Ademais, esse sistema é constituído de um conjunto de emissores e receptores que são intencionalmente desenvolvidos para funcionarem juntos, logo, não é esperado uma perturbação indesejada entre eles.

Na literatura é possível encontrar trabalhos que relatam situações adversas cujas causas sejam relacionadas as emissões de harmônicas de alta frequência. Em relação ao mau funcionamento de equipamentos, foi relatado o mau funcionamento de uma copiadora durante a operação de uma máquina operatriz individual em um sistema BT de uma planta industrial. Neste mesmo trabalho mostrou-se a falha de varistores devido a ativação repetitiva por oscilações recorrentes de tensão [12].

Em [13] foi relatado uma tensão de 3V na frequência de 8 kHz devido a uma máquina fresadora comissionada sem filtro EMC. Essa tensão de alta frequência resultou no mau funcionamento do controle da própria máquina e em uma série de reclamações de consumidores referentes ao mau funcionamento de eletrodomésticos vizinhos. Foi demonstrado em [14] que distorções de altas frequências na tensão podem afetar a modulação da luz e a saída de luz média de lâmpadas LED.

Investigou-se a influência de correntes de alta frequência oriundas de sistemas fotovoltaicos nos medidores de energia inteligentes que usam bobinas de *Rogowski*. Os resultados mostraram que a corrente de alta frequência pode fazer com que o sinal de saída da bobina ultrapasse a faixa dinâmica dos medidores inteligentes levando a registros incorretos do consumo de energia do consumidor [15]. Da mesma forma, a precisão dos medidores eletrônicos de eletricidade pode ser afetada na presença de distorções SH e indicar leituras incorretas [16].

Sobre a interferência na comunicação PLC, os principais fatores que perturbam essa comunicação são os níveis de ruído ao longo das linhas (gerado por cargas conectadas à rede) e a atenuação do sinal de comunicação devido a caminhos de baixa impedância de cargas específicas ou a própria atenuação da linha [17]. Medições feitas em laboratório e em campo mostraram que a atenuação devido ao capacitor *shunt* presente em cargas equipadas com filtro EMC pode gerar falha de comunicação e danificar outros equipamentos conectados à rede devido a altas emissões de correntes SH [18].

Em relação à redução da vida útil de dispositivos eletrônicos, demonstrou que as tensões de alta frequência podem ter um impacto significativo no estresse térmico dos equipamentos que contêm retificadores com capacitores eletrolíticos no barramento CC. Além do aquecimento adicional, foi observado ruído audível que ocorreu em níveis de tensão SH de cerca de 1% para muitos dos equipamentos analisados [13]. Também foi relatado que uma distorção de tensão em torno de 12 kHz causada devido ao acionamento do conversor de uma bomba gerou ruídos audíveis em vários dispositivos eletrônicos como monitores de computador [12].

Alguns trabalhos mostraram que é possível dois dispositivos conectados a uma distância eletricamente próxima formar uma ressonância entre eles em uma frequência supra-harmônica frequentemente usada para comutação de inversores fotovoltaicos [13]. O comprimento do fio e o valor de indutância influenciam no ponto de ressonância. Por isso, é fundamental realizar uma análise prévia para esse fenômeno quando um conversor com um cabo é conectado em um sistema de energia [19].

Outro efeito adverso proveniente das emissões supra-harmônicas inclui o superaquecimento de capacitores encontrados nos filtros LC da rede elétrica. Tal efeito se dá devido a diminuição da impedância do capacitor com o aumento da frequência e consequente elevação da corrente que flui através dele. Esta alta corrente na rede elétrica pode destruir os capacitores e levar a atuação de interruptores de circuito por falha de aterramento (GFCI - *Ground Fault Circuit Interrupter*), além de outros problemas de segurança na rede elétrica [20].

Um estudo de caso [21] mostrou que supra-harmônicas oriundas de uma usina solar fotovoltaica causaram interferência telefônica para clientes localizados em suas adjacências. O estudo também alertou sobre a necessidade de uma revisão nas práticas de aterramento considerando dispositivos que emitem supra-harmônicas.

## 2.5 MEDIÇÕES DE TENSÕES E CORRENTES SH

Medir com precisão as perturbações de frequência entre 2 -150 kHz na rede elétrica não é uma tarefa trivial. O que dificulta a medição é o fato de que geralmente as amplitudes SH são muito pequenas em relação a componente fundamental e conseqüentemente demanda instrumentos de medição mais robustos [22].

Um dos parâmetros a ser considerado em um medidor para adquirir sinais de alta frequência é a resolução em amplitude. Tal parâmetro diz respeito ao limite de número de níveis de saída discretos que tem o conversor analógico-digital (ADC) presente no circuito do medidor. A função do ADC é traduzir um sinal analógico que pode assumir um número infinito de valores, geralmente de tensão ou corrente obtido através de uma ponta de prova, em uma série de níveis finitos e discretos [23]. Um equipamento que permite a medição e visualização de sinais elétricos são os osciloscópios. A Figura 6 mostra um diagrama em bloco básico de um osciloscópio digital.

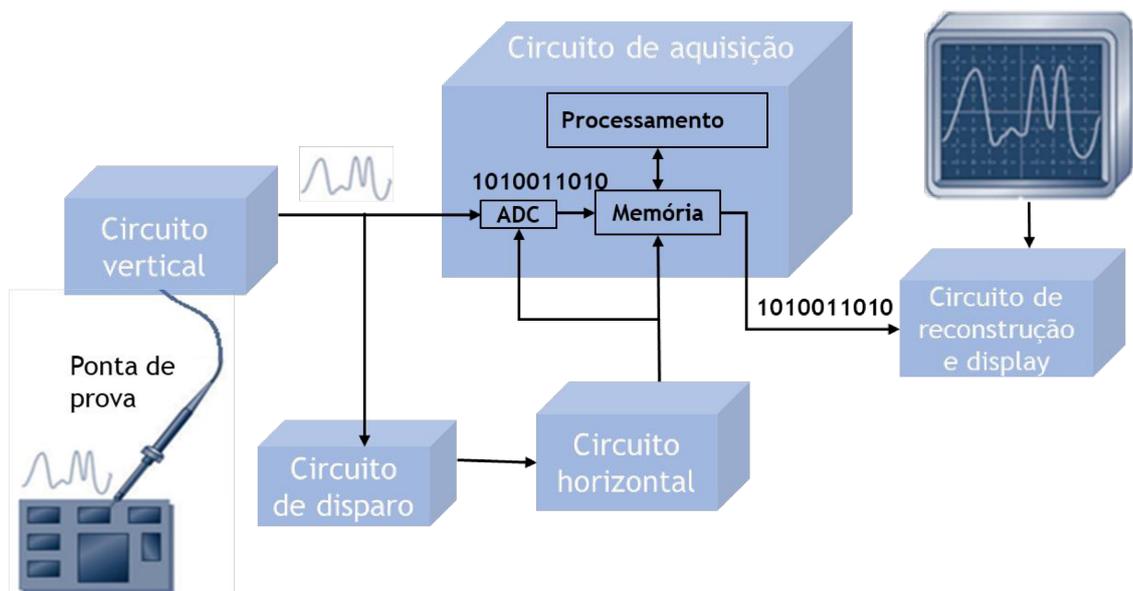


Figura 6 - Diagrama em bloco de um osciloscópio digital [23].

O número de valores discretos que podem existir na saída do ADC é determinado pela sua resolução de bits. Experimentos e simulações mostraram que, com dados amostrados, a

amplitude mais baixa que pode ser detectada pela Transformada Rápida de Fourier (FFT) é a faixa de entrada do ADC dividida por seu número de níveis distintos [22]. Este limite pode ser calculado conforme (1).

$$A_{min} = \frac{C}{2^n} \quad (1)$$

Onde  $A_{min}$  é a amplitude mínima,  $C$  é a faixa de entrada do conversor e  $n$  é a resolução de bits do ADC.

Supondo um sinal de tensão de  $359,21 V_{PP}$  ( $127 V_{RMS}$ ) que pode ser medido por um ADC de 8 bits, qualquer sinal menor de que  $1,40 V_{PP}$  não será medido corretamente. A precisão da medição não pode ser garantida quando a amplitude do sinal for menor que o mínimo teórico [22]. Por exemplo, para se medir um sinal de  $79,76 mV_{PP}$  ( $28,2 mV_{RMS}$ ), que equivale a  $89 dB \mu V$  igual ao nível de compatibilidade para emissões não intencionais da IEC 61000-2-2 a uma frequência de 150 kHz, com uma faixa de entrada de  $359 V_{PP}$  seria necessário um ADC de no mínimo 12 bits.

A resolução limita a precisão de uma medição, e logo, quanto maior a resolução (número de bits), mais precisa será a medição. A Figura 7 ilustra a diferença na medição para um instrumento de 16 bits em relação a um de 3 bits de resolução.

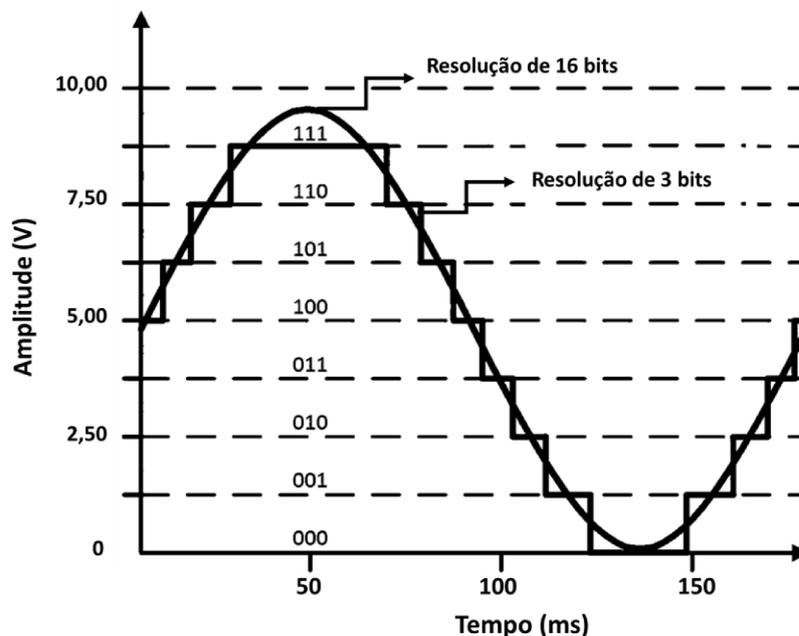


Figura 7 - Diferença na medição para um instrumento de 16 bits em relação a um de 3 bits de resolução.

Além do critério de resolução de bits, a taxa de amostragem é outro parâmetro importante. Essa taxa é a frequência na qual o ADC converte a forma de onda da entrada

analógica em dados digitais [24]. A frequência de amostragem do equipamento de medição deve obedecer ao Teorema de Nyquist que mostra que a frequência de amostragem do equipamento deve ser maior que o dobro da componente de maior frequência do sinal a ser medido. Caso contrário ocorrerá distorções na medição conhecidas como *aliasing*.

Na prática, recomenda-se que o valor da taxa de amostragem seja pelo menos 5 vezes superior à maior componente de frequência do sinal em análise. Dessa forma, é possível garantir que o sinal possa ser capturado com mínimo erro de amplitude [24]. No caso das SH a frequência de amostragem deve ser no mínimo 750 kHz.

O desafio de medição das SH pode ser resolvido com a escolha de um instrumento de medição apropriado, que tenha frequência de amostragem e resolução de bits adequadas. Contudo, equipamentos com esse grau de precisão tem custos muito elevados. Uma maneira de contornar o problema da alta resolução de bits de um equipamento é atenuar a componente fundamental através de uma filtragem do sinal antes que a medição ocorra.

## 2.6 MÉTODOS DE ATENUAÇÃO

Ao contrário das harmônicas de baixa frequência, a atenuação de harmônicas de alta frequência não pode ser alcançada facilmente com filtros passivos na rede [25]. Os métodos de atenuação encontrados na literatura consistem na mudança de projetos das próprias fontes causadoras do problema, conversores e corretores de fator de potência ativo (APFC).

Em [26] os autores abordam o uso de topologias intercaladas de circuitos APFC com diferentes frequências de comutação e um circuito APFC intercalado com frequência de comutação variável. Os resultados das medições em laboratório mostraram que ambas as abordagens são adequadas para uma redução efetiva de emissão na faixa de frequência de 2 kHz a 150 kHz.

Uma abordagem que pode reduzir substancialmente as emissões SH de conversores PE é o uso de conversores multinível proposto em [27]. Uma abordagem diferente propõe para os conversores PE que usam técnicas PWM o uso de técnicas de modulação de espectro espalhado que consiste na modulação do sinal lentamente entre dois limites de frequência, geralmente  $\pm 10\%$  da frequência fundamental de chaveamento [28]. A intenção desta abordagem é a redução da energia de pico distribuindo a energia que está originalmente concentrada na frequência de chaveamento e seus múltiplos por uma banda mais ampla. Dentre as técnicas de modulação de espectro espalhado, a mais conhecida é a modulação por largura de pulso

aleatório (RPWM), que possui como principais vantagens a redução das SH do equipamento a um baixo custo computacional, evitando a necessidade de filtragem de alta frequência [29] [30].

## 2.7 NORMATIZAÇÃO EXISTENTE

Os limites de emissões individuais dos equipamentos e da distorção presente em determinados pontos da rede para harmônicas de baixa frequência já são bem estabelecidos e definidos por normas nacionais e internacionais. Nacionalmente o tema é tratado no Módulo 8 do PRODIST que define limites de emissão até a 40ª ordem. Já as normas internacionais que estabelecem limites de distorção harmônica na rede é a IEC 61000-3-2 e a IEEE 519. Enquanto a primeira estabelece limites para cada equipamento, a segunda estabelece limites no ponto de acoplamento comum (PAC) [31].

Para frequências acima de 150 kHz, que engloba as frequências empregadas nos sistemas de comunicação, também existem normatizações vigentes EN 55014-1, CISPR 11 14 22.

No que se refere a faixa de frequência das SH, há mais de duas décadas existem recomendações e normas para emissões intencionais voltadas a equipamentos que transmitem informação via PLC [EN 50065, EN 50160] e para emissores não intencionais voltadas a equipamentos de iluminação [EN 55015] e fogões de indução [EN 55011].

Contudo, somente em 2017 e 2018, por meio de duas emendas, a norma IEC 61000-2-2 estabeleceu pela primeira vez um nível de referência com limites para emissões não intencionais na faixa de frequência de 2 a 150 kHz. Neste documento, são considerados distúrbios de tensão de modo diferencial em redes públicas de baixa tensão, isto é, distúrbios entre qualquer condutor de fase e o condutor neutro medidos com um detector de quase pico e com uma largura de banda de 200 Hz conforme recomendações da CISPR 16-1-1. As medições também são consideradas em relação aos efeitos de longo prazo cuja duração seja igual ou superior a 10 minutos.

O nível de distorção de tensão na largura de banda de 200 Hz é calculado conforme (2):

$$u_{b,F} = \frac{100}{U_1} \sqrt{\sum_{n=1-\left(\frac{100}{\Delta f}\right)}^{100/\Delta f} U^2(F + n\Delta f)} \quad (2)$$

$u_{b,F}$  = é o nível de distorção de tensão na largura de banda de 200 Hz em torno da frequência central F.

$F$  = é a frequência central da banda de 200 Hz em consideração

$U_1$  = o valor eficaz da componente de tensão fundamental

$U^2(F + n\Delta f)$  = o valor eficaz da componente de tensão na frequência  $F + n\Delta f$

$\Delta f$  = resolução em frequência

Os níveis de compatibilidade para distorção de tensão recomendados segundo essa norma são dados na Tabela 2.

Tabela 2 - Níveis de compatibilidade para distorção de tensão de 2,4 kHz a 150 kHz

<b>Faixa de frequência (kHz)</b>	<b>Nível de compatibilidade (%)</b>
2 (2,4*) a 3	1,4
3 a 9	1,4 a 0,65
	<b>dB(<math>\mu</math>V)</b>
9 a 30	129,5 a 122
30 a 50	122 a 119
50 a 150	113 a 89

\*para sistemas de 60 Hz.

Destaca-se que na frequência de transição, aplica-se o nível inferior. E que o logaritmo do nível diminui linearmente com o logaritmo da frequência nas faixas de frequência: 3 kHz a 9 kHz, de 9 kHz a 30 kHz, de 30 kHz a 50 kHz e 50 kHz a 150 kHz.

## 2.8 MÉTODOS DE MEDIÇÃO

Os métodos de medição recomendados para a faixa de frequência das SH constam no anexo B da norma IEC 61000-4-7 [32] e no anexo C da norma IEC 61000-4-30 [33]. O primeiro abrange as faixas de frequência de 2 a 9 kHz e o segundo de 9 a 150 kHz. Além disso, a norma CISPR-16 contém informações referentes aos equipamentos, medições e métodos de imunidade para frequências acima de 9 kHz.

### 2.8.1 IEC 61000-4-7

Destina-se a medição espectral de componentes em sinais (correntes ou tensões) com frequências a partir da 40ª harmônica até 9 kHz sobrepostos em uma rede de 50 Hz ou 60 Hz.

Contudo, alguns trabalhos estenderam essa metodologia e a aplicaram na medição de distúrbios com componentes até 150 kHz [13] [34]. Devido as pequenas magnitudes dos sinais a serem medidos, a norma também sugere a utilização de um filtro passa-banda para atenuar a componente de frequência fundamental em mais de 55 dB assim como as frequências acima de 9 kHz. Caso contrário, faz-se necessário a utilização de um instrumento de medição com resolução de bits adequada [6].

A metodologia recomenda que as medições sejam feitas por um equipamento que permita a aquisição do sinal em uma frequência de amostragem adequada seguindo o critério de Nyquist assim como a utilização de sensores de tensão e corrente apropriados. Sugere-se a utilização de uma janela retangular de aquisição de dados de 200 ms, correspondendo aproximadamente a 12 períodos fundamentais de um sistema de 60 Hz, resultando em uma resolução de 5 Hz no espectro de saída.

Para a análise dos dados, a norma sugere o uso de um método de transformada discreta de Fourier (DFT) tal como a FFT. Sugere-se que as frequências sejam agrupadas em bandas de 200 Hz, começando na primeira banda central acima da faixa harmônica, conforme ilustra a Figura 8.

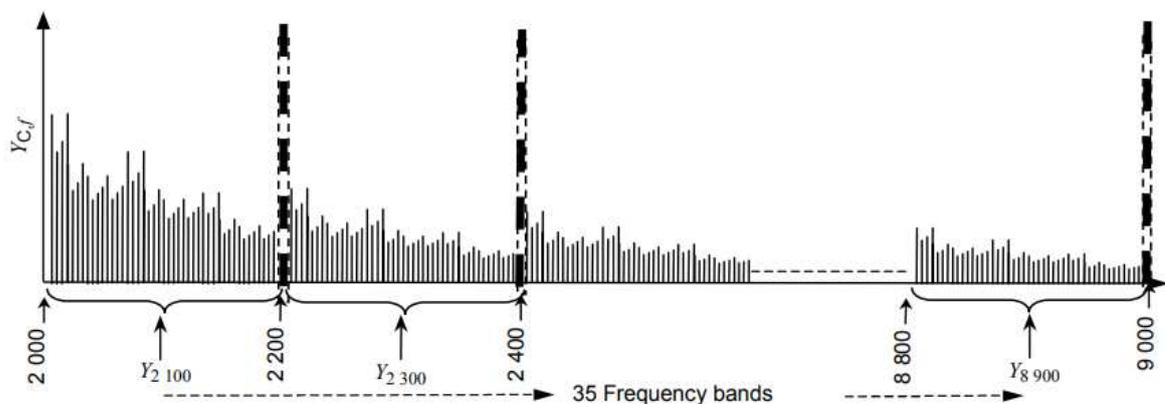


Figura 8 - Bandas de frequência para medição na faixa acima de 2 kHz até 9 kHz [32].

A frequência central do primeiro grupo deve ser 2,1 kHz para sistemas de 50 Hz e 2,5 kHz para sistemas de 60 Hz. A saída  $Y_{B,b}$  é a somatória do valor eficaz de cada banda de frequência acordo com (3).

$$Y_{B,b} = \sqrt{\sum_{b-95 \text{ Hz}}^{b+100 \text{ Hz}} Y_{C,f}^2} \quad (3)$$

### 2.8.2 CISPR 16

A norma abrange técnicas de medição para frequências acima de 9 kHz até 18 GHz. O espectro de frequência é dividido em diferentes faixas, de A - D, entre as quais a faixa A compreende a faixa de frequência que engloba as supra-harmônicas, 9 a 150 kHz. A norma aborda as especificações dos equipamentos de medição assim como à descrição das metodologias de medição.

As metodologias são baseadas em analisadores de espectro, filtros e detectores de pico. Nesse método o sinal deve ser previamente varrido no domínio da frequência. Para esse processamento inicial, duas abordagens diferentes são propostas por esse padrão, uma corresponde ao uso de um analisador de varredura (*Heterodyne*) e outra sugere o uso da Transformada de Fourier de tempo curto (STFT - *Short-Time Fourier Transform*) atuando como um banco de filtros. Análises de níveis de distorções do sinal são realizadas através dos detectores de pico, quase-pico ou detector de valor médio. Esse método é considerado oneroso e complexo de ser aplicado em campo [35].

### 2.8.3 IEC 61000-4-30

A IEC 61000-4-30 aborda técnicas de teste e medição no que tange a qualidade de energia. Em seu anexo C ela aborda três técnicas de medição para a faixa de 9 a 150 kHz, sendo a primeira e a segunda já existentes. A primeira consiste em empregar o método usado na CISPR 16 e a segunda consiste em estender o método apresentado IEC 61000-4-7 até 150 kHz.

A terceira propõe uma metodologia que envolve a realização de 32 medições igualmente espaçadas com base em um intervalo de 10 ciclos (para um sistema de 50 Hz) consistindo em 512 amostras coletadas a uma taxa de amostragem de 1024 MHz. Conseqüentemente, a análise baseada em DFT ou equivalente produz resultados com resolução de 2 kHz. Contudo, essa metodologia é desaconselhada para medições precisas, pois não cobre o sinal em todo o domínio temporal, mas somente 8% do tempo total de medição do sinal [36].

Recomenda-se o uso de um filtro passa alta em cascata com um filtro passa baixa. Para o filtro passa alta sugere uma atenuação de 3 dB a 1,5 kHz ou superior e o filtro passa baixa atenuando 200 kHz a 3 dB. A faixa de medição após os filtros deve ser de pelo menos  $\pm 50$  V instantâneo, com uma resolução de 12 bits ou mais.

Este método, apesar de ser menos completo e preciso que os outros, pode ser mais barato de implementar e apropriado para aplicações de qualidade de energia que não necessitem de uma grande quantidade de dados. Além disso, não é apropriado medir sinais modulados em amplitude que variam com um período inferior a duas vezes o intervalo entre as medições, pois devido a resolução de 2 kHz pode ser difícil diferenciar fenômenos dentro do mesmo segmento de frequência.

Para aplicações onde são necessárias medições altamente detalhadas, como testes de tipo para medições de emissões ou medições de conformidade, é preferível a utilização dos métodos de medição descritos em 2.8.1 e 2.8.2.

## 2.9 MODELOS PARA EMISSÃO E PROPAGAÇÃO DE SH

Neste tópico é apresentada uma revisão bibliográfica sobre pesquisas relacionadas à propagação de supra-harmônicas na rede elétrica. São apresentados também os conceitos de emissão primária e secundária, além do desenvolvimento de um modelo matemático simplificado que visa descrever o comportamento da propagação das emissões SH na rede elétrica.

### 2.9.1 *Emissões primárias e secundárias*

A propagação das supra-harmônicas na rede se diferencia das harmônicas de baixa frequência devido à variação de impedância em frequências mais altas entre a rede e os equipamentos e à falta de sincronia entre diferentes fontes de corrente harmônica de alta frequência [37].

Enquanto as componentes de harmônicas de 0 a 2 kHz se propagam em direção à rede somando-se vetorialmente nos terminais do ponto de acoplamento comum (PAC), estudos mostram que as componentes SH tendem a se propagar principalmente entre dispositivos individuais, devido ao caminho de menor impedância do equipamento se comparado à rede [7].

Contudo, um comportamento contrário também é possível a depender da frequência em análise e as supra-harmônicas na rede podem aumentar à medida que um maior número de dispositivos é conectado. Fatores como as múltiplas ressonâncias harmônicas, a razão entre as impedâncias dos dispositivos e a impedância da fonte são preponderantes para determinar como as SH irão se propagar [38].

A redução de emissões no PAC com o aumento do número de dispositivos conectados implica numa maior influência das propriedades de dispositivos individuais. Assim sendo, os padrões de emissão podem variar bastante de cada equipamento individualmente e depende da configuração desses diferentes equipamentos conectados juntos. Por tais motivos os níveis de distorções de supra-harmônicas são de difíceis previsões [39].

O tipo de emissão também interfere nas características de propagação. As emissões causadas por resíduos do circuito de comutação, tipicamente acima de algumas dezenas de kHz, tendem a se propagar entre dispositivos individuais. A amplitude da emissão de uma instalação que chega à rede será baixa na maioria dos casos. Já o oposto ocorre para emissões do tipo oscilação recorrente. Ainda não se sabe se a disparidade na propagação se deve à diferença de frequência ou à diferença no mecanismo de emissão [40].

Um modelo elétrico em escala real foi construído num laboratório da Suécia para simular um circuito residencial com equipamentos emissores de supra-harmônicas como eletrodomésticos de cozinha, uma bomba de calor, uma televisão e dispositivos de iluminação. As medições foram realizadas para examinar como a interação entre as cargas em conjunto e individualmente afetavam o nível de impedância para a faixa de frequência de 9 a 95 kHz. Foi mostrado que o nível de impedância para a própria rede é alto e diminui quando uma carga emissora de SH é conectada. Os resultados desse estudo indicaram que as correntes em altas frequências se propagavam entre as cargas em um grau muito maior do que entre a carga e o transformador [41].

Os trabalhos que analisaram a propagação de emissões supra-harmônicas em redes elétricas consideraram três diferentes aspectos que incluíam as emissões primárias e secundárias, a interação entre os dispositivos e o efeito de ressonâncias [42].

As emissões classificadas em primárias foram definidas como as parcelas da corrente que se originam da própria estrutura interna do equipamento emissor em análise. As emissões secundárias são parcelas da corrente do equipamento analisado que se originam devido à estrutura interna de outras cargas conectadas à rede ou devido a própria rede elétrica, também conhecida como distorção de fundo ou “*background*” [43].

A topologia do equipamento, a impedância no ponto de conexão e a presença de ressonâncias são os fatores que influenciam na emissão primária. Já a emissão secundária é afetada pela emissão de equipamentos vizinhos e a impedância no terminal do equipamento em relação à impedância da rede e da instalação. A Figura 9 mostra um esquema simplificado das emissões primárias e secundária.



Figura 9 - Esquema para a propagação de emissões primárias e secundárias em uma rede elétrica.

Um modelo simplificado de um dispositivo equipado com circuito APFC conectado à rede é apresentado na Figura 10.

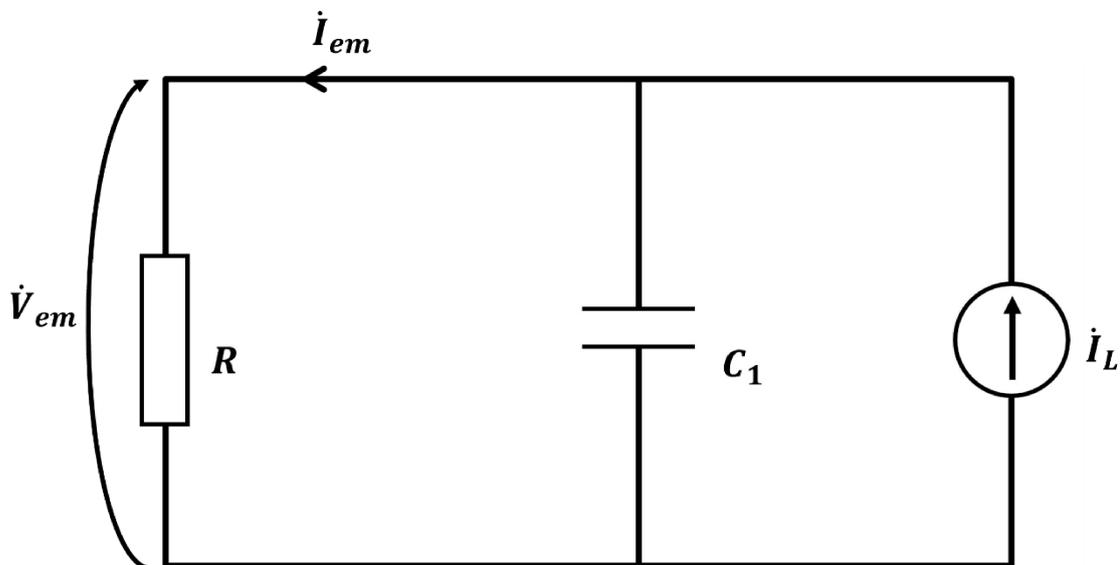


Figura 10 - Modelo simplificado para a análise de supra-harmônicas com um dispositivo conectado à rede.

Nesse modelo o dispositivo é considerado como uma fonte de corrente com emissão interna  $I_{L1}$ . A rede de baixa tensão é modelada como uma resistência  $R$  por ter característica resistiva dominante, principalmente próxima aos equipamentos. Para frequências mais altas,  $R$  seria igual à impedância da onda. O capacitor  $C_1$  representa a maneira pela qual a impedância e a tensão da rede afetam a emissão [43].

A emissão do dispositivo, a corrente e a tensão que fluem na interface entre o dispositivo e a rede, podem ser calculadas pelas equações (4) e (5).

$$\dot{i}_{em} = \frac{1}{1 + j\omega RC_1} \dot{i}_{L1} \quad (4)$$

$$\dot{V}_{em} = \frac{R}{1 + j\omega RC_1} \dot{I}_{L1} \quad (5)$$

De  $\dot{I}_{em}$  segue-se que a emissão real do dispositivo depende da impedância  $R$  da rede e do tamanho do capacitor  $C_1$  do filtro no lado da rede.

### 2.9.2 Propagação entre equipamentos

Estendendo a análise para o caso de dois dispositivos semelhantes conectados à rede têm-se o circuito ilustrado conforme a Figura 11.

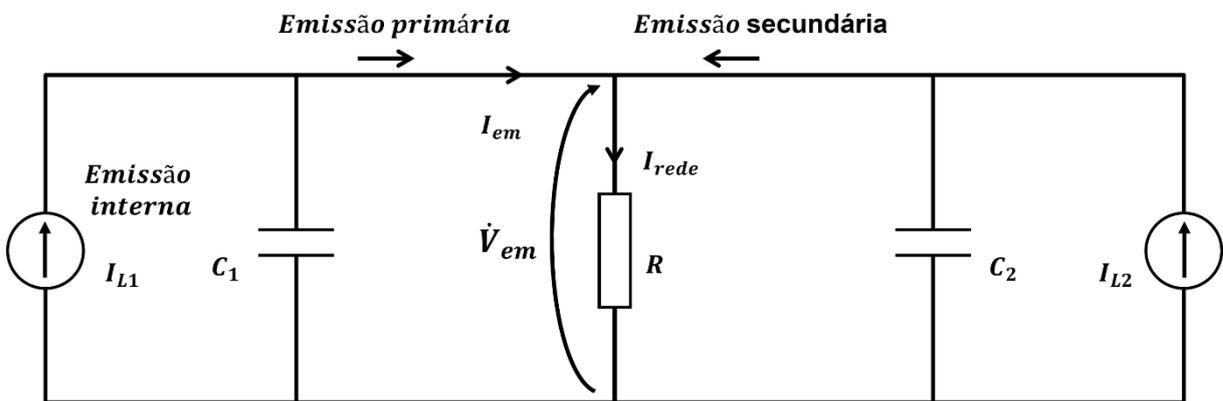


Figura 11 - Modelo simplificado para a análise de supra-harmônicas com dois dispositivos conectados à rede.

A corrente que flui entre o dispositivo 1 e a rede é a soma das componentes de emissão primária e secundária. Considerando dois dispositivos similares com mesmo capacitor  $C_1 = C_2 = C$  no lado da rede do filtro EMC e desprezando a indutância e a capacitância da rede, pode-se calcular a emissão total do primeiro dispositivo, a corrente que flui para a rede (soma da emissão do dispositivo 1 e a emissão do dispositivo 2) e a tensão da rede por (6), (7) e (8), respectivamente.

$$\dot{i}_{em} = \frac{1 + j\omega RC}{1 + 2j\omega RC} \dot{I}_{L1} + \frac{1 + j\omega RC}{1 + 2j\omega RC} \dot{I}_{L2} \quad (6)$$

$$\dot{i}_{rede} = \frac{1}{2j\omega RC} \dot{I}_{L1} + \frac{1}{2j\omega RC} \dot{I}_{L2} \quad (7)$$

$$\dot{V}_{em} = \frac{R}{2j\omega RC} \dot{I}_{L1} + \frac{R}{2j\omega RC} \dot{I}_{L2} \quad (8)$$

Na prática, dois dispositivos, mesmo que idênticos, terão amplitude e frequência ligeiramente diferentes. Entretanto, para efeito de simplificação considera-se os dois dispositivos com emissões internas de mesma amplitude  $\dot{I}_L$ , mas de frequências ligeiramente diferentes. Ao longo de uma pequena banda de frequência, cobrindo ambas as frequências, a amplitude da emissão total pode ser obtida através do Teorema de Parseval como a raiz da soma quadrada dos dois componentes, conforme a equação (9).

$$\dot{I}_{em} = \sqrt{\frac{1 + 2\alpha^2}{1 + 4\alpha^2}} \dot{I}_L \quad (9)$$

Onde,  $\alpha = \omega RC$

Para baixas frequências,  $\alpha$  muito menor que 1, a corrente de emissão total é aproximadamente igual à emissão interna de um dispositivo. Para altas frequências, essa corrente é cerca de 70% da emissão interna de um dispositivo. O impacto da frequência de comutação ou do tamanho do capacitor na corrente da interface é pequeno. A presença de um segundo dispositivo aumenta a emissão do primeiro dispositivo.

Da mesma forma, a amplitude da corrente total (dos dois dispositivos) que flui para a rede é encontrada a partir de (10).

$$\dot{I}_{rede} = \sqrt{\frac{2}{1 + 4\alpha^2}} \dot{I}_L \quad (10)$$

Onde,  $\alpha = \omega RC$

A corrente na interface de cada dispositivo individual mostra apenas uma dependência de frequência limitada, enquanto a corrente que flui para a rede diminui inversamente proporcional à frequência de comutação.

Expandindo esse conceito para múltiplos dispositivos é possível chegar a fórmulas genéricas que permitem calcular a emissão interna de um dispositivo e seu módulo, a corrente que flui para a rede (emissão total) e seu módulo para N dispositivos, conforme as equações (11), (12), (13) e (14), respectivamente.

$$\dot{I}_{em} = \frac{1 + (N - 1)j \alpha}{1 + Nj \alpha} \dot{I}_{L1} - \frac{j \alpha}{1 + Nj \alpha} \sum_{i=2}^N \dot{I}_{Li} \quad (11)$$

$$I_{em} = \frac{1 + N(N - 1) \alpha^2}{1 + N^2 \alpha^2} \dot{I}_L \quad (12)$$

$$\dot{I}_{rede} = \frac{1}{1 + Nj \alpha} \sum_{i=1}^N \dot{I}_{Li} \quad (13)$$

$$I_{rede} = \sqrt{\frac{N}{1 + N^2 \alpha^2}} \dot{I}_L \quad (14)$$

Onde,  $\alpha = \omega RC$

Dessa análise é possível mostrar que a emissão total de um dispositivo é quase igual à sua emissão primária e independente do número de dispositivos, da frequência de comutação, do tamanho do capacitor e da impedância da rede. Enquanto a emissão de um dispositivo é constante, a emissão da instalação total é, para frequências mais altas, inversamente proporcional à raiz quadrada do número de dispositivos.

Esse modelo simples de estimação da emissão de uma instalação com vários dispositivos equipados similares com correção ativa do fator de potência mostrou que a emissão secundária (corrente que flui na interface entre um dispositivo e a rede devido a uma fonte de perturbação em outro lugar) não pode ser desprezada. Também foi possível verificar que a emissão de um dispositivo aumenta quando mais dispositivos são conectados a uma instalação, ao passo que a emissão total da instalação reduz [43].

## CAPÍTULO 3

### MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Para realizar as simulações computacionais utilizou-se o *software* MATLAB *Simulink*®, onde foi modelado um circuito secundário de distribuição e fontes de corrente supra-harmônicas, de diferentes frequências, conectadas a pontos distintos da rede, conforme é explicitado nos tópicos a seguir.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO

A Figura 12 apresenta o diagrama esquemático do circuito de distribuição de energia elétrica utilizado durante o desenvolvimento dessa dissertação. O circuito possui um transformador de distribuição de 75 kVA, com tensão primária de 13,8 kV e tensão secundária de 380V/220V alimentando 13 consumidores.

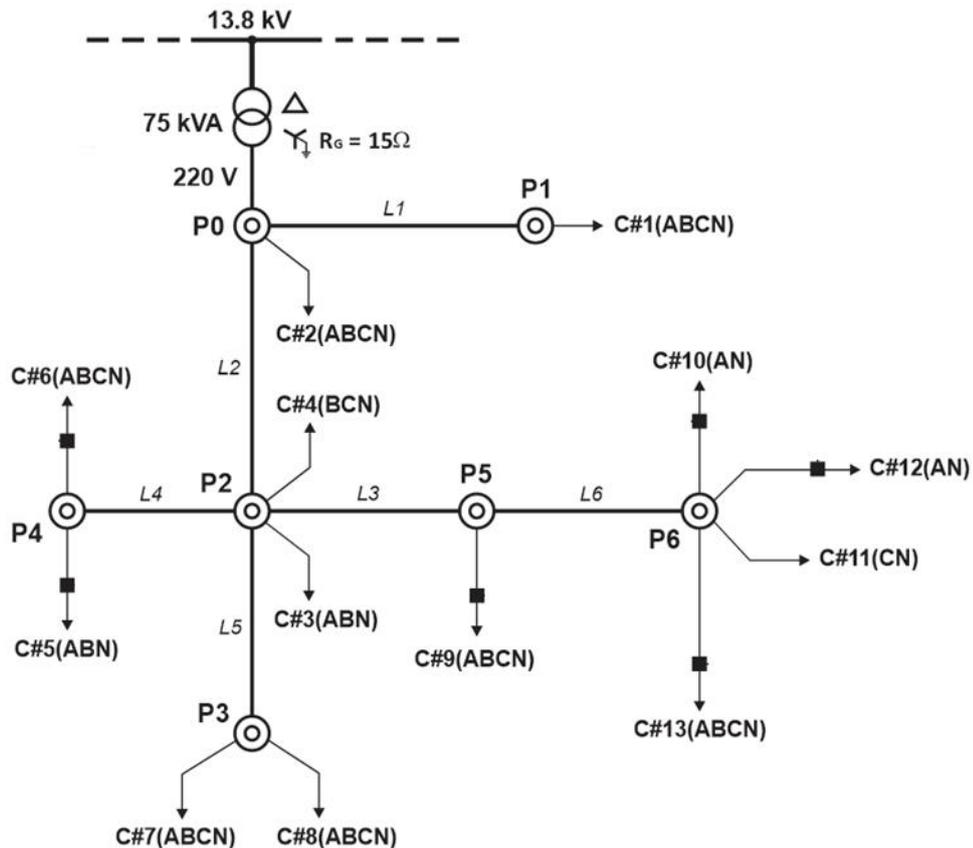


Figura 12 - Diagrama esquemático do sistema de distribuição de baixa tensão utilizado para o estudo de propagação das supra-harmônicas.

A Tabela 3 apresenta detalhes das seções através dos comprimentos dos condutores. A Tabela 4, por sua vez, apresenta os dados de carga do circuito como o número de fases, as potências ativas e reativa máximas, bem como a conexão do barramento de cada consumidor. Nas simulações foi considerada a carga máxima para os 13 consumidores. Essas cargas foram implementadas através de parâmetros RLC do bloco de cargas em paralelo do *Simulink*, as considerando como cargas tipo potência constante.

Tabela 3 – Detalhes das características da seção do circuito.

<b>Linha</b>	<b>Barra</b>		<b>Comprimento (m)</b>
<b>L1</b>	P0	P1	33,18
<b>L2</b>	P0	P2	23,91
<b>L3</b>	P2	P5	44,80
<b>L4</b>	P2	P4	5,35
<b>L5</b>	P2	P3	18,31
<b>L6</b>	P5	P6	47,68

Tabela 4 – Detalhes das potências das cargas do circuito.

<b>Carga</b>	<b>Fases</b>	<b>Barra</b>	<b>Pmax (kW)</b>	<b>Qmax (kvar)</b>
<b>C1</b>	A B C N	P1	0,80	0,35
<b>C2</b>	A B C N	P0	1,20	0,51
<b>C3</b>	A B N	P2	3,30	1,41
<b>C4</b>	B C N	P2	0,75	0,32
<b>C5</b>	A B N	P4	7,12	3,03
<b>C6</b>	A B C N	P4	4,70	2,00
<b>C7</b>	A B C N	P3	7,00	2,98
<b>C8</b>	A B C N	P3	5,40	2,30
<b>C9</b>	A B C N	P5	5,60	2,39
<b>C10</b>	A N	P6	3,50	1,49
<b>C11</b>	A B C N	P6	0,65	0,28
<b>C12</b>	A N	P6	2,00	0,85
<b>C13</b>	A B C N	P6	0,47	0,20

Para simular o comportamento das fontes supra-harmônicas na rede de distribuição em situações realistas, considerou-se os efeitos capacitivo e pelicular. Para tanto, a simulação foi feita utilizando um segmento de rede de seção PI trifásico da biblioteca do *SimPowerSystems* do *Simulink*. Ao contrário do modelo de linha de parâmetros distribuídos, em que a resistência, a indutância e a capacitância são distribuídas uniformemente ao longo da linha, esse bloco agrupa os parâmetros do segmento de rede em uma única seção PI.

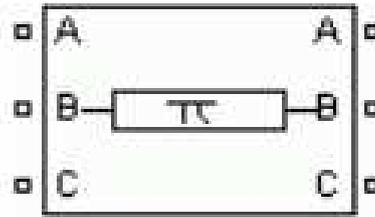


Figura 13 – Bloco Segmento de rede de seção PI trifásico *Simulink*.

Os parâmetros de rede são especificados como parâmetros de sequência positiva e zero, que levam em consideração os acoplamentos indutivo e capacitivo entre os condutores trifásicos, bem como os parâmetros em relação à terra, conforme mostra a Figura 14.

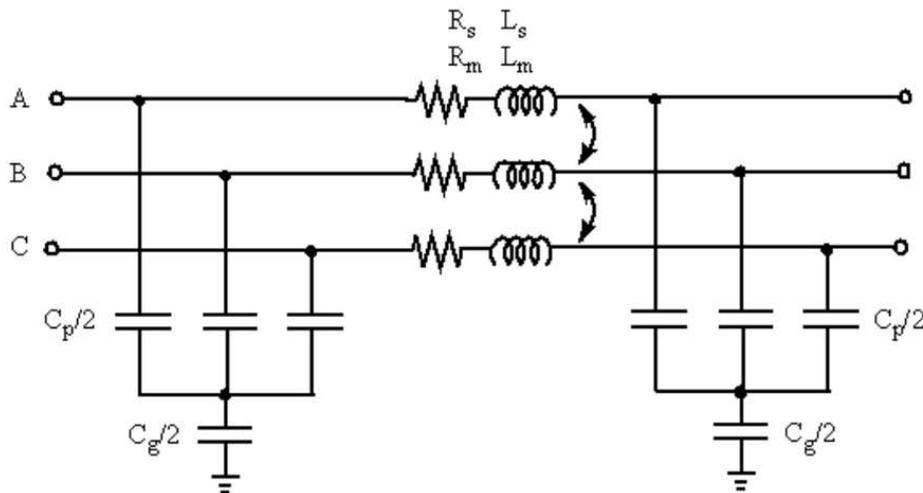


Figura 14 – Parâmetros de resistências próprias e mútuas ( $R_s$ ,  $R_m$ ), indutâncias próprias e mútuas ( $L_s$ ,  $L_m$ ), capacitâncias de fase  $C_p$  e as capacitâncias de terra  $C_g$ , consideradas na seção PI de uma linha trifásica.

Para este trabalho, os parâmetros adotados foram retirados de [44], conforme especificado na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros do segmento de rede PI trifásico.

$R_0$	13,77 $\Omega$ /km
$R_1$	3,47 $\Omega$ /km
$L_0$	0,499 mH/km
$L_1$	0,189 mH/km
$C_0$	0,245 $\mu$ F/km
$C_1$	0,335 $\mu$ F/km

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS CARGAS EMISSORAS DE SH

Os dispositivos eletrônicos emissores de SH podem ter uma variedade de topologias diferentes, dependendo da aplicação, mas o lado da rede do dispositivo geralmente é semelhante e normalmente contém internamente um filtro EMC que visa minimizar que componentes de alta frequência de comutação cheguem à rede elétrica. Uma topologia usual de filtro utilizada na interface entre inversores fotovoltaicos e a rede são filtros LCL, constituídos por uma indutância em série com a saída do inversor ( $L_f$ ), um elemento capacitivo em derivação ( $C_f$ ) e uma segunda indutância em série com a rede ( $L_g$ ), conforme apresenta Figura 15.

Na prática, é difícil se obter os valores dos parâmetros dos filtros LCL e a metodologia utilizada para os cálculos, já que essas informações não são informadas pelos fabricantes.

A literatura apresenta diferentes metodologias para se designar esses parâmetros. O presente trabalho utilizou-se da metodologia proposta por [45] que apresentou um procedimento de *design* de filtro LCL próximo do comercial, visto que as premissas adotadas buscaram minimizar os custos do filtro.

Para os cálculos foi considerada a tensão eficaz da rede de 220 V, uma frequência nominal de 60 Hz e a tensão no *link* DC de 650 V. Também foi considerado um filtro com fator de potência unitário e com indutores da rede  $L_g$  e do filtro  $L_f$  de mesmo valor e a frequência de ressonância do filtro igual a aproximadamente um terço do valor da frequência de chaveamento.

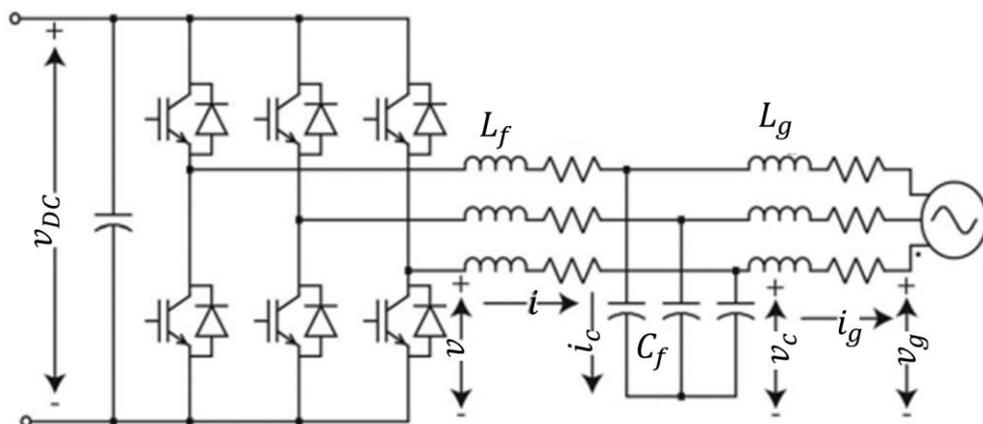


Figura 15 – Inversor trifásico e filtro LCL conectado à rede [45].

### 3.3 CASOS SIMULADOS

Em um primeiro momento, foram considerados fontes de corrente injetando 50 mA de correntes SH em cada uma das fases do sistema, conectadas em cada uma das seis barras do circuito separadamente. Também foi considerado o caso de duas fontes uma na barra P0 e outra na barra P6. Por último, foi simulado o caso de duas fontes SH na barra P6. A Tabela 6 apresenta os oito casos simulados.

Tabela 6 – Casos simulados

<b>Caso</b>	<b>Localização da fonte SH</b>
<b>A</b>	Barra P1
<b>B</b>	Barra P2
<b>C</b>	Barra P3
<b>D</b>	Barra P4
<b>E</b>	Barra P5
<b>F</b>	Barra P6
<b>G</b>	Barras P0 e P6
<b>H</b>	Duas fontes barra P6

Para cada um desses oito casos, foi considerada uma fonte SH precedida de um filtro LCL, cujos parâmetros designados constam na Tabela 8, considerando um equipamento de potência de 10kVA. Esses valores foram calculados conforme item 3.2.

Posteriormente, a rede foi atualizada considerando a inserção de seis GDFV, cujas potências e localização são apresentadas na Tabela 7 e ilustrados na Figura 16.

Vale ressaltar que esse é um caso real onde esses seis sistemas de GDFV foram realmente conectados conforme dados da BDGD 2023 dessa concessionária de energia disponíveis no Portal de Dados Abertos da ANEEL.

Tabela 7 – Potência e consumidores onde as GDFV foram conectadas

<b>Consumidor</b>	<b>Potência (kVA)</b>
<b>C5</b>	8,00
<b>C6</b>	4,25
<b>C9</b>	11,00
<b>C10</b>	10,00
<b>C12</b>	10,00
<b>C13</b>	10,00

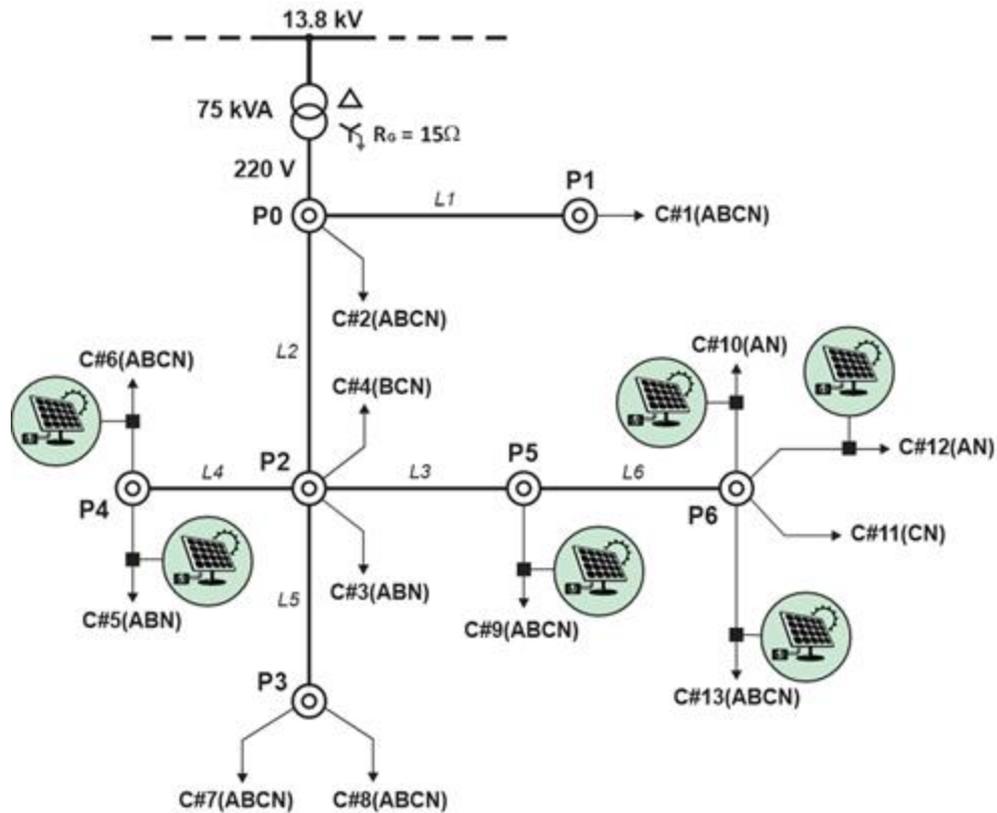


Figura 16 - Diagrama esquemático do sistema de distribuição de baixa tensão considerando as GDFV.

A Tabela 8 apresenta os valores dos componentes do filtro para as diferentes potências de GDFV e diferentes frequências de chaveamento consideradas nas simulações. As frequências escolhidas para a simulação (5, 10, 15, 20, 30 e 50 kHz) são típicas de inversores fotovoltaicos e carregadores de veículos elétricos [46].

Tabela 8 – Valores dos parâmetros dos filtros LCL para cada potência de GDFV e frequências de chaveamento consideradas.

Potência GDFV	Parâmetros filtro	Frequências (kHz)					
		5	10	15	20	30	50
4,25 kVA	$L_f = L_g$ (mH)	1,13	0,57	0,38	0,28	0,19	0,11
	$C_f$ ( $\mu$ F)	17,44	8,72	5,81	4,36	2,91	1,74
8 kVA	$L_f = L_g$ (mH)	0,60	0,30	0,20	0,15	0,10	0,06
	$C_f$ ( $\mu$ F)	32,83	16,42	10,94	8,21	5,47	3,28
10 kVA	$L_f = L_g$ (mH)	0,48	0,24	0,16	0,12	0,08	0,048
	$C_f$ ( $\mu$ F)	41,04	20,52	13,68	10,26	6,84	4,10
11 kVA	$L_f = L_g$ (mH)	0,44	0,22	0,15	0,11	0,07	0,04
	$C_f$ ( $\mu$ F)	45,14	22,57	15,05	11,29	7,52	4,51

O resultado da modelagem no *Simulink* do circuito secundário de distribuição é apresentado na Figura 17.

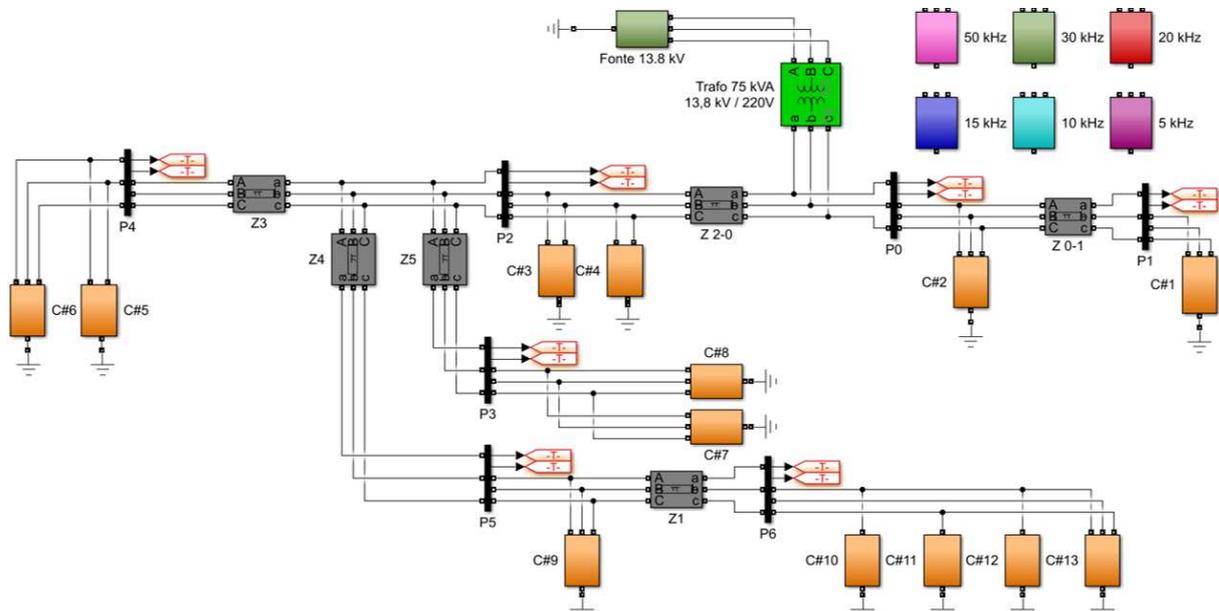


Figura 17 – Modelagem do circuito BT em ambiente *Simulink*.

A Figura 18 apresenta a caracterização de uma fonte supra-harmônica monofásica de 50 mA em 15 kHz precedida por seu filtro LCL.

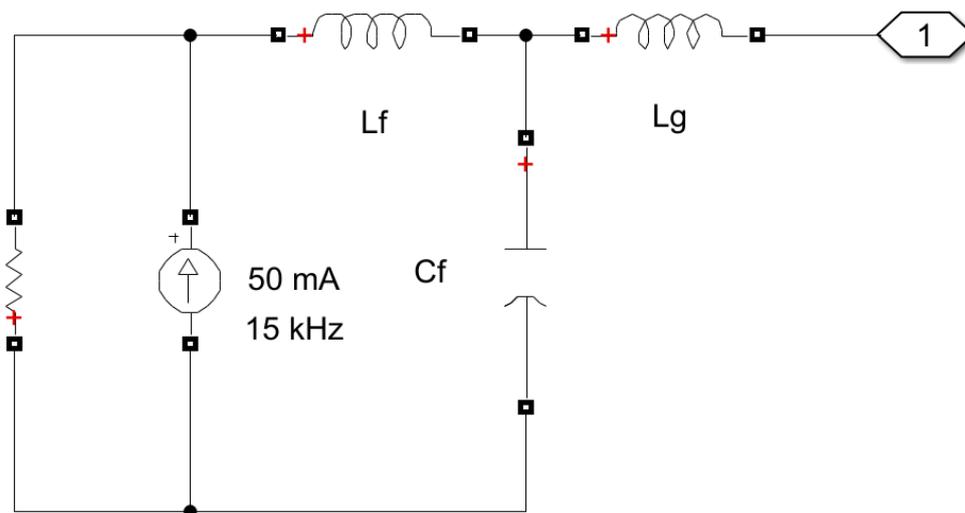


Figura 18 – Fonte de corrente supra-harmônica + Filtro LCL em ambiente *Simulink*.

Já a Figura 18 apresenta a caracterização de uma fase da geração distribuída fotovoltaica como uma fonte de corrente injetando uma corrente correspondente a sua potência seguida de

uma fonte supra-harmônica precedida por seu filtro LCL calculado conforme a potência do sistema fotovoltaico.

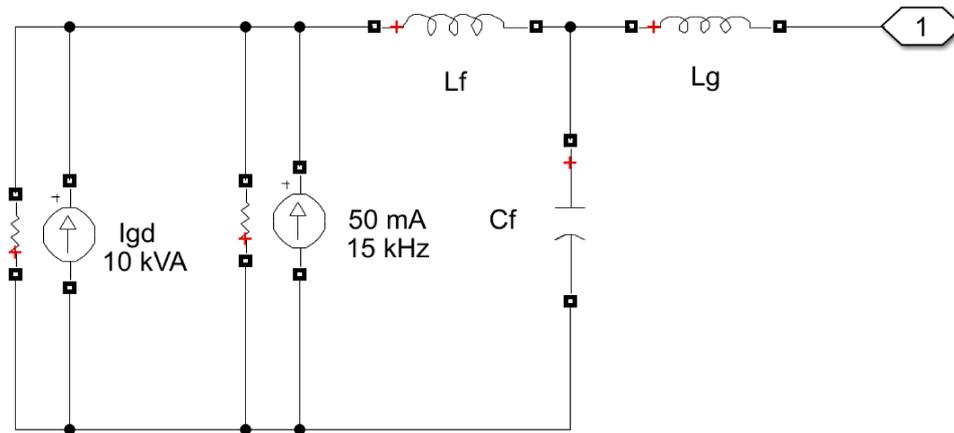


Figura 19 – Fonte de corrente da GDFV + fonte de corrente supra-harmônica + filtro LCL em ambiente *Simulink*.

Um exemplo de uma carga trifásica com a GDFV, a fonte SH e o filtro LCL é mostrado na Figura 20.

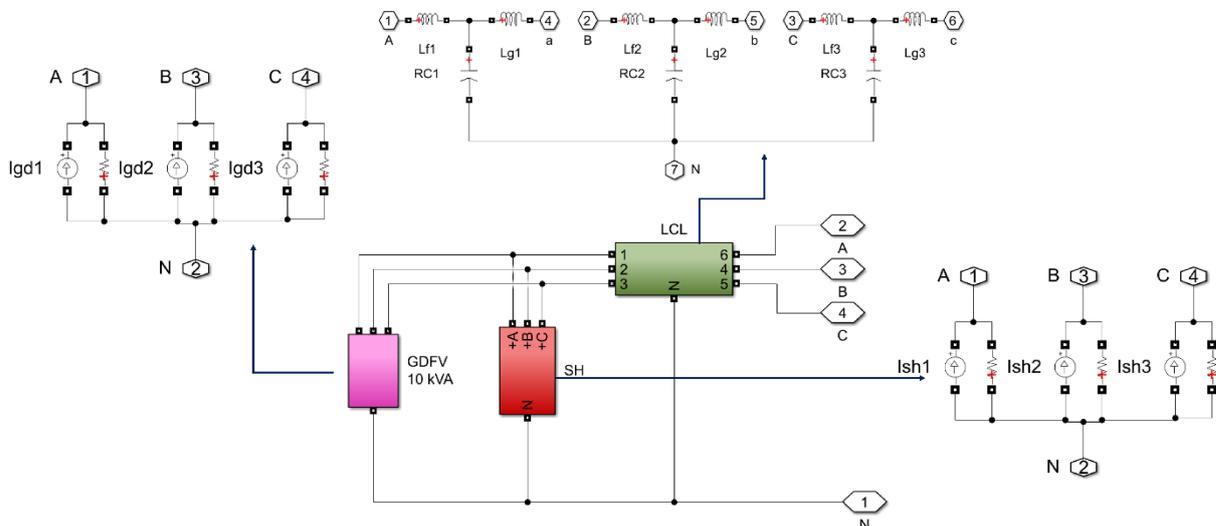


Figura 20 – Modelagem de uma GDFV, uma fonte SH e um filtro LCL trifásico em ambiente *Simulink*.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste quarto capítulo são apresentados os resultados da simulação computacional e são observados como as correntes supra-harmônicas se refletem na tensão em função da localização e da frequência de emissão.

Inicialmente, são apresentados os resultados obtidos para oito casos (A-G), sendo os seis primeiros (A-F) considerando a fonte supra-harmônica alocada em seis diferentes barras do sistema. O caso G apresenta os resultados para o caso com duas fontes supra-harmônicas alocadas em duas barras distintas e o caso H apresenta os resultados para duas fontes supra-harmônicas alocadas na barra P6. Em todos os casos, considera-se a fonte supra-harmônica injetando 50 mA em diferentes frequências.

Por último, são apresentados os resultados da simulação considerando a inserção de seis sistemas GDFV no circuito como as fontes supra-harmônicas. São analisados dois casos que se diferenciam pelas frequências de chaveamento consideradas para cada GDFV.

#### 4.1 CASO A

Os resultados da taxa de distorção harmônica de tensão para a fase A, ao se injetar as correntes supra-harmônicas de diferentes frequências na barra P1 estão sintetizados na Tabela 9, e Figura 21.

Tabela 9 – Valores percentuais de THD de tensão da fase A em cada barra e para cada frequência no caso A.

Barra	THD (%)					
	50 kHz	30 kHz	20 kHz	15 kHz	10 kHz	5 kHz
P0	0,231	0,230	0,199	0,177	0,146	0,096
P1	0,223	0,245	0,215	0,192	0,158	0,105
P2	0,317	0,304	0,261	0,231	0,190	0,125
P3	0,338	0,323	0,277	0,246	0,202	0,133
P4	0,324	0,311	0,267	0,236	0,194	0,128
P5	0,404	0,373	0,317	0,281	0,230	0,151
P6	0,482	0,439	0,372	0,329	0,270	0,177

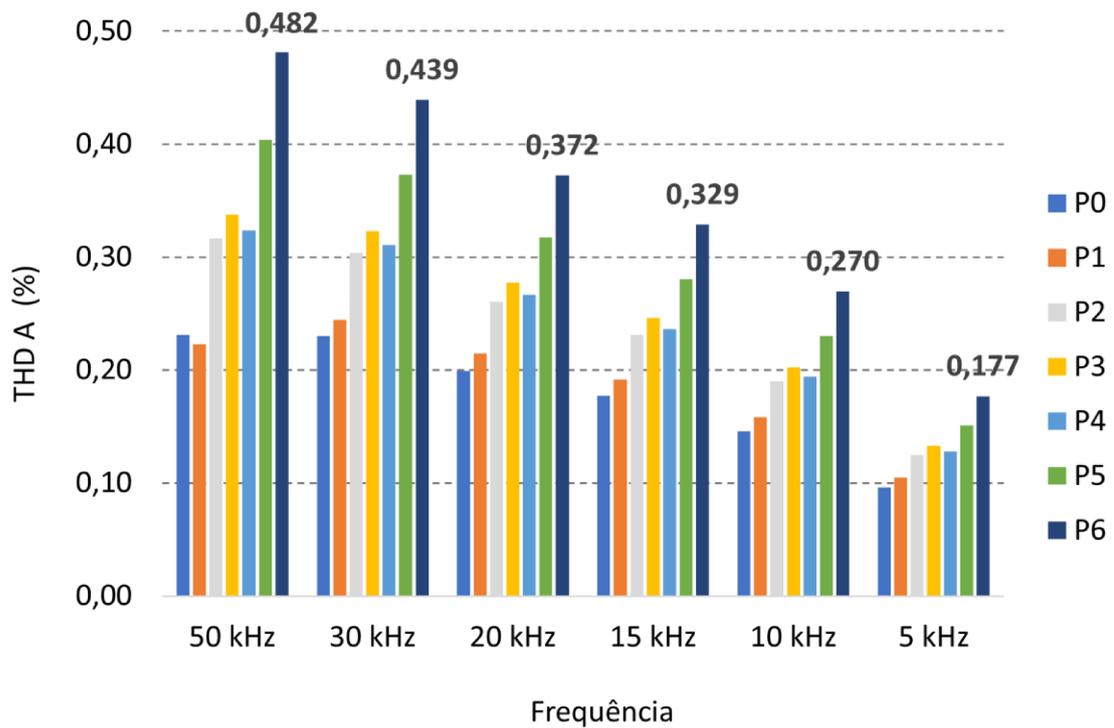


Figura 21 – Distorção harmônica de tensão da fase A em cada barra do circuito, para diferentes frequências, no caso da fonte SH alocada na barra P1.

A Figura 22 apresenta o espectro obtido na barra P1 para a frequência de 50 kHz.

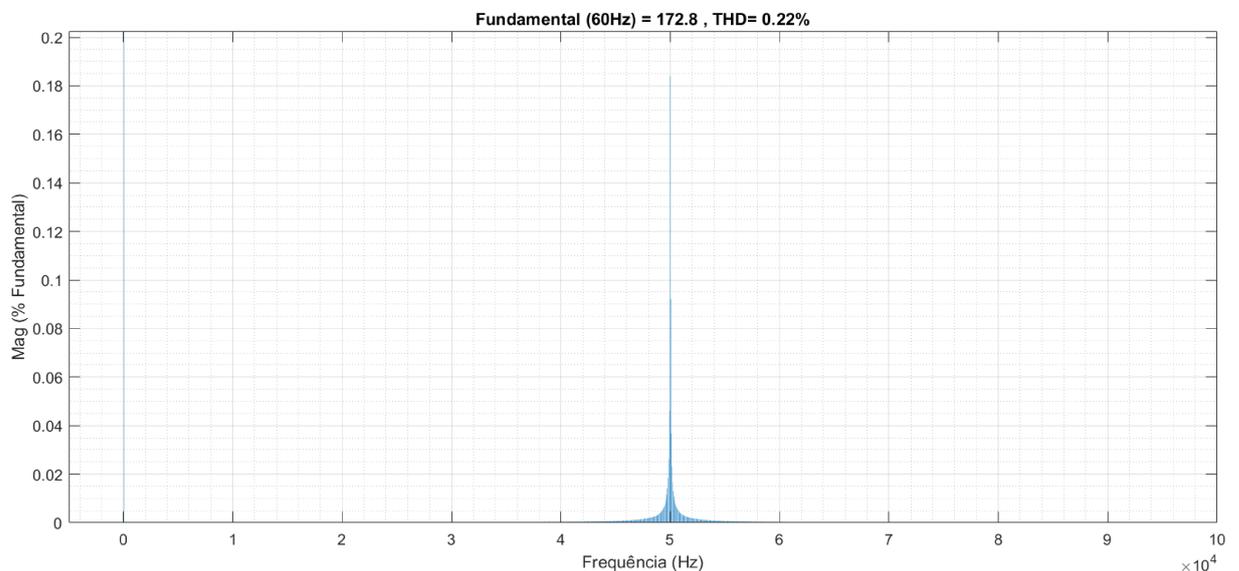


Figura 22 – Espectro de frequências na barra P1 para SH = 50 kHz.

A Figura 23 apresenta o resultado ao longo da linha, o gráfico é dado em porcentagem da taxa de distorção de tensão pela distância ao longo da rede. O ponto inicial representa barra P0 e foi incluída a distância até as barras vizinhas, conforme Tabela 10.

Tabela 10 – Distâncias entre as barras da referência P0.

Barra	d (m)
P0	0,00
P2	23,91
P4	29,26
P1	33,18
P3	44,22
P5	68,71
P6	116,39

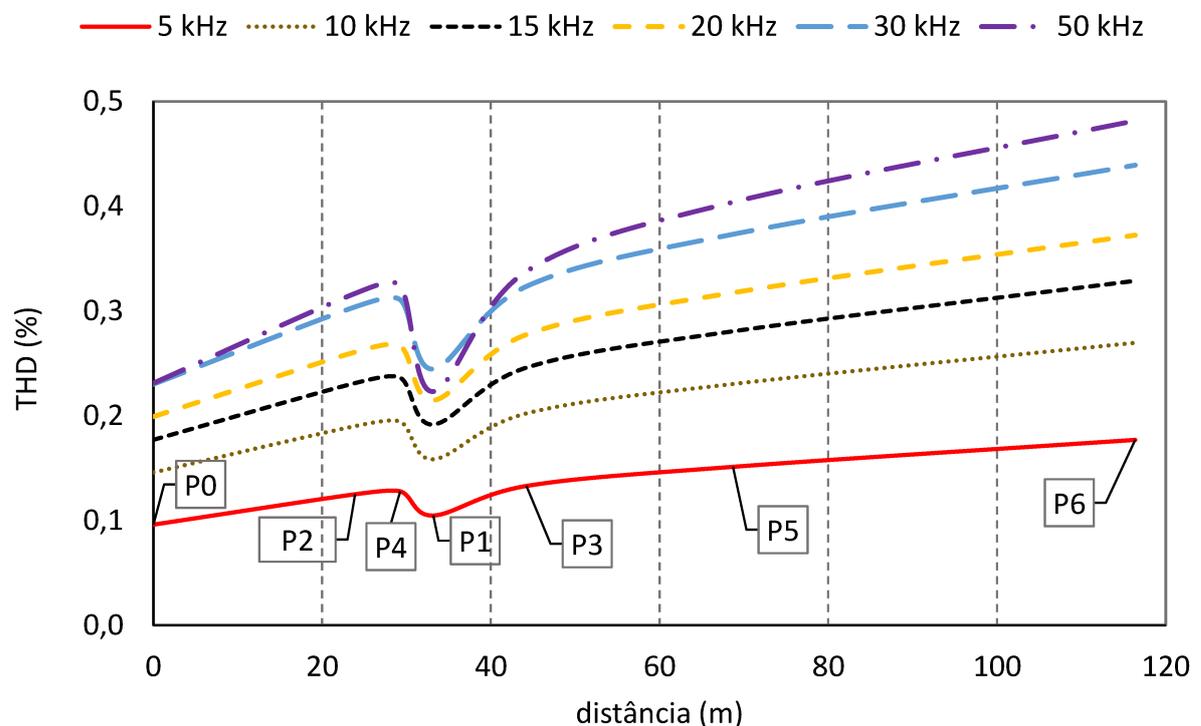


Figura 23 – Distorção harmônica de alta frequência ao longo da rede, no caso em que a fonte SH está localizada na barra P1.

Observa-se que quanto maior a frequência maiores os valores de distorção harmônica de tensão. Os menores valores acontecem por volta dos 30 m onde está localizada a barra P1, onde a fonte de corrente SH foi alocada. Nas barras mais distantes fisicamente de P1, que são P3, P5 e P6 os valores de THD foram ligeiramente superiores.

## 4.2 CASO B

Os resultados da taxa de distorção ao se injetar as correntes supra-harmônicas de diferentes frequências na barra P2 estão sintetizados na Figura 24, e Tabela 11.

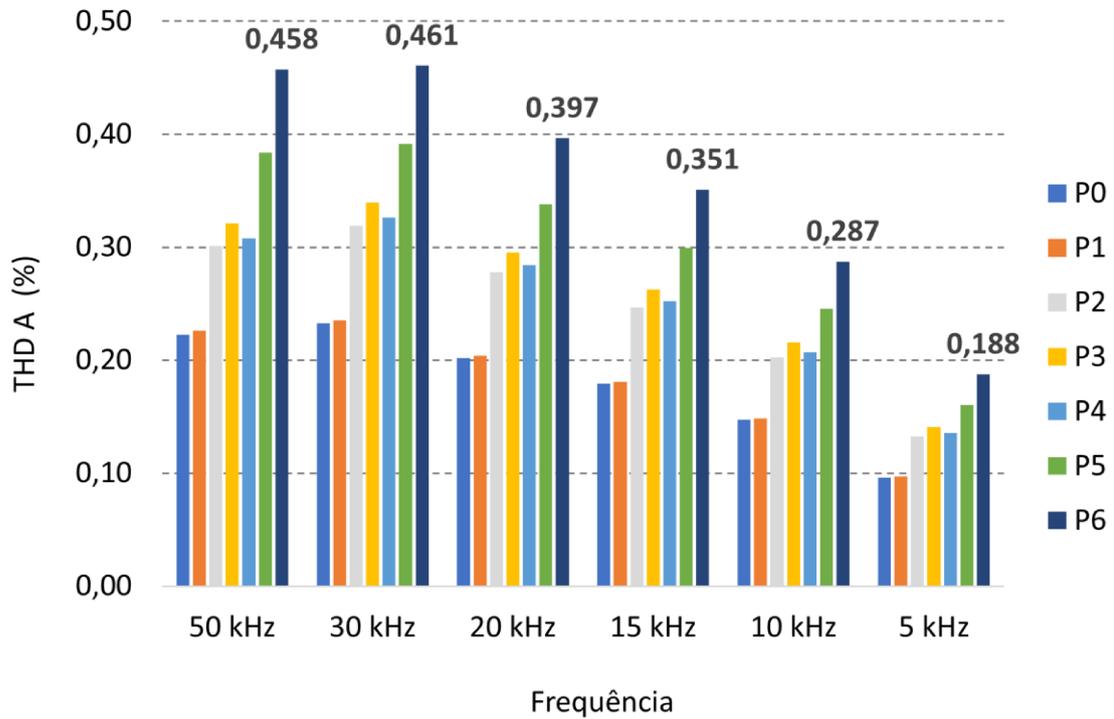


Figura 24 – Distorção harmônica de tensão da fase A em cada barra do circuito, para diferentes frequências, no caso da fonte SH alocada na barra P2.

Tabela 11 – Valores percentuais de THD de tensão da fase A em cada barra e para cada frequência no caso B.

Barra	THD (%)					
	50 kHz	30 kHz	20 kHz	15 kHz	10 kHz	5 kHz
P0	0,222	0,233	0,202	0,179	0,147	0,096
P1	0,226	0,235	0,204	0,181	0,148	0,097
P2	0,301	0,319	0,278	0,247	0,203	0,133
P3	0,321	0,340	0,296	0,263	0,216	0,141
P4	0,308	0,326	0,284	0,252	0,207	0,136
P5	0,384	0,392	0,338	0,300	0,246	0,160
P6	0,458	0,461	0,397	0,351	0,287	0,188

A Figura 25 representa o espectro obtido na barra P2 para a frequência de 50 kHz e a Figura 26 apresenta o comportamento ao longo da rede.

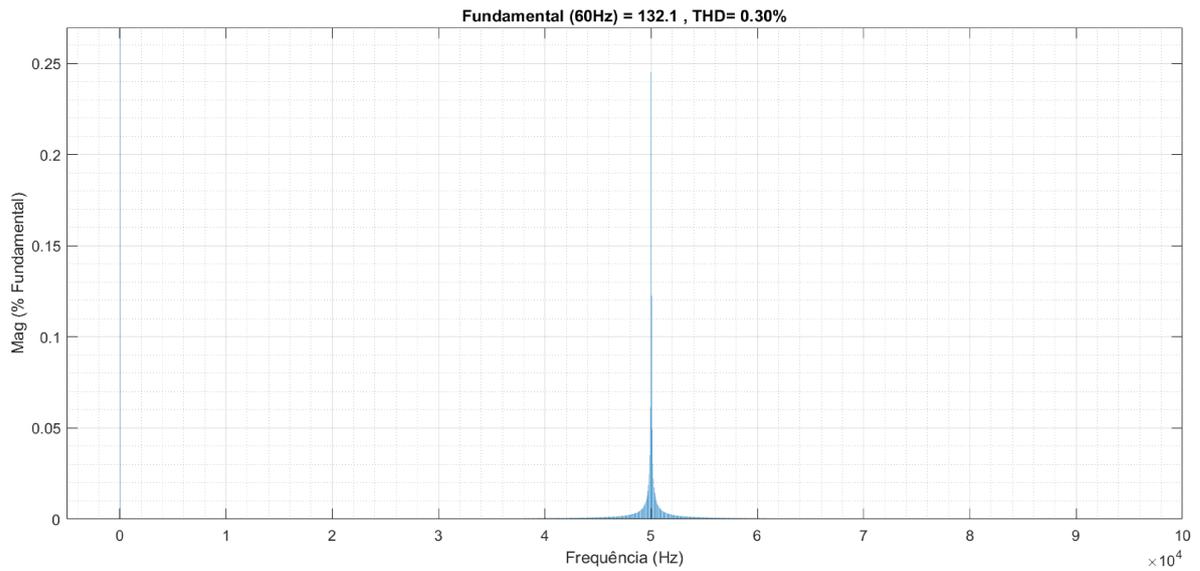


Figura 25 – Espectro de frequências na barra P2 para SH = 50 kHz, caso B.

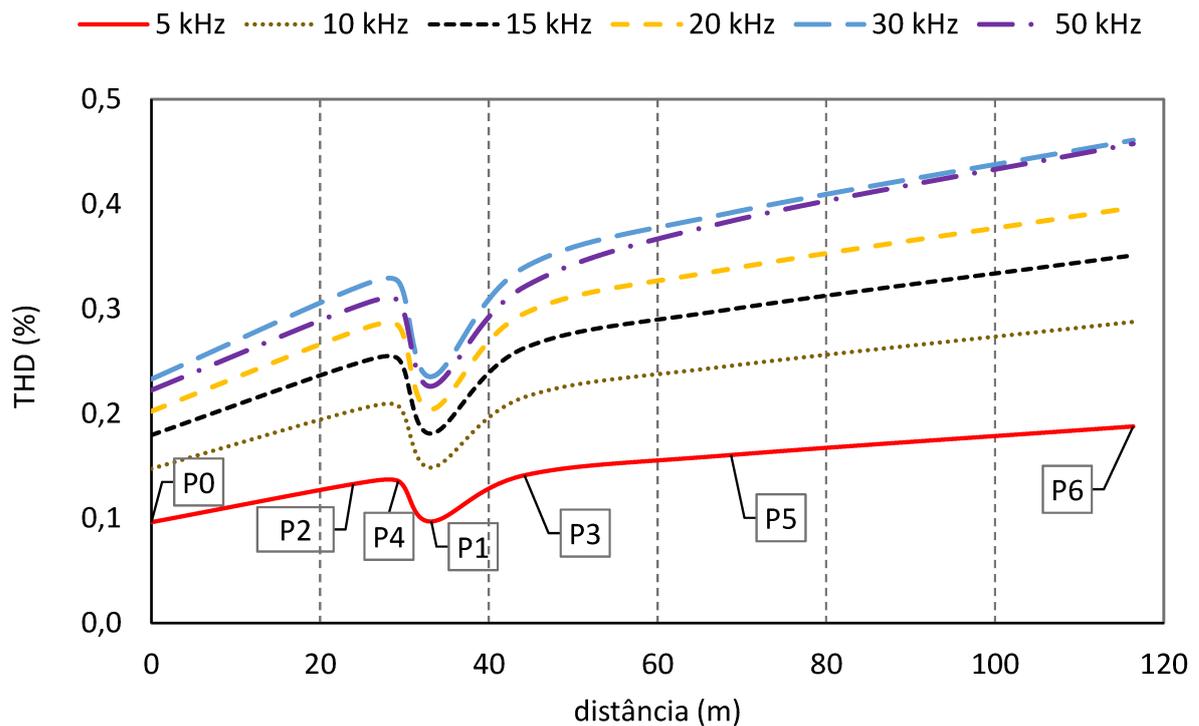


Figura 26 – Distorção harmônica de alta frequência ao longo da rede para o caso em que a fonte SH está localizada na barra P2.

Assim como para o caso A, o comportamento observado ao longo da rede foi semelhante, observou-se que quanto maior a frequência maior foram os valores de THD e que os menores valores ocorreram na barra P1.

### 4.3 CASO C

Os resultados da taxa de distorção ao se injetar as correntes supra-harmônicas de diferentes frequências na barra P3 estão sintetizados na Figura 27, e na Tabela 12.

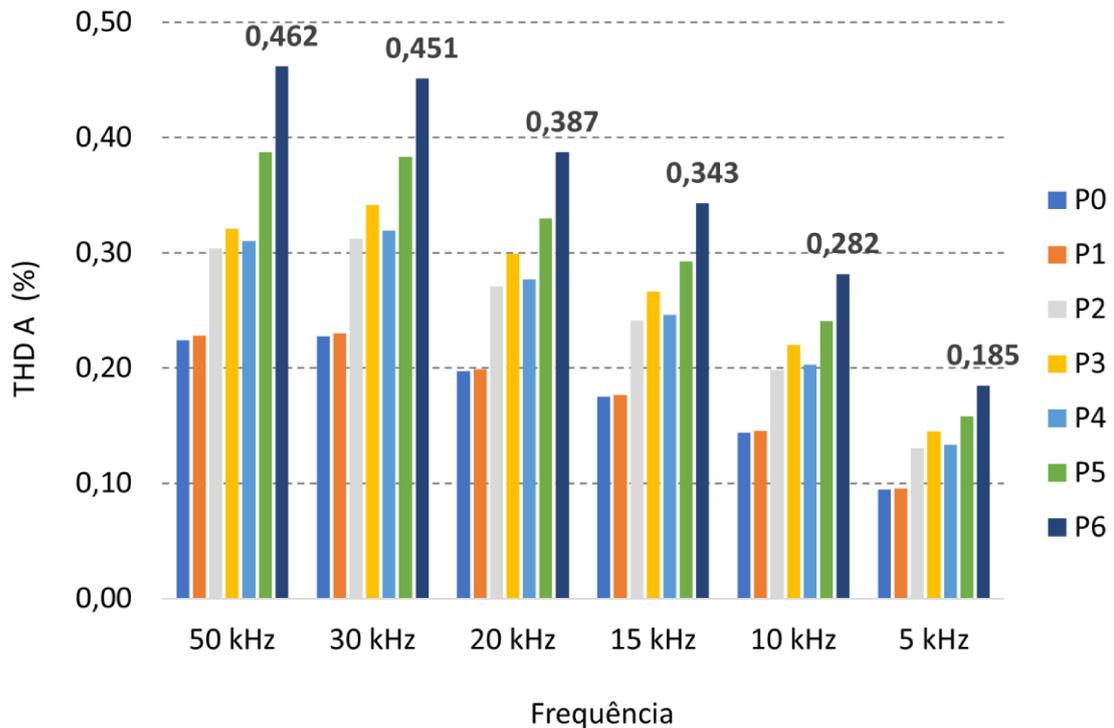


Figura 27 – Distorção harmônica de tensão da fase A em cada barra do circuito, para diferentes frequências, no caso da fonte SH alocada na barra P3.

Tabela 12 – Valores percentuais de THD de tensão da fase A em cada barra e para cada frequência no caso C.

Barra	THD (%)					
	50 kHz	30 kHz	20 kHz	15 kHz	10 kHz	5 kHz
P0	0,224	0,228	0,197	0,175	0,144	0,095
P1	0,228	0,230	0,199	0,177	0,145	0,096
P2	0,304	0,312	0,271	0,241	0,199	0,131
P3	0,321	0,342	0,299	0,267	0,220	0,145
P4	0,311	0,319	0,277	0,247	0,203	0,134
P5	0,387	0,383	0,330	0,293	0,241	0,158
P6	0,462	0,451	0,387	0,343	0,282	0,185

A Figura 28 representa o espectro obtido na barra P3 para a frequência de 50 kHz, e a Figura 29 apresenta o comportamento ao longo da rede.

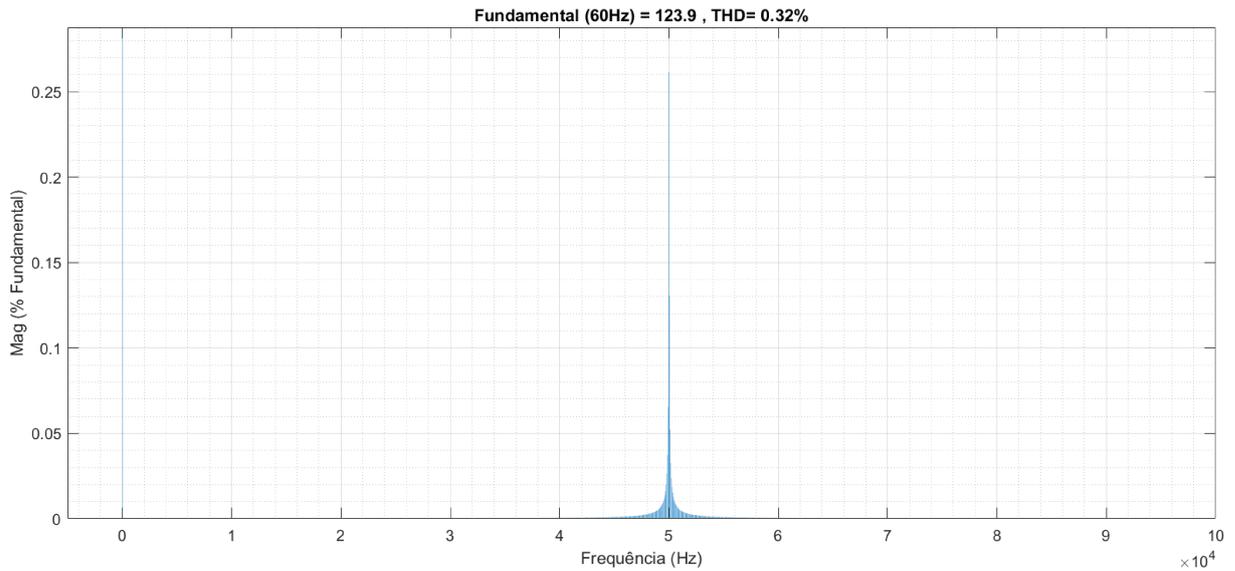


Figura 28 – Espectro de frequências na barra P3 para SH = 50 kHz, caso C.

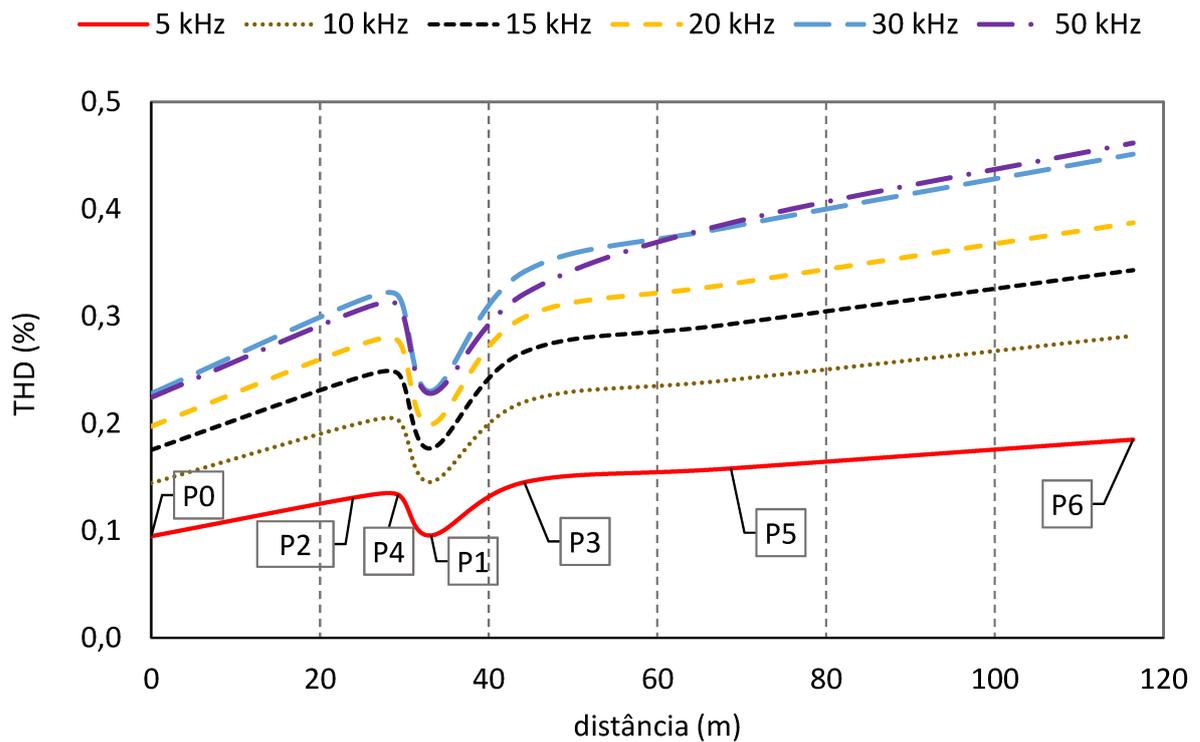


Figura 29 – Distorção harmônica de alta frequência ao longo da rede para o caso em que a fonte SH está localizada na barra P3.

Para esse caso, o comportamento observado também foi semelhante aos anteriores com a diferença que os valores de THD nas frequências de 30 kHz foram ligeiramente superiores aos de 50 kHz até a barra P5.

#### 4.4 CASO D

Os resultados da taxa de distorção por barra e por frequência ao se injetar as correntes supra-harmônicas de diferentes frequências na barra P4 estão sintetizados na Figura 30, e na Tabela 13.

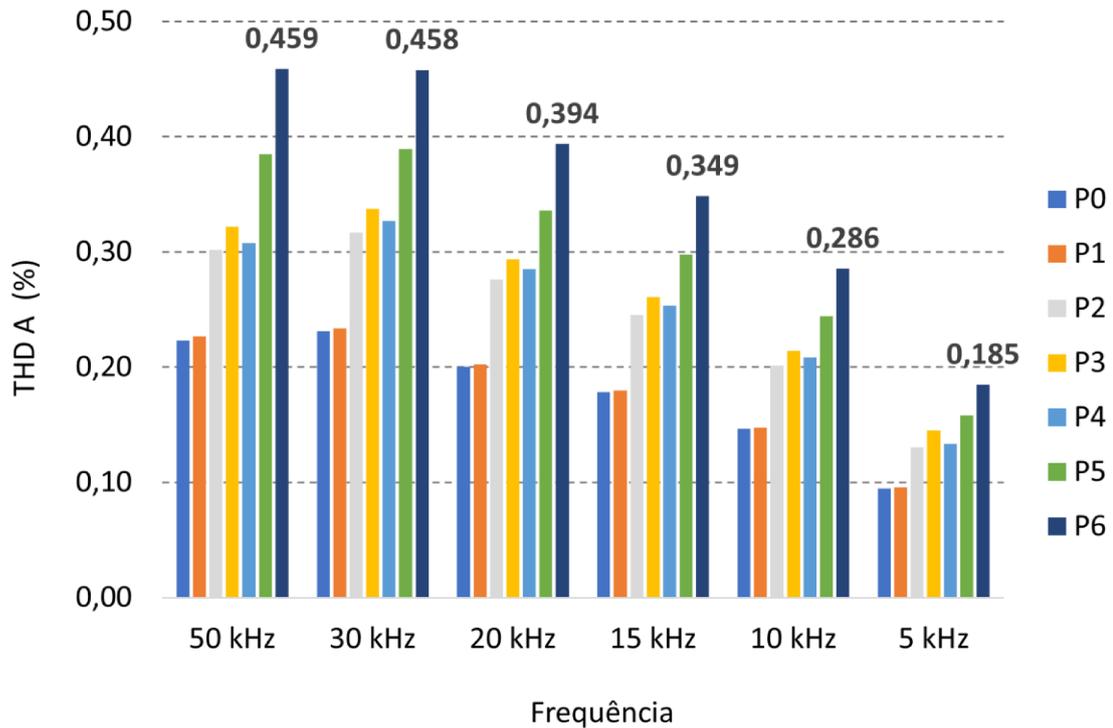


Figura 30 – Distorção harmônica de tensão da fase A em cada barra do circuito, para diferentes frequências, no caso da fonte SH alocada na barra P4.

Tabela 13 – Valores percentuais de THD de tensão da fase A em cada barra e para cada frequência no caso D.

Barra	THD (%)					
	50 kHz	30 kHz	20 kHz	15 kHz	10 kHz	5 kHz
P0	0,223	0,231	0,201	0,178	0,146	0,095
P1	0,227	0,234	0,202	0,180	0,147	0,096
P2	0,302	0,317	0,276	0,245	0,201	0,131
P3	0,322	0,337	0,293	0,261	0,214	0,145
P4	0,308	0,327	0,285	0,253	0,208	0,134
P5	0,385	0,389	0,336	0,298	0,244	0,158
P6	0,459	0,458	0,394	0,349	0,286	0,185

A Figura 31 representa o espectro obtido na barra P4 para a frequência de 50 kHz, e a Figura 32 apresenta o comportamento ao longo da rede.

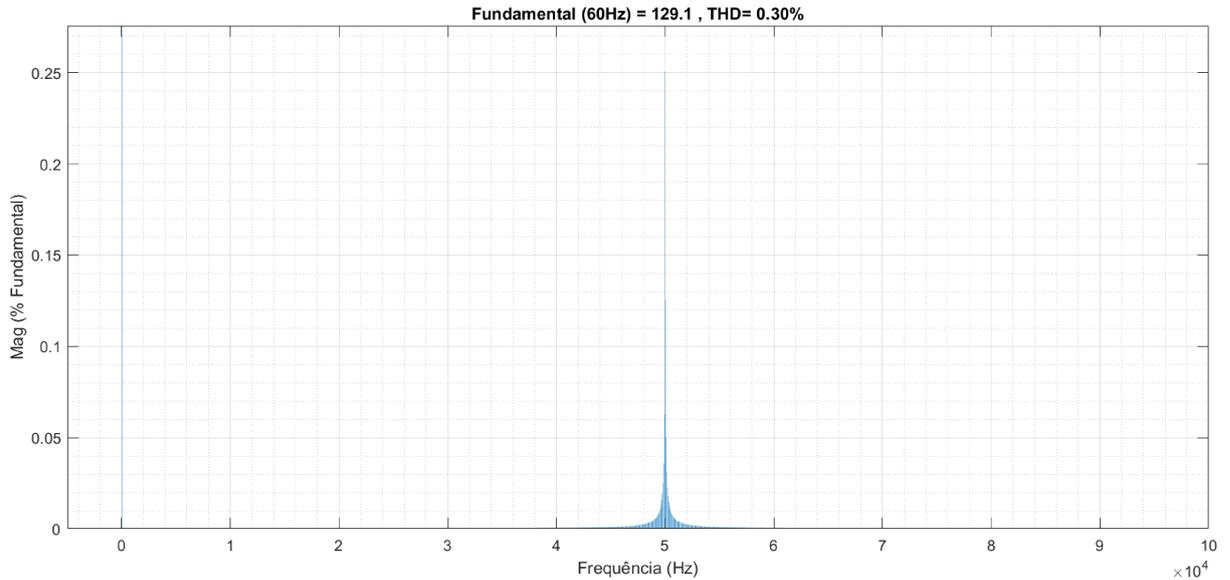


Figura 31 – Espectro de frequências na barra P4 para SH = 50 kHz, caso D.

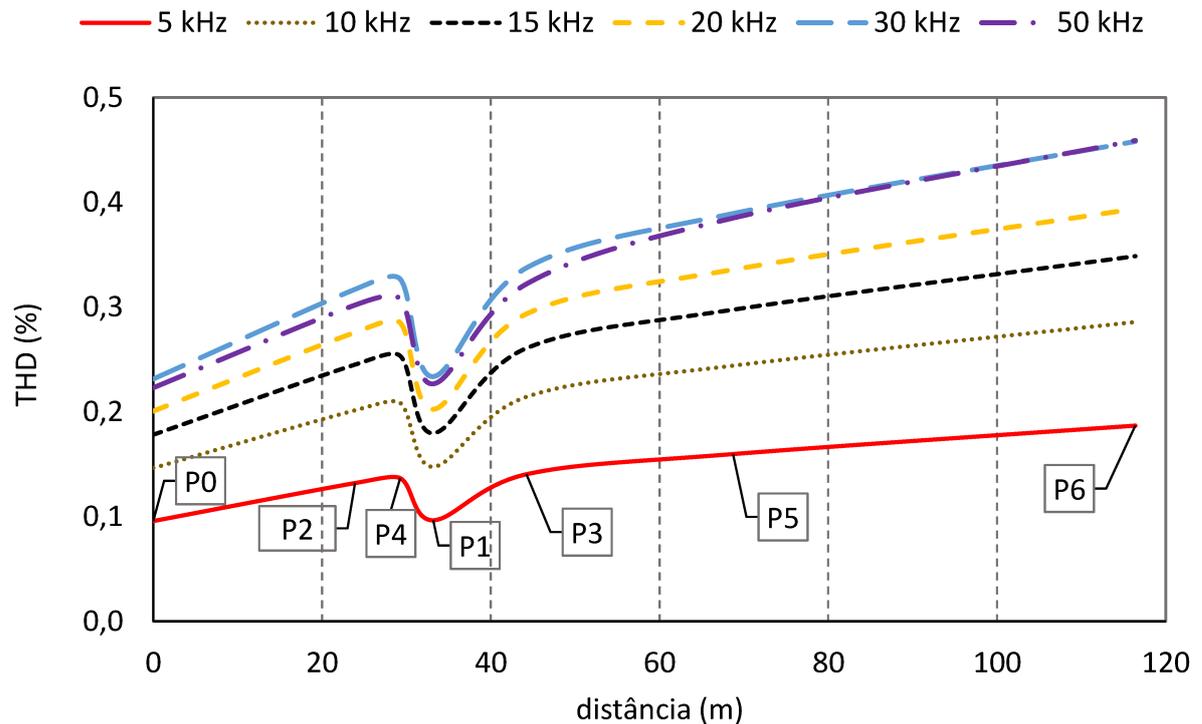


Figura 32 – Distorção harmônica de alta frequência ao longo da rede para o caso em que a fonte SH está localizada na barra P4.

Para esse caso, o comportamento observado foi semelhante ao do caso C, com os valores de THD para 30 kHz e 50 kHz se sobrepondo a partir da barra P5.

## 4.5 CASO E

Os resultados da taxa de distorção por barra e por frequência ao se injetar as correntes supra-harmônicas de diferentes frequências na barra P5 são apresentados na Figura 33, e na Tabela 14.

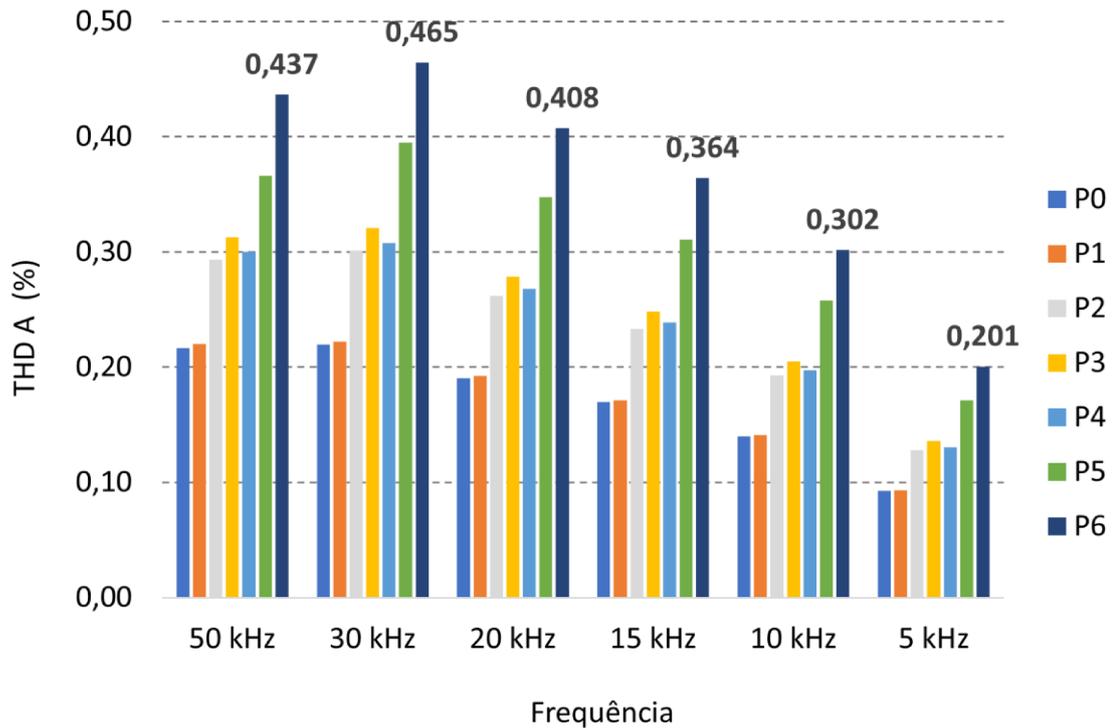


Figura 33 – Distorção harmônica de tensão da fase A em cada barra do circuito, para diferentes frequências, no caso da fonte SH alocada na barra P5.

Tabela 14 – Valores percentuais de THD de tensão da fase A em cada barra e para cada frequência no caso E.

Barra	THD (%)					
	50 kHz	30 kHz	20 kHz	15 kHz	10 kHz	5 kHz
P0	0,217	0,220	0,191	0,170	0,140	0,093
P1	0,220	0,222	0,192	0,171	0,141	0,093
P2	0,293	0,301	0,262	0,233	0,193	0,128
P3	0,313	0,321	0,279	0,248	0,205	0,136
P4	0,300	0,308	0,268	0,239	0,197	0,131
P5	0,366	0,395	0,347	0,311	0,258	0,172
P6	0,437	0,465	0,408	0,364	0,302	0,201

A Figura 34 apresenta o espectro da fase A obtido na barra P5 para a frequência de 50 kHz, e a Figura 35 apresenta o comportamento ao longo da rede.

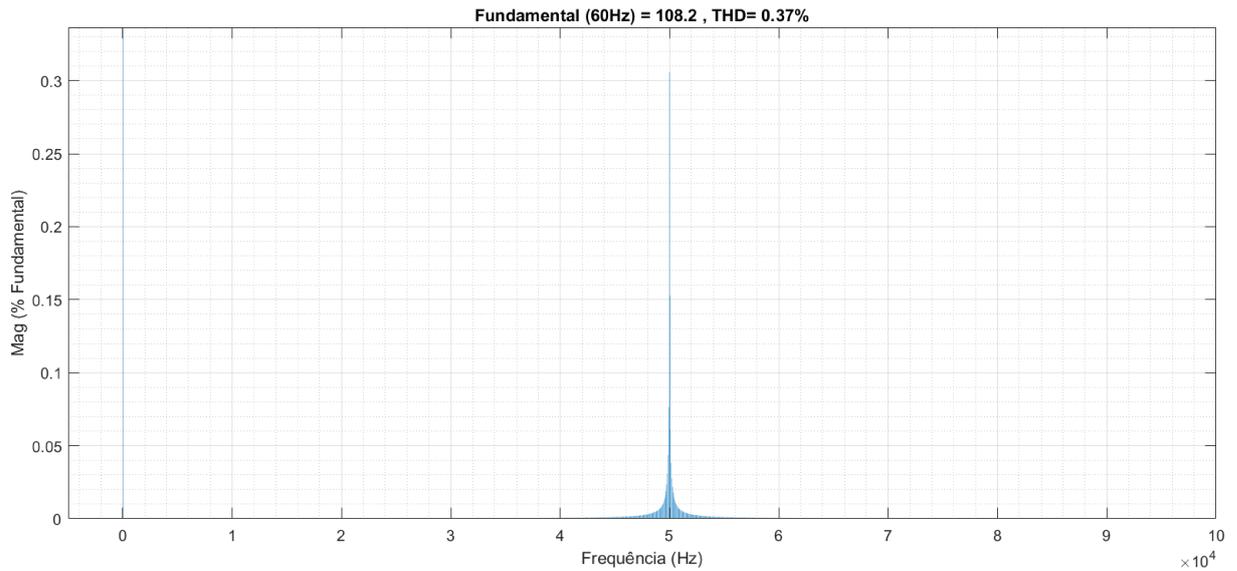


Figura 34 – Espectro de frequências na barra P5 para SH = 50 kHz, caso E.

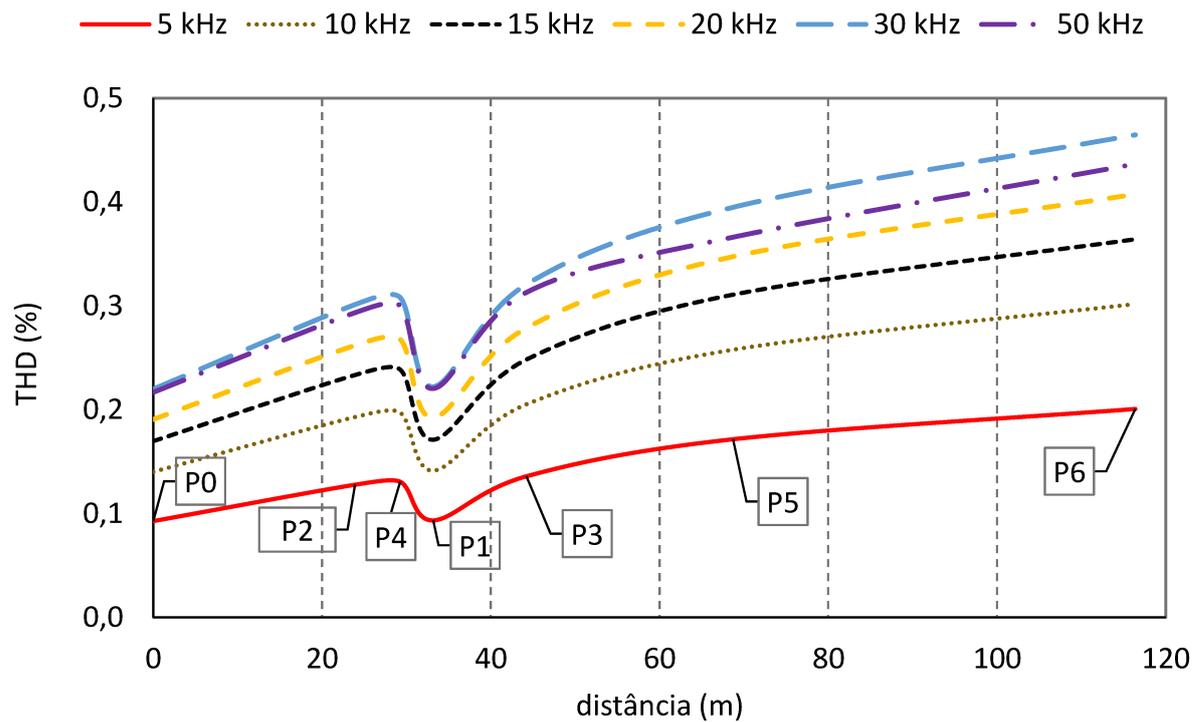


Figura 35 – Distorção harmônica de alta frequência ao longo da rede para o caso em que a fonte SH está localizada na barra P5.

Para o caso em que as fontes supra-harmônicas alocadas na barra P5, observa-se que o comportamento ao longo da linha possui maiores valores de THD para fontes SH na frequência de 30 kHz.

## 4.6 CASO F

Os resultados da taxa de distorção por barra e por frequência estão sintetizados na Figura 36, e na Tabela 15.

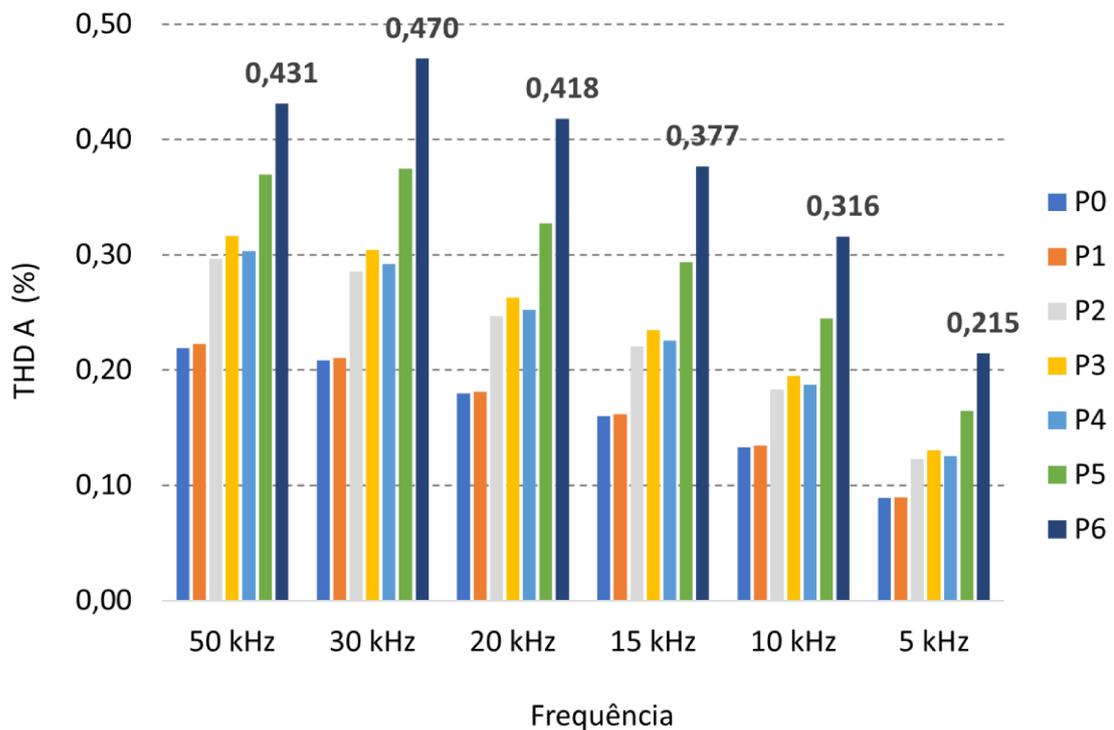


Figura 36 – Distorção harmônica de tensão da fase A em cada barra do circuito, para diferentes frequências, no caso da fonte SH alocada na barra P6.

Tabela 15 – Valores percentuais de THD de tensão da fase A em cada barra e para cada frequência no caso F.

Barra	THD (%)					
	50 kHz	30 kHz	20 kHz	15 kHz	10 kHz	5 kHz
P0	0,219	0,209	0,180	0,160	0,133	0,089
P1	0,223	0,211	0,181	0,162	0,134	0,090
P2	0,296	0,286	0,247	0,221	0,183	0,123
P3	0,316	0,304	0,263	0,235	0,195	0,131
P4	0,303	0,292	0,253	0,225	0,188	0,126
P5	0,370	0,375	0,328	0,294	0,245	0,165
P6	0,431	0,470	0,418	0,377	0,316	0,215

A Figura 37 representa o espectro obtido na barra P6, ao se injetar uma corrente supra-harmônica frequência de 50 kHz nessa mesma barra, já a Figura 38 apresenta o comportamento da propagação ao longo da rede.

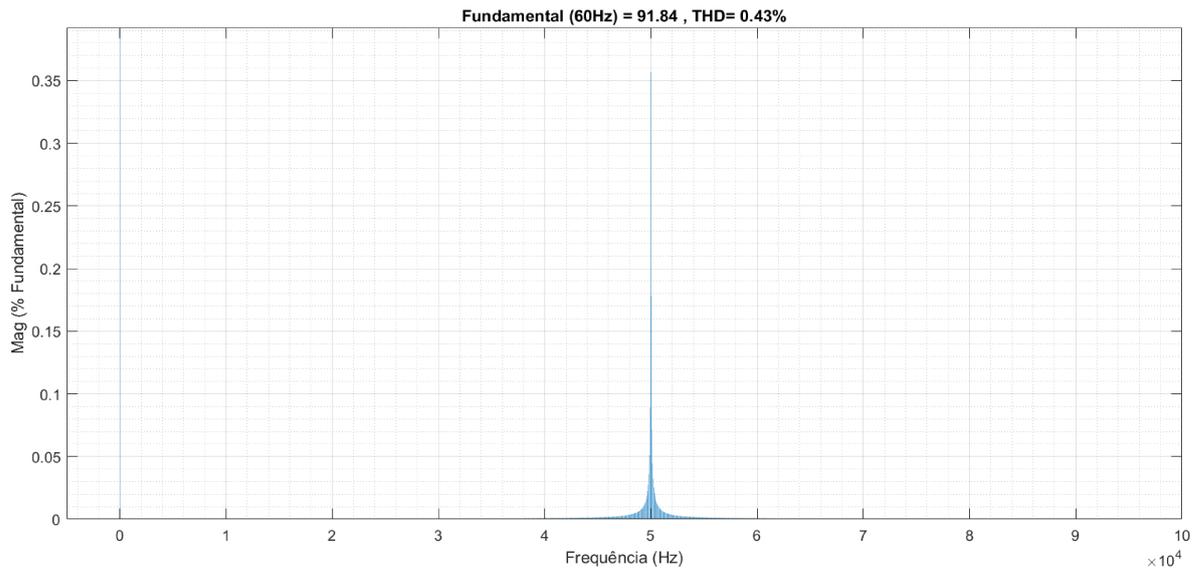


Figura 37 – Espectro de frequências na barra P6 para SH = 50 kHz, caso F.

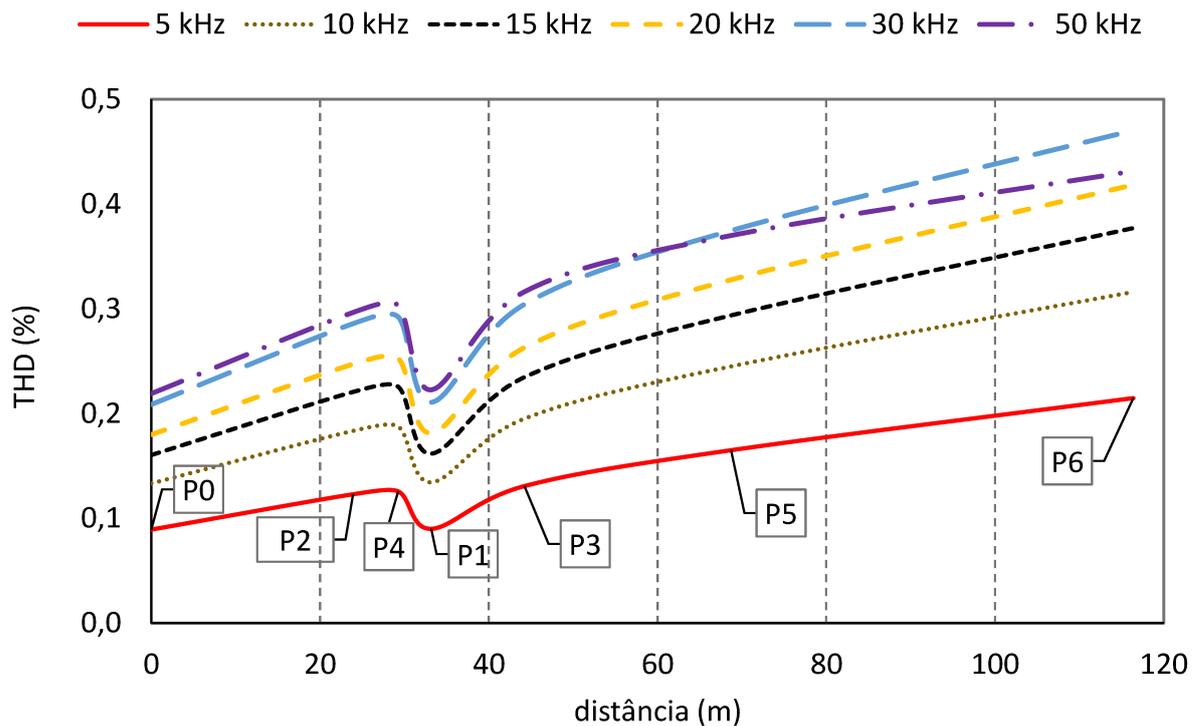


Figura 38 – Distorção harmônica de alta frequência ao longo da rede para o caso em que a fonte SH está localizada na barra P6

Nesse caso também foi possível observar que os maiores valores de THD ocorreram na frequência de 50 kHz até a barra P5, a partir de então os valores para 30 kHz foram ligeiramente superiores.

## 4.7 CASO G

Os resultados da taxa de distorção por barra e por frequência estão sintetizados na Figura 39, e na Tabela 16.

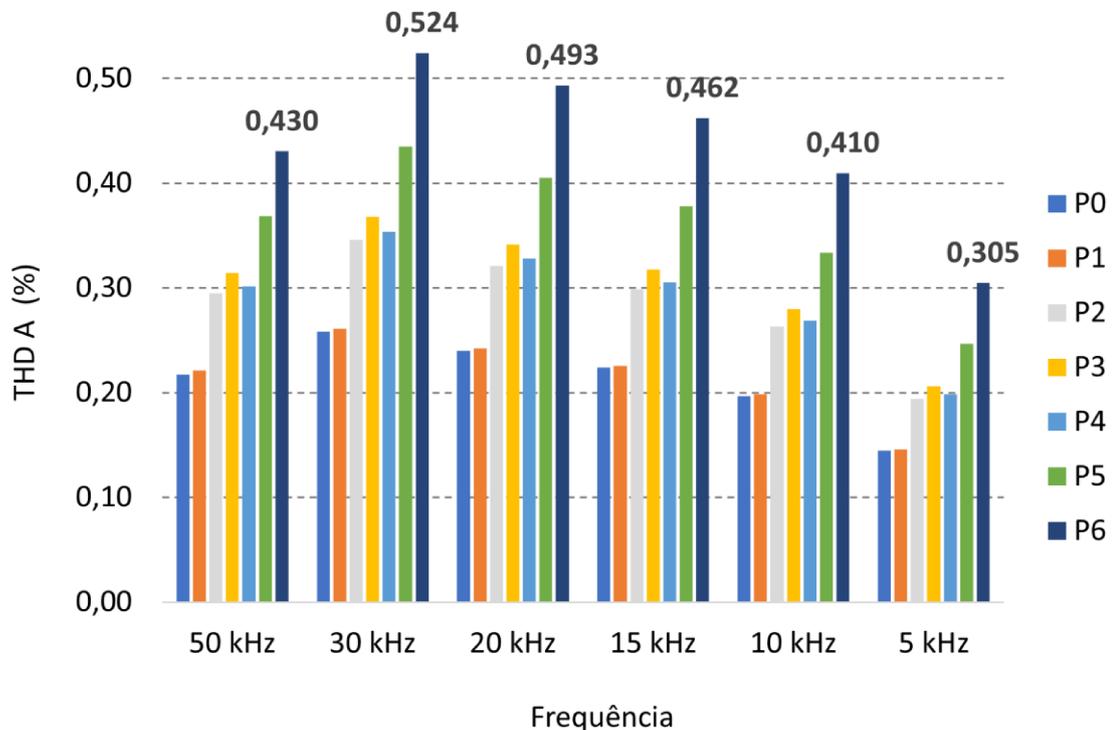


Figura 39 - Distorção harmônica de alta frequência em cada barra para a fontes SH alocadas nas barras P0 e P6.

Tabela 16 – Valores percentuais de THD de tensão da fase A em cada barra e para cada frequência no caso G.

Barra	THD (%)					
	50 kHz	30 kHz	20 kHz	15 kHz	10 kHz	5 kHz
P0	0,217	0,258	0,240	0,224	0,197	0,145
P1	0,221	0,261	0,242	0,225	0,198	0,146
P2	0,295	0,346	0,321	0,299	0,263	0,194
P3	0,314	0,368	0,341	0,318	0,280	0,206
P4	0,301	0,353	0,328	0,305	0,269	0,198
P5	0,368	0,435	0,405	0,378	0,334	0,247
P6	0,430	0,524	0,493	0,462	0,410	0,305

A Figura 40 representa o espectro obtido na barra P6 para a frequência de 30 kHz para o caso de duas fontes SH, uma na barra P0 e outra na barra P6.

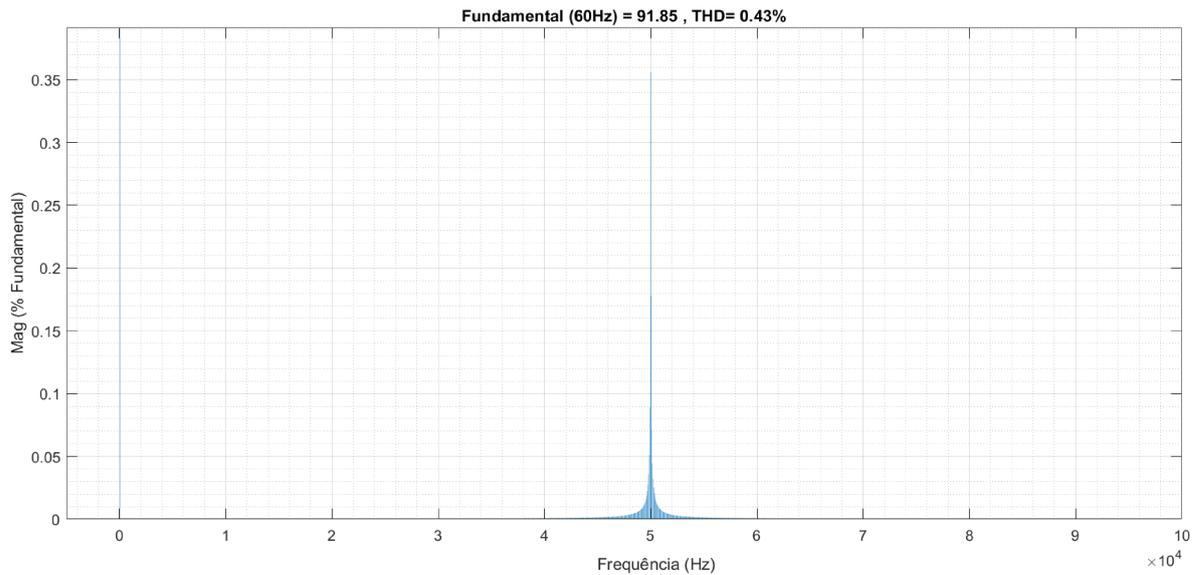


Figura 40 – Espectro de frequências na barra P6 para SH = 50 kHz, caso G.

A Figura 41 apresenta o comportamento da propagação supra-harmônica ao longo da rede.

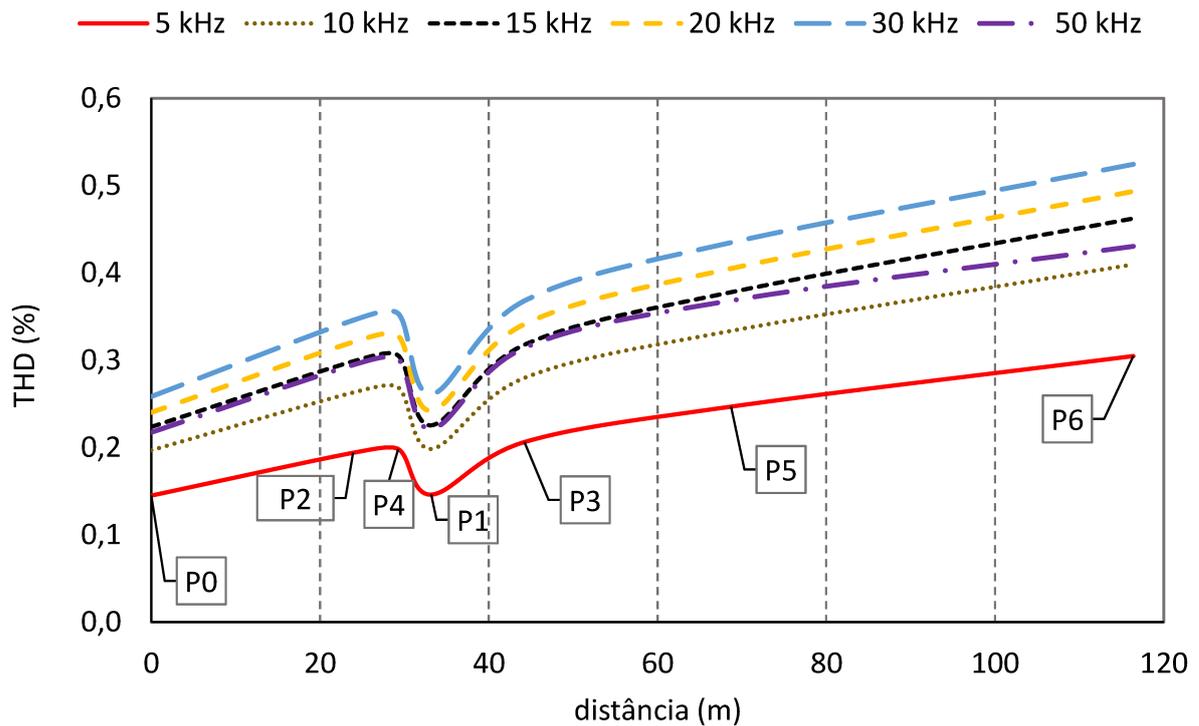


Figura 41 – Distorção harmônica de alta frequência ao longo da rede para o caso em que a fonte SH está localizada nas barras P0 e P6.

Dentre todos os casos analisados, esse obteve os maiores valores de THD, que ocorreram nas frequências de 30 kHz e 20 kHz. Os valores de THD para a frequência de 50 kHz foram iguais aos de 15 kHz até a barra P5 e após essa barra os valores foram ligeiramente inferiores.

## 4.8 CASO H

Os resultados da taxa de distorção por barra e por frequência ao se injetar duas correntes supra-harmônicas na barra P6 estão sintetizados na Figura 42, e na Tabela 17. A Figura 43 representa o espectro obtido na barra P6 e, a Figura 44 o comportamento da propagação ao longo da rede.

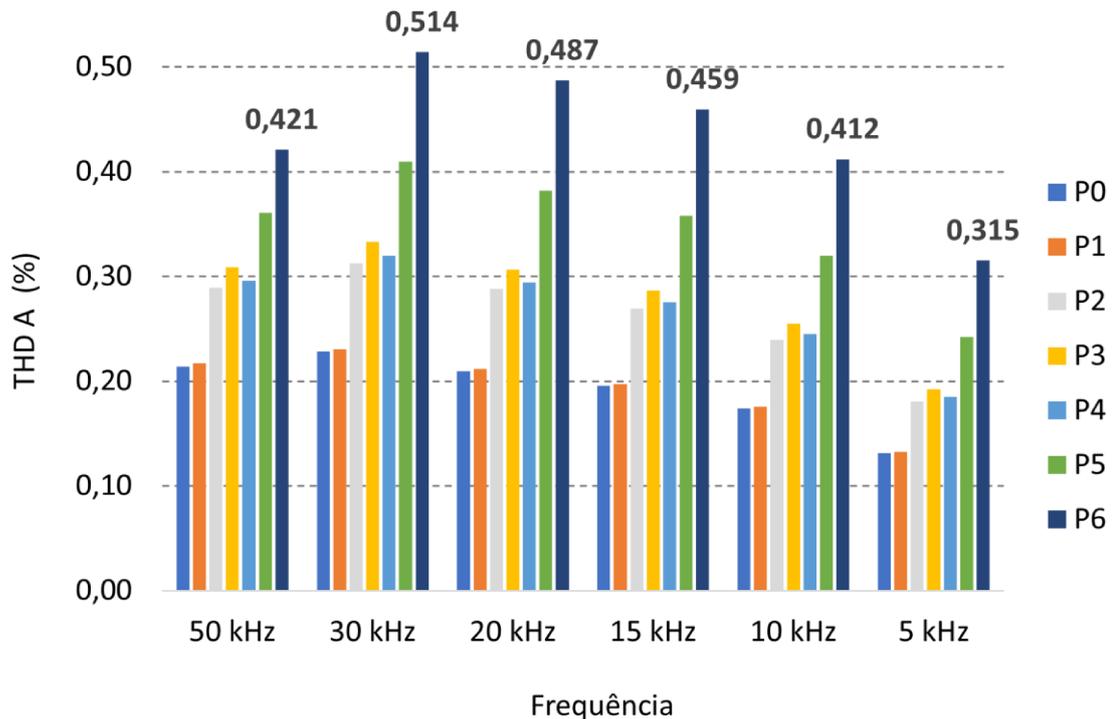


Figura 42 – Distorção harmônica de tensão da fase A em cada barra do circuito, para diferentes frequências, no caso da fonte SH alocada na barra P6.

Tabela 17 – Valores percentuais de THD de tensão da fase A em cada barra e para cada frequência no caso H.

Barra	THD (%)					
	50 kHz	30 kHz	20 kHz	15 kHz	10 kHz	5 kHz
P0	0,214	0,228	0,210	0,196	0,174	0,131
P1	0,217	0,231	0,211	0,197	0,175	0,132
P2	0,289	0,313	0,288	0,269	0,239	0,181
P3	0,309	0,333	0,306	0,286	0,255	0,192
P4	0,296	0,320	0,294	0,275	0,245	0,185
P5	0,361	0,410	0,382	0,358	0,320	0,242
P6	0,421	0,514	0,487	0,459	0,412	0,315

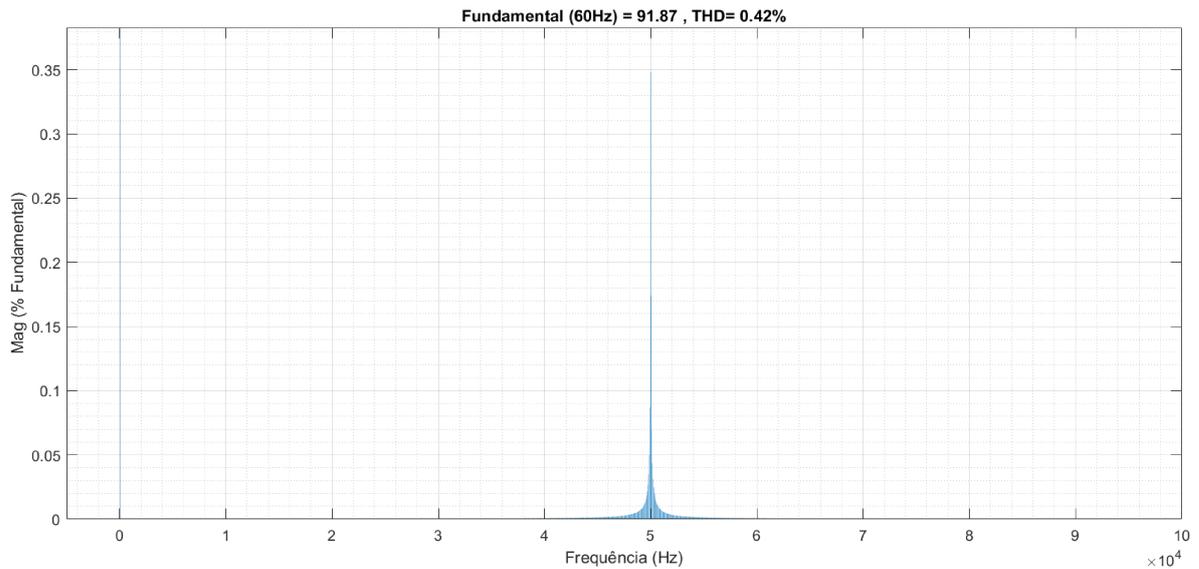


Figura 43 – Espectro de frequências na barra P6 para SH = 50 kHz, caso H.

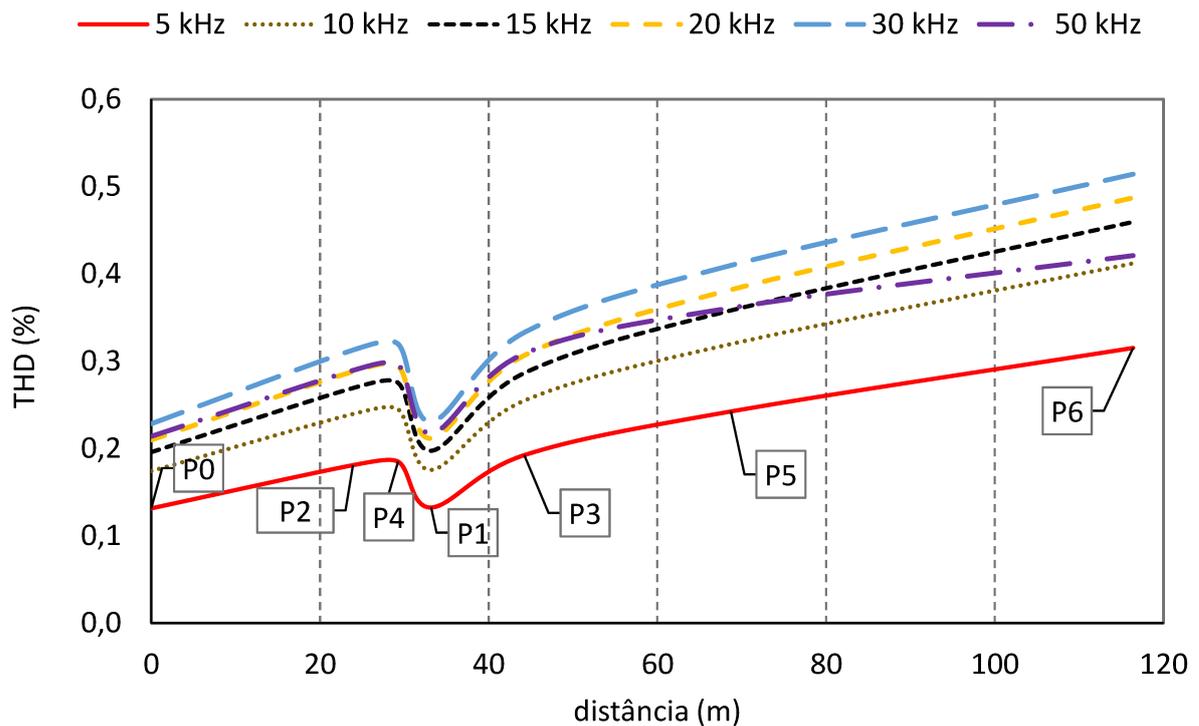


Figura 44 – Distorção harmônica de alta frequência ao longo da rede para o caso em que há duas fontes SH localizadas na barra P6.

Nota-se que os maiores valores de THD ocorreram na frequência de 30 kHz e que o THD para a frequência de 50 kHz foram iguais às de 20 kHz até a barra P3 e após essa barra foram ligeiramente inferiores.

Em relação ao caso F, onde apenas uma fonte SH foi alocada na barra P6, observou-se que para frequências mais baixas a variação no THD foi maior. Para a frequência de 50 kHz os valores de THD reduziram em 3%, já para a frequência de 5 kHz os valores aumentaram em quase 50%. Os valores de porcentagem dessa variação são mostrados na Tabela 18.

Tabela 18 – Relação em porcentagem entre o THD do caso H em relação ao caso F, em cada barra e para cada frequência.

<b>Barra</b>	<b>50 kHz</b>	<b>30 kHz</b>	<b>20 kHz</b>	<b>15 kHz</b>	<b>10 kHz</b>	<b>5 kHz</b>
P0	97,63%	109,43%	116,61%	122,07%	130,65%	147,25%
P1	97,63%	109,43%	116,61%	122,07%	130,65%	147,25%
P2	97,61%	109,41%	116,57%	122,02%	130,58%	147,13%
P3	97,61%	109,41%	116,57%	122,02%	130,58%	147,13%
P4	97,61%	109,41%	116,57%	122,02%	130,58%	147,13%
P5	97,59%	109,36%	116,50%	121,93%	130,45%	146,90%
P6	97,57%	109,33%	116,45%	121,87%	130,36%	146,75%

Foi possível observar nos oito casos analisados que a barra com maior distorção foi a barra P6. Esses resultados podem ser justificados pela resposta em frequência nessa barra.

A Figura 45 e a Figura 46 mostram a resposta em frequência para o caso base, onde o THD para todas as barras é zero, e a resposta em frequência para os casos onde fontes supra-harmônicas foram alocadas nas barras para os oito casos simulados, nas seis frequências consideradas.

De uma maneira geral, observa-se pela Figura 45, nos quatro primeiros casos, que o nível de impedância para a barra P6 é alto e aumentou ainda mais quando uma carga emissora de SH foi conectada.

Já nos quatro últimos casos simulados observa-se pela Figura 46 que o nível de impedância para a barra P6 diminuiu quando uma carga emissora de SH foi conectada.

Contudo, nas frequências consideradas nesse estudo (5 kHz, 10 kHz, 15 kHz, 20 kHz, 30 kHz e 50 kHz) os valores da impedância na barra 6 foram superiores ao do caso base, o que justifica os maiores valores de THD.

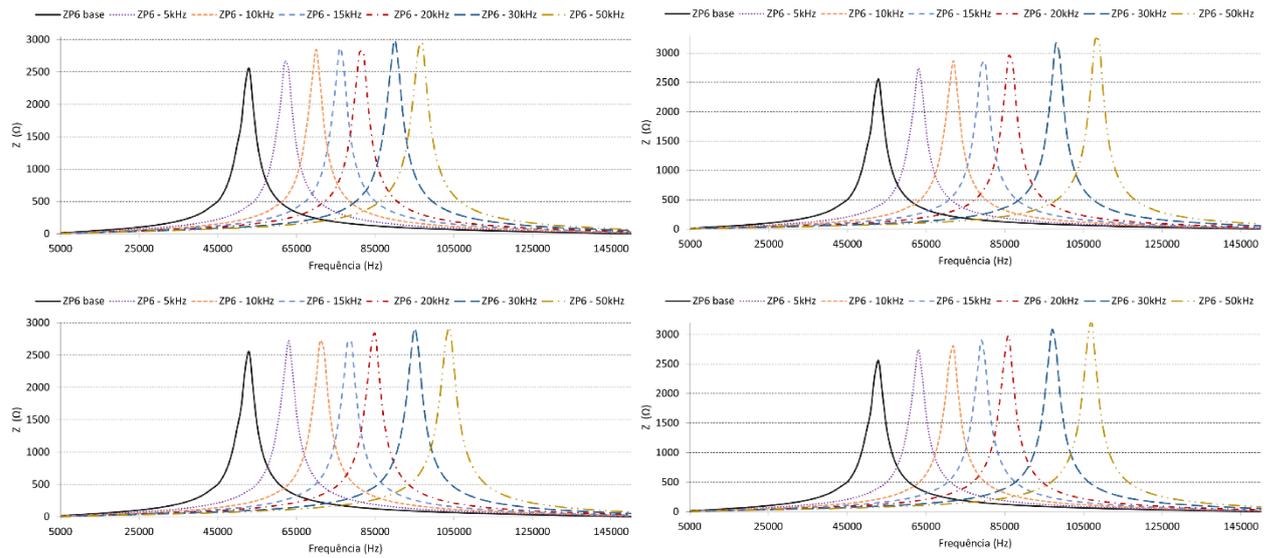


Figura 45 – Resposta em frequência barra P6 para os casos: A (superior esquerda), B (superior direita), C (inferior esquerda) e D (inferior direita).

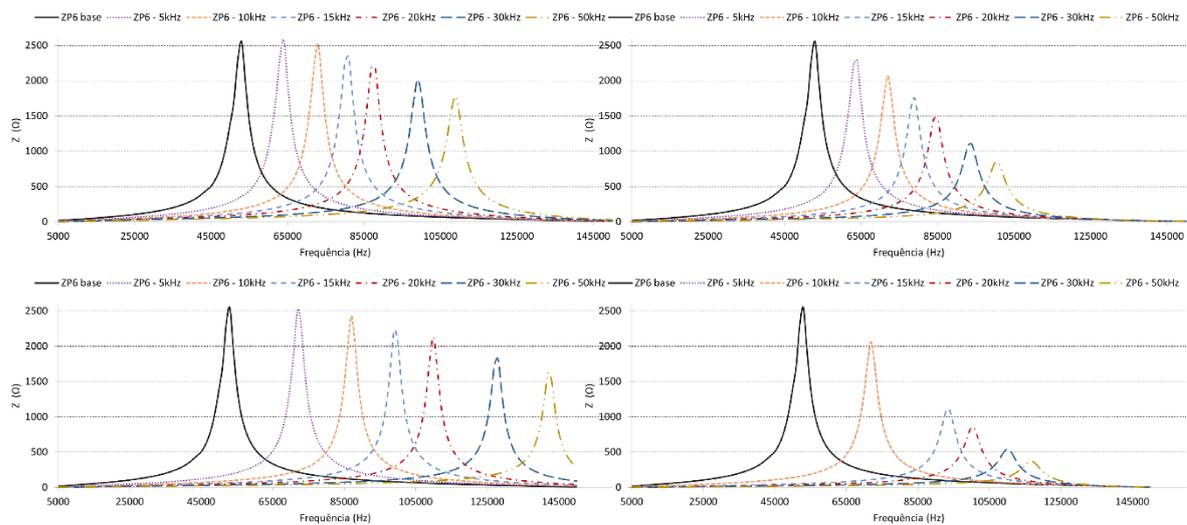


Figura 46 – Resposta em frequência barra P6 para os casos: E (superior esquerda), F (superior direita), G (inferior esquerda) e H (inferior direita).

## 4.9 INSERÇÃO DAS GDFV

### 4.9.1 Caso 1

A Tabela 19 apresenta as frequências consideradas para a primeira simulação considerando como fontes supra-harmônicas seis sistemas de geração fotovoltaica conectados ao sistema, cujas potências e localização já tinham sido apresentados na Tabela 7 e ilustrados na Figura 16 do capítulo anterior.

Tabela 19 – Frequências de chaveamento consideradas para cada GDFV para o caso 1.

Barra	Consumidor	Potência (kVA)	Fs (kHz)
P4	C5	8	50
P4	C6	4,25	30
P5	C9	11	20
P6	C10	10	10
P6	C12	10	15
P6	C13	10	5

Os resultados da taxa de distorção por barra e por frequência estão sintetizados na Figura 47 e na Tabela 20.

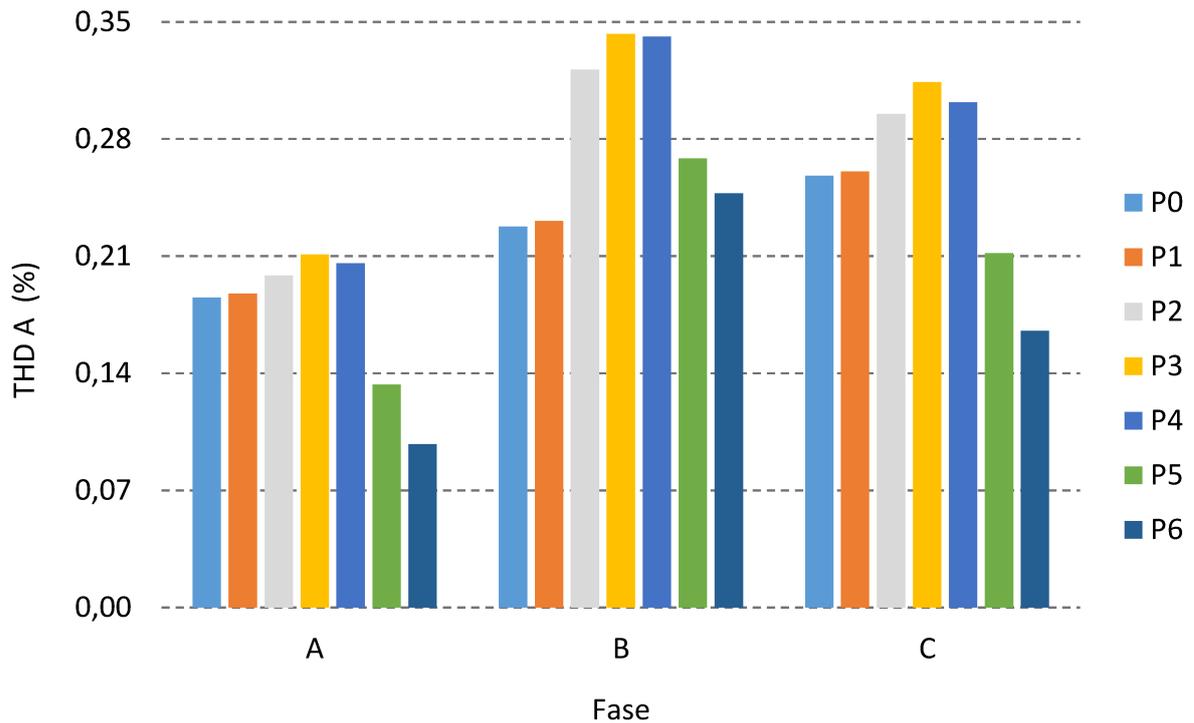


Figura 47 – Distorção harmônica de alta frequência em cada barra para as fontes SH providas de seis sistemas de GDFV.

Tabela 20 – Valores de THD por fase e por barra considerando a inserção das GDFV, caso 1.

Barra	THD (%)		
	A	B	C
P0	0,185	0,228	0,258
P1	0,188	0,231	0,261
P2	0,198	0,322	0,295
P3	0,211	0,343	0,314
P4	0,206	0,341	0,302
P5	0,133	0,268	0,212
P6	0,098	0,248	0,165

Observa-se um grande desequilíbrio por fase, sendo as fases B e C com uma maior taxa de distorção SH. A barra P3 encontra-se a uma distância de 23,66 m da barra P4 onde foram conectadas duas GDFV injetando uma corrente supra-harmônica em 30 kHz e 50 kHz. Em relação a P5 e P6, onde se encontram as outras fontes SH, essa barra se encontra a 63,11m e 92,48 m, respectivamente.

As figuras a seguir, Figura 48, Figura 49 e Figura 50, apresentam as formas de onda e espectro de frequência das três fases para a barra P3, que apresentou os maiores valores de THD.

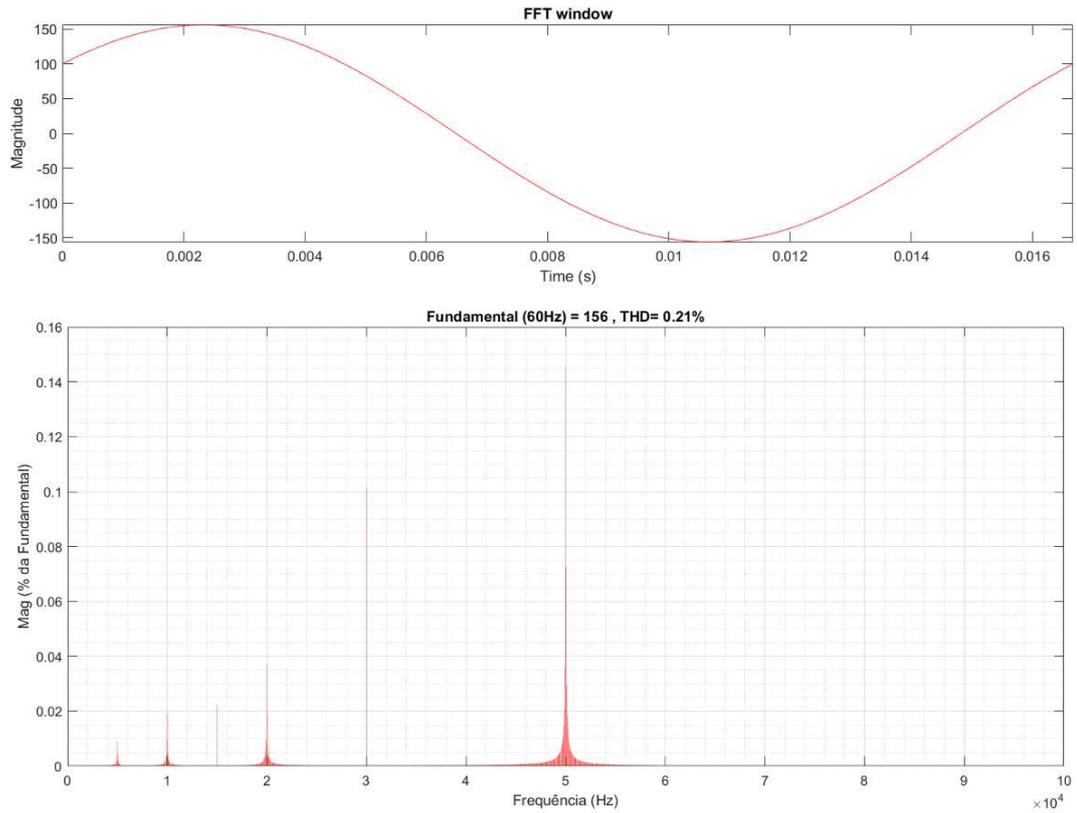


Figura 48 – Forma de onda da tensão na fase A e espectro na barra P3 considerando os seis sistemas fotovoltaicos conectados ao circuito.

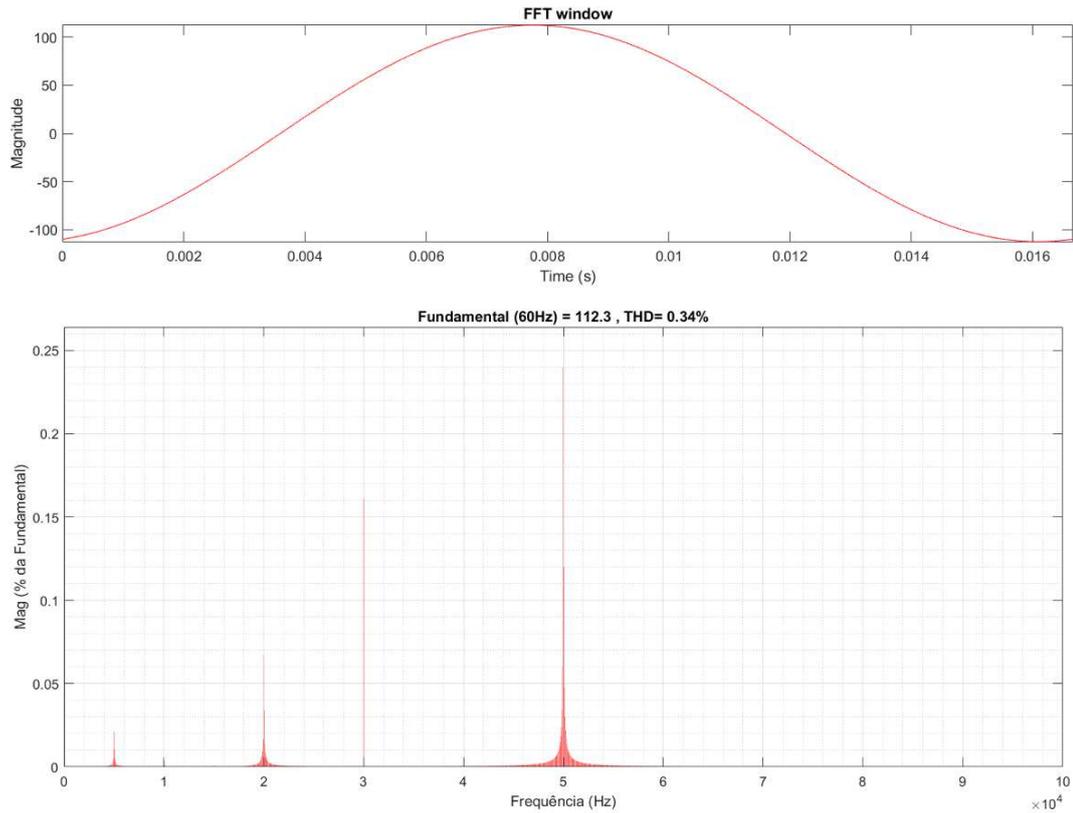


Figura 49 – Forma de onda da tensão na fase B e espectro na barra P3 considerando os seis sistemas fotovoltaicos conectados ao circuito

Observa-se que no espectro da fase B, os picos de frequência em 10 kHz e 15 kHz não aparecem visto que a os consumidores onde estão essas GDFV com essas frequências de emissão SH estão conectados nas fases AN.

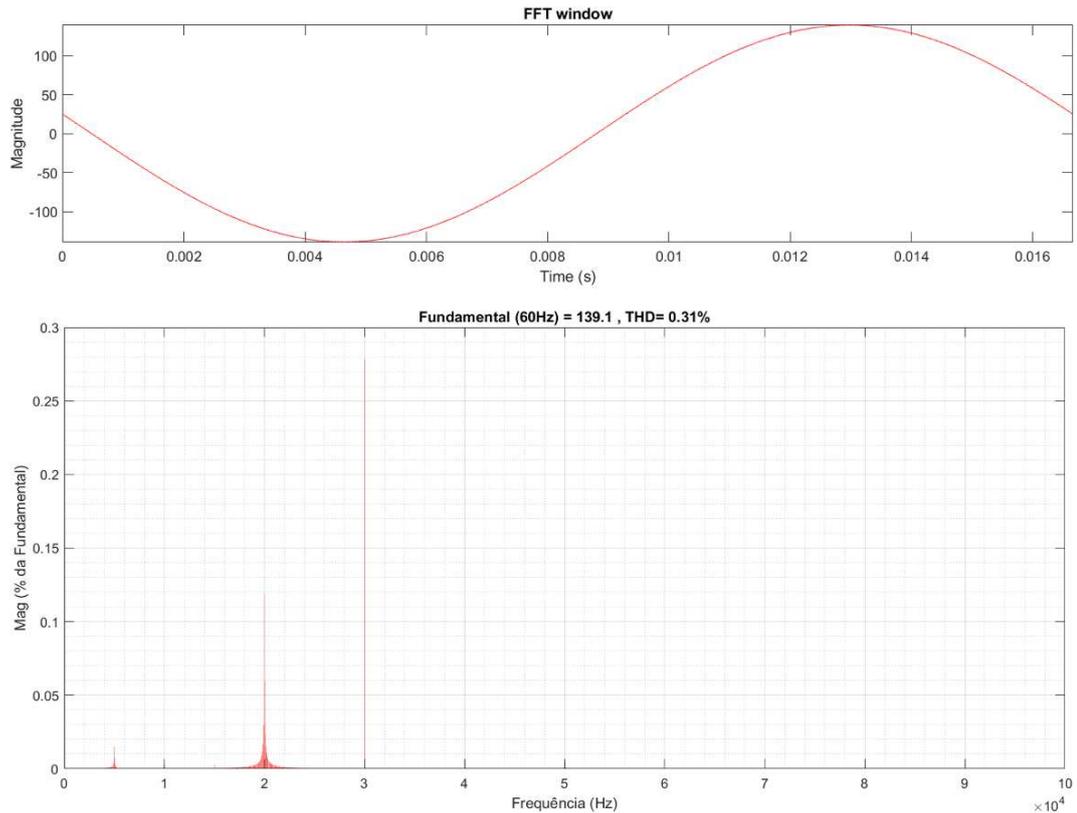


Figura 50 – Forma de onda da tensão na fase C e espectro na barra P3 considerando os seis sistemas fotovoltaicos conectados ao circuito

Observa-se que no espectro da fase C, os picos de frequência em 10 kHz, 15 kHz e 50 kHz não aparecem visto que os consumidores onde estão as GDFV com essas frequências de emissão SH estão conectados nas fases AB e AN.

A Figura 51 mostra a resposta em frequência nas barras do sistema considerando a conexão dos seis sistemas de GDFV.

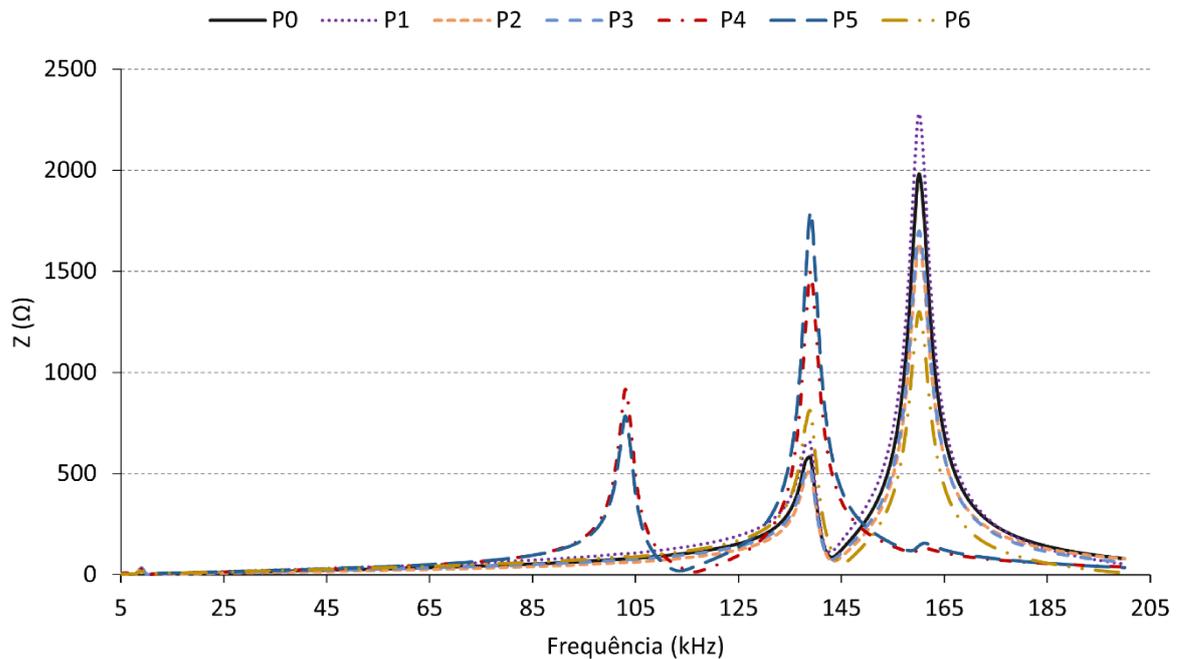


Figura 51 – Resposta em frequência para a barra P6 considerando a inserção dos seis sistemas de GDFV, caso 1.

#### 4.9.2 Caso 2

A Tabela 21 apresenta as frequências consideradas para a segunda simulação considerando como fontes supra-harmônicas seis sistemas de geração fotovoltaica conectados ao sistema. Vale ressaltar que a diferença entre o caso 1 e o caso 2 são as frequências de chaveamento considerados na simulação do sistema.

Tabela 21 – Frequências de chaveamento consideradas para cada GDFV para o caso 2.

Barra	Consumidor	Potência (kVA)	Fs (kHz)
P4	C5	8	5
P4	C6	4,25	20
P5	C9	11	50
P6	C10	10	10
P6	C12	10	15
P6	C13	10	30

Os resultados da taxa de distorção por barra e por frequência estão sintetizados na Figura 52 e na Tabela 22.

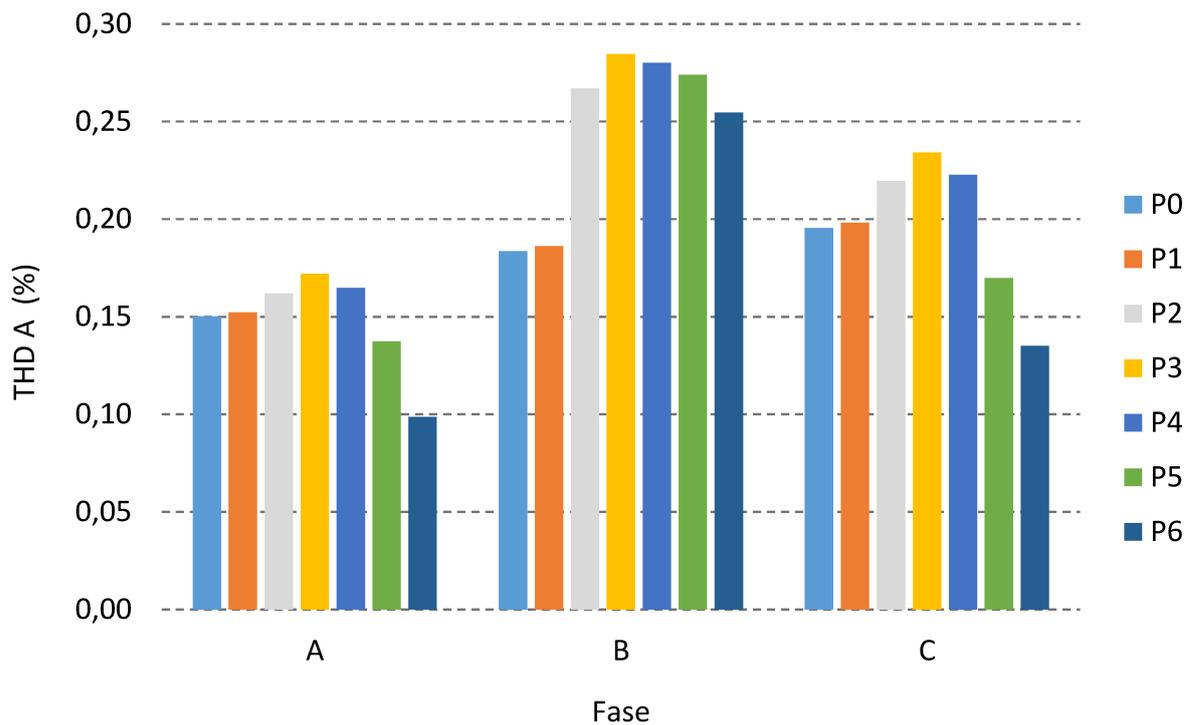


Figura 52 – Distorção harmônica de alta frequência em cada barra para as fontes SH provenientes de seis sistemas de GDFV.

Assim como para o caso anterior, observa-se um grande desequilíbrio por fase, sendo a fases B com uma maior taxa de distorção SH.

Tabela 22 – Valores de THD por fase e por barra considerando a inserção das GDFV, caso 2.

Barra	THD (%)		
	A	B	C
P0	0,150	0,184	0,195
P1	0,152	0,186	0,198
P2	0,162	0,267	0,220
P3	0,172	0,285	0,234
P4	0,165	0,280	0,223
P5	0,137	0,274	0,170
P6	0,099	0,255	0,135

As figuras a seguir, Figura 53, Figura 54 e Figura 55, apresentam as formas de onda e espectro de frequência das três fases para a barra P3, onde estão conectados os consumidores C7 e C8, que assim como para o caso 1 apresentou os maiores valores de THD por fase.

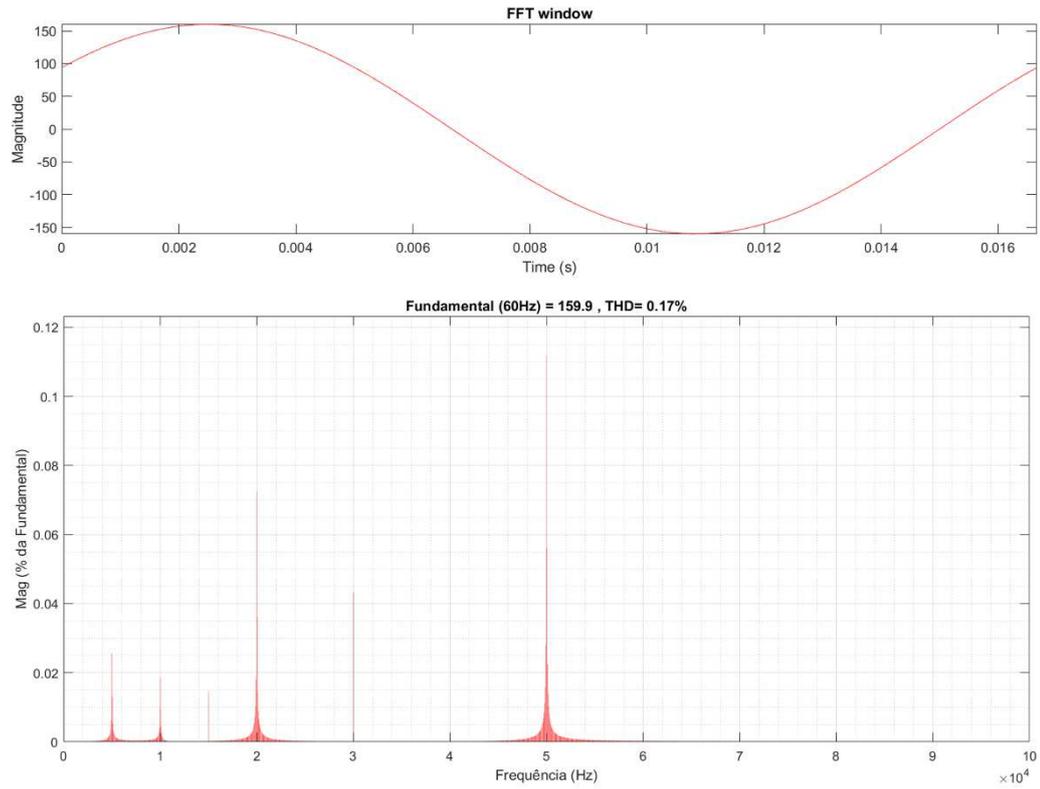


Figura 53 – Forma de onda da tensão na fase C e espectro na barra P4 considerando os seis sistemas fotovoltaicos conectados ao circuito.

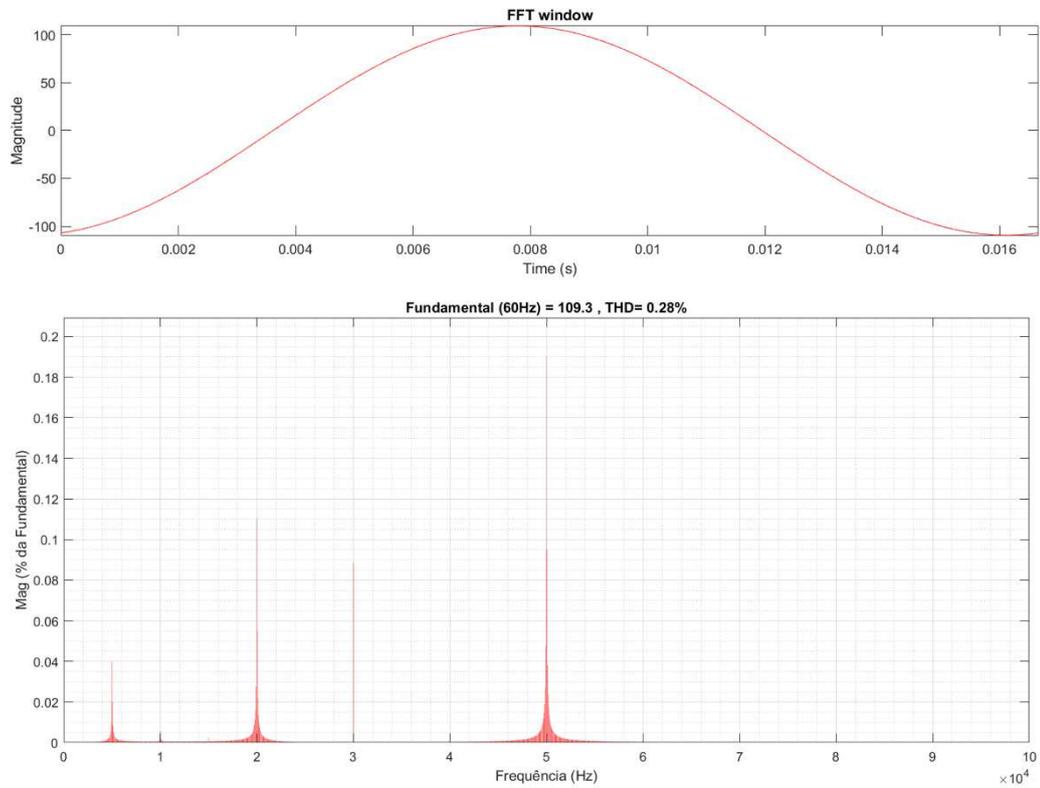


Figura 54 – Forma de onda da tensão na fase B e espectro na barra P6 considerando os seis sistemas fotovoltaicos conectados ao circuito.

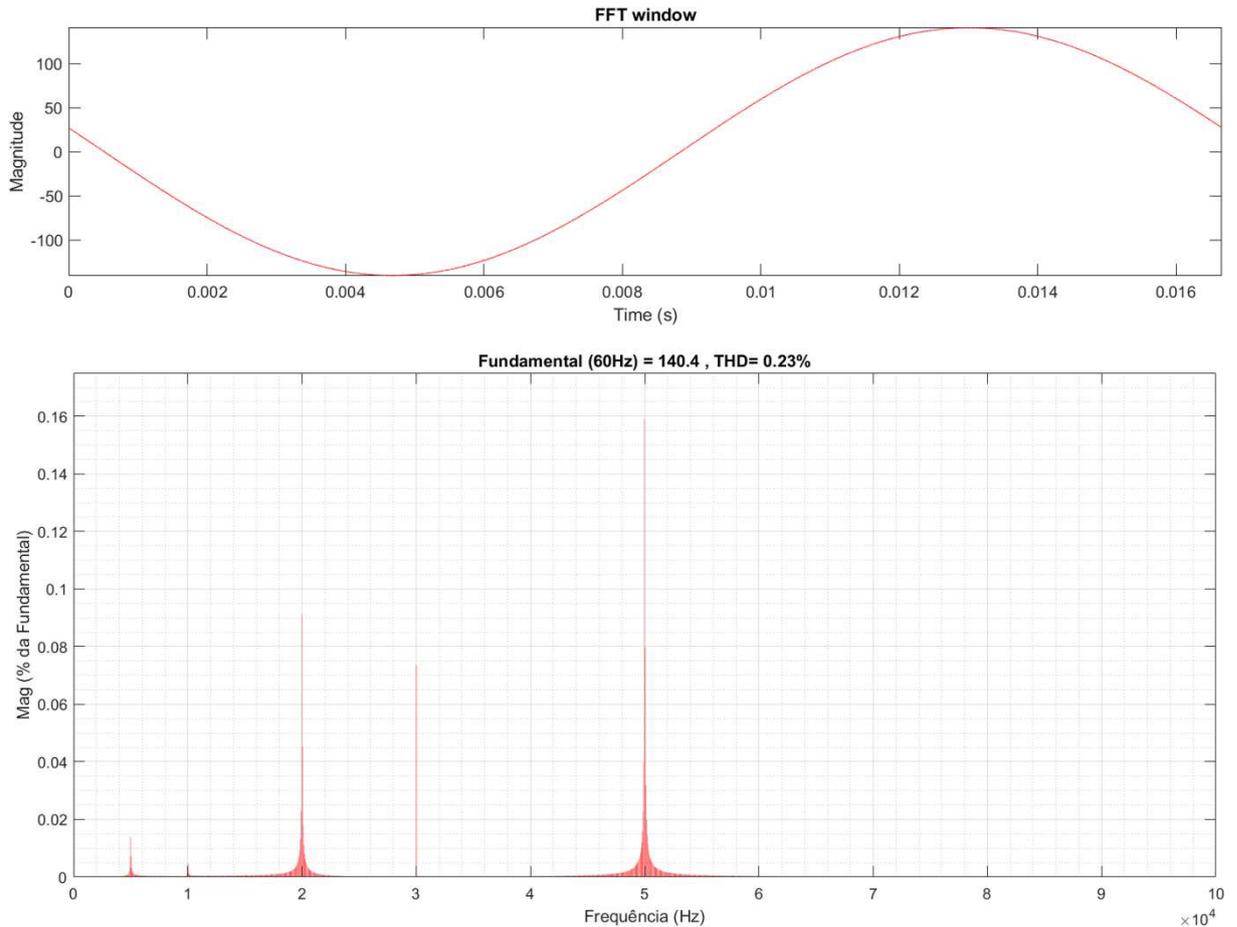


Figura 55 – Forma de onda da tensão na fase B e espectro na barra P6 considerando os seis sistemas fotovoltaicos conectados ao circuito.

A partir dos resultados mostrados, observa-se que os valores de THD reduziram em relação ao caso anterior, mas o padrão do caso 1 se manteve com pouca variação independente das mudanças de frequência de chaveamento das GDFV.

A Figura 56 mostra a resposta em frequência nas barras do sistema considerando a conexão dos seis sistemas de GDFV.

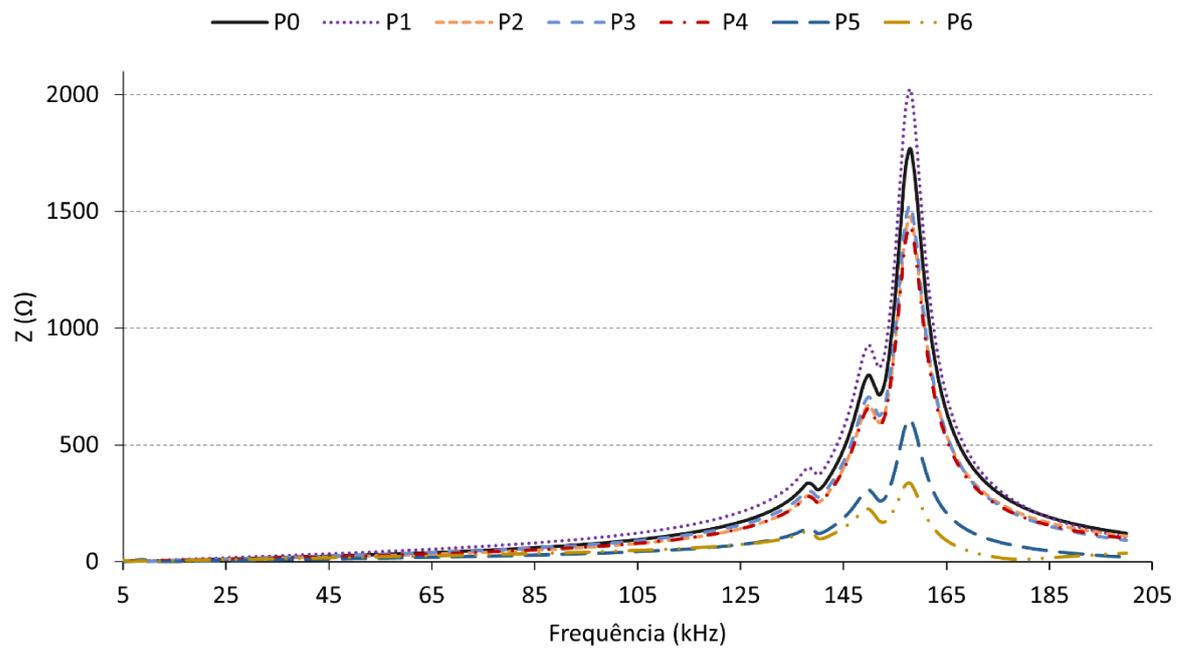


Figura 56 – Resposta em frequência para a barra P6 considerando a inserção dos seis sistemas de GDFV, caso 2.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

O aumento de equipamentos conectados à rede emitindo harmônicas em alta frequência, como inversores de sistemas fotovoltaicos e carregadores de veículos elétricos, trouxe uma nova preocupação para a área da qualidade de energia. O impacto das emissões e propagação das supra-harmônicas na rede ainda é um assunto recente cujos estudos estão em voga.

Nesse contexto, o objetivo dessa dissertação foi analisar a propagação de tensões supra-harmônicas através da simulação no *Simulink* de um circuito secundário de distribuição real. Para isso, foi feita uma revisão bibliográfica sobre o tema e apresentado nos capítulos 2 e 3.

O capítulo 4, apresentou como foi feita a modelagem do sistema no *Simulink*, assim como das cargas supra-harmônicas. Para uma simulação mais condizente com a realidade utilizou-se do modelo PI para as impedâncias da linha e filtros EMC para as cargas supra-harmônicas.

Em suma, os resultados mostraram maiores valores de distorção supra-harmônicas para maiores frequências, mas ainda assim os valores foram relativamente pequenos. Também não foi possível observar uma correlação entre valores de THD com a distância física entre a barra onde está localizada a fonte emissora.

Constatou-se que as emissões supra-harmônicas provocadas pelas correntes de alta frequência não se propagaram pela rede devido ao caminho de baixa impedância das capacitâncias intrínsecas dos condutores elétricos e por meio do elemento capacitivo contido nas estruturas dos filtros EMC presente nos equipamentos emissores das SH.

Dessa forma, os filtros EMC impedem que altos níveis de SH, provenientes do próprio equipamento (emissão primária) sejam injetados na rede e interfiram nos equipamentos da vizinhança, assim como previne que as emissões provenientes de aparelhos da vizinhança (emissão secundária), adentrem no equipamento no qual ele realiza o acoplamento.

Entretanto, as limitações do estudo são reconhecidas, visto que as simulações apresentam simplificações como a consideração das cargas como fontes supra-harmônicas puras injetando os mesmos valores de corrente SH pré-determinados. Ademais, as simulações não consideram a compensação de reativo por banco de capacitores, prática comum das concessionárias de energia. Adicionalmente, os resultados do ponto de vista computacional não consideram mau funcionamento de equipamentos que podem acontecer em situações reais como o sobreaquecimento dos componentes de filtros EMC submetidos a níveis de distorção supra-harmônicas do circuito ao qual está inserido.

Portanto, pode se concluir que apesar de filtros EMC serem bons atenuadores de SH, eles devem estar associados a outras técnicas de mitigação de forma a garantir maior segurança ao equipamento e a rede.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Essa dissertação visou contribuir minimamente com uma temática tão abrangente quanto é o tema das supra-harmônicas. É notável que existe um universo relativamente extenso para trabalhos futuros que poderão tomar por base essa dissertação e outras relacionadas. A seguir, são apresentadas algumas sugestões a serem exploradas em possíveis trabalhos futuros:

- Fazer uma modelagem mais detalhada de todas as cargas do circuito, tanto das cargas harmônicas (de baixa frequência), como das cargas emissoras supra-harmônicas, a fim de se considerar a interação de todas as partes existentes no sistema.
- Calcular os parâmetros dos filtros EMC existentes internamente aos equipamentos a partir de diferentes metodologias propostas e comparar os resultados das simulações.
- Considerar a emissão de harmônicas de alta frequência e seus múltiplos, além de diferentes valores para as correntes supra-harmônicas.
- Considerar nas simulações parâmetros dinâmicos para a seção circuito PI de linhas de distribuição sob altas frequências.
- Comparar as simulações com medições reais realizadas em circuitos secundários de distribuição.

## Referências Bibliográficas

- [1] R. Fantoni, F. Fava, D. Nadalin e F. Blas, “O futuro da mobilidade no Brasil: uma rota para eletrificação,” McKinsey & Corporation, 27 Janeiro 2023. [Online]. Available: [www.mckinsey.com.br](http://www.mckinsey.com.br). [Acesso em 5 Maio 2023].
- [2] A. Emanuel e A. McEachern, “Electric power definitions: A debate,” *In Proceedings of the IEEE Power & Energy Society (PES) General Meeting*, pp. 21-25, July 2013.
- [3] R. M. Vines, H. J. Trussell, L. J. Gale e J. J. Ben O'Neal, “Noise on Residential Power Distribution Circuits,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, pp. 161-168, November 1984. <https://doi.org/10.1109/TEMC.1984.304217>
- [4] S. K. Rönnberg, M. H. Bollen, H. Amaris, G. W. Chang, I. Y. Gu, Ł. H. Kocewiak, J. Meyer, M. Olofsson, P. F. Ribeiro e J. Desmet, “On waveform distortion in the frequency range of 2 kHz–150 kHz—Review and research challenges,” *Electric Power Systems Research*, pp. 1-10, 9 May 2017. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.04.032>
- [5] CENELEC, *E. 50065-1: signalling on low voltage electrical installations in the frequency range 3 khz to 148.5 khz,*. Part 1: General requirements, requence bands and electromagnetic disturbances, European Committee for Electrotechnical Standardization, 2001.
- [6] A. Larsson, *High Frequency Distortion in Power Grids due to Electronic Equipment*, Luleå University of Technology Sweden: Licentiate Thesis, 2006.
- [7] A. Larsson, *On High-Frequency Distortion in Low-Voltage Power Systems*, Luleå University of Technology: Doctoral Thesis, 2011.
- [8] S. Galli, A. Scaglione e Z. Wang, “Power Line Communications and the Smart Grid,” *2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, pp. 304-308, 04-06 October 2010. <https://doi.org/10.1109/SMARTGRID.2010.5622060>
- [9] A. Larsson e M. H. J. Bollen, “Emission and immunity of equipment in the frequency range 2 to 150 kHz,” *IEEE Bucharest PowerTech Conference*, pp. 1-5, 28th June - 2nd July 2009. <https://doi.org/10.1109/PTC.2009.5282041>
- [10] R. Torquato, W. Xu, W. Freitas, J. Lepka e R. Pascal, “Propagation characteristics of high-frequency harmonics in distribution systems,” *IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, pp. 1-5, 17-21 July 2016. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2016.7741220>

- [11] J. Meyer, V. Khokhlov, M. Klatt, J. Blum, C. Waniek, T. Wohlfahrt e J. Myrzik, “Overview and Classification of Interferences in the Frequency Range 2–150 kHz (Supraharmonics),” em *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Amalfi, 2018. <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2018.8445344>
- [12] C. Unger, K. Krüger e M. e. Z. R. Sonnenschein, “Disturbances Due to Voltage Distortion in the kHz Range – Experiences and Mitigation Measures,” *18th International Conference on Electricity*, pp. 1-4, 6-9 June 2005. <https://doi.org/10.1049/cp:20051018>
- [13] M. Klatt, J. Meyer, P. Schegner, A. Koch, J. Myrzik, T. Darda e G. Eberl, “Emission levels above 2 kHz - Laboratory results and survey measurements in public low voltage grids,” em *22nd International Conference on Electricity Distribution*, Stockholm, 2013. <https://doi.org/10.1049/cp.2013.1102>
- [14] G. Singh, E. R. Collins, S. K. Rönnerberg, E. O. A. Larsson e M. H. J. Bollen, “Impact of high frequency conducted voltage disturbances on LED driver circuits,” em *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Chicago, 2017. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2017.8274378>
- [15] L. Jiang, G. Ye, Y. Xiang, V. Cuk e J. Cobben, “Influence of high frequency current harmonics on (Smart) energy meters,” em *50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Stoke on Trent, 2015. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2015.7339771>
- [16] I. 61000-2-2, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-2: Environment – Compatibility levels for lowfrequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems*, 2018.
- [17] L. Fumagalli, G. Borgone e G. Faggioni, “ELVIS (Enel Low Voltage Identification System): Improving narrowband PLC communication performance by means of electrical characteristics measurement of distribution line,” *23rd International Conference on Electricity Distribution*, pp. 1-5, 15-18 June 2015.
- [18] S. K. Ronnberg, M. H. J. Bollen e M. Wahlberg, “Interaction Between Narrowband Power-Line Communication and End-User Equipment,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 2034-2039, 09 June 2011. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2011.2130543>
- [19] K. Temma, F. Ishiguro, N. Toki e I. e. P. J. J. Iyoda, “Clarification and Measurements of High Frequency Resonance by a Voltage Sourced Converter,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 450-457, January 2005. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.839723>

- [20] Powerside, “Conducted emissions in the 2kHz to 150kHz band Supra-harmonics,” PQube 3® Application Note v.3.0, [Online]. Available: <https://help.powerside.com/knowledge/application-note-conducted-emissions-in-the-2khz-to-150khz-band-supra-harmonics-application-note>. [Acesso em 21 February 2023].
- [21] G. Singh, T. Cooke, J. Johns, L. Vega, A. Valdez e G. Bull, “Telephone Interference from Solar PV Switching,” em *20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP)*, Naples, 2022. <https://doi.org/10.1109/ICHQP53011.2022.9808805>
- [22] J. Lambrechts e J. Beukes, “Active High Pass Filter for the Measurement of Supraharmonics,” em *20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP)*, Naples, 2022. <https://doi.org/10.1109/ICHQP53011.2022.9808582>
- [23] T. L. Floyd, *Sistemas digitais: fundamentos e aplicações*, Bookman Companhia Editora Ltda, 2007.
- [24] “Acquiring an Analog Signal: Bandwidth, Nyquist Sampling Theorem, and Aliasing,” National Instruments, 30 March 2023. [Online]. Available: <https://www.ni.com/pt-br/shop/data-acquisition/measurement-fundamentals-main-page/analog-fundamentals/acquiring-an-analog-signal--bandwidth--nyquist-sampling-theorem-.html>. [Acesso em 06 May 2023].
- [25] C. Unger, “Frequencies above the Harmonic Range – Challenge of the Future?,” em *Conference Proceedings IPEC*, Singapore, 2008.
- [26] T. Wohlfahrt, C. Waniek, J. M. A. Myrzik, J. Meyer e P. Schegner, “Design Recommendations for Future Household Devices concerning their High Frequency Emission in the Range between 2 kHz and 150 kHz,” em *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, Turin, 2017. <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2017.8260259>
- [27] A. Moreno-Muñoz, A. Gil-de-Castro, S. K. Rönnerberg, M. Bollen e E. Romero-Cadval, “Ongoing work in CIGRE working groups on supraharmonics from power-electronic converters,” em *23rd International Conference on Electricity Distribution*, Lyon, 2015.
- [28] S. K. Rönnerberg, A. Gil-de-Castro, M. Bollen, A. Moreno-Muñoz e E. Romero-Cadval, “Supraharmonics from Power Electronics Converters,” em *9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE)*, Costa da Caparica, 2015. <https://doi.org/10.1109/CPE.2015.7231133>

- [29] S. K. Rönnberg, A. G.-d. Castro, A. Moreno-Munoz, M. H. Bollen e J. Garrido, “Solar PV Inverter Supraharmonics Reduction with random PWM,” em *11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering*, Cadiz, Spain, 2017. <https://doi.org/10.1109/CPE.2017.7915248>
- [30] J. Garrido, A. Gil-de-Castro, V. Pallares-lopez, T. Morales-Leal e A. Moreno-Munoz, “Supraharmonics emission from LED lamps: A reduction proposal based on random pulse-width modulation,” *Electric Power Systems Research* 164, pp. 11-19, 23 July 2018. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.07.032>
- [31] F. M. F. Santos, *Qualidade de energia - comparação das normas IEC 61000-3-2 e IEEE 519*, Rio de Janeiro: Trabalho de conclusão de curso, 2007.
- [32] *IEC 61000-4-7: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto*, 2009.
- [33] *IEC 61000-4-30: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods*, 2021.
- [34] L. Alfieri, A. Bracale, G. Carpinelli e A. Larsson, “Accurate Assessment of Waveform Distortions up to 150 kHz due to Fluorescent Lamps,” em *6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, Santa Margherita Ligure, 2017. <https://doi.org/10.1109/ICCEP.2017.8004756>
- [35] G. A. Nascimento, T. M. Mendes, L. R. Silva, C. A. Duque e P. F. Ribeiro, “Análise de Supraharmônicos com Detector de Quase-Pico,” em *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*, 2020. <https://doi.org/10.48011/asba.v2i1.1466>
- [36] C. E. M. Rodrigues, *Análise de supra harmônicos em equipamentos eletrônicos e caracterização utilizando a transformada wavelet*, Universidade Federal do Pará, Belém: Dissertação de mestrado, 2018.
- [37] M. Lundmark, *The Zone Concept Design of Low-Voltage Installations Considering the Spread of High Frequency Harmonics*, Luleå University of Technology, Sweden: Doctoral Thesis, 2010.
- [38] Á. Espín-Delgado, T. Busatto, V. Ravindran, S. K. Rönnberg e J. Meyer, “Evaluation of Supraharmonic Propagation in LV Networks Based on the Impedance Changes Created by Household Devices,” em *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe*

- (ISGT-Europe), The Hague, 2020. <https://doi.org/10.1109/ISGT-Europe47291.2020.9248928>
- [39] E. Larsson e M. H. J. Bollen, “Measurement result from 1 to 48 fluorescent lamps in the frequency range 2 to 150 kHz,” em *Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010*, Bergamo, 2010. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2010.5625395>
- [40] S. Rönnerberg e M. Bollen, “Propagation of Supraharmonics in the Low Voltage Grid,” Energiforsk - Report:461, Sweden, 2017.
- [41] S. K. Ronnberg, M. Wahlberg, M. H. J. Bollen e C. Lundmark, “Equipment currents in the frequency range 9–95 kHz, measured in a realistic environment,” em *13th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Wollongong, 2008. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2008.4668745>
- [42] D. Amaripadath, *Development of Tools for Accurate Study of Supraharmonic Emissions in Smart Grids*, Université Bourgogne Franche-Comté, France: Doctoral Thesis, 2020.
- [43] S. Rönnerberg, A. Larsson e M. Bollen, “A simple model for interaction between equipment at a frequency of some tens of kHz,” *21st International Conference on Electricity Distribution*, pp. 1-4, 6-9 June 2011.
- [44] C. Leroi e E. De Jaeger, “Conducted disturbances in the frequency range 2–150 KHz: Influence of the LV distribution grids,” em *23rd International Conference on Electricity Distribution*, Lyon, 2015.
- [45] R. Peña-Alzola, M. Liserre, F. Blaabjerg, M. Ordonez e Y. Yang, “LCL-Filter Design for Robust Active Damping in Grid-Connected Converters,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, pp. 2192-220, 07 October 2014. <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2361604>
- [46] S. Rönnerberg e M. Bollen, “Power quality issues in the electric power system of the future,” *The Electricity Journal*, pp. 49-61, December 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2016.11.006>
- [47] E. O. A. Larsson e C. M. e. B. M. H. J. “. Lundmark, “Measurement of Current Taken by Fluorescent Lights in the Frequency Range 2 – 150 kHz,” *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society*, pp. 18-22, June 2006. <https://doi.org/10.1109/PES.2006.1709417>

- [48] E. Larsson, C. Lundmark e M. Bollen, "Distortion of Fluorescent Lamps in the Frequency Range 2-150 kHz," *International Conference on Harmonics and Quality of Power*, October 2006. <https://doi.org/10.1109/PES.2006.1709417>
- [49] S. T. Tentzerakis e S. A. Papathanassiou, "An Investigation of the Harmonic Emissions of Wind Turbines," *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, pp. 150-158, March 2007. <https://doi.org/10.1109/TEC.2006.889607>
- [50] S. Schöttke1, J. Meyer, P. Schegner e S. Bachmann, "Emission in the Frequency Range of 2 kHz to 150 kHz caused by electrical vehicle charging," *International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2014)*, pp. 620-625, 1-4 September 2014. <https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2014.6930980>
- [51] J. Meyer, S. Mueller, S. Ungethuem, X. Xiao, A. Collin e S. Djokic, "Harmonic and supraharmonic emission of on-board electric vehicle chargers," *IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition-Latin America (PES T&D-LA)*, 20-24 September 2016. <https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2016.7805641>
- [52] R. Torquato, W. Freitas, G. R. T. Hax, A. R. Donadon e R. Moya, "High frequency harmonic distortions measured in a Brazilian solar farm," *17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, pp. 623-627, 16-19 October 2016. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2016.7783482>
- [53] A. Mohos e J. Ladányi, "Emission Measurement of a Solar Park in the Frequency Range of 2 to 150 kHz," *International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2018)*, pp. 1024-1028, 27-30 August 2018. <https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2018.8485049>
- [54] S. Ronnberg, M. Wahlberg, M. Bollen, A. Larsson e M. Lundmark, "Measurements of interaction between equipment in the frequency range 9 to 95 kHz," *CIGRE - The 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - Part 2*, pp. 1-6, 08-11 June 2009. <https://doi.org/10.1049/cp.2009.0630>
- [55] S. K. Ronnberg, M. Wahlberg, E. Larsson, M. H. J. Bollen e C. Lundmark, "Interaction between equipment and power line Communication: 9-95 kHz," *IEEE Bucharest PowerTech*, pp. 1-5, 28-02 June-July 2009. <https://doi.org/10.1109/PTC.2009.5282131>
- [56] D. Frey, J.-L. Schanen, S. Quintana, M. Bollen e C. Conrath, "Study of High Frequency Harmonics Propagation in Industrial Networks," *International Symposium on Electromagnetic Compatibility-EMC EUROPE*, pp. 1-5, September 2012. <https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2012.6396774>

- [57] T. Slangen, v. W. T., V. Čuk e S. Cobben, “The propagation and interaction of supraharmonics from electric vehicle chargers in a low-voltage grid,” *Energies* 13, p. 3865, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13153865>
- [58] S. S. Letha, M. Bollen, S. Rönnberg e A. Delgado, “Propagation of supraharmonics in a medium-voltage network,” *CIGRE Conference*, pp. 638-642, 20 – 23 September 2021. <https://doi.org/10.1049/icp.2021.1763>
- [59] G.-d. C. A., M.-M. A., G. J., R. S. K., P.-G. E. J. e M. T., “Supraharmonics reduction in NPC inverter with random PWM,” em *IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Edinburgh, 2017.
- [60] S. Zhuang, W. Zhao, Q. Wang e S. Huang, “A New Measurement Method for Supraharmonics in 2-150 kHz,” em *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*, Paris, 2018. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8500793>
- [61] K. V., M. J., G. A., B. T. e R. S., “Comparison of Measurement Methods for the Frequency Range 2–150 kHz (Supraharmonics) Based on the Present Standards Framework,” *IEEE Access* vol. 8, pp. 77618 - 77630, 15 April 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2987996>
- [62] A. Novitskiy, S. Schlegel e D. Westermann, “Measurements and Analysis of Supraharmonic Influences in a MV/LV Network Containing Renewable Energy Sources,” em *Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) & 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics (SEEM)*, Kärđla, Estonia, 2019. <https://doi.org/10.1109/PQ.2019.8818259>
- [63] A. Larsson, M. Bollen e M. Lundmark, “Measurement and Analysis of High-Frequency Conducted Disturbances,” em *International Conference on Electricity Distribution*, Vienna, 2007.
- [64] K. Lacanette, *Application Note 779: A Basic Introduction to Filters - Active, Passive, and Switched Capacitor*, National Semiconductor Corporation, 2010.
- [65] M. Klatt, J. Meyer, P. Schegner, R. Wolf e B. Wittenberg, “Filter for the measurement of supraharmonics in public low voltage networks,” em *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, Dresden, 2015. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2015.7256141>
- [66] Kugelstadt, T., “Active filter design techniques,” em *Op Amps for Everyone*, Newnes, 2009, pp. 365-438. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-505-0.00020-X>

[67] Device, A, “Chapter 8 Analog filters,” em *Linear circuit design handbook*, Newnes, 2008.