

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA POLITÉCNICA

JOÃO CARDOSO DAS NEVES NETO

**Investigação da frequência de ressonância com compensação reativa através  
da análise da qualidade da energia elétrica em instalações elétricas  
hospitalares com equipamentos radiológicos**

São Paulo  
2023

JOÃO CARDOSO DAS NEVES NETO

**Investigação da frequência de ressonância com compensação reativa através  
da análise da qualidade da energia elétrica em instalações elétricas  
hospitalares com equipamentos radiológicos**

VERSÃO CORRIGIDA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Sistemas de Potência

Orientador: Prof. Dr. Carlos Frederico Meschini Almeida

São Paulo

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 07 de agosto de 2023

Assinatura do autor: \_\_\_\_\_

Assinatura do orientador: \_\_\_\_\_

#### Catologação-na-publicação

Neto, João Cardoso Das Neves

Investigação da frequência de ressonância com compensação reativa através da análise da qualidade da energia elétrica em instalações elétricas hospitalares com equipamentos radiológicos / J. C. D. N. Neto -- versão corr. -- São Paulo, 2023.

136 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Qualidade da Energia Elétrica 2.Frequência de Ressonância 3.Ressonância Harmônica 4.Instalações Hospitalares 5.Compensação Reativa I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.



“Se você quiser descobrir os segredos do Universo, pense em termos de energia, frequência e vibração.” (NIKOLA TESLA)

Dedico esta dissertação e todo o meu aprendizado adquirido a minha família. Minha filha Alice e minha esposa Mariana. Meus dois alicerces.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me proporcionar uma família que me apoiou e me encorajou para encarar o desafio de entrar no programa. A minha família, que sofreu, me apoiou muito durante todo o programa e foi compreensiva em minhas ausências em reuniões familiares, sou muito grato. A minha filha, Alice, minha esposa, Mariana, meus segundos pais, minha sogra Vânia e meu sogro Sergio. Meus pais, Joaquim e Sonia, que estão sempre ao meu lado.

Agradeço ao meu professor e orientador, Prof. Dr. Carlos Frederico Meschini Almeida, por todo apoio, ajuda e ensinamentos. Sou eternamente grato por ter confiado em meus trabalhos e por ter sido orientado por um profissional dedicado e capacitado, além de muito solícito. Agradeço aos professores Prof. Dr. Edval Delbone (Instituto Mauá de Tecnologia) e o Prof. MSc. José Starosta (Ação Engenharia), por sempre estarem ao meu lado, seja em ensinamentos e orientações, acadêmicas ou não.

Agradeço ao corpo docente da Escola Politécnica da USP, em especial, ao Prof. Dr. Miguel Edgar Morales Udaeta, aos colegas, em especial, ao MSc. Henrique Camilo, por todo o apoio em publicação e aos colaboradores da secretaria da pós-graduação.

Por fim, gostaria de agradecer aos professores que prontamente aceitaram o convite de participação na banca de avaliadores, com qual fico muito honrado.

## RESUMO

NEVES NETO, J. C. **Investigação da frequência de ressonância com compensação reativa através da análise da qualidade da energia elétrica em instalações elétricas hospitalares com equipamentos radiológicos**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2023.

Com o advento da pandemia da covid-19 e com o avanço da tecnologia dos equipamentos eletromédicos, as atenções à saúde, de modo geral, e a preocupação com a Qualidade da Energia Elétrica nas instalações elétricas hospitalares e clínicas de diagnósticos por imagem ganharam maior atenção, buscando um perfeito desempenho de seus equipamentos, pois uma má Qualidade da Energia Elétrica pode impactar nos diagnósticos médicos através do surgimento de interferências nas imagens, prejudicando a interpretação médica. Foram desenvolvidas normativas eficazes que indicam os requisitos técnicos necessários para garantir a conformidade dessas instalações, porém não há estudos completos sobre a imunidade e a emissividade dos equipamentos eletromédicos quanto a Qualidade da Energia. Esta pesquisa investiga a frequência de ressonância harmônica com a compensação de energia reativa através de bancos de capacitores aplicados no circuito elétrico, que consiste em um equipamento de Ressonância Magnética de Imagem (MRI), bem como procura auxiliar na determinação da melhor metodologia para a mitigação das correntes harmônicas. Com o intuito de buscar a determinação de um método para o dimensionamento das instalações médicas, também foi realizado um estudo paramétrico sobre a frequência de ressonância a partir da variação da potência reativa instalada e a impedância percentual do transformador alimentador do sistema e a determinação de um valor percentual ( $p\%$ ) para o melhor dimensionamento do filtro antirressonante. Para um melhor entendimento da metodologia, foram aplicados os conceitos de compensação reativa e aplicado os conceitos da IEC60831-1, corrente de trabalho circulante em capacitores acima considerando 30% da nominal e a atenuação dos harmônicos do sistema com implementação de filtros antirressonantes ou não. Assim, após a compensação do fator de potência, houve a necessidade de dimensionamento do filtro devido ao surgimento das ressonâncias harmônicas. Contudo, para um correto dimensionamento das compensações, a preocupação com os harmônicos e suas consequências são de suma importância.

**Palavras-chave:** Distorções harmônicas. Filtro antirressonante. Ressonância Magnética de Imagem (MRI). Ressonância harmônica. Qualidade da energia elétrica.



## ABSTRACT

NEVES NETO, J. C. **Resonance frequency investigation with reactive compensation through power quality analysis in hospital electrical installations with radiological equipment.** Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2023.

With the advent of the covid-19 pandemic and the advancement in technology of electromedical equipment, attention to health, in general, and the concern with the Power Quality in hospital electrical installations and imaging diagnosis clinics have gained greater attention, seeking a perfect performance of their equipment, because a poor Power Quality can impact on medical diagnoses through the appearance of interferences in the images, impairing the medical interpretation. Effective norms have been developed that indicate the technical requirements necessary to ensure the compliance of these installations, but there are no complete studies on the immunity and emissivity of electromedical equipment regarding Power Quality. This research investigates the harmonic resonance frequency with reactive power compensation through capacitor banks applied in the electrical circuit, which consists of a Magnetic Resonance Imaging (MRI) equipment, as well as seeks to assist in determining the best methodology for the mitigation of harmonic currents. To seek the determination of a method for the sizing of medical facilities, a parametric study on the resonance frequency from the variation of the installed reactive power and the percentage impedance of the transformer feeding the system and the determination of a percentage value (p%) for the best sizing of the anti-resonant filter was also carried out. For a better understanding of the methodology, the concepts of reactive compensation were applied, and the IEC60831-1 concepts were applied, circulating working current in capacitors above considering 30% of the nominal and the attenuation of the system harmonics with the implementation of anti-resonant filters or not. Thus, after the power factor compensation, there was the need for filter sizing due to the appearance of harmonic resonances. However, for a correct sizing of the compensations, the concern with harmonics and its consequences are of utmost importance.

**Keywords:** Anti-resonant filter. Harmonic distortions. Harmonic resonance MRI. Power quality.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Percepção Consumidor - Georgia Power Company.....	19
Figura 2 - Percepção Concessionária - Georgia Power Company .....	20
Figura 3 - Etapas para a avaliação de Qualidade da Energia Elétrica.....	21
Figura 4 - Metodologia das Análises .....	24
Figura 5 - Concentrações da Qualidade da Energia Elétrica .....	26
Figura 6 - Interrupções Curtas (VTCD) .....	30
Figura 7 - Sag.....	30
Figura 8 - Swell .....	31
Figura 9 - Interrupções Longas .....	31
Figura 10 - SubTensão.....	32
Figura 11 - SobreTensão .....	32
Figura 12 - Desequilíbrio de Tensão .....	33
Figura 13 - Ruído .....	34
Figura 14 - Flicker .....	34
Figura 15 - Notching de Tensão.....	35
Figura 16 - Distorções Harmônicas.....	36
Figura 17 - Linearidade - Carga Linear - $v(t) \times i(t)$ .....	37
Figura 18 - Linearidade - Carga Linear - $v(t) \times i(t)$ .....	38
Figura 19 - Construção ponto-a-ponto – Carga Linear .....	39
Figura 20 - Características não linearidade da relação v-i – Indutor e Capacitor .....	39
Figura 21 - Construção ponto-a-ponto .....	40
Figura 22 - Não - Linearidade - Carga Não - Linear - $v(t) \times i(t)$ .....	41
Figura 23 - Construção ponto-a-ponto - Carga Não - Linear .....	42
Figura 24 - Igualdade das Reatâncias .....	44
Figura 25 - Circuito RL .....	45
Figura 26 - Circuito RLC.....	45
Figura 27 - Diagrama Ressonância Série .....	46
Figura 28 - Diagrama Ressonância Paralela .....	47
Figura 29 - Classificação dos filtros .....	48
Figura 30 - Classificação dos filtros híbridos.....	49
Figura 31 - Simulação Matlab-Simulink – Retificador – Sem Filtro Harmônico.....	50
Figura 32 - Simulação Matlab-Simulink – Forma de onda não-senoidal.....	50

Figura 33 - Simulação Matlab-Simulink – Espectro harmônico do sistema .....	51
Figura 34 - Simulação Matlab-Simulink – Retificador – Com Filtro Harmônico .....	51
Figura 35 - Simulação Matlab-Simulink – Forma de onda senoidal.....	52
Figura 36 - Simulação Matlab-Simulink – Espectro Harmônico do Sistema.....	52
Figura 37 - Determinação dos valores percentuais p% .....	54
Figura 38 - Introdução de X_L1 do Filtro - PSIM.....	54
Figura 39 - Triângulo das Potências .....	56
Figura 40 - Tetraedro das Potência.....	58
Figura 41 - Localização do banco de capacitores: Primário Transformador adaptado .....	62
Figura 42 - Localização do banco de capacitores: Secundário Transformador.....	62
Figura 43 - Localização do banco de capacitores: Ponto de Cargas Especifica .....	63
Figura 44 - Triângulo da compensação reativa.....	64
Figura 45 - Indicação dos pontos de análises das normas .....	70
Figura 46 - Diagrama de Ligação do Analisador.....	71
Figura 47 - Analisador RE7000 .....	72
Figura 48 - Tensões em Regime Permanente .....	73
Figura 49 - Análise de Criticidade da Tensão .....	73
Figura 50 - Percentual da Fundamental.....	74
Figura 51 – Indicador de Escalas.....	74
Figura 52 - Fator de Potência.....	75
Figura 53 - Desequilíbrio de Tensão .....	76
Figura 54 - Limites para o indicador de desequilíbrio de tensão.....	76
Figura 55 - Distorção Harmônica de Tensão .....	76
Figura 56 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental) .....	77
Figura 57 – Flutuação de Tensão .....	78
Figura 58 - Limites das flutuações totais (em pu da tensão fundamental).....	78
Figura 59 - Variação da Frequência.....	78
Figura 60 - Frequência de Ressonância em função da Compensação Reativa – Compilado .....	81
Figura 61 - Frequência de Ressonância em função da Impedância Percentual do Transformador.....	82
Figura 62 - Esquema de ligação do PQUBE 3.....	83

Figura 63 - Diagrama Trifilar Alimentador Ressonância Magnética.....	84
Figura 64 - Medições - Frequência .....	85
Figura 65 - Medições - Tensão L-L .....	86
Figura 66 - Medições - THDv .....	87
Figura 67 - Medições - THDi .....	87
Figura 68 - Medições - Potência Ativa (W).....	88
Figura 69 - Medições - Potência Aparente.....	89
Figura 70 - Medições - Potência Reativa (kvar).....	89
Figura 71 - Medições - Fator de Potência .....	90
Figura 72 - Medições - Compilados das Potências.....	90
Figura 73 - Frequência de Ressonância - $X_{trafo} = X_{cap}$ .....	93
Figura 74 - Deslocamento da Frequência de Ressonância a partir da implantação do filtro.....	94
Figura 75 - Simulação Matlab-Simulink – Sem Filtro .....	95
Figura 76 - Impedância do Sistema LC – Sem Filtro .....	95
Figura 77 - Simulação Matlab-Simulink – Com Filtro – $p\%=14\%$ (160Hz).....	96
Figura 78 - Impedância do Sistema LC – Com Filtro .....	96
Figura 79 - Aumento da Potência Ativa em determinados Exames.....	98
Figura 80 - Diagrama Unifilar - Alimentador Ressonância Magnética .....	111
Figura 81 - Diagrama Trifilar - Ressonância Magnética.....	112

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – IEEE Standard 519-2022: limites de distorção da corrente para sistemas de distribuição geral (120-69 000 V) .....	67
Tabela 2 – IEEE Standard 519-2022: limites de distorção de corrente para sistemas de distribuição geral (>161 kV), geração dispersa e cogeração .....	67
Tabela 3 – IEC 61000-3-2: corrente harmônica máxima permitida para equipamento da classe D (corrente limitada a menor ou igual a 16 A por fase) (classe D: PC, monitores PC, receptores de rádio ou TV) (potência de entrada P 600 W).....	68
Tabela 4 – IEEE Standard 519-1992 – Limites de Distorção de Tensão.....	68
Tabela 5 – IEC 61000-2-4: Limites de Compatibilidade: Harmônicos de Tensão (Uh% e THDV) em Instalações Industriais até 35 kV – Classe 1.....	68
Tabela 6 – IEC 61000-2-4: I Limites de Compatibilidade: Harmônicos de Tensão (Uh% e THDV) em Instalações Industriais até 35 kV – Classe 2.....	69
Tabela 7 – IEC 61000-2-4: Limites de Compatibilidade: Harmônicos de Tensão (Uh% e THDV) em Instalações Industriais até 35 kV – Classe 3.....	69
Tabela 8 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental) .....	70
Tabela 9 – Dados do Transformador .....	91
Tabela 10 – Dados da Compensação.....	92
Tabela 11 – Dados para a série de Fourier e impacto da corrente no sistema .....	93
Tabela 12 – Indicadores Individuais DRC e DRP .....	106
Tabela 13 – Piores Valores Críticos e Precários.....	106
Tabela 14 – Distribuição das Tensões .....	107
Tabela 15 – Distribuição das Tensões com métricas.....	107
Tabela 16 – Piores 15 valores do Fator de Potência .....	108
Tabela 17 – Registros de Harmônicas .....	109
Tabela 18 – Registros do VTCD .....	109
Tabela 19 – Dados para a série de Fourier e impacto da corrente no sistema .....	110
Tabela 20 – Dados para a série de Fourier e impacto da corrente no sistema .....	110

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

<b>AC</b>	Corrente Alternada
<b>ANEEL</b>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<b>BC</b>	Banco de Capacitores
<b>BUS</b>	Barras
<b>C</b>	Capacitor
<b>CBEMA</b>	Computer Business Equipment Manufacturers Association
<b>DC/CC</b>	Corrente Contínua
<b>EN</b>	European Standard
<b>Fn</b>	Frequência fundamental
<b>FP</b>	Fator de Potência
<b>Fs</b>	Frequência de sintonia/ressonância
<b>F(QR)</b>	Frequência de ressonância em função da compensação reativa
<b>F (Z%)</b>	Frequência de ressonância em função da impedância percentual
<b>h</b>	Ordem harmônica
<b>I</b>	Corrente Elétrica
<b>Icap</b>	Corrente do capacitor.
<b>IEC</b>	International Electrotechnical Commission
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>Ih</b>	Corrente harmônica
<b>In</b>	Corrente nominal
<b>Irede</b>	Corrente da rede
<b>Irms</b>	Corrente real
<b>L</b>	Indutor
<b>MRI</b>	Magnetic Resonance Imagin
<b>NBR</b>	Norma Brasileira
<b>P</b>	Potência ativa
<b>PCC</b>	Ponto de conexão
<b>P%</b>	Porcentagem do reator
<b>Q</b>	Potência reativa
<b>Qr</b>	Potência reativa injetada
<b>QEE.</b>	Qualidade da Energia Elétrica
<b>Qcap</b>	Compensação reativa

<b>R</b>	Resistor
<b>RN</b>	Norma Regulamentadora
<b>S</b>	Potência aparente
<b>TDD</b>	Total Demand Distortion
<b>THDi</b>	Total Harmonic Distortion Current
<b>THDv</b>	Total Harmonic Distortion Voltage
<b>VTCD</b>	Varição de Tensão de Curta Duração
<b>VTLD</b>	Varição de Tensão de Longa Duração
<b>XC</b>	Reatância capacitiva
<b>XL</b>	Reatância indutiva
<b>XL1</b>	Reatância indutiva do reator
<b>Xtrafo</b>	Reatância indutiva do transformador
<b>Z%</b>	Impedância percentual

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1	MOTIVAÇÃO .....	22
1.2	OBJETIVO .....	23
1.3	METODOLOGIA.....	23
1.4	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO .....	25
<b>2</b>	<b>INTRODUÇÃO TEÓRICA DOS ELEMENTOS DO ESTADO DA ARTE ....</b>	<b>26</b>
2.1	A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA (QEE).....	26
2.1.1	Qualidade do Produto.....	27
2.2	PRINCIPAIS FENÔMENOS DA QUALIDADE DA ENERGIA DO PRODUTO. .....	29
2.3	DISTORÇÕES HARMÔNICAS .....	36
2.3.1	Ressonância Harmônica .....	43
2.3.2	Filtro Harmônico .....	47
2.4	FATOR DE POTÊNCIA .....	55
2.4.1	Compensação Reativa .....	60
<b>3</b>	<b>ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS NORMAS – DISTORÇÕES HARMÔNICAS.....</b>	<b>66</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DE RELATÓRIO DE QUALIDADE DA ENERGIA REAL.....</b>	<b>71</b>
4.1	TENSÃO EM REGIME PERMANENTE .....	72
4.2	FATOR DE POTÊNCIA .....	74
4.3	DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO .....	75
4.4	DISTORÇÃO HARMÔNICA .....	76
4.5	FLUTUAÇÃO DE TENSÃO .....	77
4.6	VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA .....	78
<b>5</b>	<b>ESTUDO PARAMÉTRICO DA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA .....</b>	<b>79</b>
5.1	VARIAÇÃO DA INJEÇÃO DA COMPENSAÇÃO REATIVA – QR .....	79
5.2	VARIAÇÃO DA IMPEDÂNCIA PERCENTUAL DO TRANSFORMADOR – Z% .....	81
<b>6</b>	<b>ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>83</b>
6.1	PROJETO DA COMPENSAÇÃO REATIVA.....	91
6.2	PROJETO DE FILTROS ANTIRESSONANTES.....	92
<b>7</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>97</b>



<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>99</b>
<b>9</b>	<b>PUBLICAÇÕES .....</b>	<b>101</b>
9.1	ARTIGOS PUBLICADOS DURANTE O PROGRAMA.....	101
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>102</b>
	<b>ANEXO A .....</b>	<b>106</b>
	<b>ANEXO B .....</b>	<b>110</b>
	<b>ANEXO C .....</b>	<b>111</b>
	<b>ANEXO D .....</b>	<b>113</b>
	<b>ANEXO E .....</b>	<b>119</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o advento de surtos e pandemias e com o avanço da tecnologia de equipamentos eletromédicos, as atenções à saúde, de modo geral, e a preocupação com a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) nas instalações elétricas hospitalares e em clínicas de diagnósticos por imagem ganharam maior atenção para um perfeito desempenho dos equipamentos, buscando um diagnóstico sem erros médicos e sem riscos aos pacientes. Um fator que também deve ser levado com seriedade é a qualificação técnica dos operadores desses equipamentos eletromédicos, bem como da equipe responsável pela assistência técnica e dos mantenedores da infraestrutura onde esses equipamentos estão instalados. No entanto, o sucesso global do processo a qualidade das instalações elétricas nos ambientes médico-hospitalares e a QEE fornecida a esses equipamentos devem ser bem estudados, estruturados e tratados com grandes preocupações. Assim, as concessionárias de energia elétrica, quanto aos usuários finais, estão cada vez mais preocupados com a QEE. Em termos gerais, há quatro elementos principais para essas preocupações:

- Equipamentos de última geração, com microprocessadores, por exemplo, são mais sensíveis às variações de QEE do que equipamentos usados no passado;
- A crescente ênfase na eficiência geral do sistema de energia resultou no crescimento contínuo da aplicação de dispositivos como acionamento de motores de alta eficiência, velocidade ajustável e capacitores de manobra para correção do fator de potência, a fim de reduzir perdas. Isso está resultando no aumento dos níveis harmônicos nos sistemas de energia;
- Os usuários finais, por sua vez, devem ter uma maior consciência dos problemas de QEE. Os clientes dos serviços públicos estão se tornando mais bem informados sobre questões como interrupções e transientes de comutação, desafiando os serviços públicos a melhorarem a QEE fornecida;
- Como muitos sistemas estão interligados e processos integrados significam que a falha de qualquer componente terá consequências severas, como as falhas em algum componente das *smart-grids*, por exemplo.

Pode-se definir a QEE em função de cinco perturbações elétricas básicas em um sinal presentes em uma instalação elétrica: amplitude da tensão, frequência do sinal, desequilíbrios de tensão e corrente nos sistemas trifásicos e distorções na forma de onda do sinal senoidal (MIGUEL, 1999). Há quem diga que a QEE é um conceito

“guarda-chuva” para uma multiplicidade de tipos individuais de perturbações no sistema de energia elétrica. As questões que se enquadram nesse “guarda-chuva” não são necessariamente novas. Sob o ponto de vista do nível de QEE fornecida pelo sistema da concessionária, é muito importante a ausência relativa de variações de tensão, particularmente, a ausência de desligamentos (ALVES, 1996). No entanto, para o consumidor, o termo QEE está, na maioria das vezes, relacionado à ausência relativa de variações de tensão medidas no ponto de entrega de energia. Contudo, a QEE, como a qualidade em outros bens e serviços, é difícil de quantificar, pois não há uma única definição aceita de QEE. Esse termo tornou-se uma das palavras-chave mais prolíficas na indústria de energia desde o final dos anos 1980 até o início do novo século, e já foi muito explorado na infraestrutura médico-hospitalar (DUGAN, 2002). Existem normas para tensão e outros critérios técnicos que podem determinar o correto padrão de funcionamento, mas a medida final da QEE é determinada pelo desempenho e produtividade do equipamento do usuário final, como o PRODIST – Módulo 8 (ANEEL, 2021).

As perturbações causadas pelos fenômenos da QEE são, muitas vezes, provocadas pelos próprios consumidores ou por instalações adjacentes que utilizam, em grande escala, os equipamentos de “tecnologia moderna”, chamados cargas não lineares. A partir da década de 1990, a crescente utilização desses equipamentos em todos os segmentos da sociedade agravou a situação sob o ponto de vista de QEE. Em geral, esses equipamentos exigem uma rede elétrica de alta qualidade para seu correto funcionamento, mas os principais causadores das perturbações acabam sendo as próprias vítimas (BOLLINGER, 1991).

Ainda segundo Dugan (2002), há muitos mal-entendidos em relação às causas dos problemas de QEE. Os gráficos da Figura 1 e da Figura 2 mostram os resultados de uma pesquisa realizada pela *Georgia Power Company*, na qual, tanto a concessionária de energia elétrica como os clientes foram questionados sobre as causas dos problemas de QEE. Embora as pesquisas de outros setores do mercado possam indicar diferenças entre as categorias, esses gráficos ilustram claramente um tema comum, que surge repetidamente em tais pesquisas. Essas pesquisas destacam que as perspectivas das concessionárias e dos clientes são muitas vezes bem diferentes. Enquanto ambos tendem a culpar cerca de dois terços dos eventos por fenômenos naturais, quando há um problema de energia com um equipamento, os usuários finais podem se queixar rapidamente à concessionária de uma falha que

tenha causado um determinado problema (DUGAN, 2002), conceito valido até os dias de hoje. Entretanto, os registros da concessionária podem indicar que não há eventos na alimentação para o cliente. Deve-se perceber que há muitos eventos que resultam problemas nos usuários finais que nunca aparecem nas estatísticas das concessionárias de serviços públicos. Um exemplo disso é a comutação de um banco de capacitores automático, que é bastante comum e normal no sistema de concessionárias de distribuição, mas que pode causar sobretensões transitórias que perturbam certos equipamentos (DUGAN, 2002). Outro exemplo é uma falha momentânea em outra parte do sistema, que faz com que a tensão se eleve brevemente no local do cliente em questão. Isso pode causar um acionamento e a variação de velocidade de um motor, por exemplo, mas a concessionária não terá nenhuma indicação de que algo estava errado no alimentador, ao menos que tenha um monitor de QEE instalado (DUGAN, 2002).



Figura 1 - Percepção Consumidor - Georgia Power Company  
Fonte: Dugan (2002).

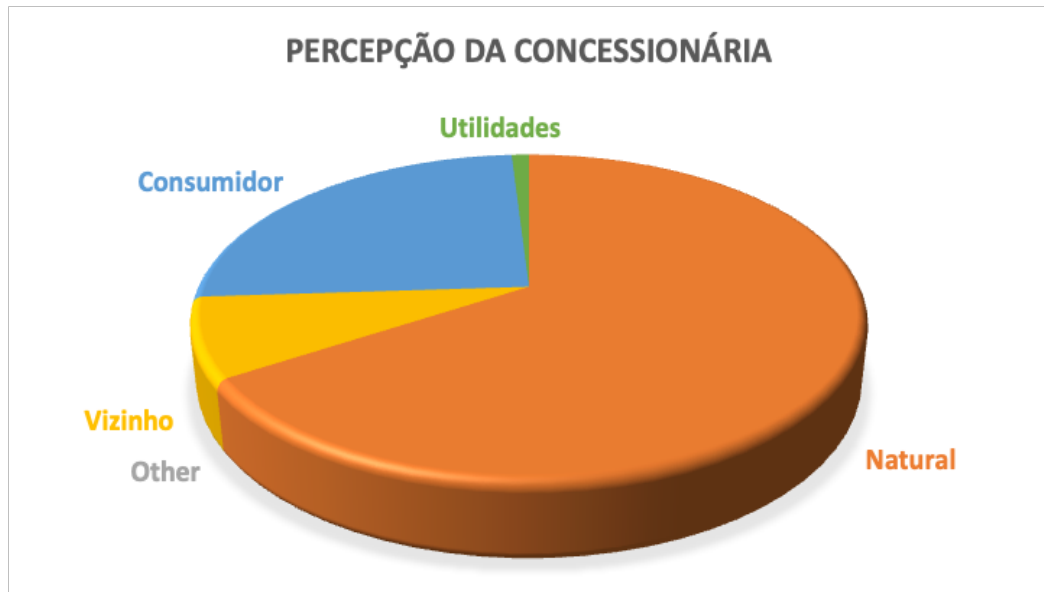


Figura 2 - Percepção Concessionária - Georgia Power Company  
Fonte: Dugan (2002).

Os problemas de QEE abrangem uma grande variedade de fenômenos diferentes. Cada um desses fenômenos pode ter uma variedade de causas e soluções diferentes, que podem ser usadas para melhorar a QEE e principalmente o desempenho do equipamento. Entretanto, observar as etapas gerais que estão associadas à investigação de muitos desses problemas é de grande serventia, especialmente se as etapas da investigação puderem envolver a interação entre o sistema de fornecimento de energia elétrica e as instalações do cliente. A Figura 3 apresenta algumas etapas gerais que são frequentemente necessárias em uma investigação de QEE, juntamente às principais considerações que devem ser abordadas em cada etapa (DUGAN, 2002). No capítulo 3, será demonstrada a análise completada de um relatório de QEE com medições reais.

O procedimento geral também deve considerar se a avaliação envolve um problema de QEE existente ou um que poderia resultar de um novo projeto ou de mudanças propostas ao sistema, como a infraestrutura, por exemplo. As medições desempenham um papel importante para analisar e explicar os fenômenos de QEE. Esse é o principal método para caracterizar o problema ou o sistema existente que está sendo avaliado. Ao realizar as medições, é importante registrar os impactos das variações da QEE ao mesmo tempo, para que os problemas possam ser correlacionados com possíveis causas (DUGAN, 2002).

As soluções precisam ser avaliadas usando uma perspectiva de sistema, e tanto a economia quanto as limitações técnicas que devem ser consideradas. As

soluções possíveis são identificadas em todos os níveis do sistema, desde o fornecimento de serviços públicos até o equipamento de uso final que está sendo afetado. Soluções que não são tecnicamente e economicamente viáveis devem ser descartadas. A solução ótima dependerá do tipo de problema, do número de usuários finais afetados e das possíveis soluções (DUGAN, 2002).

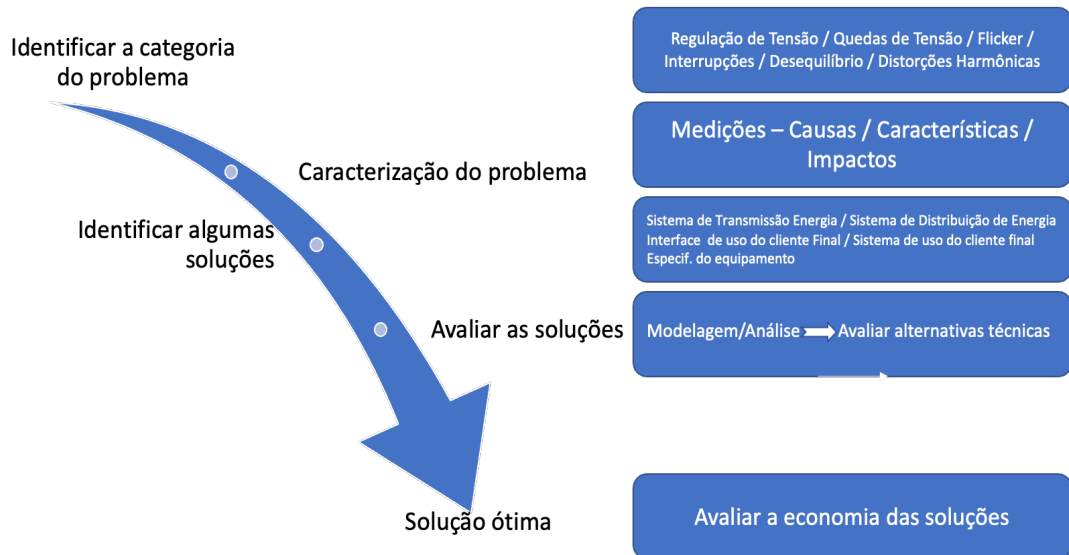


Figura 3 - Etapas para a avaliação de Qualidade da Energia Elétrica  
Fonte: Adaptado de Dugan (2002).

Em resumo, a QEE é um tema ainda muito explorado para o entendimento de quem é o infrator. Porém, o que se pode afirmar é que, com a evolução da tecnologia e o surgimento de cargas não lineares, a QEE ganhou espaço entre os pesquisadores. Assim, com a evolução tecnológica, surge a necessidade do controle preciso da operação das cargas presentes não só nas indústrias (STAROSTA; MORENO, 2008), mas também em todos os setores da economia e, principalmente, na saúde, onde uma QEE precária pode acarretar erros médicos nos diagnósticos.

Os estabelecimentos de saúde, sejam hospitais ou clínicas de medicina diagnóstica, vêm, cada vez mais, aumentando a utilização de equipamentos eletromédicos que desempenham importantes funções, como sistemas de informação sobre o paciente, equipamentos de diagnóstico e tratamento, entre outros (JÚNIOR, 2009). Assim, a eletricidade no ambiente hospitalar é essencial para a vida dos pacientes. Porém, a maioria das instalações elétricas dos estabelecimentos assistenciais de saúde é tratada com o mesmo descaso que se observa em outras atividades, sejam industriais, comerciais ou de serviços (JÚNIOR, 2009).

Para manter o mínimo necessário a uma boa prática de infraestrutura, há uma infinidade de normas técnicas a serem seguidas. Em relação aos equipamentos eletromédicos, há uma série de normas internacionais, como o IEEE *Color Book* - IEEE Std 602-2007, o IEEE *White Book*, que destaca todos os requisitos para a infraestrutura de empreendimentos da saúde, e a IEC 60601 (IEC 60601, 2005), que serviu como base para elaboração das normas nacionais, NBR IEC 60601 (NBR 60601-1, 2010). Esse conjunto de normas tem como objetivo principal o estabelecimento das condições mínimas de segurança e desempenho dos equipamentos eletromédicos, bem como a infraestrutura completa de empreendimentos do setor da saúde. Quanto às instalações elétricas, internacionalmente encontra-se a norma IEC 60364 – *Electrical Installations of Buildings* (IEC STANDARD 60364-1, 2005), que estabelece os requisitos para as instalações elétricas em locais médicos e áreas associadas ao centro médico. No Brasil, existem as normas NBR 5410 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão (NBR 5410, 2005) e a NBR 13534 – Instalações Elétricas em Estabelecimentos Assistenciais de Saúde (13534, 1995), com o objetivo de estabelecer um conjunto de requisitos mínimos de segurança nas instalações elétricas em estabelecimentos assistenciais de saúde, como hospitais, ambulatórios, unidades sanitárias, clínicas médicas, odontológicas, veterinárias etc. Porém, detalha apenas as questões de segurança, como o IT-Médico que visa garantir a manutenção dos serviços mesmo em caso da primeira falta a terra nas instalações elétricas nos Estabelecimentos Assistenciais à Saúde como detalhado na NBR13534-2008 e a RDC 50 baseados na IEC 64. Infelizmente não há uma norma específica para a Qualidade da Energia Elétrica, quanto a emissividade e a imunidade de cada equipamento eletromédico. Distúrbio alicerce desta dissertação, as normatizações para as distorções harmônicas de Qualidade da Energia Elétrica serão discutidas no Capítulo 3.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

A QEE ganha cada vez mais espaço na academia, nas pesquisas e nos formuladores de opiniões e políticas. Porém, quando sai do campo acadêmico e se direciona a aplicação, em manutenções, implementações e projetos, a realidade é bem diferente. A Qualidade da Energia ainda não é levada tão a sério, infelizmente. Muitos só se preocupam quando há um problema em sua instalação e só a partir

desse momento a QEE é vista como se deve, ou seja, é vista muito tarde. Onde se deveria ter essa preocupação desde o início do projeto, desde sua concepção.

Com a aplicação, nota-se dia a dia, que a QEE é deixada de lado.

A presente dissertação descreve uma análise real de um relatório de QEE e discute a preocupação referente à frequência de ressonância e à ressonância harmônica, propondo um modelo de cálculo que utiliza apenas as variáveis encontradas nas placas dos equipamentos. Assim, fica fácil uma análise prévia da frequência de ressonância, pois a análise torna-se mais intuitiva, sem a necessidade de grandes modelamentos envolvendo muitas variáveis.

Contudo, esses itens destacados são atores que devem ser vistos com grande precaução e atenção, desde a concepção e implantação de projetos, seja ele em qualquer seguimento, indústria, comércio ou saúde. Esse último é mais delicado, devido à sensibilidade de seus equipamentos e infraestrutura, onde qualquer problema de QEE, sem a instalação de dispositivos de retaguarda, como o UPS, como pode ser visto em Boonseng (2020), uma que vez que esta dissertação analisa a QEE sem esses dispositivos, poderá causar erros médicos e, conseqüentemente, erros de diagnósticos.

## 1.2 OBJETIVO

Esta dissertação tem como objetivo analisar e investigar a frequência de ressonância através de estudos paramétricos com a variabilidade da compensação reativa e a impedância percentual do transformador alimentador do circuito Ressonância Magnética de Imagem (MRI).

## 1.3 METODOLOGIA

A QEE está cada vez mais, chamando a atenção de todos os ramos da economia. Sejam eles industriais, comerciais ou hospitalares.

Algumas empresas vêm buscando investir em infraestruturas robustas para enfrentar esse novo normal com a presença quase unânime de cargas não lineares nas instalações, desde um simples motor até grandes sistemas de ar-condicionado, devido a seus inversores, mas infelizmente o investimento em QEE ainda é muito pequeno.



O investimento em monitoramento em tempo integral vem crescendo ano a ano, porém o grande desafio é a busca por melhores modelos de atuação para mitigar os problemas de QEE. Assim, esta dissertação tem como foco a análise e a investigação da frequência de ressonância de cada sistema medido, bem como a investigação da presença ou não da ressonância harmônica em cada circuito, um tema ainda muito pouco discutido. Assim, o trabalho seguirá uma metodologia de análises baseada em 5 (cinco) pilares principais (Figura 4) determinados por experiência em campo.



Figura 4 - Metodologia das Análises

- 1. Identificação dos Equipamentos:** Os equipamentos eletromédicos foram selecionados pela sua potência e sua funcionalidade. Disparados em tempos não conhecidos, há uma eletrônica de potência bastante robusta e um transformador dedicado a esses equipamentos;
- 2. Medições:** As medições foram efetuadas durante 7 (sete) dias de monitoramento. Todas as medições foram executadas no alimentador do circuito a montante dos equipamentos. Nesse caso, no ponto de carga, pois medições podem ser executadas em qualquer ponto, e há estudos que determinam as posições dos medidores de uma forma otimizada (ALMEIDA, 2011);
- 3. Análise de Qualidade da Energia Elétrica:** Análise do relatório de Qualidade da Energia, gerado através da medição em dois equipamentos distintos, o equipamento de Raio-X e a Ressonância Magnética de Imagem, utilizado para a ilustração dos conceitos e fenômenos de Qualidade da Energia Elétrica. Essas análises são feitas conforme o PRODIST - Módulo 8 - 7 dias (ANEEL, 2021), EN 50160, IEC 61000;
- 4. Análise da Frequência de Ressonância:** Através dos dados dos componentes do alimentador de cada sistema e da compensação reativa, na penalidade do fator de potência, tem-se a frequência de ressonância. Nesse momento, também, é avaliada a presença da ressonância harmônica no sistema;

- 5. Estudo de Caso:** Com as análises e os resultados dos pilares anteriores, são projetadas, para o circuito da Ressonância Magnética de Imagem (MRI), a compensação reativa através das análises do  $THD_i$  e a filtragem antirressonante.

#### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Para uma melhor interpretação e análise dos conteúdos dos estudos e pesquisa, esta dissertação está organizada de modo que os capítulos sigam a metodologia aplicada para a convergência dos resultados.

- a) O Capítulo 2 apresenta a introdução teórica dos elementos de estado da arte. Desde o que é QEE, em seu nível macro, convergindo ao estado da arte em níveis micros, como a ressonância harmônica;
- b) O Capítulo 3 detalha as diferenças entre as normas IEEE-519 e IEC 61000;
- c) O Capítulo 4 analisa o relatório de QEE, em termos de PRODIST – Módulo 8 do equipamento de Raio-X;
- d) O Capítulo 5 traz uma análise em termos de um estudo paramétrico da frequência de ressonância, em função da potência reativa injetada no sistema, a fim de mitigar as faltas do fator de potência, e a impedância percentual do transformador alimentador do circuito da MRI;
- e) No Capítulo 6, descreve-se um estudo de caso também no circuito da MRI, onde se projeta os compensadores reativos e os filtros antirressonantes;
- f) O Capítulo 7 finaliza a dissertação com a conclusão das análises e das pesquisas realizadas, indicando trabalhos futuros para a continuidade da discussão;
- g) No Capítulo 8, são apresentadas as publicações realizadas durante o período do programa.

## 2 INTRODUÇÃO TEÓRICA DOS ELEMENTOS DO ESTADO DA ARTE

### 2.1 A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA (QEE)

Podemos iniciar a conceituação de toda dissertação com uma pergunta: “O que é Qualidade da Energia Elétrica?” A resposta para essa indagação é bem simples, como indicado em Dugan (2002, p.) “Qualquer problema manifestado na tensão, corrente e frequência que resulte em falha ou má operação do equipamento do consumidor”. Porém, a QEE é estudada por três grandes concentrações, conforme mostra a Figura 5.

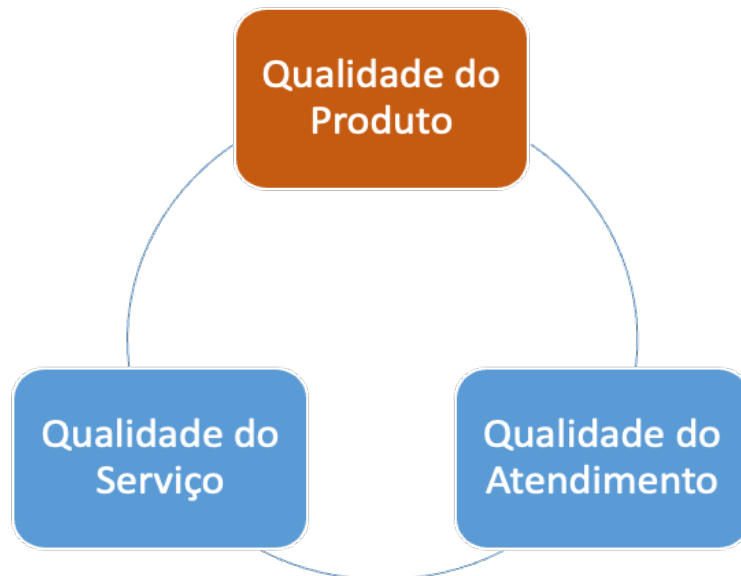


Figura 5 - Concentrações da Qualidade da Energia Elétrica  
Fonte: Dugan (2002).

1. **Qualidade do Serviço:** Pode ser compreendida como a continuidade do fornecimento, lidando basicamente com as interrupções no sistema elétrico de potência provocadas por falhas no sistema (manutenção corretiva) e por atividades de manutenção programadas (manutenções preventivas), em função de serviços necessários a serem realizados no sistema (KAGAN; ROBBA; SCHMIDT, 2009);
2. **Qualidade do Atendimento:** Se concentra no relacionamento comercial entre empresa e cliente. Procedimentos para uma ligação nova de consumidor, religamento do consumidor, elaboração de estudos e orçamentos de serviços na rede de distribuição são exemplos clássicos da

qualidade do serviço, onde o Prodíst-Módulo 8 trás como qualidade comercial (KAGAN; ROBBA; SCHMIDT, 2009);

- 3. Qualidade do Produto:** É caracterizada basicamente pela forma de onda da tensão dos componentes de um sistema elétrico de potência, também é chamada de qualidade de tensão. Contempla os seguintes fenômenos: variação de frequência; variações de tensões de longa duração; variações de tensões de curta duração e distorções harmônicas. Teve seus primeiros estudos publicados em 1894, por Kennelly. Desequilíbrios de tensão e corrente e Flutuações de tensão (KAGAN; ROBBA; SCHMIDT, 2009).

Porém, a presente dissertação tratará apenas da Qualidade da Energia Elétrica referente à qualidade do produto.

### 2.1.1 Qualidade do Produto

O termo QEE é aplicado a uma grande variedade de fenômenos eletromagnéticos no sistema elétrico como um todo. A crescente aplicação de equipamentos eletrônicos e a geração distribuída têm aumentado a atenção sobre QEE nos últimos anos. Infelizmente, a terminologia QEE não é consistente entre os diferentes segmentos da indústria, causando uma considerável confusão, pois tanto os fornecedores quanto os usuários finais têm dificuldades para entender as razões pelas quais os equipamentos elétricos não funcionarem como esperado. Da mesma forma, é confuso percorrer o jargão do fornecedor e diferenciá-lo entre milhares de soluções propostas (DUGAN, 2002).

Equipamentos chamados revolucionários de mitigações da QEE, com nomes pomposos, têm sido usados. Por exemplo, o termo surto é usado para descrever uma grande variabilidade de distúrbios que causam falhas ou mau funcionamento do equipamento. Um supressor de surtos pode suprimir alguns deles, mas não terá absolutamente nenhum efeito sobre outros. Comerciantes inescrupulosos aproveitam a ignorância do público em geral, vendendo aparelhos de preços exagerados com argumentações quase absurdas para melhorar a QEE. É claro que tudo isso vem com uma garantia de devolução do dinheiro. A regra básica é: se não lhe disserem aquilo que está na caixa e como ela funciona, não a compre (DUGAN, 2002).

Assim, o termo QEE é geralmente usado como jargão para avaliar e manter padrões de fornecimento aceitáveis na geração, transmissão, distribuição e utilização

da energia elétrica (BHIM SINGH, 2014). Onde os fenômenos da QEE e dos sistemas de fornecimento de energia elétrica são muito severos, é importante estudar os terminais dos usuários finais dos sistemas de distribuição. Existem várias razões para a deterioração dos padrões de atendimento nos sistemas de fornecimento de energia elétrica, incluindo fenômenos naturais, como raios e falhas de equipamentos. Vários equipamentos do usuário também injetam perturbações no sistema de fornecimento, pois impõem corrente não-senoidais e se comportam como cargas não lineares. Portanto, a QEE é quantificada em termos de tensão, corrente ou desvio de frequência de qualquer sistema, o que pode resultar em falhas ou mau funcionamento do equipamento do usuário (BHIM SINGH, 2014). Esses problemas estão presentes no sistema de alimentação, devido a vários distúrbios no sistema ou à presença de várias cargas não lineares, como fornos, fontes de alimentação ininterrupta – *nobreaks* –, acionamentos de velocidade ajustável etc. Entretanto, os problemas de QEE estão relacionados à corrente com fator de potência abaixo, correntes harmônicas, correntes desequilibradas e correntes de neutro excessivas em sistemas polifásicos (BHIM SINGH, 2014).

Uma outra classificação pode ser feita com bases quantitativas, como tensão, corrente e frequência. Na tensão, estão inclusas distorções de tensão, oscilação, ruído, *swell*, desequilíbrio, subtensão e sobretensão. Similarmente, para a corrente, estão inclusas componentes de potência reativa da corrente, correntes harmônicas, correntes desequilibradas e corrente de neutro excessiva.

Esses também podem consistir em uma combinação de problemas de QEE no sistema, tanto de tensão quanto de corrente. Os problemas de Qualidade da Energia Elétrica relacionados às frequências são variações de frequência acima ou abaixo do valor base desejado, que afetam o desempenho de uma série de cargas e outros equipamentos (BHIM SINGH, 2014).

A injeção de reativos é uma das valiosas ferramentas para melhorar a regulação de tensão e a eficiência de equipamentos, bem como reduzir as perdas e as correntes elétricas no circuito das instalações. Não basta o simples tratamento de questões relativas ao dimensionamento de capacitores de forma a injetar energia reativa de acordo com aquela consumida pela carga, porém outras características da instalação também devem ser consideradas e deve-se considerar, também, os efeitos das instalações dos capacitores, como a frequência de ressonância e uma possível ressonância harmônica (STAROSTA; MORENO, 2008). Esses fenômenos são

complementares, a frequência de ressonância existe sem a ressonância harmônica, porém a ressonância harmônica não acontece sem a frequência de ressonâncias, tema que será discutido mais à frente.

Contudo, a qualidade do produto é caracterizada basicamente pela forma de onda da tensão dos componentes de um sistema elétrico de potência e é chamada de qualidade de tensão. Ela contempla os seguintes fenômenos: variação de frequência; variações de tensões de longa duração; variações de tensões de curta duração; distorções harmônicas; desequilíbrios de tensão e flutuações de tensão (KAGAN; ROBBA; SCHMIDT, 2009).

## 2.2 PRINCIPAIS FENÔMENOS DA QUALIDADE DO PRODUTO

Muitos fenômenos estão diretamente ligados à QEE, podemos destacar 11 deles, como também detalhado nas Figuras 6 a 16. Porém o presente trabalho terá como foco principal apenas as distorções harmônicas.

**a) Interrupções de Curta Duração:** São Interrupções totais do fornecimento de energia, desde alguns milissegundos até menos de 1 minuto (PANDA, 2016). Suas principais causas são a abertura e o fechamento automático dos dispositivos de proteção para desativar uma seção defeituosa da rede, esses eventos podem ser causados por falhas de isolamento *flash over* do isolador. Como consequências, há o disparo de dispositivos de proteção, a perda de informações e o mau funcionamento dos equipamentos de processamento de dados, além da parada de equipamentos sensíveis, como inversores de frequência, PCs e PLCs (PANDA, 2016).

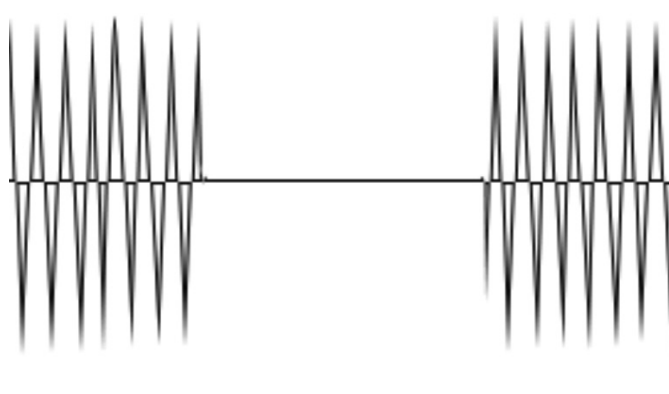


Figura 6 - Interrupções Curtas (VTCD)  
Fonte: Panda (2016).

**b) Sag:** Reduções da tensão em RMS no range de 10%-90% para uma duração superior à metade de um ciclo de rede e inferior a 1 minuto (PANDA, 2016), também conhecida como VTCD's (Variações de Tensões de Curta Duração) ou VTLD's (Variações de Tensões de Longa Durações). São causadas por falhas na rede de transmissão ou distribuição, defeitos na instalação do consumidor, acionamento de carga (cargas pesadas) e partidas de grandes motores. Geram um mau funcionamento momentâneo de equipamento TI e sistemas de controle baseados em microprocessadores (PCs, PLCs, inversores de frequência etc.), a ativação de contadores e relés eletromecânicos, o desligamento e a perda de eficiência em máquinas rotativas elétricas.

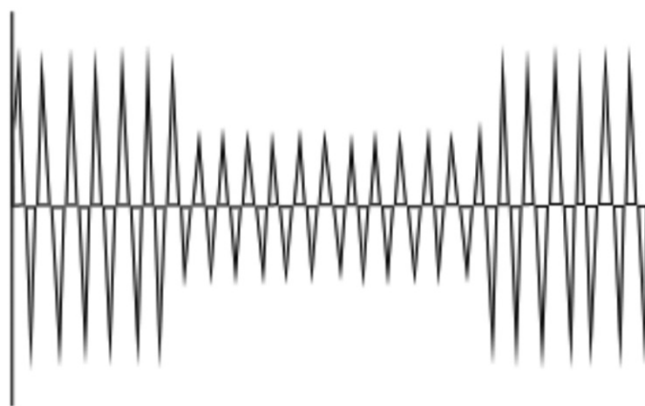


Figura 7 - Sag  
Fonte: Panda (2016).

**c) Swell:** Aumento momentâneo da tensão fora das tolerâncias normais, com duração superior a um ciclo e tipicamente inferior a 1 minuto (PANDA, 2016). É causado pela partida/parada de cargas pesadas, fontes de energia mal

dimensionadas, transformadores mal regulados (principalmente durante as horas de vazio), falhas no sistema, comutação de carga e comutação de banco de capacitores. Gera perda de dados, cintilação de iluminação (*flickers*), parada ou danos em equipamentos sensíveis se os valores de tensão forem demasiado altos.

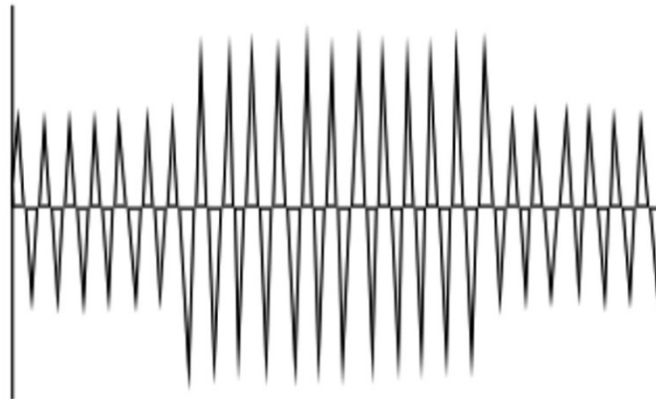


Figura 8 - Swell  
Fonte: Panda (2016).

**d) Interrupções Longas:** Interrupção total do fornecimento de energia por uma duração superior a 1-2 minutos (PANDA, 2016). São causadas por falhas dos dispositivos na rede do sistema elétrico, como tempestades, objetos (árvores, carros etc.), linhas ou postes, incêndios, erros humanos, má coordenação ou falha dos dispositivos de proteção. Geram a parada de todo o sistema.

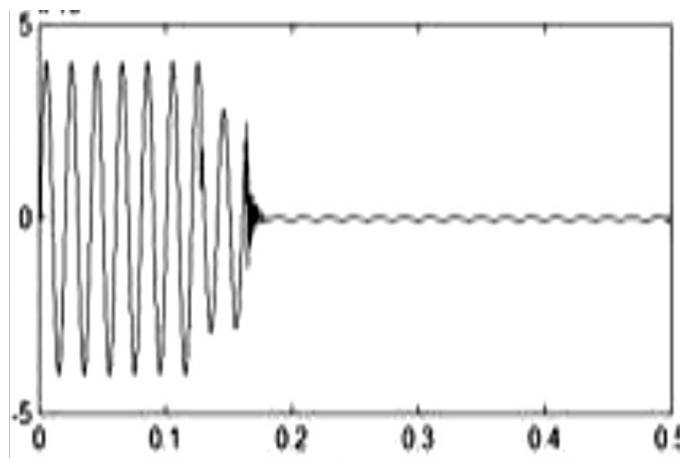


Figura 9 - Interrupções Longas  
Fonte: Panda (2016).



- e) **Subtensão:** Diminuição da tensão CA RMS para menos de 90% por uma duração superior a 1 minuto. São causadas por ligar uma grande carga ou desligar um grande banco de capacitores. (PANDA, 2016).

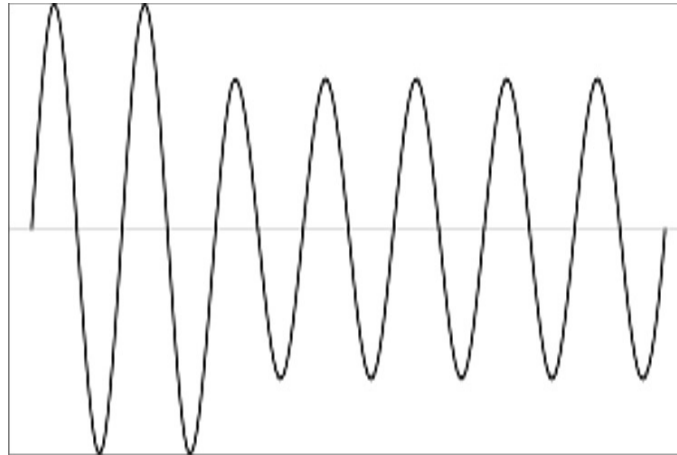


Figura 10 - SubTensão  
Fonte: Panda (2016).

- f) **Sobretensão:** Aumento da tensão CA RMS para um nível superior a 110% com uma duração superior a 1 minuto. Causado pelo desligamento de uma grande carga ou pela energização de um banco de capacitores. Ajustes incorretos dos transformadores também podem causar sobretensões, gerando a cintilação da iluminação, parada ou danos em equipamentos sensíveis, se os valores de tensão forem demasiado altos (PANDA, 2016).

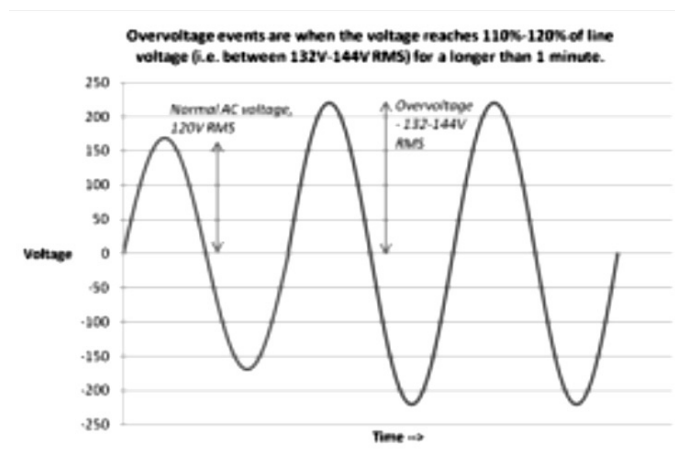


Figura 11 - SobreTensão  
Fonte: Panda (2016).

- g) **Desequilíbrio de Tensão:** Variação de tensão no sistema trifásico em que as três magnitudes de tensão ou as diferenças de ângulo de fase entre elas

não são iguais. Apresenta grandes cargas monofásicas (fornos de indução, cargas de tração) e uma distribuição incorreta de todas as cargas monofásicas pelas três fases do sistema (isso também pode ser devido a uma falha). Sistemas desequilibrados podem implicar na existência de uma sequência negativa, que é prejudicial para cargas trifásicas. As cargas mais afetadas são as máquinas de indução trifásicas.

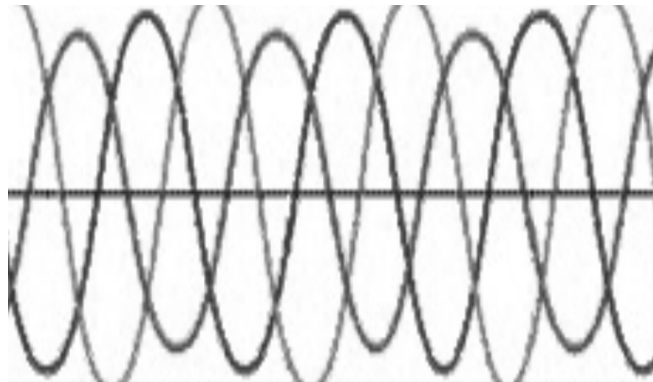


Figura 12 - Desequilíbrio de Tensão  
Fonte: Panda (2016).

**h) Ruído:** Sobreposição de sinais de alta frequência sobre a forma de onda da frequência, não confundindo com os harmônicos. São causados por interferências eletromagnéticas provocadas por micro-ondas, difusão televisiva e radiação, devido a máquinas de solda, fornos a arco e equipamentos eletrônicos. A ligação à terra imprópria pode também ser uma causa (PANDA, 2016). Causam perturbações em equipamento eletrônico sensível, geralmente não é destrutivo, acarretando a perda de dados e erros de processamento de dados e interferências nas imagens de equipamentos eletromédicos.

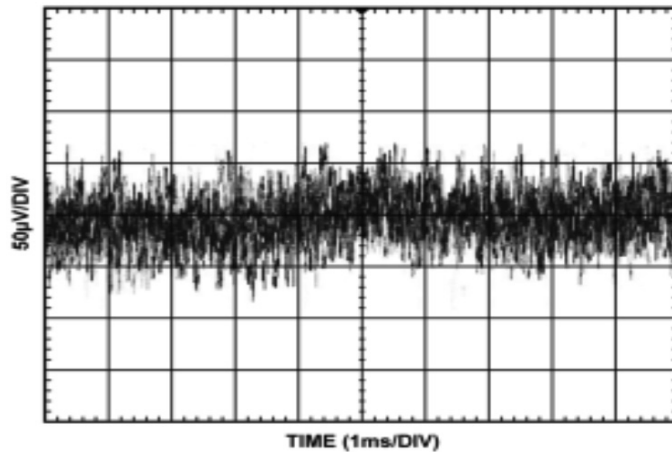


Figura 13 - Ruído  
Fonte: Panda (2016).

Assim, para os itens acima, a instalação de UPS será fundamental para a mitigação destes distúrbios.

- i) **Flicker:** Uma forma de onda pode exibir uma tremulação de tensão se a sua amplitude for modulada a frequências inferiores a 25 Hz, as quais o olho humano pode detectar como uma variação na intensidade da luz de uma lâmpada padrão. São causados por uma condição de arco no sistema de energia, fornos de arco, e o partida/parada frequente de motores elétricos e cargas oscilantes. Ocorre a cintilação da iluminação, dando a impressão de uma instabilidade da percepção visual. Para esse caso, um estabilizador pode mitigar a perturbação.

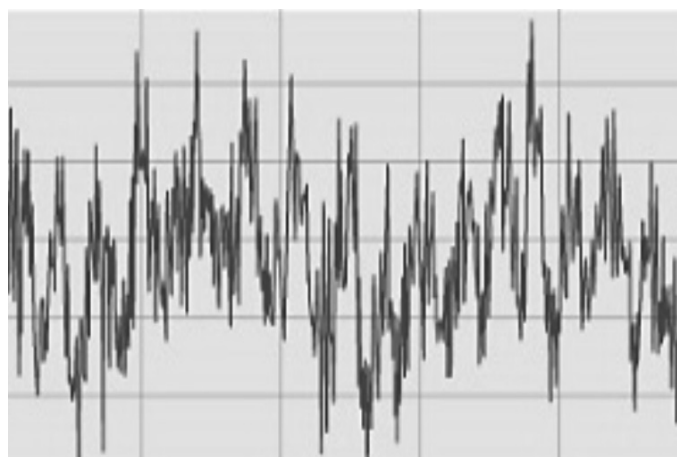


Figura 14 - Flicker  
Fonte: Panda (2016).

j) **Notching de tensão:** Variação muito rápida do valor da tensão para durações de vários microssegundos a alguns milissegundos. Essas variações podem atingir milhares de volts. É um efeito que pode levantar problemas de QEE em qualquer instalação onde são utilizados retificadores de estado sólido. É causada por raios, comutação de linhas ou capacitores de correção do fator de potência, desconexão de cargas pesadas e comutação de retificadores eletrônicos de potência. Gera a destruição de componentes e de materiais de isolamento, erros de processamento de dados ou perda de dados e erros eletromagnéticos interferência (PANDA, 2016).

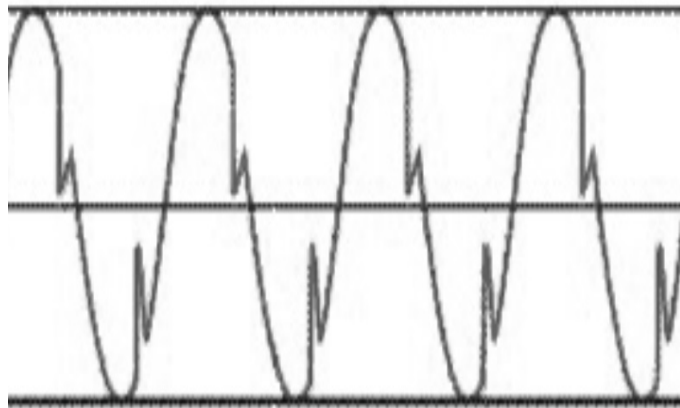


Figura 15 - Notching de Tensão  
Fonte: Panda (2016).

k) **Distorções Harmônicas:** Os harmônicos são distorções periódicas senoidais da tensão de alimentação ou corrente de carga. Tipicamente, são causadas por cargas não lineares. Os harmônicos são medidos em múltiplos inteiros da frequência fundamental de alimentação. As formas de onda de tensão ou corrente assumem uma forma não senoidal. **Fontes clássicas:** máquinas elétricas que trabalham acima do “joelho” da curva de magnetização (saturação magnética), arcos (fornos de arco, lâmpadas fluorescentes), máquinas de solda, retificadores microprocessadores, acionamentos de motores e motores de escovas CC. **Fontes modernas:** Todas as cargas não lineares, tais como equipamento eletrônico de potência, incluindo inversores de frequência, fontes de alimentação de modo comutado, equipamento de processamento de dados e iluminação de alta

eficiência. Como consequências, há o sobreaquecimento de transformadores, a sobrecarga de neutro em sistemas trifásicos, o sobreaquecimento de todos os cabos e equipamentos, a distorção da tensão secundária dos transformadores, o aumento das perdas no sistema de potência, a perda de eficiência em máquinas elétricas, a interferência eletromagnética em sistemas de comunicação, a falha de relés de proteção, explosão de capacitores, devido às ressonâncias harmônicas, erros nas medidas quando se utilizam contadores de leitura média e ao disparo de interferências de proteções térmicas.

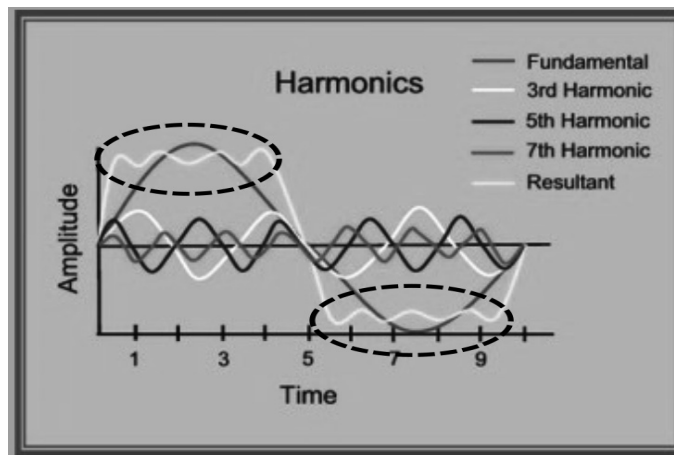


Figura 16 - Distorções Harmônicas  
Fonte: Panda (2016).

## 2.3 DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Elas constituem os principais componentes de distorção da tensão da rede e das formas de onda de corrente na carga (PANDA, 2016). A IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional ou Comissão Eletrotécnica Internacional) foi a precursora e definiu uma série de padrões, chamados Padrões de Compatibilidade Eletromagnética (EMC), para lidar com problemas de QEE (ARRILAGA, 1997). A série IEC 61000 (61000, 2018) inclui harmônicas e inter-harmônicas. Uma alternativa à série IEC é o documento IEEE 519-2022 (519-2022, 2022), que fornece diretrizes sobre harmônicas (HAMMAD, 1994).

Com o grande avanço da eletrônica de potência e o aumento das cargas não lineares, torna-se cada vez mais necessária a atenção para a presença de harmônicos no planejamento e na operação das redes e dos sistemas elétricos. Porém, muitas

vezes, essas cargas não lineares também são conhecidas em algumas literaturas como Cargas Elétricas Especiais (CEE) e estão presentes em todos os setores da economia.

- a) **Setor industrial:** fornos a arco, conversores controlados, inversores de frequência etc.;
- b) **Setor da saúde:** equipamentos de disparos, equipamentos com consumo de grande quantidade de energia em um curto espaço de tempo, raio-X, mamografia, densitometria óssea, equipamentos com supercondutores, ressonância magnética de imagem, tomografia computadorizada etc.;
- c) **Setor comercial:** aparelhos de televisão, fornos micro-ondas, lâmpadas fluorescentes etc.

Foge-se um pouco da diferenciação entre cargas lineares e cargas não lineares propriamente ditas, do modelo padrão, que podem ser analisadas através das características  $v(t)$  e  $i(t)$  de cada elemento, através da produção de uma relação não linear entre  $v(t)$  e  $i(t)$ , originando os conteúdos harmônicos (MACEDO JUNIOR, 2020).

Assim, aplicando uma tensão puramente senoidal a uma carga resistiva puramente ideal, o comportamento da forma de onda da corrente será uma réplica perfeita da forma de onda da tensão, aplicando-se, assim, a característica  $v(t) \times i(t)$ , surgindo o comportamento de uma carga linear, conforme a Figura 17, e comprovado com as equações 1 e 2.

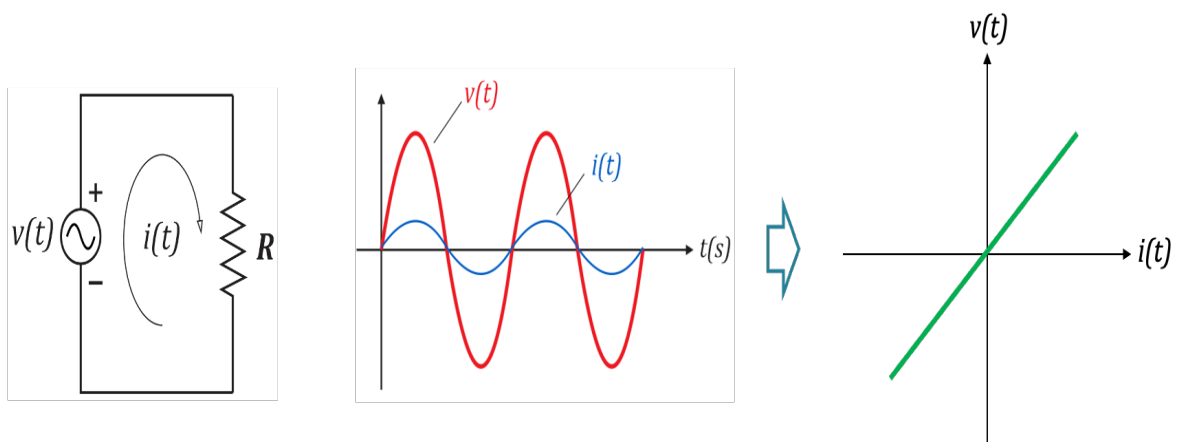


Figura 17 - Linearidade - Carga Linear -  $v(t) \times i(t)$   
Fonte: Macedo Junior (2020).

$$v(t) = R * i(t)$$

(1)

$$\frac{v(t)}{i(t)} = R_{constante} \quad (2)$$

Aplicando uma tensão não-senoidal (Figura 18) a essa mesma carga resistiva ideal, o comportamento da forma de onda da corrente continuará sendo uma réplica perfeita da forma de onda da tensão, caracterizando a relação  $v(t) \times i(t)$ , mantendo o comportamento de uma carga linear, equações 1 e 2, e mantendo o  $R$  constante.

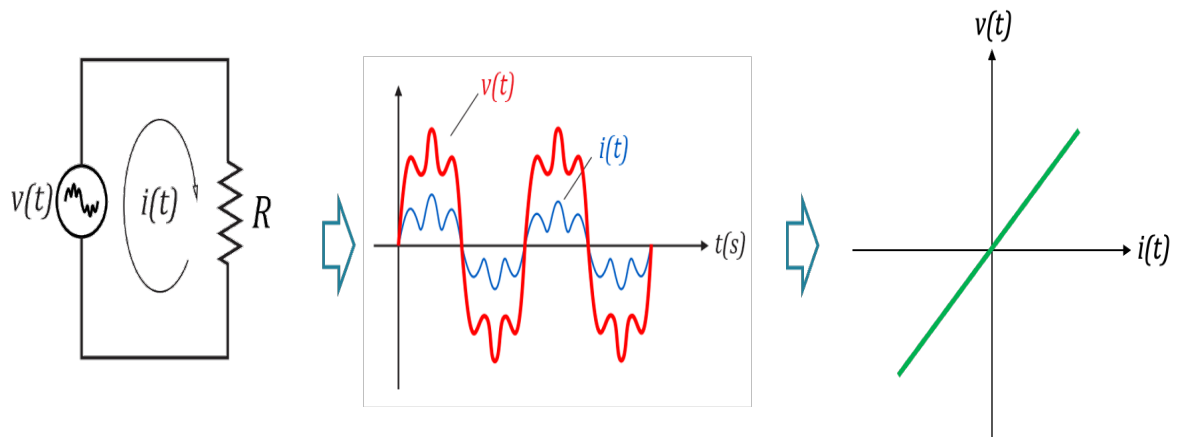


Figura 18 - Linearidade - Carga Linear -  $v(t) \times i(t)$   
Fonte: Macedo Junior (2020).

$$v(t) = R * i(t) \quad (1)$$

$$\frac{v(t)}{i(t)} = R_{constante} \quad (2)$$

Assim, conforme a Figura 19, com os rebatimentos para a forma de onda da corrente, teremos a linearidade mais detalhada.

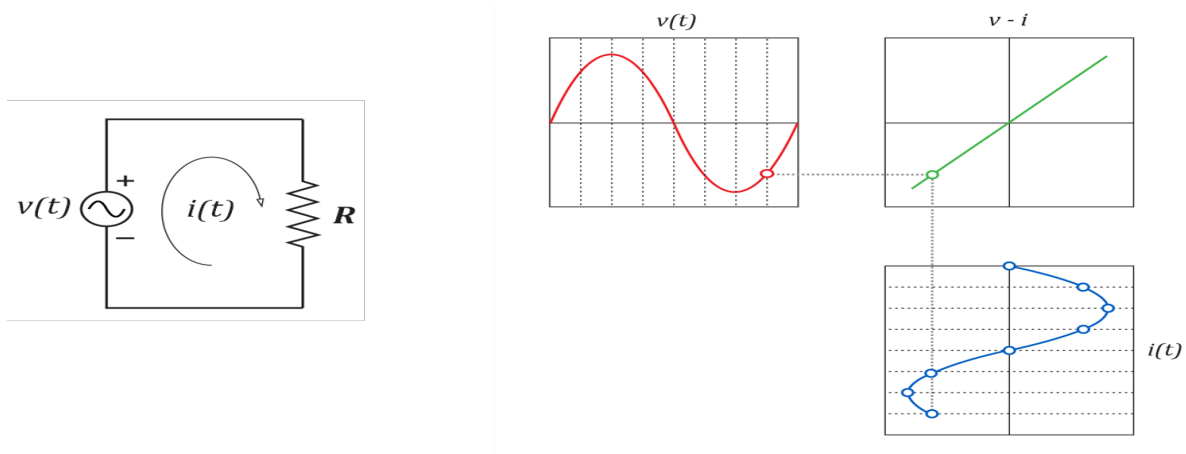


Figura 19 - Construção ponto-a-ponto – Carga Linear  
 Fonte: Macedo Junior (2020).

Para a visualização da linearidade ou não linearidade, com base nas características  $v-i$  para módulo de carga resistiva, é intuitiva a linearidade. Porém, para o indutor e o capacitor, essa visualização não é tão trivial, conforme mostra a Figura 20.

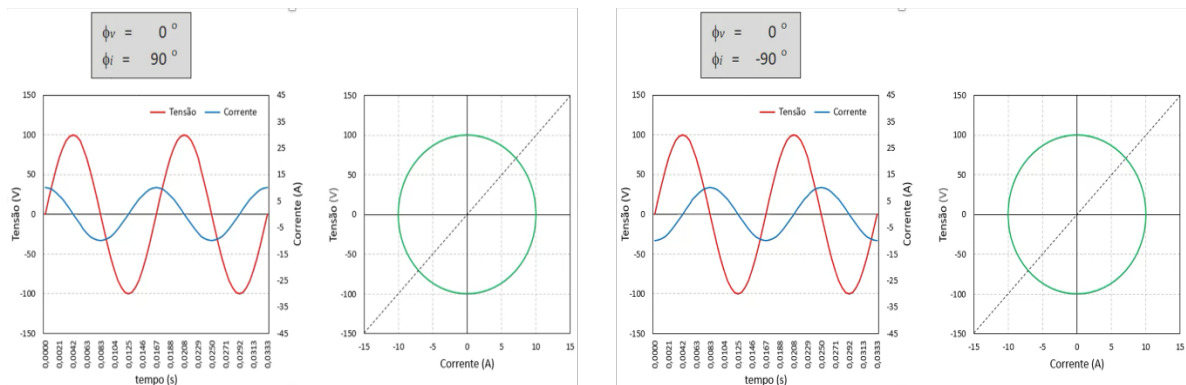


Figura 20 - Características não linearidade da relação  $v-i$  – Indutor e Capacitor  
 Fonte: Macedo Junior (2020).

Porém, apesar de não haver uma linearidade na característica  $v-i$ , com o rebatimento da tensão em  $i(t)$ , a senoide de corrente continua sendo uma réplica perfeita da tensão, apenas com o atraso ou adiantamento da corrente dependendo do elemento, indutor ou capacitor, como demonstra a Figura 21, podendo aplicar o mesmo conceito aos capacitores.



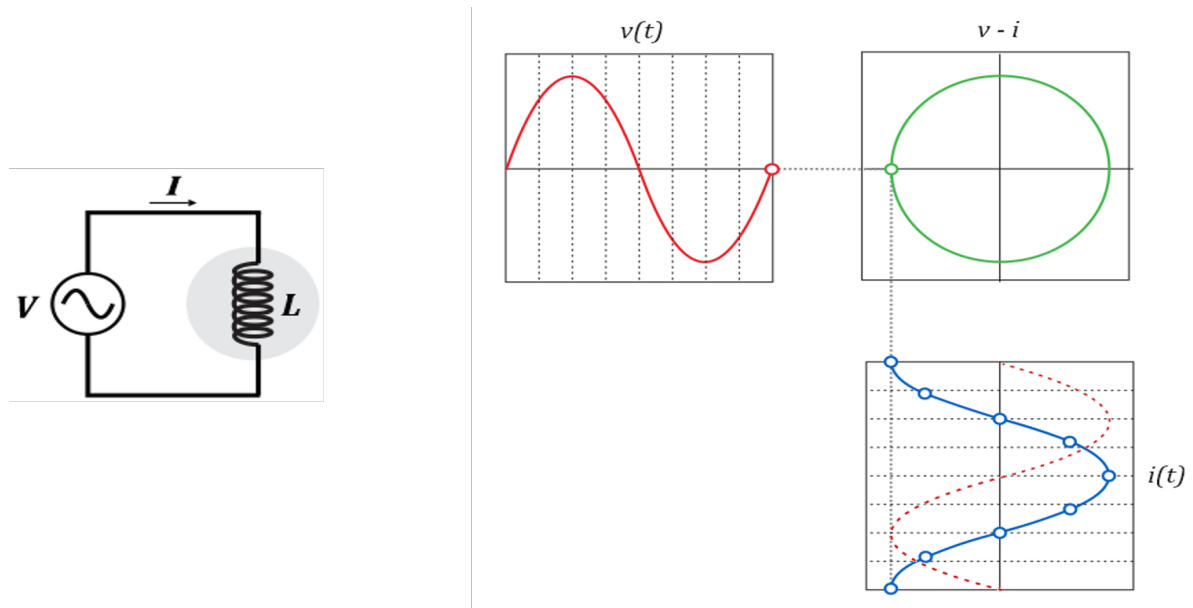


Figura 21 - Construção ponto-a-ponto  
Fonte: Macedo Junior (2020).

Como os modelos acima mostram, em um primeiro momento, não é trivial a visualização da linearidade da carga indutiva e capacitiva, porém, pela Figura 21, essa linearidade se comprova.

Entretanto há uma explicação matemática para a comprovação dessas linearidades, assim, para a relação de tensão e corrente entre esses três elementos, há as equações 3 a 5.

$$v(t) = R * i(t) \quad (3)$$

$$v(t) = \frac{1}{c} * \int i(t) dt \quad (4)$$

$$v(t) = L * \frac{d}{dt} i(t) \quad (5)$$

Uma operação linear não se resume apenas a multiplicação por uma constante, mas também a multiplicação de uma constante pela integração ou derivação de uma função (MACEDO JUNIOR, 2020). Com isso, passa-se as equações acima para o domínio da frequência, conforme as equações 6 a 8, comprovando a linearidade dos três elementos.

$$R = \frac{V}{I} \quad (6)$$

$$X_C = \frac{V}{I} \quad (7)$$

$$X_L = \frac{V}{I} \quad (8)$$

Agora, mudando a carga para um modelo não linear e aplicando uma tensão puramente senoidal, haverá uma mudança não linear na forma de onda da corrente. Caracteriza-se, assim, a carga não linear da relação tensão e corrente, conforme a Figura 22, configurando R como não constante, conforme as equações 9 e 10.

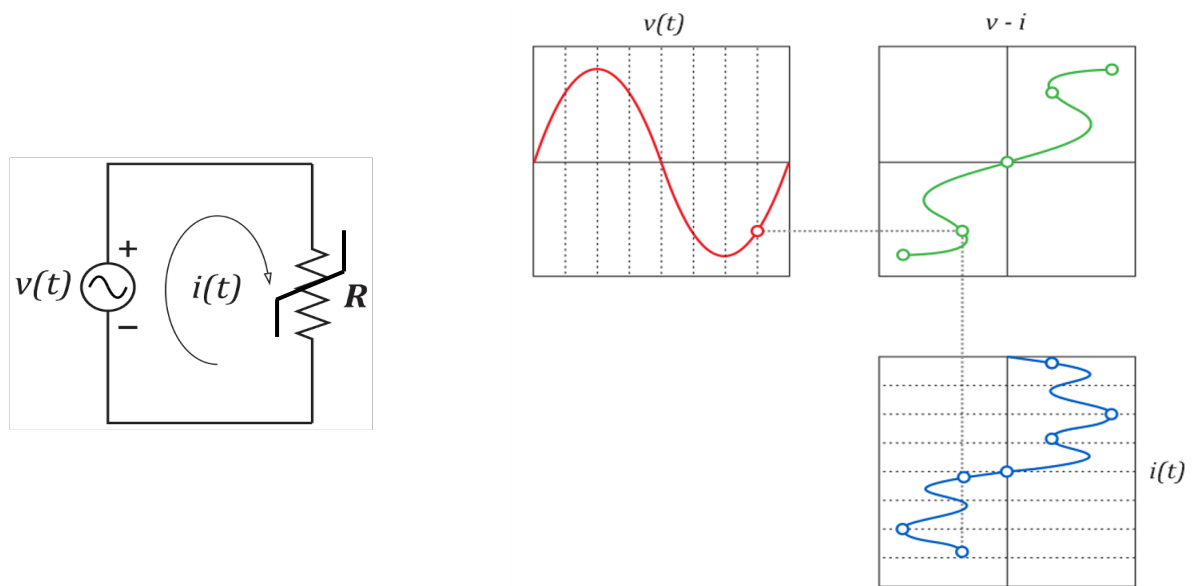


Figura 22 - Não - Linearidade - Carga Não - Linear -  $v(t) \times i(t)$   
Fonte: Macedo Junior (2020).

$$v(t) \neq R * i(t) \quad (9)$$

$$\frac{v(t)}{i(t)} \neq R_{(constante)} \quad (10)$$

Assim, conforme a Figura 23, com os rebatimentos para a forma de onda da corrente, comprava-se a não linearidade da carga com o surgimento dos espectros harmônicos.

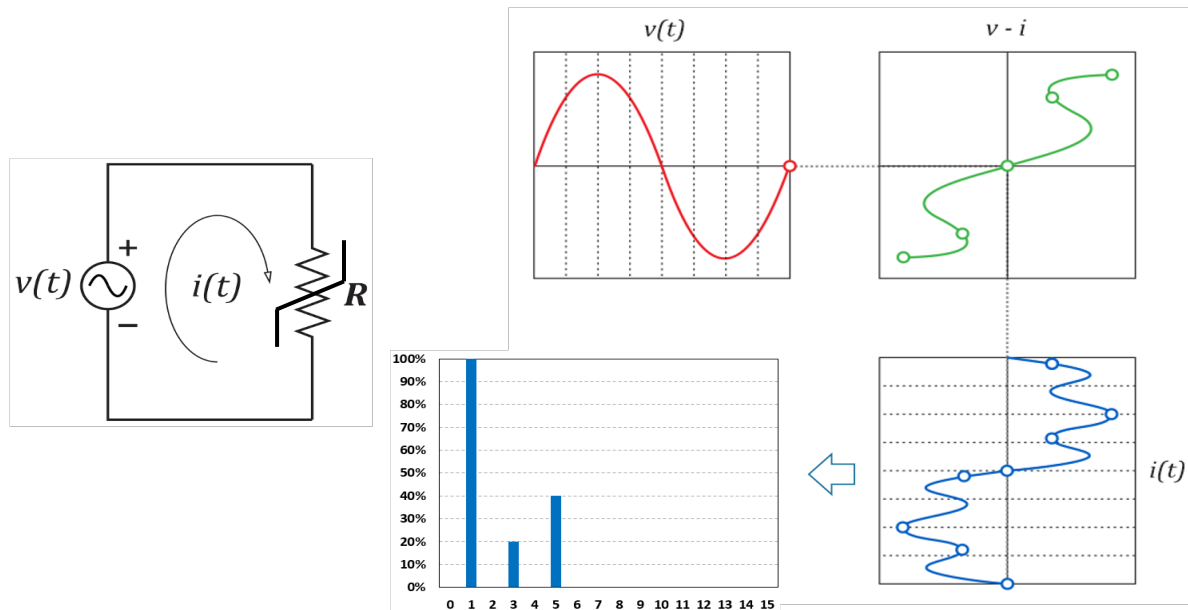


Figura 23 - Construção ponto-a-ponto - Carga Não - Linear  
Fonte: Macedo Junior (2020).

No entanto, com o surgimento das distorções harmônicas, também surgem muitos problemas de QEE. Aquecimentos em toda a instalação, interferências em equipamentos eletromédicos e as perigosas ressonâncias harmônicas são apenas alguns exemplos das harmônicas nas instalações.

Para quantificar o surgimento e a presença dos harmônicos no sistema, foram determinados alguns indicadores, como detalhado em IEEE 3002.8 (2018) e Dugan (2002), e a presença de harmônicos ímpares nos sistemas trifásicos conforme a IEC 61000-2-2.

- $THD_v$  - Total Harmonic Distortion (THD) – Voltage (IEEE 3002.8, 2018)

$$THD_v = 100 * \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \quad (11)$$

- $THD_i$  - Total Harmonic Distortion (THD) – Current (IEEE 3002.8, 2018)

$$THD_i = 100 * \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (12)$$

Onde U e I decorrem através da série de Fourier.

- **TDD - Total Demand Distortion** (519-2022, 2022)

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} I_n^2}}{I_1} \quad (13)$$

Com isso, há a definição das variáveis.

$U_n$  – Tensões de acordo com sua frequência harmônica

$U_1$  – Tensão Fundamental

$I_n$  – Correntes de acordo com sua frequência harmônica

$I_1$  – Correntes Fundamental

### 2.3.1 Ressonância Harmônica

A frequência de ressonância ocorre em qualquer sistema físico que receba energia de frequência igual a uma de suas frequências naturais de vibração, assim, esse sistema passará a vibrar com amplitudes cada vez maiores, ocorrendo o fenômeno de superposição de ondas e alterando a energia total do sistema. Uma taça quebrando devido a ondas sonoras e uma criança em um balanço com uma pessoa a empurrando, são exemplos ilustrativos desse fenômeno.

No sistema elétrico de potência, os elementos têm características indutiva ou capacitiva. Tais elementos podem causar transferência cíclica de energia entre os elementos indutivos e capacitivos na frequência de sintonia natural de ressonância, conforme descrito pela equação 14. Todavia, nessa frequência, as reatâncias indutivas e capacitivas são iguais, conforme mostra a Figura 24.

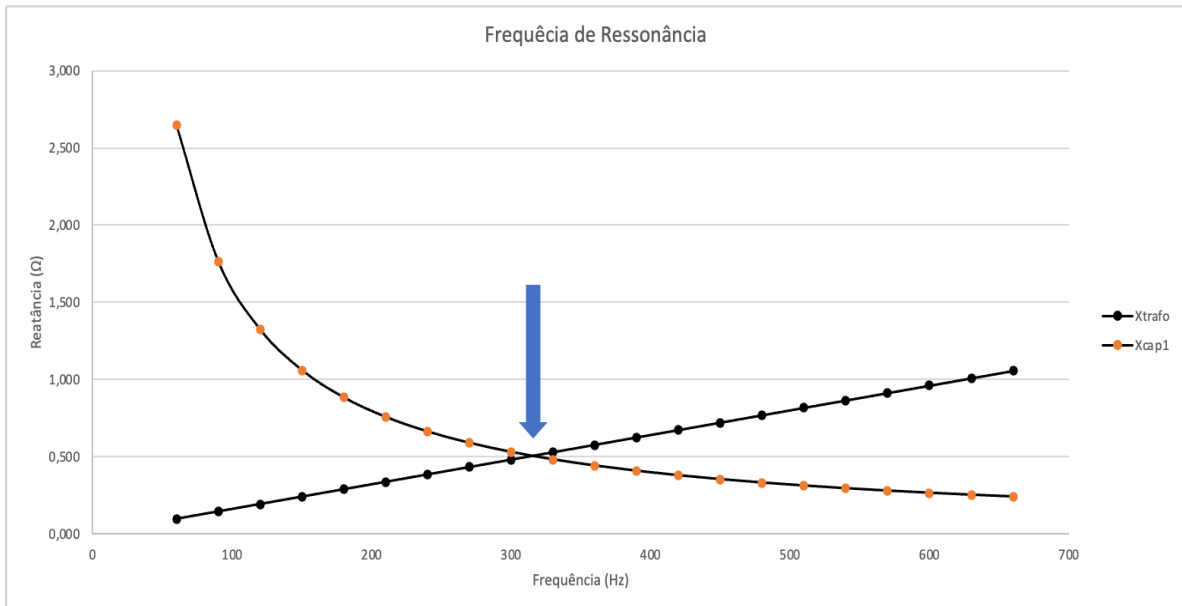


Figura 24 - Igualdade das Reatâncias

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (14)$$

$f_r$  – Frequência de Ressonância

$L$  – Valor do Indutor (mH)

$C$  – Valor do Capacitor (C)

Num circuito LC, os capacitores são tipicamente utilizados para a correção do fator de potência (FP), de modo a evitar penalidades impostas pela concessionária. Isso pode criar uma situação anormal, pois a combinação de elementos indutivos e capacitivos no sistema podem resultar em ressonância, acentuando, por exemplo, a corrente circulante no sistema através da posição do banco de capacitor conforme as Figuras 25 e 26.

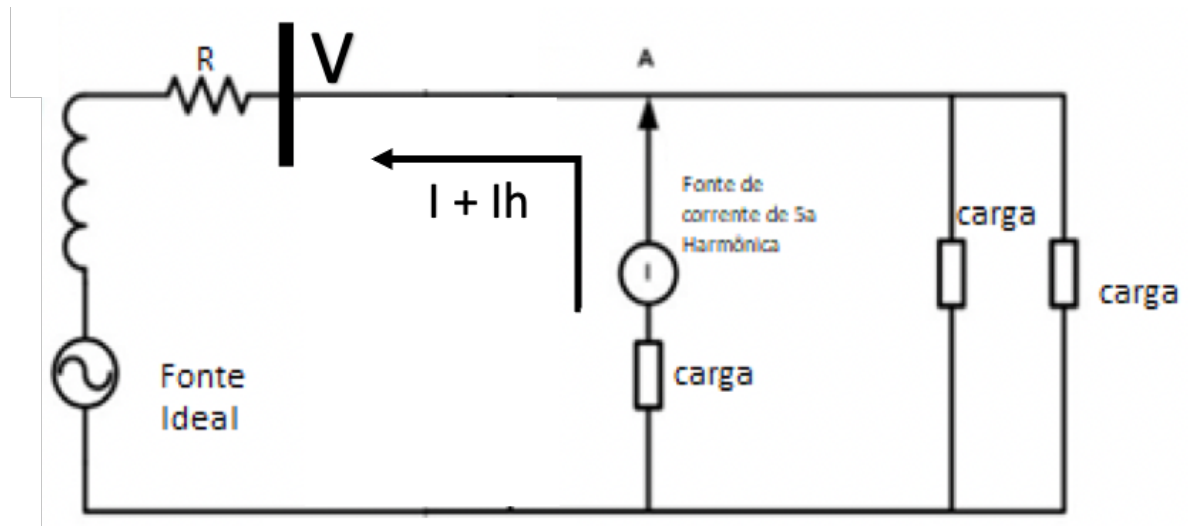


Figura 25 - Circuito RL  
Fonte: Starosta (2020).

$I$  – Corrente no Trecho  
 $I_h$  – Corrente Harmônica

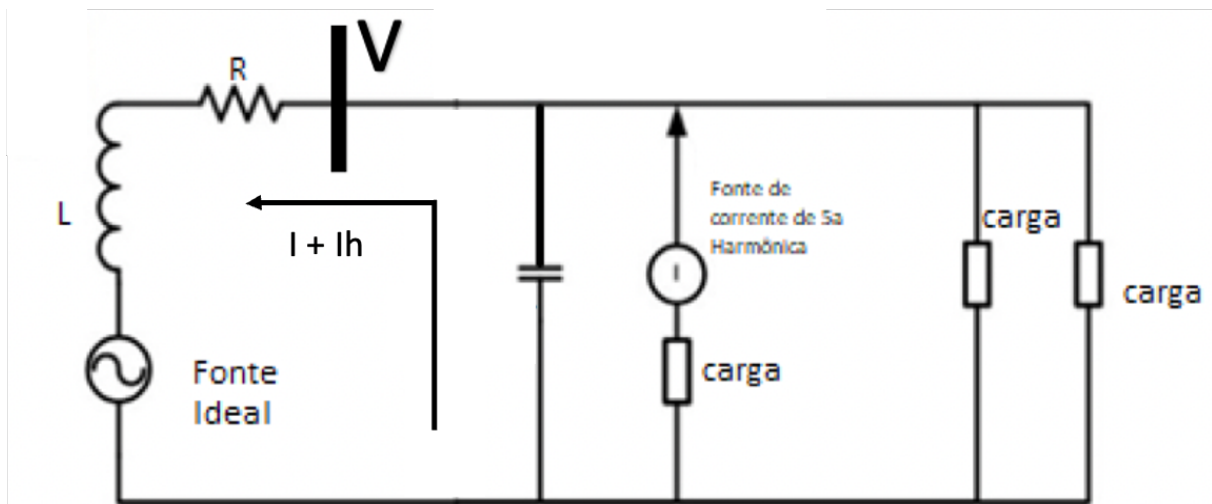


Figura 26 - Circuito RLC  
Fonte: Starosta (2020).

Ou seja, a igualdade das reatâncias em módulo indutivos ( $X_L$ ) e capacitivos ( $X_C$ ) em um ponto comum do sistema pode resultar em uma ressonância em série (L e C em série) ou em uma ressonância paralela (L e C em paralelo).

- **Ressonância série:** Considera-se uma ressonância série (Figura 27) quando a corrente se torna elevada e a tensão se torna mínima em um circuito  $X_L$  e  $X_C$  (COGO; SIQUEIRA, 2016). Essa ressonância ocorre quando as correntes harmônicas circulam entre o banco de capacitor e o transformador, sem que nesse circuito haja cargas não lineares. Normalmente, ocorre em outros locais

da instalação, ou seja, para se desenvolver um estudo, deve-se considerar o sistema inteiro como ponto de partida (STAROSTA, 2020).

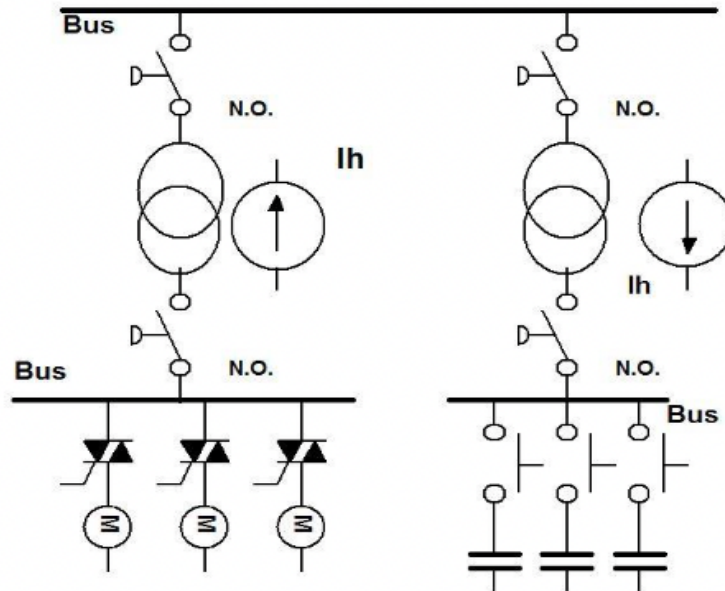


Figura 27 - Diagrama Ressonância Série  
Fonte: Starosta (2020).

**Ressonância paralela:** É considerada quando a impedância do sistema é muito elevada, levando o sistema a sobretensões. A ressonância paralela (Figura 28), diferentemente da série, é local e de fácil diagnóstico. Contudo, as pequenas fontes de correntes harmônicas ligadas a esse sistema desenvolvem tensões que comprometerão sua operacionalidade e segurança. Os bancos de capacitores de múltiplos estágios acabam, também, por impor ao sistema elétrico diversas frequências de ressonância em função dos grupos conectados, e os efeitos de cada situação típica devem ser verificados isoladamente, conforme disposto no Capítulo 3.

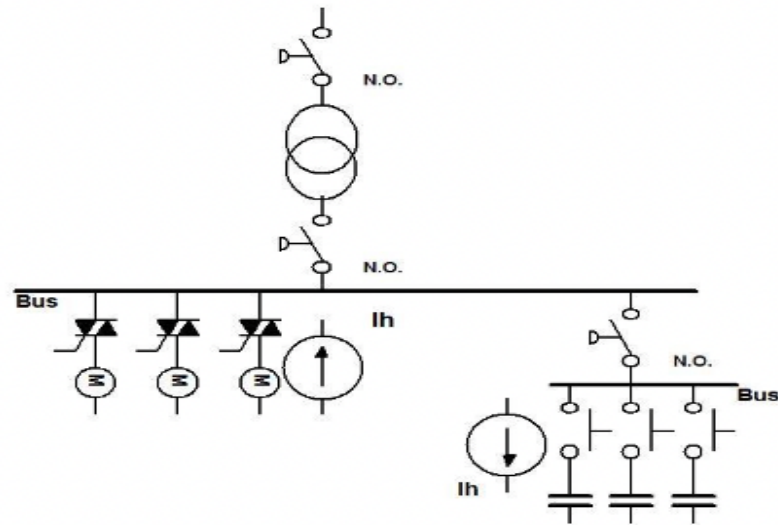


Figura 28 - Diagrama Ressonância Paralela  
Fonte: Starosta (2020).

Porém, de acordo com Almeida e Torquato (2021), para sistemas de distribuição, a frequência de ressonância série depende também, além do transformador e do banco de capacitor, da reatância da linha que separa a barra do transformador, a barra “Bus” na Figura 28. A frequência da ressonância paralela vista de uma barra a certa distância do transformador depende apenas da reatância do transformador e da capacitância de derivação, onde esses dois termos são para as linhas de grandes distâncias (ALMEIDA & Torquato, 2021).

### 2.3.2 Filtro Harmônico

Como exposto, fica claro como as harmônicas são prejudiciais ao sistema elétrico como um todo, desde a geração, transmissão, distribuição até o consumidor final, em todos os setores da economia. Com isso, surge a necessidade de mitigá-las com efetividade e, para isso, existem duas metodologias que podem ajudar: o condicionamento de carga, que garante que o equipamento se torne menos sensível a distúrbios de energia, permitindo a operação mesmo sob distorção significativa de tensão; e a instalação de sistemas de condicionamento de linha que suprimam ou neutralizem os distúrbios do sistema de energia (PANDA, 2016).

Os filtros passivos têm sido mais usados para limitar o fluxo de correntes harmônicas nos sistemas de distribuição. Entretanto, seu desempenho é restrito a alguns harmônicos e podem introduzir ressonância no sistema de energia. Entre as diferentes preferências técnicas disponíveis para melhorar a Qualidade de Energia



Elétrica, os filtros de ativos provaram ser uma alternativa importante e flexível para compensar as perturbações de corrente e tensão nos sistemas de distribuição de energia (PANDA, 2016). Os filtros ativos estão se tornando uma alternativa viável aos filtros passivos e ganham rapidamente participação no mercado, à medida que seu custo se torna competitivo (KIRAWANICH; O'CONNELL, 2014). Através da eletrônica de potência, o filtro ativo introduz componentes de corrente ou tensão que cancelam os componentes harmônicos das cargas não lineares ou das linhas de distribuição, respectivamente (JAIN, 2022).

Os filtros harmônicos (Figura 29) são classificados como filtros passivos, filtros ativos ou filtros híbridos. Os filtros passivos e ativos, ou filtros série, filtros shunt, ou uma combinação de filtros série e filtros paralelos.

Os filtros híbridos (Figura 30) são usados em sistemas monofásicos e trifásicos de três fios e trifásicos de quatro fios, sendo classificados como filtros passivos de derivação em série, filtros ativos de derivação ativa em série, filtros ativos de derivação passiva em série e filtros passivos de derivação ativa em série.

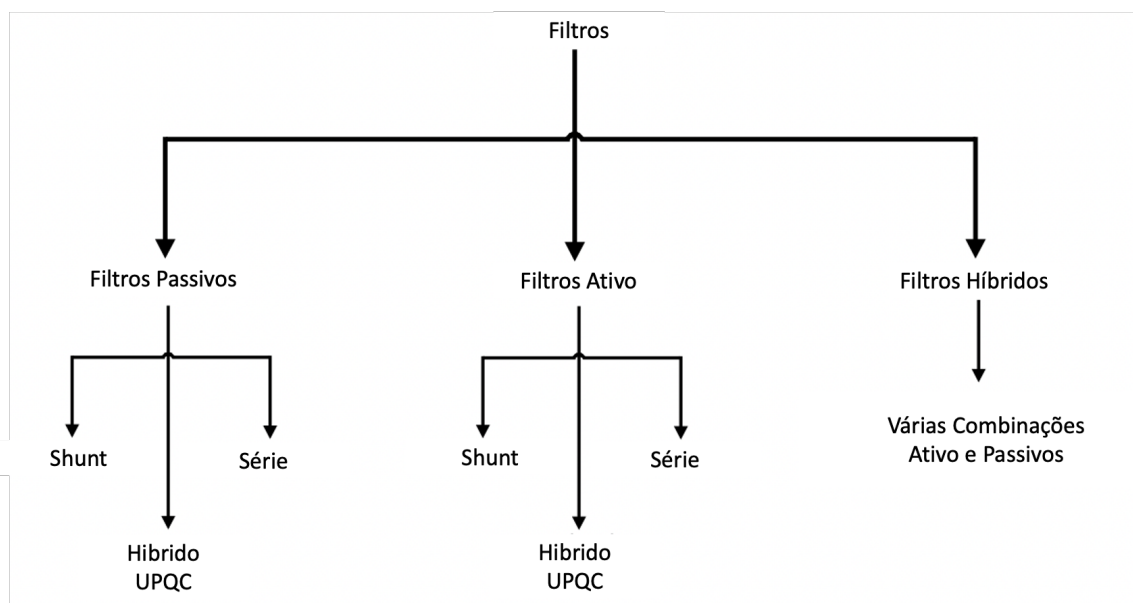


Figura 29 - Classificação dos filtros  
Fonte: Panda (2016).

- **Filtros Passivos:** os filtros passivos desempenham um papel de baixa impedância, drenando as harmônicas para a terra;
- **Filtro Ativo:** os filtros ativos injetam harmônicas iguais e opostas no sistema de energia, para cancelar as geradas por outros equipamentos (MIKKILI, 2011). Ele não reduz os harmônicos, mas os cancelam (PANDA, 2016).

- **Filtro Híbrido:** união dos dois tipos de filtros. Eles possuem gerenciamento de energia reativa e têm uma capacidade de resposta mais rápida que dos demais modelos.

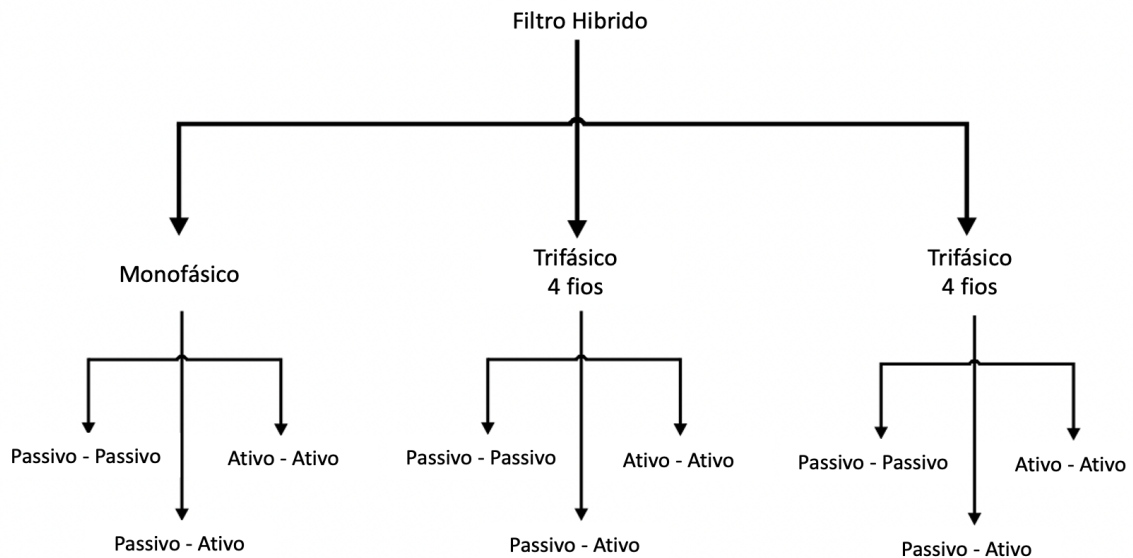


Figura 30 - Classificação dos filtros híbridos  
Fonte: Panda (2016).

Para os filtros, independentemente de sua classificação, há o conceito do fator de qualidade, que determina a faixa de sintonia dele, em outras palavras, a faixa da harmônica que se queira absorver. Os filtros de FQ (Fator de Qualidade) alto são normalmente utilizados para absorver os harmônicos nas frequências de 300 Hz, 420 Hz, 660Hz e 780Hz. Assim, para uma melhor ilustração da atuação dos filtros harmônicos em um sistema, efetua-se uma simulação utilizando o Matlab-Simulink para a mitigação das correntes harmônicas em um sistema constituído por um retificador (sistema não linear). Nessa simulação, destaca-se o sistema sem o filtro e com o filtro, conforme as Figuras 31 a 36, bem como, também, o aumento do fator de potência. Nas Figuras 33 e 36, observa-se o espectro de ordem 0, onde o Matlab-Simulink gera este espectro que representa a faixa CC do sistema.

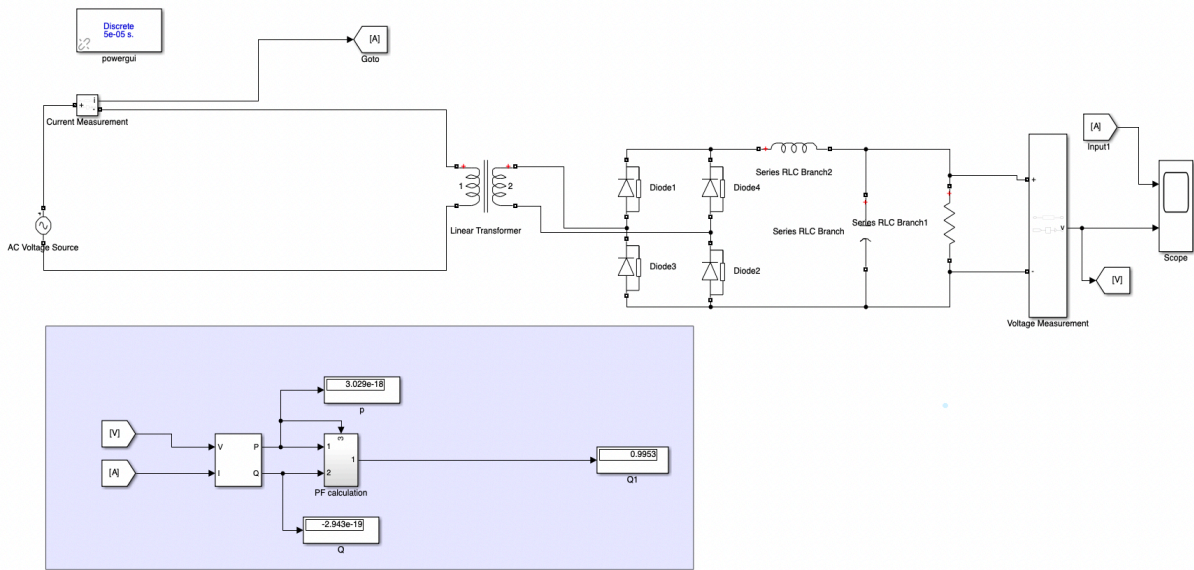


Figura 31 - Simulação Matlab-Simulink – Retificador – Sem Filtro Harmônico

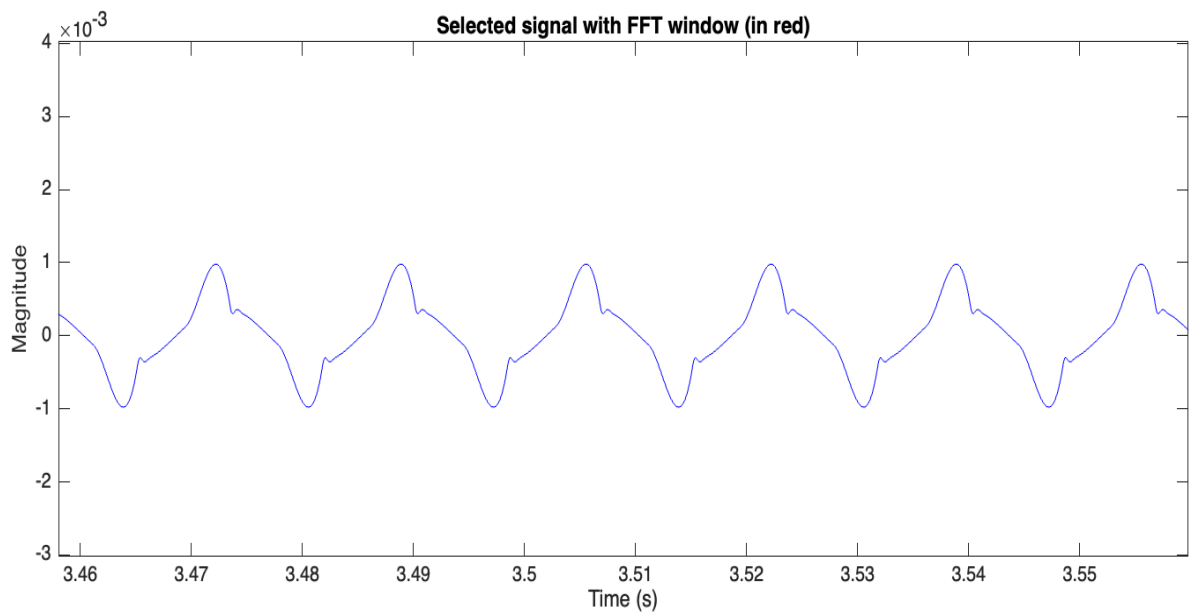


Figura 32 - Simulação Matlab-Simulink – Forma de onda não-senoidal

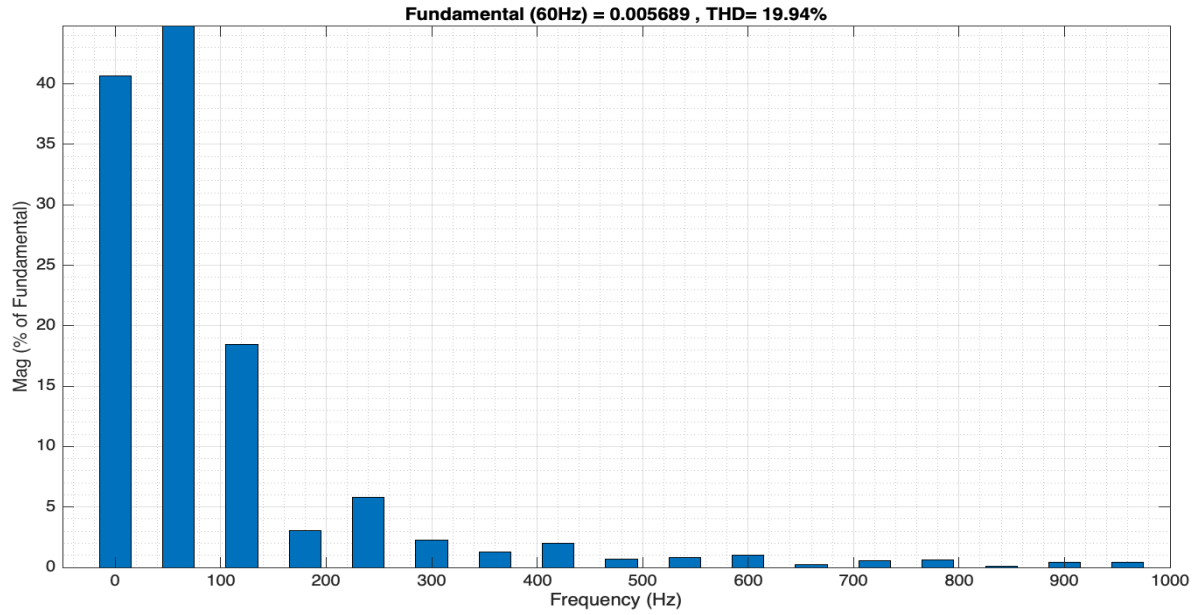


Figura 33 - Simulação Matlab-Simulink – Espectro harmônico do sistema

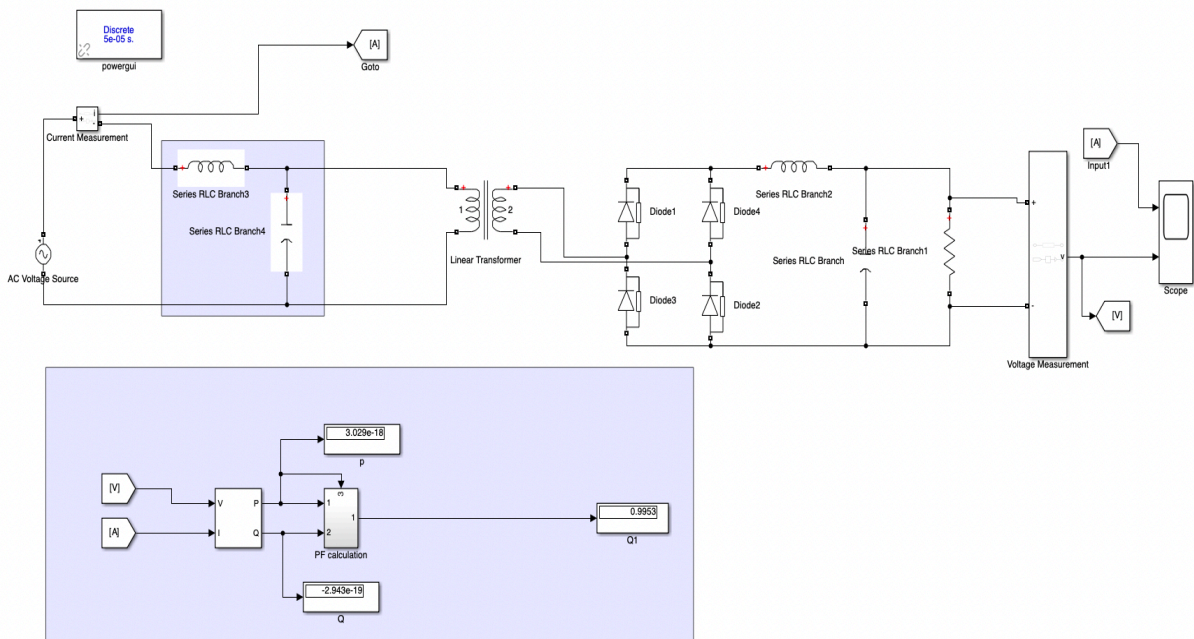


Figura 34 - Simulação Matlab-Simulink – Retificador – Com Filtro Harmônico

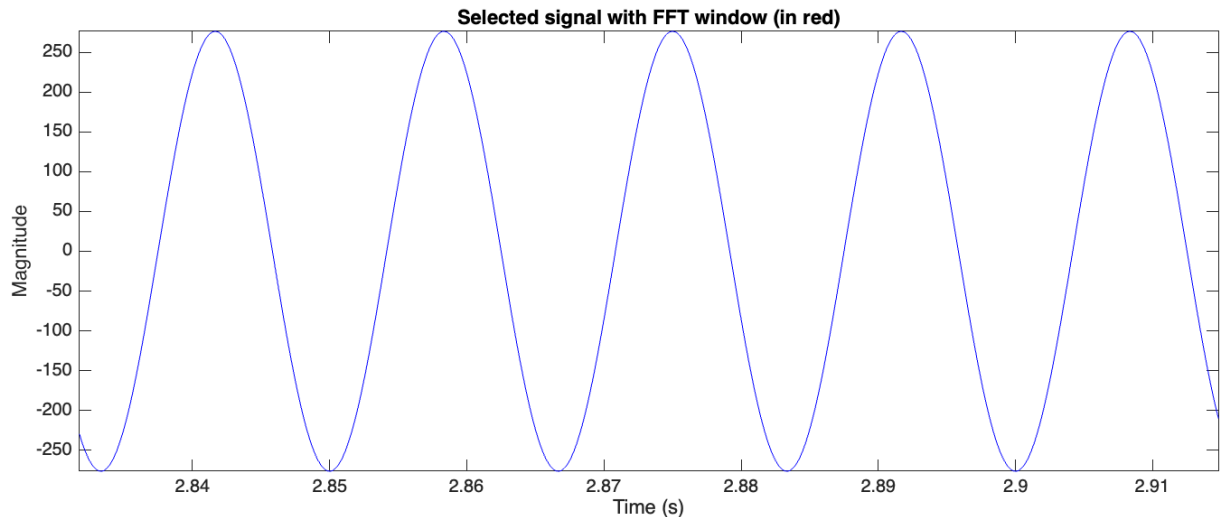


Figura 35 - Simulação Matlab-Simulink – Forma de onda senoidal

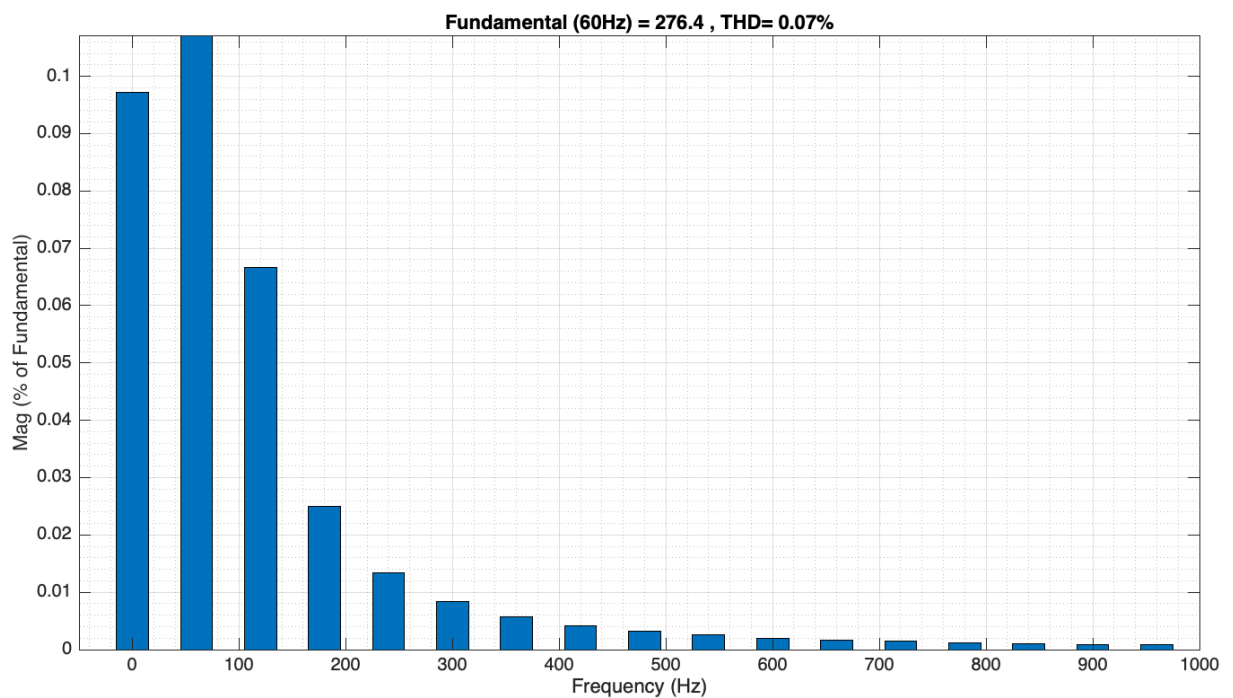


Figura 36 - Simulação Matlab-Simulink – Espectro Harmônico do Sistema.

Para efeitos de cálculos, o filtro antirressonante, ou sintonizante, tem a capacidade de deslocar a frequência de ressonância para a frequência que se queira sintonizar o sistema. Contudo, define-se o indutor a ser instalado em série com o banco de capacitores, a fim de eliminar o fenômeno de ressonância harmônica bem como a frequência de ressonância, utilizando as equações 15 a 22. Os reatores conectados em série com capacitores se definem por valores percentuais, definidos pela relação de sua impedância na frequência fundamental com a impedância dos capacitores na mesma frequência. Os valores percentuais podem ser modelados conforme os passos das equações 17 a 20, especificamente.

$$X_L = X_C \quad (15)$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad e \quad \omega^2 LC = 1 \quad (16)$$

Adotando:

$$p\% = 100\%$$

Modela-se o valor percentual em:

$$p\% = \omega^2 LC \quad (17)$$

Como:

$$\frac{p\%}{\omega^2} = LC \quad (18)$$

Substituindo 18 em 14, modelará a equação 19

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{\left(\frac{p\%}{\omega^2}\right)}} \quad (19)$$

$$p\% = \left(\frac{f_s}{f_r}\right)^2 \quad ou \quad p\% = \left(\frac{1}{h}\right)^2 \quad (20)$$

Assim, define-se os valores percentuais para a sintonia das frequências de ressonância (Figura 37) para o projeto do reator a ser instalado em série com o banco de capacitores (Figura 38), a fim de mitigar as ressonâncias harmônicas.

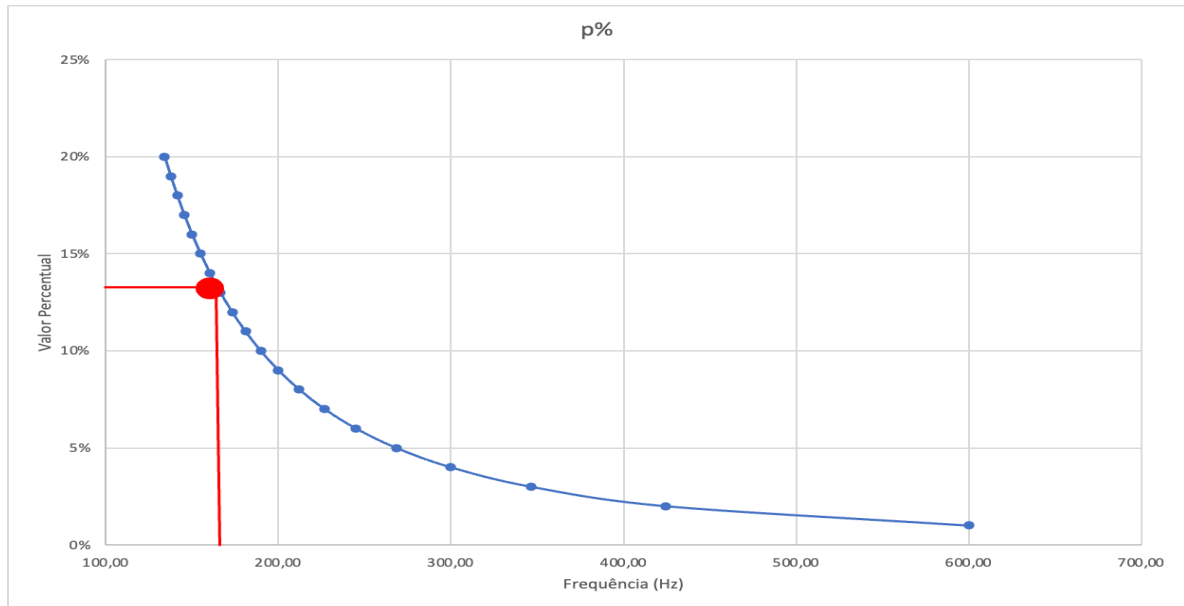


Figura 37 - Determinação dos valores percentuais p%

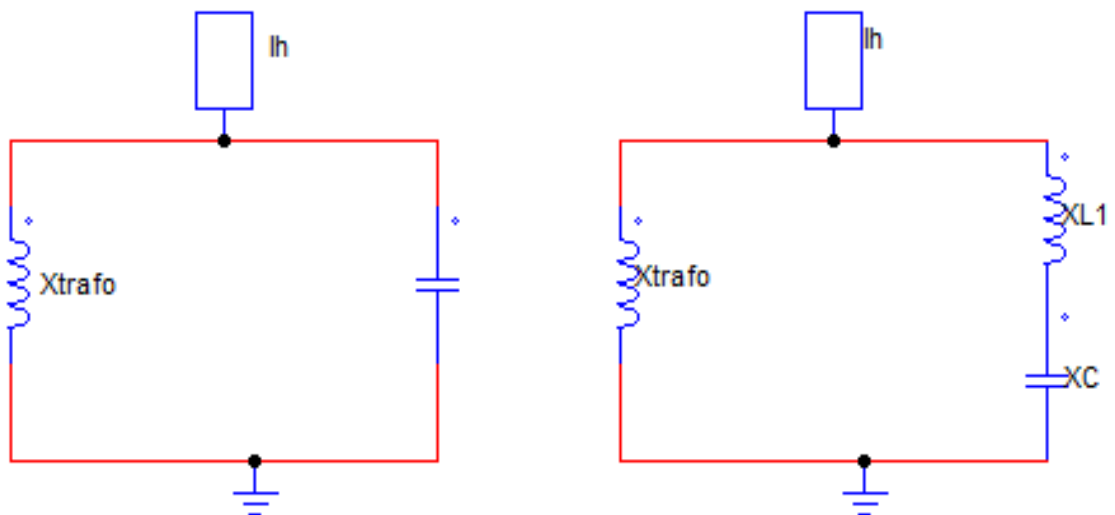


Figura 38 - Introdução de X\_L1 do Filtro - PSIM

$$X_{L1}(\text{fundamental}) = X_C * p\% \quad (21)$$

$X_{L1}$  – Reatância Indutiva do filtro antiressonante na frequência fundamental

$$X_{L1}(\text{ordem harmo.}) = X_{L1}(\text{fund}) * (h) \quad (22)$$

$$h = \frac{X_{L1}(\text{ordem harmo.})}{X_{L1}(\text{fund})} \quad (23)$$

## 2.4 FATOR DE POTÊNCIA

Tipicamente, o fator de potência é expresso pela relação entre a potência ativa e a potência aparente relativa (Figura 39) sob um sinal distorcido (sinal periódico não senoidal). Já o fator de potência de deslocamento corresponde à relação entre a potência ativa e a potência aparente, somente em relação ao componente fundamental da tensão e da corrente (COGO; SIQUEIRA, 2016). Um fator de potência próximo a 1 (um) é um bom indicador da qualidade geral da energia, especialmente para um sistema de energia elétrica com alta absorção de cargas comerciais e com uma grande quantidade de indutância. Um fator de potência baixo normalmente leva a um sistema elétrico menos eficiente e esse pode ser menos eficiente economicamente para os operadores e consumidores finais do sistema. Portanto, a melhoria do fator de potência desempenha um papel crucial na operação eficiente do sistema e na redução dos custos de consumo de eletricidade (FU ZHENG, 2017). Ou seja, com um fator de potência alto, há mais eficiência energética, podendo proporcionar uma maior economia de energia elétrica, por exemplo, ou atender um maior número de usuários com a mesma energia. O fator de potência pode ser utilizado para medir a eficiência energética de um sistema e é um aspecto importante para melhorar a qualidade do fornecimento.

Quando há distorções harmônicas, as reatâncias indutivas elevam-se proporcionalmente à elevação da frequência, e o triângulo de potências é alterado (transformado em um “tetraedro de potências – Figura 40”), introduzindo-se uma nova (terceira) dimensão, decorrente dos var's necessários para sustentar a distorção do sinal. Outro ponto são as medições do fator de potência pelo lado da concessionária, onde os medidores de energia reativados são projetados para trabalhar sob condições puramente senoidais, seguindo as normas vigentes. Eles devem atender a critérios normativos que só dizem respeito a condições senoidais. Contudo, em sistemas elétricos não-senoidais, os resultados das medições passam a depender do projeto específico de cada medidor e os resultados das medições são diferentes entre cada modelo de medidor na presença de harmônicos (WATANABE, 2009).

Quanto mais significativa for a presença de harmônicos na rede mais difícil e complexa torna-se a tarefa de corrigir satisfatoriamente o fator de potência, pois as fontes de corrente harmônicas “enxergam” a associação em paralelo entre o sistema de correção do fator de potência e a indutância equivalente do sistema a montante



(ALMEIDA NETO; STAROSTA, 2021). A inserção de capacitores na rede pode tornar-se insuficiente, uma vez que o baixo fator de potência passa não mais a ser atribuído apenas à presença de cargas indutivas, havendo a contribuição adicional da potência reativa necessária para sustentar a distorção do sinal. Assim, os sistemas de medições das concessionárias de energia que determinam o fator de potência levam em conta apenas a relação entre as potências ativa e aparente em relação à frequência fundamental, ou seja, registram fatores de potência superiores aos reais, uma vez que o fator de potência real não é medido. Em linhas gerais, o fator de potência pode ser definido como a diferença de deslocamento da corrente e da tensão dos consumidores de energia perante a sua fonte, relacionando-se às potências ativas e aparentes do sistema, como demonstram as equações de 24 a 26, sem a presença de harmônicos (YASIN KABIR, 2017).

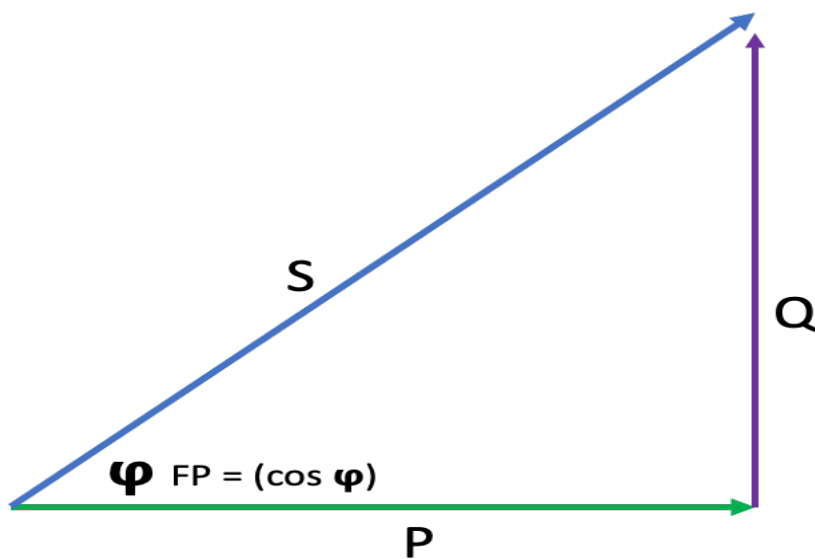


Figura 39 - Triângulo das Potências

$$FP = \frac{P}{S} \quad (24)$$

Onde, na equação

P = Potência Ativa (W), definida pela equação 25

$$P = V_1 \times I_1 \times \cos \varphi \quad (25)$$

$S$  = Potência Aparente (VA), definida pela equação 26

$$S = V_{rms} \times I_{rms} \quad (26)$$

Quando a tensão e a corrente possuem comportamentos definidos por uma função puramente senoidal, os valores de  $V_{rms}$  e  $V_1$  são iguais, bem com  $I_{rms}$  e  $I_1$ , logo, a nova potência aparente será representada pela equação 27.

$$S = V_1 \times I_1 \quad (27)$$

Logo, o FP assumirá o equacionamento, conforme a equação 28,

$$FP = \frac{V_1 \times I_1 \times \cos\varphi}{V_1 \times I_1} = \cos\varphi \quad (28)$$

Contudo, o fator de potência e o deslocamento são numericamente iguais na presença de sinais puramente senoidais. Com a presença de harmônicos, podendo ser uma fonte de tensão senoidal com a presença de cargas não lineares, o fator de potência assumirá um novo modelamento, conforme o tetraedro das potências. Um modelo interessante e de fácil compreensão, onde uma nova variável surgirá. A potência de distorção, representada pela letra  $D$ , é uma relação e/ou acréscimo para a potência aparente das relações não lineares do sistema. Assim, equações 29 a 35 representam o modelamento matemático do tetraedro de potências, conforme a Figura 40.

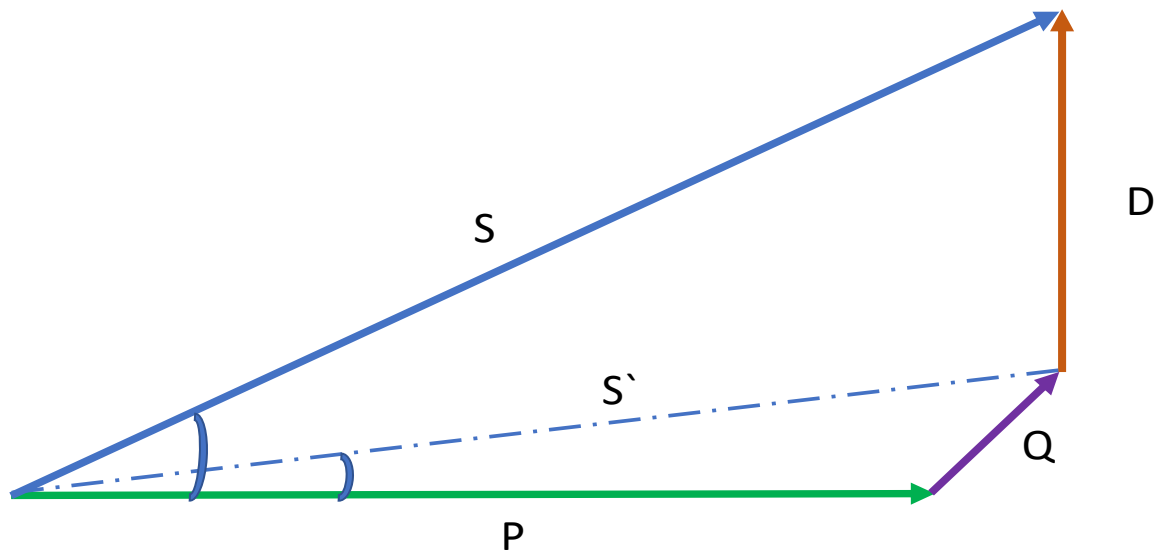


Figura 40 - Tetraedro das Potência

$$S'^2 = P^2 + Q^2 \quad (29)$$

$$S^2 = S'^2 + D^2 \quad (30)$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (31)$$

As relações do FP continuam as mesmas, potência ativa e potência aparente.

Logo,

$$FP = \cos \varphi \quad (32)$$

$$FP = \frac{P}{S} \quad (33)$$

Portanto,

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (34)$$

Ou

$$FP = \frac{(\cos \varphi)}{(\cos \lambda)} \quad (35)$$

Contudo, potência aparente pode ser modelada como contendo três componentes distintas e ortogonais entre si.

Para compensar as diferenças nas metodologias de cálculo, determinar o fator de potência que possa surgir devido aos harmônicos e corrigir o fator de potência, devido a sua efetivação prática, é recomendado efetuar os cálculos na metodologia tradicional, não considerando a potência de distorção (COGO; SIQUEIRA, 2016).

Trabalhar os sistemas com um alto fator de potência traz muitos benefícios aos sistemas, sendo eles:

- Evitar um alto custo da energia elétrica;
- Diminuir quedas de tensão no sistema;
- Diminuir as perdas na distribuição;
- Liberar a capacidade de potência instalada nos sistemas de distribuição;
- Diminuir a corrente de linha do sistema.

Destaca-se que perdas elétricas estão associadas à corrente elétrica em uma instalação. Essas são proporcionais ao quadrado da corrente, sendo e estando diretamente associadas à melhoria do fator de potência de uma instalação (Paulillo, 2018). Destaca-se, também, a questão econômica, porém a introdução de dispositivos de compensação será justificada se a redução de preço esperada exceder as despesas sofridas relacionadas com tal introdução. O consumidor tem o direito de não instalar o dispositivo de compensação se for mais conveniente. A fim de obter uma visão geral, é necessário considerar diferentes situações de operação, com diferentes perfis de carga sazonais, semanais e diárias (VASKOVSKAYA, 2014).

Já com o fator de potência baixo, haverá efeitos prejudiciais para as instalações e seus componentes, e podem ser causados pelos seguintes problemas:

- **Motores de indução operando em vazio ou em carga:** Tais motores consomem praticamente a mesma energia reativa, operando em vazio ou operando em sua capacidade máxima. Assim, quanto menor for a energia ativa consumida, menor é o fator de potência (STAROSTA; MORENO, 2008);
- **Transformadores operando em vazio ou pequenas cargas:** Analogamente aos motores, os transformadores, quando superdimensionados para a carga que devem alimentar, consomem uma quantidade de energia reativa relativamente grande se comparada à energia ativa, dando origem a um fator de potência baixo (STAROSTA; MORENO, 2008);

- **Lâmpadas de descarga:** Necessitam do auxílio de um reator para funcionar. Os reatores magnéticos, assim como os motores e os transformadores, possuem bobinas que consomem energia reativa, contribuindo para a redução do fator de potência (STAROSTA; MORENO, 2008);
- **Grande quantidade de motores de pequena potência:** A grande quantidade de motores de pequena potência provoca, muitas vezes, um baixo fator de potência, pois o correto dimensionamento de tais motores em função das máquinas a eles acopladas pode apresentar dificuldades (STAROSTA; MORENO, 2008);
- **Tensão acima da nominal:** A potência reativa é aproximadamente proporcional ao quadrado da tensão aplicada; já no caso dos motores de indução, a potência ativa só depende, praticamente, da carga mecânica aplicada ao eixo do motor, maior a energia reativa consumida e menor o fator de potência (STAROSTA; MORENO, 2008).

De modo geral, o fator de potência varia de acordo com as instalações, onde estas variam conforme a sua atividade econômica.

Nos prédios comerciais, como edifícios de escritórios e corporativos, hospitais, agências bancárias, supermercados e centros de processamento de dados (*data centers*), devido há grande presença de cargas de sistemas de refrigeração e ar-condicionado, bombas, sistemas de transportes vertical (elevadores, escadas rolantes, monta cargas), iluminações e equipamentos de alto poder de eletrônica de potência, o fator de potência merece atenção, pois essas cargas possuem características indutivas (STAROSTA; MORENO, 2008). Nas indústrias, o cenário não é diferente, há um alto consumo de energia reativa pelas cargas típicas industriais, como as injetoras, extrusoras, fornos de indução ou a arco, sistemas de solda, prensas, guindastes, monta-cargas e ponte rolantes, entre outros.

Contudo, para compensar a penalidade do fator de potência, especialistas recorrem a metodologia da compensação reativa, com instalações de banco de capacitores nos locais de penalidade ou diretamente no alimentador da instalação (STAROSTA; MORENO, 2008).

#### 2.4.1 Compensação Reativa

Como explanado na seção anterior, o fator de potência muito baixo causa problemas para a instalação, bem como perdas financeiras. Com o passar do tempo, foram descobertas técnicas para injeção de reativos contrários aos fornecidos pela carga, a fim de cancelar o resultante da potência reativa do sistema, onde essa técnica recebeu o nome de compensação reativa. Essa compensação, ou ajuste, do fator de potência é realizada com a instalação de capacitores, em paralelo (*tipo shunt*) no mesmo ponto da carga.

A resposta ao problema de compensação é definir quanto de potência reativa (Q) deve ser injetada no sistema, de modo a compensar a potência reativa consumida pela carga. A convenção de sinal adotada para a potência reativa considera a potência reativa consumida pela carga com sinal positivo e aquela injetada com o sinal negativo (STAROSTA; MORENO, 2008). Mesmo havendo a possibilidade da compensação reativa através de motores superexcitados e outros métodos, a compensação reativa através de bancos de capacitores é a mais eficaz, devido aos seus custos e a forma de instalação (WOLFGANG HOFMANN, 2012).

Para uma correta alocação do banco de capacitores no sistema, conforme as Figuras 41 a 43, deve-se atentar ao fato que esses dispositivos somente reduzem a corrente de linha no trecho compreendido entre a fonte geradora e o seu ponto de instalação. Observa-se, ainda, que, a partir do ponto de instalação dos bancos, há uma elevação de tensão devido a diminuição da queda de tensão a montante, como consequência da redução da corrente (COGO; SIQUEIRA, 2016). Outro conceito que deve ser levado em consideração são os efeitos da ressonância entre o capacitor e o restante do sistema (que muitas vezes tem o transformador como o seu principal elemento).

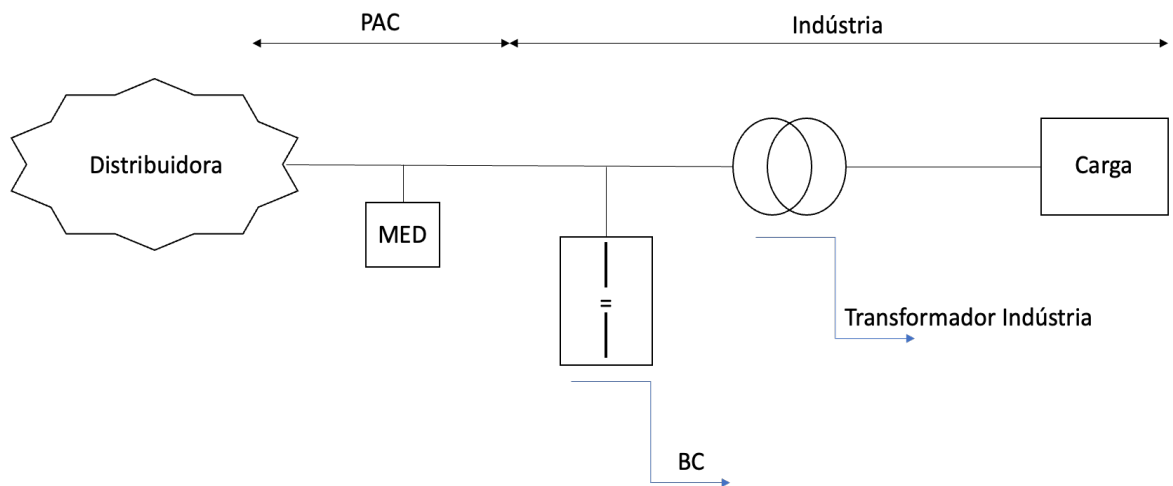


Figura 41 - Localização do banco de capacitores: Primário Transformador adaptado  
Fonte: Cogo e Siqueira (2016).

No caso ilustrado pela Figura 41, os bancos de capacitores devem ser alocados após a medição do faturamento, no sentido da fonte para a carga no primário do transformador. Em geral, esse tipo de instalação é mais caro que a instalação após o secundário. A grande desvantagem dessa localização é não permitir a liberação da carga do transformador ou dos seus secundários da instalação consumidora. Assim, sua função se restringe somente à correção do fator de potência e à liberação da carga da rede da distribuidora (COGO; SIQUEIRA, 2016).

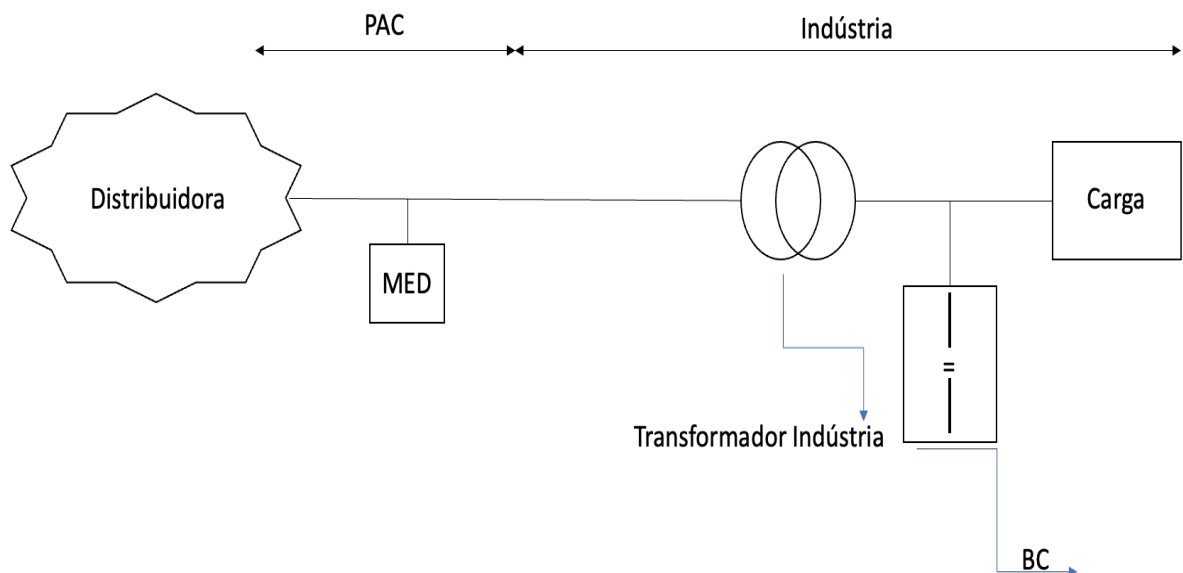


Figura 42 - Localização do banco de capacitores: Secundário Transformador  
Fonte: Cogo e Siqueira (2016) adaptado.

O modelo de instalação ilustrado na Figura 42 é o mais comum na prática, instalando-o no barramento de distribuição, resultando, assim, em menores custos finais para a instalação e maiores benefícios. Há, ainda, a vantagem de liberar a potência dos transformadores da subestação (COGO; SIQUEIRA, 2016).

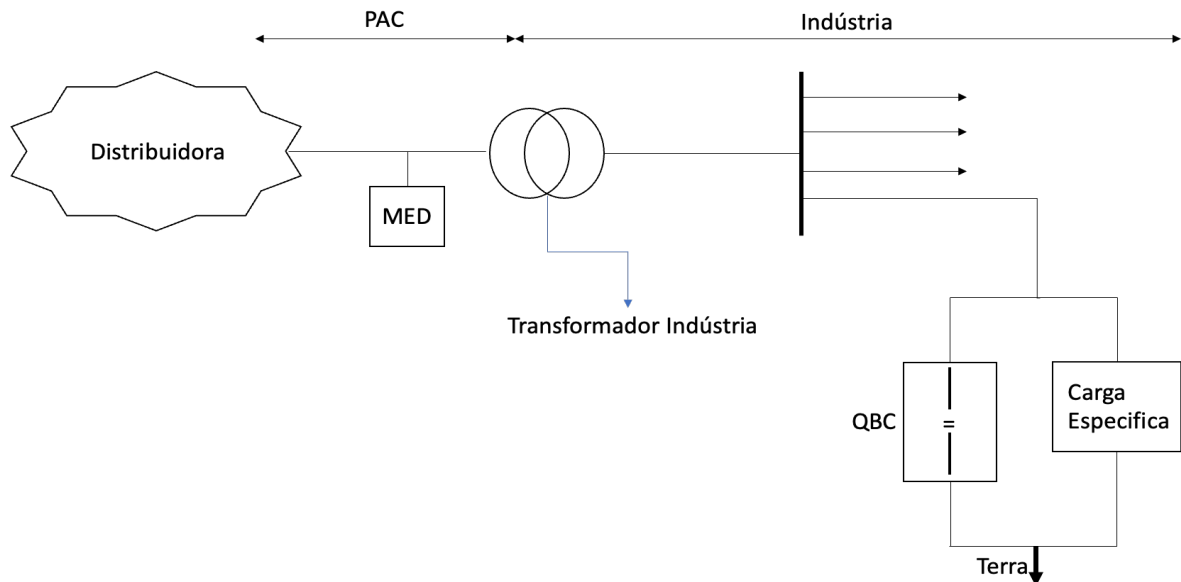


Figura 43 - Localização do banco de capacitores: Ponto de Cargas Especifica  
Fonte: Cogo e Siqueira (2016) adaptado.

Quando uma carga possui um baixo fator de potência, como no caso dos motores e ressonância magnética que será estudado nos capítulos à frente, pode-se fazer a sua correção nos terminais da carga (Figura 43).

Para uma correta compensação reativa, além da correta identificação do local de instalação do banco de capacitor, seu dimensionamento é primordial. Esse dimensionamento é dividido em dois momentos, ou dois modelos, de acordo com a carga, linear ou não linear. Em uma análise e com a inexistência das correntes harmônicas, onde (modelo do tetraedro de potências) pode-se calcular o valor do reativo consumido diretamente pela equação 31. Assim, pela Figura 44 representa-se o modelo clássico para a compensação reativa, uma potência reativa  $Q_1$  consumida pela carga linear, a potência reativa pelos capacitores  $Q_{cap}$  e a potência reativa resultante, conforme a equação 37. Nessa situação, espera-se que  $Q_2$  seja menor que  $Q_1$ .

$$Q = \sqrt{S^2 + P^2} \quad (36)$$



$$Q_2 = (Q_1 - Q_{cap}) \quad (37)$$

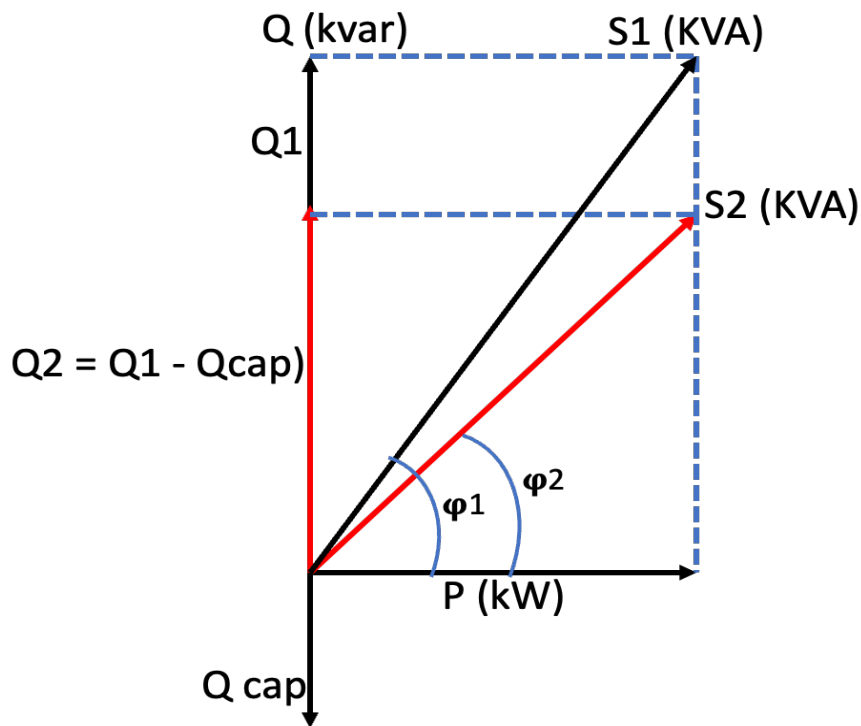


Figura 44 - Triângulo da compensação reativa

Onde,

- $Q_1$  e  $S_1$ : Potências reativas e aparente da compensação de reativos;
- $\varphi_1$ : É o ângulo de fase antes da compensação de reativos;
- $Q_2$  e  $S_2$ : Potências reativas e aparente após a compensação;
- $\varphi_2$ : É o ângulo de fase após a compensação de reativos;
- $Q_{cap}$ : Potência reativa injetada pelos capacitores.

É importante notar que essa definição considera uma situação instantânea de carga ou uma carga sem variação. A rigor, a análise deve ser estendida a todas as condições típicas de carga (STAROSTA; MORENO, 2008).

As questões matemáticas das estimativas e dos cálculos associados objetivam definir quanto de potência reativa deve ser injetada. Tais questões tornam-se de importância limitada, na medida que a carga a ser compensada apresenta comportamento variável ao longo do tempo e contém, por sua própria característica operacional, correntes harmônicas (características de não linearidade) (STAROSTA; MORENO, 2008). A solução a ser implantada deve garantir adequada operação da instalação durante todo o ciclo de carga. Os capacitores devem compensar a carga

em todos os seus ciclos de operação, sem causar efeitos indesejados, como sobretensões e ressonâncias (STAROSTA; MORENO, 2008). Os novos valores do fator de potência corrigido e da potência aparente dependem, também, do conteúdo harmônico da carga. Em última análise, o fator de potência total está relacionado diretamente aos valores da potência de distorção, potência aparente, potência aparente relativa à componente fundamental e do ângulo  $\lambda$  (STAROSTA; MORENO, 2008).

Em linhas gerais, a compensação de energia reativa em uma instalação deve ser analisada com o devido cuidado, evitando soluções imediatistas que podem conduzir a resultados técnicos e/ou econômicos não satisfatórios. É necessário ter critério e experiência para efetuar uma compensação adequada, para que não sejam provocados efeitos transitórios ou ressonâncias que prejudiquem o desempenho do sistema das instalações e da distribuição (RN 1000, 2021).

### 3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS NORMAS – DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Se os problemas de qualidade de energia aumentam a um nível em que começam a afetar não só aqueles que estão emitindo distúrbios no sistema, mas também aqueles que estão recebendo esta energia distorcida, então, tais problemas tornam-se motivo de preocupação. Face a esses problemas de distorção de energia, várias organizações, como IEC (*International Electrotechnical Commission*), IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*), *American National Standards Institute* (ANSI), *British Standards* (BS), *European Norms* (EN), *Computer Business Equipment Manufacturers Association* (CBEMA), e *Information Technology Industry Council* (ITIC), desenvolveram normas diferentes para especificar os limites admissíveis de vários índices de desempenho, para manter o nível de qualidade da energia elétrica a uma referência aceitável e para fornecer orientações aos clientes, fabricantes e serviços públicos sobre a contenção dos vários eventos que causam problemas. Lembra-se que, infelizmente, ainda não há normas específicas quanto a emissividade e a imunidade dos equipamentos. No futuro, pode-se ter estampado, nos manuais dos equipamentos, informações nesse tocante, como as informações de eficiência energética desses equipamentos. Assim, hoje, temos as seguintes normas para o seguimento da QEE:

- a) IEEE Standard 519-2022 – *“Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”*
- b) IEEE Standard 1159-1995 – *Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*
- c) IEEE Standard 1100-1999 – *Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment*
- d) IEEE Standard 1250-1995 - *Guide for Service to Equipment Sensitive to Momentary Voltage Disturbances*
- e) IEEE Standard 1366-2012 - *Electric Power Distribution Reliability Indices*
- f) IEC 61000-2-2 - *Compatibility Levels for Low-Frequency Conducted Disturbances and Signaling in Public Supply Systems*
- g) IEC 61000-2-4 - *Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances.*

- h) IEC 61000-3-2 - *Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current Up to and Including 16 A Per Phase)*
- i) IEC 61000-4-15 - *Flicker Meter – Functional and Design Specifications*
- j) PRODIST - Módulo 8 - *QUALIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA*
- k) EN 50160 - *Voltage Characteristics of Public Distribution Systems*
- l) IEC IEC60831-1 - *Shunt power capacitors of the self-healing type for a.c. systems having a rated voltage up to and including 1 000 V.*

Nessas normas, destaca-se IEEE 519-2022, IEC 61000 e, no Brasil, o PRODIST - Módulo 8, cada uma difere quanto seus índices e seus pontos de referências. As tabelas de 1 a 7 representam essas diferenças.

Tabela 1 – IEEE Standard 519-2022: limites de distorção da corrente para sistemas de distribuição geral (120-69 000 V)

Distorção máxima da corrente harmônica (em percentagem da IL)						
Ordem harmônica individual (harmônicas ímpares)						
Isc/IL	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD(%)
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
<1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Fonte: (519-2022, 2022)

Tabela 2 – IEEE Standard 519-2022: limites de distorção de corrente para sistemas de distribuição geral (>161 kV), geração dispersa e cogeração

Distorção máxima da corrente harmônica (em percentagem da IL)						
Ordem harmônica individual (harmônicas ímpares)						
Isc/IL	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD(%)
<50	2,00	1,00	0,75	0,30	0,15	2,50
≥50	3,00	1,50	1,15	0,45	0,22	3,75

Fonte: (519-2022, 2022)

Notas: Os harmônicos estão limitados a 25% dos limites harmônicos. Todo o equipamento de produção de energia está limitado a esses valores de distorção de corrente, independentemente do ISC/IL real, onde:

*ISC* = corrente máxima de curto – circuito em PCC

*IL* = I<sub>max</sub> de carga de demanda (componente de frequência fundamental) no PAC.

Tabela 3 – IEC 61000-3-2: corrente harmônica máxima permitida para equipamento da classe D (corrente limitada a menor ou igual a 16 A pôr fase) (classe D: PC, monitores PC, receptores de rádio ou TV) (potência de entrada P 600 W)

Ordem Harmônica, h	Corrente harmônica máxima admissível por watt (mA/W)	Corrente harmônica máxima admissível (A)
3	3,40	2,3
5	1,90	1,14
7	1,00	0,77
9	0,50	0,4
11	0,35	0,33
13 ≤ h ≤ 39	3,85/h	0,15-0,15/h

Fonte: (61000, 2018)

Tabela 4 – IEEE Standard 519-1992 – Limites de Distorção de Tensão

Tensão na Barra PCC	Distorção de Tensão Individual (%)	Distorção de Tensão Total (%)
$V \leq 1\text{kV}$	5,00	8,00
$1\text{kV} < V \leq 69\text{kV}$	3,00	5,00
$69\text{kV} < V \leq 161\text{kV}$	1,50	2,50
161kV	1,00	1,50

Fonte: (61000, 2018)

Tabela 5 – IEC 61000-2-4: Limites de Compatibilidade: Harmônicos de Tensão (Uh% e THDV) em Instalações Industriais até 35 kV – Classe 1

Harmônicas Ímpares		Harmônicas Par		Harmônicas Tríplas	
h	Vh (pu)	h	Vh (pu)	h	Vh (pu)
5	3	2	2	3	3
7	3	4	1	9	1,5
11	3	6	0,5	15	0,3
13	3	8	0,5	≥21	0,2
17	2	10	0,2		
19	1,5	≥12	0,2		
23	0,2				
25	1,5				
≥29	0,2 + 12,5/h				

Fonte: (61000, 2018)

Tabela 6 – IEC 61000-2-4: I Limites de Compatibilidade: Harmônicos de Tensão (Uh% e THDV) em Instalações Industriais até 35 kV – Classe 2

Harmônicas Ímpares		Harmônicas Par		Harmônicas Tríplas	
h	Vh (pu)	h	Vh (pu)	h	Vh (pu)
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6	0,5	15	0,3
13	3	8	0,5	≥21	0,2
17	2	10	0,2		
19	1,5	≥12	0,2		
23	1				
25	1,5				
≥29	0,2 + 12,5/h				

Fonte: (61000, 2018)

Tabela 7 – IEC 61000-2-4: Limites de Compatibilidade: Harmônicos de Tensão (Uh% e THDV) em Instalações Industriais até 35 kV – Classe 3

Harmônicas Ímpares		Harmônicas Par		Harmônicas Tríplas	
h	Vh (pu)	h	Vh (pu)	h	Vh (pu)
5	8	2	3	3	6
7	7	4	1,5	9	2,5
11	5	≥6	1	15	2
13	4,5			21	1,75
17	4			≥21	1
19	4				
23	3,5				
25	3,5				
≥29	5v(11/h)				

Fonte: (61000, 2018)

Contudo, é percebido que as normas IEEE Standard 519-2022 e IEC 61000 (itens analisados) abordam situações e disposições de análises diferentes. A IEEE Standard 519-2022 aborda sempre a quantidade de conteúdo harmônico no ponto de acoplamento comum (PAC), isso é, não há análises para dentro da instalação a jusante do PAC. Porém, a IEC 61000 aborda e determina os limites estabelecidos para cada equipamentos e para dentro da instalação, montante, a Figura 45 exemplifica estes modelos.

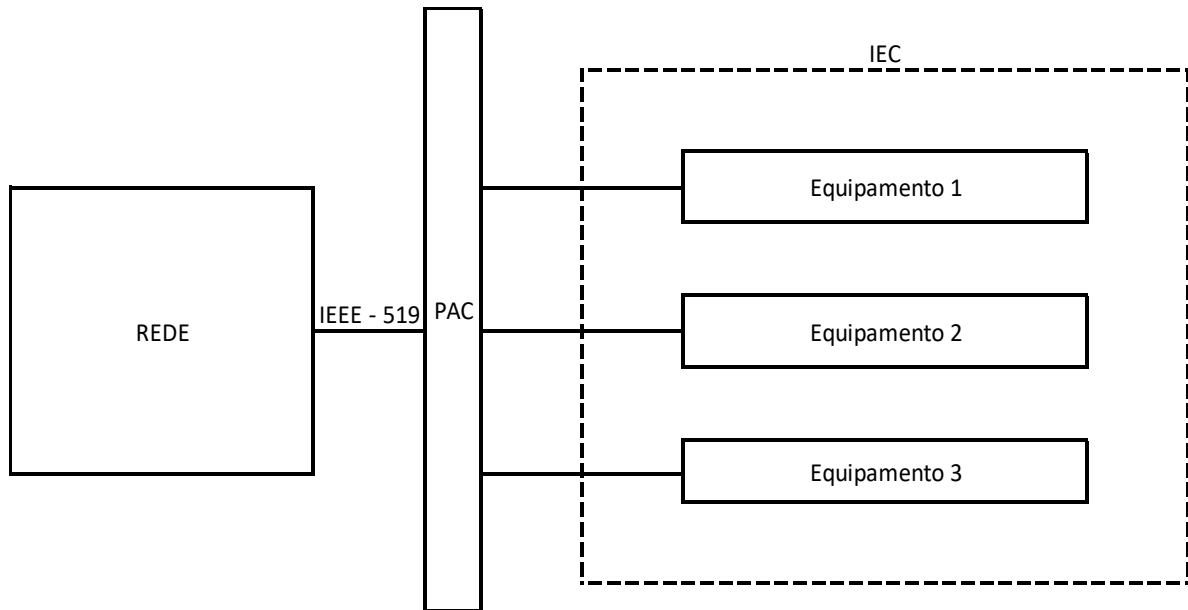


Figura 45 - Indicação dos pontos de análises das normas

Contudo, podemos, também, destacar as normativas brasileiras para a qualidade de energia elétrica. Em 16 de dezembro de 2008, a ANEEL aprova a primeira versão do PRODIST, porém, para as análises das distorções harmônicas, estabelece-se os indicadores em seu Módulo 8, no qual estão os índices que indicam os limites máximos desejáveis no sistema de distribuição conforme a tabela 8.

Tabela 8 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)

Indicador	Tensão Nominal (Vn)		
	$V_n < 2,3\text{kV}$	$2,3\text{kV} \leq V_n < 69\text{kV}$	$69 \leq V_n < 230\text{kV}$
DTT 95%	10,00%	8,00%	5,00%
DTTp 95%	2,50%	2,00%	1,00%
DTTi 95%	7,50%	6,00%	4,00%
DTT3 (95%)	6,50%	5,00%	3,00%

Fonte: (ANEEL, 2021)

#### 4 ANÁLISE DE RELATÓRIO DE QUALIDADE DA ENERGIA REAL

Para ilustrar a aplicação do PRODIST - Módulo 8 (ANEEL, 2021), foi realizada uma análise entre os dias 09/09/2022 08:32:30 e 16/09/2022 08:22:30, com 1008 medições durante o período. A medição se baseia em um sistema real constituído de um aparelho de Raio-X em uma clínica de diagnósticos. As medições foram obtidas conforme o diagrama elétrico da Figura 46, através do analisador de energia RE7000 (Figura 47). Neste capítulo, foram ilustrados os gráficos das medições correspondentes, bem como a discussão de cada, conforme as Figuras 48 a 59. As tabelas com os valores medidos foram ilustradas no Apêndice A.

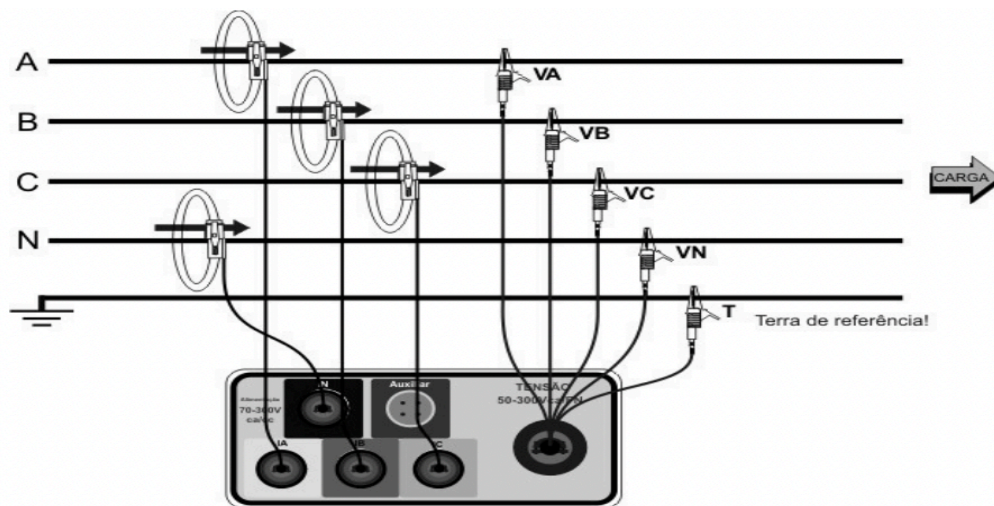


Figura 46 - Diagrama de Ligação do Analisador  
Fonte: Embrasul ([s.d.]).





Figura 47 - Analisador RE7000  
Fonte: Embrasul ([s.d.]).

#### 4.1 TENSÃO EM REGIME PERMANENTE

Conforme diretrizes do PRODIST – Módulo 8 a Tensão em Regime do sistema com 224V FN (Figura 48) está em conformidade. A conformidade de tensão em regime permanente deve-se à comparação do valor de tensão obtido por medição apropriada no ponto de conexão, em relação aos níveis de tensão especificados como adequados, precários e críticos conforme as Figuras 48 e 49 e se mantém nos níveis de conformidade em todo o tempo medido conforme a Figura 50 de acordo com a métrica de escala da Figura 51.

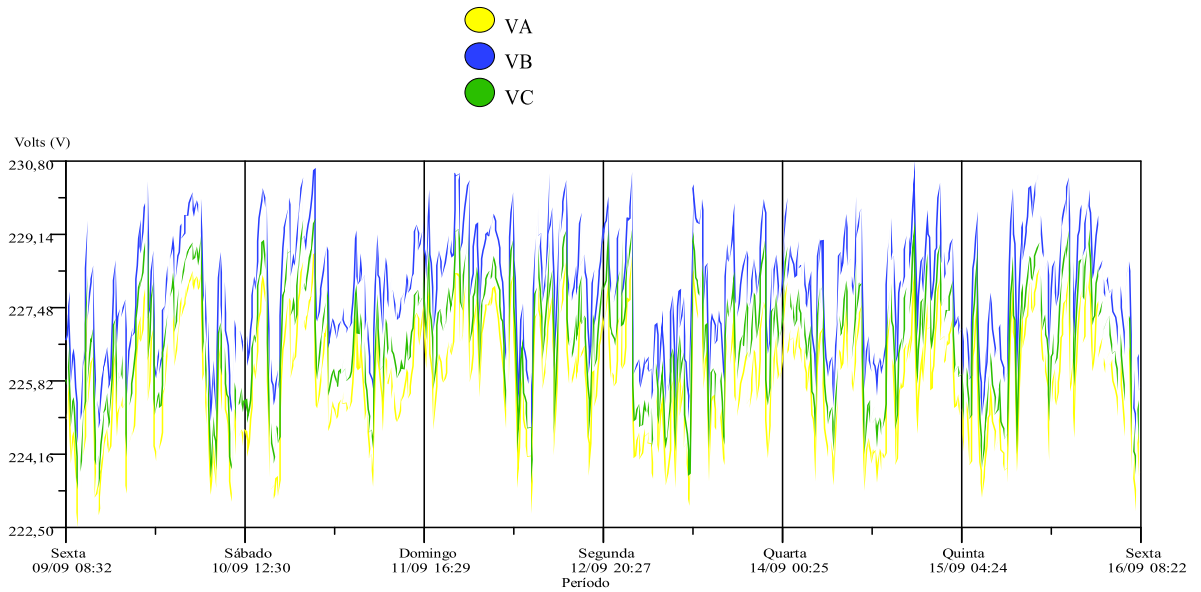


Figura 48 - Tensões em Regime Permanente  
Fonte: Embrasul ([s.d.]).

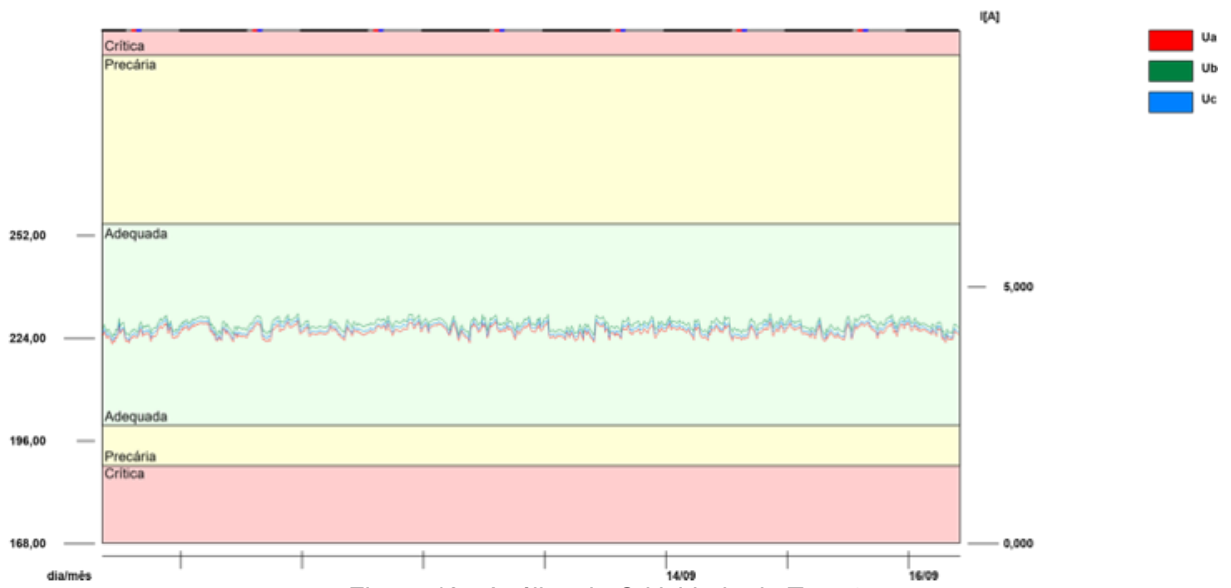


Figura 49 - Análise de Criticidade da Tensão  
Fonte: Embrasul ([s.d.]).

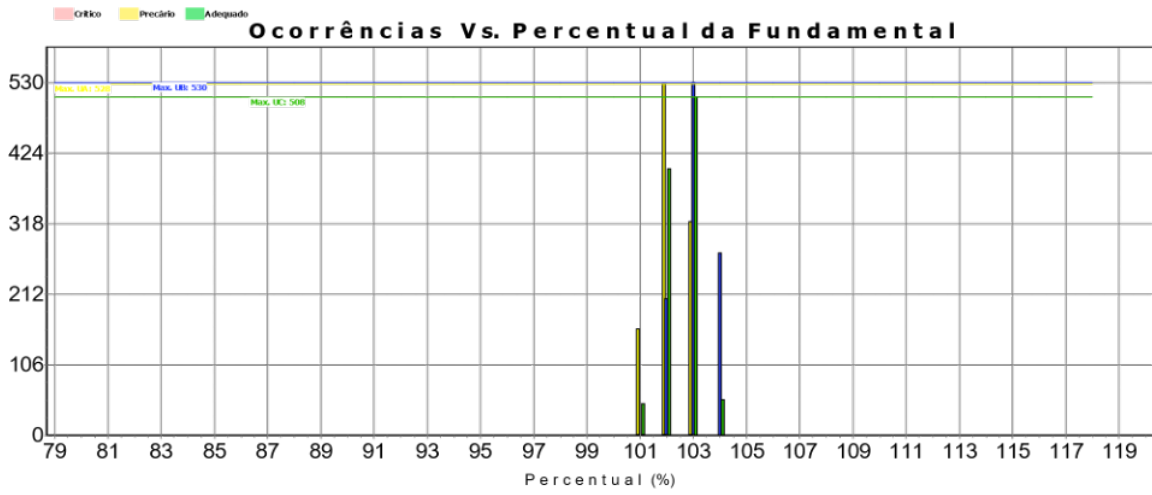


Figura 50 - Percentual da Fundamental  
 Fonte: Embrasul ([s.d.]).

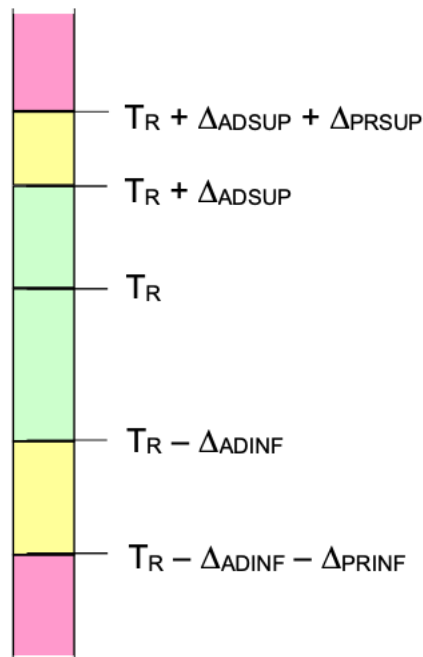


Figura 51 – Indicador de Escalas  
 Fonte: ANEEL (2021).

## 4.2 FATOR DE POTÊNCIA

Conforme o PRODIST – Módulo 8 para a unidade do Grupo A ou ponto de conexão entre distribuidoras e com a tensão inferior a 230kV, o fator de potência no ponto de conexão (PAC) deve estar compreendido entre 0,92 e 1 indutivo, ou 1 e 0,92 capacitivo, de acordo com as Regras de Prestação de Serviço Público de Distribuição de Energia elétrica (ANEEL, 2021). Porém, conforme a Figura 52, o sistema medido apresenta inconformidades quanto aos valores de referência. Nos momentos de

operação do equipamento, os valores esta abaixo do valor unitário, chegando em 0,30, assim, o sistema deverá ser compensado.

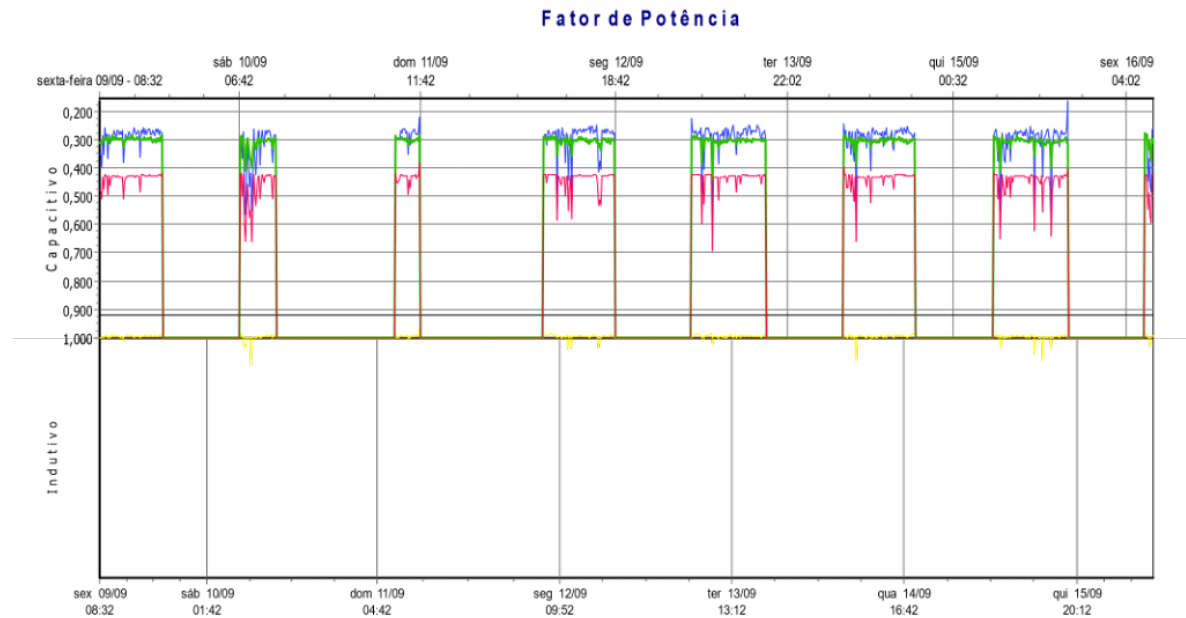


Figura 52 - Fator de Potência  
Fonte: Embrasul ([s.d.]).

### 4.3 DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Através da Figura 53, observa-se que para o FD95% do sistema foi encontrado o valor de 0,34%, o qual está em conformidade com o PRODIST - Módulo 8 (ANEEL, 2021), cujos limites estão especificados na Figura 54. O desequilíbrio de tensão ocorre quando há assimetria de carga no sistema, podendo originar diversos impactos sobre as cargas do sistema, como a redução de potência útil em motores, por exemplo (KAGAN; ROBBA; SCHMIDT, 2009).

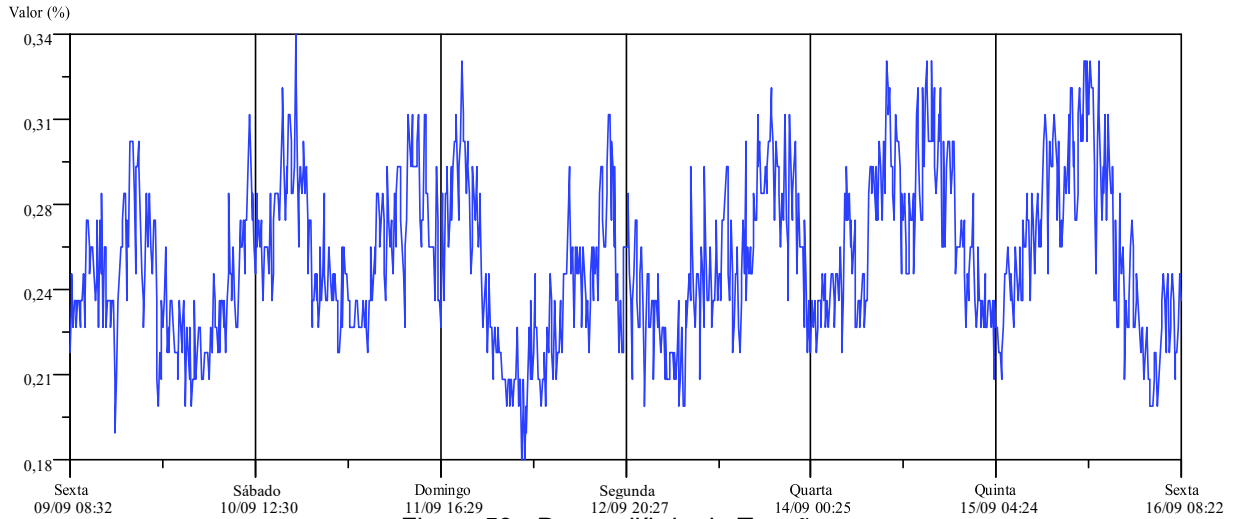


Figura 53 - Desequilíbrio de Tensão  
 Fonte: Embrasul ([s.d.]).

Indicador	Tensão nominal ( $V_n$ )	
	$V_n < 2,3 \text{ kV}$	$2,3 \text{ kV} \leq V_n < 230\text{kV}$
FD95%	3,0%	2,0%

Figura 54 - Limites para o indicador de desequilíbrio de tensão  
 Fonte: (ANEEL, 2021)

#### 4.4 DISTORÇÃO HARMÔNICA

Conforme a Figura 55, a DTT do sistema com 2,7% está em conformidade com o PRODIST - Módulo 8 (ANEEL, 2021), onde a recomendação é de 10% para as tensões até 2,3kV



Figura 55 - Distorção Harmônica de Tensão  
 Fonte: (Embrasul)

Indicador	Tensão nominal ( $V_n$ )		
	$V_n < 2,3 \text{ kV}$	$2,3 \text{ kV} \leq V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT <sub>95%</sub>	10,0%	8,0%	5,0%
DTT <sub>p,95%</sub>	2,5%	2,0%	1,0%
DTT <sub>i,95%</sub>	7,5%	6,0%	4,0%
DTT <sub>3,95%</sub>	6,5%	5,0%	3,0%

Figura 56 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)

Fonte: ANEEL (2021).

#### 4.5 FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

Para a Pst<sub>95%</sub> do sistema com média de 1,2pu não está em conformidade com o PRODIST - Módulo 8 (ANEEL, 2021) conforme a Figura 57, onde os limites para tensões até 2,3kV é de apenas 1 pu. Para esse caso, seria recomendada a instalação de um estabilizador de tensão. São oscilações de energia provocadas por cargas variáveis, como o aparelho de raio-X, com disparos em tempo variável no tempo. O principal efeito são as cintilações, mais conhecidas como *Fliker's*, que provocam oscilações perceptíveis nas iluminações (KAGAN; ROBBA; SCHMIDT, 2009), mesmo nos casos atuais e locais que utilizam os leds.

#### P S T D<sub>95%</sub>

Data	PstVA	Faixa	PstVB	Faixa	PstVC	Faixa
10/09/2022	1,15	Precário	1,21	Precário	0,92	Adequado
11/09/2022	1,13	Precário	1,21	Precário	0,94	Adequado
12/09/2022	1,15	Precário	1,23	Precário	1,03	Precário
13/09/2022	1,20	Precário	1,24	Precário	1,22	Precário
14/09/2022	1,21	Precário	1,24	Precário	1,20	Precário
15/09/2022	1,21	Precário	1,23	Precário	1,19	Precário
16/09/2022	1,20	Precário	1,22	Precário	1,05	Precário

#### P L T S<sub>95%</sub>

Data	PstVA	Faixa	PstVB	Faixa	PstVC	Faixa
------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

09/09 a 16/09	1,03	Precário	1,08	Precário	1,00	Precário
---------------	------	----------	------	----------	------	----------

Figura 57 – Flutuação de Tensão  
Fonte: Embrasul ([s.d.]

Indicador	Tensão nominal ( $V_n$ )		
	$V_n < 2,3 \text{ kV}$	$2,3 \text{ kV} \leq V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
$P_{st95\%}$	1,0 pu	1,5 pu	2,0 pu

Figura 58 - Limites das flutuações totais (em pu da tensão fundamental)  
Fonte: (ANEEL, 2021)

#### 4.6 VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA

A variação na frequência, em relação aos limites de referência de 59,9Hz e 60,1Hz, com um intervalo de 30 segundos fora destes limites (ANEEL, 2021), geralmente ocorre devido a variações da carga no sistema, deste modo os limites medidos são em conformidade como demonstrado na Figura 59. Essas variações podem impactar determinados equipamentos, por exemplo, uma geração distribuída (KAGAN; ROBBA; SCHMIDT, 2009).

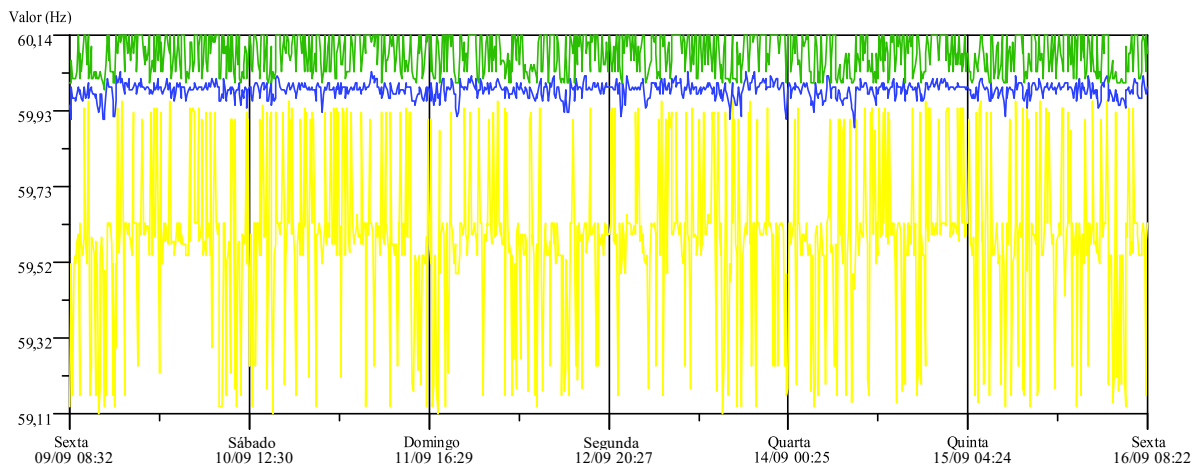


Figura 59 - Variação da Frequência  
Fonte: Embrasul ([s.d.]

## 5 ESTUDO PARAMÉTRICO DA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA

O estudo paramétrico para a identificação da frequência de ressonância do sistema transformador-carga-compensação reativa tem o objetivo de demonstrar a frequência de ressonância sob duas óticas: frequência de ressonância através da variação da compensação reativa do sistema e variação impedância percentual do transformador, cujas variáveis são facilmente encontradas nas placas dos elementos do sistema elétrico. As tabelas de análises deste capítulo estão ilustradas no Apêndice B.

### 5.1 VARIAÇÃO DA INJEÇÃO DA COMPENSAÇÃO REATIVA – QR

A partir das equações 38 a 44, teremos o modelamento do sistema com a frequência de ressonância em função de Z%.

$$LC = \frac{X_L}{\omega} * \frac{1}{\omega X_c} \quad (38)$$

$$LC = \frac{X_L}{X_c} * \frac{1}{\omega^2} \quad (39)$$

E como,

$$X_c = \frac{V_n^2}{Q_r} \quad (40)$$

E,

$$X_L = \frac{V_n^2}{S} * Z\% \quad (41)$$

Assim, substituindo 40 e 41 em 39

$$LC = \frac{V_n^2}{S} * Z\% * \frac{Q_r}{V_n^2} * \frac{1}{\omega^2} \quad (42)$$



Portanto:

$$LC = \frac{Q_r}{S} * Z\% * \frac{1}{\omega^2} \quad (43)$$

Contudo, para o modelamento da frequência de ressonância em função de Z% (Figura 60), teremos,

$$f(Q_r) = \frac{f_s}{\sqrt{\left(\frac{Q_r}{S}\right) * Z\%}} \quad (44)$$

Onde,

$f(Q_r)$  – Freq. de Resson. em função da compensação Reativa;

$Q_r$  – Potência reativa injetada pelo banco de capacitores;

$f_s$  – Frequência do sistema;

$Z\%$  – Impedância percentual do transformador;

$S$  – Potência aparente do sistema (TRAF0).

Com a variação da compensação reativa injetada no sistema, a frequência de ressonância tende a ser menor, ou seja, há um deslocamento a menor da frequência de ressonância (Figura 60). Porém, esta injeção de reativos, deve-se seguir o projeto de compensação reativa de cada sistema estudado.

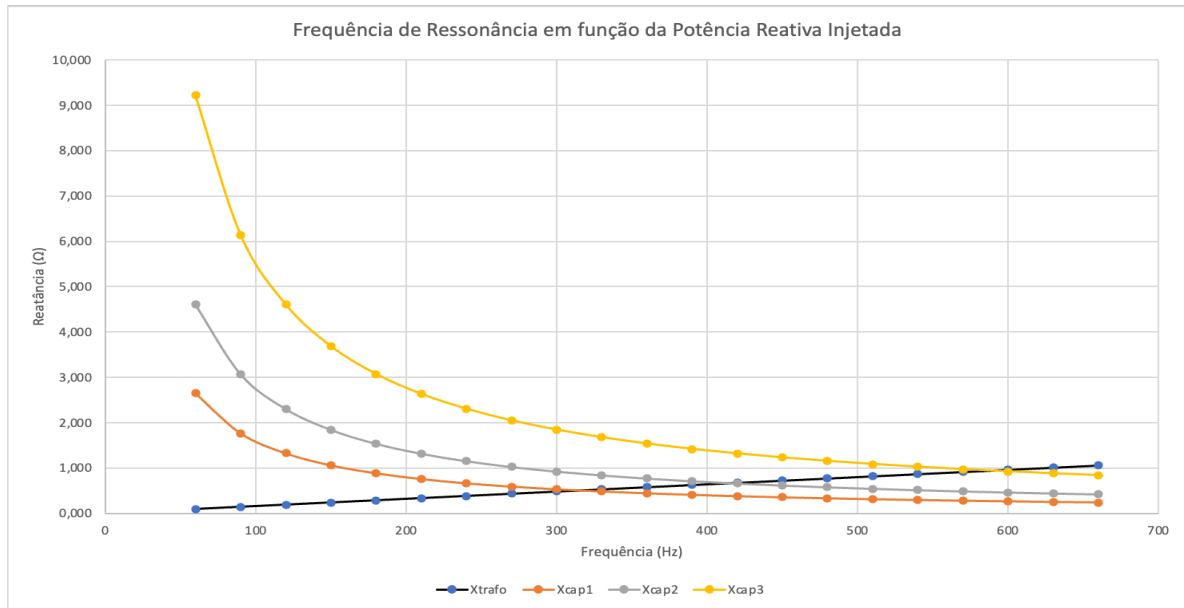


Figura 60 - Frequência de Ressonância em função da Compensação Reativa – Compilado

## 5.2 VARIAÇÃO DA IMPEDÂNCIA PERCENTUAL DO TRANSFORMADOR – Z%

A frequência de ressonância com a impedância do transformador seguirá o mesmo modelamento (Figura 61), conforme a equação 45.

Assim,

$$f(Z\%) = \frac{f_s}{\sqrt{\left(\frac{Q_r}{S}\right) * Z\%}} \quad (45)$$

Onde,

$f(Z\%)$  – Freq. de Resson. em função da impedância percentual do transformador ;

$Z\%$  – Impedância percentual do transformador;

$f_s$  – Frequência do sistema;

$Q_r$  – Compensação Reativa do sistema;

$S$  – Potência aparente do sistema.

Por outro lado, com a variação a maior da impedância percentual, haverá uma redução da potência de curto-circuito, onde a frequência de ressonância tende a ser menor, ou seja, há um deslocamento a menor da frequência de ressonância (Figura 61). Porém, não foram avaliados os problemas de potência de curto-circuito baixa.

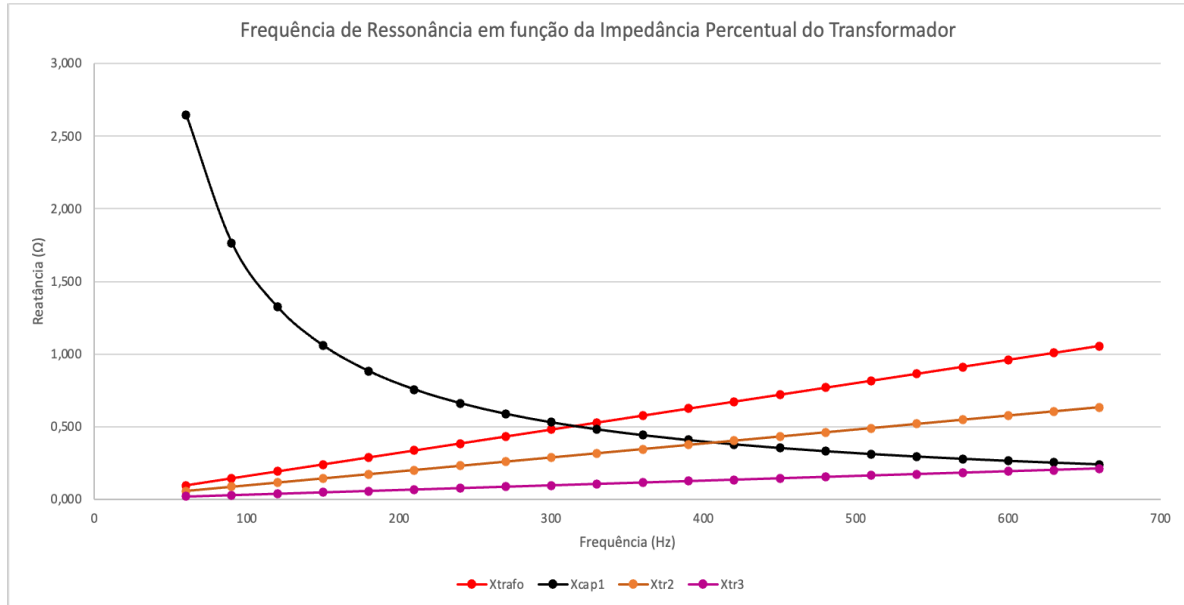


Figura 61 - Frequência de Ressonância em função da Impedância Percentual do Transformador

Com a demonstração do estudo dos parâmetros analisados, pode-se observar que quanto maior a potência de curto-circuito do transformador maior será a frequência de ressonância do sistema para uma determinada compensação reativa. Estes estudos paramétricos podem ser o início de uma discussão futura quanto a mitigação da ressonância harmônica do sistema.

## 6 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo, apresenta-se um estudo de caso real, com medições realizadas no alimentador de um aparelho de ressonância magnética de 1,5T, instalado em uma clínica de medicina diagnóstica por imagens. As medições foram executadas com analisador de energia PQUBE 3 – PLS (Figura 62), instalado no sistema elétrico, conforme a Figura 63. As Figuras 64 a 72 demonstram as medições realizadas em um período de 7 dias, de 29/08/2022 a 05/09/2022, conforme as diretrizes do PRODIST - Módulo 8 (ANEEL, 2021) e as tabelas referentes ao relatório de QEE, que estão ilustradas no Apêndice C. No estudo de caso, são apresentados os projetos de compensação reativa e o projeto de filtro antirressonância. O analisador Pqube 3 utiliza como referências as normas EN 50160 (EN50160, 2010) e as IEC's 61000. No Anexo E, há um relatório completo dos dias 12/09 a 18/09.

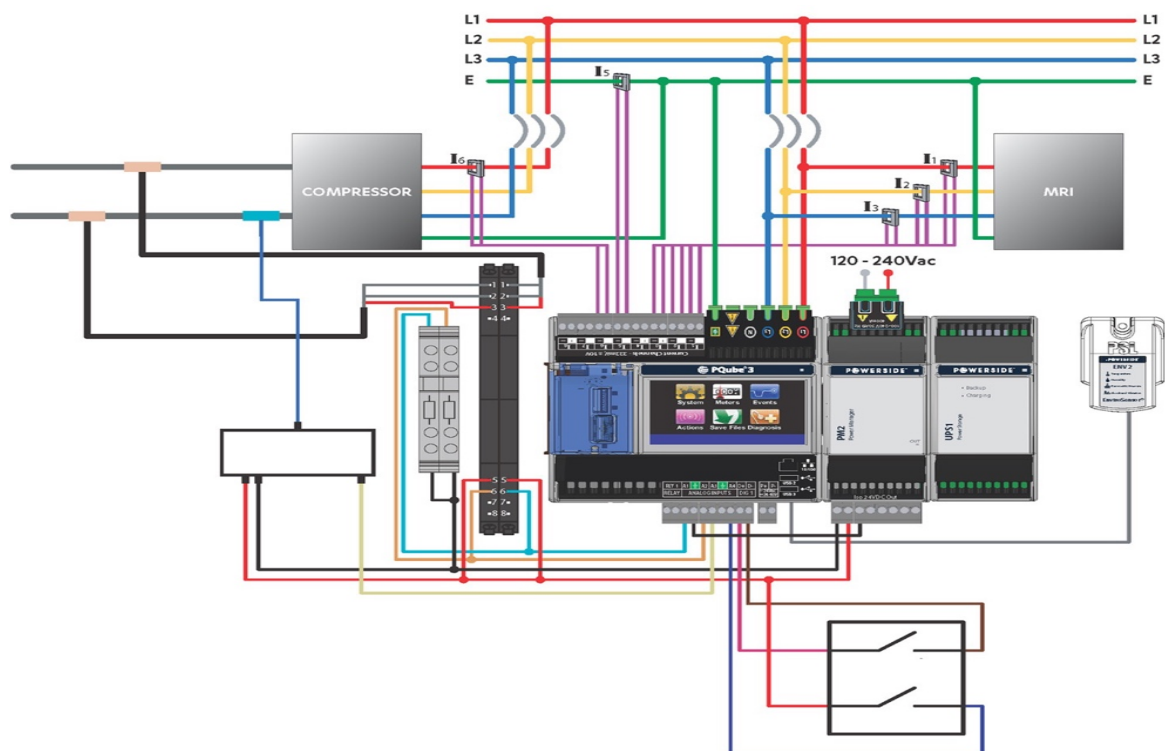


Figura 62 - Esquema de ligação do PQUBE 3  
Fonte: (Pqube, 2020)

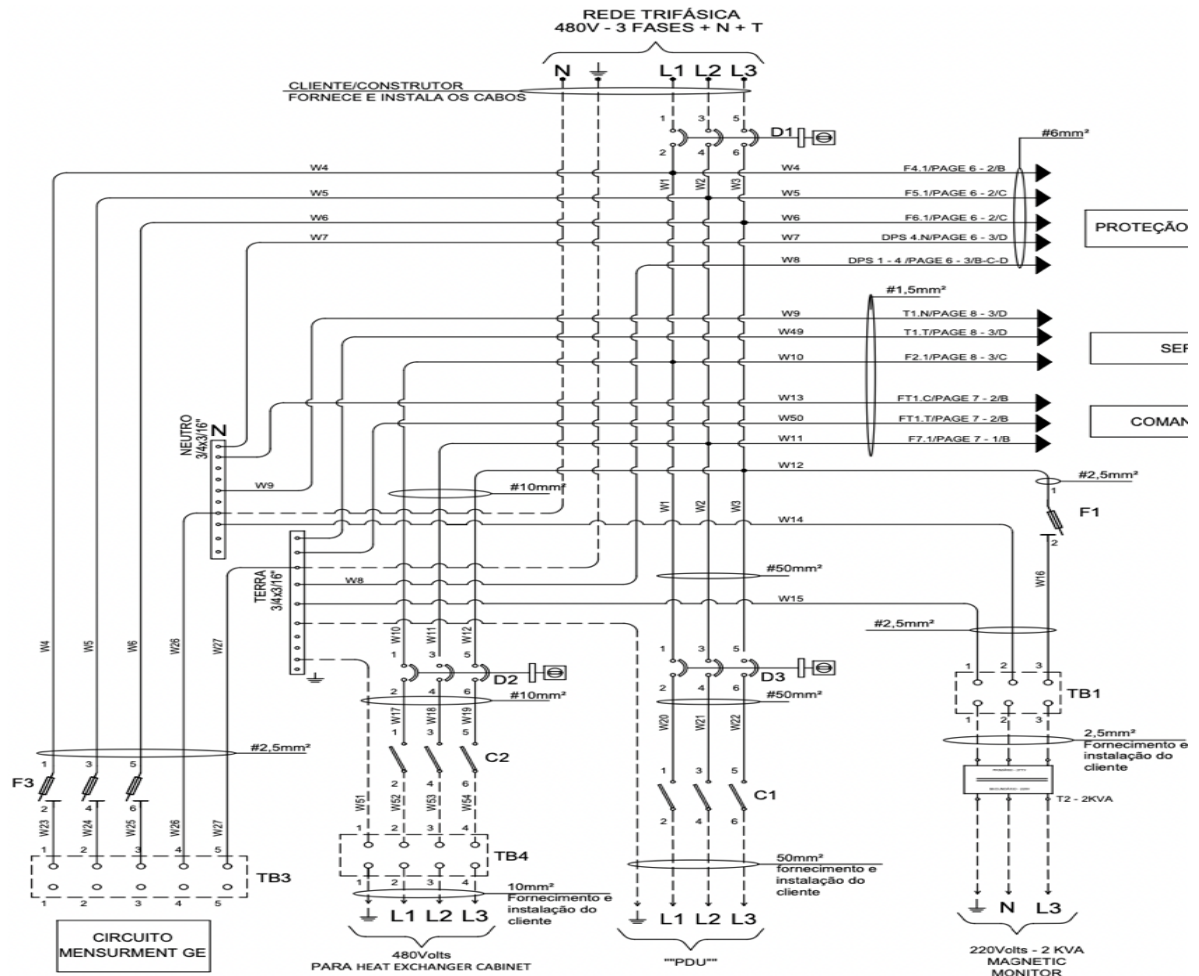


Figura 63 - Diagrama Trifilar Alimentador Ressonância Magnética  
 Fonte: (GE, 2009)

A Figura 64 configura a variação da frequência do sistema nos dias de medições e funcionamento do equipamento de Ressonância Magnética de Imagem, mesmo com as variações, não violam os indicadores do PRODIST - Módulo 8 por exemplo.

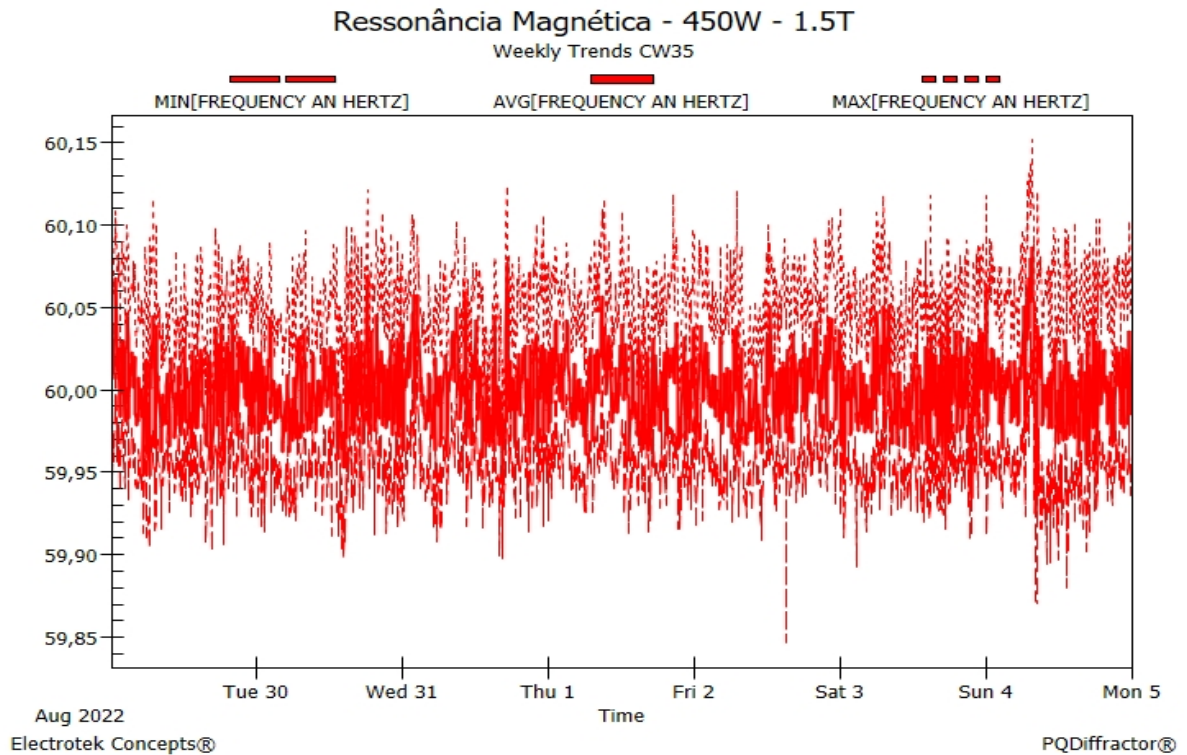


Figura 64 - Medições - Frequência

Para um pleno funcionamento da MRI, a tensão de trabalho deve-se estar compreendida entre 432 e 528V conforme o manual de projeto deste equipamento eletromédico (GE, 2009). E a Figura 65 indica que a tensão está em conformidades. Porém, para este equipamento, utiliza-se um sistema de UPS para a garantia da estabilidade da tensão e mitigação dos distúrbios conforme visto no capítulo 2 item 2.2.

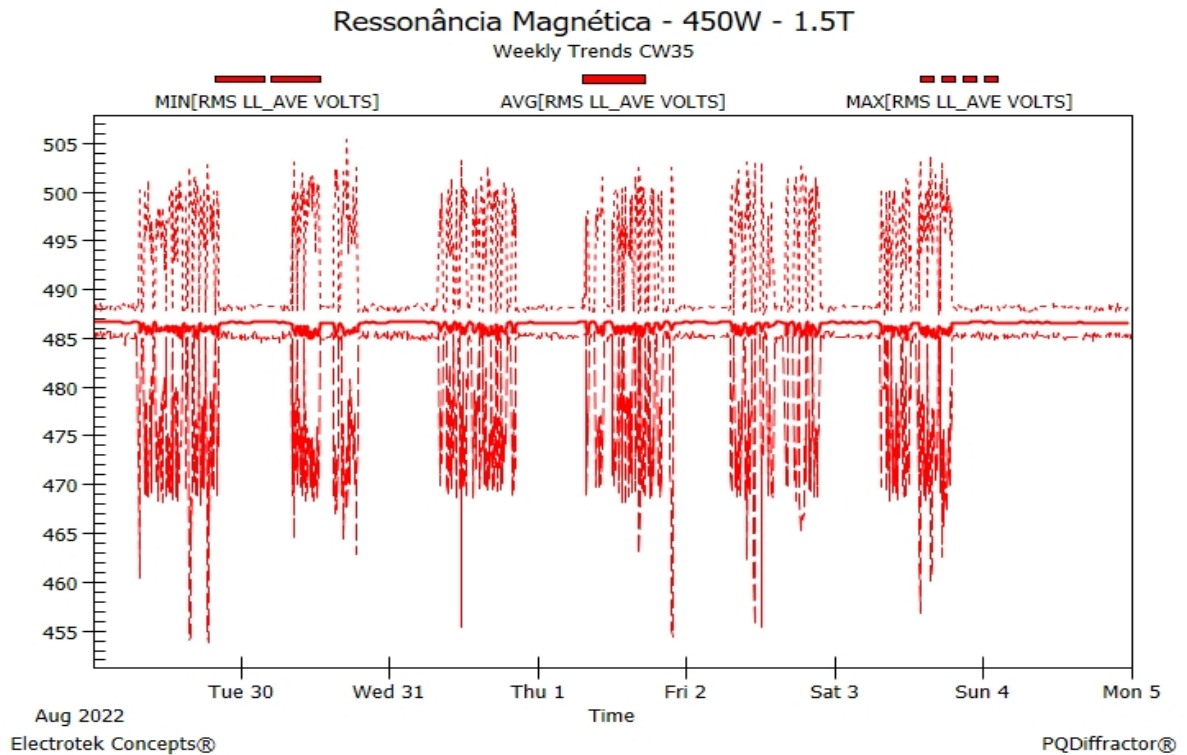


Figura 65 - Medições - Tensão L-L

Se por um lado há especificações bem definidas para as tensões de trabalho do equipamento, as questões de QEE não são estabelecidas, como discutido ao longo da dissertação quanto a emissividade e imunidade deste equipamento, porém foi analisado os índices de  $THD_v$ , conforme os índices do PRODIST - Módulo 8. Sendo que está em conformidade abaixo dos 10% conforme Figura 66. O  $THD_i$  (Figura 67) foi analisado para fins de cálculos do FP.

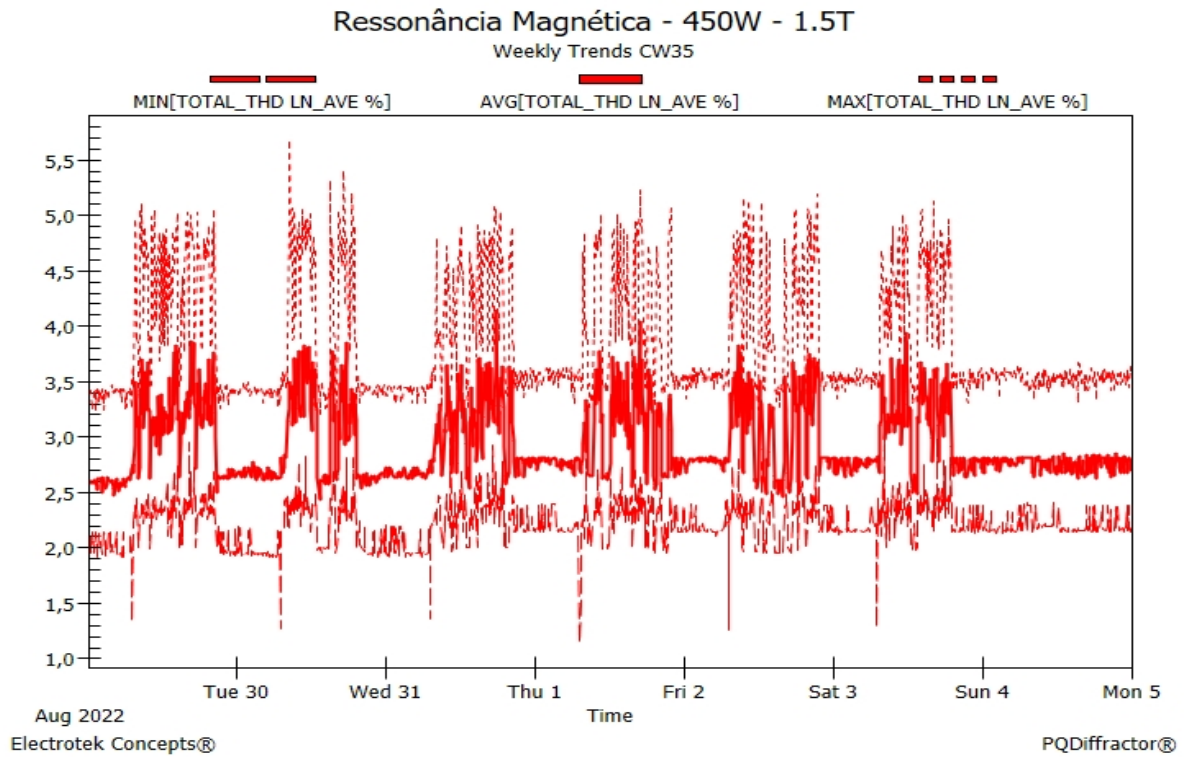


Figura 66 - Medições - THDv

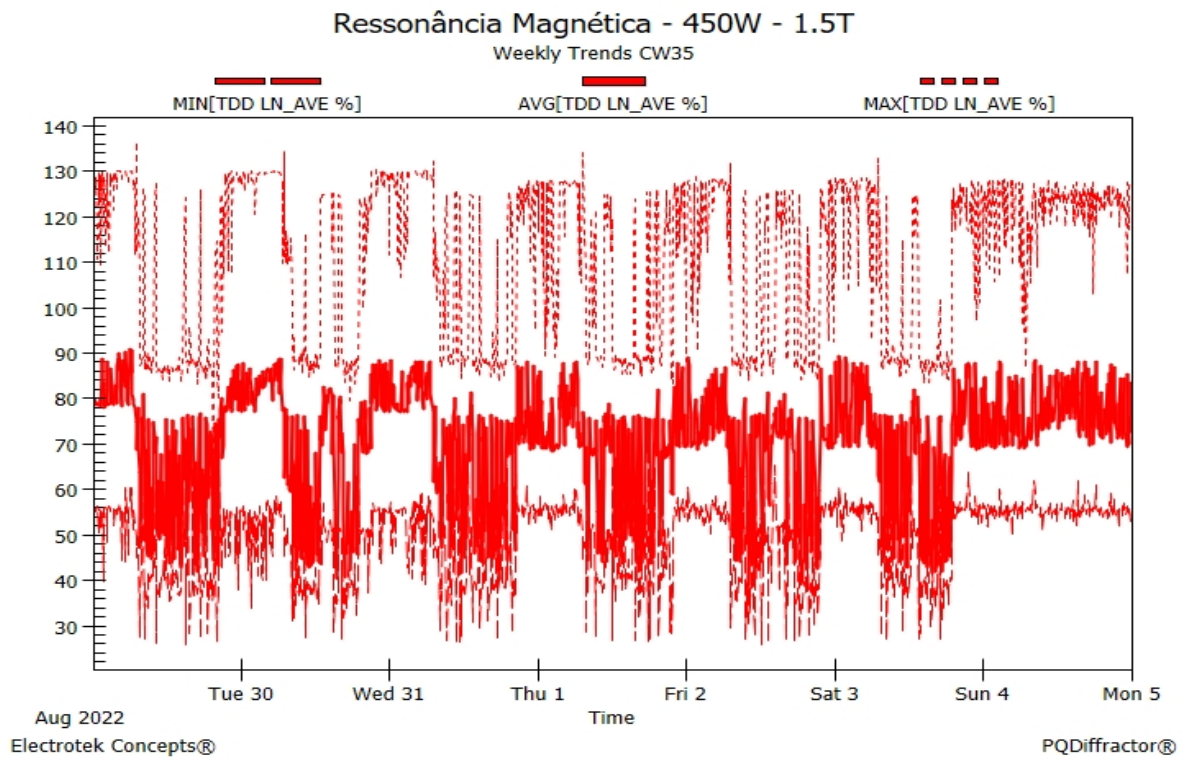


Figura 67 - Medições - THDi

Como descrito nos capítulos acima, a MRI é considerada um equipamento de disparos, disparos de uma grande quantidade de energia e esta energia é utilizada através dos gradientes para a geração das imagens específica de cada exame. Como



pode ser visto na prática, os exames de abdômen e crânio, são os exames que demandam maior consumo de energia do sistema. E este consumo pode ser visto na Figura 68, com o consumo de potência ativa (CORRIGIDO), na Figura 69 a potência aparente e na Figura 70 a potência reativa do sistema. Com isso, o fator de potência demonstrado na Figura 71, segue as variações pertinentes das potências. Assim, na Figura 72 observa-se a variação das potências de acordo com o disparo do equipamento MRI.

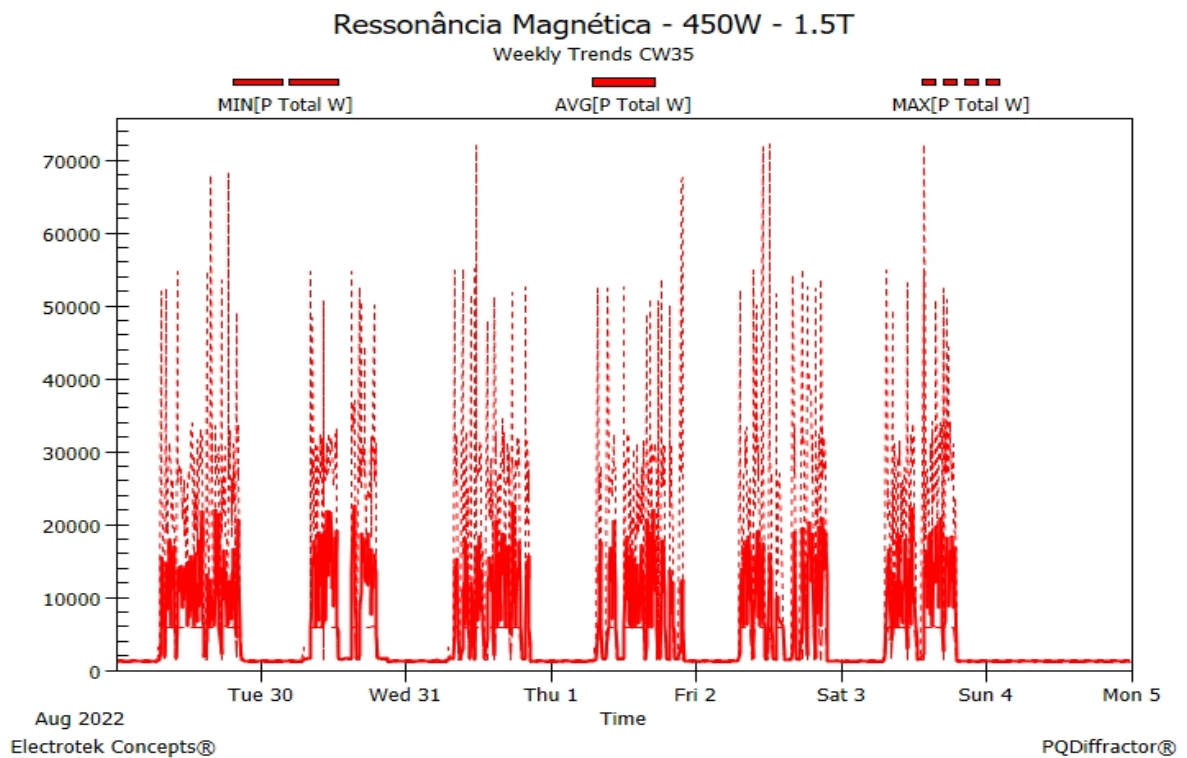


Figura 68 - Medições - Potência Ativa (W)

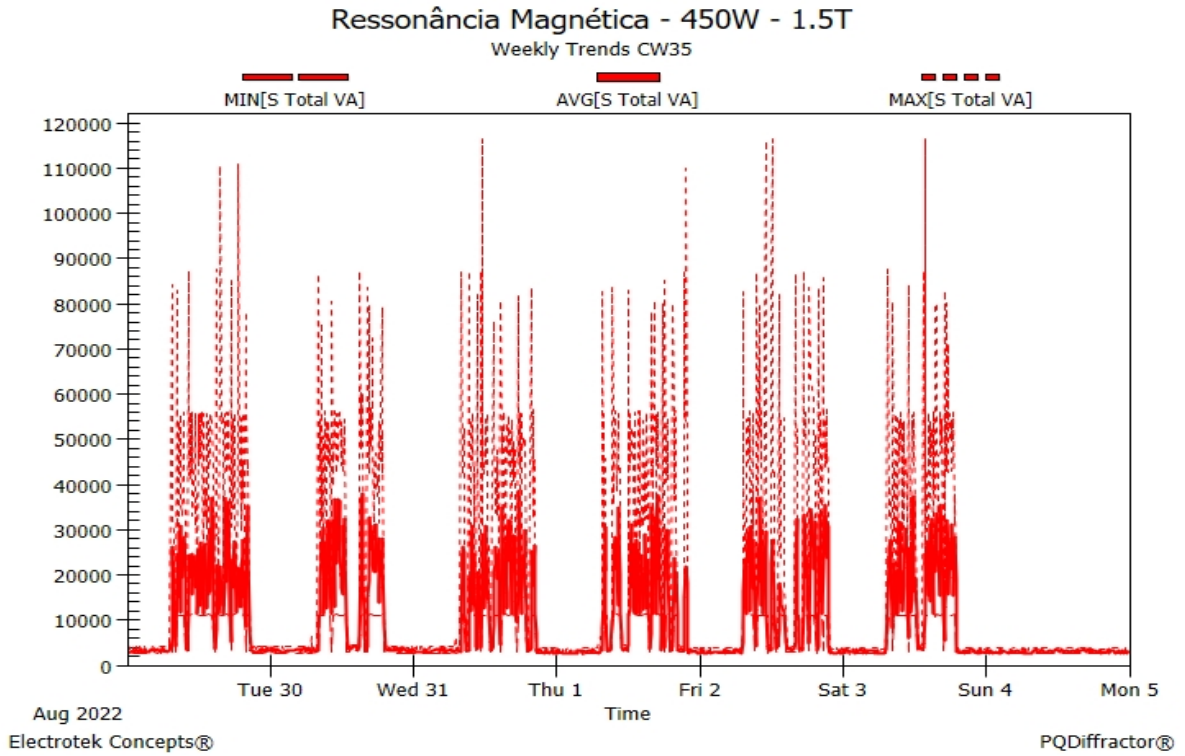


Figura 69 - Medições - Potência Aparente

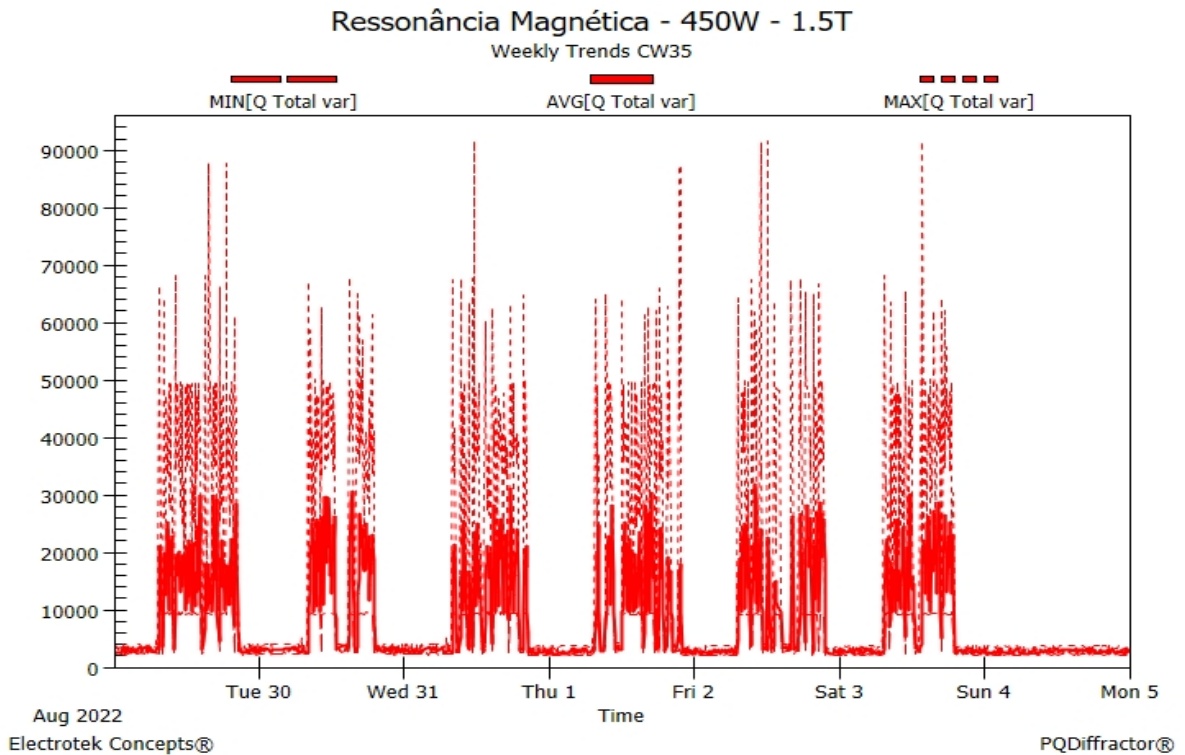


Figura 70 - Medições - Potência Reativa (kvar)

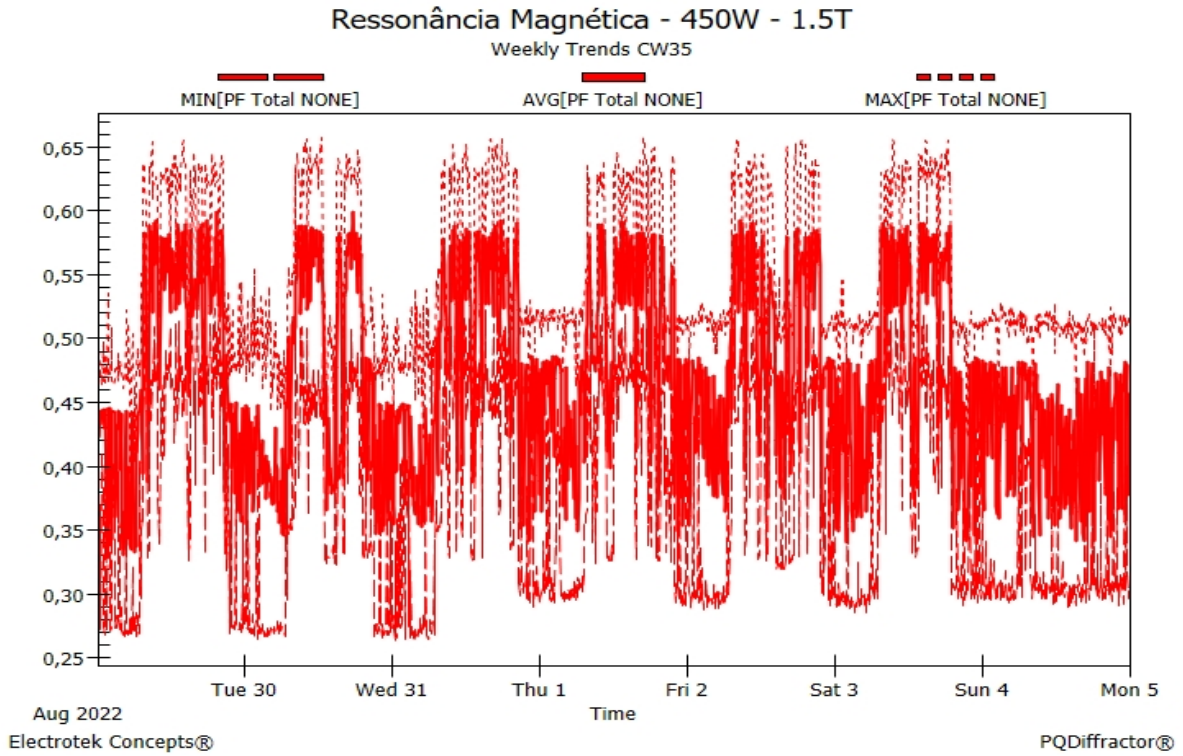


Figura 71 - Medições - Fator de Potência

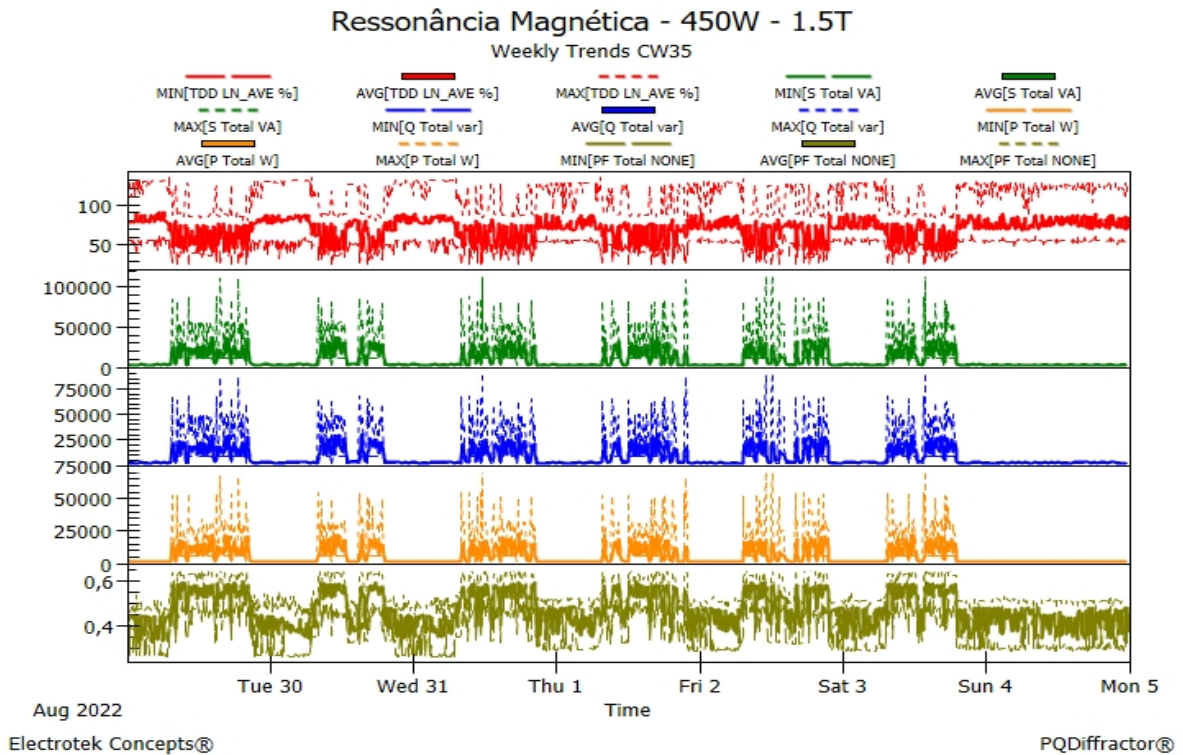


Figura 72 - Medições - Compilados das Potências

## 6.1 PROJETO DA COMPENSAÇÃO REATIVA

Para a compensação reativa do sistema, foram analisados os gráficos de potência ativa, potência reativa e fator de potência. Porém, outras grandezas também foram analisadas, como tensão nominal do transformador de alimentação do sistema, impedância percentual do transformador e corrente nominal, conforme a Tabela 9. A compensação seguirá os procedimentos conforme o PRODIST – Módulo 8 (ANEEL, 2021), com o valor de 0,92 para o fator de potência. Adotando-se o valor médio de  $THD_i$  60%.

Tabela 9 – Dados do Transformador

Dados do Transformador	
Tensão (V)	480
Potência Aparente (VA)	160000
Impedância Percentual	5%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, aplicando os conceitos da Figura 40, tem-se a Tabela 10 Porém, aplica-se a convergência de  $FP$  e  $THD_i$  (POMILIO, 2006) para análises de corrente distorcida. No entanto, quando há tensão senoidal, o  $FP$  pode ser representado conforme a equação 46.

$$FP = \frac{I_1}{I_{rms}} \cos \varphi \quad (46)$$

Onde, a relação das correntes é chamada de Fator de Forma e a componente  $\cos \varphi$  pode ser definida também como Fator Deslocamento. Sendo as equações 47 e 48 os modelamentos de  $I_{rms}$  e  $THD_i$ , respectivamente.

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (47)$$

$$THD_i = \frac{\left( \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \right)}{I_1} \quad (48)$$

Assim, o  $FP$  em função de  $THD_i$  pode ser descrito conforme a equação 49.

$$FP = \frac{\cos \varphi}{(1+(THD_i)^2)^{1/2}} \quad (49)$$

Tabela 10 – Dados da Compensação

Sistema Sem Compensação		Sistema Compensado	
Potência Aparente - Carga(VA) - S1	120000	Potência Aparente (VA) - S2	67346,93878
FP (atual)	0,65	FP (compensado)	0,98
FP (atual corrigido THDi)	0,55	Potência Ativa (W) - P2	66000
Potência Ativa Carga (W) - P1	66000	Potência Reativa (kvar) - Q2	13401,8716
Potência Reativa - Calculado (kvar) - Q1	100219,759	Potência Reativa (kvar) - Qcap	86817,88693

Portanto, a injeção de 87kvar no sistema reduzirá a potência aparente do circuito de 120kVA para 67kVA, com a conseqüente redução da corrente. O  $FP$  será elevado para 98%, acima do PRODIST – Módulo 8, que recomenda 0,92. Para esta dissertação foi considerado um banco fixo para fins ilustrativos, porém em bancos de capacitores automáticos com estágios, para cada estágio haverá um fator de potência e uma frequência de ressonância,

## 6.2 PROJETO DE FILTROS ANTIRRESSONANTES

Para este estudo de caso, aplicam-se os filtros antirressonantes, com o intuito de sintonizar para a frequência de 160hz, para ficar abaixo das frequências de 180hz (3 harmônicas), (valores próximos de 160Hz e os conceitos de inter-harmônicas não são abordados nesta dissertação), com o p% de 14%, conforme a Figura 37. Assim, o estudo não contemplará filtros sintonizados para frequências mais altas.

A Figura 73 demonstra a determinação da igualdade entre as reatâncias do sistema Trafo-Capacitor.

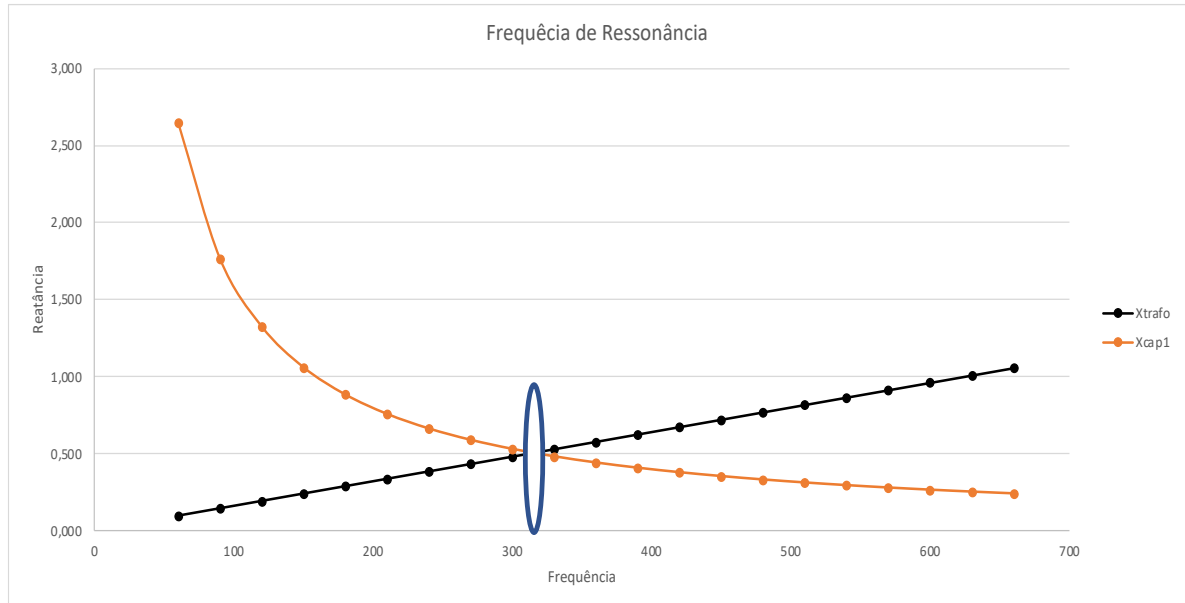


Figura 73 - Frequência de Ressonância - Xtrafo = Xcap

Como exemplificado no subitem 2.3, as frequências harmônicas presentes em sistemas trifásicos normalmente são ímpares. Assim, a partir das medições e das componentes harmônicas da corrente, obtém-se os valores ilustrados na Tabela 11.

Tabela 11 – Dados para a série de Fourier e impacto da corrente no sistema

Harmônica	Frequência	Xtrafo	Xcap	Irede	Icap
1	60	0,096	2,648	144,338	104,645
5	300	0,480	0,530	16,564	202,313
7	420	0,672	0,378	3,808	-34,208
9	540	0,864	0,294	0,743	-17,632
11	660	1,056	0,241	-0,168	-12,323

Assim, a corrente  $I_{cap}$ , por Fourier,  $I_{cap} = 231,33 A$  (série de Fourier das correntes). Sendo  $I_{cap}$  de 30% maior que  $I_{rede}$ , extrapolando as diretrizes da IEC60831-1 (IEC, 2014). Para os cálculos do filtro, teremos as equações 50 a 52 e o p% de 14%, utilizado esta porcentagem devida ser comercial (ELSPEC, 2022) conforme o gráfico da Figura 23.

$$X_{L1(fundamental)} = X_C * 14\% \tag{50}$$

$$X_{L1(ordem harmo.)} = X_{L1(fund)} * (h) \tag{51}$$

Assim, para o indutor do filtro:

$$L_1 = \frac{X_{L1}}{2 * \pi * f_s} \quad (52)$$

Assim,

O filtro será de:

$$L_1 = 0,0009847H$$

Portanto, com a implementação do filtro antirressonante no sistema, teremos a sintonização da frequência conforme a Figura 74.

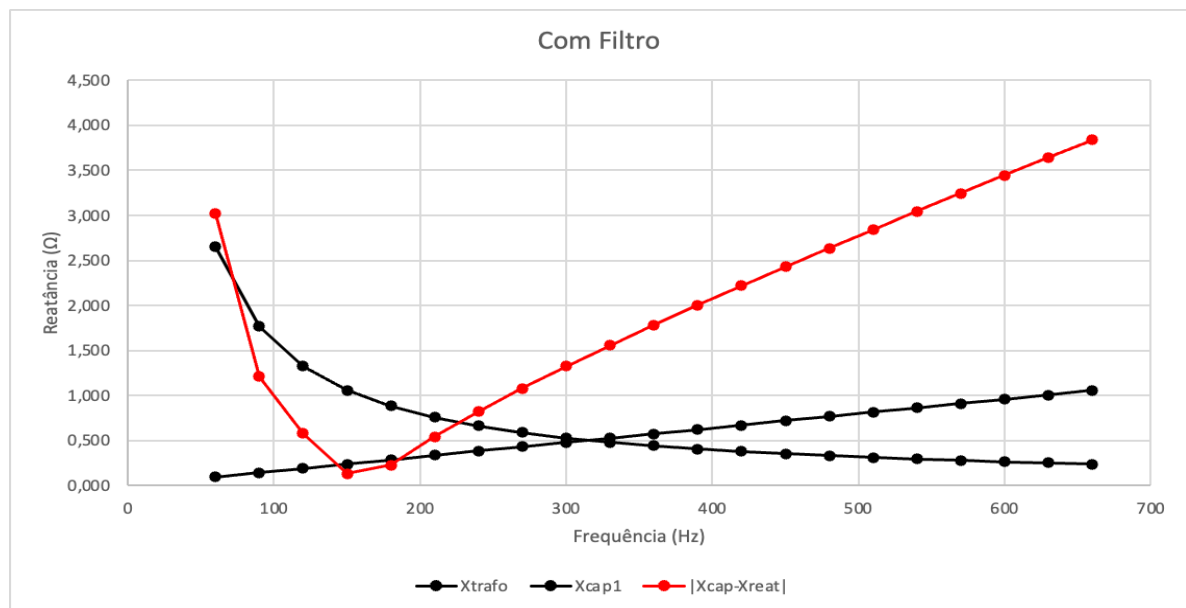


Figura 74 - Deslocamento da Frequência de Ressonância a partir da implantação do filtro

Contudo, as simulações das figuras de 75 a 79 abaixo, comprovam a efetividade do modelamento p% para o projeto do filtro antiressonante.

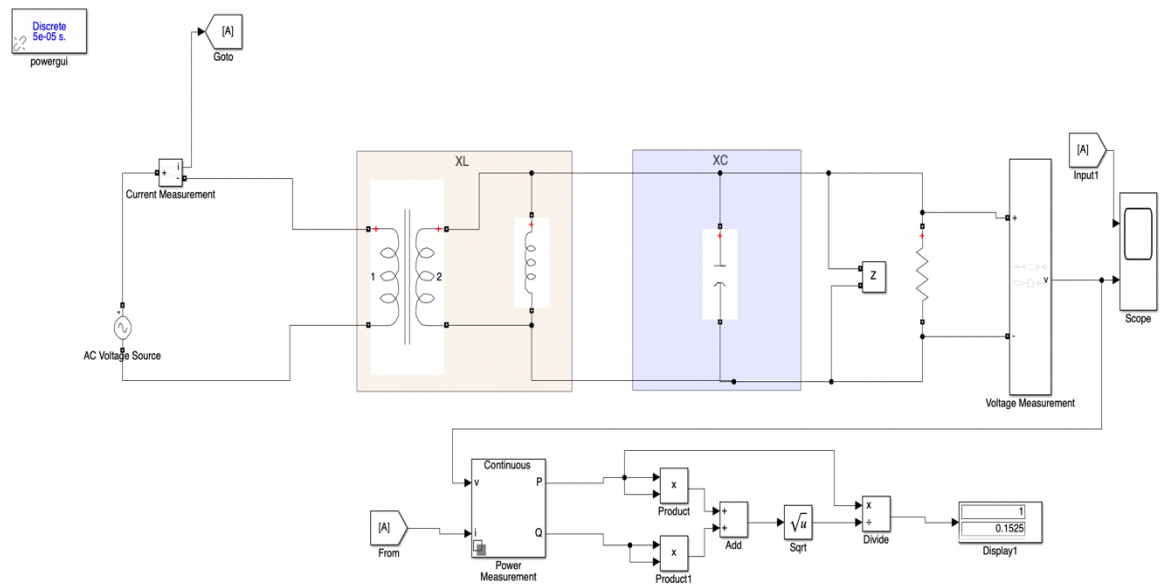


Figura 75 - Simulação Matlab-Simulink – Sem Filtro

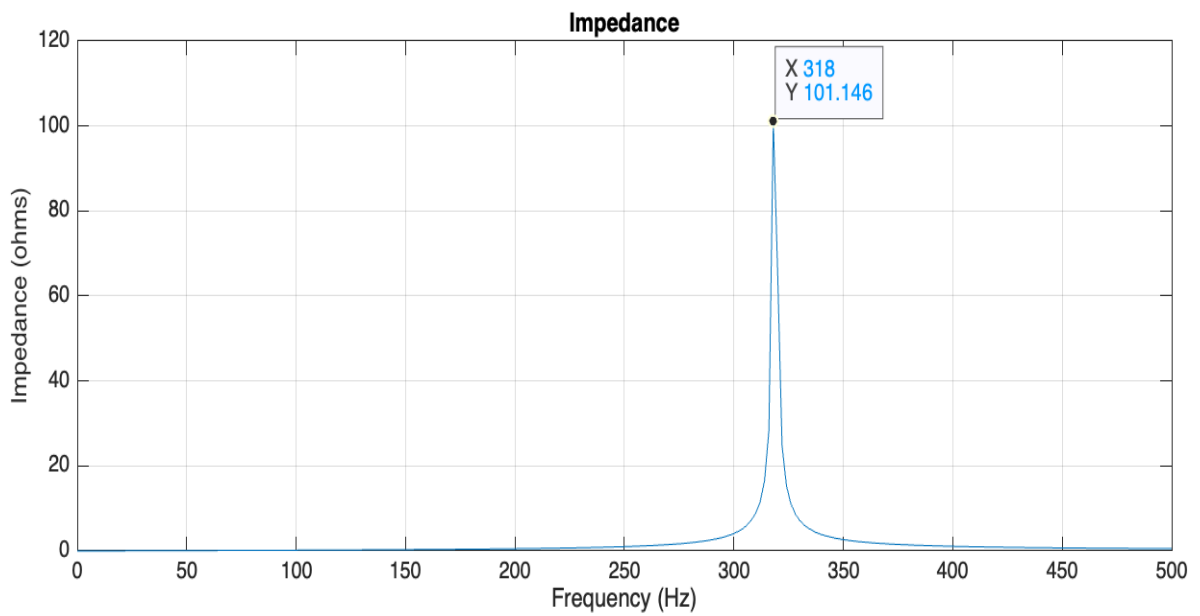


Figura 76 - Impedância do Sistema LC – Sem Filtro

Com a introdução do filtro em série com o banco de capacitor, a frequência de ressonância será descolada conforme o modelo  $p\%=14\%$  para os 160Hz.



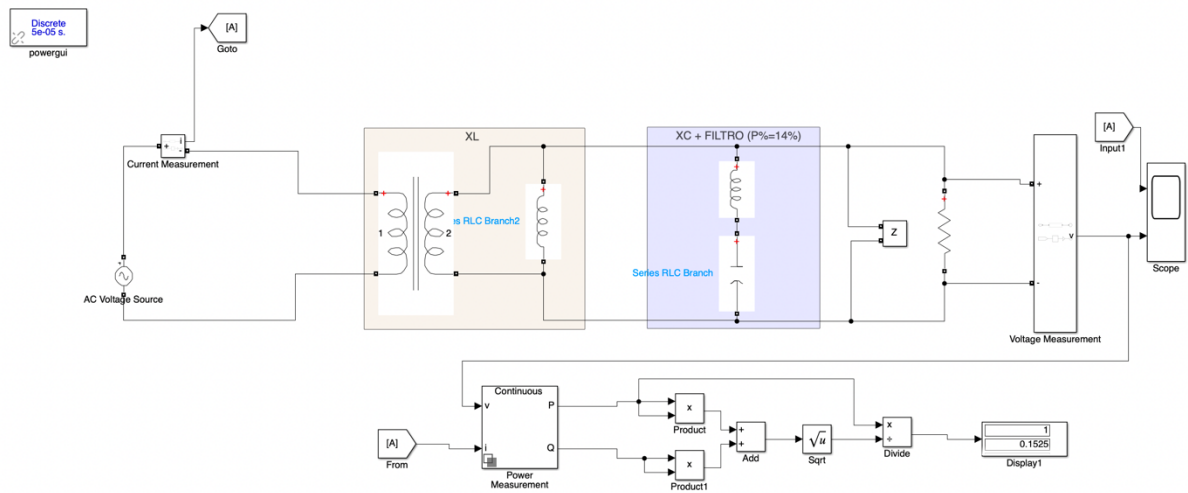


Figura 77 - Simulação Matlab-Simulink – Com Filtro – p%=14% (160Hz)

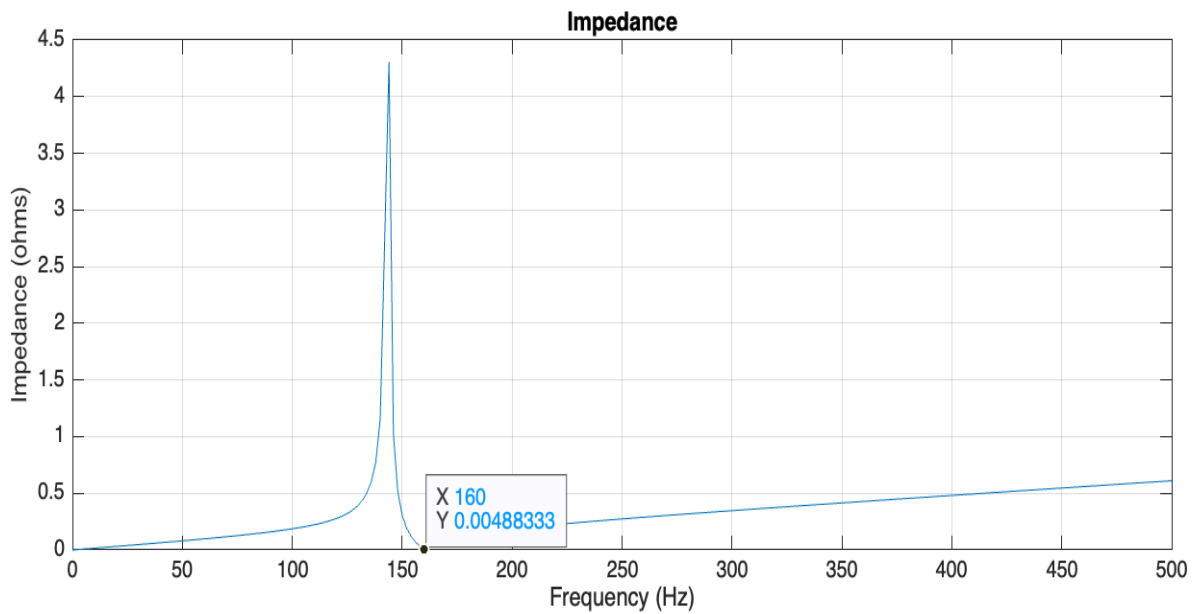


Figura 78 - Impedância do Sistema LC – Com Filtro

Assim, haverá novas correntes de  $I_{cap}$ ,  $I_{cap} = 104,645 A$ , satisfazendo também a IEC60831-1 (IEC, 2014).

## 7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados e as análises apresentadas mostram a importância da QEE em qualquer setor da economia, seja ele industrial, comercial ou de saúde, pois suas análises muitas vezes são semelhantes, pois, infelizmente, como demonstrado ao longo da dissertação, não há estudos que norteiem os sistemas e os equipamentos para uma análise de imunidade e emissividade dos dispositivos, somente para limites no ponto de conexão (IEEE) e em alguns modelos tecnologia de equipamentos (IEC) Assim, os modelamentos apresentados, sejam eles o estudo paramétrico ou o valor percentual dos reatores, podem ser aplicados em qualquer sistema desses setores. E são os norteadores para a mitigação da ressonância harmônica nos sistemas elétricos, iniciando uma grande discussão para o setor, onde inicia-se estudos para indicadores e parâmetros para estas mitigações. Como por exemplo, quais potências reativas injetas máximas (*hosting capacity var* do sistema?) e/ou quais os parâmetros para a impedância do sistema para a mitigação das ressonâncias harmônicas. E para mostrar que alguns estudos poderiam ser simplificados como a seguir.

Em Lemieux (1990), é detalhado o surgimento da ressonância harmônica após a instalação de um banco de capacitores em uma fábrica de papel na cidade de Kitimat, BC Canadá. Com a compensação reativa, o sistema ressonou entre 5 harmônicas e 7 harmônicas, sendo assim, o autor detalha a utilização dos mesmos princípios da dissertação, porém sem a utilização da metodologia aplicada, conforme a Figura 30, o dimensionamento dos filtros seria mais rápido sem a necessidade de muitas análises.

Em (C. Boonseng, 2020), o autor trabalha com a análise de QEE em equipamentos de Ressonância Magnética de Imagem (MRI), porém, diferentemente do estudo em análise nesta dissertação, o autor comprova a eficiência da instalação dos filtros harmônicos acoplados a um sistema de UPS. Ainda, através de experimentos práticos, os equipamentos de UPS devem ser devidamente projetados com uma variação muito baixa de potência ativa e aparente, pois, na grande maioria dos projetos de UPS para MRI, utiliza-se a potência nominal do equipamento, só que, em determinados exames, essa potência apresenta picos de 15% a 20% da potência nominal (Figura 79), fazendo que com o UPS ativo o seu sistema de *by-pass*.

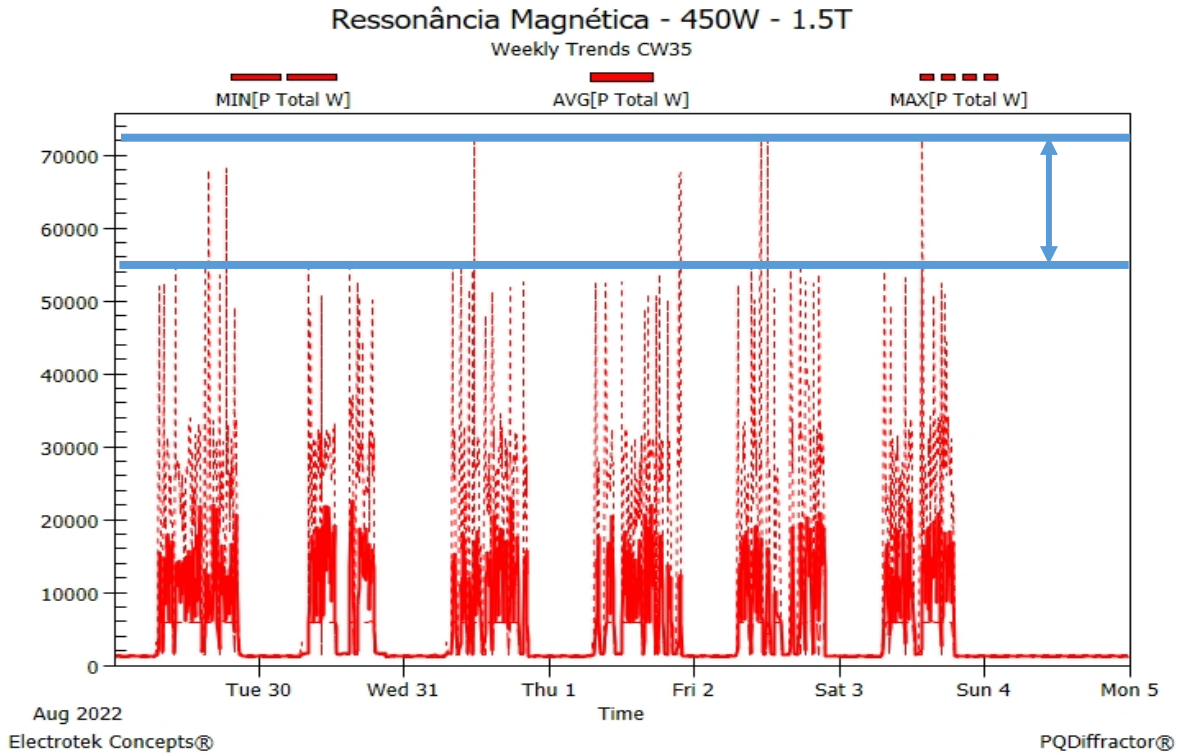


Figura 79 - Aumento da Potência Ativa em determinados Exames

## 8 CONCLUSÕES

A QEE está cada vez mais presente em nossas vidas e cada vez mais deve-se ter atenções e preocupações, pois, se os problemas de QEE não são mitigados em sua essência, as proporções dos malefícios podem aumentar exponencialmente. Como destacado nesta dissertação, ao pensar na compensação reativa, a preocupação com a frequência de ressonância deve ser imediata, ou seja, para a QEE, não se pensa apenas no problema envolvendo algum fenômeno da QEE em especial, mas deve-se fazer uma avaliação ampla, considerando outros tipos de perturbações. Considerando as demais possibilidades, há problemas consequentes das escolhas feitas, como é o caso da ressonância harmônica na escolha da compensação reativa através dos capacitores.

As instalações, os sistemas de distribuições etc. não podem ser pensadas apenas como pontos de conexão, “*plug & play*” mas, antes de conectá-los, deve-se pensar em suas consequências. Conectar gerações distribuídas, sistemas com eletrônica de potência, fornos de indução e/ou transformadores que trabalham em vazio sem um estudo prévio, sem medições e simulações dessa conexão, pode ocasionar problemas de QEE. No entanto, esses problemas poderiam ser antecipados ou até mitigados.

Métodos eficazes para essas mitigações são constantemente estudados e aplicados, a compensação reativa da penalidade do fator de potência é um exemplo. Porém, com seu mau dimensionamento, sem uma pesquisa do local em que será instalado, a probabilidade haver problemas é muito alta. No entanto, essas análises podem ser feitas antecipadamente, com monitoramento “*full time*” contínuo do sistema, por exemplo.

Esta dissertação detalha as análises de relatório de monitoramento de QEE e o estudo paramétrico de frequência de ressonância através de dados de fácil acesso no campo, placas dos componentes do sistema, itens essenciais para a mitigação dos problemas de QEE a partir da compensação reativa, antes mesmo de sua implementação. Assim, a Qualidade da Energia é um tema que deve ser monitorado, estudado e analisado frequentemente e não apenas quando há um problema ou uma preocupação. Ou seja, dados e mais dados de QEE são as chaves para um futuro próximo sem problemas e preocupações com a QEE.

Esta dissertação é o início de uma grande discussão para a mitigação da ressonância harmônica, pois, no Estudo Paramétrico do Capítulo 4, observa-se que, com a variabilidade da potência reativa injetada e a impedância percentual do transformador, não haverá ressonância harmônica no sistema, independentemente do seu conteúdo harmônico.

Estudos futuros podem ser iniciados a partir desta dissertação, onde a determinação destes parâmetros pode responder algumas perguntas, como por exemplo, quais potências reativas injetadas máximas (*hosting capacity var* do sistema?) e/ou quais os parâmetros para a impedância do sistema para a mitigação das ressonâncias harmônicas. Contudo, este estudo mostra que será possível com estudos mais elaborados, como análises de redes de distribuição através de *frequency scan* determinando as impedâncias em cada barra e indicando os indicadores ou parâmetros destas impedâncias e a uma potência reativa injetada ótima para se evitar a ressonância harmônica do sistema, por exemplo.

## 9 PUBLICAÇÕES

As publicações realizadas durante o desenvolvimento do trabalho são listadas abaixo. Também estão listadas abaixo publicações distintas ao tema do trabalho, mas realizadas no período do programa

### 9.1 ARTIGOS PUBLICADOS DURANTE O PROGRAMA

1. XIV Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, (CBQEE), 2021 – Foz do Iguaçu – Brasil - *Mitigação de Harmônicos e Compensação Reativa em Circuito Elétrico com Ressonância Magnética:Doi 10.1109/PVSC48317.2022.9938798.*
2. IEEE 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP), 2022, Naples - Italy - *Investigation of Harmonic Resonance from Reactive Compensation in Hospital Electrical Installations with Magnetic Resonance Imaging (MRI): Doi 10.1109/ICHQP53011.2022.9808426.*
3. 11th IEEE PES Generation, Transmission and Distribution Conference & Exposition Virtual 2022 – Latin America (IEEE PES GTD) – La Paz – Bolivia – *Reactive Consumption and DG – Adequate Reactive Compensation - Co-Autor: Doi 10.1109/IEEEPESGTDLatinAmeri53482.2022.10038298.*
4. IEEE 49th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC 49), 2022, Philadelphia – U.S.A - *Insertion of Photovoltaic Generation in the Planning of Electricity Distribution Systems Based on its Economic Potential: Doi 10.1109/PVSC48317.2022.9938798.*
5. 11th IEEE PES Generation, Transmission and Distribution Conference & Exposition Virtual 2022 – Latin America (IEEE PES GTD) – La Paz – Bolivia– *Stochastic Analysis (MCS) for Mitigation of Reliability Indicators of the Power Distribution System: Doi 10.1109/IEEEPESGTDLatinAmeri53482.2022.10038302*

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1159-2019, I. **IEEE 1159-2019 IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**. 2019.

519-2022, I. S. **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**. 1993.

602-2007, I. **IEEE STANDART 602-2007**. IEEE, 2007.

61000, I. **Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current  $\leq 16$  A per phase)**. IEC, 2018.

61000-3-11:2017, I. **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-11: Limits - Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems - Equipment with rated current  $\leq 75$  A and subject to conditional connection**. [s.d.]

61000-3-3:2013, I. **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-3: Limits - Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems, for equipment with rated current  $\leq 16$  A per phase and not subject to conditional connection**. 2013.

61000-3-4:1998, I. T. **IEC TS 61000-3-4:1998 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-4: Limits - Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A**. 1998.

ALMEIDA, P.; TORQUATO, R.; FREITAS, W. Ressonâncias Harmônicas em Redes de Distribuição de Baixa Tensão Modernas. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (SBSE) Proceedings**, 2021 v. 1, n. 1,.

ALVES, M. Qualidade de energia e o impacto sobre o sistema consumidor. **Eletricidade Moderna**, n. 267, p. 109-116, 1996.

ANEEL. **Prodist Módulo 8**. Módulo 8 – Qualidade Do Fornecimento De Energia Elétrica. Brasília, 2021.

ARRILAGA, J. S. **Power System Harmonic Analysis**. Chichester, 1997.

BHIM SINGH, A. C. H. **Power Quality: Problems and Mitigation Techniques**. Hardcover: Wiley, 2014.

BOLLINGER, F. Harmônicas em instalações de computadores: casos reais e recomendações. **Editora Moderna**, n. 206, p. 24-28, 1991.

COGO, J. R.; SIQUEIRA, F. J. **Capacitores e Potência e Filtros de Harmônicos**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2016.

C. Boonseng, T. Ratanasrimetha, R. Boonseng and K. Kularbphettong. **UPS System Design with Appropriate PPFs to Prevent Harmonic Resonance and Power Quality Improvements for MRI Scan Equipment**. INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS, 23. Proceedings..., 2020

DUGAN, R. **Electrical Power Systems Quality**. New York: McGraw-Hill, 2002.

ELSPEC - Medium Voltage Equalizer - [https://www.elspec-ltd.com/wp-content/uploads/dlm\\_uploads/2022/07/Elspec-datasheet-EqualizerMediumVoltage-data-sheet-web.pdf](https://www.elspec-ltd.com/wp-content/uploads/dlm_uploads/2022/07/Elspec-datasheet-EqualizerMediumVoltage-data-sheet-web.pdf)

EMBRASUL. **Manual técnico** - Analisador Embrasul RE7000. [s.d.].

EN50160. **EN 50160** – Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks. 2010.

FU ZHENG, W. Z. Long Term Effect of Power Factor Correction on the Industrial Load: A Case Study. **Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)**, 2017.

HAMMAD, A. Analysis of the second harmonic instability for the Chateauguay HVdc/svc scheme. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 7, n. 1, p. 410-415, 1992.

HERNÁNDEZ, Y. et al. Towards a Framework to Detect and Prevent Non-Technical Losses in Power Distribution based on data-mining techniques and Bayesian networks. In: 2015 Fourteenth Mexican International Conference on Artificial Intelligence (MICAI). **IEEE**, 2015. p. 157-161.

IEC. **IEC, 60831-1:2014, 2014**. IEC 60831-1:2014 - Shunt power capacitors of the self-healing type for a.c. systems having a rated voltage up to and including 1 000 V - Part 1: General - Performance, testing and rating - Safety requirements - Guide for installation and operation. IEC, 2014.

IEC 60601, I. IEC 60601-1:2005 Medical electrical equipment - Part 1: General requirements for basic safety and essential performance. **International Standard**, 2005.

IEC STANDARD 60364-1, I. S. **INTERNATIONAL IEC STANDARD 60364-1 - Low-voltage electrical installations – Part 1: Fundamental principles, assessment of general characteristics, definitions**. IEC, 2005.



IEEE 3002.8, I. **IEEE 3002.8 - 2018 - Recommend Practice for Conducting Harmonic Studies and Analysis of Industrial and Commercial Power Systems.** 2018.

JÚNIOR, M. C. Verificação do impacto da qualidade de energia e das instalações elétricas nos equipamentos eletromédicos. **Qualidade de Energia - O Setor Elétrico**, p. 18-28, 2009.

MACEDO JUNIOR, J. R. Origens das distorções harmônicas em sistemas elétricos de potência. **Youtube**, 2020. Disponível em: [https://www.youtube.com/watch?v=Ex9xr9-\\_69U](https://www.youtube.com/watch?v=Ex9xr9-_69U). Acesso em:

KAGAN, N. et al. **Redes Elétricas Inteligentes no Brasil**. 1. ed. Rio de Janeiro: Synergia, 2013.

KAGAN, N.; ROBBA, E. J.; SCHMIDT, H. P. **Estimação de indicadores de qualidade de energia elétrica**. Blucher, 2009.

MARTINHO, E. **Distúrbios da Energia Elétrica**. Érica, 2015.

MIGUEL, A. La amenaza de los armónicos y sus soluciones. *In: La amenaza de los armónicos y sus soluciones*. Madrid: Editora Centro Español de Información del Cobre, 1999. p. 205.

NBR 13534. **NBR 13534** - Instalações elétricas de baixa tensão - Requisitos específicos para instalação em estabelecimentos assistenciais de saúde. ABNT, 1995.

NBR 5410, A. N. **ABNT NBR 5410** - Instalações elétricas de baixa tensão. ABNT, 2005.

NBR 60601-1, I. **ABNT NBR IEC 60601-1:2010** - Equipamento eletromédico Parte 1: Requisitos gerais para segurança básica e desempenho essencial. ABNT, 2010.

NETO, J. C.; ALMEIDA, C. F.; STAROSTA, E. D. Mitigação de Harmônicos e Compensação Reativa em Circuito Elétrico com Ressonância Magnética. **CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**, 14. Anais... 2021 p.1

KIRAWANICH, P; O'CONNELL, R. M. Fuzzy logic control of an active power line conditioner. **IEEE Trans. Power. Electron**, 2014.

PANDA, S. M. **Power Quality Issues - Current Harmonics**. Boca Raton: CRC Press, 2016.

PAULILLO, F. R. Compensação reativa e qualidade da energia elétrica. **Qualidade de energia - O Setor Elétrico**, p. 36-43, [s.d.].

POMILIO, J. Fascículo / Harmônicos. **O Setor Elétrico**, 2006.

RN 1000; E. A. A. **RN 1000**. 2011.

JAIN, S. K.; AGRAWAL, P.; GUPTA, H. O. Fuzzy logic controlled shunt active power filter for power quality improvement. **IEE Proceedings-Electric Power Applications**, v. 149, n. 5, p. 317-328, 2002.

STAROSTA, J.; MORENO, H. **Compensação da energia reativa**. São Paulo, São Paulo: Prentice Hall, 2008.

STAROSTA, J. O “milagre” da multiplicação dos ampéres. Aspectos de ressonância harmônica. **O Setor Elétrico**, 2020. Disponível em:<https://www.osestoreletrico.com.br/o-milagre-da-multiplicacao-dos-amperes-aspectos-de-ressonancia-harmonica-parte-i/>. Acesso em:

MIKKILI, S.; PANDA, A. K. PI and Fuzzy Logic Controller Based 3-Phase 4-Wire Shunt Active Filters for the Mitigation of Current Harmonics with the I d-I q Control Strategy. **Journal of power Electronics**, v. 11, n. 6, p. 914-921, 2011.

VASKOVSKAYA, T. A. Market price signals for customers for compensation of reactive power. *In: 11th International Conference on the European Energy Market (EEM14)*. IEEE, 2014. p. 1-4.

WATANABE, E. H. **Medição de Potência Reativa em Sistemas com Formas de Onda Não-Senoidais**. Blumenau: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 17. Anais... 2009 p.1

WOLFGANG HOFMANN, J. **Reactive Power Compensation A Practical Guide**. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2012.

KABIR, Y.; MOHSIN, Y. M.; KHAN, M. M. Automated power factor correction and energy monitoring system. *In: 2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*. IEEE, 2017. p. 1-5.



Não Há	Não Há	Não Há	Não Há
Não Há	Não Há	Não Há	Não Há

Fonte: Embrasul ([s.d.])

Tabela 14 – Distribuição das Tensões

	UA	UB	UC
Tensão Média	225,90	227,88	226,70
Tensão Máxima	228,75	230,80	229,50
Tensão Mínima	222,50	224,41	223,37

Fonte: Embrasul ([s.d.])

Tabela 15 – Distribuição das Tensões com métricas

Valor (%)	UA (%)	UB (%)	UC (%)	Valor (%)	UA (%)	UB (%)	UC (%)
<80,0	0,00%	0,00%	0,00%	100,8	0,00%	0,00%	0,00%
80,9	0,00%	0,00%	0,00%	101,8	15,77%	0,00%	4,66%
81,9	0,00%	0,00%	0,00%	102,8	52,38%	20,24%	39,68%
82,8	0,00%	0,00%	0,00%	103,8	31,85%	52,58%	50,40%
83,8	0,00%	0,00%	0,00%	104,7	0,00%	27,18%	5,26%
84,7	0,00%	0,00%	0,00%	105,5	0,00%	0,00%	0,00%
85,7	0,00%	0,00%	0,00%	106,3	0,00%	0,00%	0,00%
86,6	0,00%	0,00%	0,00%	107,3	0,00%	0,00%	0,00%
87,7	0,00%	0,00%	0,00%	108,3	0,00%	0,00%	0,00%
88,8	0,00%	0,00%	0,00%	109,2	0,00%	0,00%	0,00%
89,9	0,00%	0,00%	0,00%	110,2	0,00%	0,00%	0,00%
91,0	0,00%	0,00%	0,00%	111,2	0,00%	0,00%	0,00%
92,1	0,00%	0,00%	0,00%	112,2	0,00%	0,00%	0,00%

93,1	0,00%	0,00%	0,00%	113,1	0,00%	0,00%	0,00%
94,1	0,00%	0,00%	0,00%	114,1	0,00%	0,00%	0,00%
95,0	0,00%	0,00%	0,00%	115,1	0,00%	0,00%	0,00%
96,0	0,00%	0,00%	0,00%	116,1	0,00%	0,00%	0,00%
97,0	0,00%	0,00%	0,00%	117,1	0,00%	0,00%	0,00%
97,9	0,00%	0,00%	0,00%	118,0	0,00%	0,00%	0,00%
98,9	0,00%	0,00%	0,00%	119,0	0,00%	0,00%	0,00%
99,9	0,00%	0,00%	0,00%	>=120,0	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Embrasul ([s.d.])

Tabela 16 – Piores 15 valores do Fator de Potência

Fase A	Fase B	Fase C	Trifásico
11/09/2022 11:32:30 -0,960	15/09/2022 18:42:30 -0,164	16/09/2022 07:02:30 -0,278	16/09/2022 07:02:30 -0,278
13/09/2022 09:52:30 -0,984	11/09/2022 11:32:30 -0,219	14/09/2022 07:12:30 -0,282	14/09/2022 07:12:30 -0,282
13/09/2022 07:42:30 -0,985	13/09/2022 06:52:30 -0,225	16/09/2022 07:22:30 -0,284	16/09/2022 07:22:30 -0,284
11/09/2022 07:42:30 -0,986	14/09/2022 07:02:30 -0,243	11/09/2022 11:32:30 -0,285	11/09/2022 11:32:30 -0,285
13/09/2022 13:02:30 -0,986	13/09/2022 13:32:30 -0,250	09/09/2022 18:32:30 -0,287	09/09/2022 18:32:30 -0,287
10/09/2022 07:02:30 -0,987	12/09/2022 15:42:30 -0,251	09/09/2022 10:32:30 -0,287	09/09/2022 10:32:30 -0,287
12/09/2022 08:22:30 -0,987	13/09/2022 16:02:30 -0,251	14/09/2022 07:02:30 -0,287	14/09/2022 07:02:30 -0,287
16/09/2022 07:02:30 -0,988	13/09/2022 17:22:30 -0,251	15/09/2022 10:42:30 -0,288	15/09/2022 10:42:30 -0,288
13/09/2022 18:32:30 -0,988	14/09/2022 17:12:30 -0,254	09/09/2022 13:42:30 -0,288	09/09/2022 13:42:30 -0,288
12/09/2022 08:32:30 -0,988	12/09/2022 14:52:30 -0,254	10/09/2022 07:02:30 -0,288	10/09/2022 07:02:30 -0,288
13/09/2022 07:52:30 -0,988	13/09/2022 16:12:30 -0,254	11/09/2022 07:42:30 -0,288	11/09/2022 07:42:30 -0,288
13/09/2022 10:02:30 -0,988	12/09/2022 14:32:30 -0,255	15/09/2022 07:02:30 -0,288	15/09/2022 07:02:30 -0,288
14/09/2022 18:02:30 -0,988	12/09/2022 15:02:30 -0,256	09/09/2022 13:32:30 -0,288	09/09/2022 13:32:30 -0,288
14/09/2022 18:12:30 -0,988	15/09/2022 12:42:30 -0,256	13/09/2022 07:12:30 -0,289	13/09/2022 07:12:30 -0,289
12/09/2022 07:12:30 -0,988	09/09/2022 09:22:30 -0,257	12/09/2022 09:12:30 -0,289	12/09/2022 09:12:30 -0,289

Fonte: Embrasul ([s.d.])

Tabela 17 – Registros de Harmônicas

Ordem	Va	Vb	Vc
--	--	--	--
--	--	--	--
--	--	--	--
--	--	--	--
--	--	--	--
--	--	--	--
--	--	--	--
--	--	--	--
--	--	--	--
--	--	--	--
--	--	--	--

Fonte: Embrasul ([s.d.])

Tabela 18 – Registros do VTCD

Reg	Data	Hora	Mag.(pu)	Ciclos	Tempo(s)	Classificação
						Não Há Registros
						Não Há Registros
						Não Há Registros
						Não Há Registros
						Não Há Registros
						Não Há Registros
						Não Há Registros
						Não Há Registros
						Não Há Registros
						Não Há Registros

Fonte: Embrasul ([s.d.])

## ANEXO B

## ESTUDO PARAMÉTRICO DA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA

Tabela 19 – Dados para a série de Fourier e impacto da corrente no sistema

Variação da Compensação Reativa										
Hr	F	Xtrafo	Xcap1	Xcap2	Xcap3	C	L	Fr (87kvar) Hz	Fr (50kvar) Hz	Fr(25kvar) Hz
1	60	0,096	2,648	4,608	9,216	0,001	0,000254648	315,1	415,7	587,9
1,5	90	0,144	1,766	3,072	6,144	0,001	0,000254648			
2	120	0,192	1,324	2,304	4,608	0,001	0,000254648			
2,5	150	0,240	1,059	1,843	3,686	0,001	0,000254648			
3	180	0,288	0,883	1,536	3,072	0,001	0,000254648			
3,5	210	0,336	0,757	1,317	2,633	0,001	0,000254648			
4	240	0,384	0,662	1,152	2,304	0,001	0,000254648			
4,5	270	0,432	0,589	1,024	2,048	0,001	0,000254648			
5	300	0,480	0,530	0,922	1,843	0,001	0,000254648			
5,5	330	0,528	0,482	0,838	1,676	0,001	0,000254648			
6	360	0,576	0,441	0,768	1,536	0,001	0,000254648			
6,5	390	0,624	0,407	0,709	1,418	0,001	0,000254648			
7	420	0,672	0,378	0,658	1,317	0,001	0,000254648			
7,5	450	0,720	0,353	0,614	1,229	0,001	0,000254648			
8	480	0,768	0,331	0,576	1,152	0,001	0,000254648			
8,5	510	0,816	0,312	0,542	1,084	0,001	0,000254648			
9	540	0,864	0,294	0,512	1,024	0,001	0,000254648			
9,5	570	0,912	0,279	0,485	0,970	0,001	0,000254648			
10	600	0,960	0,265	0,461	0,922	0,001	0,000254648			
10,5	630	1,008	0,252	0,439	0,878	0,001	0,000254648			
11	660	1,056	0,241	0,419	0,838	0,001	0,000254648			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 20 – Dados para a série de Fourier e impacto da corrente no sistema

Variação da Impedância percentual do Transformador										
Hr	F	Xtrafo	Xcap1	Xtr2	Xtr3	C	L	Fr (5%) Hz	Fr (3%) Hz	Fr(1%) Hz
1	60	0,096	2,648	0,058	0,019	0,001	0,000254648	315,1	406,8	704,7
1,5	90	0,144	1,766	0,086	0,029	0,001	0,000254648			
2	120	0,192	1,324	0,115	0,038	0,001	0,000254648			
2,5	150	0,240	1,059	0,144	0,048	0,001	0,000254648			
3	180	0,288	0,883	0,173	0,058	0,001	0,000254648			
3,5	210	0,336	0,757	0,202	0,067	0,001	0,000254648			
4	240	0,384	0,662	0,230	0,077	0,001	0,000254648			
4,5	270	0,432	0,589	0,259	0,086	0,001	0,000254648			
5	300	0,480	0,530	0,288	0,096	0,001	0,000254648			
5,5	330	0,528	0,482	0,317	0,106	0,001	0,000254648			
6	360	0,576	0,441	0,346	0,115	0,001	0,000254648			
6,5	390	0,624	0,407	0,374	0,125	0,001	0,000254648			
7	420	0,672	0,378	0,403	0,134	0,001	0,000254648			
7,5	450	0,720	0,353	0,432	0,144	0,001	0,000254648			
8	480	0,768	0,331	0,461	0,154	0,001	0,000254648			
8,5	510	0,816	0,312	0,490	0,163	0,001	0,000254648			
9	540	0,864	0,294	0,518	0,173	0,001	0,000254648			
9,5	570	0,912	0,279	0,547	0,182	0,001	0,000254648			
10	600	0,960	0,265	0,576	0,192	0,001	0,000254648			
10,5	630	1,008	0,252	0,605	0,202	0,001	0,000254648			
11	660	1,056	0,241	0,634	0,211	0,001	0,000254648			

Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXO C

DIAGRAMAS DO ALIMENTADOR DA RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

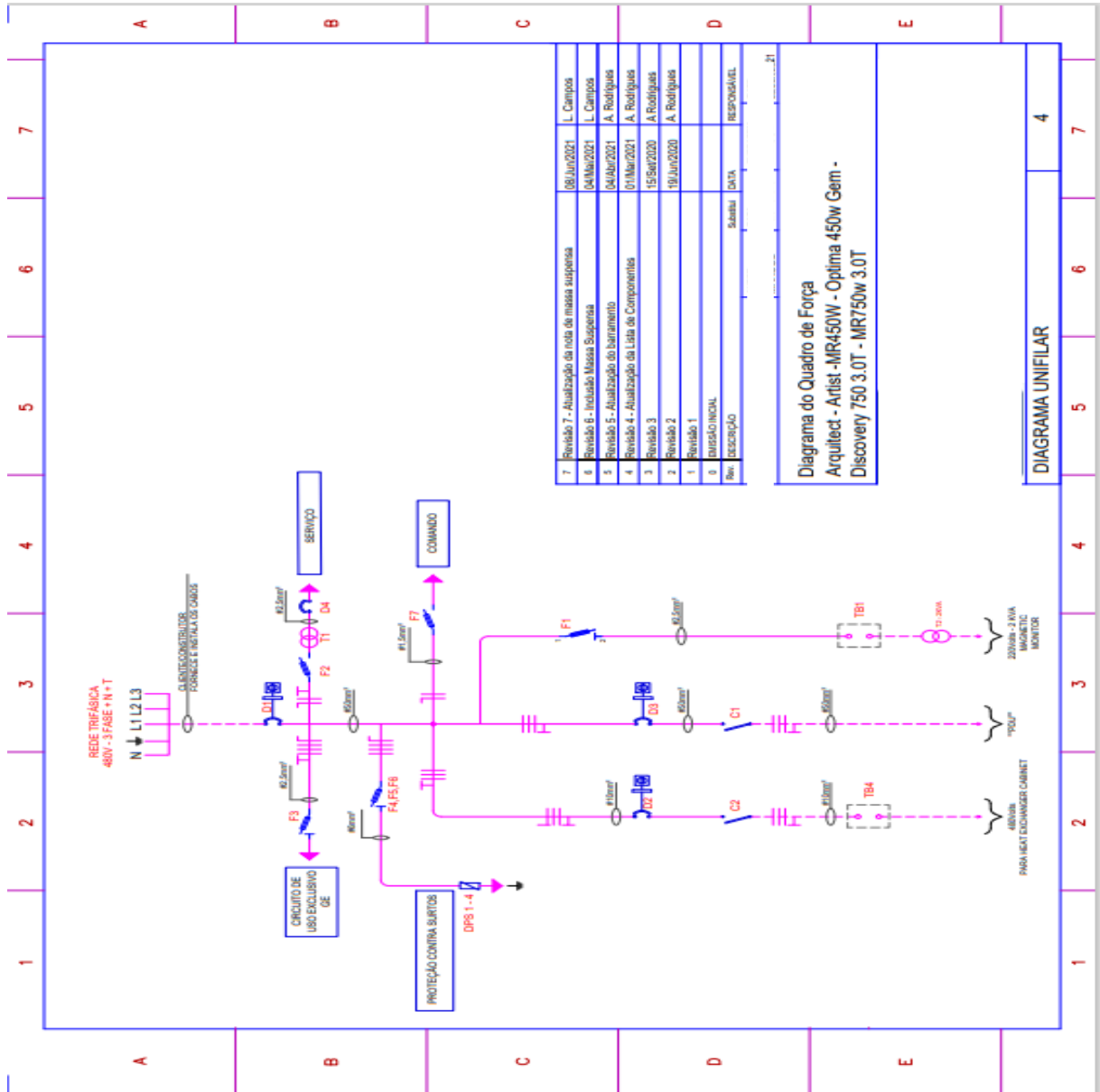


Figura 80 - Diagrama Unifilar - Alimentador Ressonância Magnética



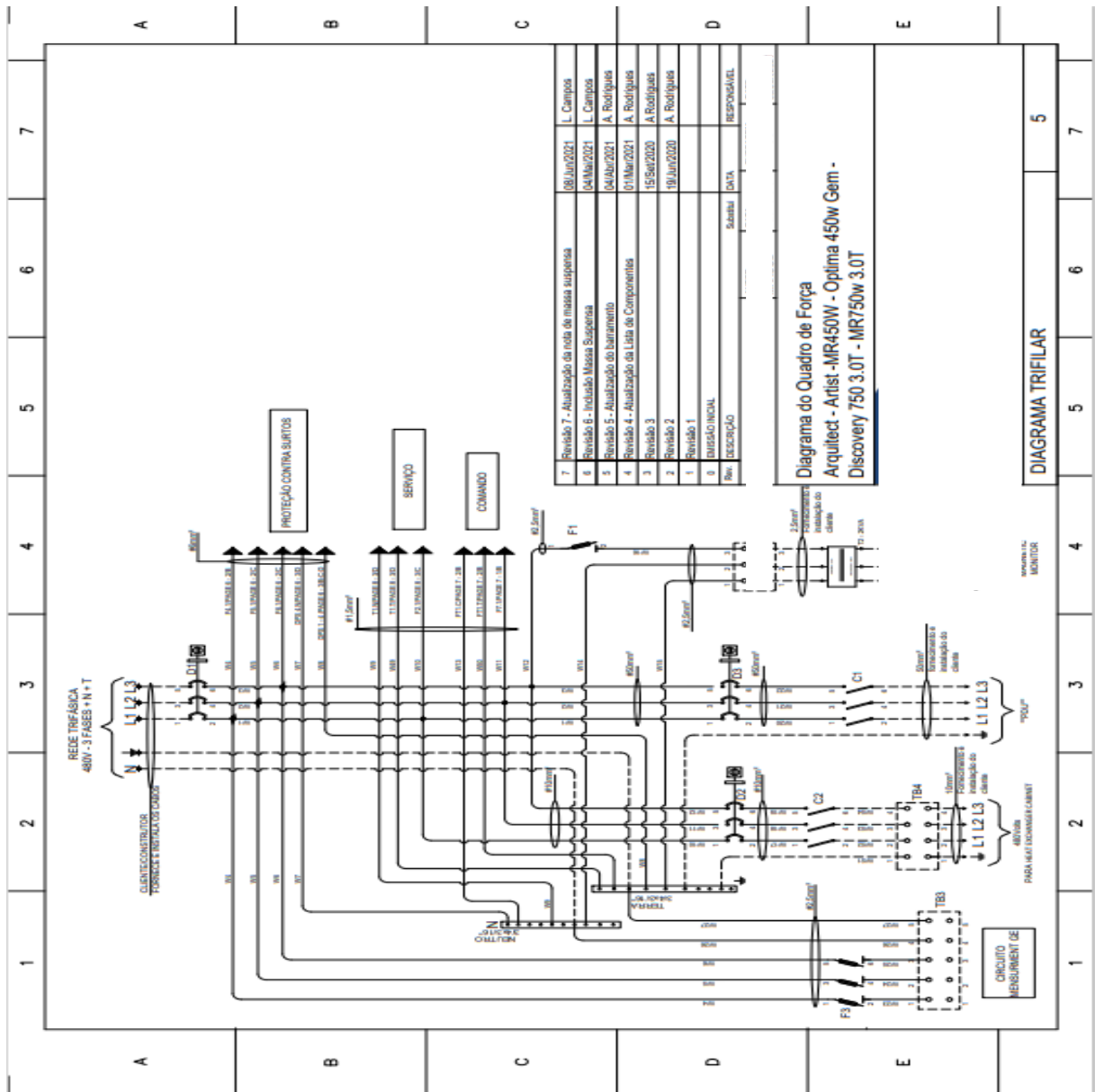


Figura 81 - Diagrama Trifilar - Ressonância Magnética  
 Fonte: (GE, 2009)

## ANEXO D

### ESPECIFICAÇÕES DOS MEDIDORES

#### PQUBE 3 – PLS

##### Technical Specifications

TECHNICAL SPECIFICATIONS	
Dimensions (L x W x H)	4.33 in X 2.89 in X 3.08 in (11.0 cm X 7.34 cm X 7.82 cm), 1.8 in (3.5 cm) DIN rail mountable
Weight	10.5 oz (300g)
Operating Environment	Temperature: -4 to +149° F (-20 to +65° C), +131° F (+55° C) with PM2 AUX load Humidity: 5 - 95% RH (inside use) Altitude: <2000 m above sea level
Power Supply	AC: 24 Vac ±10% at 50/60/400 Hz, 1.5A max DC: ±24 to 48 Vdc ±10% (polarity independent), 1A max. Optional PM1 and PM2 modules: 100 to 240 Vac 50/60 Hz and 120 to 370 Vdc Power over Ethernet (PoE) compatible
Internal Memory	32 GB (holds over a year of data, depending on number of recorded events)
Data Backup	USB 2.0 thumb drive; External microSD card (not included)
Clock Synchronization	SNTP, NTP
Output File Types	Text, GIF, CSV, and IEEE 1159-3 PQDIF
Communication Ports	Ethernet RJ45 10/100 (optional external wireless or cell modem)
Communication Protocols	Modbus/TCP, DNP 3.0, SNMP with traps, BACnet, FTP or HTTP (secure FTPS and HTTPS), and email

##### Measurement Functions

VOLTAGE	
Sampling Rate	512 samples per cycle at 50 Hz / 60 Hz (applies to voltage, current, and analog channels)
Inputs	4 + Reference to earth (L1, L2, L3, N, E)
Voltage Range	0 to 750 Vac (L-N), 0 to 1300 Vac (L-L), impedance: 4.8MΩ
Voltage Magnitude*	L-L, L-N, L-E, and N-E. RMS over 1/2 cycle (Urms 1/2)
Frequency*	50 Hz, 60 Hz, 400 Hz, or 16.67 Hz
Unbalance (negative and zero sequence)*	IEC, GB, and ANSI methods
Flicker (Pinst, Pst, and PIt)*	IEC 61000-4-15
Voltage Harmonic & Interharmonic*	Volt or %H1, IEC 61000-4-7 Class 1, order up to 50 <sup>th</sup>
Total Harmonic Distortion (THD)	%, IEC 61000-4-7
High Frequency Impulse (voltage)	Records transient pulses on one channel (L1-E, L2-E, L3-E, or N-E) at 4 MHz sampling, or all 4 channels at 1 MHz, range: ± 6 kV
Conducted Emissions (2 - 9 kHz)*	Volts for L1-E, L2-E, L3-E : resolution 200 Hz bins, range 0 to 60 Vpk
Conducted Emissions (8 - 150 kHz)*	Volts for L1-E, L2-E, L3-E, and N-E: resolution 2000 Hz bins, range 0 to 60 Vpk

Fonte: (Pqube, 2020)

CURRENT	
Inputs	8 inputs (I1 to I8), differential, 0 to 6000 Amp with CTs (Inductive & Rogowski coil) Low Range: 0.333 Vrms High Range: 10 Vpk Impedance: 33.3 k $\Omega$
Current Magnitude*	RMS refreshed 1/2 cycle (I <sub>rms</sub> 1/2)
Peak Current	RMS over 1 sec, 1 min, or user defined (3 min to 1 hr)
Unbalance (negative and zero sequence)*	IEC, GB, and ANSI methods
Current Harmonics & Interharmonics*	Amp, order up to 50 <sup>th</sup>
Total Demand Distortion (TDD) or	Amp, IEC 61000-4-7
Total Harmonic Demand Distortion (THDI)	%, IEC 61000-4-7

POWER	
Channels	8 calculated channels. I1 to I8, calculated with either L1-N, L2-N, or L3-N voltages
Total Power	Up to two 3-phase loads
Peak Power	Intervals: 1 sec, 1 min, or user defined (up to one hour)
Reactive Power	VAR (per-phase and total)
Apparent Power	VA (per-phase, peak, and total)
Power Factor	TPF or DPF method (per-phase and total)

ENERGY	
Channels	8 channels. I1 to I8 calculated with either L1-N, L2-N, or L3-N voltages
Energy (Import, Export, & Net)	kWh (per-phase and total) Accuracy certified ANSI C12.20 Class 0.2 and IEC 62053-22 Class 0.2S
Reactive Energy (Import, Export, And Net)	kVARh (per-phase and total)
Apparent Energy	kVAh (per-phase and total)

ANALOG	
Inputs	4 single ended or 2 differential inputs (A1, A2, A3, A4, E) Low Range: Low: $\pm 10$ Vdc or 6 Vac High Range: $\pm 100$ Vdc or 60 Vac
Analog Magnitude	AN1-E, AN2-E, AN3-E, AN4-E or differential AN1-AN2, AN3-AN4 RMS refreshed 1/2 cycle
Power & Energy Configuration (Optional)	Power and energy meter 1 (AN1 X AN2), power and energy meter 2 (AN3 X AN4)

DIGITAL	
Inputs	1 differential input (D+, D-). Digital threshold 1.5 V $\pm$ 0.2 V typical

ENVIRONMENT SENSORS	
Inputs	2 ENV2 probe inputs (USB2, USB3). Uses Powerside's ENV2 EnviroSensor probe
Temperature	-4 to 176° F (-20 to 80° C)
Humidity	0 to 100 % RH
Barometric Pressure	Resolution better than 0.001 hPa
Acceleration (x, y, and z)	(x, y, and z) $\pm 2$ , $\pm 4$ , or $\pm 8$ gravity ranges, trigger on shock/vibration, seismic, or tilt

RELAY	
Outputs	1 output, trigger programmable
Activation Mode	Activated on sag/swell, over/under frequency, overcurrent, inrush, waveshape change high frequency, impulse, snapshot, and digital/analog events
Rating	RLY1 - 30 Vac or Vdc, 300mA max, activates for event duration or 3 seconds (whichever is longer), 20 ms delay

\* Meets or exceeds IEC 61000-4-30 Ed. 3 Class A

Fonte: (Pqube, 2020)

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS	
Alimentação auxiliar ou pela medição de tensão	
Faixa Vac:	70 a 500Vac (Fase/Neutro)
Faixa Vdc:	100 a 300Vdc
Consumo:	5VA
Entradas de tensão	
Número de entradas:	3 (VA,VB,VC) ou 4 (VA,VB,VC,VN)*
Faixa de Medição:	50 a 500Vac (Fase-Neutro) 866V (F-F)
Resolução:	0,01V
Precisão:	0,2%
Sobrecarga de tensão:	+10% valor máximo durante 1 segundo.
Impedância de entrada:	2M $\Omega$
Amplitude de banda:	1500Hz
* Para equipamento com módulo de medição do Neutro	Opcional
Entradas de corrente	
Número de entradas:	3 (IA,IB,IC) ou 4 (IA,IB,IC,IN)*
Tipo:	Sensor flexível** ou alicate rígido
Faixa de medição:	Com sensor flexível: 0,1 a 3000A
	Com Alicate rígido AL100: 0,05A a 100A
	Com Alicate rígido AL1000: 5A a 1000A
* Para equipamento com módulo (N) de medição de Neutro.	Opcional
**Deve-se optar pelo diâmetro do sensor flexível: 120mm ou 240mm	
Resolução:	0,01A
Precisão:	0,2% + precisão do sensor de corrente
Amplitude de banda:	1500Hz
Frequência nominal	
Frequência:	45 a 70Hz
Resolução:	0,01Hz
Precisão:	$\pm$ 0,01Hz
Combinações de fiação	
Monofásicas:	2F
Bifásicas:	2F, 3F
Trifásicas:	3F, 4F e 5F
PARÂMETROS MEDIDOS	
Tensões:	Por fase e trifásicas
Correntes:	Por fase e trifásicas
Desequilíbrios:	Percentuais de desbalanceamentos entre as fases de tensão (NEMA e IEC)
Potências:	Ativas, reativas e aparentes por fase e totais
Precisão das potências:	$\pm$ 0,5% + precisão do sensor de corrente

Fonte: (Pqube, 2020)

Fator de potência:	Indutivo e capacitivo
Faixa do FP:	0,001 até 1 indutivo e 0,001 até 1 capacitivo
Precisão do FP:	±0,5%
Fator de deslocamento:	Indutivo e capacitivo
Faixa do FP:	0,001 até 1 indutivo e 0,001 até 1 capacitivo
Precisão do FP:	±0,5%
Distorções:	DHTi, DHTv, TDD, DHT GLOBAL
<b>CARACTERÍSTICAS DOS MÓDULOS</b>	
Para módulo H (Harmônicas)	
Ordens medidas:	1° (fund) até 41° (pares e ímpares) Conforme IEC 61000-4-7
Ângulo de fase:	0° a 360°
ANL7000:	Formas de onda
	Planilhas pré configuradas
	Gráficos e relatório pré-definidos
	Filtro de extremos em V ou I
Para todas as fases	
Histogramas (Espectro harmônico):	Percentuais e valores absolutos
Para módulo T (Captura de Transientes)	
Distúrbios de tensão:	Até 700V (F-N) de pico
Duração mínima detectada:	130i s
Para módulo P (Conformidade com Prodíst)*	
Flicker:	PST e PLT conforme IEC61000-4-15
Harmônicas:	1° (fund) até 41° (pares e ímpares) conforme módulo 8 do PRODIST da ANEEL
VTCD (Variações de tensão de curta duração):	Data, hora, magnitude, duração, classificação do evento (Afundamentos "SAG", Elevações "SWELL" e Interrupções) [Momentâneos ou temporários] Conforme módulo 8 do PRODIST da ANEEL
<i>*Este módulo atende INTEGRALMENTE todas as exigências especificadas pelo módulo 8 dos procedimentos de distribuição da ANEEL (PRODIST)</i>	
<b>NORMAS</b>	
Métodos de medição utilizados:	IEC 61000-4-30 (Classe S)
Flicker:	IEC 61000-4-15
Harmônicos:	IEC 61000-4-7
<b>CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS GERAIS</b>	
Sistema de amostragem	
Resolução:	128 amostras por ciclo (Simultaneamente em todos os canais)
Intervalo de integração:	De 200 milissegundos a 10 minutos

Fonte: (Pqube, 2020)

Memória para registros	
Capacidade da memória interna:	2GB
Autonomia:	Integração em 1 segundo: superior a 2 semanas* Integração em 10 minutos: 24 anos*
Base de tempo:	Cristal de quartzo - Resolução de 10ms Horário exibido em HH:MM:SS
Bateria:	Interna para armazenamento de dados (Recarrega automático)
<i>*Medição consecutiva com todos os parâmetros registrados simultaneamente</i>	
Display	
Tipo:	LCD gráfico (cristal líquido)
Retroiluminação:	Com backlight azul
Tamanho:	114 x 64mm
Resolução:	240 x 128 pixels
Teclado	
Força de contato:	160 ± 30g
Vida útil:	50.000 ciclos (mínimo)
Interfaces de comunicação	
USB	Host 2.0
Ethernet	Porta Ethernet RJ45 a 100Mbps (TCP/IP)
3G/EDGE/GPRS	Quadband. Descarga e visualização remota.
WIFI	802.11 b/n/g. Conexão a redes Wireless.
SOFTWARE ANL7000	
Compatibilidade com sistema operacional:	Windows XP e superiores
Memória do computador:	> 1GB de RAM
Atualizações:	Gratuitas
Software de análise ANL7000:	Acompanha o equipamento
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E DE SEGURANÇA	
Dimensões frontais:	217,6 x 281mm
Profundidade:	73mm
Peso:	1,5kg
Grau de proteção:	IP54
Grau de Poluição:	II (grau 2)
Categoria:	CAT III
Isolação:	2,5kV - 60Hz
Características ambientais	
Temperatura de operação:	-10°C a 60°C
Temperatura de armazenamento:	-20°C a 70°C
Umidade:	0% a 95%, sem condensação

Fonte: (Pqube, 2020)

**ANEXO E**

**RELATÓRIO QUALIDADE DE ENERGIA PQUBE 3 – REPORT REVIEW**

Powerside.  
980 Atlantic Ave  
Alameda, CA  
TEL: 510 522 4400  
<http://www.powerside.com>

**EN50160 Compliance Report FAIL**

2022 Calendar Week 37 - 12/09/2022 – 18/09/2022

"Characteristics of Voltage at a Network User's Supply Terminals: Limits and Values"

**450W – 1,5T**

3-phase 4-wire Wye/Star  
Um=277V / 60Hz



**Summary of Results**  
**EN50160**  
**12/09/2022 – 18/09/2022**

**EN50160 Pass-Fail Requirements Table**

EN50160 Section	Power Quality Parameter	EN50160 Compliance	Remarks
4.2.1	Power Frequency	<b>PASS</b>	
4.2.2	Supply Voltage Variations	<b>PASS</b>	
4.2.3	Flicker Severity	<b>FAIL</b>	Exceeds Limits
4.2.4	Voltage Unbalance	<b>PASS</b>	
4.2.5	Voltage THD	<b>PASS</b>	
4.2.5	Voltage Harmonics	<b>FAIL</b>	Harmonics exceed limits (L1, L2, L3)

**EN50160 Additional Information Table**

EN50160 Section	Power Quality Parameter	Remarks
4.2.6	Voltage Interharmonics	
4.3.1	Interruptions	
4.3.2	Dips	
4.3.3	Swells	
4.3.6	Rapid Voltage Changes	
4.3.4	Transient Overvoltages	
4.3.5	Waveshape Changes	

Note 1: During 12/09/2022 – 18/09/2022 measurements were made 100,00% of the time

Note 2: Low Voltage Systems (< 1 kV) limits were used.

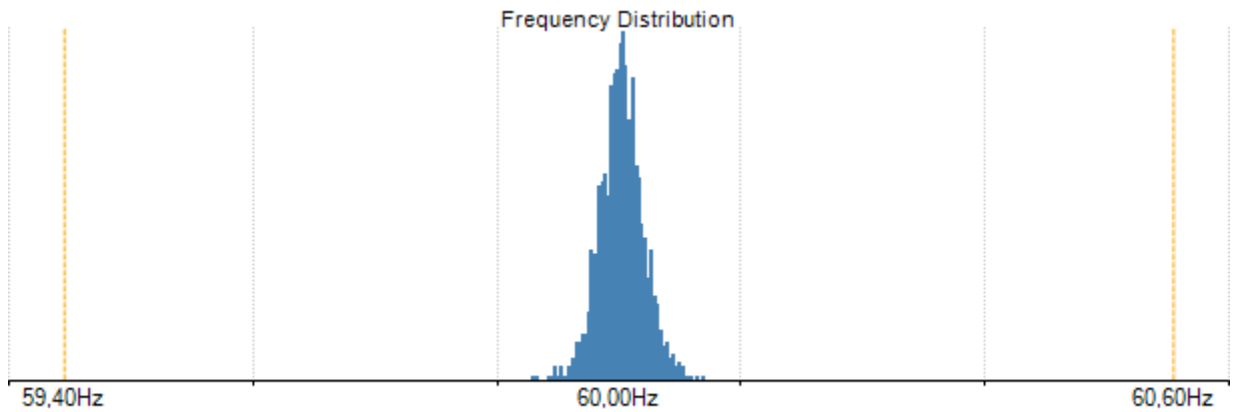
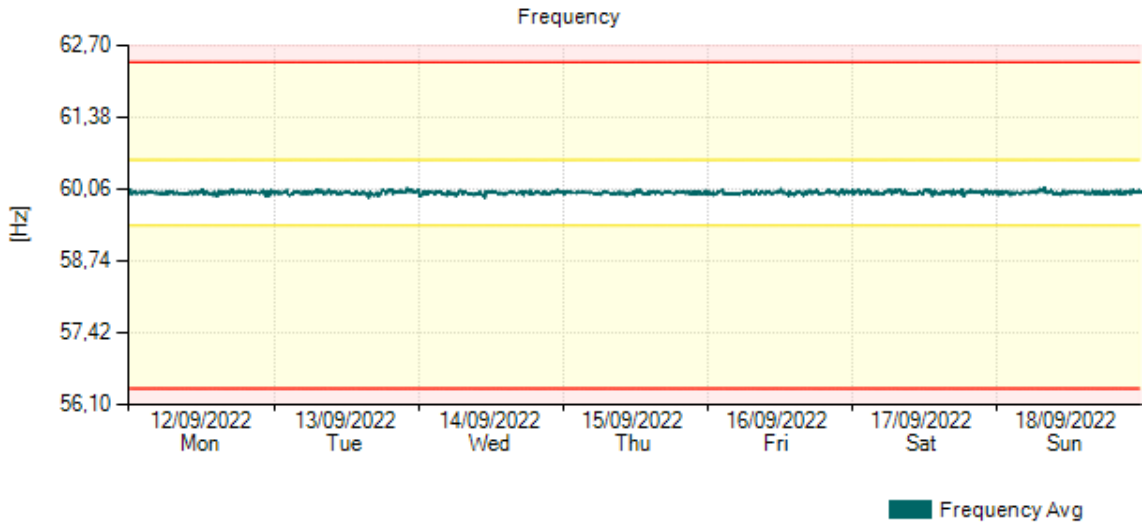
Note 3: Flagged data was excluded from this report.

Instrument used:	<a href="http://www.powerside.com">PQube 3® (www.powerside.com)</a>
Manufacturer:	Powerside
PQube ID:	450W – 1,5T
Serial number:	P3003495
Firmware revision:	3.7.3.19.04.25
Report Software:	PQube Report Writer 3.9.13.6
Author of Report:	Powerside.
Name:	John Smith

### Section 4.2.1: Power Frequency

**Nominal Frequency:** 60,00Hz  
**Parameter definition:** Mean value of the fundamental frequency measured over 10 seconds  
**Limitation:** For systems with a synchronous connection to an interconnected system  
 Measured values based on coverage

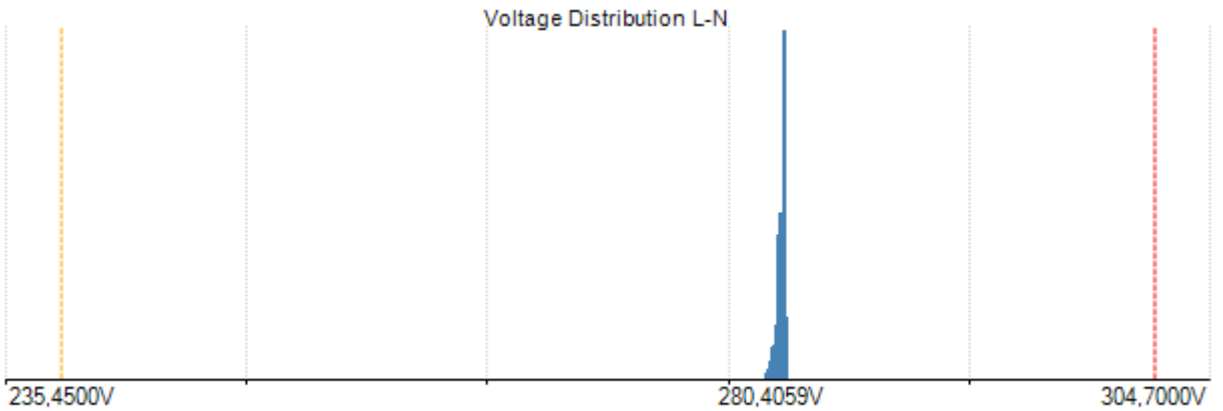
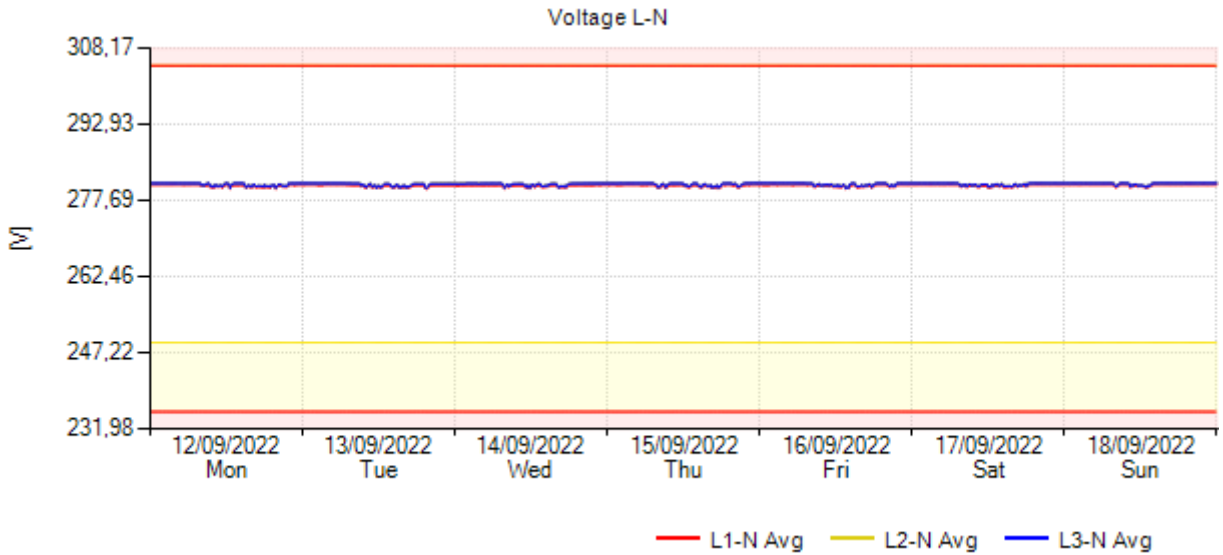
Requirement	Measured Frequency	Result
99,5% of week: 59,40Hz ~ 60,60Hz	59,94Hz~60,07Hz	PASS
100% of week: 56,40Hz ~ 62,40Hz	59,91Hz~60,09Hz	PASS



### Section 4.2.2: Supply Voltage Variations

**Nominal Voltage L-N:** 277,00V L-N  
**Parameter definition:** 10 minute mean RMS value of the supply voltage (Avg)  
**Limitation:** For systems with a synchronous connection to an interconnected system  
 Measured values based on coverage

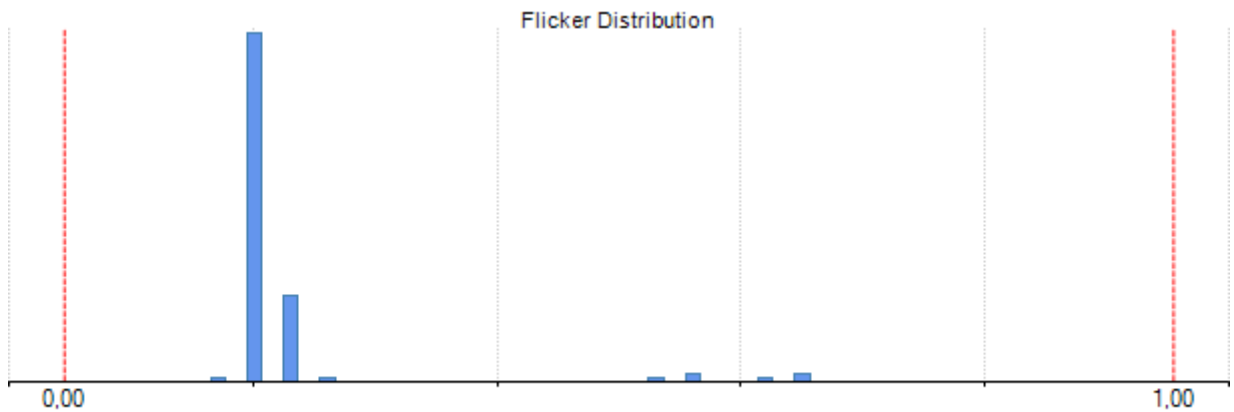
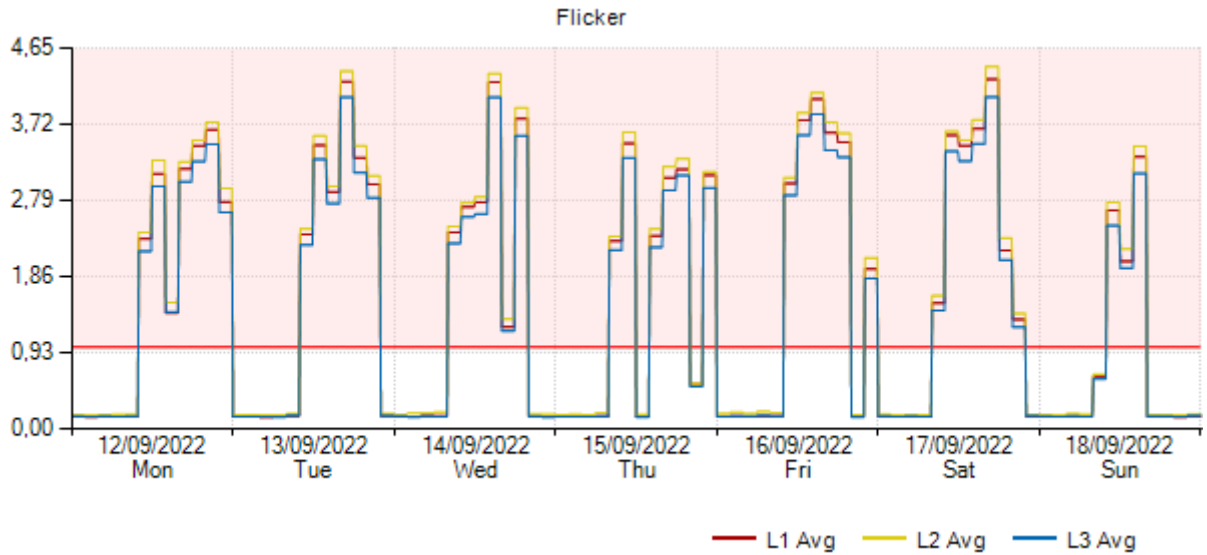
Requirement	Measured L1 Voltage	Measured L2 Voltage	Measured L3 Voltage	Result
95% of week: 249,3V ~ 304,7V	280,31V ~ 280,87V	280,53V ~ 281,24V	280,50V ~ 281,20V	PASS
100% of week: 235,45V ~ 304,7V	280,04V ~ 280,89V	280,24V ~ 281,27V	280,22V ~ 281,21V	PASS



### Section 4.2.3: Flicker Severity

Parameter definition: Long term flicker severity Plt (2 hour intervals) (Avg)  
 Limitation: Under normal operating conditions  
 Measured values based on coverage

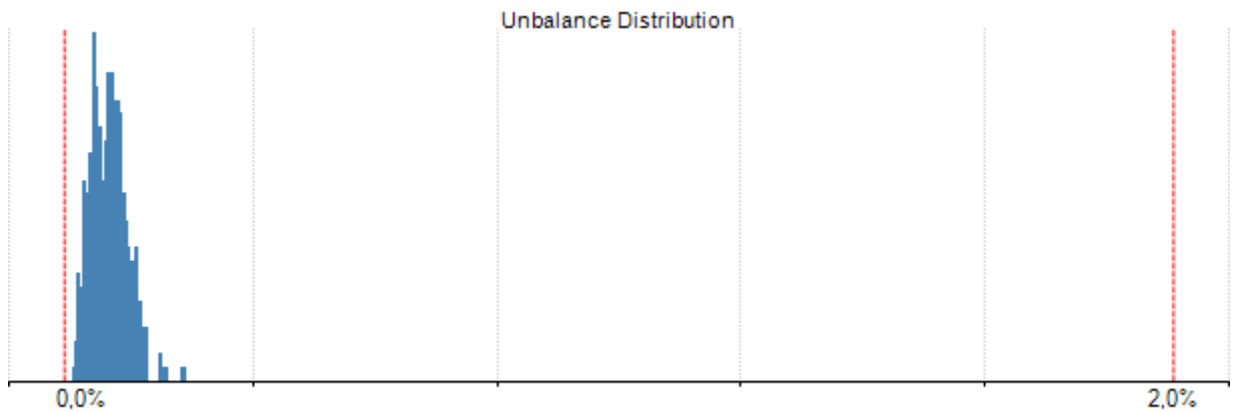
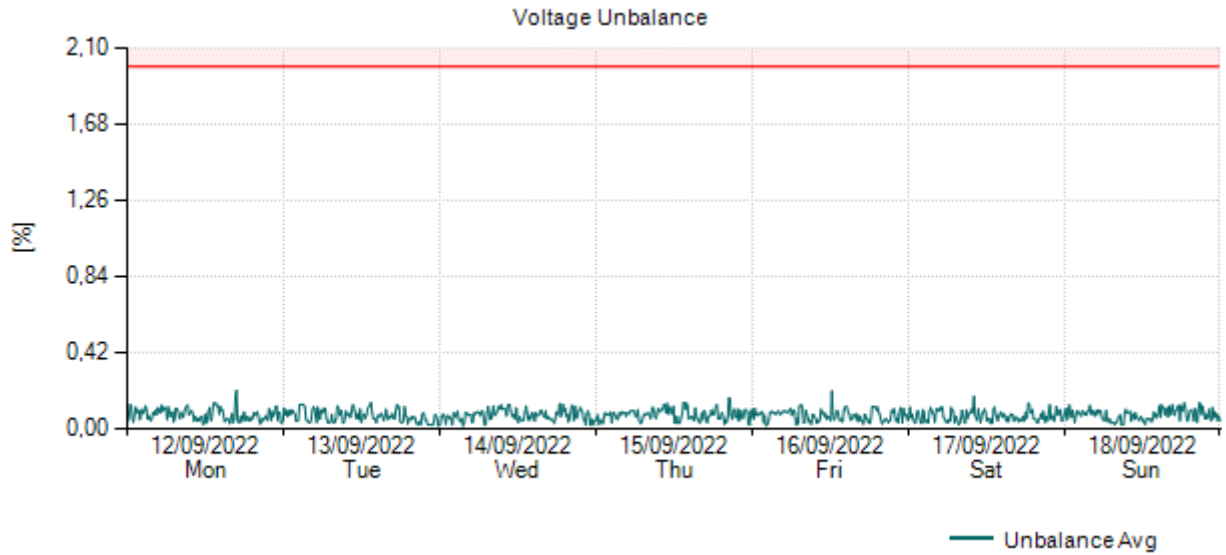
Requirement	Measured L1 Plt	Measured L2 Plt	Measured L3 Plt	Result
95% of week: $Plt \leq 1$	3,79	3,91	3,59	<b>FAIL</b>



### Section 4.2.4: Voltage Unbalance

Parameter definition: 10 minute mean RMS values of the negative sequence ratio u2 (Avg)  
 Limitation: Under normal operating conditions  
 Measured values based on coverage

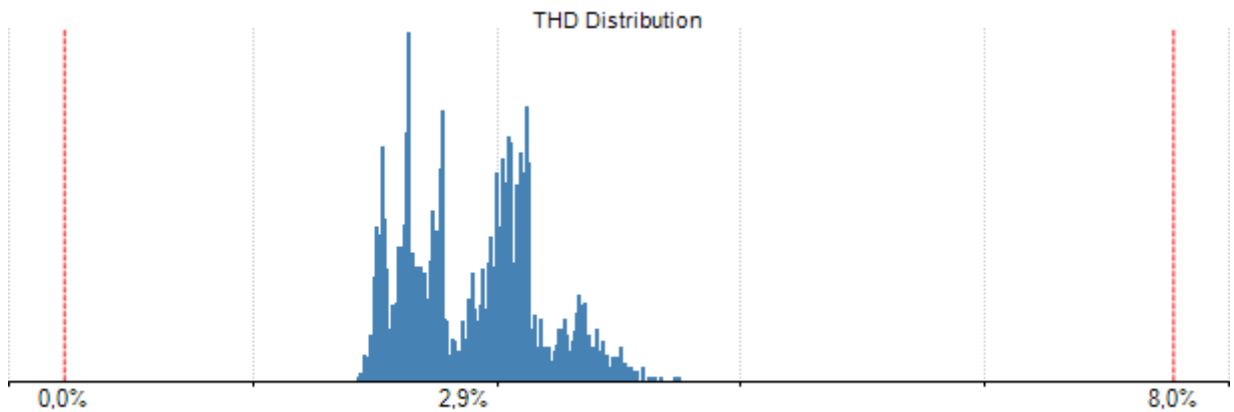
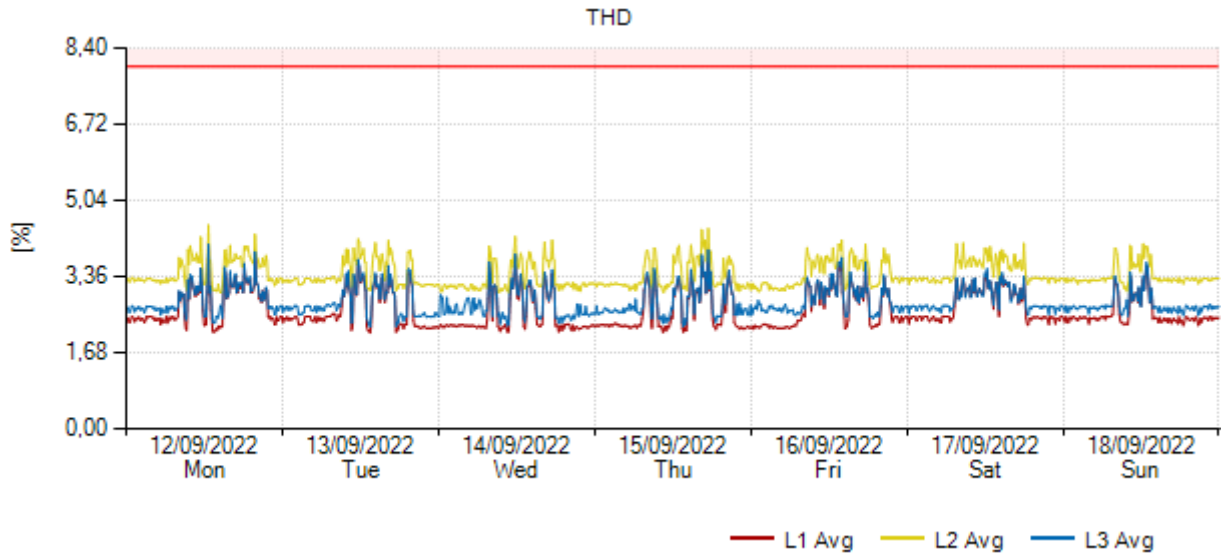
Requirement	Measured Unbalance u2	Result
95% of week: 0% ~ 2%	0,13%	PASS



### Section 4.2.5: Voltage THD

Parameter definition: 10 minute mean RMS value of THD. (Avg)  
 Limitation: Under normal operating conditions  
 Measured values based on coverage

Requirement	Measured L1 THD	Measured L2 THD	Measured L3 THD	Result
95% of week: THD ≤ 8%	3,35%	3,97%	3,42%	PASS



**Section 4.2.5: Voltage Harmonics**

Parameter definition: 10 minute mean RMS values of each individual harmonic voltage.  
 Limitation: Under normal operating conditions  
 Measured values based on coverage

**L1-N Harmonics Table**

Odd Harmonics								Even Harmonics			
Not multiples of 3				Multiples of 3							
Order h	EN5016 0 limit	95% value	Result	Order h	EN5016 0 limit	95% value	Result	Order h	EN5016 0 limit	95% value	Result
H5	6,0%	1,520%	PASS	H3	5,0%	1,265%	PASS	H2	2,0%	0,899%	PASS
H7	5,0%	0,980%	PASS	H9	1,5%	0,621%	PASS	H4	1,0%	0,518%	PASS
H11	3,5%	2,360%	PASS	H15	0,5%	0,199%	PASS	H6	0,5%	0,320%	PASS
H13	3,0%	0,872%	PASS	H21	0,5%	0,036%	PASS	H8	0,5%	0,255%	PASS
H17	2,0%	0,424%	PASS	H27	None	0,019%		H10	0,5%	0,538%	FAIL
H19	1,5%	0,161%	PASS	H33	None	0,012%		H12	0,5%	0,753%	FAIL
H23	1,5%	0,042%	PASS	H39	None	0,010%		H14	0,5%	0,202%	PASS
H25	1,5%	0,043%	PASS					H16	0,5%	0,136%	PASS
H29	None	0,029%						H18	0,5%	0,072%	PASS
H31	None	0,029%						H20	0,5%	0,046%	PASS
H35	None	0,017%						H22	0,5%	0,036%	PASS
H37	None	0,025%						H24	0,5%	0,017%	PASS
								H26	None	0,019%	
								H28	None	0,029%	
								H30	None	0,014%	
								H32	None	0,021%	
								H34	None	0,020%	
								H36	None	0,009%	
								H38	None	0,015%	
								H40	None	0,018%	

**L2-N Harmonics Table**

Odd Harmonics								Even Harmonics			
Not multiples of 3				Multiples of 3							
Order h	EN5016 0 limit	95% value	Result	Order h	EN5016 0 limit	95% value	Result	Order h	EN5016 0 limit	95% value	Result
H5	6,0%	1,668%	PASS	H3	5,0%	1,303%	PASS	H2	2,0%	0,496%	PASS
H7	5,0%	1,583%	PASS	H9	1,5%	1,204%	PASS	H4	1,0%	0,663%	PASS
H11	3,5%	2,262%	PASS	H15	0,5%	0,384%	PASS	H6	0,5%	0,990%	FAIL
H13	3,0%	1,060%	PASS	H21	0,5%	0,061%	PASS	H8	0,5%	1,082%	FAIL
H17	2,0%	0,415%	PASS	H27	None	0,028%		H10	0,5%	1,006%	FAIL
H19	1,5%	0,207%	PASS	H33	None	0,022%		H12	0,5%	1,819%	FAIL
H23	1,5%	0,044%	PASS	H39	None	0,010%		H14	0,5%	0,502%	FAIL
H25	1,5%	0,043%	PASS					H16	0,5%	0,328%	PASS
H29	None	0,032%						H18	0,5%	0,163%	PASS
H31	None	0,031%						H20	0,5%	0,073%	PASS
H35	None	0,018%						H22	0,5%	0,038%	PASS
H37	None	0,028%						H24	0,5%	0,030%	PASS
								H26	None	0,022%	
								H28	None	0,030%	
								H30	None	0,014%	
								H32	None	0,017%	
								H34	None	0,017%	
								H36	None	0,011%	
								H38	None	0,014%	
								H40	None	0,016%	



L3-N Harmonics Table

Odd Harmonics											
Not multiples of 3				Multiples of 3				Even Harmonics			
Order <i>h</i>	EN5016 <i>0 limit</i>	95% value	Result	Order <i>h</i>	EN5016 <i>0 limit</i>	95% value	Result	Order <i>h</i>	EN5016 <i>0 limit</i>	95% value	Result
H5	6,0%	1,511%	PASS	H3	5,0%	1,323%	PASS	H2	2,0%	1,133%	PASS
H7	5,0%	1,071%	PASS	H9	1,5%	0,633%	PASS	H4	1,0%	0,508%	PASS
H11	3,5%	2,272%	PASS	H15	0,5%	0,268%	PASS	H6	0,5%	0,335%	PASS
H13	3,0%	0,961%	PASS	H21	0,5%	0,046%	PASS	H8	0,5%	0,291%	PASS
H17	2,0%	0,422%	PASS	H27	None	0,019%		H10	0,5%	1,165%	FAIL
H19	1,5%	0,138%	PASS	H33	None	0,012%		H12	0,5%	0,774%	FAIL
H23	1,5%	0,047%	PASS	H39	None	0,011%		H14	0,5%	0,192%	PASS
H25	1,5%	0,032%	PASS					H16	0,5%	0,168%	PASS
H29	None	0,030%						H18	0,5%	0,090%	PASS
H31	None	0,033%						H20	0,5%	0,049%	PASS
H35	None	0,017%						H22	0,5%	0,029%	PASS
H37	None	0,029%						H24	0,5%	0,022%	PASS
								H26	None	0,018%	
								H28	None	0,028%	
								H30	None	0,018%	
								H32	None	0,022%	
								H34	None	0,014%	
								H36	None	0,011%	
								H38	None	0,018%	
								H40	None	0,015%	

## Section 4.2.6: Voltage Interharmonics

Parameter definition:	The level of interharmonics is increasing due to the development of frequency converters and similar control equipment.
Limitation:	Levels are under consideration in EN50160, but there are no limits at present. Measured values based on coverage

### L1-N Interharmonics Table

Odd Interharmonics								Even Interharmonics			
Not multiples of 3				Multiples of 3							
Order h	Min value	Average value	Max value	Order h	Min value	Average value	Max value	Order h	Min value	Average value	Max value
IH5	0,023%	0,143%	0,546%	IH3	0,024%	0,157%	0,542%	IH2	0,030%	0,154%	0,557%
IH7	0,029%	0,164%	0,927%	IH9	0,046%	0,184%	0,762%	IH4	0,021%	0,146%	0,742%
IH11	0,069%	0,234%	1,000%	IH15	0,016%	0,069%	0,349%	IH6	0,025%	0,137%	0,498%
IH13	0,031%	0,136%	0,516%	IH21	0,005%	0,018%	0,085%	IH8	0,036%	0,159%	0,681%
IH17	0,010%	0,049%	0,256%					IH10	0,071%	0,251%	1,089%
IH19	0,007%	0,030%	0,105%					IH12	0,057%	0,179%	0,792%
IH23	0,004%	0,012%	0,040%					IH14	0,021%	0,082%	0,371%
IH25	0,004%	0,011%	0,039%					IH16	0,012%	0,060%	0,292%
								IH18	0,009%	0,039%	0,173%
								IH20	0,006%	0,023%	0,082%
								IH22	0,005%	0,015%	0,060%
								IH24	0,004%	0,011%	0,035%

### L2-N Interharmonics Table

Odd Interharmonics								Even Interharmonics			
Not multiples of 3				Multiples of 3							
Order h	Min value	Average value	Max value	Order h	Min value	Average value	Max value	Order h	Min value	Average value	Max value
IH5	0,048%	0,148%	0,549%	IH3	0,041%	0,164%	0,556%	IH2	0,039%	0,163%	0,562%
IH7	0,040%	0,167%	0,908%	IH9	0,055%	0,200%	0,749%	IH4	0,039%	0,146%	0,710%
IH11	0,101%	0,256%	1,019%	IH15	0,034%	0,095%	0,367%	IH6	0,053%	0,156%	0,502%
IH13	0,064%	0,171%	0,566%	IH21	0,006%	0,021%	0,078%	IH8	0,039%	0,166%	0,684%
IH17	0,023%	0,059%	0,270%					IH10	0,098%	0,259%	1,071%
IH19	0,014%	0,035%	0,112%					IH12	0,091%	0,220%	0,809%
IH23	0,005%	0,014%	0,039%					IH14	0,046%	0,118%	0,391%
IH25	0,004%	0,012%	0,039%					IH16	0,027%	0,075%	0,304%
								IH18	0,017%	0,045%	0,174%
								IH20	0,010%	0,027%	0,087%
								IH22	0,006%	0,017%	0,061%
								IH24	0,005%	0,013%	0,036%

### L3-N Interharmonics Table

Odd Interharmonics								Even Interharmonics			
Not multiples of 3				Multiples of 3							
Order h	Min value	Average value	Max value	Order h	Min value	Average value	Max value	Order h	Min value	Average value	Max value
IH5	0,024%	0,134%	0,530%	IH3	0,025%	0,137%	0,540%	IH2	0,021%	0,138%	0,511%
IH7	0,031%	0,162%	0,923%	IH9	0,049%	0,188%	0,740%	IH4	0,024%	0,140%	0,716%
IH11	0,078%	0,254%	1,098%	IH15	0,018%	0,070%	0,354%	IH6	0,025%	0,131%	0,478%
IH13	0,030%	0,139%	0,536%	IH21	0,006%	0,017%	0,068%	IH8	0,034%	0,154%	0,653%
IH17	0,011%	0,049%	0,252%					IH10	0,070%	0,259%	1,093%
IH19	0,007%	0,030%	0,108%					IH12	0,060%	0,191%	0,810%
IH23	0,004%	0,012%	0,043%					IH14	0,022%	0,083%	0,372%
IH25	0,004%	0,011%	0,039%					IH16	0,013%	0,060%	0,299%
								IH18	0,009%	0,039%	0,171%
								IH20	0,006%	0,022%	0,084%
								IH22	0,005%	0,014%	0,057%
								IH24	0,004%	0,011%	0,038%

**Section 4.3.1: Interruptions**

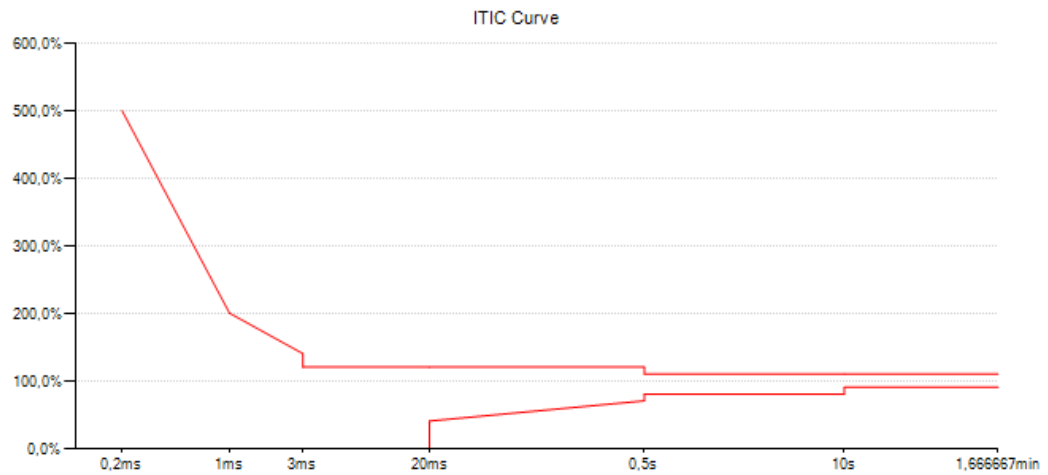
No interruptions during 12/09/2022 – 18/09/2022

**Section 4.3.2: Dips**

No dips during 12/09/2022 – 18/09/2022

**Section 4.3.3: Swells**

No swells during 12/09/2022 – 18/09/2022



**Section 4.3.4: Transient Overvoltages**

No transients during 12/09/2022 – 18/09/2022

**Section 4.3.5: Waveshape Changes**

No waveshape changes during 12/09/2022 – 18/09/2022

**Section 4.3.6: Rapid Voltage Changes**

Parameter definition: According to IEC 61000-4-30 Clause A.5

*The voltage during a rapid voltage change shall not exceed the voltage dip and/or the voltage swell threshold, as it would otherwise be considered as a voltage dip or swell. The characteristic parameter of the rapid voltage change is the difference between the steady state value reached after the change and the initial steady-state value.*

Date	Time	Trigger	Depth	Duration	Threshold
2022/09/12	T 19:59:23.794 BRT	L2-N	6.08%	137.943s	6.0%
2022/09/13	T 14:09:26.234 BRT	L2-N	6.49%	101.928s	6.0%
2022/09/14	T 08:26:12.769 BRT	L2-N	6.28%	2.660s	6.0%
2022/09/14	T 08:26:19.806 BRT	L2-N	6.64%	2.660s	6.0%
2022/09/14	T 08:26:31.310 BRT	L3-N	6.17%	1.601s	6.0%

2022/09/14	T 08:26:34.627 BRT	L2-N	6.54%	2.661s	6.0%
2022/09/14	T 08:26:39.831 BRT	L2-N	6.44%	2.394s	6.0%
2022/09/14	T 08:26:46.653 BRT	L2-N	6.39%	0.568s	6.0%
2022/09/14	T 08:27:00.628 BRT	L2-N	6.37%	2.658s	6.0%
2022/09/14	T 08:27:06.145 BRT	L2-N	6.59%	2.659s	6.0%
2022/09/14	T 08:27:12.680 BRT	L2-N	6.46%	1.101s	6.0%
2022/09/14	T 08:27:18.033 BRT	L2-N	6.40%	0.568s	6.0%
2022/09/14	T 08:27:22.620 BRT	L2-N	6.44%	1.101s	6.0%
2022/09/14	T 08:27:26.122 BRT	L2-N	6.25%	1.869s	6.0%
2022/09/14	T 08:27:30.309 BRT	L2-N	6.44%	1.602s	6.0%
2022/09/14	T 08:27:33.928 BRT	L2-N	6.09%	2.662s	6.0%
2022/09/14	T 08:27:40.719 BRT	L2-N	6.45%	0.301s	6.0%
2022/09/14	T 08:27:55.327 BRT	L2-N	6.45%	2.659s	6.0%
2022/09/14	T 08:28:02.546 BRT	L2-N	6.28%	0.833s	6.0%
2022/09/14	T 08:28:07.446 BRT	L2-N	6.40%	0.834s	6.0%
2022/09/14	T 08:28:16.346 BRT	L2-N	6.70%	2.658s	6.0%
2022/09/14	T 08:28:21.445 BRT	L2-N	6.60%	2.665s	6.0%
2022/09/14	T 08:28:28.160 BRT	L2-N	6.42%	1.100s	6.0%
2022/09/14	T 08:28:32.426 BRT	L2-N	6.42%	0.833s	6.0%
2022/09/14	T 08:28:36.826 BRT	L2-N	6.42%	0.834s	6.0%
2022/09/14	T 12:30:52.947 BRT	L2-N	6.51%	51.936s	6.0%
2022/09/14	T 12:31:49.975 BRT	L2-N	6.58%	2.925s	6.0%
2022/09/14	T 12:32:02.137 BRT	L2-N	6.03%	2.924s	6.0%
2022/09/14	T 12:32:08.235 BRT	L2-N	6.54%	10.205s	6.0%
2022/09/14	T 12:32:27.114 BRT	L2-N	6.56%	2.925s	6.0%
2022/09/14	T 12:32:34.114 BRT	L2-N	6.33%	0.300s	6.0%
2022/09/14	T 12:32:38.213 BRT	L2-N	6.22%	0.300s	6.0%
2022/09/14	T 12:32:42.580 BRT	L2-N	6.21%	0.033s	6.0%
2022/09/14	T 12:32:43.713 BRT	L2-N	6.75%	2.932s	6.0%
2022/09/14	T 13:34:55.715 BRT	L2-N	6.26%	1.367s	6.0%
2022/09/14	T 13:34:58.298 BRT	L2-N	6.45%	1.825s	6.0%
2022/09/14	T 13:35:01.398 BRT	L2-N	6.39%	1.826s	6.0%
2022/09/14	T 13:35:05.482 BRT	L2-N	6.31%	3.519s	6.0%
2022/09/14	T 13:35:13.469 BRT	L2-N	6.50%	1.600s	6.0%
2022/09/14	T 13:35:16.119 BRT	L2-N	6.78%	9.603s	6.0%
2022/09/14	T 13:35:28.789 BRT	L2-N	6.36%	1.593s	6.0%
2022/09/14	T 13:35:32.157 BRT	L2-N	6.30%	1.400s	6.0%
2022/09/14	T 13:35:35.057 BRT	L2-N	6.46%	14.427s	6.0%
2022/09/14	T 13:35:50.542 BRT	L2-N	6.59%	4.467s	6.0%
2022/09/14	T 13:35:56.476 BRT	L2-N	6.25%	1.142s	6.0%
2022/09/14	T 13:36:04.195 BRT	L2-N	6.27%	3.961s	6.0%
2022/09/14	T 13:36:09.198 BRT	L2-N	6.55%	4.353s	6.0%
2022/09/14	T 13:36:15.135 BRT	L2-N	6.08%	1.400s	6.0%
2022/09/14	T 13:36:18.236 BRT	L2-N	6.22%	1.142s	6.0%
2022/09/14	T 13:36:21.036 BRT	L2-N	6.28%	1.401s	6.0%
2022/09/14	T 13:36:24.221 BRT	L2-N	6.45%	1.600s	6.0%
2022/09/14	T 13:36:27.821 BRT	L2-N	6.42%	1.825s	6.0%
2022/09/14	T 13:36:30.921 BRT	L2-N	6.63%	1.600s	6.0%
2022/09/14	T 13:36:34.437 BRT	L2-N	6.54%	3.959s	6.0%
2022/09/14	T 13:36:39.970 BRT	L2-N	6.54%	1.592s	6.0%
2022/09/14	T 13:36:43.137 BRT	L2-N	6.39%	1.141s	6.0%
2022/09/14	T 13:36:46.970 BRT	L2-N	6.30%	0.458s	6.0%
2022/09/14	T 13:36:49.586 BRT	L2-N	6.25%	0.908s	6.0%
2022/09/14	T 13:36:51.919 BRT	L2-N	6.32%	1.824s	6.0%
2022/09/14	T 13:36:55.868 BRT	L2-N	6.46%	1.400s	6.0%
2022/09/14	T 13:36:58.768 BRT	L2-N	6.41%	1.599s	6.0%
2022/09/14	T 13:37:01.667 BRT	L2-N	6.33%	1.400s	6.0%
2022/09/14	T 13:37:05.334 BRT	L2-N	6.21%	0.908s	6.0%
2022/09/14	T 13:37:08.634 BRT	L2-N	6.28%	0.717s	6.0%
2022/09/14	T 13:37:11.834 BRT	L2-N	6.26%	0.908s	6.0%
2022/09/14	T 13:37:17.501 BRT	L2-N	6.58%	1.824s	6.0%
2022/09/14	T 13:37:20.667 BRT	L2-N	6.31%	1.400s	6.0%
2022/09/14	T 13:37:23.300 BRT	L2-N	6.54%	1.825s	6.0%
2022/09/14	T 13:37:26.367 BRT	L2-N	6.16%	1.400s	6.0%

2022/09/14	T 13:37:30.550 BRT	L2-N	6.23%	0.458s	6.0%
2022/09/14	T 13:37:35.582 BRT	L2-N	6.50%	1.824s	6.0%
2022/09/14	T 13:37:39.314 BRT	L2-N	6.02%	1.141s	6.0%
2022/09/14	T 13:37:42.697 BRT	L2-N	6.44%	1.399s	6.0%
2022/09/14	T 13:37:47.546 BRT	L2-N	6.11%	1.367s	6.0%
2022/09/14	T 13:37:51.029 BRT	L2-N	6.47%	1.600s	6.0%
2022/09/14	T 13:37:54.129 BRT	L2-N	6.50%	1.400s	6.0%
2022/09/14	T 13:39:54.747 BRT	L2-N	6.26%	1.176s	6.0%
2022/09/14	T 13:40:02.750 BRT	L2-N	6.32%	1.751s	6.0%
2022/09/14	T 13:40:05.884 BRT	L2-N	6.51%	92.527s	6.0%
2022/09/16	T 08:26:27.640 BRT	L2-N	6.27%	106.104s	6.0%
2022/09/16	T 10:06:00.253 BRT	L2-N	6.66%	2.132s	6.0%
2022/09/16	T 10:06:03.852 BRT	L2-N	6.65%	2.131s	6.0%
2022/09/16	T 10:06:10.231 BRT	L2-N	6.71%	1.899s	6.0%
2022/09/16	T 10:06:26.907 BRT	L2-N	6.47%	0.566s	6.0%
2022/09/16	T 10:06:31.073 BRT	L2-N	6.55%	7.722s	6.0%
2022/09/16	T 10:06:47.053 BRT	L2-N	6.28%	5.991s	6.0%
2022/09/16	T 10:06:54.969 BRT	L2-N	6.35%	1.366s	6.0%
2022/09/16	T 10:06:57.935 BRT	L2-N	6.09%	2.124s	6.0%
2022/09/16	T 10:07:08.913 BRT	L2-N	6.56%	2.132s	6.0%
2022/09/16	T 10:07:13.194 BRT	L2-N	6.56%	3.883s	6.0%
2022/09/16	T 10:07:18.211 BRT	L2-N	6.71%	2.133s	6.0%
2022/09/16	T 10:07:21.394 BRT	L2-N	6.59%	7.741s	6.0%
2022/09/16	T 10:07:32.160 BRT	L2-N	6.40%	0.833s	6.0%
2022/09/16	T 10:07:47.313 BRT	L1-N	6.02%	0.000s	6.0%
2022/09/16	T 10:07:48.513 BRT	L2-N	6.65%	2.133s	6.0%
2022/09/16	T 10:07:51.896 BRT	L2-N	6.03%	2.124s	6.0%
2022/09/16	T 10:08:09.091 BRT	L2-N	6.66%	2.133s	6.0%
2022/09/16	T 10:40:52.324 BRT	L2-N	6.33%	0.835s	6.0%
2022/09/16	T 10:41:04.343 BRT	L3-N	6.36%	3.199s	6.0%
2022/09/16	T 10:41:14.676 BRT	L2-N	6.58%	1.101s	6.0%
2022/09/16	T 10:41:21.113 BRT	L2-N	6.65%	1.868s	6.0%
2022/09/16	T 10:41:28.049 BRT	L2-N	6.41%	2.927s	6.0%
2022/09/16	T 10:41:37.988 BRT	L2-N	6.32%	2.393s	6.0%
2022/09/16	T 10:41:47.959 BRT	L2-N	6.45%	1.602s	6.0%
2022/09/16	T 10:41:57.163 BRT	L2-N	6.46%	0.567s	6.0%
2022/09/16	T 10:42:02.265 BRT	L2-N	6.30%	1.601s	6.0%
2022/09/16	T 10:42:06.367 BRT	L2-N	6.32%	2.135s	6.0%
2022/09/16	T 10:42:11.154 BRT	L2-N	6.45%	1.868s	6.0%
2022/09/16	T 10:42:20.426 BRT	L2-N	6.61%	1.334s	6.0%
2022/09/16	T 10:42:29.379 BRT	L2-N	6.32%	1.869s	6.0%
2022/09/16	T 10:42:32.464 BRT	L2-N	6.49%	3.194s	6.0%
2022/09/16	T 10:42:39.551 BRT	L2-N	6.44%	1.068s	6.0%
2022/09/16	T 10:42:45.904 BRT	L2-N	6.59%	3.459s	6.0%
2022/09/16	T 10:42:53.189 BRT	L2-N	6.40%	2.926s	6.0%
2022/09/16	T 10:42:59.424 BRT	L2-N	6.54%	3.192s	6.0%
2022/09/16	T 10:43:07.675 BRT	L3-N	6.35%	2.934s	6.0%
2022/09/16	T 10:43:14.526 BRT	L2-N	6.73%	3.194s	6.0%
2022/09/16	T 10:43:19.295 BRT	L3-N	6.59%	2.668s	6.0%
2022/09/16	T 10:43:26.948 BRT	L2-N	6.55%	7.411s	6.0%
2022/09/16	T 10:43:40.585 BRT	L2-N	6.65%	3.193s	6.0%
2022/09/16	T 10:43:49.956 BRT	L2-N	6.30%	4.335s	6.0%
2022/09/16	T 10:44:03.344 BRT	L2-N	6.33%	1.335s	6.0%
2022/09/17	T 08:23:33.584 BRT	L2-N	6.40%	96.228s	6.0%
2022/09/17	T 09:18:20.546 BRT	L2-N	6.36%	1.869s	6.0%
2022/09/17	T 09:18:23.565 BRT	L2-N	6.54%	2.093s	6.0%
2022/09/17	T 09:18:26.684 BRT	L2-N	6.56%	1.867s	6.0%
2022/09/17	T 09:18:31.252 BRT	L2-N	6.12%	1.050s	6.0%
2022/09/17	T 09:18:34.285 BRT	L2-N	6.31%	1.867s	6.0%
2022/09/17	T 09:18:38.685 BRT	L2-N	6.30%	1.866s	6.0%
2022/09/17	T 09:18:42.385 BRT	L2-N	6.40%	1.574s	6.0%
2022/09/17	T 09:18:46.651 BRT	L2-N	6.16%	1.049s	6.0%
2022/09/17	T 09:18:49.384 BRT	L2-N	6.41%	2.101s	6.0%
2022/09/17	T 09:18:53.102 BRT	L2-N	6.51%	2.101s	6.0%

2022/09/17	T 09:18:57.269 BRT	L2-N	6.28%	1.309s	6.0%
2022/09/17	T 09:19:00.887 BRT	L2-N	6.41%	1.574s	6.0%
2022/09/17	T 09:19:04.586 BRT	L2-N	6.39%	1.867s	6.0%
2022/09/17	T 09:19:09.636 BRT	L2-N	6.36%	0.525s	6.0%
2022/09/17	T 09:19:12.269 BRT	L2-N	6.32%	1.308s	6.0%
2022/09/17	T 09:19:16.169 BRT	L2-N	6.28%	1.308s	6.0%
2022/09/17	T 09:19:19.385 BRT	L2-N	6.42%	1.867s	6.0%
2022/09/17	T 09:19:22.485 BRT	L2-N	6.47%	2.091s	6.0%
2022/09/17	T 09:19:26.451 BRT	L2-N	6.20%	1.050s	6.0%
2022/09/17	T 09:19:29.185 BRT	L2-N	6.36%	1.576s	6.0%
2022/09/17	T 09:19:32.986 BRT	L2-N	6.45%	1.576s	6.0%
2022/09/17	T 09:19:36.771 BRT	L2-N	6.32%	1.309s	6.0%
2022/09/17	T 09:19:39.622 BRT	L2-N	6.44%	1.868s	6.0%
2022/09/17	T 09:19:44.007 BRT	L2-N	6.41%	1.601s	6.0%
2022/09/17	T 09:19:47.909 BRT	L2-N	6.25%	1.568s	6.0%
2022/09/17	T 09:19:51.027 BRT	L2-N	6.36%	1.868s	6.0%
2022/09/17	T 09:19:53.945 BRT	L2-N	6.59%	1.868s	6.0%
2022/09/17	T 09:19:57.930 BRT	L2-N	6.16%	1.308s	6.0%
2022/09/17	T 09:20:00.663 BRT	L2-N	6.45%	2.101s	6.0%
2022/09/17	T 09:20:05.130 BRT	L2-N	6.32%	1.309s	6.0%
2022/09/17	T 09:20:08.047 BRT	L2-N	6.41%	1.567s	6.0%
2022/09/17	T 09:20:11.681 BRT	L2-N	6.27%	1.868s	6.0%
2022/09/17	T 09:20:15.783 BRT	L2-N	6.61%	2.101s	6.0%
2022/09/17	T 09:20:20.167 BRT	L2-N	6.30%	1.868s	6.0%
2022/09/17	T 09:20:25.268 BRT	L2-N	6.30%	1.308s	6.0%
2022/09/17	T 09:20:28.685 BRT	L2-N	6.65%	1.866s	6.0%
2022/09/17	T 09:20:32.301 BRT	L2-N	6.60%	2.133s	6.0%
2022/09/17	T 09:20:36.167 BRT	L2-N	6.46%	1.867s	6.0%
2022/09/17	T 09:20:40.150 BRT	L2-N	6.35%	1.051s	6.0%
2022/09/17	T 09:20:42.884 BRT	L2-N	6.47%	1.867s	6.0%
2022/09/17	T 13:39:49.128 BRT	L2-N	6.63%	96.256s	6.0%

**Conclusions**  
**EN50160**  
**12/09/2022 – 18/09/2022**

**EN50160 Pass-Fail Requirements Table**

EN50160 Section	Power Quality Parameter	EN50160 Compliance	Remarks
4.2.1	Power Frequency	<b>PASS</b>	
4.2.2	Supply Voltage Variations	<b>PASS</b>	
4.2.3	Flicker Severity	<b>FAIL</b>	Exceeds Limits
4.2.4	Voltage Unbalance	<b>PASS</b>	
4.2.5	Voltage THD	<b>PASS</b>	
4.2.5	Voltage Harmonics	<b>FAIL</b>	Harmonics exceed limits (L1, L2, L3)

**EN50160 Additional Information Table**

EN50160 Section	Power Quality Parameter	Remarks
4.2.6	Voltage Interharmonics	
4.3.1	Interruptions	
4.3.2	Dips	
4.3.3	Swells	
4.3.6	Rapid Voltage Changes	
4.3.4	Transient Overvoltages	
4.3.5	Waveshape Changes	

- Note 1: During 12/09/2022 – 18/09/2022 measurements were made 100,00% of the time  
Note 2: Low Voltage Systems (< 1 kV) limits were used.  
Note 3: Flagged data was excluded from this report.

Instrument used: [PQube 3® \(www.powerside.com\)](http://www.powerside.com)  
Manufacturer: Powerside  
PQube ID: 450W – 1,5T  
Location:  
Serial number: P3003495  
Firmware revision: 3.7.3.19.04.25  
Report Software: PQube Report Writer 3.9.13.6  
Author of Report: Powerside.  
Name: John Smith

**Customer Information**

Name: George Sample  
Company: Sample Customer  
Address 1: 123 Sample Drive  
Address 2: Alameda, California 94501 USA  
Address 3:  
Phone:  
Website: <http://www.Sample.com>

**Equipment Settings (Event thresholds)**

Dips Setup.ini not available  
Swells Setup.ini not available  
Interruptions Setup.ini not available  
RVC Setup.ini not available  
Transients Setup.ini not available