

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS JOINVILLE
CURSO ENGENHARIA ELÉTRICA

Luan Carlos Dalmazo Fernandes

ESTUDO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA NO CONSUMO DE UM
SISTEMA DE COMPRESSOR ROTATIVO DE PARAFUSO

Joinville
2025

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS JOINVILLE
CURSO ENGENHARIA ELÉTRICA

Luan Carlos Dalmazo Fernandes

ESTUDO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA NO CONSUMO DE UM
SISTEMA DE COMPRESSOR ROTATIVO DE PARAFUSO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Santa
Catarina (IFSC) como requisito parcial
para a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Luis Mariano Nodari,
M.Eng.

Joinville
2025

Fernandes, Luan Carlos Dalmazo.

Estudo da qualidade da energia elétrica no consumo de um sistema de compressor rotativo de parafuso. – Joinville, SC, 2025.
113 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Joinville, 2025.

Orientador: Luís Mariano Nodari.

1. Compressor rotativo de parafuso. 2. Qualidade de energia elétrica. 3. Distorções harmônicas. I. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. II. Título.

Luan Carlos Dalmazo Fernandes

**ESTUDO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA NO CONSUMO DE UM
SISTEMA DE COMPRESSOR ROTATIVO DE PARAFUSO**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em engenharia elétrica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Joinville, 10 de dezembro de 2025.



Prof. Luís Mariano Nodari, M. Eng.

Orientador

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina



Prof. Ary Victorino da Silva Filho, M. Eng.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina



Prof. Janderson Duarte, Dr. Eng.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder a oportunidade de chegar até aqui.

Agradeço à minha mãe, Solange, pelo incentivo e pelos sacrifícios realizados para que eu pudesse ter a oportunidade de estudar.

Agradeço ao meu pai, José, pelas orações feitas para que eu pudesse continuar a caminhada firme e forte.

Agradeço aos amigos que fiz durante essa jornada pelo companheirismo, apoio e momentos de descontração.

Agradeço ao eletricista Evandro, que me auxiliou durante as medições realizadas para a execução deste trabalho.

Agradeço ao professor e orientador Luís Mariano Nodari pela orientação e pelas correções ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma fundamentação teórica que contextualiza inicialmente os principais conceitos relacionados aos compressores rotativos de parafuso e, em seguida, apresenta os conceitos pertinentes à qualidade da energia elétrica. Além disso, são abordadas as normas técnicas a respeito dos índices de qualidade da energia elétrica. Na etapa seguinte, foram realizadas medições com o auxílio de um analisador de energia, tendo como objetivo avaliar a qualidade da energia elétrica em um compressor rotativo de parafuso e, assim, identificar e quantificar possíveis não conformidades associadas às distorções harmônicas. Os dados obtidos foram organizados em gráficos e tabelas, possibilitando a análise e interpretação dos resultados. A análise dos dados permitiu caracterizar o comportamento das distorções harmônicas de tensão e de corrente presentes no sistema. Para reduzir essas distorções, foram projetadas duas soluções passivas: filtros sintonizados e um filtro passa-baixa LC. Ambos foram implementados por meio de simulações, permitindo avaliar o desempenho de cada solução e discutir suas principais vantagens e limitações quanto à mitigação do conteúdo harmônico e à manutenção do fator de potência.

Palavras-chave: Compressor Rotativo de Parafuso. Qualidade de energia elétrica. Distorções harmônicas. Filtros Passivos.

ABSTRACT

This work presents a theoretical foundation that initially contextualizes the main concepts related to rotary screw compressors and then introduces the concepts related to electric power quality. In addition, the technical standards regarding power quality indices are addressed. In the following stage, measurements were carried out using a power analyzer in order to evaluate the electrical power quality of a rotary screw compressor and, consequently, identify and quantify possible nonconformities associated with harmonic distortions. The data obtained were organized into graphs and tables, allowing for detailed analysis and interpretation of the results. The data analysis enabled the characterization of the behavior of voltage and current harmonic distortions present in the system. To reduce these distortions, two passive solutions were designed: tuned filters and an LC low-pass filter. Both solutions were implemented through simulations, making it possible to evaluate their performance and discuss their main advantages and limitations regarding harmonic mitigation and the maintenance of power factor.

Keywords: Rotary Screw Compressor. Electric Power Quality. Harmonic Distortions. Passive Filters.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipos de Compressores.	12
Figura 2 - Etapas de compressão de um compressor de parafuso duplo.	13
Figura 3 - Compressor de Parafuso Lubrificado a Óleo com Acionamento Integrado.	14
Figura 4 - Um sistema com compressor controlado por velocidade.....	14
Figura 5: Conversores de frequência.	15
Figura 6: circuito de um inversor de frequência com as formas de onda em cada módulo.	16
Figura 7: Sinal de Saída do Gerador de PWM do Inversor de Frequência.	16
Figura 8: Acionamento dos IGBTs no circuito do inversor.	17
Figura 9: Formas de Onda de Tensão e Corrente na Saída do Inversor de Frequência.	17
Figura 10 - Custos estimado das perdas financeiras para parada de até um minuto no fornecimento da energia elétrica.	19
Figura 11: Fundamental com harmônicas e forma de onda resultante.....	24
Figura 12: Exemplos de formas de onda de correntes distorcidas em cargas eletrônicas.	25
Figura 13: Corrente de Entrada de um Inversor de Frequência com Retificador de Seis Pulsos.....	27
Figura 14: Espectro Harmônico da Corrente de Entrada de um Inversor de Frequência com Retificador de Seis Pulsos.....	28
Figura 15: Resposta de filtro ideal (a) passa-alta; (b) passa-baixa; (c) passa-faixa; (d) rejeita faixa.	35
Figura 16: Filtro Passivo de Sintonia Simples.	37
Figura 17: Conversor de Frequência Trifásico com Filtro de 2ª Ordem na Entrada. .	39
Figura 18 - Compressor rotativo de parafuso.....	42
Figura 19 - Dados da placa do compressor.....	43
Figura 20 - Dados da placa do inversor de frequência.	44
Figura 21- Analisador de energia elétrica RE7080	44
Figura 22- Sensor de corrente flexível TI3000	45
Figura 23 - Cabos para medição de tensão	45

Figura 24: Instalação do analisador de energia elétrica	46
Figura 25- Conexão do analisador de energia no ponto de conexão comum	46
Figura 26 - Esquema de ligação trifásica a cinco fios.	47
Figura 27 - Esquema de alimentação elétrica do compressor.....	48
Figura 28: Simulação do Inversor de Frequência.....	51
Figura 29: Simulação do Inversor de Frequência: Modulação por Largura de Pulsos.	52
Figura 30: Níveis da Medição de Tensão entre Fase e Neutro.....	53
Figura 31 - Níveis da Medição de Corrente.....	54
Figura 32: Medição da Potência Ativa e Aparente.....	55
Figura 33: Medição do Fator de Potência	56
Figura 34 - Distorções Harmônicas Totais da Medição de Tensão.	57
Figura 35: Espectro Harmônico da Medição de Tensão - Valores Máximos.....	58
Figura 36 - Distorções Harmônicas Totais da Medição de Corrente.	60
Figura 37- Espectro de Frequência da Medição de Corrente – Valores Máximos.....	61
Figura 38: Simulação do Inversor de Frequência: Forma de Onda da Tensão e Corrente da Fonte.	63
Figura 39: Comparação entre a Simulação e a Medição do Espectro Harmônico de Corrente da Fonte.	64
Figura 40: Simulação do Inversor de Frequência com Filtro de Sintonia.	66
Figura 41: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro para atenuação da 5ª ordem harmônica.....	67
Figura 42: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro para atenuação da 5ª e 7ª ordem harmônica.....	68
Figura 43: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro para atenuação da 5ª, 7ª e 11ª ordem harmônica.	69
Figura 44: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro para atenuação da 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordem harmônica.	70

Figura 45: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro para atenuação da 5ª, 7ª, 11ª, 13ª e 17ª ordem harmônica.	71
Figura 46: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro para atenuação da 5ª, 7ª, 11ª, 13ª, 17ª e 19ª ordem harmônica.....	72
Figura 47: Simulação com Filtro Sintonizado: Forma de Onda da Tensão e Corrente da Fonte.	73
Figura 48: Filtro para Atenuação da 5ª, 7ª, 9ª, 11ª, 13ª, 17ª e 19ª Ordem Harmônica.	74
Figura 49: Frequência de Ressonância do Filtro Sintonizado.	75
Figura 50: Simulação do Inversor de Frequência com Filtro Passa-Baixa LC.	77
Figura 51: Simulação com Passa-Baixa LC: Forma de Onda da Tensão e Corrente da Fonte.	78
Figura 52: Espectro Harmônico de Corrente da Fonte com Filtro Passa-Baixa LC de Entrada.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais causas dos fenômenos eletromagnéticos	21
Tabela 2 - Categorias e características típicas dos fenômenos eletromagnéticos do sistema de energia	22
Tabela 3: Ordem, frequência e sequência dos harmônicos em sistema elétrico trifásico equilibrado.	26
Tabela 4 - Comparação dos Limites dos Níveis de Tensão Estabelecido por Normas	53
Tabela 5 - Comparação da DHTv com as Norma Correspondentes.	57
Tabela 6: Comparação da DHLv Medida com o Módulo 8 do Prodist e a IEEE 519.	59
Tabela 7 – Comparação das DHTi medidas com a Norma IEEE 519.....	61
Tabela 8: Comparação entre as Harmônicas Individuais de Corrente Medidas e os Limites Estabelecidos pelas Normas IEEE 519 e IEC 61000-3-4.	62
Tabela 9: Comparação da Simulação e Medição do DHTi e Fator de Potência.	65
Tabela 10: Dimensionamento dos Elementos Passivos dos Filtros de Sintonia.....	66
Tabela 11: Comparação de DHTi, FP e Corrente Eficaz com Filtro de Sintonia e sem Correção das Distorções Harmônicas.....	73
Tabela 12: Comparação de DHTi, FP e Corrente Eficaz com Filtro Passa-Baixa LC e sem Correção das Distorções Harmônicas.	78
Tabela 13: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro passa-baixa LC de entrada.	78
Tabela 14: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, sem a utilização de filtros.....	94
Tabela 15: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro para atenuação da 5ª ordem harmônica.....	95
Tabela 16: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro para atenuação da 5ª e 7ª ordem harmônica.....	95
Tabela 17: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro para atenuação da 5ª, 7ª e 11ª ordem harmônica.	96

Tabela 18: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro para atenuação da 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordem harmônica.	97
Tabela 19: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro para atenuação da 5ª, 7ª, 11ª, 13ª e 17ª ordem harmônica.	97
Tabela 20: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro para atenuação da 5ª, 7ª, 11ª, 13ª, 17ª e 19ª ordem harmônica.....	98

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	7
1.1	TEMA.....	Erro! Marcador não definido.
1.2	OBJETIVOS	9
1.2.1	Objetivo Geral.....	9
1.2.2	Objetivo Específico	9
1.3	JUSTIFICATIVA	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
2.1	COMPRESSOR DE AR.....	11
2.1.1	Compressor de Parafuso.....	12
2.1.2	Sistema de Controle de Velocidade Variável	14
2.2	QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	18
2.2.1	Distúrbios Elétricos	20
2.2.2	Distorções Harmônicas	23
2.2.2.1	Definição	23
2.2.2.2	Ordem, Frequência e Sequência das Harmônicas	25
2.2.2.3	Espectro Harmônico	27
2.2.2.4	Distorção Harmônica Total (DHT)	28
2.2.2.5	Distorção Harmônica Individual (DHI)	29
2.2.3	Fator de Potência.....	30
2.2.4	Normatização.....	31
2.2.4.1	Módulo 8 do PRODIST	31
2.2.4.2	Recomendação da IEEE – 519 (1992);	33
2.2.4.3	IEC 61000 - Compatibilidade Eletromagnética	33
2.2.4.4	IEC 61000-3-4 - Limites para emissão de harmônicas de corrente (≥ 16 A).34	
2.2.4.5	EN 50160.....	34
2.3	Filtros para Atenuação de Harmônicas.....	34
2.3.1	Filtro Passivo	36
2.3.1.1	Filtro de Sintonia.....	36
2.3.1.2	Filtro Passa Baixa LC.....	38

3	METODOLOGIA	42
3.1	Característica do Compressor em Estudo.....	42
3.2	Procedimentos de Medição	44
3.3	Cálculo do Curto-Circuito no Ponto de Conexão Comum	47
3.4	Simulação do Inversor de Frequência	49
4	PROJETO, RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1	Resultados das Medições	52
4.1.1	Níveis de Tensão	52
4.1.2	Níveis de Corrente	54
4.1.3	Potência e Fator de Potência	55
4.1.4	Distorções Harmônicas de Tensão	56
4.1.4.1	Distorções Harmônicas Totais de Tensão (DHTt)	56
4.1.4.2	Espectro de Frequência de Tensão	58
4.1.5	Distorções Harmônicas de Corrente	59
4.1.5.1	Distorções Harmônicas Totais de Corrente (DHTi)	59
4.1.5.2	Espectro de Frequência de Corrente	61
4.2	Resultados da Simulação do Inversor de Frequência	63
4.3	Projeto do Filtro Sintonizado	65
4.4	Resultados com a Aplicação do Filtro Sintonizado	66
4.4.1	Análise do Filtro Sintonizado no Domínio da Frequência.....	74
4.5	Projeto do Filtro Passa-Baixa LC.....	75
4.6	Resultados com a Aplicação do Filtro Passa-Baixa LC.....	77
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	80

1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica constitui um bem essencial para a sociedade, cuja relevância vem crescendo no decorrer das últimas décadas de maneira acelerada, em virtude de seu papel fundamental como insumo básico para residências, estabelecimentos comerciais, prestação de serviços e processos de produção industrial.

Diante da relevância da energia elétrica para a sociedade, órgãos reguladores e institutos competentes estabeleceram padrões de qualidade que devem ser seguidos pelas geradoras, transmissoras, distribuidoras e consumidores. Esses padrões têm como objetivo assegurar o funcionamento adequado do sistema elétrico e dos equipamentos conectados a ele, prevenindo falhas que possam comprometer a operação dos sistemas de transmissão e distribuição.

A reformulação do setor elétrico brasileiro fez com que surgisse a preocupação com a qualidade da energia, e viabilizar a implantação de um mercado consumidor do produto que é a própria energia elétrica. É de responsabilidade das empresas de geração e distribuição fornecer energia elétrica aos consumidores dentro dos padrões estabelecidos pelas normas e com o menor custo possível. É nesse contexto que as operadoras de sistemas elétricos são estimuladas pelas agências reguladoras, no caso do Brasil a ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. O próprio mercado também força as operadoras a prestarem informações sobre as condições de operação e fornecimento de energia segundo alguns eventos ocorridos e que afetam os consumidores. O monitoramento e análise da energia exercem o papel de fornecer tais informações. (ANEEL, 2015).

Quando ocorre falhas e interrupções no processo industrial devido à má qualidade da energia elétrica, as indústrias geralmente exigem das concessionárias um aprimoramento na prestação de serviços, para que o produto energia elétrica seja entregue em conformidade com os parâmetros legais estabelecidos.

No entanto, nem sempre a concessionária é a responsável pela má qualidade da energia. Em muitos casos, as cargas consumidoras de energia elétrica conectadas às redes de distribuição das concessionárias também contribuem para a degradação da qualidade da energia elétrica, especialmente diante do crescimento do uso de cargas não lineares cada vez mais presentes no cotidiano.

Segundo Dugan *et al.* (2002), a utilização de cargas não lineares pode aumentar a eficiência e reduzir o consumo de energia elétrica, no entanto, aumenta o potencial de distorção harmônica, o que pode gerar o efeito de ressonância harmônica no sistema elétrico. Isso pode fazer com que o sistema oscile, agravando problemas existentes ou gerando outros distúrbios na rede de distribuição e transmissão.

Além disso, as harmônicas contribuem para o aumento da circulação de corrente eficaz no sistema, em função da redução do fator de potência, associada ao maior consumo de energia reativa. Como consequência, ocorre o aumento das perdas elétricas, principalmente por efeito Joule, além do aquecimento excessivo de transformadores e condutores.

Segundo Ribeiro (2015), no passado não havia uma preocupação significativa com os problemas relacionados à má qualidade da energia, uma vez que os equipamentos eram mais robustos e menos sensíveis às falhas no fornecimento. No entanto, com o avanço tecnológico, especialmente no ramo da eletrônica de potência, tanto as concessionárias quanto os consumidores tornaram-se mais atentos à qualidade da energia. Essa preocupação é justificada por diversos fatores, como: a sensibilidade dos equipamentos modernos, que utilizam microprocessadores e dispositivos eletrônicos suscetíveis a distúrbios na rede de distribuição; o crescente interesse pelo racionamento e pela conservação da energia, que levou à adoção de práticas que, por sua vez, aumentam as distorções harmônicas e as condições de ressonância; e, por fim, o fato de que qualquer falha pode gerar consequências significativas, uma vez que o sistema elétrico funciona de forma integrada.

A proposta deste trabalho visa um estudo da qualidade de energia elétrica, com foco em encontrar possíveis distúrbios elétricos causados pelo sistema de acionamento de um compressor rotativo de parafuso. Para a análise da qualidade de energia elétrica, será adotado como objeto de estudo um compressor de parafuso de 200 CV, controlado por inversor de frequência. Com base nos resultados obtidos, será desenvolvido e simulado um projeto de filtro passivo para atenuação do conteúdo harmônico de corrente, com o intuito de mitigar os efeitos observados e avaliar sua eficácia diante aos limites estabelecidos por normas técnicas de qualidade de energia.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Identificar, quantificar e propor solução aos distúrbios elétricos gerados pelo acionamento de um sistema de compressor de parafuso rotativo, analisando sua conformidade com as normas relativas a qualidade de energia elétrica.

1.1.2 Objetivo Específico

Após uma breve explanação do tema, com o intuito de estabelecer o embasamento teórico, este documento estrutura-se para atingir os seguintes objetivos:

- Realizar um estudo do funcionamento do sistema de compressores rotativos de parafuso;
- Desenvolver um modelo elétrico simplificado da alimentação do compressor rotativo de parafuso estudado;
- Realizar um estudo do referencial teórico relativo à qualidade de energia elétrica e às normas vigentes, como o Módulo 8 do PRODIST, a EN 50160, a IEC 61000 e a IEEE 519;
- Efetuar medições, por meio de um analisador de energia elétrica, na alimentação de entrada do compressor;
- Gerar gráficos e tabelas das grandezas registradas para melhor visualização e análise dos dados;
- Comparar, através de tabelas, as grandezas medidas com os limites normativos para verificar a conformidade com as normas;
- Projetar e simular filtro passivo para atenuar as componentes harmônicas;
- Avaliar a eficácia do filtro diante aos limites estabelecidos por normas técnicas de qualidade de energia.

1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo Ferreira (2010), a crescente utilização de cargas de natureza não linear (como sistemas microprocessados, fontes chaveadas, inversores de frequência, entre outros) em instalações industriais provoca um aumento significativo na ocorrência de distúrbios em sistemas de potência. Tais distúrbios de qualidade de energia se manifestam como deformações nas formas de onda de tensão e corrente, o que acarreta o aumento do número de falhas e, conseqüentemente, a redução da vida útil dos equipamentos conectados às redes elétricas. Além disso, essas deformações afetam significativamente as indústrias, por meio da interrupção de processos produtivos e da lentidão nas redes de computadores, gerando perdas financeiras relevantes. Também causam perdas significativas de eficiência do sistema elétrico, devido ao aumento das perdas térmicas e às exigências adicionais de dimensionamento em cabos e transformadores.

Diante do exposto, é evidente a relevância da qualidade da energia elétrica no contexto industrial. Quando os distúrbios têm origem interna, cabe à própria indústria identificar, avaliar e corrigir esses problemas. Esse processo envolve a realização de medições, a verificação do atendimento aos limites estabelecidos por normas técnicas e, quando necessário, a adoção de dispositivos de correção, como filtros de harmônicas, visando mitigar os efeitos adversos e garantir a confiabilidade e a eficiência do sistema elétrico.

Adicionalmente, a proposta nesse trabalho verifica os problemas relacionados à qualidade de energia causados por um compressor rotativo de parafuso, além de ser fundamental para a correção específica desse equipamento, pode servir como referência para o estudo da qualidade de energia em outros compressores da casa de máquinas ou em equipamentos de características semelhantes.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 COMPRESSOR DE AR

Compressores são máquinas destinadas a elevar a pressão de certo volume de ar, admitido nas condições atmosféricas, até uma determinada pressão, exigidas na execução dos trabalhos a serem realizados pelo ar comprimido (PARKER, 2007).

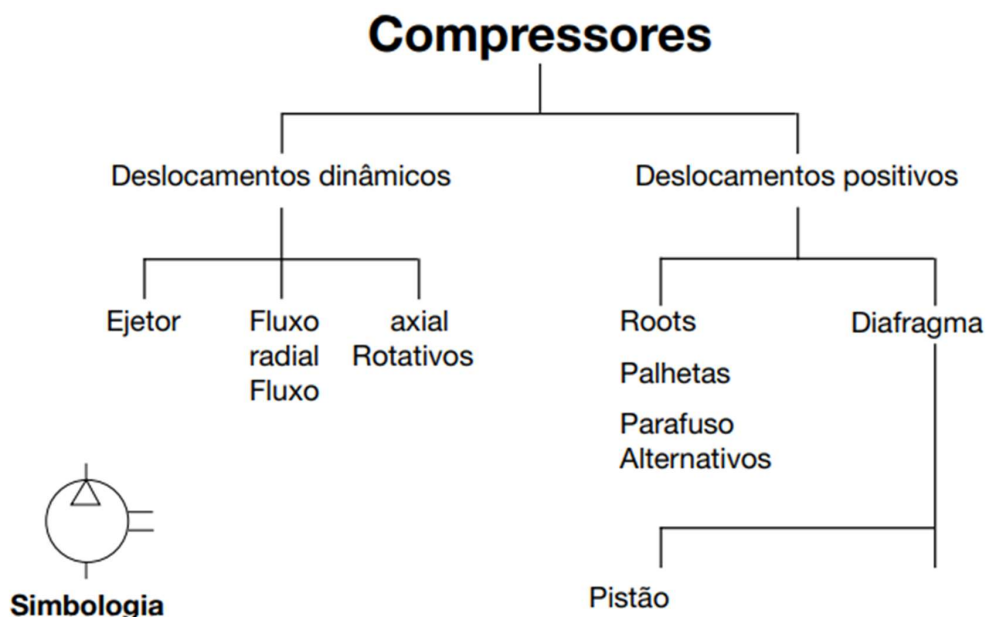
Existem duas classificações fundamentais para o princípios de trabalho para a compressão de ar ou gás: compressão por deslocamento positivo e por deslocamento dinâmico.

Segundo Parker (2007), no princípio de deslocamento positivo, o ar é admitido em uma câmara isolada do ambiente externo, onde sofre compressão através da redução de seu volume. Ao atingir a pressão predeterminada, ocorre a abertura das válvulas de descarga, ou alternativamente o ar comprimido é direcionado para o tubo de descarga durante a diminuição volumétrica da câmara de compressão. Ou seja, o deslocamento positivo é baseado na redução de volume.

Nos compressores de deslocamento dinâmico, a pressão é aumentada através da transformação da energia cinética em energia de pressão, durante a passagem do ar através do compressor. O ar admitido entra em contato com impulsores (rotor laminado) dotados de alta velocidade. O ar é acelerado, atingindo velocidade elevadas e consequentemente os impulsores transmitem energia cinética ao ar. Posteriormente, o fluxo de ar em alta velocidade é desacelerado nos difusores, convertendo a energia cinética em pressão.

A Figura 1 apresenta alguns dos principais tipos de compressores:

Figura 1 – Tipos de Compressores.



Fonte: Parker (2006).

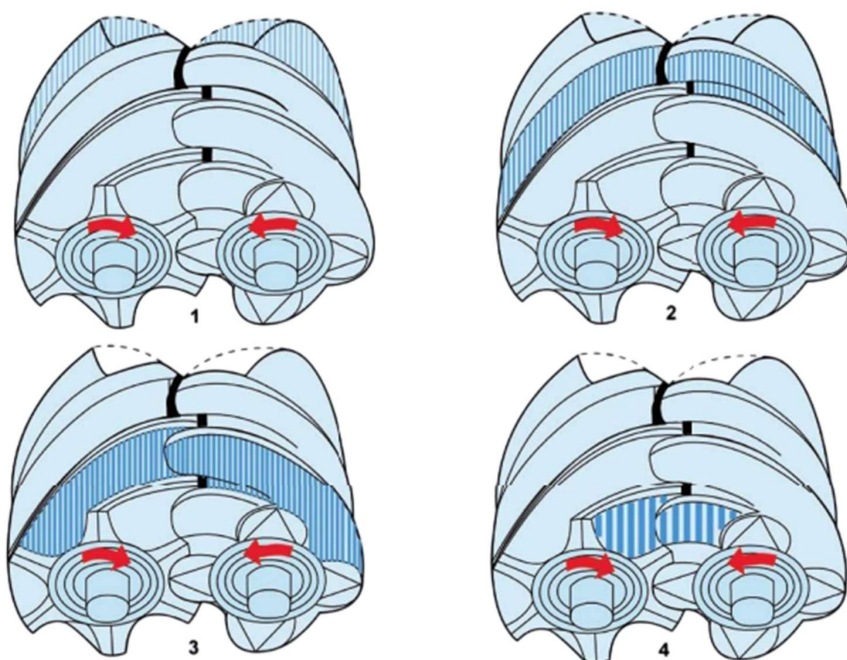
2.1.1 Compressor de Parafuso

Segundo Atlas Copco (2015), a ideia para um compressor de deslocamento positivo em forma de parafuso duplo surgiu na década de 1930, quando havia necessidade de se ter um compressor rotativo com alta vazão e fluxo estável em condições variáveis de pressão.

O compressor rotativo em forma de parafuso duplo é composto por dois rotores helicoidais macho e fêmea, que giram em direções opostas, comprimindo o ar à medida que o volume entre eles e o alojamento diminui. O rotor macho possui lóbulos convexos, já o rotor fêmea possui uma depressão côncava. Cada parte do parafuso possui uma relação de compressão fixa, que é determinada por suas características geométricas: comprimento, passo do parafuso e forma da abertura de descarga. O processo mais comum é acionar o rotor macho, obtendo-se uma menor rotação do rotor fêmea.

Para que seja possível obter a máxima eficiência, a relação de compressão interna deve ser adaptada à pressão de trabalho necessária. Nas extremidades da câmara existem aberturas para admissão e descarga do ar.

Figura 2 - Etapas de compressão de um compressor de parafuso duplo.

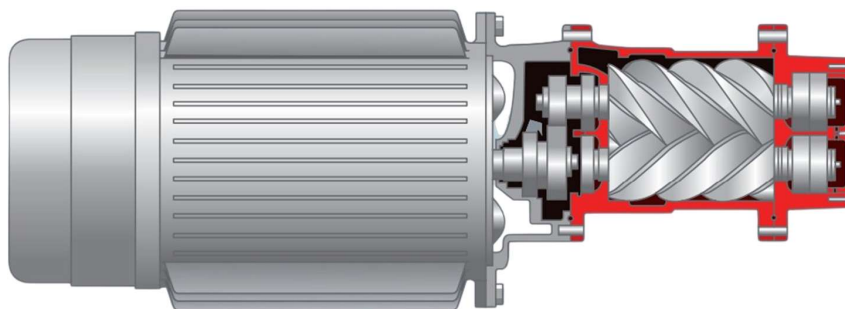


Fonte: Atlas Copco (2015).

A Figura 2 demonstra o processo de compressão em quatro etapas distintas. Na primeira etapa, o ar preenche o espaço disponível entre os rotores. Na segunda, terceira e quarta etapa, o movimento rotacional dos parafusos reduz o volume da câmara de compressão, resultando em um aumento da pressão do ar contido. Esse mecanismo ilustra o princípio fundamental de compressão por deslocamento positivo característico dos compressores de parafuso.

Segundo Badeirante (2025), o acionamento do par de parafusos é realizado por um motor elétrico ou a diesel, que realiza o movimento rotacional sincronizado entre os rotores. A conexão entre o motor e o elemento compressor pode ser feita por dois métodos: acoplamento indireto via sistema de polias e correias, ou acoplamento direto entre os eixos do motor e da unidade compressora. Além disso, os parafusos podem ser lubrificados por fluido refrigerante, normalmente é refrigerado a óleo, ou podem ser isento de lubrificação. A Figura 3 apresenta este tipo de configuração construtiva de compressor.

Figura 3 - Compressor de Parafuso Lubrificado a Óleo com Acionamento Integrado.

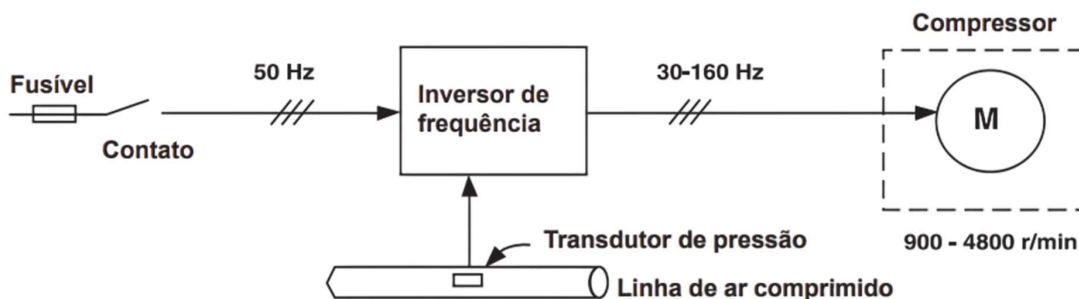


Fonte: Atlas Copco (2015).

2.1.2 Sistema de Controle de Velocidade Variável

Segundo Parker (2015), para manter o ar comprimido dentro de uma pequena faixa de pressão, geralmente $\pm 0,1$ bar, utiliza-se um controle eletrônico de velocidade. Um inversor de frequência regula continuamente a rotação do compressor conforme a demanda de ar, que é monitorada através de medições da pressão do sistema realizada por um transdutor de pressão. Esses sinais de pressão controlam o inversor de frequência do motor, ajustando consequentemente sua velocidade. A Figura 4 apresenta o esquema simplificado de um sistema de compressão acionado por inversor de frequência, no qual um transdutor de pressão é utilizado para medir a pressão na linha de ar comprimido.

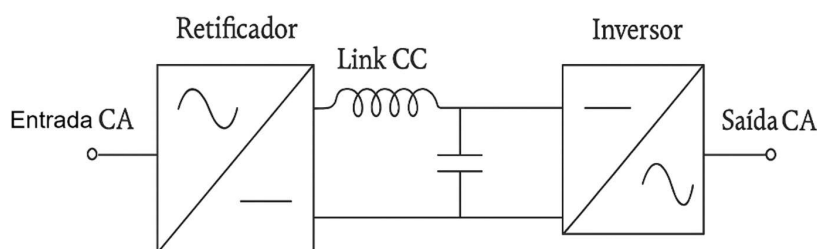
Figura 4 - Um sistema com compressor controlado por velocidade.



Fonte: Atlas Copco (2015).

Segundo Franchini (2013), os inversores de frequência (ou conversores de frequência) comumente encontrados em aplicações para controle de velocidade em motores são formados por três módulos: retificador, filtro e inversor. A Figura 5 ilustra esse tipo de topologia.

Figura 5: Conversores de frequência.

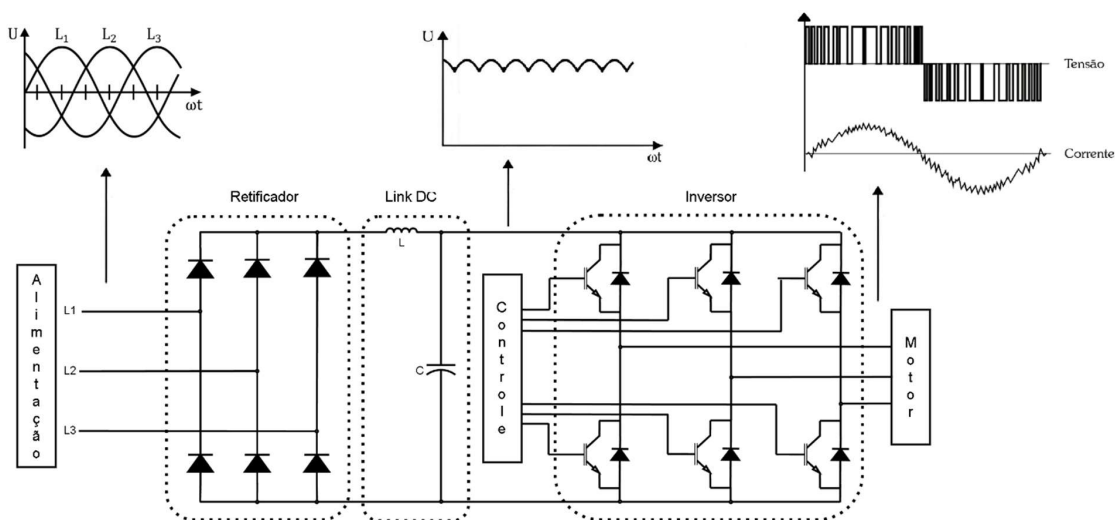


Fonte: Franchini (2013).

Em uma topologia não controlada, o módulo retificador, composto por diodos, é responsável pela retificação do sinal alternado com tensão e frequência constantes provenientes da rede de alimentação. Na rede de entrada, a frequência é fixa em 60 Hz, sendo convertida pelo retificador em tensão contínua por meio de retificação de onda completa. O filtro, ou link CC, tem a função de regular a tensão retificada, realizando o armazenamento de energia por meio de um banco de capacitores. Esse estágio fornece uma tensão contínua com valor aproximadamente $\sqrt{2}$ vezes maior que a tensão de linha da rede. No bloco do inversor encontram-se os transistores IGBTs, responsáveis pela conversão da tensão contínua proveniente do link CC em um sinal alternado com tensão e frequência variáveis.

A Figura 6 apresenta o esquemático mais detalhado do circuito de um inversor de frequência com as formas de onda em cada módulo.

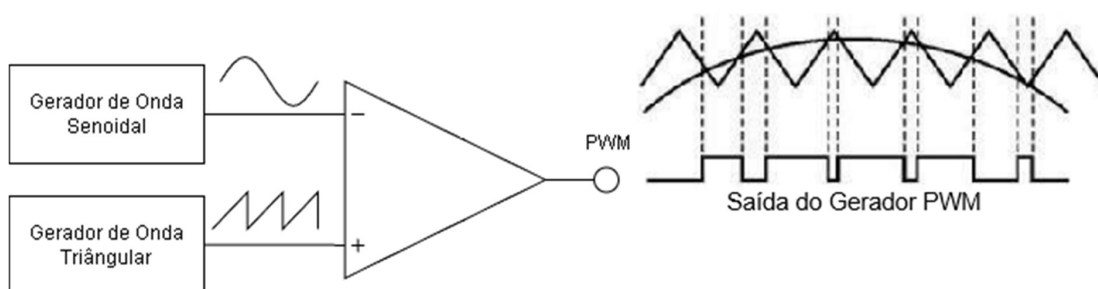
Figura 6: circuito de um inversor de frequência com as formas de onda em cada módulo.



Fonte: Autoria Própria (2013).

O controle de chaveamento dos transistores do módulo inversor é realizado por meio da técnica de modulação por largura de pulsos (PWM). Nessa técnica, a forma de onda PWM é gerada pela comparação entre uma onda triangular e uma referência senoidal, das quais se obtém a forma de onda da tensão de saída. A frequência da onda triangular determina a frequência de chaveamento do inversor, enquanto a onda senoidal define a largura dos pulsos e, consequentemente, o valor eficaz da tensão de saída, conforme apresenta a Figura 7.

Figura 7: Sinal de Saída do Gerador de PWM do Inversor de Frequência.

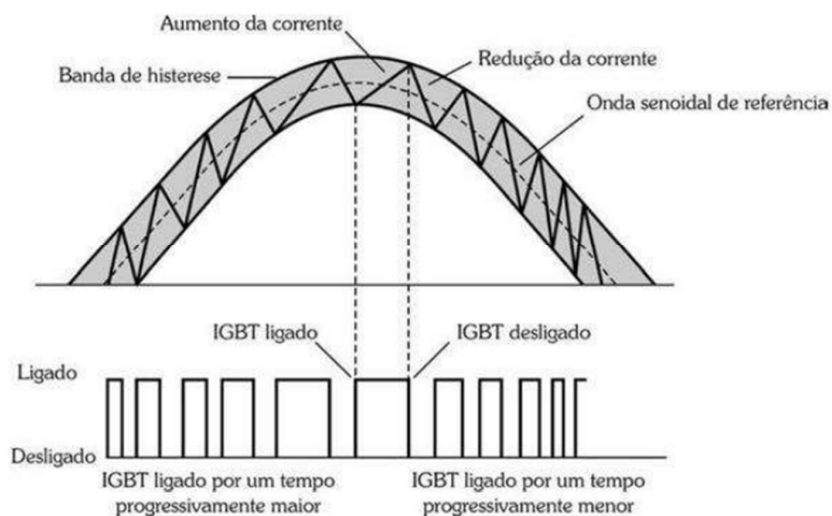


Fonte: Franchini (2013).

O IGBT é inicialmente chaveado com pulsos de curta duração, permitindo que apenas uma pequena parcela de corrente seja aplicada ao motor. Em seguida, o

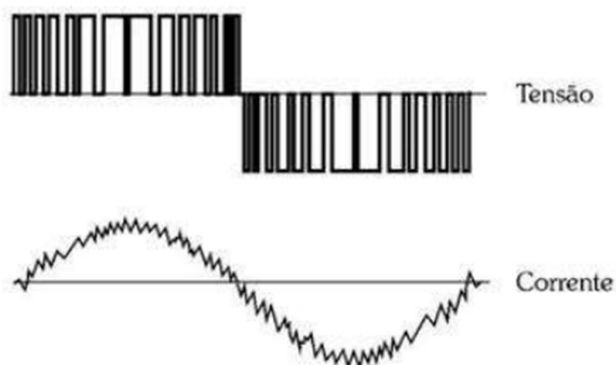
tempo de condução é aumentado progressivamente, possibilitando correntes maiores até que o motor alcance sua corrente nominal. Após esse período, a duração dos pulsos é reduzida gradualmente, diminuindo a corrente fornecida ao motor. A Figura 8 apresenta como ocorre esse processo, enquanto a Figura 9 mostra a forma de onda da tensão e da corrente de saída fornecidas ao motor.

Figura 8: Acionamento dos IGBTs no circuito do inversor.



Fonte: Franchini (2013).

Figura 9: Formas de Onda de Tensão e Corrente na Saída do Inversor de Frequência.



Fonte: Franchini (2013).

2.2 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Desde o século XIX, onde começava as primeiras experiências comerciais relacionadas com a geração, a transmissão e a distribuição de energia elétrica, nascia também a preocupação com a qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores. Em 1934, os primeiros indicadores de controle sobre esta qualidade era estabelecido pela legislação brasileira, em seu Código de Águas (ALVES, 2010).

Alves (2010) afirma que, inicialmente, o conceito de qualidade de energia elétrica era associado somente à confiabilidade do sistema, ou seja, medida pela quantidade e duração das interrupções elétricas reportadas pelos consumidores. Durante as décadas de 1970 e 80, conceitos como as distorções harmônicas e cintilação luminosa (flicker), passaram a ser tratados e discutidos pela comunidade do setor elétrico nacional, resultando em alguns procedimentos impostos pelas concessionárias quando do atendimento de novas cargas industriais, sem contudo, se estabelecer uma legislação específica sobre ao assunto.

No entanto, atualmente, o conceito de qualidade de energia elétrica está relacionado um conjunto de alterações na forma de onda de fornecimento da tensão elétrica que podem afetar o desempenho do sistema elétrico, tanto as companhias de fornecimento de energia como os consumidores. O que se espera das concessionárias, é que o fornecimento de energia elétrica seja realizado de forma confiável, dentro dos limites normalizados. Garantir o fornecimento de energia elétrica, de forma contínua e isenta de perturbações não é uma tarefa fácil. Por si só, o consumo de corrente elétrica pode provocar perturbações e ocasionar problemas no sistema elétrico, os quais podem ser intensificados por fenômenos naturais ou por ações deliberadas sobre o sistema. A natureza dessas perturbações, bem como sua severidade e frequência de ocorrência, varia de um ponto a outro do sistema elétrico, afetando as cargas dos consumidores e, em muitos casos, sendo também influenciada por elas.

Segundo Paulilo (2013), a qualidade do produto diz respeito à conformidade do produto “energia elétrica”, que pode ser vista como a capacidade do sistema elétrico fornecer energia com tensões equilibradas e sem deformações de forma de onda. Esta é uma definição do ponto de vista da identificação de qual é o nível de qualidade da energia fornecida pela concessionária.

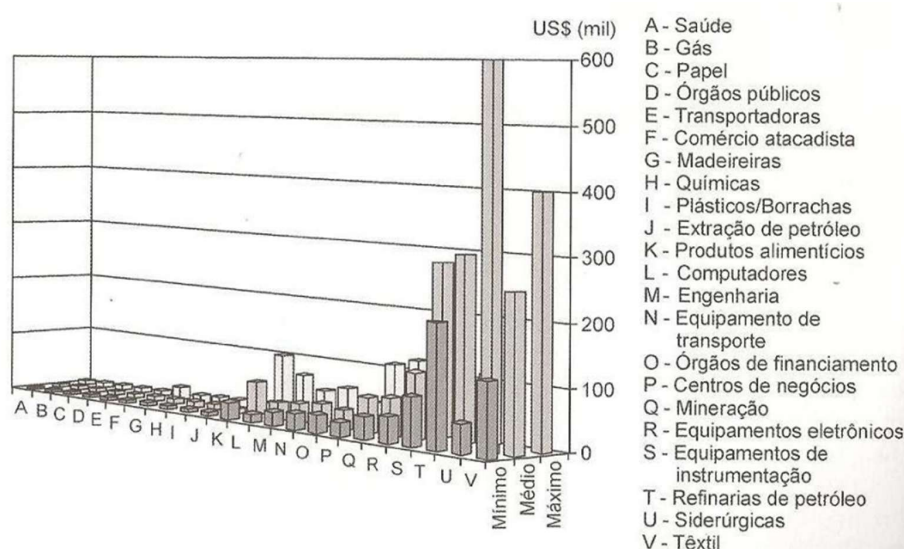
Já para Alves (2010), a qualidade da energia elétrica, do ponto de vista do consumidor, pode ser definida como sendo a ausência de variações manifestadas na tensão, corrente ou frequência que resultem em falhas ou má operações de seus equipamentos.

A maior parte dos equipamentos eletrônicos utiliza novas tecnologias, como, por exemplo, os conversores estáticos, que de acordo com sua tecnologia, podem provocar perturbações na rede (distorções harmônicas, flutuações de tensão e desequilíbrios). Esses equipamentos são responsáveis por degradar a qualidade da energia fornecida pela concessionária e podem diminuir a eficiência ou até mesmo danificar os demais dispositivos conectados à rede.

Para o consumidor residencial, há o entendimento do senso comum de que a baixa qualidade de energia elétrica se resume à falta de energia. Desde que a interrupção não dure muito tempo, não haverá grande insatisfação ou prejuízos econômicos por parte do consumidor. No entanto, para o consumidor industrial, se a falta de energia ocorrer por um breve período, a fábrica pode parar, e o processo industrial precisa ser reiniciado, causando grandes prejuízos financeiros.

Para resumir os impactos econômicos da qualidade da energia, a Figura 10 ilustra como uma interrupção de até 1 minuto no fornecimento de energia elétrica pode resultar em custos significativos para diferentes setores econômicos.

Figura 10 - Custos estimado das perdas financeiras para parada de até um minuto no fornecimento da energia elétrica.



Fonte: (Martinho, 2009)

Desta forma, é evidente a relevância de analisar e diagnosticar a qualidade da energia elétrica, identificando as causas e efeitos dos distúrbios no sistema. Com isso, torna-se possível propor soluções técnicas e economicamente viáveis para mitigar os impactos decorrentes da baixa qualidade da energia.

2.2.1 Distúrbios Elétricos

Segundo Aldabó (2013), os distúrbios de energia geram efeitos prejudiciais nos sistemas conectados como carga. Tais problemas podem originar-se tanto de fatores externos (como descargas atmosféricas nas linhas de distribuição) quanto de fatores internos (como a utilização de cargas não-lineares).

Para Martinho (2009), distúrbio elétrico pode ser definido como qualquer variação de amplitude, frequência e/ou qualquer deformação da forma de onda das grandezas elétricas. A principal causa desse fenômeno deve-se à crescente utilização de equipamentos eletrônicos alimentados à rede elétrica. A maior parte dos equipamentos eletrônicos, seja monofásico ou trifásico, incorporam um circuito retificador à sua entrada, seguido de um conversor comutado do tipo CC-CC ou CC-CA. O elevado conteúdo harmônico da corrente distorce a tensão na saída devido à queda de tensão nas impedâncias do sistema de alimentação.

De acordo com a norma internacional IEEE 1159 (1995), os distúrbios eletromagnéticos relacionados à qualidade de energia elétrica são divididos em: transitórios, variação de tensão de curta duração, variação de tensão de longa duração, desequilíbrio de tensão, distorções de forma de onda, flutuação de tensão e variação de frequência. Esses distúrbios eletromagnéticos podem ser causados pela operação normal de determinadas cargas ou dispositivos elétricos de um sistema elétrico ou por fenômenos naturais. A Tabela 1 apresenta os sete principais fenômenos eletromagnéticos e suas principais causas.

Tabela 1 - Principais causas dos fenômenos eletromagnéticos

Categoria	Principais Causas
1. Transitório	
1.1. Impulsivo	Descargas atmosféricas
1.2. Oscilatório	Energização de bancos de capacitores
2. Variação de curta duração	
2.1. Afundamento de tensão (Sag)	Falta, energização de grandes cargas com alta corrente de partida, conexões frouxas
2.2. Salto de tensão (Swell)	Curto circuito entre fase e terra provocando elevação de tensão na fase sem falta
2.3. Interrupção	Faltas no sistema de potência, falhas de equipamentos e disfunção de controle
3. Variação de longa duração	
3.1. Interrupção sustentada	Falha de natureza permanente, exige intervenção manual para restauração
3.2. Subtensão	Ligação de carga elevada ou desligamento em banco de capacitores
3.3. Sobretenção	Comutação de cargas ou variações na compensação reativa do sistema ou ajuste incorreto em TAPs de transformadores
4. Desequilíbrio de tensão	Cargas desbalanceadas ou falhas em banco de capacitores.
5. Distorção de forma de onda	
5.1. Componente CC	Perturbação geomagnética, efeito de retificação de meia-onda
5.2. Harmônico	Cargas e dispositivos não lineares
5.3. Inter-harmônico	Uso de conversores estáticos de frequência, cicloconversores, motores de indução e dispositivos de arco
5.4. Corte (Notching)	Operação normal de dispositivos de eletrônica de potência, conversores trifásico que produzem corrente contínua
5.5. Ruído	Dispositivos eletrônicos de potência, equipamentos a arco, fontes de alimentação chaveada, retificadores de estado sólido

6. Flutuação de tensão (Flicker)	Fornos a arco
7. Variação de frequência	Saída de bloco de cargas ou perda de um grande gerador

Fonte: Adaptado de IEEE 1159 (1995).

A Tabela 2 apresenta o conteúdo espectral, a duração típica e magnitude de tensão típica de cada fenômeno eletromagnético, segundo a norma IEEE 1159 (1995).

Tabela 2 - Categorias e características típicas dos fenômenos eletromagnéticos do sistema de energia

Categoria	Componente espectral típico	Duração típica	Amplitude de tensão típica
1. Transitório			
1.1. Impulsivo			
1.1.1. Nano Segundos	5 ns (subida)	< 50 ns	
1.1.2. Micro Segundos	1 μ s (subida)	50 ns - 1 ms	
1.1.3. Milisegundos	0,1 ms (subida)	> 1 ms	
1.2. Oscilatório			
1.2.1. Baixa frequência	< 5 kHz	0,3 - 50 ms	0 - 4 pu
1.2.2. Média frequência	5 - 500 kHz	20 μ s	0 - 8 pu
1.2.3. Alta frequência	0,5 - 5 MHz	5 μ s	0 - 4 pu
2. Variação de curta duração			
2.1 Instantânea			
2.1.1. Afundamento de tensão (Sag)		0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 pu
2.1.2. Salto de tensão (Swell)		0,5 - 30 ciclos	1,1 - 1,8 pu
2.2. Momentânea			
2.2.1. Interrupção		0,5 ciclo - 3s	< 0,1 pu
2.2.2. Afundamento de tensão (Sag)		30 ciclos - 3s	0,1 - 0,9 pu

2.2.3. Salto de tensão (Swell)		30 ciclos - 3s	1,1 - 1,4 pu
2.3. Temporária			
2.3.1. Interrupção		3 s - 1 min	< 0,1 pu
2.3.2. Afundamento de tensão (Sag)		3 s - 1 min	0,1 - 0,9 pu
2.3.3. Salto de tensão (Swell)		3 s - 1 min	1,1 - 1,2 pu
3. Variação de longa duração			
3.1. Interrupção sustentada		> 1 min	0,0 pu
3.2. Subtensão		> 1 min	0,8 - 0,9 pu
3.3. Sobreensão		> 1 min	1,1 - 1,2 pu
4. Desequilíbrio de tensão			
5. Distorção de forma de onda			
5.1. Componente CC		Regime	0 - 0,1%
5.2. Harmônico	0 - 100° harmônico	Regime	0 - 20%
5.3. Inter-harmônico	0 - 6 kHz	Regime	0 - 2 %
5.4. Corte (Notching)		Regime	
5.5. Ruído	Banda de espectro	Regime	0 - 1 %
6. Flutuação de tensão (Flicker)	< 25 Hz	Intermitente	0,1 - 7%
7. Variação de frequência		< 10 s	

Fonte: IEEE 1159 (1995)

2.2.2 Distorções Harmônicas

2.2.2.1 Definição

Harmônicas são integrais múltiplas da frequência de origem, e formas de onda não lineares são constituídas de componentes de alta frequência. Para a onda senoidal de 60 Hz, as harmônicas de ordem ímpar são a terceira (180 Hz), a quinta (300 Hz), a sétima (420 Hz) e assim por diante (ALDABÓ, 2013).

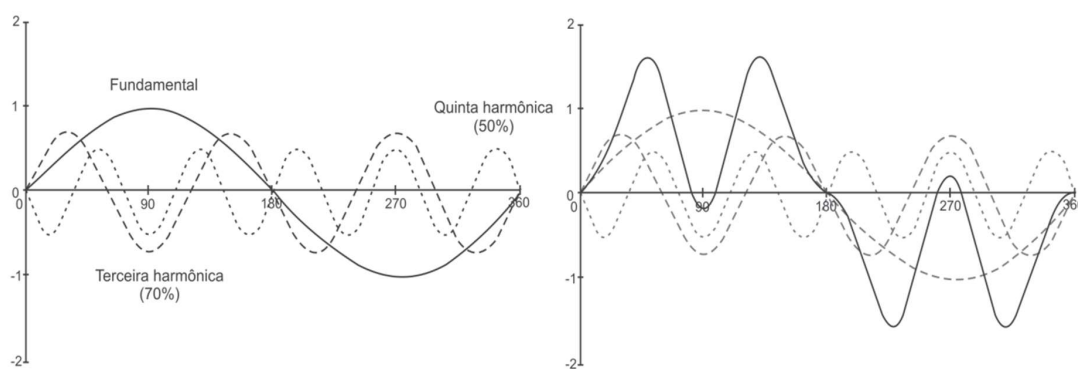
Segundo Pomilio (2010), uma distorção de forma de onda é dita harmônica quando a deformação se apresenta de forma similar em cada ciclo da frequência fundamental. Esse tipo de distorção periódica geralmente resulta da relação não linear

entre tensão e corrente em determinados elementos do sistema elétrico, como transformadores e motores, cujos núcleos ferromagnéticos estão sujeitos a saturação. Além disso, as não linearidades podem ser causadas pela descontinuidades associadas ao chaveamento de corrente em dispositivos eletrônicos de potência, como conversores, pontes retificadoras e compensadores estáticos.

De acordo com Leão (2014), a análise de Fourier, ferramenta matemática desenvolvida em 1822 pelo francês Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768–1830), é utilizada para identificar as componentes harmônicas presentes em uma onda não senoidal. A frequência, a amplitude e a fase de cada senoide são determinadas por meio dessa ferramenta, aplicada à onda não senoidal. Dessa forma, a análise de Fourier realiza o processo de conversão das formas de onda do domínio do tempo para suas componentes fundamentais.

Fourier estabeleceu que qualquer função periódica não senoidal pode ser expressa como a soma de várias componentes senoidais. Essa representação, conhecida como série de Fourier, é formada por uma senoide de frequência fundamental, por senoides cujas frequências são múltiplas inteiras da fundamental e de uma eventual componente contínua, conforme apresenta a Figura 11.

Figura 11: Fundamental com harmônicas e forma de onda resultante.



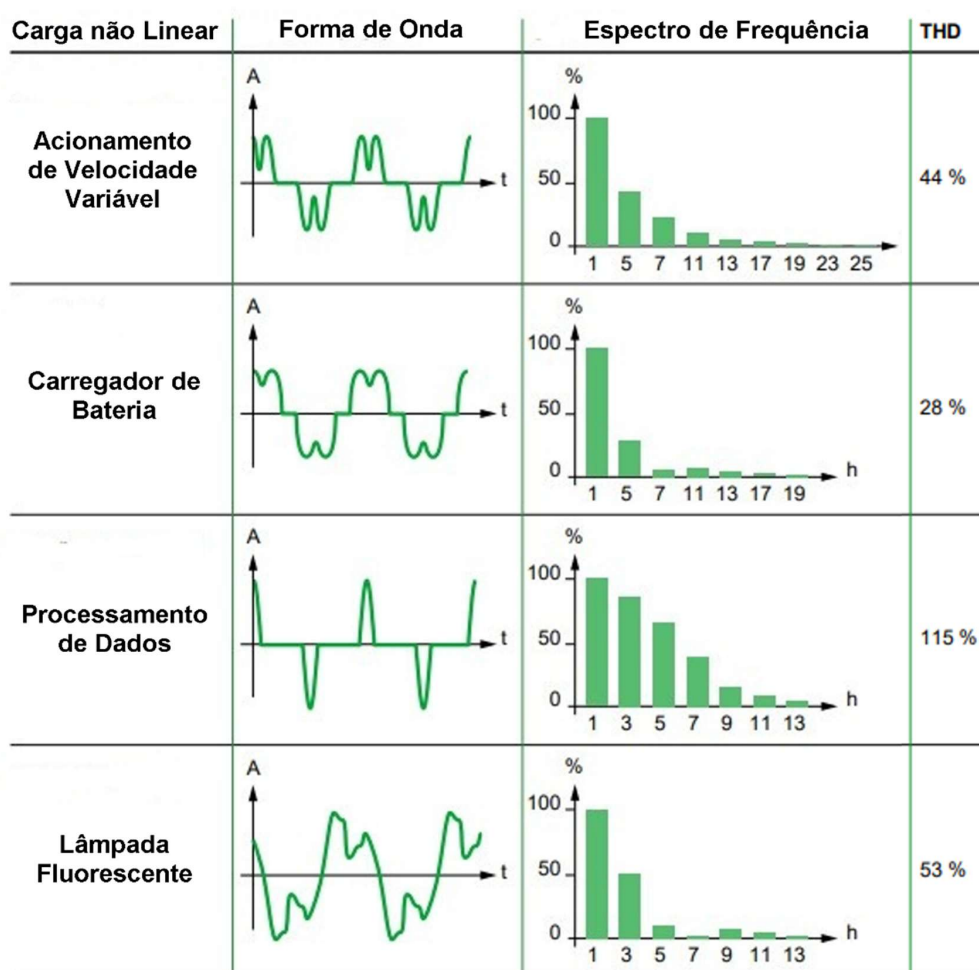
Fonte: Aldabó (2013).

Formas de onda puramente senoidais, com frequência de 60 Hz no caso do Brasil, representam a condição ideal dos sistemas elétricos, uma vez que transformadores, máquinas elétricas e dispositivos eletrônicos são projetados para operar com suprimento senoidal.

Segundo Leão (2014), o aumento da presença de harmônicos nas redes elétricas industriais, comerciais, residenciais e de serviços tem ocorrido devido ao desenvolvimento da eletrônica incorporada aos equipamentos elétricos, visando ao aumento da eficiência e da confiabilidade desses equipamentos.

A Figura 12 apresenta a forma de onda de corrente distorcida de acordo com o tipo de carga.

Figura 12: Exemplos de formas de onda de correntes distorcidas em cargas eletrônicas.



Fonte: Ferracci (2001).

2.2.2.2 Ordem, Frequência e Sequência das Harmônicas

Os sinais harmônicos são definidos quanto à sua ordem, frequência e sequência.

Em um sistema elétrico trifásico equilibrado com presença de cargas não lineares equilibradas, as componentes harmônicas apresentam sequência positiva (ou direta), negativa (ou inversa), e zero (ou nula), de acordo com a ordem do harmônico.

A Tabela 3 apresenta a sequência de fase dos harmônicos, juntamente com suas respectivas ordens e frequências, em um sistema elétrico trifásico equilibrado.

Tabela 3: Ordem, frequência e sequência dos harmônicos em sistema elétrico trifásico equilibrado.

Ordem	Frequência (Hz)	Sequência
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
n	$n * 60$	...

Fonte: Adaptado de Leão (2014).

O significado físico para as componentes de sequências é que, em um sistema trifásico, correntes harmônicas de sequência positiva produzem um campo girante direto; correntes harmônicas de sequência negativa produzem um campo com a rotação oposta; e as correntes harmônicas de sequência zero produzem um campo que oscila, mas não gira entre os enrolamentos de fase (LEÃO, 2014).

Moreno (2010) afirma que as harmônicas de sequência positiva tendem a fazer o motor girar no mesmo sentido da componente fundamental, resultando em sobrecorrente em seus enrolamentos e consequente aumento de temperatura, o que reduz a vida útil do motor. As harmônicas de sequência negativa fazem o motor girar em sentido oposto ao da fundamental, atuando como um freio e também provocando elevação da temperatura. Já as harmônicas de sequência zero não provocam alterações no sentido de rotação do motor; entretanto, somam-se algebricamente no condutor de neutro, o que significa que podem ocorrer situações em que circule por esse condutor uma corrente de terceira ordem (e suas múltiplas inteiras), ocasionando aquecimento excessivo no neutro.

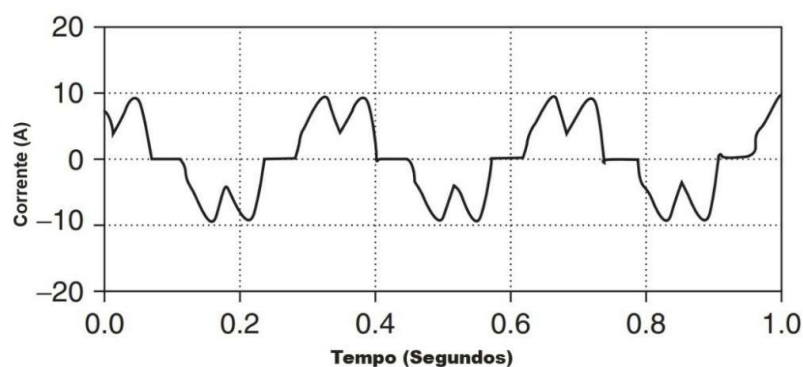
2.2.2.3 Espectro Harmônico

Através da decomposição de um sinal em suas componentes harmônicas, é possível representá-lo na forma de um gráfico de barras, no qual cada barra indica a ordem, a frequência e o valor eficaz correspondentes. Esse tipo de representação, denominado espectro harmônico, constitui uma ferramenta fundamental para a especificação e o projeto de filtros destinados à atenuação das componentes harmônicas.

O espectro harmônico é uma representação da forma de onda no domínio da frequência. Teoricamente, o espectro harmônico de um sinal deformado qualquer chegaria ao infinito. Na prática, geralmente limita-se o número de harmônicas a serem medidas e analisadas por volta da ordem número 40, uma vez que, raramente, os sinais acima dessa ordem são significativos a ponto de poderem perturbar o funcionamento de uma instalação ou equipamento (MORENO, 2010).

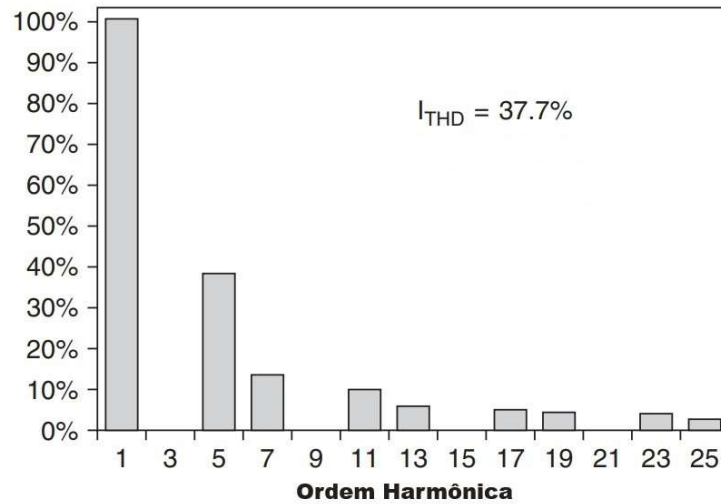
A Figura 13 apresenta a forma de onda da corrente de entrada de um inversor de frequência com retificador de seis pulsos, enquanto a Figura 14 mostra o respectivo espectro harmônico da corrente.

Figura 13: Corrente de Entrada de um Inversor de Frequência com Retificador de Seis Pulsos.



Fonte: Kusko (2007).

Figura 14: Espectro Harmônico da Corrente de Entrada de um Inversor de Frequência com Retificador de Seis Pulsos.



Fonte: Kusko (2007).

2.2.2.4 Distorção Harmônica Total (DHT)

O desvio total de uma onda distorcida em relação à sua componente fundamental pode ser estimado com a ajuda do indicador Distorção Harmônica Total (DHT), um dos índices mais comumente usado para indicar o conteúdo harmônico em um sinal (IEEE Std. 519, 1992).

A DHT é a medida do grau de distorção de uma onda em relação a uma senoide pura, sendo seu valor nulo quando o sinal não apresenta componentes harmônicas.

Quando se consideram os valores de corrente, se obtêm a distorção harmônica total de corrente, indicada pela DHT_i , quando se consideram os valores de tensão, se obtêm a distorção harmônica total de tensão, indicada pela DHT_v .

A forma genérica para calcular a distorção harmônica total é apresentada na Equação (2.1).

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^k f_h^2}}{f_1} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

Em que f_1 apresenta a componente fundamental do sinal, f_h apresenta o módulo da grandeza na frequência harmônica, h é a ordem harmônica e k é o último harmônico considerado.

Leão (2014) ressalta que o nível de distorção harmônica total da corrente pode ser mal interpretado em determinadas situações. Por exemplo, em acionamentos de velocidade variável, observa-se uma elevada taxa de DHT_i em condições de baixa corrente, quando esses equipamentos operam com cargas leves. Esse fato, entretanto, não representa um problema significativo para a instalação, uma vez que a magnitude da corrente fundamental é baixa, mesmo que a distorção seja relativamente alta.

É importante ressaltar que a distorção de corrente, é provocada pela carga, ao passo que a distorção de tensão, é produzida pela fonte geradora como consequência da circulação de correntes distorcidas pela instalação. Isso provoca uma espécie de “efeito de bola de neve” uma vez que, se a tensão é deformada, as correntes nas cargas também se deformam e, se as correntes se deformam, as tensões se deformam mais ainda, e assim por diante (MORENO, 2010).

2.2.2.5 Distorção Harmônica Individual (DHI)

A distorção harmônica individual, ou fator harmônico, é um índice que mede a quantidade de distorção de uma harmônica específica em relação à frequência fundamental. Para indicar a distorção harmônica individual, utiliza-se o chamado DHI, expresso pela Equação (2.2).

$$DHI = \frac{f_h}{f_1} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

Em que f_h representa a componente harmônica de tensão ou de corrente de ordem h em relação à fundamental f_1 .

A importância da DHI reside no fato de que esse indicador é útil para identificar quais harmônicas causam maior impacto na rede elétrica. A violação da DHI orienta à

medida corretiva, como a colocação de filtros, e pode caracterizar a condição de ressonância.

2.2.3 Fator de Potência

Segundo Pomilio (2010), o fator de potência tem por sua definição como sendo a relação entre a potência ativa e a potência aparente consumidas por determinado dispositivo, sem levar em consideração as formas de onda da tensão e corrente. Em sistemas onde as formas de onda são senoidais o fator de potência consiste no cosseno da defasagem entre as formas de onda de tensão e corrente. A determinação do fator de potência em um sistema sem presença de distorções harmônicas pode ser calculada através da Equação (2.3)

$$FP = \frac{P}{S} = \cos \phi \quad (2.3)$$

Em um sistema onde apenas a tensão possui forma senoidal o fator de potência é expresso pelo produto entre a componente fundamental da corrente sobre a corrente eficaz e o cosseno da defasagem entre a tensão e a componente fundamental da corrente, sendo calculado através da Equação (2.4).

$$FP = \frac{I_1}{I_{RMS}} \cdot \cos \phi_1 \quad (2.4)$$

Neste caso, a potência ativa de entrada é resultado do produto da tensão senoidal por todas as componentes harmônicas da corrente não-senoidal.

O valor RMS da corrente de entrada também pode ser expresso em função das componentes harmônicas, através da Equação (2.5).

$$I_{RMS} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (2.5)$$

A Distorção Harmônica Total DHT é a relação entre o valor RMS das componentes harmônicas da corrente e a fundamental.

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2.6)$$

Assim, o Fator de Potência pode ser estabelecido através da Equação (2.7).

$$FP = \frac{\cos \phi_1}{\sqrt{1 + DTH^2}} \quad (2.7)$$

Desse modo, é possível perceber que o fator de potência está relacionado com a corrente absorvida da linha. Portanto, existe a necessidade de normas internacionais para a regulamentação dos valores máximos das harmônicas de corrente que um dispositivo ou equipamento pode injetar na linha de alimentação.

2.2.4 Normalização

2.2.4.1 Módulo 8 do PRODIST

O documento da ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST), é um conjunto de documentos que regulamentam as atividades técnicas dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Composto por 11 módulos, as normativas abrangem desde o planejamento da expansão das redes de distribuição até as regras para os sistemas de medição. O conjunto de normas padroniza: Acesso ao Sistema de Distribuição; Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição;

Informações Requeridas e Obrigações; Cálculo de Perdas na Distribuição; Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica; Ressarcimento de Danos Elétricos; Sistema de Informação Geográfica Regulatório e Fatura de Energia Elétrica.

No que se refere à qualidade do produto, o módulo 8 define a terminologia, caracteriza os fenômenos, estabelece os indicadores e limites ou valores de referência, além de definir a metodologia de medição e a gestão das reclamações relativas à conformidade de tensão em regime permanente e transitório.

Já em relação à qualidade dos serviços prestados, são definidos os métodos de apuração de indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, estabelecendo padrões e responsabilidades.

Ao tratar da qualidade do produto em regime permanente ou transitório, a norma estabelece critérios para parâmetros como tensão em regime permanente, fator de potência, distorções harmônicas, desequilíbrio de tensão, flutuações, variações de curta duração e frequência.

A normativa é aplicada a consumidores, geradoras (com microssistemas isolados e fontes intermitentes), distribuidoras, agentes comercializadores de energia, transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Percebe-se que o principal foco do PRODIST consiste na qualidade da tensão fornecida aos consumidores. No Brasil, as limitações relacionadas às distorções harmônicas de corrente ainda são pouco restritivas. Atualmente, uma das exigências vigentes aplica-se aos dispositivos de iluminação, os quais devem apresentar fator de potência superior a 0,95, resultando em baixa distorção da corrente.

Referente às variações de tensão, o Módulo 8 do PRODIST define, para valores nominais iguais ou inferiores a 1 kV, os níveis de tensão classificados como adequados, precários ou críticos, conforme apresentado no Anexo A. Referente às distorções harmônicas, o Módulo 8 do PRODIST estabelece níveis de referência tanto para a distorção harmônica total de tensão DHT_v , quanto para as distorções harmônicas individuais DHI_v , conforme a ordem do harmônico. Os valores de referência correspondentes a DHT_v são apresentados na Tabela do Anexo B, enquanto os valores de referência correspondentes a DHI_v são apresentados na Tabela do Anexo C.

2.2.4.2 Recomendação da IEEE – 519 (1992);

A IEEE 519 de 1992 é uma recomendação e, portanto, não se configura como norma formal. Ela descreve as principais causas das distorções harmônicas, apresenta os métodos de medição e define os limites de distorção. Seu foco está em estabelecer limites para os valores medidos no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), mas não trata das medições em equipamentos individuais. A lógica é que não interessa o que ocorre dentro da instalação, o que realmente importa é o impacto refletido para o exterior, ou seja, para outros consumidores conectados à mesma alimentação.

Os limites dependem do nível de tensão e de curto-circuito no ponto. Há uma relação entre a corrente de curto-circuito (I_{cc}) e a corrente de carga, de tal forma que, quanto maior for a corrente de curto-circuito em relação à corrente de carga, maiores serão os limites admissíveis, visto que menores serão as distorções de tensão no PAC.

A norma estabelece que as harmônicas pares devem ser limitadas a 25% dos valores das componentes ímpares, e que distorções de corrente que gerem um nível de corrente contínua não são admissíveis.

No Anexo D são apresentados os limites de distorção harmônica de corrente, conforme o nível de tensão (de 120 V a 161 kV). Já no Anexo E são apresentados os limites de distorções harmônicas de tensão.

2.2.4.3 IEC 61000 - Compatibilidade Eletromagnética

A IEC 61000 é uma norma editada pela Comissão Internacional de Eletrotécnica (IEC). A IEC é a organização internacional responsável pela elaboração e publicação de normas aplicáveis às tecnologias elétricas, eletrônicas e afins. Além disso, gerencia sistemas de avaliação da conformidade, garantindo que equipamentos, sistemas e componentes atendam aos requisitos estabelecidos em seus padrões internacionais.

2.2.4.4 IEC 61000-3-4 - Limites para emissão de harmônicas de corrente (≥ 16 A)

A norma IEC 61000-3-4 estabelece limites para as harmônicas de corrente geradas por equipamentos cuja corrente de entrada seja superior a 16 A por fase. Aplica-se a cargas conectadas a redes públicas de baixa tensão em corrente alternada de 50 ou 60 Hz, com tensão fase-neutro inferior a 240 V ou fase-fase inferior a 600 V. A norma apresenta limites para as distorções harmônicas individuais de corrente em equipamentos cuja potência aparente seja menor ou igual a 33 vezes a potência de curto-circuito no ponto de conexão comum (PCC), apresentados no Anexo F.

2.2.4.5 EN 50160

A EN 50160 é uma norma europeia que define as características da tensão da energia elétrica fornecida pelas redes de distribuição pública em regime permanente. Ela estabelece as especificações da tensão de alimentação em baixa e média tensão (baixa até 1 kV e média de 1 kV a 35 kV) no ponto de acoplamento comum. Dentre os diversos parâmetros de tensão definidos, destacam-se: a tensão de alimentação, o desequilíbrio de tensão, a queda de tensão e a distorção harmônica da tensão.

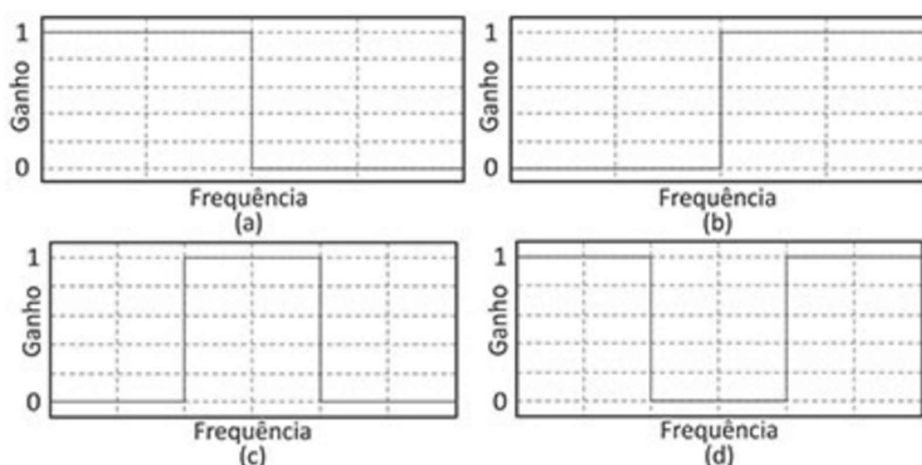
No que se refere à distorção harmônica total de tensão, a normativa estabelece, que esse índice não deve ser superior a 8%. Além disso, a tabela presente no Anexo G apresenta os limites de distorções harmônicas individuais de tensão para sistemas cuja tensão de alimentação seja inferior a 1 kV.

2.3 Filtros para Atenuação de Harmônicas

Uma vez realizada a medição da qualidade da energia elétrica na carga e constatado que os níveis de distorção harmônica ultrapassam os limites estabelecidos pelas normas, uma das alternativas para correção é o projeto e a implementação de filtros passivos. Esses dispositivos promovem a atenuação das componentes harmônicas de corrente e tensão em suas diversas frequências harmônicas, reduzindo-as a valores aceitáveis e fazendo com que as formas de onda se aproximem de uma senoide ideal, com características semelhantes às observadas na geração.

Quanto à resposta em frequência, os filtros são classificados em quatro tipos: passa-baixa, passa-alta, passa-faixa e rejeita-faixa. A resposta em frequência ideal de cada um deles pode ser observada na Figura 15.

Figura 15: Resposta de filtro ideal (a) passa-alta; (b) passa-baixa; (c) passa-faixa; (d) rejeita faixa.



Fonte: Leão (2014).

O filtro passa-baixa permite passagem de sinais até uma frequência limite, denominada frequência de corte, acima da qual os sinais de frequências são atenuados. Os passa-baixa são usados em aplicações que requerem a rejeição de altas frequências. O oposto ao passa-baixa é o passa-alta, que rejeita sinais abaixo da frequência de corte. Os filtros passa-alta são usados em aplicações que requerem a rejeição de baixas frequências. Os filtros passa-faixa e rejeita-faixa apresentam duas frequências de corte, inferior e superior. O primeiro é sintonizado para uma frequência e permite a passagem de uma faixa de frequências compreendida entre as de corte inferior e superior, enquanto o segundo, também denominado de filtro *notch*, permite a passagem de sinais apenas fora da faixa de frequências intermediárias. Filtros *notches* são usados para remover uma frequência não desejada de um sinal, afetando todas outras frequências o menos possível (LEÃO, 2014).

Os filtros podem ser classificados em passivos ou ativos. Os filtros passivos são formados por elementos como capacitores, indutores e resistores, enquanto os

filtros ativos utilizam dispositivos eletrônicos como elemento ativo, associados a resistores e capacitores.

2.3.1 Filtro Passivo

Segundo Leão (2014) os filtros passivos são classificados, quanto à forma de conexão à rede elétrica, em série e paralelo. O filtro série bloqueia uma frequência específica ou uma faixa de frequências indesejadas, sendo composto por uma indutância e uma capacitância em paralelo. Por ser uma solução cara, é raramente utilizado. Além disso, o filtro precisa transportar toda a corrente passante no ponto do sistema em que é instalado e ser isolado para tensão plena para terra.

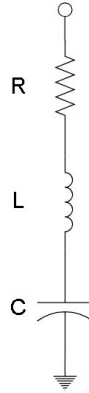
A solução mais comum consiste na utilização de filtros em paralelo, que oferecem um caminho de baixa impedância para determinadas correntes harmônicas, impedindo que elas se propaguem para outras partes do sistema. O filtro paralelo, ou shunt, pode ser aterrado em um de seus terminais e tem como objetivo desviar parte da corrente harmônica da carga para o próprio filtro, reduzindo, assim, a corrente harmônica que circula pela rede elétrica.

2.3.1.1 Filtro de Sintonia

Os filtros de sintonia simples são os filtros passivos mais utilizados comercialmente. Também conhecidos como shunt ressonante, são classificados como passa-faixa ou passa-banda, apresentando baixa impedância na frequência de sintonia e realizando filtragem em uma faixa estreita em torno dessa frequência. Dessa forma, são empregados principalmente para a eliminação de uma harmônica específica.

A Figura 16 apresenta a configuração do filtro passivo de sintonia simples.

Figura 16: Filtro Passivo de Sintonia Simples.



Fonte: De autoria própria (2025).

Na frequência de sintonia, o filtro passa-banda apresenta impedância puramente resistiva. Para frequências menores que a de sintonia, a impedância do filtro é capacitiva ($|X_C| > |X_L|$), e para frequências maiores que a de sintonia, é indutiva ($|X_L| > |X_C|$). A impedância do filtro é, portanto, capacitiva na frequência fundamental (LEÃO, 2014).

Através da Equação (2.8), é possível determinar o valor da resistência R_h para o filtro de atenuação da específica ordem harmônica. Uma vez calculado R_h , as Equações (2.9) e (2.10) fornecem o valor do indutor L_h e capacitor C_h .

$$R_h = \frac{K_h \cdot I_1}{(I_h^2 - K_h^2 \cdot I_1^2)} \cdot \left[R_s \cdot K_h \cdot I_1 + \sqrt{(R_s \cdot I_h)^2 + (h \cdot \omega \cdot L_s)^2 \cdot (I_h^2 - K_h^2 \cdot I_1^2)} \right] \quad (2.8)$$

$$L_h = \frac{R_h \cdot Q}{h \cdot \omega} \quad (2.9)$$

$$C_h = \frac{1}{h^2 \cdot \omega^2 \cdot L_h} \quad (2.10)$$

Onde:

h ordem do harmônico;

R_h : resistência série do filtro para o harmônico h ;

K_h : valor máximo permitido para o harmônico h (% de I_1);

I_1 : valor eficaz da fundamental da corrente do alimentador;

I_h : valor eficaz do harmônico h da corrente do alimentador;

R_s, L_s : resistência e indutância série do alimentador;

ω : frequência angular da tensão do alimentador;

Q : fator de qualidade do filtro.

Segundo Kassick (2000), filtros com elevado fator de qualidade Q apresentam menores perdas de energia e uma banda passante mais estreita; contudo, são mais suscetíveis à perda de sintonia devido a variações paramétricas do filtro causadas por temperatura, corrente, envelhecimento, entre outros fatores. Já os filtros com baixo fator Q possuem banda passante mais larga, sendo menos propensos à perda de sintonia, porém apresentam perdas mais elevadas.

Cada filtro é projetado de forma independente na planta, ou seja, sem levar em consideração a influência dos demais filtros sobre o comportamento do conjunto. Após o dimensionamento do filtro, devem ser realizadas simulações para verificar o atendimento às normas referentes aos limites de distorção harmônica, bem como garantir o funcionamento adequado da planta sob essas novas condições.

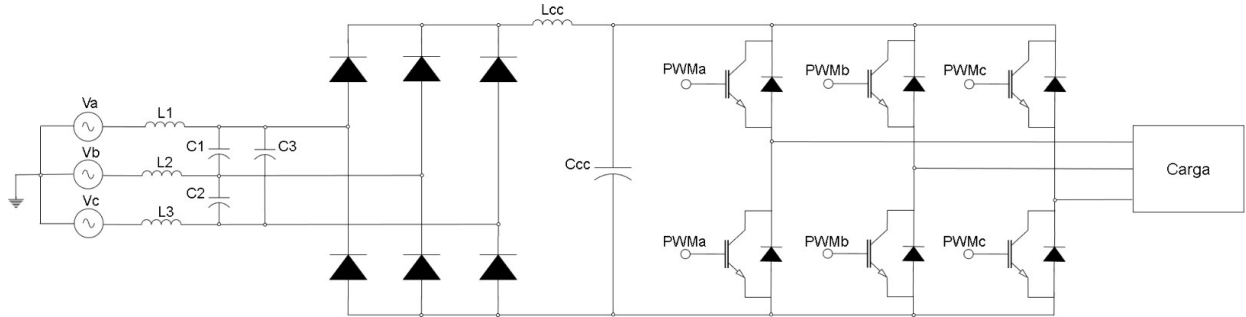
2.3.1.2 Filtro Passa Baixa LC

O filtro passa-baixa LC tem a função de atenuar as componentes harmônicas de alta frequência que estão presentes na corrente acima da frequência de corte. Trata-se de uma topologia simples e robusta, capaz de reduzir a distorção harmônica total de corrente e proporcionar um elevado fator de potência na entrada do conversor.

O indutor do filtro atua na melhoria da forma de onda da corrente, reduzindo a distorção harmônica. O capacitor, por sua vez, compensa o ângulo de defasagem entre a tensão e a componente fundamental da corrente provocado pela presença do indutor, além de atuar como um caminho de baixa impedância para as componentes de alta frequência.

O projeto do filtro é relativamente simples e consiste na determinação dos indutores L_1 , L_2 e L_3 e dos capacitores C_1 , C_2 e C_3 . A implementação do filtro ressonante na entrada do conversor de frequência trifásico é apresentada na Figura 17.

Figura 17: Conversor de Frequência Trifásico com Filtro de 2ª Ordem na Entrada.



Fonte: De autoria própria (2025).

Para a implementação do filtro, é necessário estabelecer algumas especificações do conversor para o projeto do filtro, como:

V_{in_ef}	→ Tensão eficaz de entrada.
f_{rede}	→ Frequência da rede de alimentação.
V_o	→ Tensão de barramento.
P_L	→ Potência no motor.
η_{inv}	→ Rendimento estimado do inversor.

O passo a passo para o projeto é apresentado a seguir:

Primeiro, é necessário determinar o fator de tensão, no qual expressa o ganho de tensão do conversor. Seu valor pode ser obtido através da Expressão (2.11).

$$FV = \frac{V_o}{\sqrt{2} \cdot V_{in_ef}} \quad (2.11)$$

O ábaco apresentado no Anexo J exibe a característica de saída do conversor. Nele, é possível observar três curvas correspondentes a diferentes relações de frequência. A partir do cálculo do fator de tensão e utilizando esse ábaco, determina-se a razão entre a corrente de saída e a corrente média de curto-circuito (I_o/I_{ccmed}) para a relação de frequências desejada.

A corrente média de curto-circuito corresponde à corrente média fornecida pelo conversor quando a carga apresenta resistência nula. Seu valor é obtido através da Expressão (2.12).

$$I_{ccmed} = \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{effase}}{\pi \cdot \omega \cdot L} \quad (2.12)$$

A relação de frequências estabelece a relação entre a frequência de ressonância dos componentes LC e a frequência da rede de alimentação. Seu valor pode ser calculado através da Expressão (2.13).

$$a = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{rede} \cdot \sqrt{3 \cdot L \cdot C}} \quad (2.13)$$

Pode-se dizer também que a relação de frequências é dada pela razão entre a frequência angular de corte do filtro e a frequência angular da rede de alimentação, através da Expressão (2.14).

$$a = \frac{\omega_{corte}}{\omega} \quad (2.14)$$

A corrente de saída do conversor pode ser calculada utilizando a Expressão (2.15).

$$I_o = \frac{P_L}{\eta_{inv} \cdot V_o} \quad (2.15)$$

O valor da corrente média de curto-circuito é determinado dividindo-se a corrente de saída pela razão entre a corrente de saída e a corrente média de curto-circuito obtida no ábaco da característica de saída do conversor. Seu valor é obtido através da Expressão (2.16).

$$I_{cc_med} = \frac{I_o}{I_o / I_{cc_med}} \quad (2.16)$$

A corrente eficaz de curto-circuito é calculada através da Expressão (2.17).

$$I_{cc_ef} = \frac{I_{cc_med}}{0,9} \quad (2.17)$$

Por fim, é possível determinar o valor do indutor (2.18) e do capacitor (2.19).

$$L = \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{in_ef}}{\pi^2 \cdot 2 \cdot f \cdot I_{cc_ef}} \quad (2.18)$$

$$C = \frac{1}{3 \cdot (\omega_{corte})^2 \cdot L} \quad (2.19)$$

Para um sistema trifásico equilibrado, o valor de L será o mesmo para os três indutores de fase ($L1 = L2 = L3$), assim como o valor de C é idêntico para os três capacitores ($C1 = C2 = C3$).

3 METODOLOGIA

3.1 Característica do Compressor em Estudo

Para realizar o estudo da qualidade de energia elétrica em um compressor rotativo de parafuso, foi utilizado como objeto de estudo um compressor de 200 CV trifásico, conforme é observado na Figura 18. O equipamento está instalado em uma casa de máquinas de uma indústria de usinagem e fundição. Este equipamento é um dos compressores responsáveis por pressurizar a rede de ar comprimido da fábrica até sua pressão nominal (6,5 bar), atendendo aos processos produtivos.

Figura 18 - Compressor rotativo de parafuso.



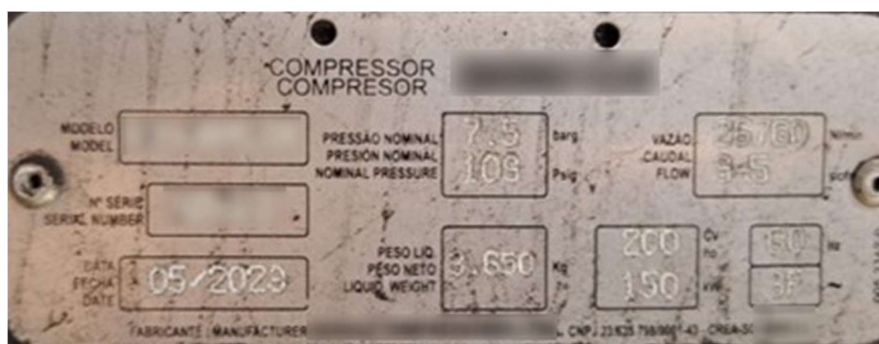
Fonte: De autoria própria (2025).

A seguir é apresentado as principais características elétricas do compressor:

- Data de Fabricação: Maio de 2023;
- Potência: 200 CV ou 150 kW;
- Modo de partida: Inversor de frequência;
- Tensão do Compressor: 220 V / 380 V / 440 V.

Os dados do compressor em estudo podem ser observados em sua placa de identificação, apresentada na Figura 19.

Figura 19 - Dados da placa do compressor.



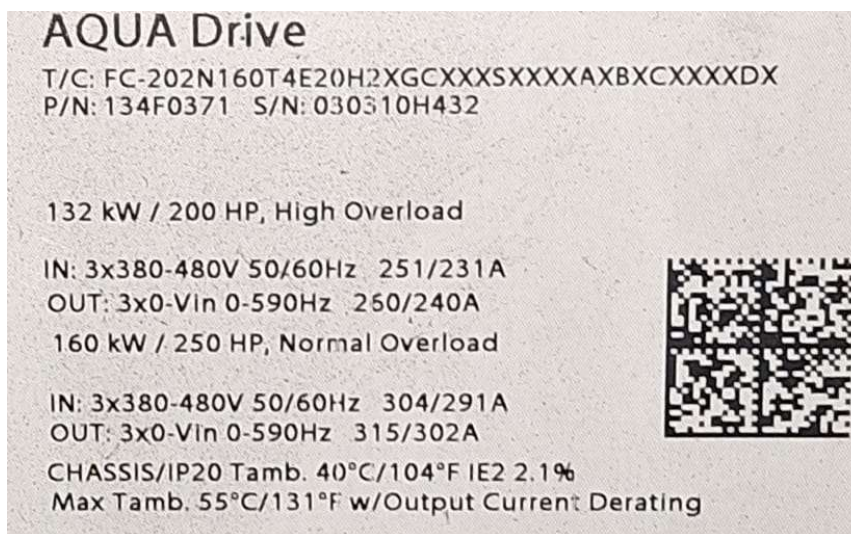
Fonte: De autoria própria (2025).

A seguir é apresentado as principais características elétricas do inversor de frequência responsável por controlar a velocidade do compressor.

- Fabricante: Danfoss;
- Modelo: VLT AQUA Drive FC 202;
- Potência Nominal: 250 HP ou 160 kW;
- Tensão de entrada: 380 V a 480 V;
- Frequência de entrada: 50 a 60 Hz;
- Frequência de saída: 0 a 590 Hz.

Os dados do inversor de frequência podem ser observados em sua placa de identificação, apresentada na Figura 20.

Figura 20 - Dados da placa do inversor de frequência.



Fonte: De autoria própria (2025).

3.2 Procedimentos de Medição

Para realizar as medições dos parâmetros elétricos para análise da qualidade de energia elétrica, foi utilizado um analisador de energia modelo RE7080 da fabricante Embrasul, conforme Figura 21. Este equipamento é capaz de registrar as potências ativa, reativa e aparente, níveis de tensão, variação de tensão de curta duração, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, fator de potência, frequência, distorções harmônicas de tensão e de corrente e espectro de frequência de distorções harmônicas de tensão e corrente.

Figura 21- Analisador de energia elétrica RE7080



Fonte: De autoria própria (2025).

As medições de corrente foram realizadas por meio de um sensor de corrente flexível modelo TI3000, visto na Figura 22. Esse sensor funciona com base no princípio da bobina de Rogowski, que detecta o campo magnético gerado pela corrente alternada do condutor, induzindo uma tensão em seus terminais. Essa tensão é proporcional à taxa de variação da corrente, ou seja, permite medir a corrente alternada ao detectar as mudanças no campo magnético gerado. Com esse sensor, é possível medir a corrente sem a necessidade de abrir o circuito.

Figura 22- Sensor de corrente flexível TI3000



Fonte: De autoria própria (2025).

O equipamento dispõe de cabos para medição de tensão, os quais possuem garras do tipo jacaré, observado na Figura 23. No total, são cinco cabos: três para os condutores de fases, um para o condutor de neutro e outro para o condutor de terra.

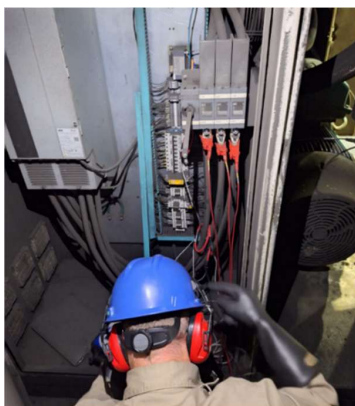
Figura 23 - Cabos para medição de tensão



Fonte: De autoria própria (2025).

A instalação do equipamento no ponto de conexão comum foi realizada por eletricista qualificado, utilizando equipamentos de proteção individual (EPIs) adequados, tais como: óculos de proteção, calçado isolante com solado de borracha, uniforme anti-chamas, capacete e luvas isolantes para até 1000 V. A Figura 24 apresenta o momento de instalação do analisador de energia elétrica.

Figura 24: Instalação do analisador de energia elétrica



Fonte: De autoria própria (2025).

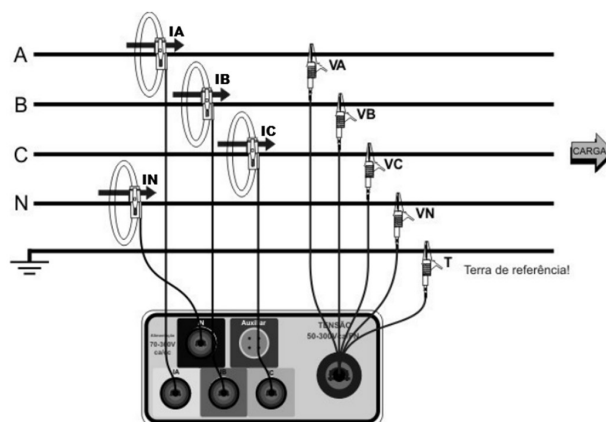
A instalação do analisador de energia elétrica foi realizada no painel elétrico do compressor rotativo de parafuso em estudo, antes da chave seccionadora rotativa com fusível incorporado. Foi utilizado o esquema de ligação trifásica a cinco fios. A Figura 25 apresenta o analisador de energia instalado no painel, e a Figura 26 apresenta o esquema de ligação utilizado.

Figura 25- Conexão do analisador de energia no ponto de conexão comum



Fonte: De autoria própria (2025).

Figura 26 - Esquema de ligação trifásica a cinco fios.



Fonte: Embrasul (2021).

3.3 Cálculo do Curto-Circuito no Ponto de Conexão Comum

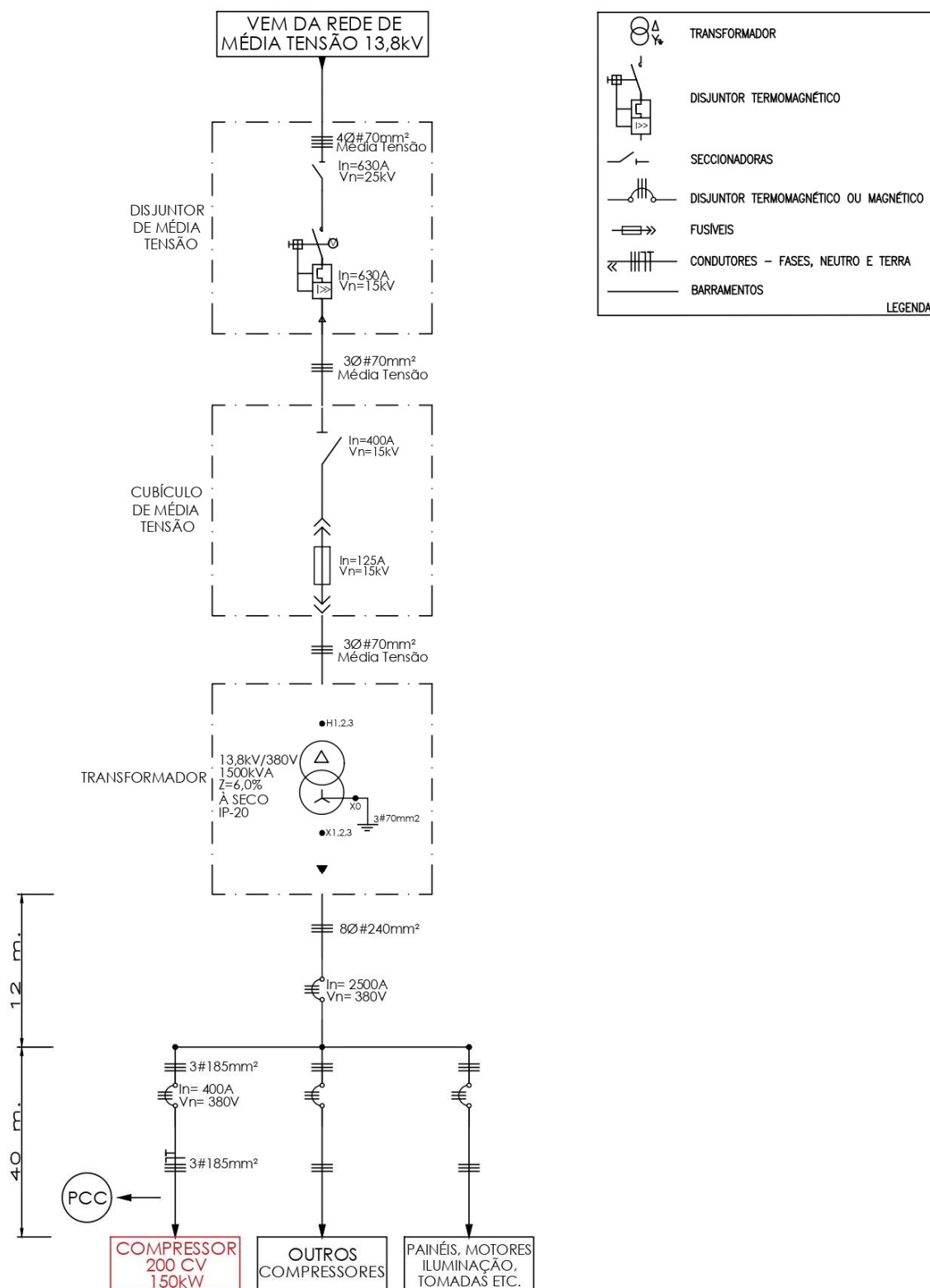
Para estabelecer os limites de distorção harmônica definidos pela norma IEEE 519 (1992) e, posteriormente, projetar o filtro sintonizado, faz-se necessário realizar o cálculo da corrente de curto-circuito trifásico no ponto de conexão comum (PCC).

O compressor em estudo é alimentado por uma rede trifásica de 380 V, por meio de condutores de com seção de 185 mm², com comprimento total de 40 metros. A proteção é realizada por um disjuntor termomagnético com corrente nominal de 400 A e capacidade de interrupção de curto-circuito de 36 kA, instalado na subestação da casa de máquinas. Essa subestação é responsável pelo fornecimento de energia elétrica a outros compressores rotativos de parafuso, além de painéis elétricos, circuitos de tomadas e iluminação da casa de máquinas.

O transformador instalado na subestação é do tipo a seco, com potência nominal de 1500 kVA, recebendo alimentação em média tensão de 13,8 kV no primário e fornecendo 380 V em baixa tensão no secundário. A partir do secundário, uma linha de 12 metros de comprimento, composta por oito cabos por fase de 240 mm², alimenta o quadro de distribuição geral da subestação.

A Figura 27 apresenta um esquema simplificado da alimentação elétrica do compressor em estudo.

Figura 27 - Esquema de alimentação elétrica do compressor.



Fonte: De autoria própria (2025).

Para o cálculo do curto-circuito no PCC, são consideradas as impedâncias do transformador e do cabo que sai do secundário do transformador e alimenta o disjuntor no quadro de distribuição geral da subestação, quanto do cabo que alimenta o compressor).

A impedância total equivalente (Z_{EQ}) foi determinada através da soma vetorial das impedâncias individuais dos elementos do circuito, conforme a Equação (3.1).

$$Z_{EQ} = Z_T + Z_{CABOS} \quad (3.1)$$

onde Z_T representa a impedância do transformador e Z_{CABOS} a impedância dos condutores.

Com o valor da impedância total equivalente, a corrente de curto-circuito simétrica em um sistema elétrico trifásico pode ser determinada através da Equação (3.2).

$$I_{CS} = \frac{V_N}{\sqrt{3} \cdot Z_{EQ}} \quad (3.2)$$

em que V_N é a tensão de linha do sistema.

A partir dos cálculos realizados e apresentados no Apêndice A, obteve-se uma corrente de curto-circuito trifásica simétrica de 30,43 kA no ponto de conexão comum.

3.4 Simulação do Inversor de Frequência

A etapa de simulação do inversor de frequência foi realizada por meio de um programa computacional para simulação de circuitos elétricos, o software PSIM 9.1. Essa etapa se faz necessária para a implementação da técnica dos filtros sintonizados.

Buscou-se, a partir das informações da instalação, obter o modelo que melhor representasse a carga observada no sistema, utilizando elementos passivos (resistores, indutores e capacitores) e elementos ativos (transistores, diodos etc.). O

sistema foi simulado até que se alcançassem, com aproximação, as grandezas medidas no sistema real.

Para a etapa de simulação do sistema, a resistência e a indutância do alimentador do compressor foram determinadas a partir do somatório das impedâncias do transformador e dos cabos de alimentação. Considerou-se o transformador da fabricante *WEG* de 150 kVA, com tensão nominal de 13,8 kV/380 V, cuja impedância total é de 3,5% em P.U, conforme apresentado na tabela do Anexo H, retirada do catálogo do fabricante. Além disso, foram consideradas as resistências e reatâncias indutivas dos cabos de alimentação, apresentadas na tabela do Anexo I, obtidas do catálogo da fabricante de cabos *Pirelli* (valores em Ω/km). Foram utilizados os valores referentes ao trecho entre o secundário do transformador e o quadro de força da subestação, bem como do trecho entre o quadro de força e o compressor, realizando-se a conversão dos valores para as distâncias reais e para a quantidade de cabos por fase. Desta forma, a resistência e a indutância totais do alimentador resultam da soma das parcelas do transformador e dos cabos, resultando em 6,00 m Ω de resistência e 11,15 μH de indutância conforme cálculo apresentado no Apêndice A.

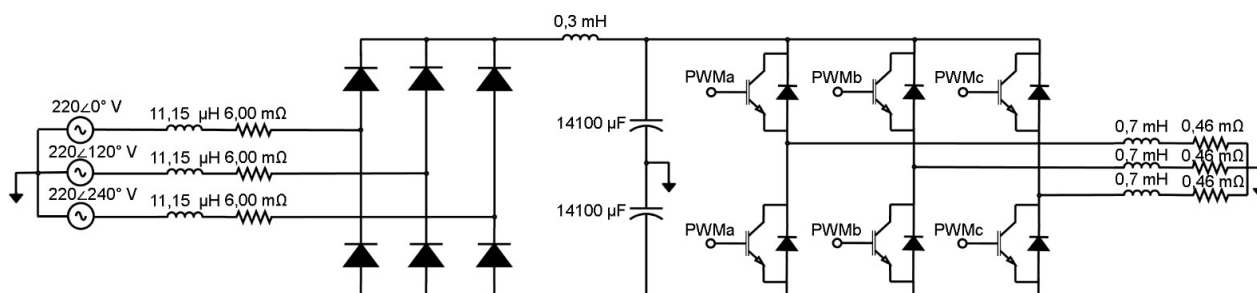
Para a modelagem da carga, o motor foi representado por uma impedância equivalente composta por uma resistência e uma indutância conectadas em estrela. Inicialmente, os valores foram calculados a partir dos dados de placa do motor trifásico obtido em campo, da fabricante *WEG*, que possui tensão nominal de 380 V eficaz, corrente nominal de 282 A e fator de potência de 0,85, conforme apresentado na figura do Anexo K. Entretanto, verificou-se que a impedância teórica não reproduzia adequadamente a corrente de entrada observada no sistema real. Dessa forma, os valores da carga foram ajustados de modo a obter, na simulação, uma corrente de entrada compatível com os valores medidos experimentalmente. Assim, foi considerada uma resistência de 0,46 m Ω em série com uma indutância de 0,7 mH, adequada para os objetivos do estudo, que se concentram na análise da corrente de entrada do inversor de frequência.

Para o cálculo do capacitor do barramento CC, adotou-se a tensão da rede trifásica de entrada de 380 V eficaz, a 60 Hz. O capacitor foi dimensionado de modo a garantir uma tensão média no barramento próxima de 535,8 V (1,41 vezes a tensão de linha) e a fornecer uma potência de saída de 150 kW, com um ripple de tensão de aproximadamente 10% em relação ao valor médio. Já o indutor do link CC foi ajustado por meio de análise paramétrica na simulação, com o objetivo de reproduzir a

distorção harmônica total de corrente próxima de 30% observada experimentalmente na entrada do inversor de frequência. Dessa forma, obteve-se um valor de indutância de 0,3 mH e capacitância de 7.050 μ F para o barramento CC.

A Figura 28 apresenta a estrutura do inversor de frequência utilizada na simulação.

Figura 28: Simulação do Inversor de Frequência.

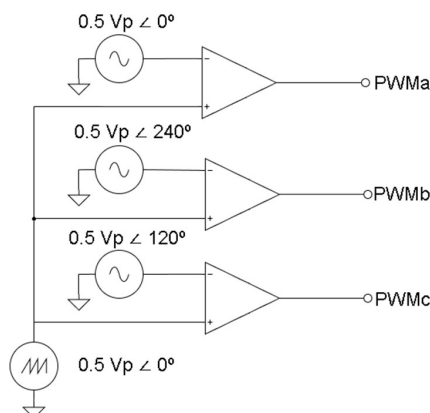


Fonte: De autoria própria (2025).

De acordo com a Tabela presente no Anexo L , referente ao inversor de frequência da fabricante Danfoss, a frequência de chaveamento pode ser parametrizada entre 1 kHz e 16 kHz. Neste estudo, optou-se por utilizar o valor máximo do intervalo, 16 kHz.

Para o chaveamento dos transistores, adotou-se a técnica de modulação por largura de pulsos (PWM). Nesse método, realiza-se a comparação entre uma onda senoidal de 60 Hz e uma onda triangular de 16 kHz, sendo esta última responsável por definir a frequência de chaveamento do inversor. Ambas as formas de onda apresentam amplitude de 0,5 V pico. As ondas senoidais utilizadas encontram-se defasadas em 120° entre si. A Figura 29 apresenta a modulação por largura de pulsos utilizada nas simulações.

Figura 29: Simulação do Inversor de Frequência: Modulação por Largura de Pulsos.



Fonte: De autoria própria (2025).

4 PROJETO, RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados das Medições

4.1.1 Níveis de Tensão

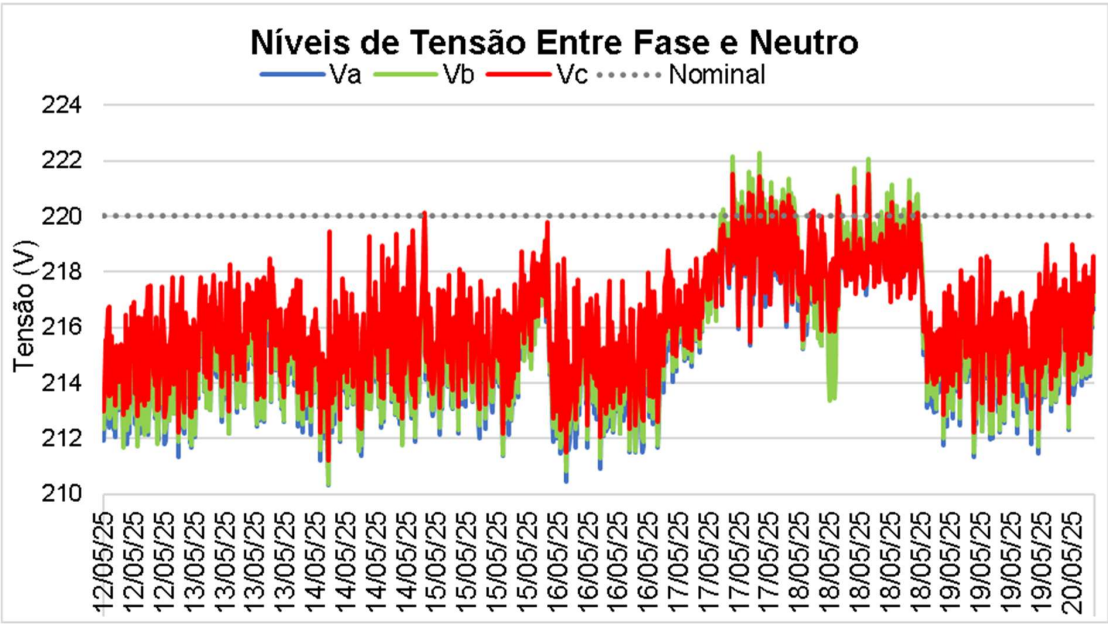
A tensão nominal na entrada do compressor, onde foram realizadas as medições, é de 380 V (tensão de linha) e 220 V (tensão de fase). A análise desse parâmetro permite identificar eventuais quedas de tensão ou variações de curta e longa duração que possam influenciar o desempenho do equipamento.

A Figura 30 apresenta os níveis de tensão de fase medido em cada uma das fases da entrada do compressor.

Analizando os resultados das medições, observa-se que, durante o funcionamento do compressor, os valores de tensão das três fases apresentam comportamento semelhante, mantendo-se, na maior parte do tempo, abaixo de 220 V, porém acima de 210 V. Nota-se também que, entre os dias 17/05 e 18/05, correspondentes a um sábado e domingo, ocorreu uma elevação na tensão, ultrapassando 220 V nas três fases. Esse comportamento está associado à baixa demanda de ar comprimido durante o final de semana, o que levou o compressor a operar com carga leve nesse período. Como consequência, a corrente fundamental diminuiu e, portanto, o nível de tensão aumentou.

A Tabela 4 apresenta os níveis de tensão medidos em comparação com os limites estabelecidos por normas nacionais e internacionais. Verifica-se que os valores obtidos estão em conformidade com o Módulo 8 do PRODIST e com a norma EN 50160, porém não atendem aos limites estabelecidos pela IEC 61000.

Figura 30: Níveis da Medição de Tensão entre Fase e Neutro.



Fonte: De autoria própria (2025).

Tabela 4 - Comparação dos Limites dos Níveis de Tensão Estabelecido por Normas

Medição				Módulo 8 PRODIST	EN 50160	IEC 61000
Nominal		Medição (V)	Percentual	Valor Adequado	Valor Limite	Valor Limite
Tensão de Linha (380 V)	Máximo	384,26	1,12%	350 ≤ TL ≤ 399	± 5%	± 3%
	Mínimo	364,33	-4,13%			
	Médio	373,81	-1,63%			
Tensão de Fase (220 V)	Máximo	222,27	1,03%	202 ≤ TL ≤ 231		
	Mínimo	210,34	-4,39%			
	Médio	215,82	-1,90%			

Fonte: De autoria própria (2025).

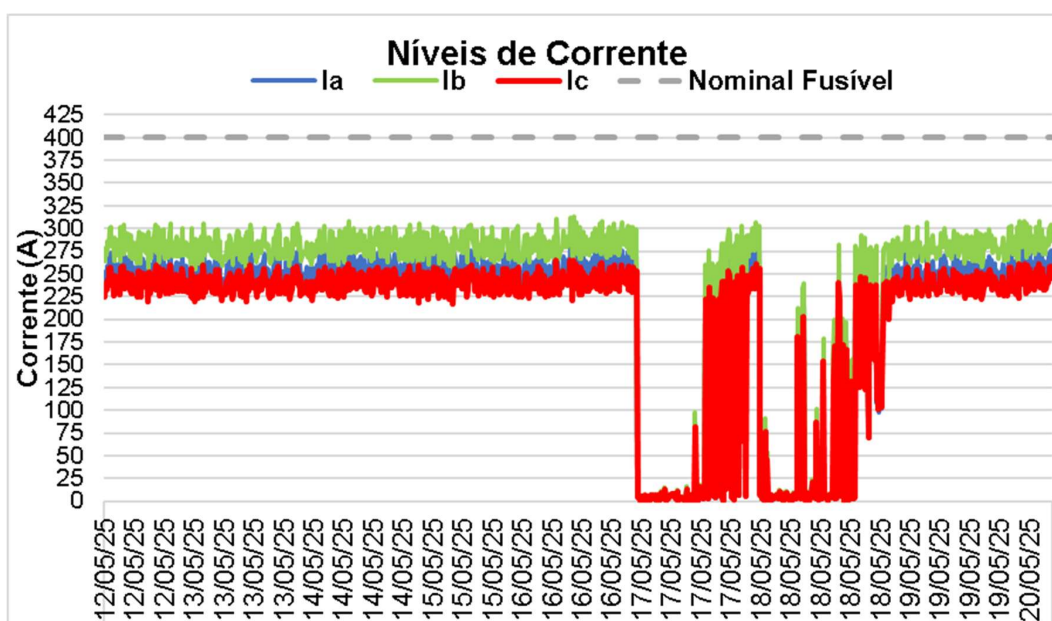
4.1.2 Níveis de Corrente

A análise dos níveis de corrente permite verificar a presença de desequilíbrios entre as fases e a ocorrência de picos de corrente durante o funcionamento do compressor. Picos indesejados de corrente durante a operação do equipamento podem levar ao acionamento indevido dos dispositivos de proteção.

A Figura 31 apresenta os níveis de corrente medido em cada uma das fases da entrada do inversor de frequência.

O fusível presente no painel de entrada do compressor, responsável por proteger o circuito, possui corrente nominal de 400 A. Percebe-se que o circuito está operando com uma folga de aproximadamente 25%. Além disso, observa-se que, durante o funcionamento do compressor, a corrente da fase B mantém-se superior às das demais fases, enquanto a fase C apresenta valores inferiores, evidenciando um pequeno desequilíbrio entre as fases. Ao calcular a média das correntes das três fases entre os dias 12/05 e 16/05, período de funcionamento normal do compressor, verifica-se que a fase A apresentou corrente média de 254,67 A, a fase B de 281,15 A e a fase C de 240,19 A.

Figura 31 - Níveis da Medição de Corrente



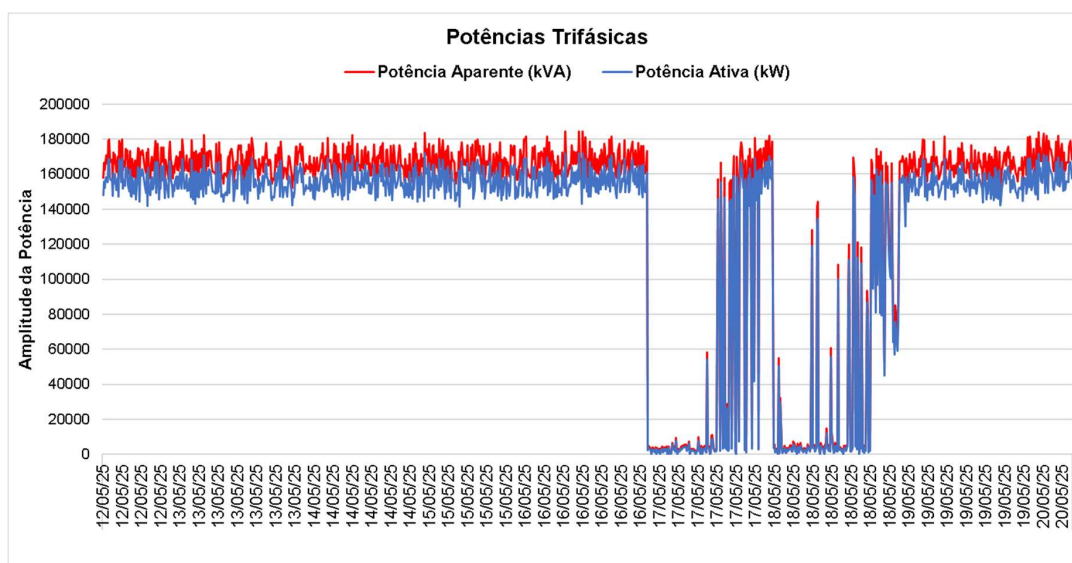
Fonte: De autoria própria (2025).

4.1.3 Potência e Fator de Potência

Através da Figura 32, é possível observar os resultados obtidos nas medições das potências trifásicas aparente e ativa. Verifica-se que, durante a operação nominal do compressor, a potência ativa apresenta valores médios em torno de 156 kW, enquanto a potência aparente permanece-se próxima de 167 kVA. Quando ocorre o desligamento do compressor, ambas as potências reduzem-se significativamente, mantendo-se próximas de zero.

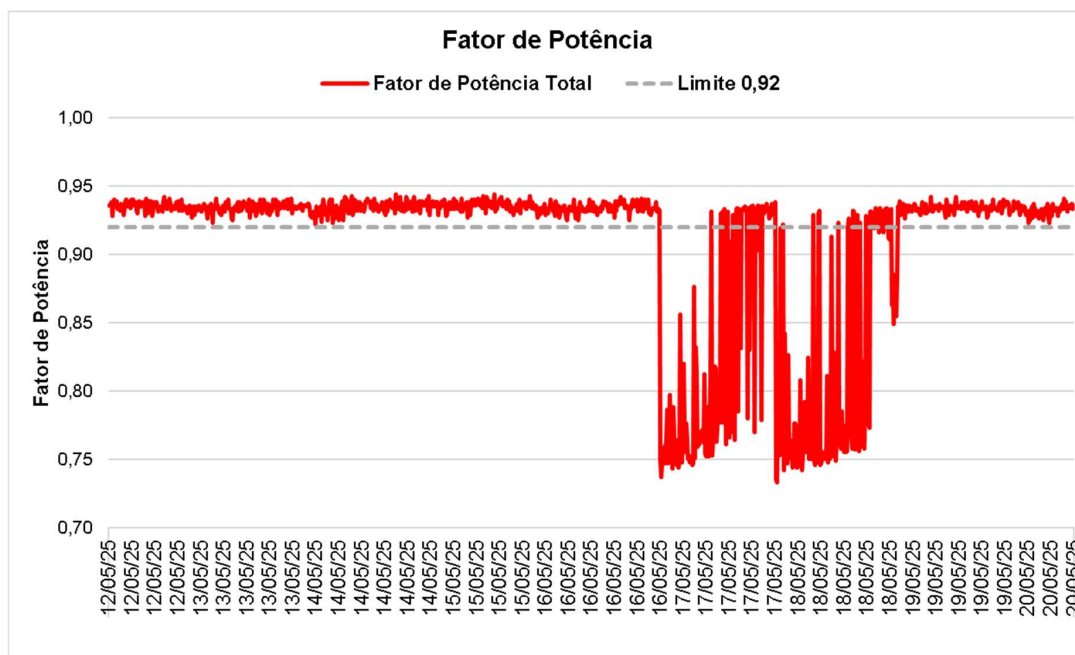
Os resultados referentes ao fator de potência total são apresentados na Figura 35. Nota-se que, durante os períodos em que o compressor permanece desligado, o fator de potência atinge valores próximos de 0,75. Durante a operação normal do compressor, o fator de potência mantém-se em média de 0,93.

Figura 32: Medição da Potência Ativa e Aparente.



Fonte: De autoria própria (2025).

Figura 33: Medição do Fator de Potência



Fonte: De autoria própria (2025).

4.1.4 Distorções Harmônicas de Tensão

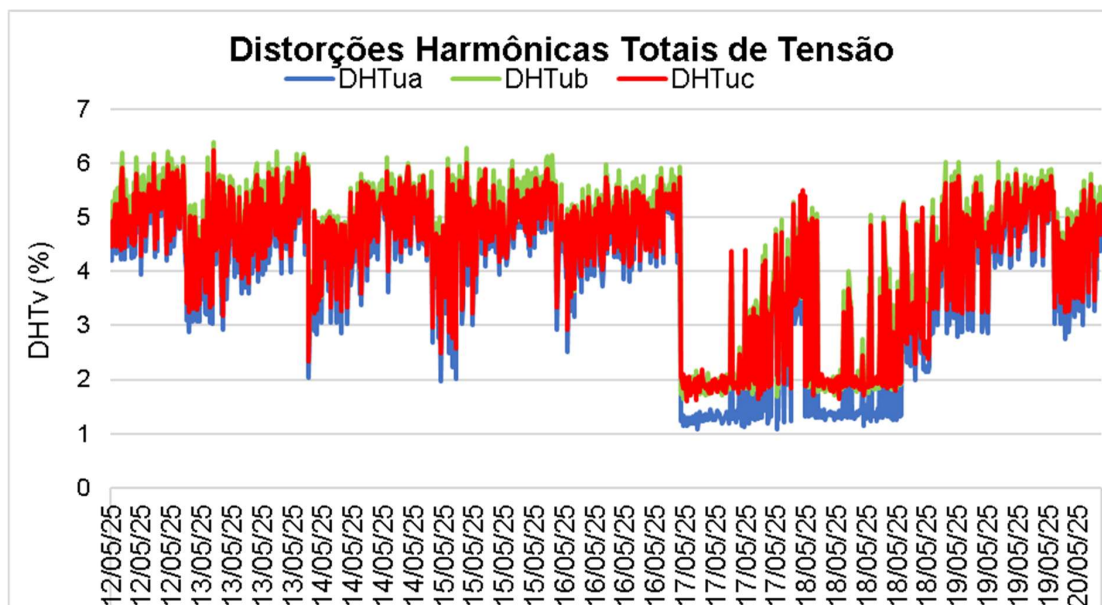
4.1.4.1 Distorções Harmônicas Totais de Tensão (DHTt)

Por meio do gráfico da Figura 34, é possível observar as distorções harmônicas totais de tensão DHT_v em cada uma das fases.

Nota-se que, no período em que o compressor opera com carga leve, a corrente fundamental diminui, o que resulta na redução da distorção harmônica de tensão, atingindo valores próximos de 2%. Essa redução ocorre porque a distorção harmônica de tensão é consequência das correntes distorcidas que circulam pelo sistema elétrico. Como a amplitude das componentes harmônicas de corrente diminui em decorrência da redução da corrente fundamental, a distorção harmônica de tensão também é reduzida.

Além disso, observa-se que os valores de DHT_v atingem seus máximos durante a operação do compressor, chegando a aproximadamente 6% em todas as fases.

Figura 34 - Distorções Harmônicas Totais da Medição de Tensão.



Fonte: De autoria própria (2025).

A Tabela 5 apresenta os valores máximo, mínimo e médio de DHT_v em todas as fases, comparando com os limites estabelecidos por normas nacionais e internacionais. Observa-se que o índice de DHT_v atende a duas das três normas analisadas, ficando acima do recomendado apenas pela IEEE 519.

Tabela 5 - Comparação da DHTv com as Norma Correspondentes.

	Valores Medidos			Norma de Análise		
	Fase A	Fase B	Fase C	Prodinst Módulo 8	IEEE 519	EN 50160
Máximo	6,00%	6,38%	6,24%			
Mínimo	1,64%	2,43%	2,01%	< 10%	< 5%	< 8%
Média	4,49%	4,91%	4,69%			

Fonte: De autoria própria (2025).

Os resultados obtidos para o índice de DHT_v podem ser considerados aceitáveis, uma vez que atenderam a três das quatro normas analisadas. Ressalta-se que a implementação de filtros passivos destinados à atenuação das componentes

harmônicas de corrente tenderia a reduzir ainda mais a distorção harmônica de tensão no sistema.

4.1.4.2 Espectro de Frequência de Tensão

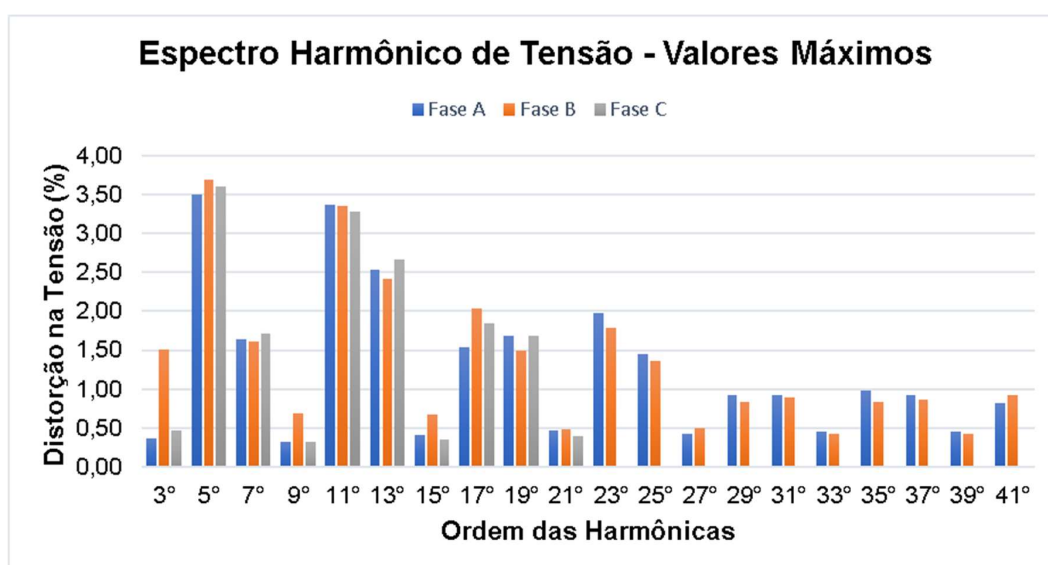
A Figura 35 apresentam os valores máximos das distorções harmônicas individuais de tensão DHI_v em todas as fases.

Por meio do espectro harmônico de tensão, é possível identificar quais componentes harmônicas exercem maior influência sobre a distorção harmônica total, bem como avaliar a magnitude de cada uma delas. Para essa análise, foi considerado o período completo de medição, compreendido entre os dias 12/05 e 20/05.

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos na medição para a DHI_v e os compara com os limites estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST e pela norma IEEE 519.

Comparando os resultados com as três normas analisadas, percebe-se que, de modo geral, o índice de distorção harmônica individual de tensão DHI_v não ultrapassa os limites recomendados. Dessa forma, pode-se afirmar que não foram observados resultados críticos de distorção harmônica de tensão que indiquem problemas relacionados à qualidade da energia elétrica.

Figura 35: Espectro Harmônico da Medição de Tensão - Valores Máximos.



Fonte: De autoria própria (2025).

Tabela 6: Comparação da DHlv Medida com o Módulo 8 do Prodist e a IEEE 519.

Medição				Norma de Análise		
Ordem da Harmônica	Fase A (%)	Fase B (%)	Fase C (%)	M.8 PRODIST (%)	EN 50160 (%)	IEEE 519 (%)
3°	0,37	1,51	0,47	6,5	5,0	3
5°	3,5	3,69	3,6	7,5	6,0	
7°	1,64	1,61	1,72	6,5	5,0	
9°	0,32	0,69	0,33	2	1,5	
11°	3,37	3,36	3,28	4,5	3,5	
13°	2,54	2,42	2,66	4	3,0	
15°	0,41	0,68	0,36	1	0,5	
17°	1,54	2,03	1,84	2,5	2,0	
19°	1,69	1,49	1,69	2	1,5	
21°	0,47	0,48	0,4	1	0,5	
23°	1,98	1,79	1,85	2	1,5	
25°	1,45	1,37	1,29	1,5	1,5	
27°	0,43	0,5	0,48	0,5		
29°	0,92	0,83	0,91	1		
31°	0,93	0,89	0,95	1		
33°	0,45	0,43	0,48	0,5		
35°	0,98	0,84	0,91	1		
37°	0,92	0,87	0,82	1		
39°	0,45	0,43	0,39	0,5		
41°	0,82	0,92	0,90	1		

Fonte: De autoria própria (2025).

4.1.5 Distorções Harmônicas de Corrente

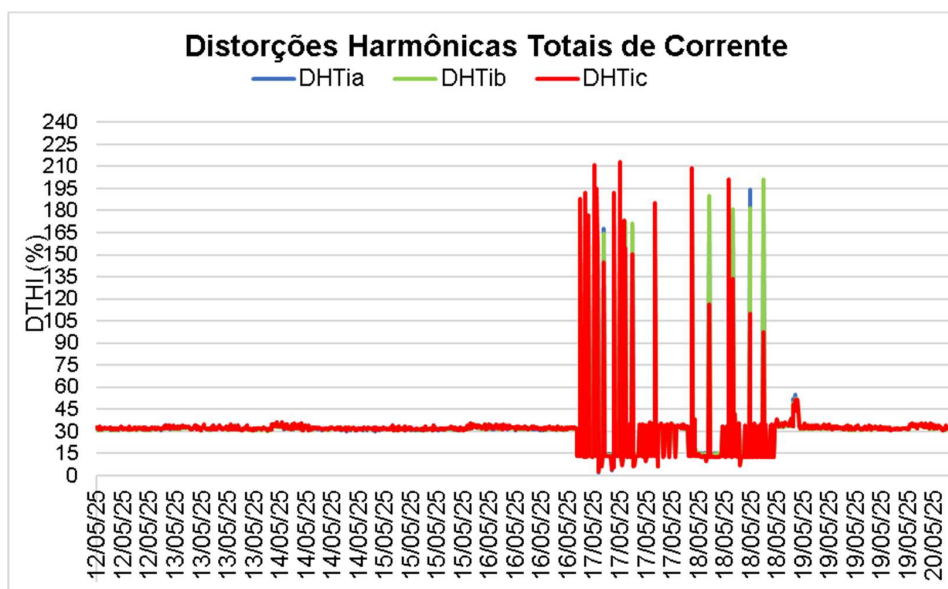
4.1.5.1 Distorções Harmônicas Totais de Corrente (DHT_i)

O gráfico da Figura 36 apresenta os níveis de distorções harmônicas totais de corrente DHT_i em cada uma das fases. Os valores indicados correspondem ao percentual que o valor eficaz da distorção harmônica total representa em relação ao valor eficaz da componente fundamental da corrente.

Observa-se que, durante o período entre os dias 17/05 e 18/05 em que o compressor opera com carga leve, os valores de DHT_i atingiram valores máximos próximos de 180%. Como nesse período a corrente fundamental apresenta magnitude reduzida, tem-se como resultado uma DHT_i elevada. No entanto, esse aumento não

representa um problema para a instalação, uma vez que a corrente fundamental é baixa.

Figura 36 - Distorções Harmônicas Totais da Medição de Corrente.



Fonte: De autoria própria (2025).

Levando-se em consideração que, para a análise da distorção harmônica de corrente, devem ser utilizadas medições válidas realizadas com o compressor operando em carga nominal, será considerado o período compreendido entre os dias 12/05 e 16/05.

A norma IEEE 519 recomenda limites para a distorção harmônica total de corrente em função da razão entre a corrente de curto-circuito no ponto de conexão e a corrente total demandada pela carga. Considerando a corrente demandada total de 251 A, correspondente à potência nominal do compressor de 200 CV, e o nível de curto-circuito calculado anteriormente de 30,43 kA, obtém-se uma razão de aproximadamente 120. De acordo com essa razão, o limite de distorção harmônica total de corrente permitido é de 15%, conforme apresentado no Anexo C.

A Tabela 7 apresenta os valores máximos, mínimos e médios da distorção harmônica total de corrente em todas as fases, referentes ao período de 12/05 a 16/05.

Observa-se que os níveis de distorção harmônica de corrente estão acima dos limites recomendados pela norma IEEE 519 (1992), evidenciando que o

funcionamento do compressor acionado por controle de velocidade variável provoca elevadas distorções harmônicas de corrente, conforme descrito na literatura estudada sobre o tema.

Tabela 7 – Comparação das DHT_i medidas com a Norma IEEE 519.

	Valores Medidos			Norma de Análise IEEE 519 (DHT_i)
	Fase A	Fase B	Fase C	
Máximo	36,82%	36,85%	37,27%	< 15%
Mínimo	30,03%	30,15%	30,39%	
Média	32,19%	32,18%	32,49%	

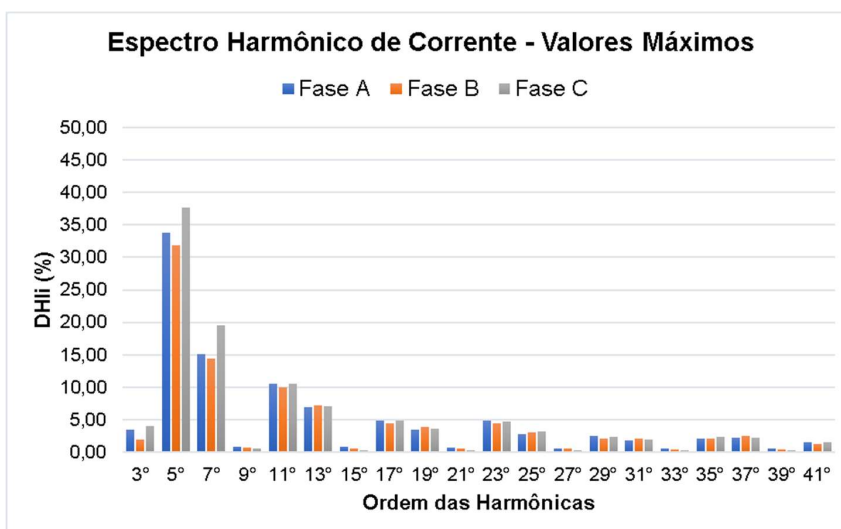
Fonte: De autoria própria (2025).

4.1.5.2 Espectro de Frequência de Corrente

A Figura 37 apresenta o espectro harmônico com os valores máximos das distorções harmônicas individuais de corrente DHT_i em todas as fases, no período de 12/05 a 16/05.

Através do espectro harmônico, é possível analisar quais componentes harmônicas de corrente mais influenciam na DHT_i . Além disso, essa ferramenta permite determinar o filtro sintonizado para atenuação de ordens harmônicas específicas.

Figura 37- Espectro de Frequência da Medição de Corrente – Valores Máximos



Fonte: De autoria própria (2025).

Fica evidente através do espectro a presença das harmônicas de corrente da ordem de $6n \pm 1$, ou seja, de quinta, sétima, décima primeira, décima terceira ordem, o que já era esperado por se tratar de um retificador trifásico, de acordo com o que foi observado na literatura estudada.

A Tabela 8, além de apresentar os valores máximos das distorções harmônicas individuais de corrente, também compara-os com os limites estabelecidos pelas normas IEEE 519 e IEC 61000-3-4.

Tabela 8: Comparação entre as Harmônicas Individuais de Corrente Medidas e os Limites Estabelecidos pelas Normas IEEE 519 e IEC 61000-3-4.

Ordem da Harmônica	Medição			Norma de Análise	
	Fase A (%)	Fase B (%)	Fase C (%)	IEEE 519	IEC 61000-3-4
3°	3,5	1,93	4,04	12	21,6
5°	33,72	31,92	37,66	12	10,7
7°	15,17	14,37	19,49	12	7,2
9°	0,85	0,71	0,61	12	3,8
11°	10,5	10,02	10,48	5,5	3,1
13°	6,91	7,26	7,09	5,5	2
15°	0,82	0,63	0,35	5,5	0,7
17°	4,93	4,49	4,87	5	1,2
19°	3,53	3,9	3,68	5	1,1
21°	0,72	0,59	0,27	5	0,6
23°	4,85	4,38	4,78	2	0,9
25°	2,85	3,11	3,18	2	0,8
27°	0,62	0,51	0,27	2	0,6
29°	2,45	2,16	2,35	2	0,7
31°	1,88	2,08	1,94	2	0,7
33°	0,62	0,43	0,35	2	0,6
35°	2,16	2,07	2,35	1	0,6
37°	2,26	2,45	2,28	1	0,6
39°	0,51	0,46	0,34	1	0,6
41°	1,54	1,32	1,49	1	0,6

Fonte: De autoria própria (2025).

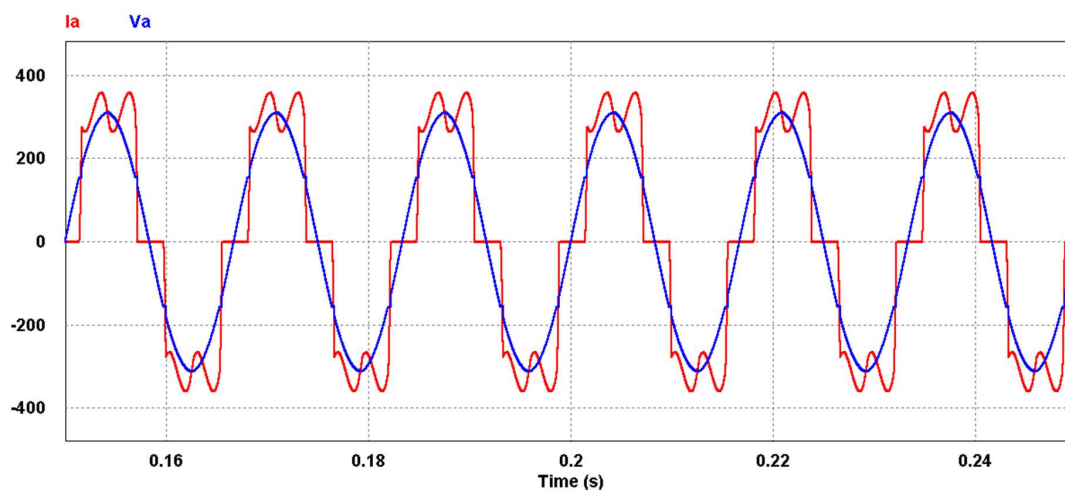
Por meio dos resultados obtidos na medição e comparando-os com os limites estabelecidos pelas normas da IEEE e IEC, fica evidente que a maior parte das componentes harmônicas de ordem $6n \pm 1$ ultrapassam os valores recomendados por

ambas as normas. Já as harmônicas de ordem $3n$, ou seja, terceira, nona, décima quinta, possuem seus valores abaixo ao recomendado.

4.2 Resultados da Simulação do Inversor de Frequência

A simulação do inversor de frequência sem a presença de entrada permitiu avaliar o comportamento da tensão e da corrente na entrada do inversor do compressor. A Figura 38 apresenta as formas de onda da tensão e da corrente simuladas na Fase A. Observa-se que a forma de onda da tensão permaneceu senoidal, com baixos níveis de distorção harmônica, estando, portanto, em conformidade com os limites estabelecidos pelas normas aplicáveis, de maneira semelhante ao observado nos resultados de medição. Já a forma de onda da corrente apresentou elevado conteúdo harmônico, embora se mantenha praticamente em fase com a tensão.

Figura 38: Simulação do Inversor de Frequência: Forma de Onda da Tensão e Corrente da Fonte.



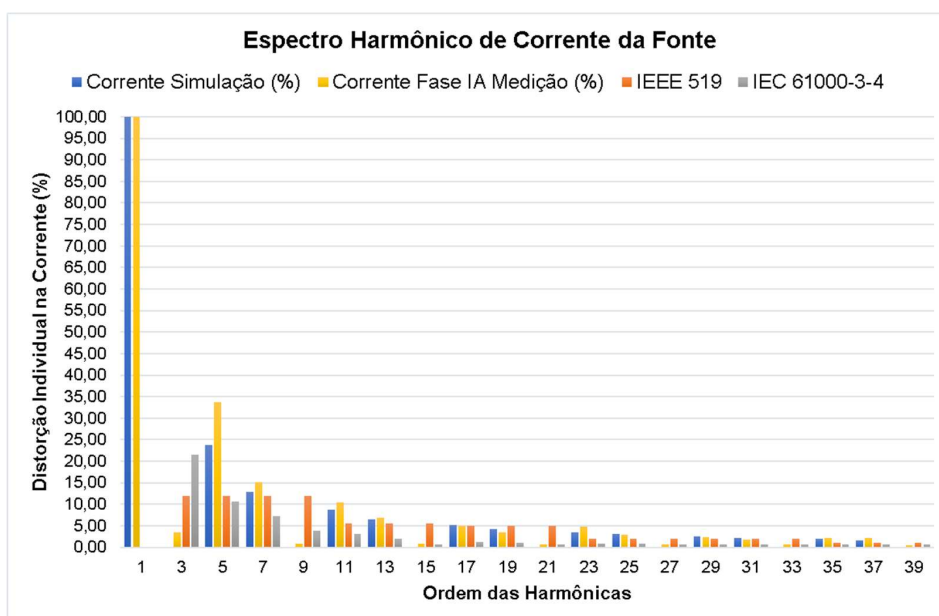
Fonte: De autoria própria (2025).

A Figura 39 apresenta o espectro harmônico da forma de onda da corrente simulada na fase A e o compara com o espectro harmônico da corrente medida na mesma fase. Evidencia-se a presença predominante de componentes harmônicas de ordem $6n \pm 1$, características de conversores de frequência baseados em retificadores

a diodos de seis pulsos e em conformidade com os resultados obtidos na medição. Verificou-se que essas harmônicas ultrapassam os limites de distorções harmônicas individuais estabelecidos pelas normas IEEE 519 e IEC 61000-3-4.

Percebe-se ainda que, na simulação, não houve presença de harmônicos da ordem de $3n$, comportamento previsto no referencial teórico, uma vez que esse tipo de componente tende a não aparecer em sistemas trifásicos equilibrados. Entretanto, na medição realizada em campo, verificou-se a presença de pequenas amplitudes dessas harmônicas. Essa diferença pode ser justificada pelos pequenos desequilíbrios de tensão entre fases existentes na instalação real, os quais permitem o surgimento de componentes harmônicas de sequência zero. Ainda assim, os valores observados foram baixos e não ultrapassaram os limites estabelecidos pelas normas.

Figura 39: Comparação entre a Simulação e a Medição do Espectro Harmônico de Corrente da Fonte.



Fonte: De autoria própria (2025).

Observou-se ainda, por meio da Tabela 9, que os valores obtidos para a corrente eficaz, o fator de potência e a distorção harmônica total de corrente da simulação foram bastante próximos aos valores medidos na Fase A em campo. Esse resultado valida a representatividade do modelo simulado e confirma a coerência entre o comportamento teórico e o comportamento real da planta. Entretanto, observa-se que

houve uma diferença significativa no valor da 5ª ordem harmônica entre a simulação e a medição.

Os valores de DHT_i ultrapassam os 15% estabelecidos pela IEEE 519, evidenciando a necessidade de aplicação de técnicas de filtragem para a atenuação das componentes harmônicas de corrente.

Tabela 9: Comparação da Simulação e Medição do DHTi e Fator de Potência.

	Corrente Eficaz	Fator de Potência	DHTi	Limite de DHTi IEEE 519
Simulação Fase A	256,13 A	0,93	30,67%	15,00%
Medição Fase A	254,67 A	0,95	32,00%	15,00%

Fonte: De autoria própria (2025).

4.3 Projeto do Filtro Sintonizado

A obtenção dos valores de resistência, capacitância e indutância dos filtros série ressonantes foi realizada por meio das Equações (2.8), (2.9) e (2.10) apresentadas anteriormente. Após o dimensionamento para a atenuação da ordem harmônica específica, procedeu-se à simulação da planta com a inserção do filtro projetado, permitindo obter novamente os valores da corrente fundamental e das correntes harmônicas. Dessa forma, verificou-se o atendimento às normas referentes aos limites de distorção harmônica, bem como o funcionamento adequado da planta.

Optou-se por realizar o dimensionamento dos filtros até a 19ª ordem harmônica, visando atender aos limites de distorção harmônica total de corrente e às distorções harmônicas individuais estabelecidos pelas normas aplicáveis.

A Tabela 10 apresenta os valores da corrente fundamental, da corrente da ordem harmônica específica obtidos por simulação, além do limite de distorção harmônica, do fator de qualidade utilizados nas equações para obtenção dos valores de resistência, indutância e capacitância utilizados nos filtros de sintonia.

No Apêndice B, é apresentado o cálculo detalhado do dimensionamento dos filtros até a 19ª ordem harmônica.

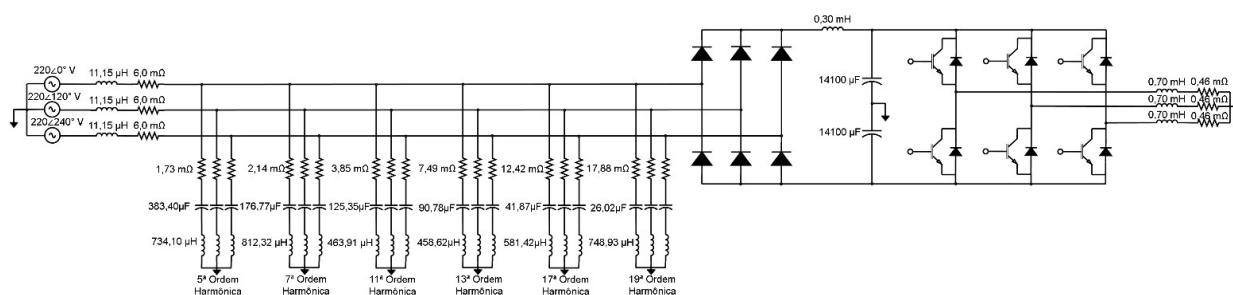
Tabela 10: Dimensionamento dos Elementos Passivos dos Filtros de Sintonia.

	I1	Ih	K	Q	R	L	C
5ª Ordem Harmônica	244,2 A	58,03 A	0,0002	800	1,73 mΩ	734,10 μH	383,4 μF
7ª Ordem Harmônica	244,6 A	29,55 A	0,00009	1000	2,14 mΩ	812,32 μH	176,77 μF
11ª Ordem Harmônica	245,66 A	20,21 A	0,00007	500	3,85 mΩ	463,91 μH	125,35 μF
13ª Ordem Harmônica	247,58 A	14,13 A	0,00008	300	7,49 mΩ	458,63 μH	90,78 μF
17ª Ordem Harmônica	249,31 A	11,22 A	0,00008	300	12,42 mΩ	581,42 μH	41,87 μF
19ª Ordem Harmônica	250,30 A	8,75 A	0,00008	300	17,88 mΩ	748,93 μH	26,02 μF

Fonte: De autoria própria (2025).

A Figura 40 apresenta o inversor de frequência com a implementação dos filtros para atenuação da 5ª, 7ª, 11ª, 13ª, 17ª e 19ª ordem harmônica.

Figura 40: Simulação do Inversor de Frequência com Filtro de Sintonia.



Fonte: De autoria própria (2025).

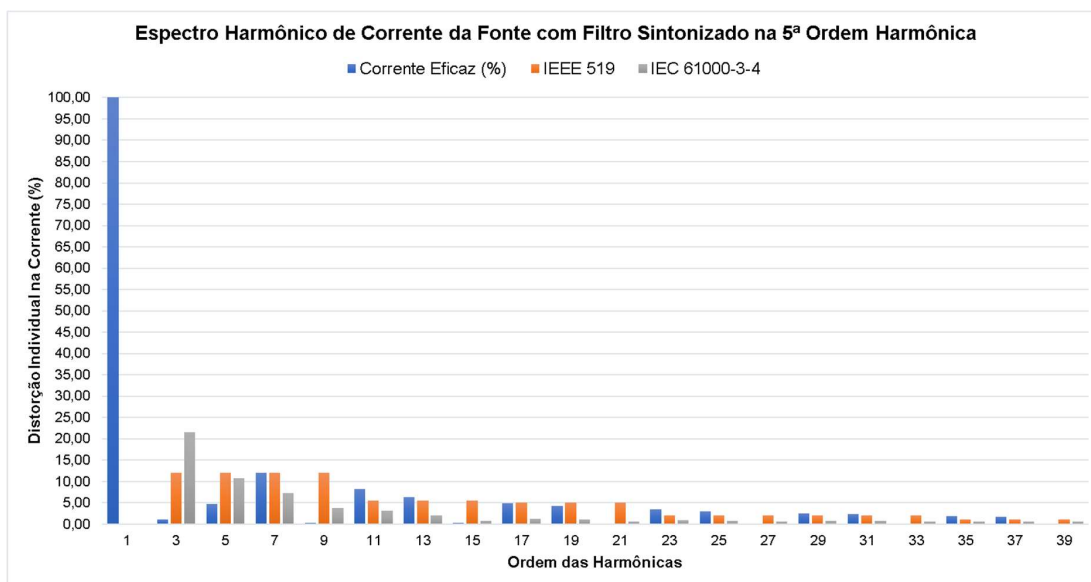
4.4 Resultados com a Aplicação do Filtro Sintonizado

A avaliação dos resultados foi realizada a partir da implementação e simulação individual de cada filtro sintonizado projetado. Para cada filtro, analisaram-se o módulo da corrente de cada ordem harmônica, a distorção harmônica total e o fator de potência, de modo a garantir o adequado funcionamento da planta com a implementação de cada filtro.

A Figura 41 apresenta os resultados obtidos para os módulos das distorções harmônicas individuais de corrente, em percentual, na entrada do inversor de

frequência, com a inserção do filtro sintonizado para atenuação da 5ª ordem harmônica.

Figura 41: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro para atenuação da 5ª ordem harmônica.

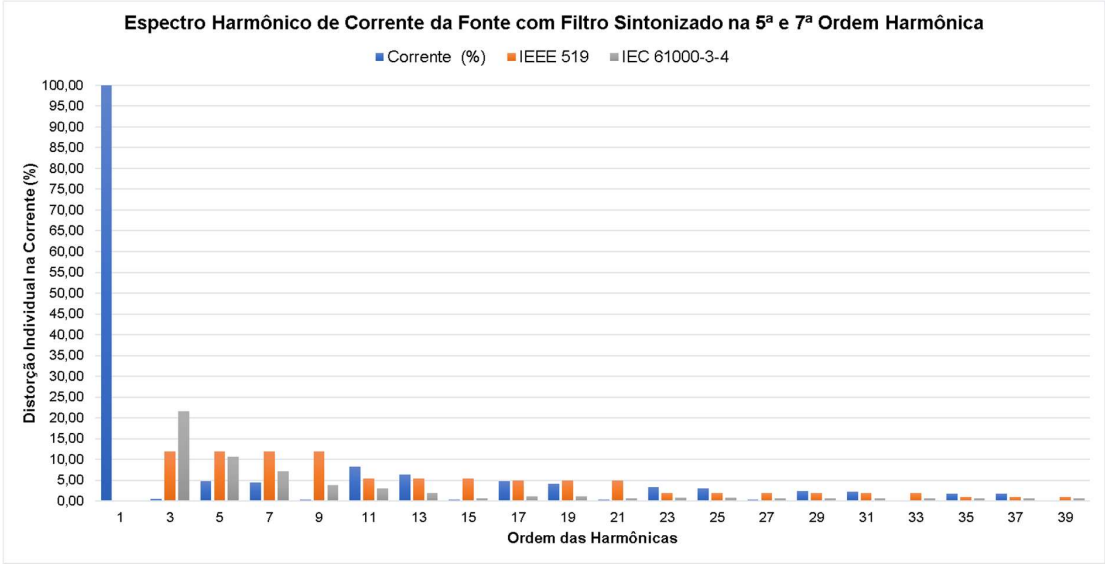


Fonte: De autoria própria (2025).

Redução da 5ª Harmônica:	de 23,76% para 4,79% - está de acordo com ambas as normas.
Redução da 7ª Harmônica:	de 12,84% para 12,08% - está fora de ambas as normas.
Redução da 11ª Harmônica:	de 8,68% para 8,28% - está fora de ambas as normas.
Redução da 13ª Harmônica:	de 6,44% para 6,31% - está fora de ambas as normas.
Redução da 17ª Harmônica:	de 5,21% para 4,94% - está fora da norma da IEC.
Redução da 19ª Harmônica:	de 4,24% para 4,18% - está fora da norma da IEC.
Redução da THD:	de 30,67% para 18,96% - está fora da IEEE 519.
Elevação do Fator de Potência:	de 0,95 para 0,98.

A Figura 42 traz os resultados das simulações feitas para os módulos das distorções harmônicas individuais de corrente, em percentual, na entrada do inversor de frequência, com a inserção do filtro sintonizado para atenuação da 5ª e 7ª ordem harmônica.

Figura 42: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro para atenuação da 5ª e 7ª ordem harmônica.

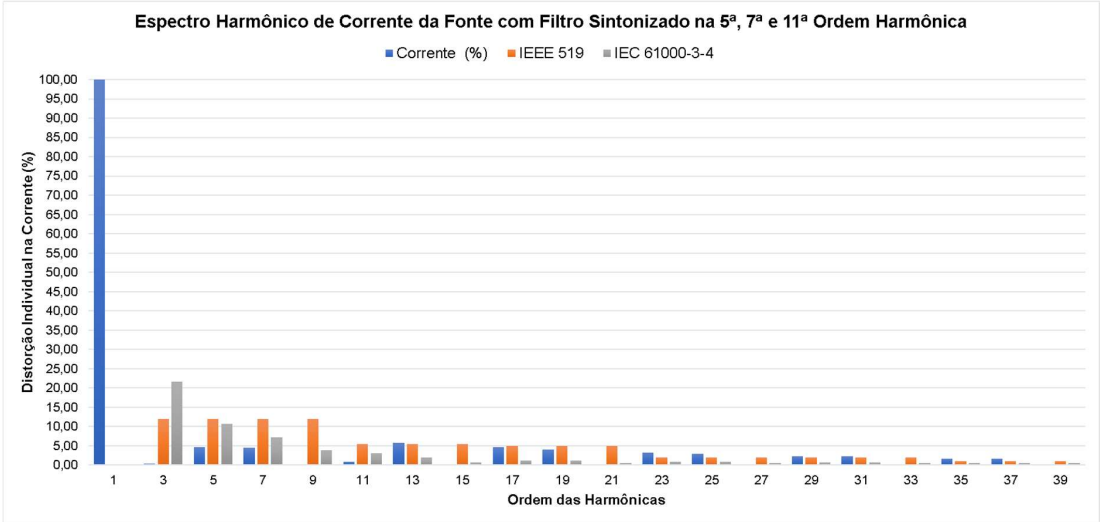


Fonte: De autoria própria (2025).

Elevação da 5ª Harmônica:	de 4,79% para 4,83% - está de acordo com ambas as normas.
Redução da 7ª Harmônica:	de 12,08% para 4,46% - está de acordo com ambas as normas.
Redução da 11ª Harmônica:	de 8,28% para 8,23% - está fora de ambas as normas.
Elevação da 13ª Harmônica:	de 6,31% para 6,35% - está fora de ambas as normas.
Redução da 17ª Harmônica:	de 4,94% para 4,86% - está fora da norma da IEC.
Elevação da 19ª Harmônica:	de 4,18% para 4,21% - está fora da norma da IEC.
Redução da THD:	de 18,96% para 14,79% - está de acordo com a IEEE.
Fator de Potência:	de 0,98 para 0,98.

A Figura 43 traz os valores das distorções harmônicas individuais de corrente observadas na entrada do inversor de frequência após a instalação dos filtros sintonizados projetados para atenuar as harmônicas de 5ª, 7ª e 11ª ordem.

Figura 43: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro para atenuação da 5ª, 7ª e 11ª ordem harmônica.

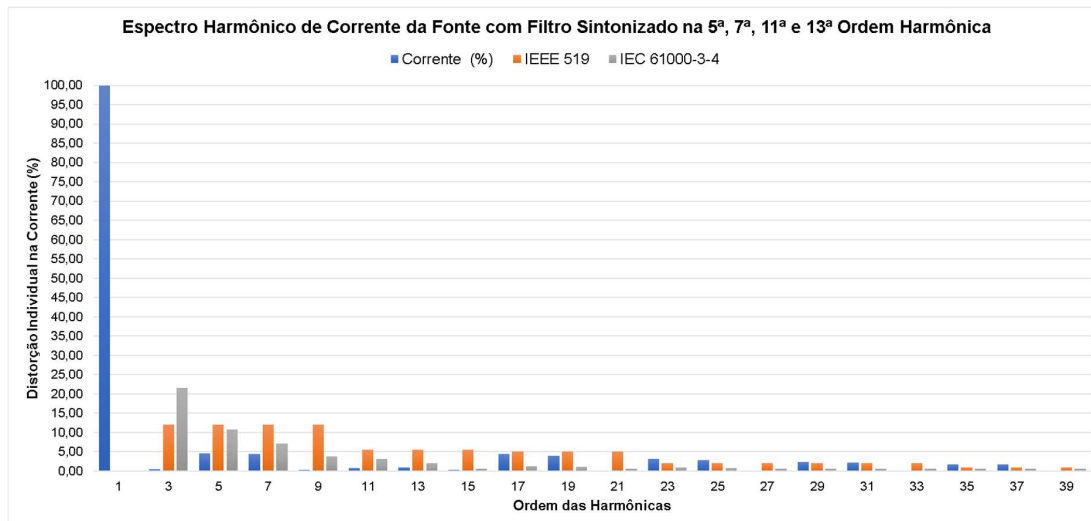


Fonte: De autoria própria (2025).

Redução da 5ª Harmônica:	de 4,83% para 4,74% - está de acordo com ambas as normas.
Redução da 7ª Harmônica:	de 4,46% para 4,45% - está de acordo com ambas as normas.
Redução da 11ª Harmônica:	de 8,23% para 0,83% - está de acordo com ambas as normas.
Redução da 13ª Harmônica:	de 6,35% para 5,71% - está fora de ambas as normas.
Redução da 17ª Harmônica:	de 4,86% para 4,68% - está fora da norma da IEC.
Redução da 19ª Harmônica:	de 4,21% para 4,03% - está fora da norma da IEC.
Redução da THD:	de 14,79% para 11,67% - está de acordo com a IEEE.
Redução do Fator de Potência:	de 0,98 para 0,97

A Figura 44 demonstra os valores percentuais dos módulos das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, considerando a aplicação dos filtros sintonizados destinados à atenuação das harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordem.

Figura 44: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro para atenuação da 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordem harmônica.

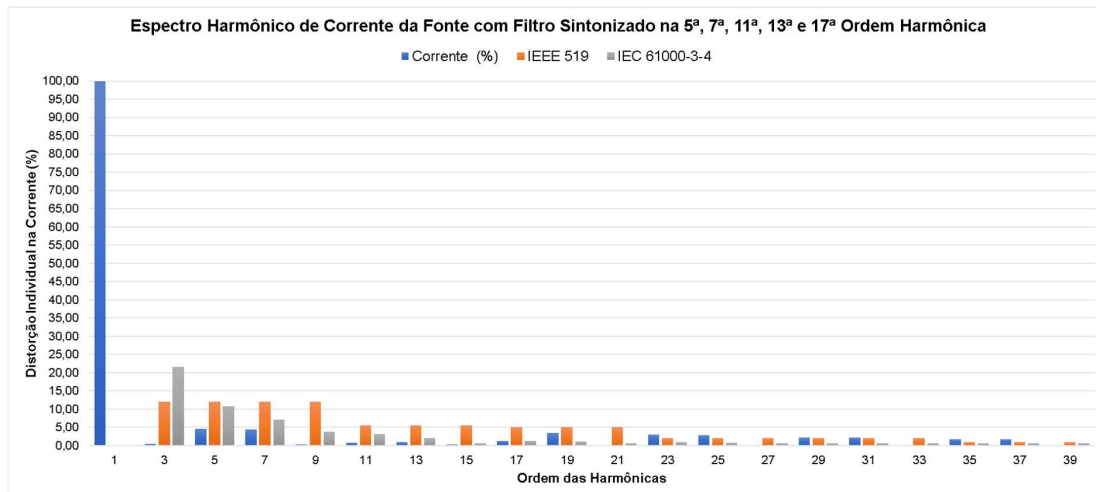


Fonte: De autoria própria (2025).

Redução da 5ª Harmônica:	de 4,74% para 4,66% - está de acordo com ambas as normas.
Redução da 7ª Harmônica:	de 4,45% para 4,43% - está de acordo com ambas as normas.
Redução da 11ª Harmônica:	de 0,83% para 0,73% - está de acordo com ambas as normas.
Redução da 13ª Harmônica:	de 5,71% para 0,95% - está de acordo com ambas as normas.
Redução da 17ª Harmônica:	de 4,68% para 4,50% - está fora da norma da IEC.
Redução da 19ª Harmônica:	de 4,03% para 3,88% - está fora da norma da IEC.
Redução da THD:	de 11,67% para 10,01% - está de acordo com a IEEE.
Fator de Potência:	de 0,97 para 0,97.

A Figura 45 apresenta os valores percentuais das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, obtidos após a inserção dos filtros sintonizados destinados à atenuação das harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª, 13ª e 17ª ordem.

Figura 45: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro para atenuação da 5ª, 7ª, 11ª, 13ª e 17ª ordem harmônica.

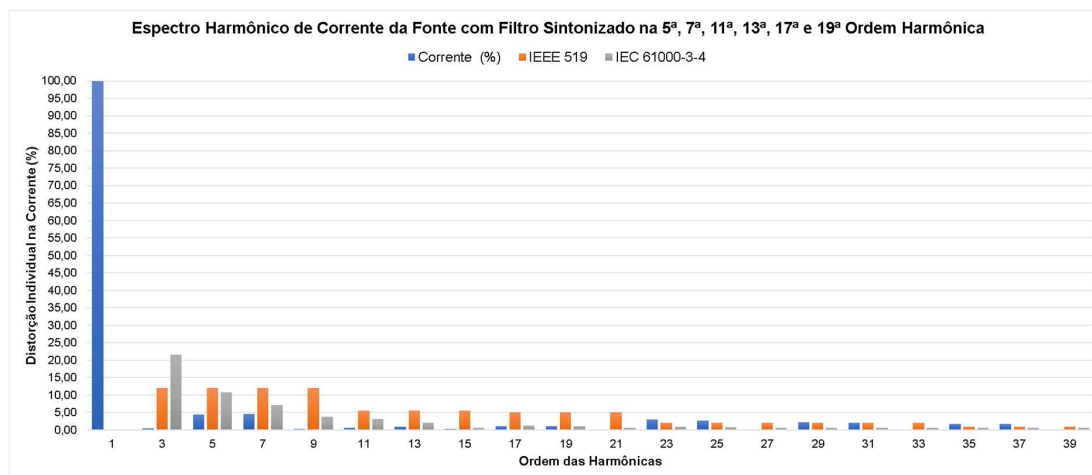


Fonte: De autoria própria (2025).

Redução da 5ª Harmônica:	de 4,66% para 4,55% - está de acordo com ambas as normas.
Elevação da 7ª Harmônica:	de 4,43% para 4,50% - está de acordo com ambas as normas.
Redução da 11ª Harmônica:	de 0,73% para 0,71% - está de acordo com ambas as normas.
Elevação da 13ª Harmônica:	de 0,95% para 1,01% - está de acordo com ambas as normas.
Redução da 17ª Harmônica:	de 4,50% para 1,19% - está de acordo com ambas as normas.
Redução da 19ª Harmônica:	de 3,88% para 3,49% - está fora da norma da IEC.
Redução da THD:	de 10,01% para 8,72% - está de acordo com a IEEE.
Fator de Potência:	de 0,97 para 0,97.

Através da Figura 46 são observados os resultados obtidos para os módulos das distorções harmônicas individuais de corrente, em valores percentuais, na entrada do inversor de frequência, com a inserção do filtro sintonizado para atenuação da 5ª, 7ª, 11ª, 13ª e 17ª e 19ª ordem harmônica.

Figura 46: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro para atenuação da 5ª, 7ª, 11ª, 13ª, 17ª e 19ª ordem harmônica.



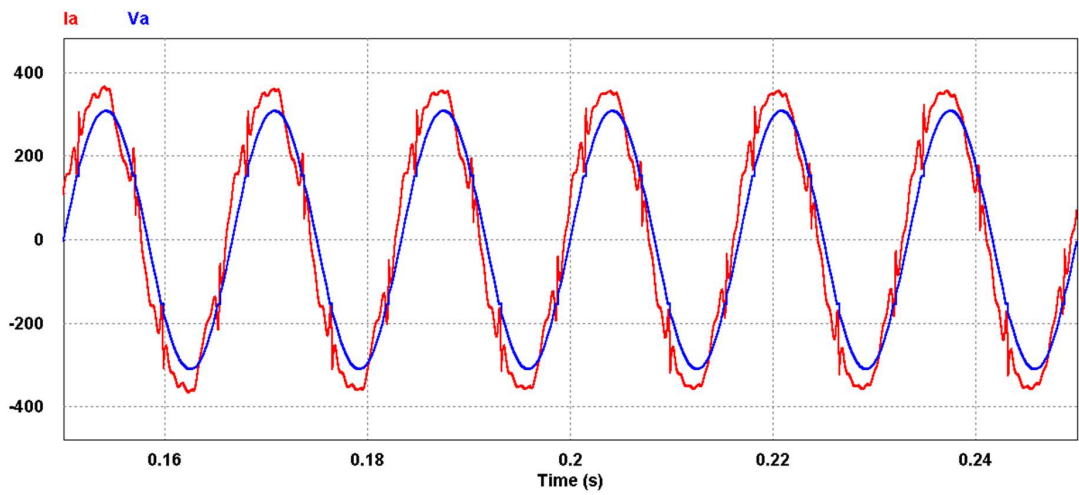
Fonte: De autoria própria (2025).

Redução da 5ª Harmônica:	de 4,55% para 4,43% - está de acordo com ambas as normas.
Elevação da 7ª Harmônica:	de 4,50% para 4,55% - está de acordo com ambas as normas.
Redução da 11ª Harmônica:	de 0,71% para 0,70% - está de acordo com ambas as normas.
Redução da 13ª Harmônica:	de 1,01% para 1,00% - está de acordo com ambas as normas.
Redução da 17ª Harmônica:	de 1,19% para 1,16% - está de acordo com ambas as normas.
Redução da 19ª Harmônica:	de 3,49% para 1,10% - está de acordo com ambas as normas.
Redução da THD:	de 8,72% para 7,98% - está de acordo com a IEEE.
Fator de Potência:	de 0,97 para 0,97.

A Figura 47 apresenta os resultados obtidos para as formas de onda de tensão e de corrente na entrada do inversor de frequência, após a implementação dos filtros sintonizados nas 5ª, 7ª, 11ª, 13ª, 17ª e 19ª ordens harmônicas. Já a Tabela 11 apresenta os valores de DHT_i e do fator de potência, comparando-os com os resultados da simulação do inversor de frequência sem a aplicação dos filtros de sintonia.

Observa-se que, com a aplicação dos filtros de sintonia, a DHT_i reduziu de 30,67% para 7,98%, representando uma diminuição de 22,69%. Além disso, o fator de potência manteve-se em 0,97, valor superior ao mínimo de 0,92 exigido pela concessionária. Dessa forma, após a implementação dos filtros, a DHT_i passou a atender ao limite de 15% estabelecido pela IEEE 519.

Figura 47: Simulação com Filtro Sintonizado: Forma de Onda da Tensão e Corrente da Fonte.



Fonte: De autoria própria (2025).

Tabela 11: Comparação de DHTi, FP e Corrente Eficaz com Filtro de Sintonia e sem Correção das Distorções Harmônicas.

	Com Banco de Filtro Sintonizado	Sem a Correção das Distorção Harmônicas
DHTi	7,98%	30,67%
Limite de DHTi IEEE 519	15%	15%
Fator de Potência	0,97	0,95
Corrente Eficaz	252,10 A	256,13 A

Fonte: De autoria própria (2025).

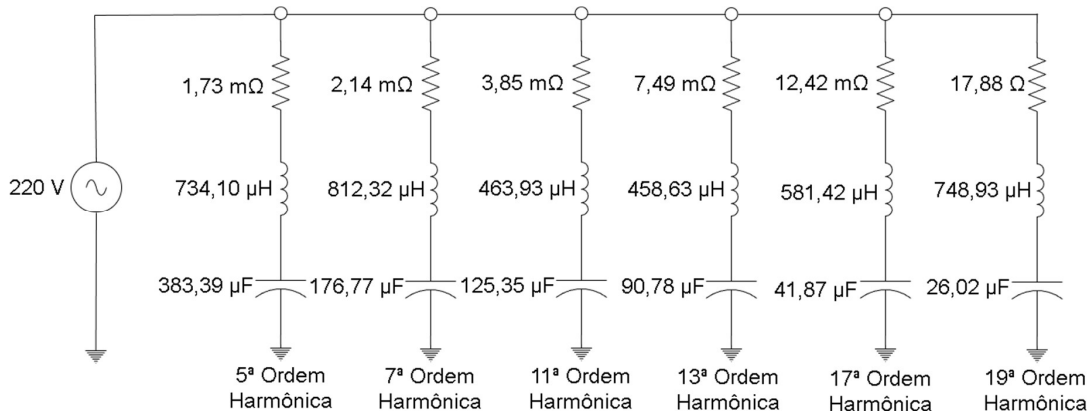
Observa-se, por meio do espectro harmônico de corrente apresentado na Figura 46, que a implementação dos filtros sintonizados para as harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª, 13ª, 17ª e 19ª ordem foi eficaz, mantendo essas componentes dentro dos limites estabelecidos pelas normas IEEE 519 e IEC 61000-3-4. Verifica-se apenas que as harmônicas superiores, entre a 23ª e a 39ª ordem, ultrapassam os limites da IEC 61000-3-4. Contudo, como apresentam pequenas magnitudes quando comparadas à corrente fundamental, não caracterizam um impacto crítico no desempenho do sistema, especialmente considerando que a distorção harmônica total de corrente permanece dentro dos limites.

4.4.1 Análise do Filtro Sintonizado no Domínio da Frequência

A análise da resposta dos filtros sintonizados no domínio da frequência foi realizada por meio de simulação. Para isso, consideraram-se circuitos ressonantes série para as harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª, 13ª, 17ª e 19ª ordem, operando de forma independente do sistema, conforme ilustrado na Figura 48. Utilizou-se uma fonte de tensão senoidal de 220 V eficaz, aplicando-se uma varredura de frequência de até 10 kHz.

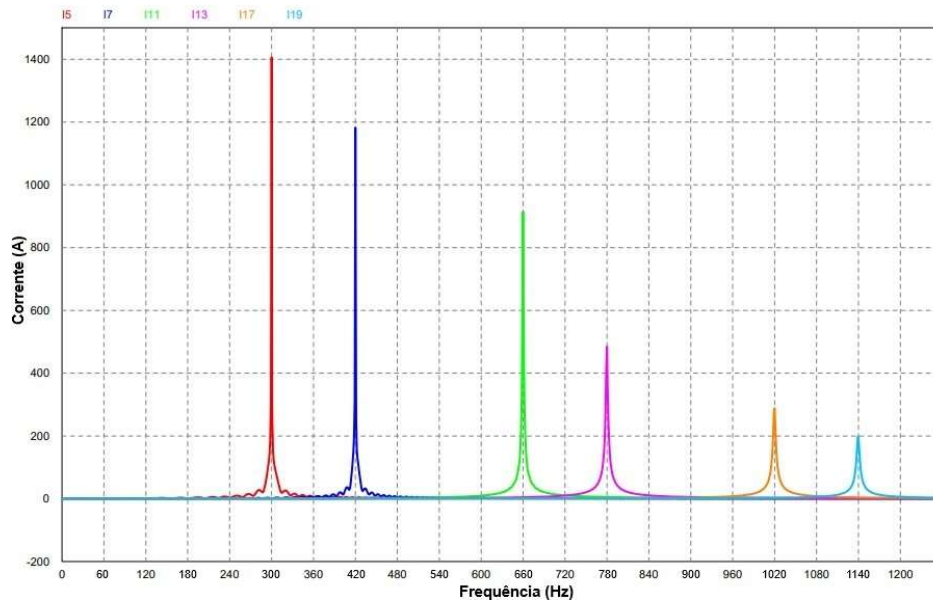
Para cada filtro de sintonia, observou-se o comportamento da corrente em função da variação da frequência da fonte de entrada, conforme ilustrado na Figura 49. Percebe-se que, próximo à frequência de sintonia, a corrente no filtro se eleva, pois, nessa frequência, a reatância capacitiva se anula com a reatância indutiva, restando apenas a impedância puramente resistiva. Dessa forma, a corrente é desviada para a terra.

Figura 48: Filtro para Atenuação da 5ª, 7ª, 9ª, 11ª, 13ª, 17ª e 19ª Ordem Harmônica.



Fonte: De autoria própria (2025).

Figura 49: Frequência de Ressonância do Filtro Sintonizado.



Fonte: De autoria própria (2025).

4.5 Projeto do Filtro Passa-Baixa LC

Para a realização do projeto do filtro passa-baixa LC de entrada, é necessário determinar as especificações no início do projeto.

$V_{in_ef} = 220 \text{ V}$	→ Tensão eficaz de entrada.
$f_{rede} = 60 \text{ Hz}$	→ Frequência da rede de alimentação.
$V_o = 535,8 \text{ V}$	→ Tensão de barramento.
$P_L = 150 \text{ kW}$	→ Potência no motor.
$\eta_{inv} = 95\%$	→ Rendimento estimado do inversor.

O primeiro passo é calcular o fator de tensão (4.1) e a corrente de saída (4.2).

$$FV = \frac{V_o}{\sqrt{2} \cdot V_{in_ef}} = \frac{535,8}{\sqrt{2} \cdot 220} = 1,72 \quad (4.1)$$

$$I_o = \frac{P_L}{\eta_{inv} \cdot V_o} = \frac{150.000}{0,95 \cdot 535,8} = 294,68 \text{ A} \quad (4.2)$$

Através do Ábaco da curva característica de saída, apresentado no Anexo J, verifica-se que a razão entre a corrente média de curto-circuito e a corrente de saída é de 0,56 para uma relação de frequências de 2,9. Portanto, a corrente média de curto-circuito é dada pela Expressão (4.3).

$$I_{cc_med} = \frac{I_o}{0,56} = \frac{294,68}{0,56} = 526,23 \text{ A} \quad (4.3)$$

Após determinar a corrente média de curto-circuito, tem-se a corrente eficaz de curto-circuito, conforme Equação (4.4).

$$I_{cc_ef} = \frac{I_{cc_med}}{0,9} = \frac{526,23}{0,9} = 584,70 \text{ A} \quad (4.4)$$

O valor da indutância é obtido através da Equação (4.5).

$$L = \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{in_ef}}{\pi^2 \cdot 2 \cdot f \cdot I_{cc_ef}} = \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot 220}{\pi^2 \cdot 2 \cdot 60 \cdot 584,70} = 1,348 \text{ mH} \quad (4.5)$$

Considerando a relação de frequências de 2,9, é possível determinar a frequência angular de corte (4.6) e o valor do capacitor (4.7).

$$\omega_{corte} = 2,9 \cdot \omega = 2,9 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60 = 1093,27 \text{ rad/s} \quad (4.6)$$

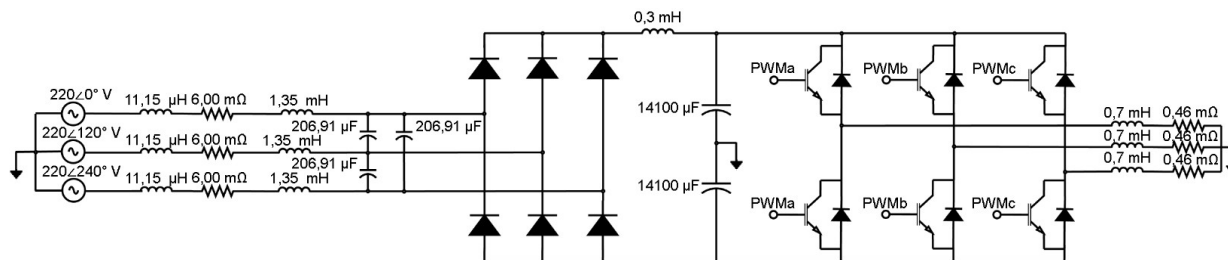
$$C = \frac{1}{3 \cdot (\omega_{corte})^2 \cdot L} = \frac{1}{3 \cdot (1093,27)^2} = 206,91 \text{ } \mu\text{F} \quad (4.7)$$

Pode-se dizer que frequência de corte do filtro será dada pela Expressão (4.8).

$$f_{corte} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{3 \cdot L \cdot C}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{3 \cdot 1,348 \text{ m} \cdot 206,91 \mu}} \cong 174 \text{ Hz} \quad (4.8)$$

A Figura 50 apresenta o circuito inversor de frequência com a utilização de filtro passa-baixa LC de entrada, utilizado na simulação.

Figura 50: Simulação do Inversor de Frequência com Filtro Passa-Baixa LC.



Fonte: De autoria própria (2025).

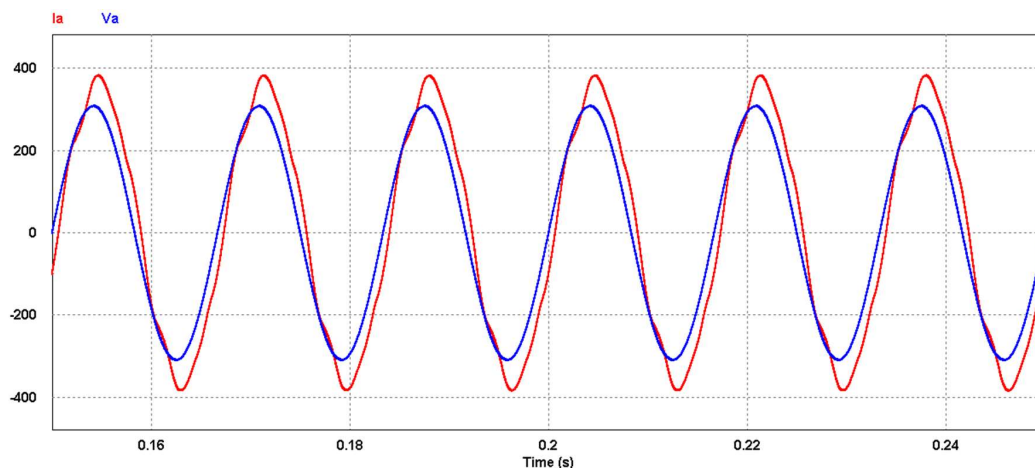
4.6 Resultados com a Aplicação do Filtro Passa-Baixa LC

Esta seção apresenta e discute os resultados obtidos por meio das simulações realizadas com a implementação do filtro passa-baixa LC na entrada do inversor de frequência. São analisadas as alterações nas formas de onda de corrente e tensão fornecidas pela fonte, bem como os impactos sobre a distorção harmônica e o fator de potência, permitindo avaliar o desempenho do filtro dentro das condições propostas.

Os resultados das formas de onda de tensão e de corrente na entrada do inversor de frequência, obtidos com a implementação do filtro projetado com frequência de corte de 174 Hz, podem ser observados na Figura 51. Já os valores de DHT_i e do fator de potência, comparados aos resultados da simulação do inversor de frequência sem a correção das distorções harmônicas, são apresentados na Tabela 12.

Percebe-se que, com a implementação da técnica de filtragem, a DHT_i foi reduzida de 30,67% para 5,51%, representando uma diminuição de 25,16%, atendendo ao limite estabelecido pela IEEE 519. O fator de potência também apresentou melhoria, passando de 0,95 para 0,97. No entanto, observou-se um pequeno aumento na corrente de entrada, de 256,13 A para 262,29 A. Esse acréscimo ocorre principalmente devido à corrente reativa consumida pelo capacitor do filtro, que eleva a corrente total absorvida da rede, mesmo com a melhoria na forma de onda da corrente.

Figura 51: Simulação com Passa-Baixa LC: Forma de Onda da Tensão e Corrente da Fonte.



Fonte: De autoria própria (2025).

Tabela 12: Comparação de DHTi, FP e Corrente Eficaz com Filtro Passa-Baixa LC e sem Correção das Distorções Harmônicas.

	Com Filtro Passa-Baixa LC	Sem a Correção das Distorção Harmônicas
DHTi	5,51%	30,67%
Limite de DHTi IEEE 519	15%	15%
Fator de Potência	0,97	0,95
Corrente Eficaz	262,29 A	256,13 A

Fonte: De autoria própria (2025).

Os valores eficazes dos módulos das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência podem ser observados na Tabela 13.

Tabela 13: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro passa-baixa LC de entrada.

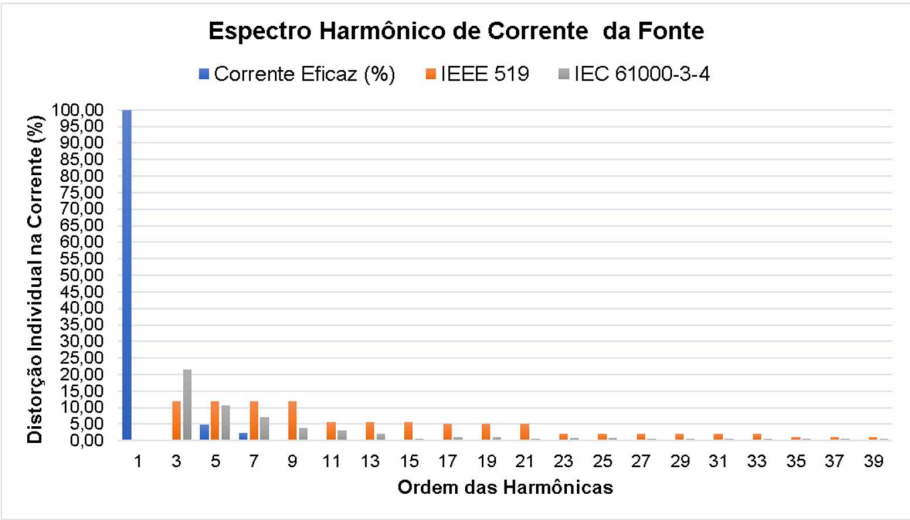
Ordem	Frequência (Hz)	Corrente Eficaz (A)	Corrente (%)	IEEE 519 (%)	IEC 61000-3-4 (%)
1	60,00	258,85	100,00	-	-
3	180,00	0,01	0,00	12	21,6
5	300,00	12,35	4,77	12	10,7
7	420,00	6,20	2,40	12	7,2
9	540,00	0,00	0,00	12	3,8
11	660,00	0,96	0,37	5,5	3,1

13	780,00	0,95	0,37	5,5	2
15	900,00	0,00	0,00	5,5	0,7
17	1020,00	0,34	0,13	5	1,2
19	1140,00	0,19	0,07	5	1,1
21	1260,00	0,00	0,00	5	0,6
23	1380,00	0,10	0,04	2	0,9
25	1500,00	0,09	0,04	2	0,8
27	1620,00	0,00	0,00	2	0,6
29	1740,00	0,06	0,02	2	0,7
31	1860,00	0,04	0,02	2	0,7
33	1980,00	0,00	0,00	2	0,6
35	2100,00	0,03	0,01	1	0,6
37	2220,00	0,02	0,01	1	0,6
39	2340,00	0,00	0,00	1	0,6

Fonte: De autoria própria (2025).

A Figura 52 apresenta o espectro harmônico da corrente da fonte.

Figura 52: Espectro Harmônico de Corrente da Fonte com Filtro Passa-Baixa LC de Entrada.



Fonte: De autoria própria (2025).

Verifica-se que a aplicação do filtro passa-baixa LC foi efetiva, uma vez que todas as harmônicas individuais, até a 39ª ordem, permaneceram dentro dos limites estabelecidos pelas normas IEEE 519 e IEC 61000-3-4. Observa-se uma pequena presença das componentes harmônicas de 5ª e 7ª ordem, enquanto as demais ordens foram praticamente eliminadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo identificar problemas relacionados à qualidade de energia elétrica causados pelo acionamento de um compressor rotativo de parafuso, com foco na caracterização das distorções harmônicas e na proposição de uma solução utilizando filtros passivos. Inicialmente, realizou-se um estudo bibliográfico referente aos compressores e sua forma de acionamento por meio de conversores de frequência. Além disso, desenvolveu-se uma revisão dos principais conceitos relacionados à qualidade de energia elétrica e às normas nacionais e internacionais aplicáveis.

A etapa de medição consistiu no registro das grandezas elétricas, por meio de um analisador de energia, instalado na entrada de alimentação do conversor de frequência do compressor. Verificou-se que não ocorreram problemas relacionados aos níveis de tensão ou picos de corrente durante o funcionamento do compressor.

A partir do estudo das medições das distorções harmônicas, observou-se, por meio da comparação com os limites definidos pelas normativas técnicas, que a distorção harmônica de tensão permaneceu, na maior parte do tempo, dentro dos valores estabelecidos. Dessa forma, as distorções harmônicas de tensão não se mostraram o principal fator associado aos problemas de qualidade de energia elétrica em compressor rotativo de parafuso.

Por outro lado, observou-se que as distorções harmônicas de corrente apresentaram componentes da ordem $6n \pm 1$, tanto nas medições quanto nas simulações, em conformidade com o que foi observado na literatura para conversores de frequência com retificador trifásico de seis pulsos. Além disso, os valores das distorções harmônicas de corrente observados, tanto nas medições quanto nas simulações sem implementação de filtros, apresentaram-se semelhantes e acima dos limites estabelecidos pela IEEE 519 e pela IEC 61000-3-4.

Assim, verificou-se que os principais problemas de qualidade de energia elétrica associados ao compressor estudado estão relacionados às distorções harmônicas de corrente de ordem $6n \pm 1$.

Constatou-se, por meio das medições, que quando o compressor opera em carga leve, as distorções harmônicas de corrente apresentam níveis elevados devido à redução da corrente fundamental. Esse comportamento é comum em acionamentos de velocidade variável e está em conformidade com a literatura estudada. Contudo,

tal condição não representa um problema crítico para a instalação, uma vez que a magnitude da corrente fundamental é baixa, mesmo que a distorção seja elevada.

Através das simulações, tanto a implementação dos filtros sintonizados para atenuação da 5^a, 7^a, 9^a, 11^a, 13^a, 17^a e 19^a quanto a implementação do filtro passa-baixa LC demonstraram eficazes na redução das distorções harmônicas de corrente, garantindo que o fator de potência se mante-se elevado na entrada do conversor de frequência do compressor.

Ressalta-se que os filtros sintonizados, por serem conectados em paralelo com a carga, não impõem queda de tensão e conduzem apenas as ordens harmônicas de corrente específicas para as quais foram projetados. No entanto, a necessidade de implementar múltiplos filtros para reduzir a distorção harmônica total de corrente tende a elevar a complexidade de instalação desse tipo de solução.

Por sua vez, o filtro passa-baixa LC exige que os indutores conectados em série suportem a corrente de linha da carga, o que demanda componentes mais robustos. Observou-se um pequeno aumento na corrente de entrada do sistema após sua implementação, efeito associado principalmente à corrente reativa consumida pelo capacitor do filtro, que eleva a corrente total absorvida da rede mesmo com a redução da distorção harmônica. Ainda assim, trata-se de um filtro menos sensível a mudanças no sistema elétrico quando comparado aos filtros sintonizados, além de apresentar boa mitigação das harmônicas acima da frequência de corte. Embora seja uma solução mais robusta, sua implementação tender a ser custosa devido ao porte dos componentes envolvidos.

Para dar continuidade a este estudo, sugere-se a implementação prática dos filtros passivos propostos na entrada de acionamentos de velocidade variável, acompanhada de medições em campo para validar experimentalmente a efetividade da solução apresentada. Além disso, recomenda-se a análise de topologias mais avançadas para mitigação harmônica, especialmente aquelas baseadas em filtros ativos. Diferentemente dos filtros passivos sintonizados, que apenas desviam as correntes harmônicas para o terra, os filtros ativos são capazes de extrair as componentes harmônicas da corrente e compensá-las, permitindo inclusive o aproveitamento dessa energia por meio de sua injeção no barramento CC do conversor. Esse tipo de abordagem pode aumentar o aproveitamento energético e reduzir ainda mais a distorção harmônica, constituindo uma linha promissora para pesquisas futuras.

REFERÊNCIAS

- ALVES, Mário Fabiano. **QEE – Qualidade da Energia Elétrica**. Minas Gerais, 2010.
- ALDABÓ, Ricardo. **Qualidade na Energia Elétrica**. São Paulo: Artliber, 2013.
- PAULILO, G. **Conceitos gerais sobre qualidade da energia**. O Setor Elétrico, 2013.
- RIBEIRO, T. C. dos Santos de Carvalho. **Qualidade da energia elétrica**. Editora e Distribuidora Educacional S.A, 2015.
- LEÃO, R. P. S.; SAMPAIO, R. F.; ANTUNES, F. L. M. **Harmônicos em Sistemas Elétricos**. Elsevier Editora Ltda, 2014.
- MORENO, Hilton. Instituto Brasileiro de Cobre. **Harmônicas nas Instalações Elétricas**. São Paulo, 2001.
- MARTINHO, Edson. **Distúrbios da Energia Elétrica**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2009.
- FERRACCI, Phillipe. **Power Quality. Cahier Technique n. 199**. Île de France: Schneider Electric, 2001.
- KUSKO, Alexander. **Power Quality in Electrical Systems**. The McGraw-Hill Companies, 2007.
- KASSICK, E. V. **Harmônicas em sistemas elétricos de baixa tensão**. Instituto de Eletrônica de Potência, UFSC, 2000.
- FRANCHI, C. M. **Inversores de Frequência: Teoria e Aplicações**. 2ª edição. Érica Ltda., 2013.
- BATSCHAUER, A. L. **Projeto de reatores eletrônicos para lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão de 250 W e 400 W. 2002**. 143 páginas. Dissertação de Mestrado, UFSC, 2002.
- PARKER. **Tecnologia Pneumática Industrial**. Parker Hannifin Corporation, 2007.
- ATLAS COPCO. **Manual do Ar Comprimido**. Atlas Copco, Bélgica, 2015.
- IEC 61000. **Electromagnetic Compatibility. International Electrotechnical Commission**. IEC, 2002.
- IEEE 519. **IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control In Electrical Power System**. IEEE, 1992.
- EN 50160. **Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution systems**. Comitê Europeu de Normatização, CEN, 2000.

ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Módulo 8. 2010.

IEC 61000-3-4. Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A. IEC, 1998.

DANFOSS. Guia de Programação VLT® AQUA Drive FC 202. 2015.

Apêndice A – Cálculo da Corrente de Curto-Circuito no Ponto de Conexão Comum (PCC).

Cálculo da impedância, resistência e reatância do transformador:

De acordo com a tabela do Anexo H, referente à impedância de saída do transformador do fabricante WEG, tem-se que os valores em pu da impedância e da resistência para um transformador de 1.500 kVA são:

$S_n = 1.500 \text{ kVA}$ Potência aparente do transformador.

$Z_{tper} = 6\%$ Impedância percentual do transformador.

$R_{tper} = 1,5\%$ Resistência percentual do transformador.

$V_n = 380 \text{ V}$ Tensão do secundário do transformador.

Convertendo os valores por unidade para valor real:

$$Z_{trafo} = \frac{Z_{tper} \cdot (V_n)^2}{S_n \cdot 100} = \frac{6,0 \cdot (380)^2}{1.500k \cdot 100} = 57,76 \mu\Omega \quad \text{Impedância do transformador.}$$

$$R_{trafo} = \frac{R_{tper} \cdot (V_n)^2}{S_n \cdot 100} = \frac{1,5 \cdot (380)^2}{1.500k \cdot 100} = 14,44 \mu\Omega \quad \text{Resistência do transformador.}$$

$$X_{trafo} = \sqrt{(Z_{trafo})^2 - (R_{trafo})^2} = \sqrt{(57,76\mu)^2 - (14,44\mu)^2} \\ = 55,93 \mu\Omega \quad \text{Reatância do transformador.}$$

Cálculo da impedância, resistência e reatância do cabo que parte do secundário do transformador e alimenta o quadro de força na subestação:

A seção do alimentador é de $8 \times 240 \text{ mm}^2$ (oito condutores por fase) e, de acordo com o Anexo I, os valores de resistência elétrica e reatância indutiva, em Ω/km são:

$$R_{ca1} = 0,094 \quad \text{Resistência em } \Omega/\text{km} \text{ do condutor.}$$

$$X_{l1} = 0,098 \quad \text{Reatância indutiva em } \Omega/\text{km} \text{ do condutor.}$$

Considerando que o comprimento do condutor é de 12 metros, tens que o valor de resistência e reatância indutiva serão:

$$R_{c1} = \frac{\frac{R_{ca1} \cdot 12}{1000}}{8} = \frac{\frac{0,094 \cdot 12}{1000}}{8} = 141 \mu\Omega \quad \text{Resistência do condutor.}$$

$$X_{c1} = \frac{\frac{X_{l1} \cdot 12}{1000}}{8} = \frac{\frac{0,098 \cdot 12}{1000}}{8} = 147 \mu\Omega \quad \text{Reatância indutiva do condutor.}$$

Cálculo da impedância, resistência e reatância do cabo que parte do quadro de força na subestação e alimentação compressor:

A seção do alimentador é de 185 mm^2 e, de acordo com o Anexo I, os valores de resistência elétrica e reatância indutiva, em Ω/km são:

$$R_{ca2} = 0,15 \quad \text{Resistência em } \Omega/\text{km} \text{ do condutor.}$$

$$X_{l2} = 0,10 \quad \text{Reatância indutiva em } \Omega/\text{km} \text{ do condutor.}$$

Considerando que o comprimento do condutor é de 40 metros, tens que o valor de resistência e reatância indutiva serão:

$$R_{c2} = \frac{R_{ca2} \cdot 40}{1000} = \frac{0,15 \cdot 40}{1000} = 6 \text{ m}\Omega \quad \text{Resistência do condutor.}$$

$$X_{c2} = \frac{X_{l2} \cdot 40}{1000} = \frac{0,10 \cdot 40}{1000} = 4 \text{ m}\Omega \quad \text{Resistência do condutor.}$$

Considerando o somatório das resistências e reatâncias do transformador e dos condutores, tens que a impedância total no PCC será:

$$R_{total} = R_{trafo} + R_{c1} + R_{c2} = (14,44\mu + 141\mu + 6m) = 6,15 \text{ m}\Omega \quad \text{Resistência total.}$$

$$X_{total} = X_{trafo} + X_{c1} + X_{c2} = (55,93\mu + 147\mu + 4m) = 4,20 \text{ m}\Omega \quad \text{Reatância Indutiva total.}$$

$$Z_{total} = 7,21 \text{ m} \angle 33,69^\circ \Omega \quad \text{Impedância total.}$$

Sabendo o valor da impedância total no PCC, é possível calcular o valor da corrente de curto-circuito simétrica.

$$I_{cs} = \frac{V_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{total}} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 7,21 \text{ m}} = 30,43 \text{ kA}$$

Apêndice B- Projeto do Filtro Sintonizado

Projeto do Filtro para Atenuação da 5ª Ordem Harmônica:

$$I_{1P} = 345,36 \text{ A} \quad \text{Corrente de pico da fundamental}$$

$$I_1 = \frac{I_{1P}}{\sqrt{2}} = \frac{345,36}{\sqrt{2}} = 244,21 \text{ A} \quad \text{Corrente eficaz da fundamental}$$

$$I_{5P} = 82,07 \text{ A} \quad \text{Corrente de pico da 5ª ordem harmônica}$$

$$I_5 = \frac{I_{5P}}{\sqrt{2}} = \frac{82,07}{\sqrt{2}} = 58,03 \text{ A} \quad \text{Corrente eficaz da 5ª ordem harmônica}$$

$$\frac{I_{CS}}{I_1} = \frac{30,43 \text{ kA}}{256,13 \text{ A}} = 118,81 \quad \text{Razão entre a corrente de curto-circuito no PCC pela corrente nominal}$$

Limites de distorções harmônica de corrente para sistema de baixa tensão (120 V à 69 kV eficaz)

**Limite de distorção harmônica de corrente para sistemas de baixa tensão
(120V à 69kV eficaz)**

Distorção Harmônica Máxima da corrente em percentagem de I_L						
h: Ordem das Harmônicas Ímpares						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	$50 \leq h < 100$	THD
<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
As harmônicas pares são limitadas à 25% do limite da harmônica ímpar imediatamente superior						
Não é permitido componente contínua (retificador de meia onda por exemplo)						
* Todos os equipamentos de geração de energia elétrica são limitados pelos valores desta linha, independente de sua capacidade de curto circuito I_{sc}/I_L						
I_{sc} : Corrente de curto circuito máxima no PCC						
I_L : Corrente máxima solicitada pela carga, na frequência fundamental, no PCC						

Tabela 1.1 - Limites de correntes e THD

Fonte: IEEE 519 (1992).

$$K_5 = 0,0002$$

Máxima distorção para 5ª ordem harmônica

$$R_5 = \frac{K_5 \cdot I_1}{(I_5^2 - K_5^2 \cdot I_1^2)} \cdot \left[R_s \cdot K_5 \cdot I_1 + \sqrt{(R_s \cdot I_5)^2 + (5 \cdot \omega \cdot L_s)^2 \cdot (I_5^2 - K_5^2 \cdot I_1^2)} \right]$$

$$R_5 = \frac{0,0002 \cdot 244,21}{(58,03^2 - 0,0002^2 \cdot 244,21^2)} \cdot [6,15m \cdot 0,0002 \cdot 244,21 + \dots]$$

$$\dots + \sqrt{(6,15m \cdot 58,03)^2 + (5 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 11,15\mu)^2 \cdot (58,03^2 - 0,0002^2 \cdot 244,21^2)}$$

$$R_5 = 1,73 \text{ m}\Omega$$

Resistência para 5ª ordem harmônica.

$$Q = 800$$

Fator de qualidade.

$$L_5 = \frac{R_5 \cdot Q}{5 \cdot \omega} = \frac{1,73m \cdot 800}{5 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60} = 734,10 \text{ }\mu\text{H} \quad \text{Indutância para 5ª ordem harmônica.}$$

$$C_5 = \frac{1}{5^2 \cdot \omega^2 \cdot L_5} = \frac{1}{5^2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 60)^2 \cdot 734,10\mu} = 383,40 \text{ }\mu\text{H} \quad \text{Capacitância para 5ª ordem harmônica.}$$

Projeto do Filtro para Atenuação da 7ª Ordem Harmônica:

$$I_{1P} = 345,92 \text{ A}$$

Corrente de pico da fundamental

$$I_1 = \frac{I_{1P}}{\sqrt{2}} = \frac{345,92}{\sqrt{2}} = 244,60 \text{ A} \quad \text{Corrente eficaz da fundamental}$$

$$I_{7P} = 41,79 \text{ A}$$

Corrente de pico da 7ª ordem harmônica

$$I_7 = \frac{I_{7P}}{\sqrt{2}} = \frac{41,79}{\sqrt{2}} = 29,55 \text{ A} \quad \text{Corrente eficaz da 7ª ordem harmônica}$$

$$K_7 = 0,00009 \quad \text{Máxima distorção para 7ª ordem harmônica}$$

$$R_7 = \frac{K_7 \cdot I_1}{(I_7^2 - K_7^2 \cdot I_1^2)} \cdot \left[R_s \cdot K_7 \cdot I_1 + \sqrt{(R_s \cdot I_7)^2 + (7 \cdot \omega \cdot L_s)^2 \cdot (I_7^2 - K_7^2 \cdot I_1^2)} \right]$$

$$R_7 = \frac{0,00009 \cdot 244,60}{(29,55^2 - 0,00009^2 \cdot 244,60^2)} \cdot [6,15m \cdot 0,00009 \cdot 244,60 + \dots]$$

$$\dots + \sqrt{(6,15m \cdot 29,55)^2 + (7 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 11,15\mu)^2 \cdot (29,55^2 - 0,00009^2 \cdot 244,60^2)}$$

$$R_7 = 2,14 \text{ m}\Omega \quad \text{Resistência para 7ª ordem harmônica.}$$

$$Q = 1000 \quad \text{Fator de qualidade.}$$

$$L_7 = \frac{R_7 \cdot Q}{7 \cdot \omega} = \frac{2,74m \cdot 1000}{7 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60} = 812,32 \text{ }\mu\text{H} \quad \text{Indutância para 7ª ordem harmônica.}$$

$$C_7 = \frac{1}{7^2 \cdot \omega^2 \cdot L_7} = \frac{1}{7^2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 60)^2 \cdot 812,32\mu} = 176,77 \text{ }\mu\text{H} \quad \text{Capacitância para 7ª ordem harmônica.}$$

Projeto do Filtro para Atenuação da 11ª Ordem Harmônica:

$$I_{1P} = 347,42 \text{ A} \quad \text{Corrente de pico da fundamental}$$

$$I_1 = \frac{I_{1P}}{\sqrt{2}} = \frac{347,42}{\sqrt{2}} = 245,66 \text{ A} \quad \text{Corrente eficaz da fundamental}$$

$$I_{11P} = 28,58 \text{ A} \quad \text{Corrente de pico da 11ª ordem harmônica}$$

$$I_{11} = \frac{I_{11P}}{\sqrt{2}} = \frac{28,58}{\sqrt{2}} = 20,21 \text{ A} \quad \text{Corrente eficaz da 11ª ordem harmônica}$$

$$K_{11} = 0,00007 \quad \text{Máxima distorção para 11ª ordem harmônica}$$

$$R_{11} = \frac{K_{11} \cdot I_1}{(I_{11}^2 - K_{11}^2 \cdot I_1^2)} \cdot \left[R_s \cdot K_{11} \cdot I_1 + \sqrt{(R_s \cdot I_{11})^2 + (11 \cdot \omega \cdot L_s)^2 \cdot (I_{11}^2 - K_{11}^2 \cdot I_1^2)} \right]$$

$$R_{11} = \frac{0,00007 \cdot 245,66}{(20,21^2 - 0,00007^2 \cdot 245,66^2)} \cdot [6,15m \cdot 0,00007 \cdot 245,66 + \dots]$$

$$\dots + \sqrt{(6,15m \cdot 20,21)^2 + (11 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 11,15\mu)^2 \cdot (20,21^2 - 0,00007^2 \cdot 245,66^2)}$$

$$R_{11} = 3,85 \text{ m}\Omega \quad \text{Resistência para 11ª ordem harmônica.}$$

$$Q = 500 \quad \text{Fator de qualidade.}$$

$$L_{11} = \frac{R_{11} \cdot Q}{11 \cdot \omega} = \frac{3,85m \cdot 500}{11 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60} = 463,91 \mu\text{H} \quad \text{Indutância para 11ª ordem harmônica.}$$

$$C_{11} = \frac{1}{11^2 \cdot \omega^2 \cdot L_{11}} = \frac{1}{11^2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 60)^2 \cdot 463,91\mu} = 125,45 \mu\text{H} \quad \text{Capacitância para 11ª ordem harmônica.}$$

Projeto do Filtro para Atenuação da 13ª Ordem Harmônica:

$$I_{1P} = 350,14 \text{ A} \quad \text{Corrente de pico da fundamental}$$

$$I_1 = \frac{I_{1P}}{\sqrt{2}} = \frac{350,14}{\sqrt{2}} = 247,58 \text{ A} \quad \text{Corrente eficaz da fundamental}$$

$$I_{13P} = 19,98 \text{ A} \quad \text{Corrente de pico da 13ª ordem harmônica}$$

$$I_{13} = \frac{I_{13P}}{\sqrt{2}} = \frac{19,98}{\sqrt{2}} = 14,13 \text{ A} \quad \text{Corrente eficaz da 13ª ordem harmônica}$$

$$K_{13} = 0,00008 \quad \text{Máxima distorção para 13ª ordem harmônica}$$

$$R_{13} = \frac{K_{13} \cdot I_1}{(I_{13}^2 - K_{13}^2 \cdot I_1^2)} \cdot \left[R_s \cdot K_{13} \cdot I_1 + \sqrt{(R_s \cdot I_{13})^2 + (13 \cdot \omega \cdot L_s)^2 \cdot (I_{13}^2 - K_{13}^2 \cdot I_1^2)} \right]$$

$$R_{13} = \frac{0,00008 \cdot 247,58}{(14,13^2 - 0,00008^2 \cdot 247,58^2)} \cdot [6,15m \cdot 0,00008 \cdot 247,58 + \dots]$$

$$\dots + \sqrt{(6,15m \cdot 14,13)^2 + (13 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 11,15\mu)^2 \cdot (14,13^2 - 0,00008^2 \cdot 247,58^2)}$$

$$R_{13} = 7,49 \text{ m}\Omega \quad \text{Resistência para 13ª ordem harmônica.}$$

$$Q = 300 \quad \text{Fator de qualidade.}$$

$$L_{13} = \frac{R_{13} \cdot Q}{13 \cdot \omega} = \frac{7,49m \cdot 300}{13 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60} = 458,62 \mu\text{H} \quad \text{Indutância para 13ª ordem harmônica.}$$

$$C_{13} = \frac{1}{13^2 \cdot \omega^2 \cdot L_{13}} = \frac{1}{13^2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 60)^2 \cdot 458,62\mu} = 90,78 \mu\text{H} \quad \text{Capacitância para 13ª ordem harmônica.}$$

Projeto do Filtro para Atenuação da 17ª Ordem Harmônica:

$$I_{1P} = 352,58 \text{ A} \quad \text{Corrente de pico da fundamental}$$

$$I_1 = \frac{I_{1P}}{\sqrt{2}} = \frac{352,58}{\sqrt{2}} = 249,31 \text{ A} \quad \text{Corrente eficaz da fundamental}$$

$$I_{17P} = 15,87 \text{ A} \quad \text{Corrente de pico da 17ª ordem harmônica}$$

$$I_{17} = \frac{I_{17P}}{\sqrt{2}} = \frac{15,87}{\sqrt{2}} = 11,22 \text{ A} \quad \text{Corrente eficaz da 17ª ordem harmônica}$$

$$K_{17} = 0,00008 \quad \text{Máxima distorção para 17ª ordem harmônica}$$

$$R_{17} = \frac{K_{17} \cdot I_1}{(I_{17}^2 - K_{17}^2 \cdot I_1^2)} \cdot \left[R_s \cdot K_{17} \cdot I_1 + \sqrt{(R_s \cdot I_{17})^2 + (17 \cdot \omega \cdot L_s)^2 \cdot (I_{17}^2 - K_{17}^2 \cdot I_1^2)} \right]$$

$$R_{17} = \frac{0,00008 \cdot 249,31}{(11,22^2 - 0,00008^2 \cdot 249,31^2)} \cdot [6,15m \cdot 0,00008 \cdot 249,31, + \dots]$$

$$\dots + \sqrt{(6,15m \cdot 11,22)^2 + (17 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 11,15\mu)^2 \cdot (11,22^2 - 0,00008^2 \cdot 249,31^2)}$$

$$R_{17} = 12,42 \text{ m}\Omega \quad \text{Resistência para 17ª ordem harmônica.}$$

$$Q = 300 \quad \text{Fator de qualidade.}$$

$$L_{17} = \frac{R_{17} \cdot Q}{17 \cdot \omega} = \frac{12,42m \cdot 300}{17 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60} = 581,42 \text{ }\mu\text{H} \quad \text{Indutância para 17ª ordem harmônica.}$$

$$C_{17} = \frac{1}{17^2 \cdot \omega^2 \cdot L_{17}} = \frac{1}{17^2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 60)^2 \cdot 581,42\mu} = 41,87 \text{ }\mu\text{H} \quad \text{Capacitância para 17ª ordem harmônica.}$$

Projeto do Filtro para Atenuação da 19ª Ordem Harmônica:

$$I_{1P} = 353,98 \text{ A} \quad \text{Corrente de pico da fundamental}$$

$$I_1 = \frac{I_{1P}}{\sqrt{2}} = \frac{353,98}{\sqrt{2}} = 250,30 \text{ A} \quad \text{Corrente eficaz da fundamental}$$

$$I_{19P} = 12,37 \text{ A} \quad \text{Corrente de pico da 19ª ordem harmônica}$$

$$I_{19} = \frac{I_{19P}}{\sqrt{2}} = \frac{12,37}{\sqrt{2}} = 8,74 \text{ A} \quad \text{Corrente eficaz da 19ª ordem harmônica}$$

$$K_{19} = 0,00008 \quad \text{Máxima distorção para 19ª ordem harmônica}$$

$$R_{19} = \frac{K_{19} \cdot I_1}{(I_{19}^2 - K_{19}^2 \cdot I_1^2)} \cdot \left[R_s \cdot K_{19} \cdot I_1 + \sqrt{(R_s \cdot I_{19})^2 + (19 \cdot \omega \cdot L_s)^2 \cdot (I_{19}^2 - K_{19}^2 \cdot I_1^2)} \right]$$

$$R_{19} = \frac{0,00008 \cdot 250,30}{(8,74^2 - 0,00008^2 \cdot 250,30^2)} \cdot [6,15m \cdot 0,00008 \cdot 250,30, + \dots]$$

$$\dots + \sqrt{(6,15m \cdot 8,74)^2 + (19 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 11,15\mu)^2 \cdot (8,74^2 - 0,00008^2 \cdot 250,30^2)}$$

$$R_{19} = 17,88 \text{ m}\Omega \quad \text{Resistência para 19ª ordem harmônica.}$$

$$Q = 300 \quad \text{Fator de qualidade.}$$

$$L_{19} = \frac{R_{19} \cdot Q}{19 \cdot \omega} = \frac{17,88m \cdot 300}{19 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60} = 748,93 \mu\text{H} \quad \text{Indutância para 19ª ordem harmônica.}$$

$$C_{19} = \frac{1}{19^2 \cdot \omega^2 \cdot L_{19}} = \frac{1}{19^2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 60)^2 \cdot 748,93\mu} = 26,02 \mu\text{H} \quad \text{Capacitância para 19ª ordem harmônica.}$$

Apêndice C – Resultados da Simulação do Inversor de Frequência

A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos para os módulos das distorções harmônicas individuais de corrente, em valores eficazes, na entrada do inversor de frequência, sem a inserção de filtros.

Tabela 14: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, sem a utilização de filtros.

Ordem	Frequência (Hz)	Corrente Eficaz (A)	Corrente (%)	IEEE 519 (%)	IEC 61000-3-4 (%)
1	60,00	244,20	100,00	-	-
3	180,00	0,04	0,02	12	21,6
5	300,00	58,03	23,76	12	10,7
7	420,00	31,35	12,84	12	7,2
9	540,00	0,01	0,00	12	3,8
11	660,00	21,19	8,68	5,5	3,1
13	780,00	15,71	6,44	5,5	2
15	900,00	0,01	0,00	5,5	0,7
17	1020,00	12,72	5,21	5	1,2
19	1140,00	10,35	4,24	5	1,1
21	1260,00	0,01	0,00	5	0,6
23	1380,00	8,70	3,56	2	0,9
25	1500,00	7,41	3,04	2	0,8
27	1620,00	0,01	0,00	2	0,6
29	1740,00	6,30	2,58	2	0,7
31	1860,00	5,52	2,26	2	0,7
33	1980,00	0,01	0,00	2	0,6
35	2100,00	4,68	1,92	1	0,6
37	2220,00	4,17	1,71	1	0,6
39	2340,00	0,00	0,00	1	0,6

Fonte: De autoria própria (2025).

Apêndice D - Resultados com a Aplicação de Filtros Sintonizados

Tabela 15: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro para atenuação da 5ª ordem harmônica.

Ordem	Frequência (Hz)	Corrente Eficaz (A)	Corrente (%)	IEEE 519 (%)	IEC 61000-3-4 (%)
1	60,00	244,60	100,00	-	-
3	180,00	2,81	1,15	12	21,6
5	300,00	11,72	4,79	12	10,7
7	420,00	29,55	12,08	12	7,2
9	540,00	0,56	0,23	12	3,8
11	660,00	20,25	8,28	5,5	3,1
13	780,00	15,43	6,31	5,5	2
15	900,00	0,57	0,23	5,5	0,7
17	1020,00	12,07	4,94	5	1,2
19	1140,00	10,23	4,18	5	1,1
21	1260,00	0,47	0,19	5	0,6
23	1380,00	8,26	3,38	2	0,9
25	1500,00	7,44	3,04	2	0,8
27	1620,00	0,45	0,18	2	0,6
29	1740,00	5,96	2,44	2	0,7
31	1860,00	5,60	2,29	2	0,7
33	1980,00	0,41	0,17	2	0,6
35	2100,00	4,41	1,80	1	0,6
37	2220,00	4,28	1,75	1	0,6
39	2340,00	0,35	0,14	1	0,6

Fonte: De autoria própria (2025).

Tabela 16: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro para atenuação da 5ª e 7ª ordem harmônica.

Ordem	Frequência (Hz)	Corrente Eficaz (A)	Corrente (%)	IEEE 519 (%)	IEC 61000-3-4 (%)
1	60,00	245,66	100,00	-	-
3	180,00	1,16	0,47	12	21,6
5	300,00	11,87	4,83	12	10,7
7	420,00	10,95	4,46	12	7,2
9	540,00	0,71	0,29	12	3,8
11	660,00	20,21	8,23	5,5	3,1
13	780,00	15,61	6,35	5,5	2
15	900,00	0,84	0,34	5,5	0,7
17	1020,00	11,95	4,86	5	1,2
19	1140,00	10,34	4,21	5	1,1

21	1260,00	0,69	0,28	5	0,6
23	1380,00	8,16	3,32	2	0,9
25	1500,00	7,56	3,08	2	0,8
27	1620,00	0,66	0,27	2	0,6
29	1740,00	5,84	2,38	2	0,7
31	1860,00	5,69	2,31	2	0,7
33	1980,00	0,60	0,24	2	0,6
35	2100,00	4,29	1,74	1	0,6
37	2220,00	4,34	1,77	1	0,6
39	2340,00	0,51	0,21	1	0,6

Fonte: De autoria própria (2025).

Tabela 17: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro para atenuação da 5ª, 7ª e 11ª ordem harmônica.

Ordem	Frequência (Hz)	Corrente Eficaz (A)	Corrente (%)	IEEE 519 (%)	IEC 61000-3-4 (%)
1	60,00	247,59	100,00	-	-
3	180,00	0,94	0,38	12	21,6
5	300,00	11,74	4,74	12	10,7
7	420,00	11,01	4,45	12	7,2
9	540,00	0,72	0,29	12	3,8
11	660,00	2,06	0,83	5,5	3,1
13	780,00	14,13	5,71	5,5	2
15	900,00	0,70	0,28	5,5	0,7
17	1020,00	11,58	4,68	5	1,2
19	1140,00	9,99	4,03	5	1,1
21	1260,00	0,60	0,24	5	0,6
23	1380,00	8,01	3,24	2	0,9
25	1500,00	7,37	2,98	2	0,8
27	1620,00	0,58	0,23	2	0,6
29	1740,00	5,77	2,33	2	0,7
31	1860,00	5,57	2,25	2	0,7
33	1980,00	0,53	0,21	2	0,6
35	2100,00	4,27	1,73	1	0,6
37	2220,00	4,28	1,73	1	0,6
39	2340,00	0,46	0,18	1	0,6

Fonte: De autoria própria (2025).

Tabela 18: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro para atenuação da 5^a, 7^a, 11^a e 13^a ordem harmônica.

Ordem	Frequência (Hz)	Corrente Eficaz (A)	Corrente (%)	IEEE 519 (%)	IEC 61000-3-4 (%)
1	60,00	249,31	100,00	-	-
3	180,00	0,98	0,39	12	21,6
5	300,00	11,63	4,66	12	10,7
7	420,00	11,05	4,43	12	7,2
9	540,00	0,70	0,28	12	3,8
11	660,00	1,81	0,73	5,5	3,1
13	780,00	2,38	0,95	5,5	2
15	900,00	0,63	0,25	5,5	0,7
17	1020,00	11,22	4,50	5	1,2
19	1140,00	9,68	3,88	5	1,1
21	1260,00	0,54	0,22	5	0,6
23	1380,00	7,90	3,17	2	0,9
25	1500,00	7,23	2,90	2	0,8
27	1620,00	0,55	0,22	2	0,6
29	1740,00	5,71	2,29	2	0,7
31	1860,00	5,48	2,20	2	0,7
33	1980,00	0,49	0,20	2	0,6
35	2100,00	4,25	1,71	1	0,6
37	2220,00	4,23	1,70	1	0,6
39	2340,00	0,43	0,17	1	0,6

Fonte: De autoria própria (2025).

Tabela 19: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro para atenuação da 5^a, 7^a, 11^a, 13^a e 17^a ordem harmônica.

Ordem	Frequência (Hz)	Corrente Eficaz (A)	Corrente (%)	IEEE 519 (%)	IEC 61000-3-4 (%)
1	60,00	250,30	100,00	-	-
3	180,00	1,05	0,42	12	21,6
5	300,00	11,38	4,55	12	10,7
7	420,00	11,27	4,50	12	7,2
9	540,00	0,70	0,28	12	3,8
11	660,00	1,79	0,71	5,5	3,1
13	780,00	2,52	1,01	5,5	2
15	900,00	0,66	0,26	5,5	0,7
17	1020,00	2,98	1,19	5	1,2
19	1140,00	8,75	3,49	5	1,1
21	1260,00	0,53	0,21	5	0,6

23	1380,00	7,66	3,06	2	0,9
25	1500,00	7,03	2,81	2	0,8
27	1620,00	0,55	0,22	2	0,6
29	1740,00	5,60	2,24	2	0,7
31	1860,00	5,38	2,15	2	0,7
33	1980,00	0,49	0,19	2	0,6
35	2100,00	4,21	1,68	1	0,6
37	2220,00	4,19	1,67	1	0,6
39	2340,00	0,43	0,17	1	0,6

Fonte: De autoria própria (2025).

Tabela 20: Valores da simulação das distorções harmônicas individuais de corrente na entrada do inversor de frequência, com filtro para atenuação da 5^a, 7^a, 11^a, 13^a, 17^a e 19^a ordem harmônica.

Ordem	Frequência (Hz)	Corrente Eficaz (A)	Corrente (%)	IEEE 519 (%)	IEC 61000-3-4 (%)
1	60,00	250,94	100,00	-	-
3	180,00	1,04	0,42	12	21,6
5	300,00	11,13	4,43	12	10,7
7	420,00	11,42	4,55	12	7,2
9	540,00	0,71	0,28	12	3,8
11	660,00	1,76	0,70	5,5	3,1
13	780,00	2,52	1,00	5,5	2
15	900,00	0,69	0,28	5,5	0,7
17	1020,00	2,91	1,16	5	1,2
19	1140,00	2,81	1,10	5	1,1
21	1260,00	0,49	0,19	5	0,6
23	1380,00	7,48	2,98	2	0,9
25	1500,00	6,89	2,75	2	0,8
27	1620,00	0,54	0,22	2	0,6
29	1740,00	5,54	2,21	2	0,7
31	1860,00	5,32	2,12	2	0,7
33	1980,00	0,48	0,19	2	0,6
35	2100,00	4,18	1,67	1	0,6
37	2220,00	4,16	1,66	1	0,6
39	2340,00	0,44	0,17	1	0,6

Fonte: De autoria própria (2025).

Anexo A - Tensões nominais padronizadas e recomendadas para ligações trifásicas até 1 kV

Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV		
Tensão de Atendimento (TA)	Tensão de Linha - 380 V	Tensão de Fase - 220 V
Adequada	$350 \leq TL \leq 399$	$202 \leq TL \leq 231$
Precária	$331 \leq TL < 350$ ou $399 < TL \leq 403$	$191 \leq TL < 202$ ou $231 < TL \leq 233$
Crítica	$TL < 331$ ou $TL > 403$	$TL < 191$ ou $TL > 233$
TL - Tensões de Leitura em relação a tensão nominal (TN)		

Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV		
Tensão de Atendimento (TA)	Tensão de Linha - 380 V	Tensão de Fase - 220 V
Adequada	$350 \leq TL \leq 399$	$202 \leq TL \leq 231$
Precária	$331 \leq TL < 350$ ou $399 < TL \leq 403$	$191 \leq TL < 202$ ou $231 < TL \leq 233$
Crítica	$TL < 331$ ou $TL > 403$	$TL < 191$ ou $TL > 233$
TL - Tensões de Leitura em relação a tensão nominal (TN)		

Fonte: Adaptado do Módulo 8 do Prodíst (2020).

Anexo B - Limites das distorções harmônicas totais de tensão - módulo 8 do PRODIST

Tensão Nominal (Vn)	Distorção Harmônica Total de Tensão (DHTv) [%]
$Vn \leq 1,0$ kV	10
$1,0$ kV $< Vn < 69$ kV	8
69 kV $\leq Vn < 230$ kV	5

Fonte: Adaptado do Módulo 8 do Prodíst (2020).

Anexo C - Limites para distorções harmônicas individuais de tensão - módulo 8 do PRODIST.

Ordem Harmônica		Distorção Harmônica de tensão - tensão nominal do barramento (Vn)			
		Vn ≤ 1kV	1kV < Vn ≤ 13,8kV	13,8kV < Vn ≤ 69kV	69kV < Vn < 230kV
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5%	6,0%	4,5%	2,5%
	7	6,5%	5,0%	4,0%	2,0%
	11	4,5%	3,5%	3,0%	1,5%
	13	4,0%	3,0%	2,5%	1,5%
	17	2,5%	2,0%	1,5%	1,0%
	19	2,0%	1,5%	1,5%	1,0%
	23	2,0%	1,5%	1,5%	1,0%
	25	2,0%	1,5%	1,5%	1,0%
	> 25	1,5%	1,0%	1,0%	0,5%
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5%	5,0%	4,5%	2,0%
	9	2,0%	1,5%	1,5%	1,0%
	15	1,0%	0,5%	0,5%	0,5%
	21	1,0%	0,5%	0,5%	0,5%
	> 21	1,0%	0,5%	0,5%	0,5%
Pares	2	2%	1,5%	1%	1%
	4	1%	1%	1%	0,5%
	6	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
	8	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
	10	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
	12	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
	>12	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%

Fonte: Adaptado do Módulo 8 do Prodíst (2020).

Anexo D - Limites de distorção da corrente para sistemas de distribuição – IEEE 519

Máxima corrente harmônica em % da corrente de carga							
Níveis de Tensão	I _{cc} / I _e	< 11	11≤n<17	17≤n<23	23≤n<35	35<n	DHTi
120 V a 69 kV	< 20	4,00%	2,00%	1,50%	0,60%	0,30%	5,00%
	20 < 50	7,00%	3,50%	2,50%	1,00%	0,50%	8,00%
	50 < 100	10,00%	4,50%	4,00%	1,50%	0,70%	12,00%
	100 < 1000	12,00%	5,50%	5,00%	2,00%	1,00%	15,00%
	> 1000	15,00%	7,00%	6,00%	2,50%	1,40%	20,00%
69 kV a 161 kV	< 20	2,00%	1,00%	0,75%	0,30%	0,15%	2,50%
	20 < 50	3,50%	1,75%	1,25%	0,50%	0,25%	4,00%
	50 < 100	5,00%	2,25%	2,00%	0,75%	0,35%	6,00%
	100 < 1000	6,00%	2,75%	2,50%	1,00%	0,50%	7,50%
	> 1000	7,50%	3,50%	3,00%	1,25%	0,70%	10,00%
> 161 kV	< 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%
I _{cc} - Corrente de Curto Circuito no PAC; I _e - Corrente demandada							

Fonte: Adaptado de IEEE-519 (1992).

Anexo E- Limites de distorção harmônica individual e total de tensão - IEEE 519.

Limites de distorção de tensão		
	Distorção individual	THD
69kV e abaixo	3%	5%
69001V até 161kV	1,50%	2,50%
Acima de 161kV	1%	1,50%

Fonte: IEEE-519 (1992).

Anexo F - Limites para distorções harmônicas individuais de corrente - IEC 61000-3-4:1998

Ordem Harmônica	Limite Harmônico Admissível (%)	Ordem Harmônica	Limite Harmônico Admissível (%)
3	21,6	19	1,1
5	10,7	21	≤ 0,6
7	7,2	23	0,9
9	3,8	25	0,8
11	3,1	27	≤ 0,6
13	2	29	0,7
15	0,7	31	0,7
17	1,2	≥ 33	≤ 0,6

Fonte: Adaptado de IEC 61000-3-4 (1998)

Anexo G - Valores das tensões harmônicas individuais para ordens até 25, expressos em porcentagem da tensão fundamental.

Harmônicos Ímpares				Harmônicos Pares	
Não Múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Ordem	Percentual da Tensão Nominal	Ordem	Percentual da Tensão Nominal	Ordem	Percentual da Tensão Nominal
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6 ... 24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

DHTv < 8%

Fonte: Adaptado de EN 50160 (2007)

Anexo H - Impedância de saída de transformadores em PU.

Impedância de saída de transformadores em PU.



KVA	150	225	300	500	750	1000	1500
Z%	3,5	4,5	4,5	4,5	5	5	6
R%	1,4	1,3	1,2	1,1	1,6	1,5	1,5

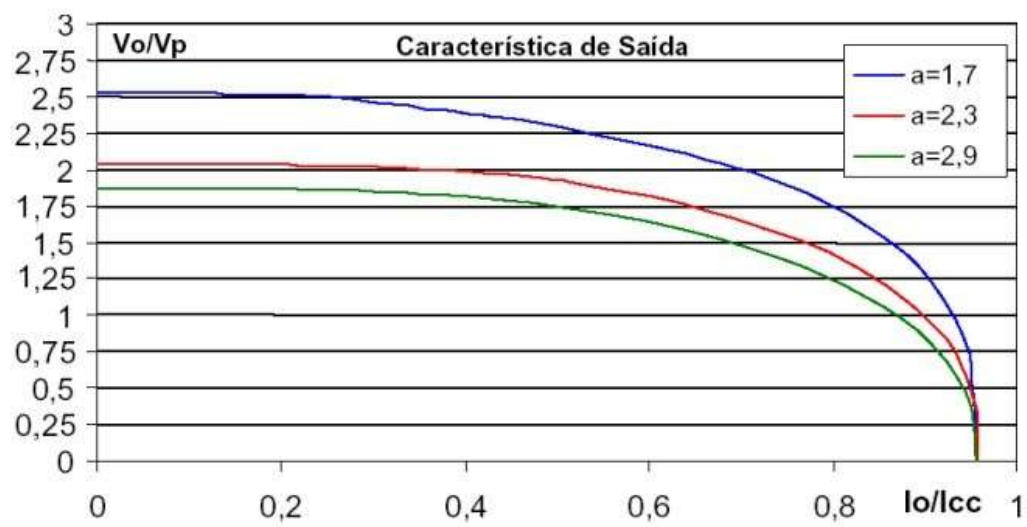
Fonte: Adaptado de WEG.

Anexo I - Valores de resistências elétricas e impedância indutivas de cabos isolados em PVC, em EPR e XLPE em condutos fechados (valores em Ω/km).

Seção (mm ²)	R _{cc} ^(A)	Condutos não-magnéticos ^(B) Circuitos FN / FF / 3F	
		R _{ca}	X _L
[1]	[2]	[3]	[4]
1,5	12,1	14,48	0,16
2,5	7,41	8,87	0,15
4	4,61	5,52	0,14
6	3,08	3,69	0,13
10	1,83	2,19	0,13
16	1,15	1,38	0,12
25	0,73	0,87	0,12
35	0,52	0,63	0,11
50	0,39	0,47	0,11
70	0,27	0,32	0,10
95	0,19	0,23	0,10
120	0,15	0,19	0,10
150	0,12	0,15	0,10
185	0,099	0,12	0,094
240	0,075	0,094	0,098
300	0,060	0,078	0,097
400	0,047	0,063	0,096
500	0,037	0,052	0,095
630	0,028	0,043	0,093
800	0,022	0,037	0,089
1000	0,018	0,033	0,088

Fonte: Adaptado de PIRELLI.

Anexo J - Característica de saída do PFC passivo.



Fonte: Slides de Aula CPF, Prof. Nodari.

Anexo K - Plaqueta de identificação do motor de indução do compressor em estudo.



Fonte: De autoria própria (2025).

Anexo L - Seleção da frequência de chaveamento do inversor de frequência.

14-01 Frequência de Chaveamento		
Option:	Função:	
		Selecionar a frequência de chaveamento do inversor. Alterar a frequência de chaveamento pode ajudar a reduzir o ruído acústico do motor. AVISO! O valor da frequência de saída do conversor de frequência nunca deve ser superior a 1/10 da frequência de chaveamento. Quando o motor estiver funcionando, ajuste a frequência de chaveamento no parâmetro 14-01 Frequência de Chaveamento até que o motor funcione o mais silenciosamente possível. Consulte também a parâmetro 14-00 Padrão de Chaveamento. Para obter informações sobre derating, consulte o guia de design relevante.
[0]	1,0 kHz	
[1]	1,5 kHz	
[2]	2,0 kHz	
[3]	2,5 kHz	
[4]	3,0 kHz	
[5]	3,5 kHz	
[6]	4,0 kHz	
[7]	5,0 kHz	
[8]	6,0 kHz	
[9]	7,0 kHz	
[10]	8,0 kHz	
[11]	10,0 kHz	
[12]	12,0kHz	
[13]	14,0 kHz	
[14]	16,0kHz	

Fonte: Danfoss (2015).