



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba

LEONARDO PARRA MELATI

Metodologias Gráficas para o Estudo e Avaliação da Qualidade de Energia Elétrica em Circuitos Monofásicos

Sorocaba

2023

LEONARDO PARRA MELATI

METODOLOGIAS GRÁFICAS PARA O ESTUDO E AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE
ENERGIA ELÉTRICA EM CIRCUITOS MONOFÁSICOS

Relatório do Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado ao Instituto de Ciência
e Tecnologia de Sorocaba, Universidade
Estadual Paulista (UNESP), como parte
dos requisitos para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Controle e
Automação.

Orientador: Prof. Dr. Helmo Kelis Morales
Paredes

Sorocaba
2023

M517m Melati, Leonardo Parra
Metodologias gráficas para o estudo e avaliação da qualidade de energia elétrica em circuitos monofásicos / Leonardo Parra Melati. -- Sorocaba, 2023
103 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba
Orientador: Helmo Kelis Morales Paredes

1. Energia elétrica. 2. MATLAB (Programa de computador). 3. Circuitos elétricos - Corrente alternada. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Instituto de Ciência e Tecnologia
Câmpus de Sorocaba

METODOLOGIAS GRÁFICAS PARA O ESTUDO E AVALIAÇÃO DA
QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA EM CIRCUITOS MONOFÁSICOS

LEONARDO PARRA MELATI

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
BACHAREL EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Prof. Dr. Everson Martins
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. HELMO KELIS MORALES PAREDES
Orientador/UNESP-Campus de Sorocaba

Prof. Dr. EDUARDO VERRI LIBERADO
UNESP – Campus de Sorocaba

Prof. Dr. LUIS ARMANDO DE ORO ARENAS
UNESP – Campus de Sorocaba

Junho de 2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, João e Edmara, por todo o apoio e incentivo durante a minha graduação, estando sempre ao meu lado mesmo nos momentos mais difíceis.

Agradeço também aos docentes do Instituto de Tecnologia e Ciência de Sorocaba (ICTS) pelos ensinamentos fundamentais para a minha formação acadêmica e profissional, em especial ao meu orientador, Prof. Dr. Helmo Kelis Morales Paredes, por me acompanhar durante toda a execução deste trabalho, e por me despertar o interesse pelo mundo da elétrica durante as aulas ministradas na graduação.

Gostaria também de agradecer a todos os servidores técnicos e administrativos da UNESP, que sempre me atenderam e me ajudaram prontamente durante os anos que estive na graduação. Agradeço também à toda a equipe da limpeza, manutenção, segurança e demais colaboradores da instituição por seu importante trabalho desempenhado no campus.

Finalmente, agradeço a todos os meus colegas de faculdade, por todos os momentos vividos e pela oportunidade de aprender a importância do trabalho em equipe.

RESUMO

A proposta deste trabalho deu-se acerca dos problemas causados pela má Qualidade de Energia Elétrica (QEE), materializados pelos grandes impactos financeiros, principalmente para o setor industrial. Parte-se da hipótese de que os métodos gráficos de monitoramento e visualização podem contribuir para a identificação e classificação de distúrbios que afetam a QEE. O objetivo geral deste trabalho é estudar os métodos gráficos de visualização dos distúrbios da QEE em circuitos monofásicos. Para tanto, foram elencados duas Estratégias, a primeira sendo as Trajetórias V-I ou Figuras de Lissajous e a segunda sendo as Elipses de Espaço Vetorial no Plano Complexo, ambas para a visualização dos distúrbios que afetam a QEE.

Durante o decorrer do trabalho foram realizadas diversas simulações utilizando o ambiente *Simulink* do *software Matlab*. Para melhor entendimento e organização do estudo, as simulações estão apresentadas neste trabalho em doze casos, que possibilitam analisar diversos distúrbios de QEE e suas formas de visualização.

Os resultados obtidos neste estudo sinalizam a possibilidade da utilização dos métodos gráficos citados como forma válida para visualização e classificação dos distúrbios de QEE.

Palavras-chave: qualidade de energia elétrica; figuras de Lissajous; elipses de espaço vetorial.

ABSTRACT

The purpose of this work was investigate the problems caused by poor Power Quality (PQ), materialized by the large financial impacts, mainly for the industrial sector. It starts from the hypothesis that graphical monitoring and visualization methods can contribute to the identification and classification of disturbances that affect PQ. The general objective of this work is to study the graphic methods of visualization of PQ disturbances in single-phase circuits. For that, two Strategies were listed, the first being the V-I Trajectories or Lissajous Figures and the second being the Vector Space Ellipses in the Complex Plane, both for the visualization of the disturbances that affect the PQ.

During the course of the work, several simulations were performed using the Simulink environment of Matlab software. For a better understanding and organization of the study, the simulations are presented in this work in twelve cases, which make it possible to analyze several PQ disturbances and their forms of visualization.

The results obtained in this study indicate the possibility of using the aforementioned graphic methods as a valid way to visualize and classify PQ disturbances.

Keywords: power quality; Lissajous figures, space vector ellipses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de afundamento de tensão de 20%.	20
Figura 2 - Exemplo de elevação de tensão de 20%.	22
Figura 3 - Exemplo de interrupção de tensão.	23
Figura 4 - Exemplo de distorção harmônica.....	24
Figura 5 - Figuras de Lissajous para cargas resistivas, indutivas e capacitivas.	27
Figura 6 - Trajetória VI com a presença de componentes harmônicas.....	28
Figura 7 - Elipse formada pelo Vetor de Espaço Vetorial rotacionando no Plano Complexo.....	30
Figura 8 - Circuito elétrico utilizado para simulação dos distúrbios de energia elétrica.	31
Figura 9 - Formas de tensão e corrente para o Caso I.....	32
Figura 10 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso I intervalo I – FP = 0,77.	33
Figura 11 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso I intervalo II – FP = 0,92.	34
Figura 12 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso I intervalo III – FP = 1.	34
Figura 13 - Trajetórias V-I sobrepostas para o Caso I.....	35
Figura 14 - Trajetória V-I tridimensional para o Caso I.....	36
Figura 15 - Elipse de Espaço Vetorial no Plano Complexo para o Caso I.	36
Figura 16 - Formas de tensão e corrente para o Caso II.....	38
Figura 17 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso II intervalo I – Tensão Nominal.	39
Figura 18 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso II intervalo II – Afundamento de Tensão.	39
Figura 19 - Enfoque nas formas de onda de tensão corrente para o Caso II intervalo III – Elevação de Tensão.	40
Figura 20 - Trajetórias V-I sobrepostas para o Caso II.....	41
Figura 21 - Trajetórias V-I separadas para o Caso II.	41
Figura 22 - Trajetória V-I tridimensional para o Caso II.....	42
Figura 23 - Elipse de Espaço Vetorial no Plano Complexo para o Caso II intervalo II - Afundamento e Elevação de Tensão.	43
Figura 24 - Formas de tensão e corrente para o Caso III.....	44
Figura 25 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso III intervalo I – Sem Compensação Capacitiva.	45

Figura 26 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso III intervalo II – Com Compensação Capacitiva.....	46
Figura 27 - Trajetórias V-I sobrepostas para o Caso III.....	46
Figura 28 - Trajetórias V-I separadas para o Caso III.	47
Figura 29 - Trajetória V-I tridimensional para o Caso III.....	48
Figura 30 - Elipse de Espaço Vetorial no Plano Complexo para o Caso III - Harmônica de Terceira Ordem.	48
Figura 31 - Formas de tensão e corrente para o Caso IV.	50
Figura 32 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso IV intervalo I – Tensão Nominal com 3ª Harmônica.	51
Figura 33 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso IV intervalo II – Afundamento de Tensão com 3ª Harmônica.....	51
Figura 34 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso IV intervalo III – Elevação de Tensão com 3ª Harmônica.	52
Figura 35 - Trajetórias V-I sobrepostas para o Caso IV.	53
Figura 36 - Trajetórias V-I separadas para o Caso IV.....	53
Figura 37 - Trajetória V-I tridimensional para o Caso IV.	54
Figura 38 - Elipse de Espaço Vetorial no Plano Complexo para o Caso IV Intervalo I - Harmônica de Terceira Ordem Com Afundamento de Tensão.	54
Figura 39 - Elipse de Espaço Vetorial no Plano Complexo para o Caso IV Intervalo II - Harmônica de Terceira Ordem Com Afundamento de Tensão.	55
Figura 40 - Formas de tensão e corrente para o Caso V.	57
Figura 41 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso V intervalo I – Sem Compensação Capacitiva.....	57
Figura 42 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso V intervalo II – Com Compensação Capacitiva.....	58
Figura 43 - Trajetórias V-I sobrepostas para o Caso V.	58
Figura 44 - Trajetórias V-I separadas para o Caso V.....	59
Figura 45 - Trajetória V-I tridimensional para o Caso V.	60
Figura 46 - Elipse de Espaço Vetorial no Plano Complexo para o Caso V - Harmônica de Quinta Ordem.	60
Figura 47 - Formas de tensão e corrente para o Caso VI.	62
Figura 48 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso VI intervalo I – Sem Compensação Capacitiva.....	62
Figura 49 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso VI intervalo II – Com	

Compensação Capacitiva.....	63
Figura 50 - Trajetórias V-I sobrepostas para o Caso VI.	63
Figura 51 - Trajetórias V-I separadas para o Caso VI.	64
Figura 52 - Trajetória V-I tridimensional para o Caso VI.	64
Figura 53 - Elipse de Espaço Vetorial no Plano Complexo para o Caso VI - Harmônica de Sétima Ordem.	65
Figura 54 - Formas de tensão e corrente para o Caso VII.	66
Figura 55 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso VII intervalo I – Sem Compensação Capacitiva.	67
Figura 56 - Enfoque nas formas de onda de tensão corrente para o Caso VII intervalo II – Com Compensação Capacitiva.	68
Figura 57 - Trajetórias V-I sobrepostas para o Caso VII.	68
Figura 58 - Trajetórias V-I separadas para o Caso VII.	69
Figura 59 - Trajetória V-I tridimensional para o Caso VII.	69
Figura 60 - Elipse de Espaço Vetorial no Plano Complexo para o Caso VII - Harmônicas de Terceira, Quinta e Sétima Ordem Combinadas.	70
Figura 61 - Formas de tensão e corrente para o Caso VIII.	71
Figura 62 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o momento do chaveamento do banco de capacitores.....	72
Figura 63 - Trajetória V-I para o Caso VIII.	73
Figura 64 - Trajetória V-I Tridimensional para o Caso VIII.	73
Figura 65 - Trajetória V-I Tridimensional para o Caso VIII.	74
Figura 66 - Formas de tensão e corrente para o Caso IX.	75
Figura 67 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso IX intervalo I – FP = 0,77 Indutivo.	75
Figura 68 - Enfoque nas formas de onda de tensão corrente para o Caso IX intervalo II – FP Unitário.	76
Figura 69 - Enfoque nas formas de onda de tensão corrente para o Caso IX intervalo III – FP = 0,92 Capacitivo.	77
Figura 70 - Trajetórias V-I sobrepostas para o Caso IX.	78
Figura 71 - Trajetórias V-I separadas para o Caso IX.	78
Figura 72 - Trajetória V-I tridimensional para o Caso IX.	79
Figura 73 - Formas de tensão e corrente para o Caso X.	80
Figura 74 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso X intervalo I – FP = 0,77 Capacitivo.	81

Figura 75 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso X intervalo II – FP Unitário.	82
Figura 76 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso I intervalo IX – FP = 0,92 Indutivo.	82
Figura 77 - Trajetórias V-I sobrepostas para o Caso X.	83
Figura 78 - Trajetórias V-I separadas para o Caso X.	84
Figura 79 - Trajetória V-I tridimensional para o Caso X.	84
Figura 80 - Circuito do tipo Fonte de Tensão.	86
Figura 81 - Formas de tensão e corrente para o Caso XI.	86
Figura 82 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso XI intervalo I.	87
Figura 83 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso XI intervalo II.	88
Figura 84 - Trajetórias V-I para o Caso XI.	89
Figura 85 - Trajetória V-I tridimensional para o Caso XI.	89
Figura 86 - Carga do tipo Fonte de Corrente.	91
Figura 87 - Formas de tensão e corrente para o Caso XII.	92
Figura 88 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso XII intervalo I.	92
Figura 89 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso XII intervalo II.	93
Figura 90 - Trajetórias VI para o Caso XII.	94
Figura 91 - Trajetória V-I tridimensional para o Caso XII.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Intervalos de compensação do FP.....	32
Tabela 2 - Grandezas obtidas para o circuito do Caso I.	37
Tabela 3 - Intervalos de Afundamento e Elevação de Tensão.	37
Tabela 4 - Grandezas obtidas para o circuito do Caso II.	43
Tabela 5 - Grandezas obtidas para o circuito do Caso III.	49
Tabela 6 - Grandezas obtidas para o circuito do Caso IV.	56
Tabela 7 - Grandezas obtidas para o circuito do Caso V.	61
Tabela 8 - Grandezas obtidas para o circuito do Caso VI.	65
Tabela 9 - Grandezas obtidas para o circuito do Caso VII.	71
Tabela 10 - Grandezas obtidas para o circuito do Caso IX.	79
Tabela 11 - Grandezas obtidas para o circuito do Caso X.	85
Tabela 12 - Grandezas obtidas para o circuito do Caso XI.	90
Tabela 13 - Grandezas obtidas para o circuito do Caso XII.	95

LISTA DE SIGLAS

A – Potência Aparente

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CA – Corrente Alternada

DHT – Distorção Harmônica Total

IEC – *International Electrotechnical Commission*

FP – Fator de Potência

FR – Fator de Referência

P – Potência Ativa

PQ – *Power Quality*

pu – *Power Unit*

Q – Potência Reativa

QEE – Qualidade de Energia Elétrica

RMS – *Root Mean Square*

S – Sinal medido

Sref – Sinal de Referência

THD – *Total Harmonic Distortion*

UNESP – Universidade Estadual Paulista

VA – volt-ampère

var – volt-ampère reativo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Índices de Qualidade	17
2.2	Distúrbios de QEE	20
3	FORMAS DE VISUALIZAÇÃO GRÁFICA DE DISTÚRBIOS DE QEE	26
3.1	Figuras de Lissajous	27
3.2	Elipses de Espaço Vetorial	28
4	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	31
4.1	Caso I – Correção de fator de potência	32
4.2	Caso II – Correção de fator de potência a 0,92 com Afundamento e Elevação de Tensão	37
4.3	Caso III – Presença de 3ª harmônica na tensão antes e depois de compensação capacitiva	44
4.4	Caso IV – Presença de 3ª Harmônica na Tensão com Afundamento e Elevação de Tensão	49
4.5	Caso V – Presença de 5ª Harmônica na Tensão antes e depois de compensação capacitiva	56
4.6	Caso VI – Presença de 7ª Harmônica na Tensão antes e depois de compensação capacitiva	61
4.7	Caso VII – Presença das 3ª, 5ª e 7ª Harmônicas simultaneamente na Tensão antes e depois de compensação capacitiva	66
4.8	Caso VIII – Oscilação Transitória	71
4.9	Caso IX – Carga indutiva, com correção de fator de potência para unitário e sobre compensação capacitiva	74
4.10	Caso X - Carga indutiva, com correção de fator de potência para unitário e sobre compensação capacitiva com a presença de harmônica de 3ª ordem na alimentação	80
4.11	Caso XI – Carga Não Linear tipo Fonte de Tensão	85

4.12 Caso XII Carga não Linear Tipo fonte de Corrente	90
5 CONCLUSÃO	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
APÊNDICE A – Código utilizado para geração das figuras de Lissajous	99

1 INTRODUÇÃO

Um tópico muito importante para a área de estudo da engenharia elétrica e da engenharia de controle e automação é a Qualidade de Energia Elétrica (QEE). A grosso modo, o termo QEE é utilizado para descrever as diversas características que influenciam a operação de um equipamento e ou na energia elétrica fornecida às indústrias e residências. (POMILIO, 2022). Assim, é possível dizer que a QEE é o requisito necessário para garantir o funcionamento satisfatório e seguro dos equipamentos elétricos e eletrônicos. Caso a energia elétrica fornecida for de qualidade inferior à necessária, os equipamentos podem operar inadequadamente, ou até mesmo sofrerem danos irreparáveis.

Um exemplo de interferência devido a problemas de QEE em equipamentos elétricos, “facilmente” detectável é a presença de ruídos em equipamentos de áudio e som. Em 2016, um especialista de som e áudio japonês tomou uma medida extrema para garantir a QEE para seus equipamentos de rádio, pagando cerca de 10 mil dólares para instalar um poste na frente de sua casa, trazendo energia diretamente da distribuidora, evitando assim a interferência na QEE gerada pelos equipamentos dos vizinhos. Como disse o japonês em uma entrevista ao *Wall Street Journal*: “Eletricidade é como sangue. Caso o sangue esteja contaminado, o corpo todo ficará doente. Não importa o quão caro seja um equipamento de áudio, nunca será bom se a energia que o alimenta for ruim”. (OSAWA, 2016).

Em escala industrial, a QEE é muito importante para garantir o funcionamento eficiente dos equipamentos e máquinas nas linhas de produção. A má QEE acarreta em custos adicionais para as indústrias, devido à manutenções corretivas, paradas e redução na eficiência dos processos produtivos. Em um estudo conduzido em 2008 pelo time da *Leonardo Energy*, estimou que o impacto da má QEE traz um prejuízo de cerca de 150 bilhões de euros por ano para a indústria na União Europeia. (LEONARDO ENERGY, 2008).

1.1 Objetivos

Tendo em vista o panorama apresentado, o objetivo geral deste trabalho é estudar os métodos gráficos de visualização dos distúrbios da QEE em circuitos monofásicos. Para tanto, foram elencados dois objetivos específicos:

A) Verificar a aplicabilidade das Trajetórias V-I ou Figuras de Lissajous para a visualização dos distúrbios que afetam a QEE.

B) Verificar a aplicabilidade das Elipses de Espaço Vetorial no Plano Complexo para a visualização dos distúrbios que afetam a QEE.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O foco central de estudo e avaliação da QEE são os distúrbios associados aos sinais de tensão e corrente elétrica. Os distúrbios podem ser caracterizados de diversas formas, segundo sua banda de frequências, sua intensidade e a natureza dos efeitos causados. Entre os distúrbios existentes, é possível citar alguns que ocorrem de maneira mais comum, por exemplo: afundamento, elevação, interrupção, transitório e harmônicas, além da combinação desses distúrbios. (POMILIO, 2022).

A proliferação de cargas não-lineares acabou por afetar consideravelmente a maneira como a energia é distribuída e mensurada, uma vez que tais cargas modificam as formas de onda de tensão e corrente, que podem afetar negativamente o funcionamento de equipamentos eletrônicos sensíveis, que são mais suscetíveis à oscilações de energia (GRANADOS-LIEBERMAN *et al.*, 2011). Atualmente, há uma tendência de monitoramento contínuo da QEE numa instalação ou equipamento, de forma que grandes quantidades de dados são geradas a cada segundo, tornando a análise laboriosa e complexa. O processo de monitoramento tem evoluído junto com os equipamentos e metodologias de medição, uma vez que as técnicas de processamento de sinais, os computadores e os dispositivos de comunicação têm se espalhado pelo mundo.

As metodologias tradicionais de análise da QEE, em muitos casos, mostram-se insuficientes para a correta caracterização e classificação de um determinado distúrbio. Por exemplo, a transformada de Fourier além de fornecer apenas informações no domínio da frequência, supõe que o sinal analisado é periódico e estacionário, sendo que em muitos casos os distúrbios de QEE não obedecem a tais condições (BRAGA, 2009).

A transformada *wavelet* discreta tem seu desempenho prejudicado em caso de sinais com presença de ruídos, enquanto que a transformada de Stockwell, que mistura os princípios da transformada de Fourier janelada e transformada *wavelet* contínua, tem uma maior robustez aos ruídos e melhor resolução nos domínios do tempo e da frequência. (LIMA, 2015).

Recentemente, a técnica *space vector ellipse* no plano complexo foi utilizada para caracterizar sinais com distúrbios. Nesta técnica o distúrbio é retratado no plano complexo de forma elipsoidal, tornando o processo de análise e classificação mais simples e menos laborioso para algoritmos de aprendizado de máquina e inteligência artificial. Neste sentido, algumas das técnicas mencionadas anteriormente serão empregadas para diagnosticar e caracterizar os distúrbios de QEE. (ALAM, 2021). Assim, a metodologia de análise deve facilitar a detecção das anormalidades, de forma a melhorar o monitoramento da QEE e a tomada de decisão tornando-a mais rápida e detalhada.

2.1 Índices de Qualidade

Com o intuito de mensurar e monitorar a QEE, existem normas nacionais e internacionais que determinam os requisitos mínimos para o fornecimento de energia elétrica.

Alguns índices são comumente utilizados por várias normas de QEE, sendo possível citar alguns:

O primeiro índice estudado neste trabalho é o valor eficaz, comumente abreviado como valor RMS, do inglês *root mean square*. Este valor representa uma grandeza que caso aplicada em corrente contínua, produziria a mesma dissipação de potência sobre uma carga resistiva. O cálculo do valor RMS de um sinal de tensão ou corrente alternadas é obtido conforme (1).

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t). dt} \quad (1)$$

onde, T é o período e x(t) representa o valor instantâneo de tensão.

Outro importante índice de QEE é o Fator de Potência (FP). Uma das primeiras definições relacionadas à medida de FP aplicada aos circuitos monofásicos de CA é como sendo a razão entre a potência Ativa (P) e a potência Aparente (A), conforme mostra (2). (PAREDES, 2011).

$$FP = \frac{P}{A} \quad (2)$$

Uma definição simples, porém prática para o cálculo das potências foi proposta por Fryze em 1940. Esta definição utiliza os valores eficazes de tensão e corrente e permite o cálculo das potências a partir de qualquer forma de onda periódica, através de (3) e (4).

Potência aparente:

$$A = V_{eficaz} * I_{eficaz} \quad (3)$$

Potência ativa:

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

em que v e i são a tensão e a corrente instantâneas, respectivamente. Sendo assim, o FP pode ser calculado através de (5).

$$FP = \frac{P}{A} = \frac{\frac{1}{T} \int v(t) * i(t) * dt}{V_{RMS} * I_{RMS}} \quad (5)$$

A definição em (5) permite o cálculo do FP em circuitos monofásicos. Para circuitos nos quais a forma de onda de tensão e corrente são senoidais, o FP pode ser expresso como sendo igual ao cosseno da defasagem entre os sinais de tensão e corrente, da maneira presente em (6).

$$FP = \cos \phi \quad (6)$$

A medição e o monitoramento do fator de potência em uma instalação elétrica se fazem necessários devido às regulações presentes, que determinam que o consumidor mantenha um valor mínimo de fator de potência. No Brasil, segundo o artigo 302 da Resolução Normativa ANEEL nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021, “o fator de potência de referência “FR”, indutivo ou capacitivo, tem como limite mínimo permitido o valor de 0,92 para a unidade consumidora do grupo A.” (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2021, p. 127).

Para casos em que é necessário mensurar a presença de componentes harmônicas em um sistema elétrico, utiliza-se a Distorção Harmônica Total (DHT) como índice de qualidade. A DHT, pode ser calculada conforme (7).

$$DHT_x = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} X_n^2}}{X_1} \quad (7)$$

sendo que X_1 e X_n são os valores eficazes da componente fundamental (tensão ou corrente) e o valor eficaz da n-ésima componente harmônica (tensão ou corrente).

Os índices de QEE mencionados são utilizados como parâmetros pelos órgãos reguladores do fornecimento de energia elétrica para definir os padrões mínimos a serem seguidos tanto pelos fornecedores quanto pelos consumidores. Vale ressaltar que no Brasil, as regulações que determinam o valor mínimo de FP para uma unidade consumidora aplicam-se somente a consumidores do Grupo Tarifário A, que são as unidades consumidoras de média e alta tensão, ou seja, de 11,9 kV até 138 kV, não sendo aplicado a consumidores residenciais. (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2021).

2.2 Distúrbios de QEE

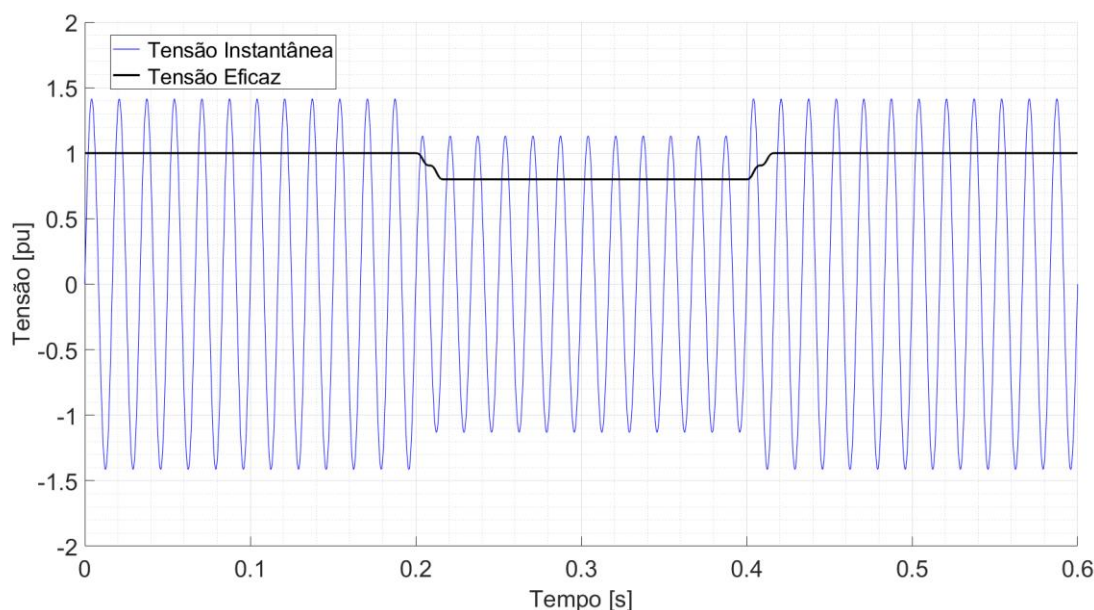
No contexto do estudo da QEE, é chamado de distúrbio qualquer fenômeno eletromagnético que possa impactar negativamente o funcionamento ou a vida útil de um equipamento elétrico.

Iniciando as análises dos diversos tipos de distúrbios que afetam a QEE, o afundamento de tensão é um dos distúrbios mais comuns. O afundamento de tensão é definido como um distúrbio bidimensional na maioria das normas reguladoras, tendo como suas dimensões a amplitude do afundamento e a duração do distúrbio. (BAGGINI, 2008).

De acordo com a definição presente na norma IEC 61000-4-30, um afundamento ou mergulho de tensão é uma redução de 10% a 90% no valor da tensão eficaz de alimentação de uma carga, por um período maior que meio ciclo de onda e menor que 1 minuto. (INTERNATIONAL ELETROTECHNICAL COMISSION, 2021).

A Figura 1 traz como exemplo um afundamento de tensão de 20% ocorrido entre os instantes 0.2 s e 0.4 s. Neste tempo, há uma diminuição de 0.2 pu no valor eficaz da tensão medida, durante 12 ciclos de forma de onda.

Figura 1 - Exemplo de afundamento de tensão de 20%.



Fonte: Autoria própria.

A principal causa da ocorrência dos afundamentos de tensão é a presença de curto-circuito elétrico, pois o curto-circuito causa um aumento na corrente, que em contrapartida diminui a tensão entre as impedâncias do circuito de alimentação. No caso de fontes de alimentação trifásicas, a presença de curto-circuito pode ocorrer tanto entre duas fases, como também entre uma fase e o neutro ou o aterramento, podendo ter a presença de mais de duas fases envolvidas. (BAGGINI, 2008).

Em situações práticas, os sistemas elétricos contêm dispositivos de proteção, que desconectam o curto-circuito da fonte, recuperando rapidamente o valor normal de operação da tensão e não trazendo nenhum prejuízo à carga elétrica. Caso o afundamento de tensão ocorra de maneira prolongada, por um período maior que 1 minuto, este distúrbio passa a ser caracterizado como subtensão.

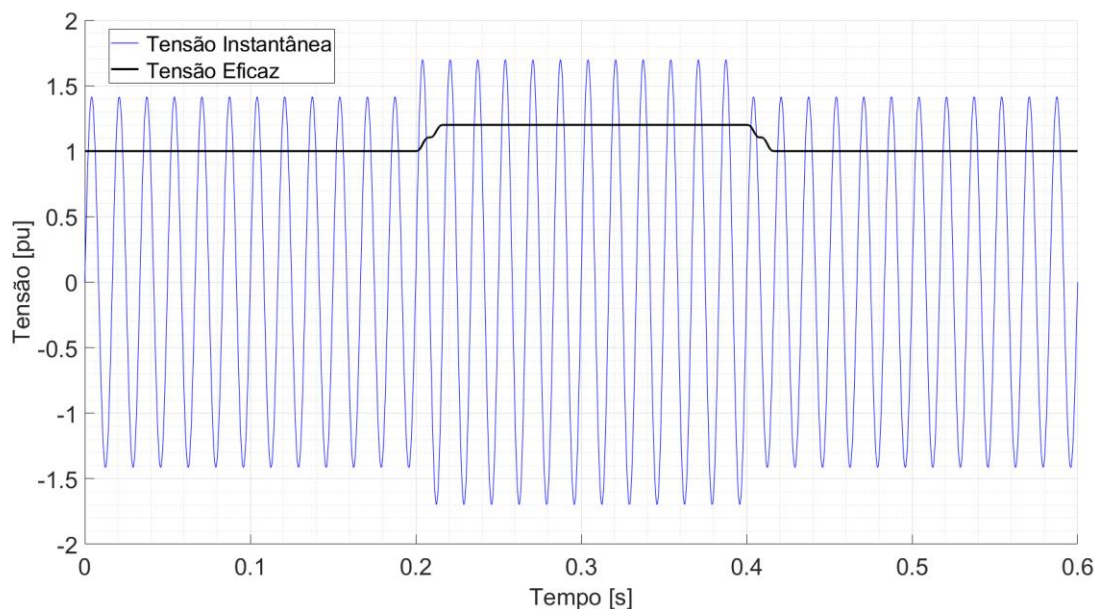
Os afundamentos de tensão podem ser também causados pelo chaveamento de uma carga elétrica de dimensão significativamente grande no sistema elétrico por determinado tempo, como grandes motores, fornos industriais ou equipamentos de solda, que causam alterações na corrente elétrica, similares às causadas pela presença de curto-circuito na fonte de alimentação.

Prosseguindo com o estudo dos distúrbios que afetam a QEE, existe o distúrbio de elevação de tensão. Este distúrbio pode ser entendido a grosso modo como sendo o oposto do distúrbio de afundamento da tensão, pois consiste em um aumento da tensão eficaz de alimentação.

Assim como o distúrbio de afundamento de tensão, a elevação de tensão é também descrita como um distúrbio bidimensional, apresentando amplitude de tensão eficaz de 10% a 90% acima do valor da tensão nominal por um período maior que 1 ciclo e menor que 1 minuto no circuito.

Um exemplo de elevação de tensão pode ser visto na Figura 2. Neste exemplo, é provocada uma elevação de tensão de 20%, com início em 0.2 s e duração de 0.2 s. A tensão eficaz medida teve uma elevação de 0.2 pu com duração de 12 ciclos de onda por consequência.

Figura 2 - Exemplo de elevação de tensão de 20%.



Fonte: Autoria própria.

A remoção de cargas elétricas, o chaveamento de bancos de capacitores e a ocorrência de falhas na fonte de alimentação são as principais causas da elevação de tensão. O prolongamento da elevação de tensão é denominado sobretensão, no qual a elevação de tensão ocorre por um período superior a 1 minuto. Usualmente, sobretensões causam mais danos aos dispositivos elétricos que subtensões, pois podem ocasionar o rompimento de dielétricos. (POMILIO, 2022).

Há algumas situações em que ocorre a ausência total de tensão, caracterizando a presença de um distúrbio denominado interrupção de tensão. A interrupção de tensão diferencia-se do afundamento, pois consiste na ausência completa de tensão e não apenas uma diminuição em seu valor eficaz.

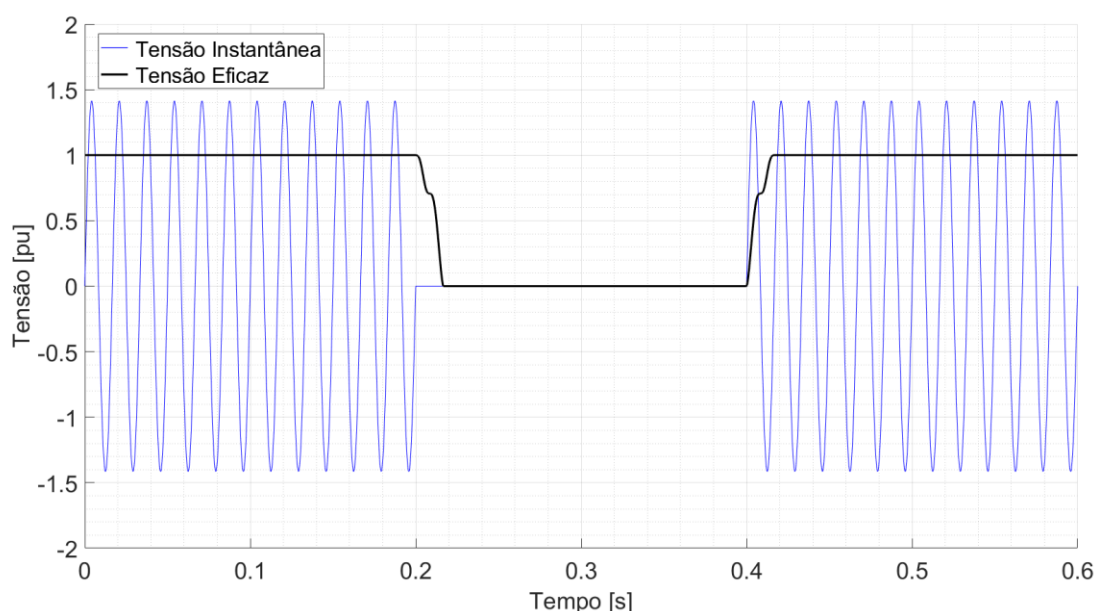
O distúrbio de interrupção de tensão pode ser classificado de quatro maneiras diferentes, de acordo com seu período de duração: (POMILIO, 2022)

- **Interrupção Momentânea:** Consiste na interrupção da tensão de alimentação por um período com duração maior que meio ciclo e menor que 3 s. Um exemplo de causa de interrupção temporária é o acionamento do circuito de proteção da rede elétrica, sendo esperado que o circuito retorne ao seu modo de operação normal após a interrupção.

- **Interrupção Temporária:** Interrupções temporárias são interrupções com duração entre 3 s e 1 min, sendo também causadas geralmente pela ação de algum dispositivo de proteção elétrica. Uma solução possível para a mitigação das interrupções momentâneas e temporárias é a utilização de baterias que permitem o fornecimento de energia temporariamente até que a fonte principal seja restabelecida.
- **Interrupção Permanente:** Uma interrupção permanente (*outage* em inglês) consiste na ausência total de tensão elétrica por um período maior que 1 min. Este distúrbio é provocado pelo desligamento de uma linha elétrica sem retorno imediato, podendo ser causado tanto por defeitos quanto por manutenções programadas. A melhor solução para este tipo de distúrbio é a presença de uma fonte de alimentação redundante no sistema, garantindo um backup para o circuito.
- **Micro-interrupção:** Micro-interrupções são interrupções de duração menor que meio ciclo, geralmente causadas por um curto-circuito de extinção rápida em sistemas de distribuição.

A Figura 3 ilustra uma interrupção de tensão durante 0.2 s, equivalente a 12 ciclos de onda em 60 Hz. Tendo uma duração maior que meio ciclo de onda e menor que 3 s, a interrupção de tensão presente na Figura 3 é denominada de interrupção momentânea.

Figura 3 - Exemplo de interrupção de tensão.



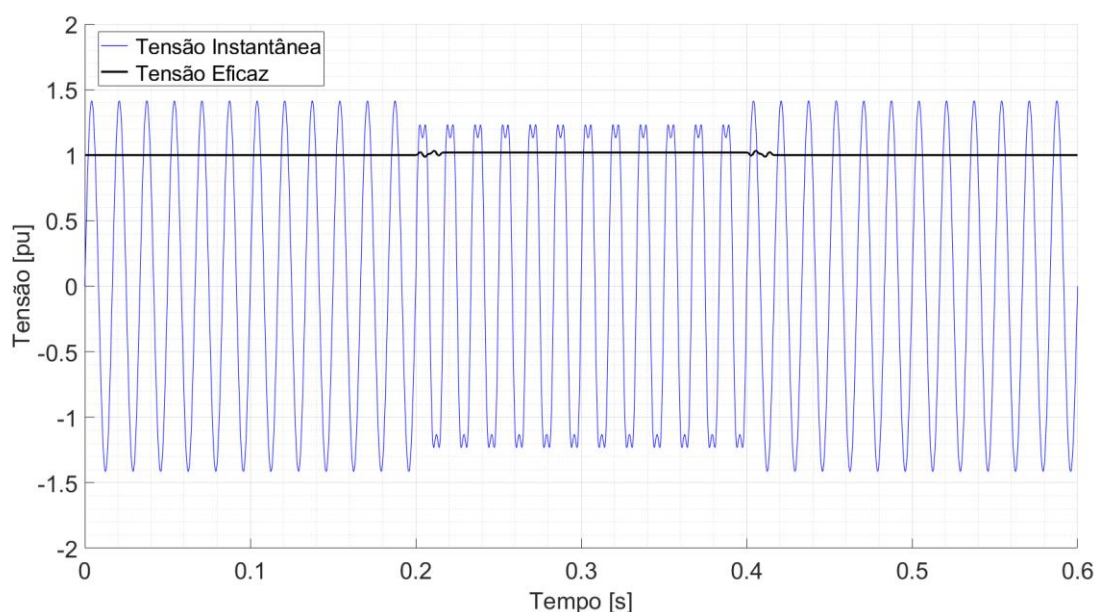
Fonte: Autoria própria.

A presença de componentes harmônicas em um circuito elétrico caracteriza um distúrbio denominado de distorção harmônica. Harmônicas são definidas como componentes de tensão ou corrente cuja frequência é múltipla inteira da frequência fundamental. Tomando como exemplo uma instalação elétrica com frequência de 60 Hz, a primeira harmônica seria a própria fundamental (60 Hz), a segunda harmônica teria frequência de 120 Hz, a terceira harmônica com frequência de 180 Hz, seguindo sucessivamente para as demais harmônicas. (BAGGINI, 2008).

O distúrbio de distorção harmônica pode ser representado pela superposição de ondas de tensão ou corrente de várias amplitudes e frequências múltiplas inteiras da fundamental.

Um exemplo de distorção harmônica pode ser visto na Figura 4 no intervalo entre 0.2 s e 0.4 s. Neste exemplo, foi adicionada uma componente harmônica de 3ª ordem com fase zero e 20% da fundamental. A DHT medida no momento em que houve a presença da componente harmônica foi de 20% na tensão, sendo igual à porcentagem da amplitude da componente harmônica em relação à componente fundamental. Para os momentos sem a presença de distorção harmônica, a DHT medida foi igual a zero.

Figura 4 - Exemplo de distorção harmônica.



Fonte: Autoria própria.

Distorções harmônicas são causadas pela presença de cargas não-lineares, como

transformadores saturados e dispositivos de eletrônica de potência. Usualmente, as harmônicas presentes neste tipo de carga são harmônicas ímpares, com predominância da terceira harmônica e amplitudes progressivamente menores para as harmônicas das subseqüentes múltiplas ímpares. (BAGGINI, 2008).

Quando há a presença de componentes múltiplas não inteiras da fundamental no sistema elétrico, caracteriza-se o distúrbio de distorção inter-harmônica. Este tipo de distúrbio é causado primariamente por fornos a arco e inversores de frequência com frequência variável.

No caso dos fornos a arco, geralmente são adotadas simplificações que visam aproximar as componentes harmônicas múltiplas não inteiras a componentes harmônicas múltiplas inteiras devido ao fato de haver muitas vezes harmônicas de frequências aleatórias presentes neste tipo de carga. (BAGGINI, 2008). O distúrbio de distorção inter-harmônica não será abordado com profundidade neste trabalho.

Os distúrbios mencionados são definidos utilizando grandezas medidas no circuito por métodos tradicionais de monitoramento de energia elétrica. Entretanto, os distúrbios também podem ser monitorados graficamente, trazendo uma outra forma para sua detecção e classificação.

3 FORMAS DE VISUALIZAÇÃO GRÁFICA DE DISTÚRBIOS DE QEE

Este Projeto Final de Curso de Engenharia visa o estudo, análise e implementação de técnicas gráficas para avaliar a qualidade da energia elétrica de um equipamento ou instalação. A representação gráfica das formas de onda da tensão e corrente pode ser a base para caracterizar e identificar padrões e comportamentos de diversos circuitos lineares e não lineares sob diferentes condições de operação. Assim, espera-se que, por exemplo, um sistema de monitoramento permita detectar qualquer forma de anormalidade na forma de onda da tensão e/ou corrente.

Os métodos tradicionais de análise de QEE geralmente têm seu enfoque em medições como o valor instantâneo de um sinal de tensão ou corrente, seu valor eficaz, seus índices de qualidade além do espectro de Fourier. Embora estes métodos sejam válidos para a análise da QEE em diversas situações, existem algumas limitações. A análise do valor eficaz de um sinal de tensão e corrente, por exemplo, é muito dependente do tempo de amostragem do sinal. Um pequeno intervalo de amostragem pode tornar o valor eficaz pouco relevante, e suscetível à influência de oscilações transitórias, principalmente no caso de uma carga indutiva, enquanto um intervalo de amostragem muito grande pode ser insuficiente para o estudo de distúrbios de curta duração. (GRANADOS-LIEBERMAN *et al.*, 2011).

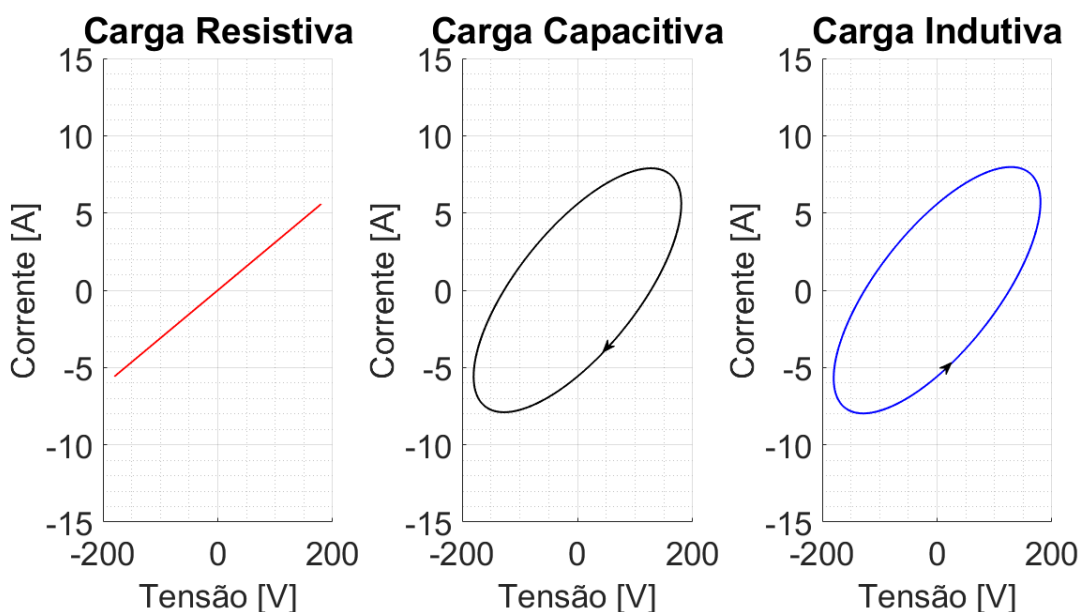
Tendo em vista as limitações apresentadas pelos métodos tradicionais de análise e monitoramento de energia elétrica, foram desenvolvidos métodos gráficos, que permitem uma melhor precisão para a identificação de distúrbios de QEE, como as Figuras de Lissajous ou Trajetórias V-I (BRAGA, 2009) e as Elipses de Espaço Vetorial no Plano Complexo. (ALAM, 2021).

3.1 Figuras de Lissajous

As figuras de Lissajous, também conhecidas como trajetórias V-I, são curvas que relacionam os sinais de tensão e corrente de uma carga estudada. As Figuras de Lissajous são obtidas por meio de um gráfico bidimensional, no qual os eixos X e Y deste gráfico recebem os sinais medidos de tensão e corrente, respectivamente. Com essas figuras, é possível observar características como a defasagem e a relação entre as frequências das formas de onda de entrada. (BRAGA, 2009).

Na Figura 5 demonstra-se a utilização das trajetórias V-I para caracterização de cargas. Por exemplo, a presença de elementos reativos na carga produz uma trajetória de forma elíptica, que rotaciona no sentido horário, caso haja predominância indutiva e no sentido anti-horário, caso haja predominância capacitiva. A carga resistiva resulta em uma reta como Trajetória V-I, pois não há defasagem entre tensão e corrente.

Figura 5 - Figuras de Lissajous para cargas resistivas, indutivas e capacitivas.

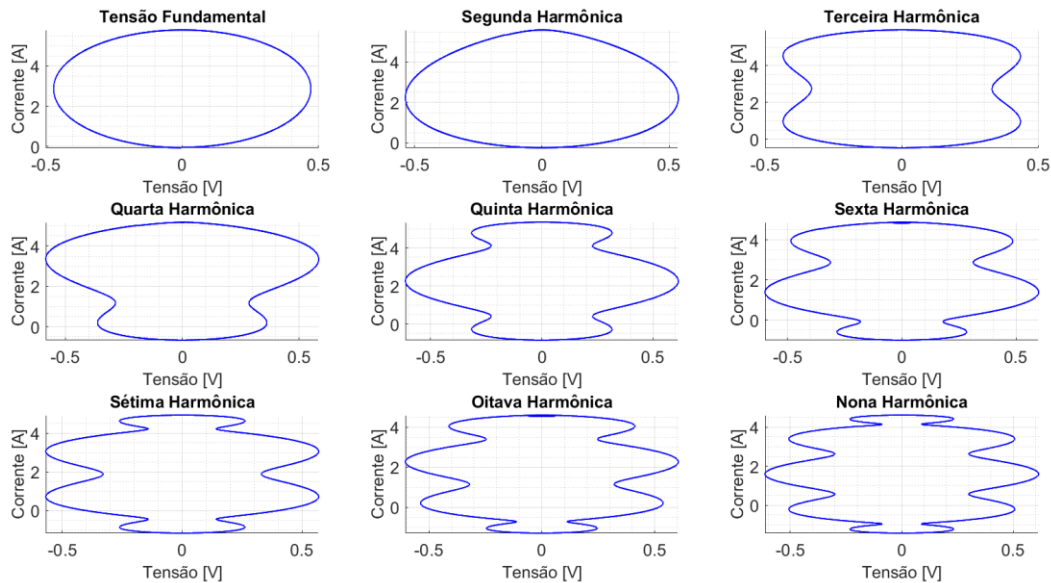


Fonte: Autoria própria.

Ao se aplicar distorções harmônicas a uma carga elétrica reativa (indutiva ou capacitiva), as trajetórias V-I apresentam deformações, conforme observadas na Figura 6, sendo que as distorções são maiores para ordens harmônicas superiores. A componente fundamental, por exemplo, é representada por uma Trajetória V-I de forma

circular, já a presença de uma componente harmônica de 2ª ordem gera uma Trajetória V-I com a presença de uma inflexão na extremidade superior. A Trajetória V-I para a harmônica de 3ª ordem apresenta duas inflexões em suas laterais, enquanto a Trajetória V-I para a harmônica de 4ª ordem gera três inflexões, e assim sucessivamente.

Figura 6 - Trajetória VI com a presença de componentes harmônicas.



Fonte: Autoria própria.

3.2 Elipses de Espaço Vetorial

Outra forma de visualização de distúrbios que afetam a QEE é a técnica de *Space Vector Ellipse* no plano complexo. De acordo com a metodologia descrita por (ALAM, 2021), para a aplicação do método de elipse do espaço vetorial, o sinal (S) de tensão ou corrente a ser estudado deve ser inicialmente expresso utilizando a soma de dois fasores rotacionando em direções opostas com ângulo de rotação ω , conforme determinado pela regra de Euler e representado em (8). (ALAM, 2021).

$$S(t) = |S| \sin(\omega t) = \frac{|S|}{2j} (e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}) \quad (8)$$

Além do sinal de interesse, medido a partir do circuito estudado, é necessário também um sinal de referência (Sref), com uma defasagem de 90° em relação ao sinal

estudado e magnitude e frequência iguais à de um sinal ideal, ou seja, sem a presença de nenhum tipo de distúrbio de QEE. Sendo assim, o sinal de referência pode ser representado conforme (9).

$$S_{ref}(t) = |S_{ref}| \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = \frac{|S_{ref}|}{2j} (e^{j(\omega t + \frac{\pi}{2})} - e^{-j(\omega t + \frac{\pi}{2})}) \quad (9)$$

Com S e Sref, é possível obter o vetor de espaço vetorial $\vec{R}(t)$ rotacional no plano complexo através de (10):

$$\vec{R}(t) = \begin{bmatrix} 1 & e^{\frac{j\omega}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S(t) \\ S_{ref}(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Utilizando (8) e (9) em (10), é possível obter o Vetor de Espaço Vetorial no plano complexo a partir dos sinais no domínio do tempo, conforme (11).

$$\vec{R}(t) = \left(\frac{|S|}{2} e^{-\frac{j\pi}{2}} + \frac{|S_{ref}|}{2} e^{\frac{j\pi}{2}} \right) e^{j\omega t} + \left(\frac{|S|}{2} e^{\frac{j\pi}{2}} + \frac{|S_{ref}|}{2} e^{-\frac{j\pi}{2}} \right) e^{-j\omega t} \quad (11)$$

A equação da elipse também pode ser expressa por meio da soma dos fasores com frequência angular positiva e negativa, conforme mostrado em (12).

$$\vec{R}(t) = R^+ e^{j\omega t} + R^- e^{-j\omega t} \quad (12)$$

sendo $R^+ = |R^+| e^{j\phi^+}$ e $R^- = |R^-| e^{j\phi^-}$, é possível obter o semi eixo maior (σ_{ma}), semi eixo menor (σ_{mi}) e ângulo de inclinação (ϕ) a partir de (13), (14) e (15):

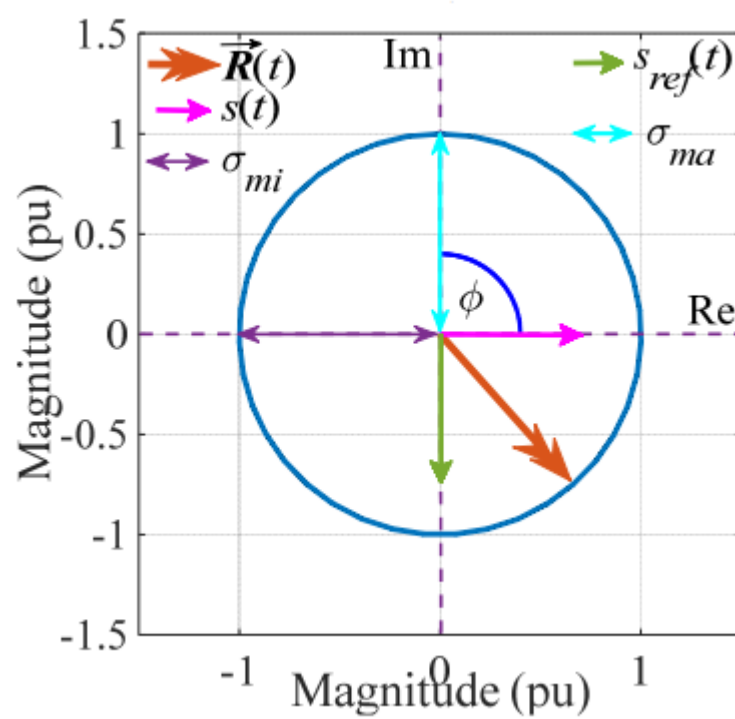
$$\sigma_{ma} = ||R^+| + |R^-|| \quad (13)$$

$$\sigma_{mi} = ||R^+| - |R^-|| \quad (14)$$

$$\phi = \phi^+ - \phi^- \quad (15)$$

A Figura 7 mostra a formação da Elipse a partir do Vetor de Espaço Vetorial rotacionando no plano complexo.

Figura 7 - Elipse formada pelo Vetor de Espaço Vetorial rotacionando no Plano Complexo.



Fonte: ALAM (2021).

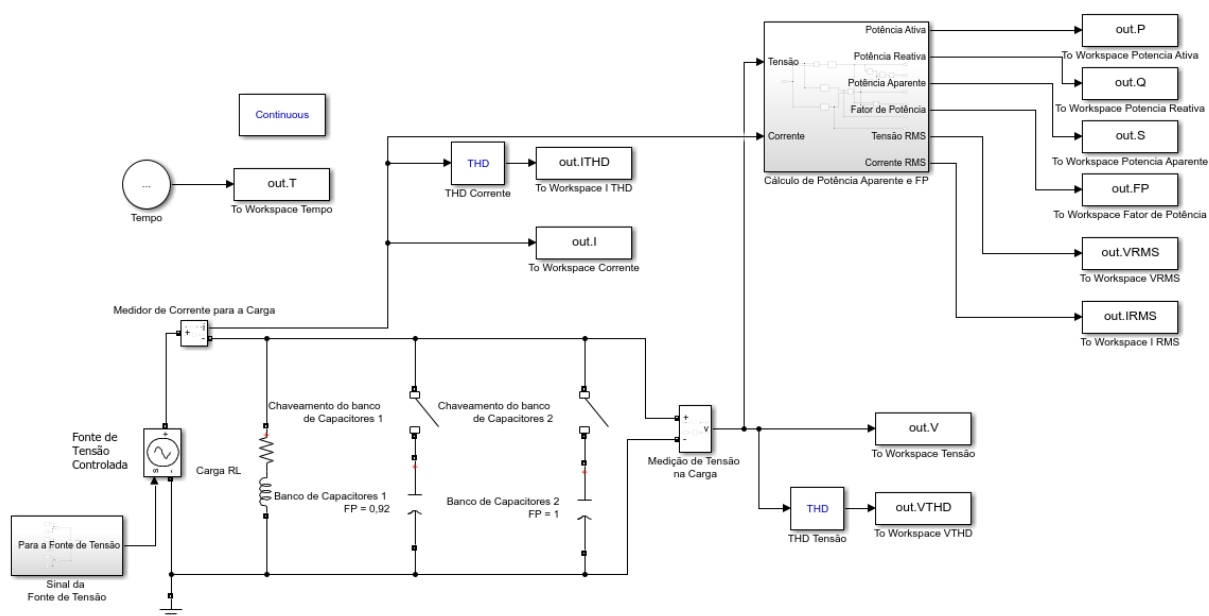
4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Considerando a abrangência do tema, neste trabalho serão avaliados inicialmente os circuitos elétricos monofásicos.

De acordo com a proposta inicial do trabalho, o *software* utilizado para a realização das etapas de modelagem, simulação e obtenção de resultados foi o *Matlab/Simulink*. A grande vantagem do *software Matlab* é seu ambiente de simulação integrado baseado em blocos, o *Simulink*. Com o *Simulink* é possível modelar circuitos elétricos e determinar seus parâmetros, a fim de se obter as saídas necessárias para realizar o tratamento matemático com o *Matlab*.

Sendo assim, foi possível construir um circuito utilizando os componentes presentes na biblioteca *Simscape Specialized Power Systems*, como pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 - Circuito elétrico utilizado para simulação dos distúrbios de energia elétrica.



Fonte: Autoria própria.

O circuito elétrico mostrado na Figura 8 consiste de uma carga linear de 750 W (watts) de potência ativa e 625 var (volt-ampère reativo) de potência reativa indutiva, totalizando uma potência aparente de 980 VA (volt-ampère), com um fator de potência de 0,77. Estes dados de potência foram baseados nos dados de um motor genérico de chapa

aberta IP21, fabricado pela WEG, que pode ser utilizado em diversas aplicações, de acordo com informações do fabricante. (WEG, 2021). Além disso, é utilizado um banco capacitivo para correção do fator de potência (para 0,92 e 1)

4.1 Caso I – Correção de fator de potência

Conforme definido pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), um dos principais índices para medição da QEE é o fator de potência (FP). (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2021). Sendo assim, o primeiro caso simulado tem como objetivo a visualização dos efeitos da correção do fator de potência para uma carga indutiva alimentada com uma fonte de tensão senoidal.

A simulação está dividida em três intervalos, conforme a Tabela 1:

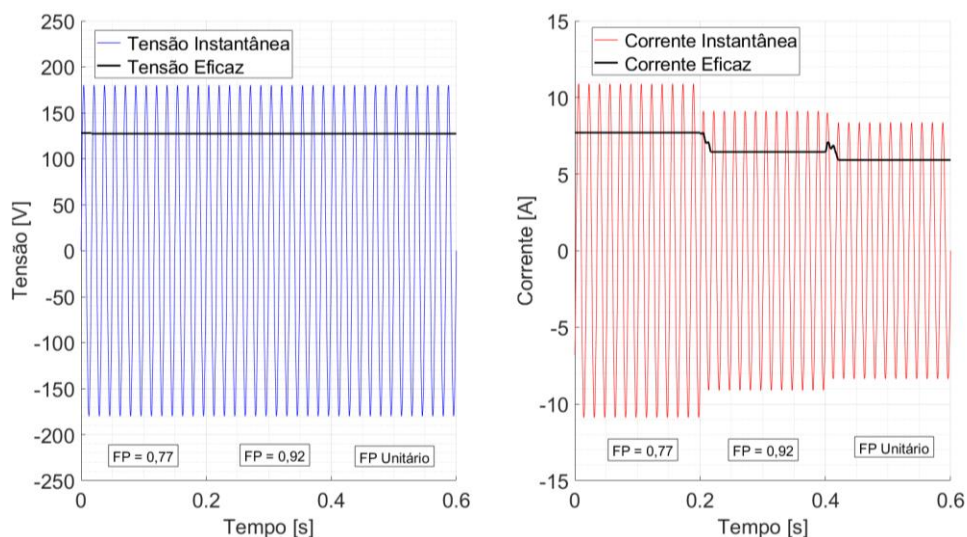
Tabela 1 - Intervalos de compensação do FP.

Tempo (s)	Carga	FP
0,0 – 0,2	750 W + 625 var indutivo	0,77
0,2 – 0,4	750 W + 625 var indutivo + 300 var capacitivo	0,92
0,4 – 0,6	750 W + 625 var indutivo + 625 var capacitivo	1

Fonte: Autoria própria.

Com as simulações realizadas, é possível obter os seguintes sinais de tensão e corrente instantâneas e valores eficazes ao longo do tempo, conforme mostrado na Figura 9:

Figura 9 - Formas de tensão e corrente para o Caso I.

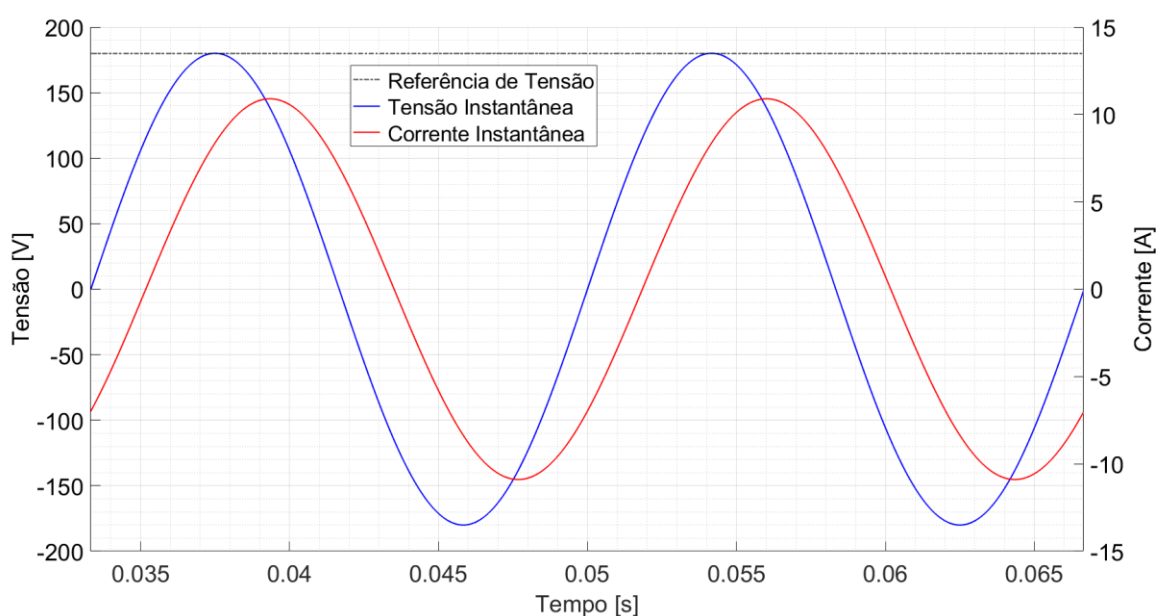


Fonte: Autoria própria.

A Figura 9 mostra que a tensão eficaz na carga se manteve constante nos três intervalos, conforme esperado, pois não houve mudanças na alimentação do circuito. Diferentemente da tensão, a corrente eficaz na carga diminuiu conforme o aumento do fator de potência. Isto se deve à redução do consumo de potência reativa da fonte.

Observando o enfoque no intervalo I, mostrado na Figura 10, é possível notar que há uma defasagem entre a tensão e corrente, sendo esta defasagem causada pela presença da indutância no circuito.

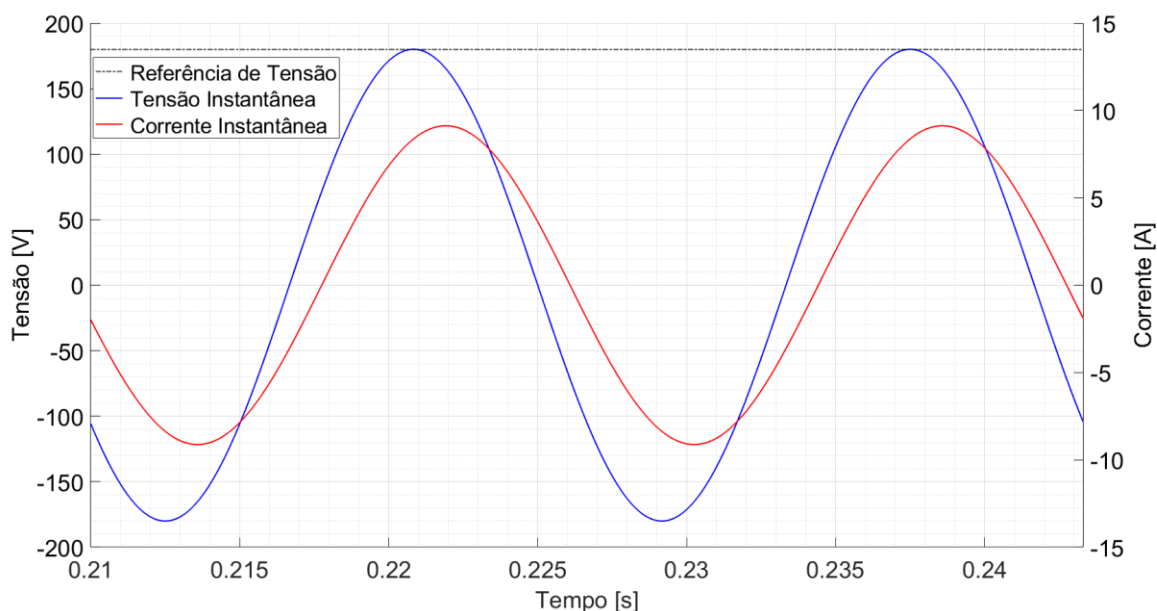
Figura 10 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso I intervalo I – $FP = 0,77$.



Fonte: Autoria própria.

Ao inserir o capacitor para compensação de fator de potência para 0,92, nota-se uma diminuição na defasagem entre a tensão e a corrente do circuito, conforme visto na Figura 11. Também é possível notar que o valor de pico da corrente diminuiu, pois parte da corrente reativa circula entre os elementos reativos, indutor e capacitor.

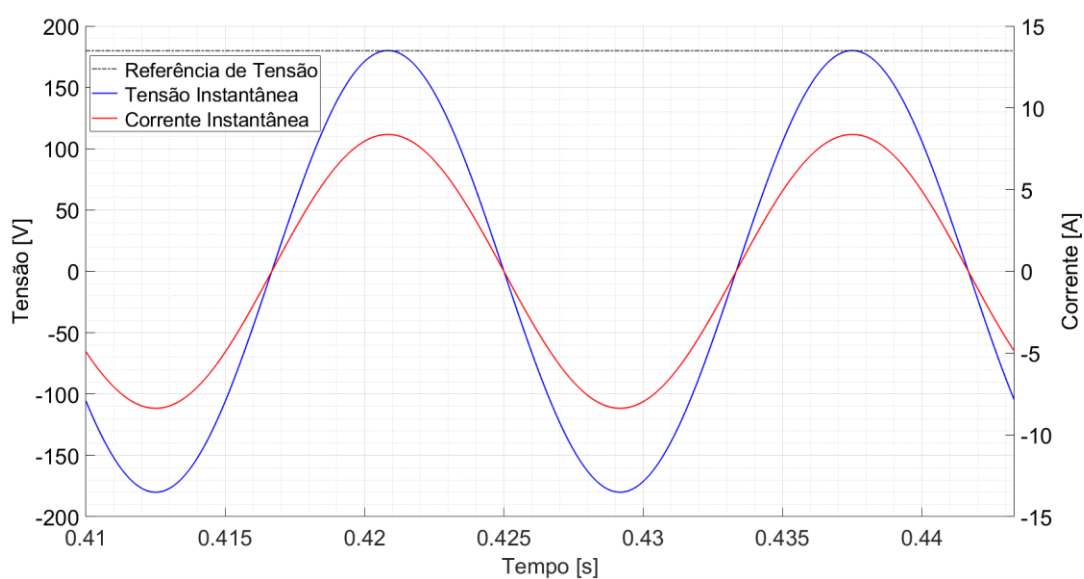
Figura 11 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso I intervalo II – FP = 0,92.



Fonte: Autoria própria.

Com a compensação total do fator de potência (unitário), a defasagem entre a tensão e a corrente desaparece. A amplitude da corrente também diminui, pois agora, toda a corrente reativa circula entre o indutor e o capacitor. O sistema elétrico enxerga a carga como se fosse uma carga resistiva, conforme visto na Figura 12.

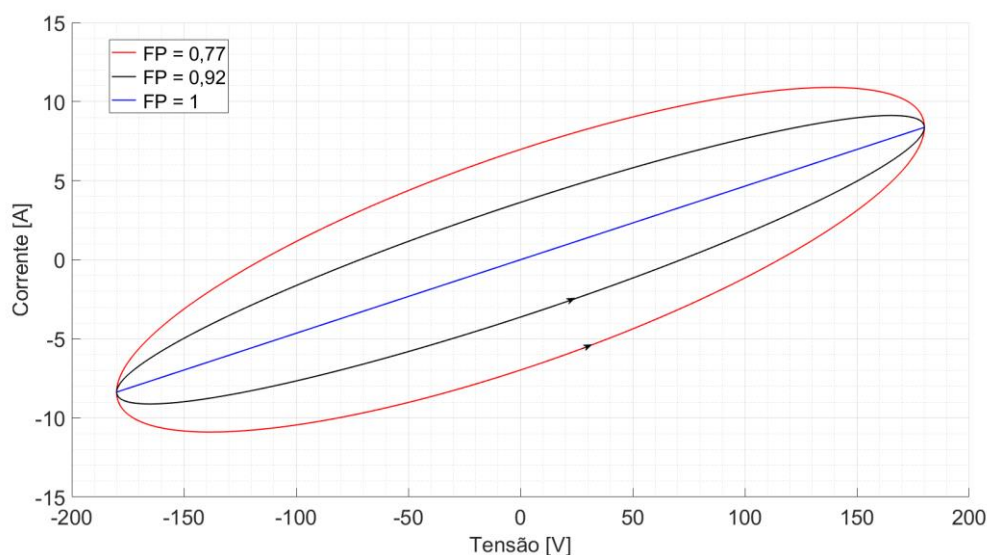
Figura 12 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso I intervalo III – FP = 1.



Fonte: Autoria própria.

Todo o processo de compensação, mostrado através da Figura 9, os quais foram destacados nas Figuras 10, 11 e 12 podem ser representadas mediante as Trajetórias V-I, conforme mostra a Figura 13.

Figura 13 - Trajetórias V-I sobrepostas para o Caso I.

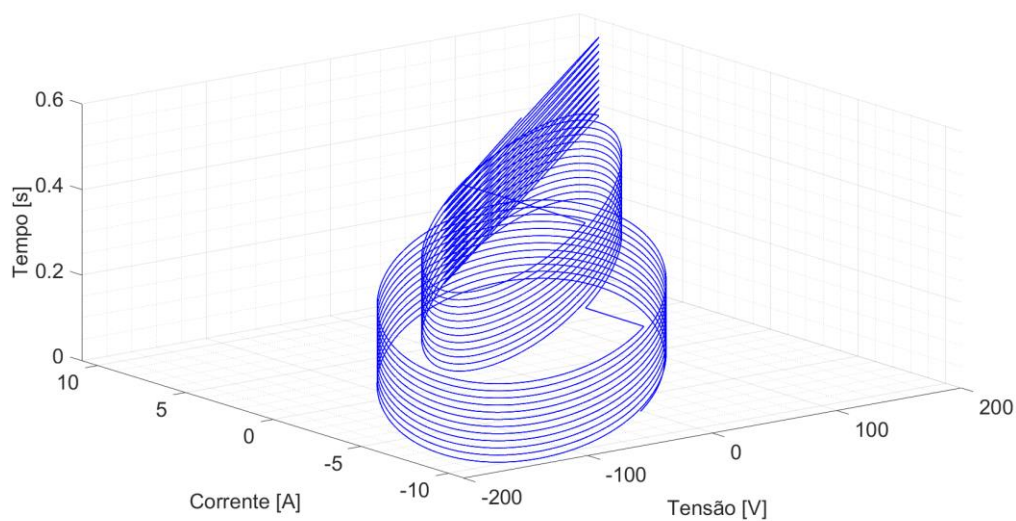


Fonte: Autoria própria.

Nas trajetórias mostradas na Figura 13, é possível identificar nitidamente os três intervalos analisados. No primeiro intervalo, em vermelho, a Trajetória V-I se forma em sentido anti-horário, sentido característico de uma carga predominantemente indutiva. No segundo intervalo, a trajetória V-I mantém seu sentido anti-horário e seu formato elíptico, mas apresenta um achatamento, pois a defasagem entre a tensão e a corrente na carga diminui devido à compensação do fator de potência a 0,92. Já no terceiro intervalo, a trajetória V-I torna-se uma reta devido à compensação total do fator de potência para 1. Neste intervalo, a corrente diretamente proporcional à tensão e não apresentando rotação, pois toda a energia reativa fica circulando entre o capacitor e o indutor, ou seja, a fonte enxerga a carga como uma resistência, com fator de potência unitário.

Finalmente, ao adicionar o eixo do tempo à trajetória V-I, é possível obter um gráfico tridimensional, que possibilita a visualização da trajetória ao longo do tempo. Na Figura 14, é possível notar os três diferentes intervalos da simulação, assim como a transição entre eles.

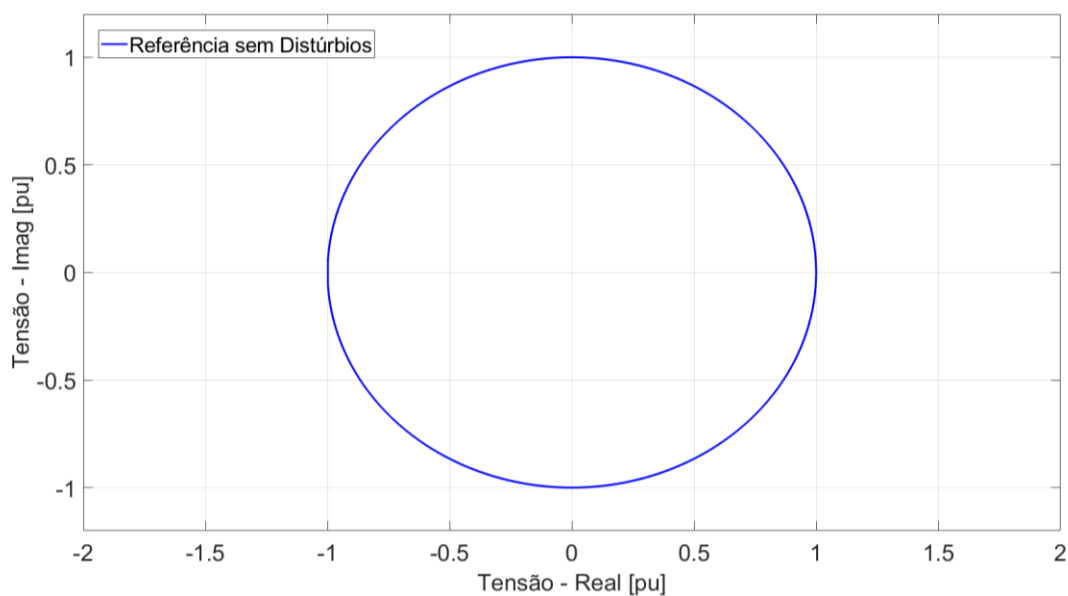
Figura 14 - Trajetória V-I tridimensional para o Caso I.



Fonte: Autoria própria.

Embora o Caso I possua uma diferença entre os intervalos analisados devido à correção do fator de potência, não apresenta nenhum dos distúrbios de QEE, como Afundamento, Elevação ou Distorções Harmônicas. Sendo assim, seu gráfico *Space Vector Ellipse* (SVE) de tensão é sem nenhum tipo de distúrbio, sendo igual à elipse de referência, ou seja, um círculo perfeito, demonstrado na Figura 15.

Figura 15 - Elipse de Espaço Vetorial no Plano Complexo para o Caso I.



Fonte: Autoria própria.

Finalmente, os parâmetros obtidos durante a simulação também foram tabelados para fins de comparação e mostrados na Tabela 2:

Tabela 2 - Grandezas obtidas para o circuito do Caso I.

	Intervalo 1: FP = 0,77	Intervalo 2: FP = 0,92	Intervalo 3: FP = 1
Tensão Eficaz [V]	127,3	127,3	127,3
Corrente Eficaz [A]	7,7	6,5	5,9
DHT na Tensão [%]	0	0	0
DHT na Corrente [%]	0	0	0
Potência Ativa [W]	753	752	753
Potência Reativa [var]	628	320	0
Potência Aparente [VA]	980	817	752
FP	0,77	0,92	1

Fonte: Autoria própria.

Analisando os dados da Tabela 2, é possível verificar mais uma vez a queda no valor eficaz da corrente demandada pela carga ao se corrigir o FP. Consequentemente, a potência reativa diminui também, chegando a 0 com a compensação total do FP. Nos três intervalos, a DHT também foi 0, pois não há a presença de componentes harmônicas.

4.2 Caso II – Correção de fator de potência a 0,92 com Afundamento e Elevação de Tensão

Prosseguindo com o estudo de distúrbios de QEE, o caso II tem como objetivo a simulação dos distúrbios de afundamento e elevação de tensão e compará-los com a tensão nominal. Para isso, é utilizada a mesma carga apresentada na Figura 7, neste caso, compensando o fator de potência para 0,92 indutivo.

Os distúrbios de afundamento e elevação de tensão foram provocados na fonte de alimentação de acordo com a Tabela 3:

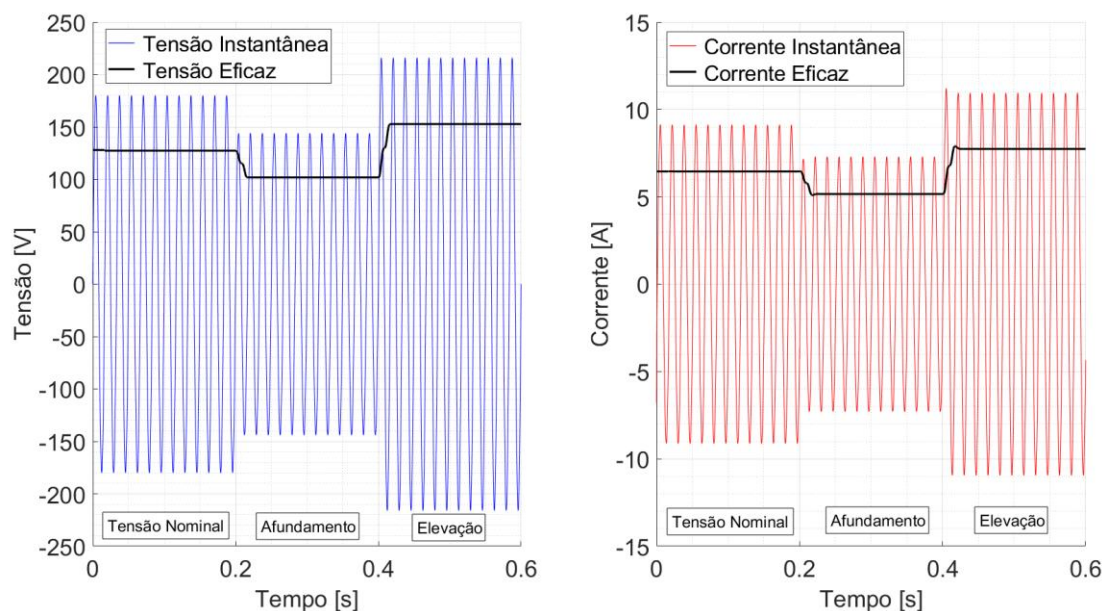
Tabela 3 - Intervalos de Afundamento e Elevação de Tensão.

Tempo (s)	Tensão de Alimentação
0,0 – 0,2	Tensão Nominal
0,2 – 0,4	Afundamento de 20% com duração de 12 ciclos
0,4 – 0,6	Elevação de 20% com duração de 12 ciclos

Fonte: Autoria própria.

Por meio da simulação, foram obtidos os gráficos de tensão e corrente instantâneas e eficazes, presentes na Figura 16:

Figura 16 - Formas de tensão e corrente para o Caso II.

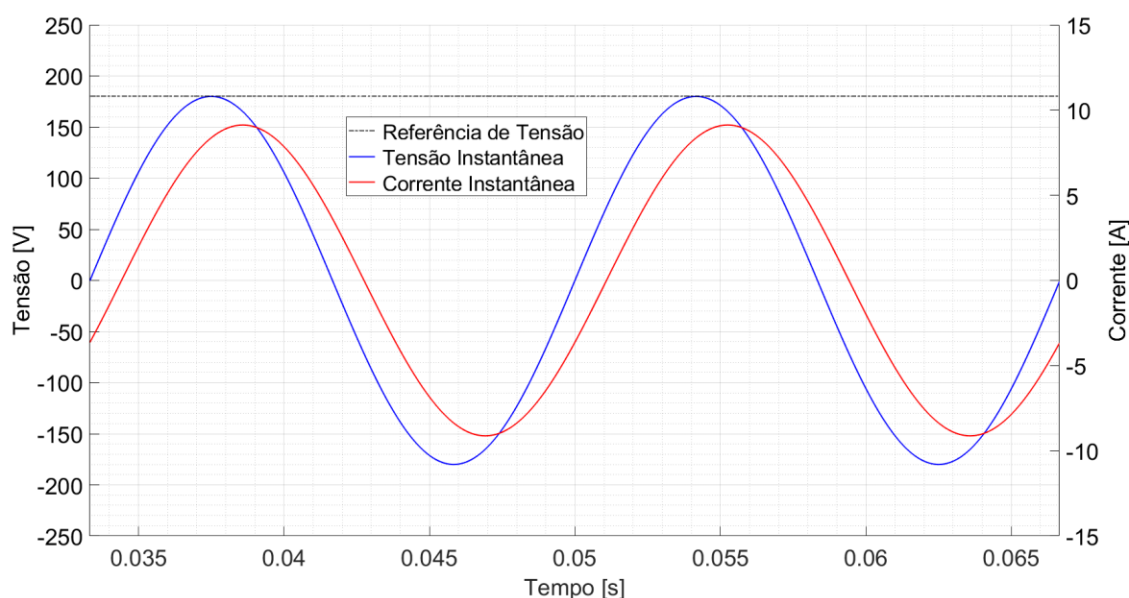


Fonte: Autoria própria.

Conforme mencionado anteriormente neste trabalho a partir da definição de afundamento de tensão (POMILIO, 2022), houve uma diminuição no valor da tensão eficaz ao provocar o afundamento de tensão, que foi acompanhada por uma diminuição proporcional no valor da corrente eficaz. Na mesma linha, houve também um aumento no valor da tensão e corrente eficaz ao provocar a elevação de tensão.

A fim de se obter uma referência, foi plotado o gráfico da Figura 17 com enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o intervalo I, no qual foi aplicado a tensão nominal no circuito. A corrente apresenta atraso em relação à tensão, devido à característica indutiva da carga estudada.

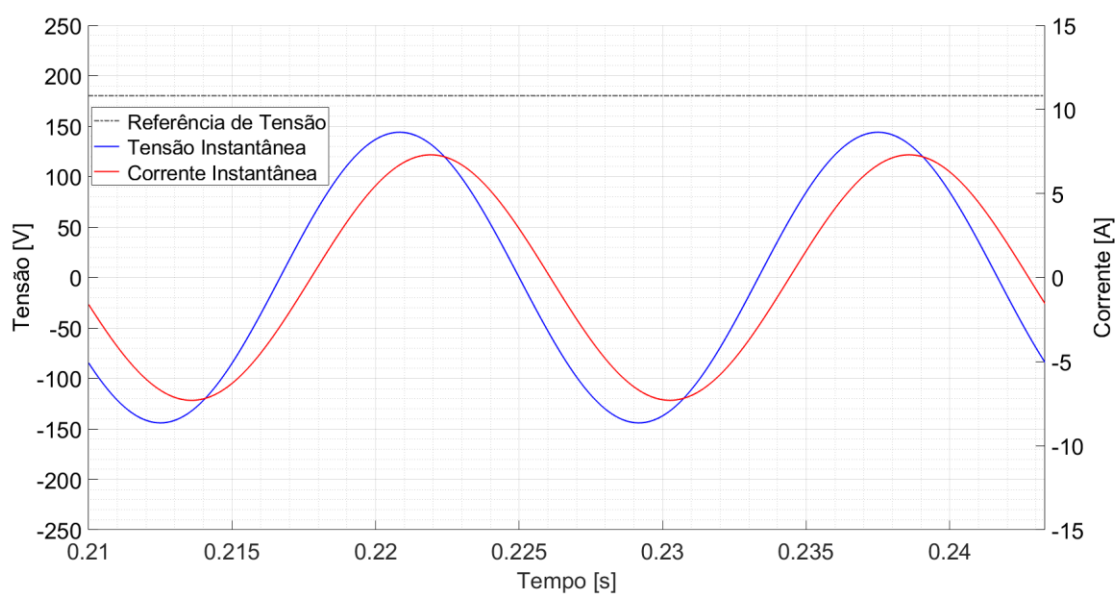
Figura 17 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso II intervalo I – Tensão Nominal.



Fonte: Autoria própria.

Ao observar na Figura 18 o enfoque das formas de onda de tensão e corrente no intervalo de tempo com afundamento de tensão, é possível notar que não houve nenhuma deformação nas formas de onda, nem alteração da defasagem entre a tensão e corrente. A única alteração ocorrida foi a diminuição na amplitude da tensão e da corrente.

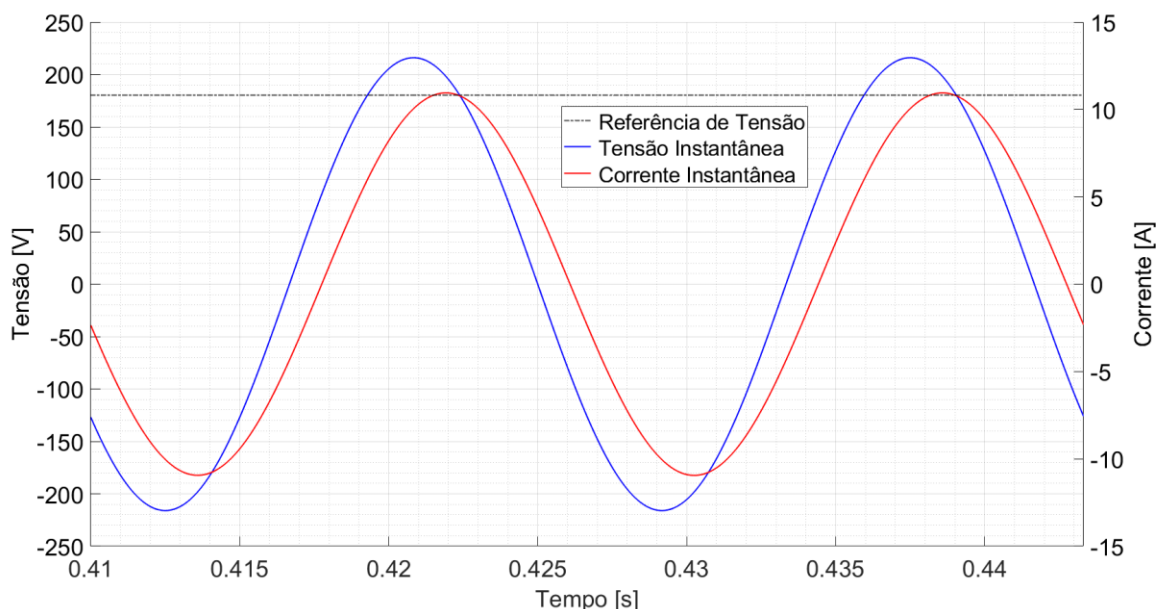
Figura 18 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso II intervalo II – Afundamento de Tensão.



Fonte: Autoria própria.

Conforme é possível observar na Figura 19, não houve alteração na defasagem entre tensão e corrente nem a presença de deformação nas formas de onda, apenas uma mudança na amplitude das grandezas, que neste caso, sofreu uma elevação.

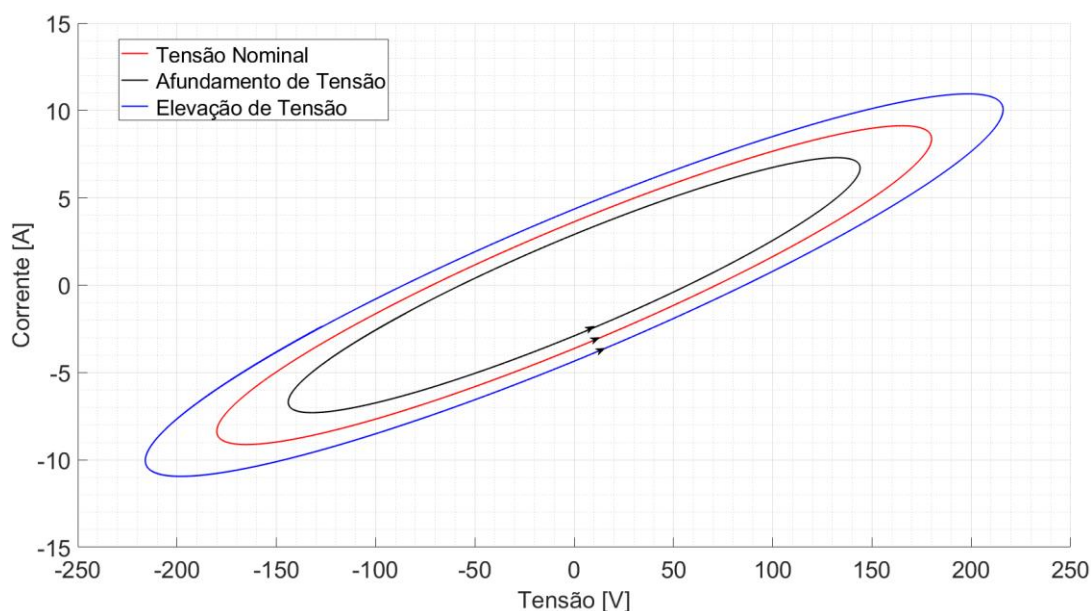
Figura 19 - Enfoque nas formas de onda de tensão corrente para o Caso II intervalo III – Elevação de Tensão.



Fonte: Autoria própria.

Com a tensão e a corrente obtidas por meio de simulação, é possível finalmente obter as trajetórias V-I para o circuito nos três intervalos, conforme ilustrado na Figura 20. O primeiro ponto a ser notado é a diferença nos tamanhos das elipses para os três casos. Ao tomar como referência a trajetória V-I do intervalo I (tensão nominal), observa-se que a trajetória V-I do intervalo II (afundamento de tensão) é menor, enquanto a trajetória no intervalo III (elevação de tensão) é maior. Além disso, todas as trajetórias V-I apresentam rotação em sentido anti-horário, devido à característica indutiva da carga.

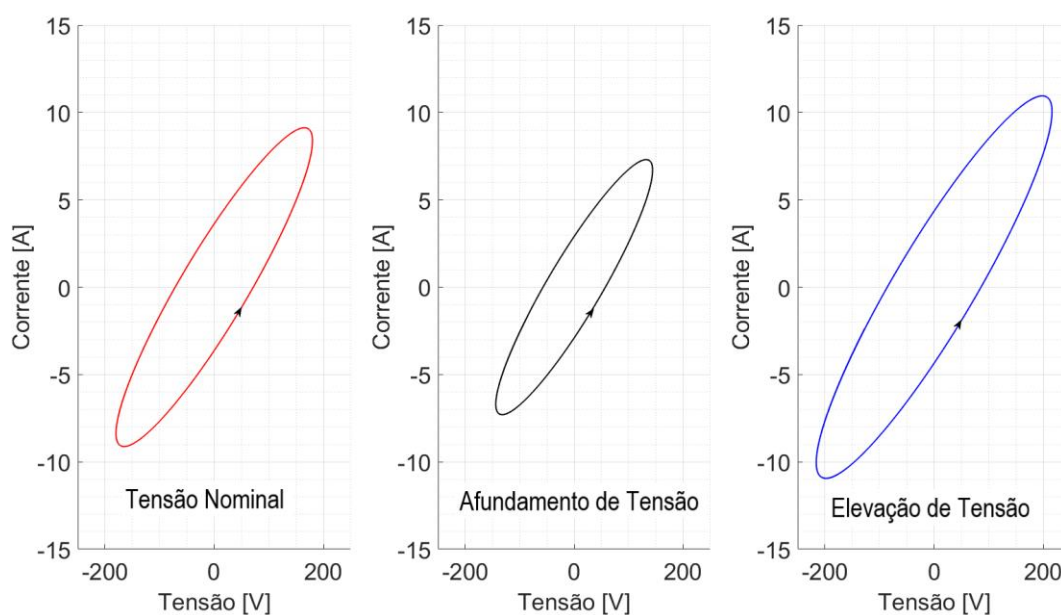
Figura 20 - Trajetórias V-I sobrepostas para o Caso II.



Fonte: Autoria própria.

Outro ponto a ser observado é a característica elíptica nas Trajetórias V-I para os três intervalos na Figura 21, sem a presença de deformações, sendo possível concluir que os distúrbios de Afundamento e Elevação de tensão não causam este tipo de deformação nas trajetórias V-I.

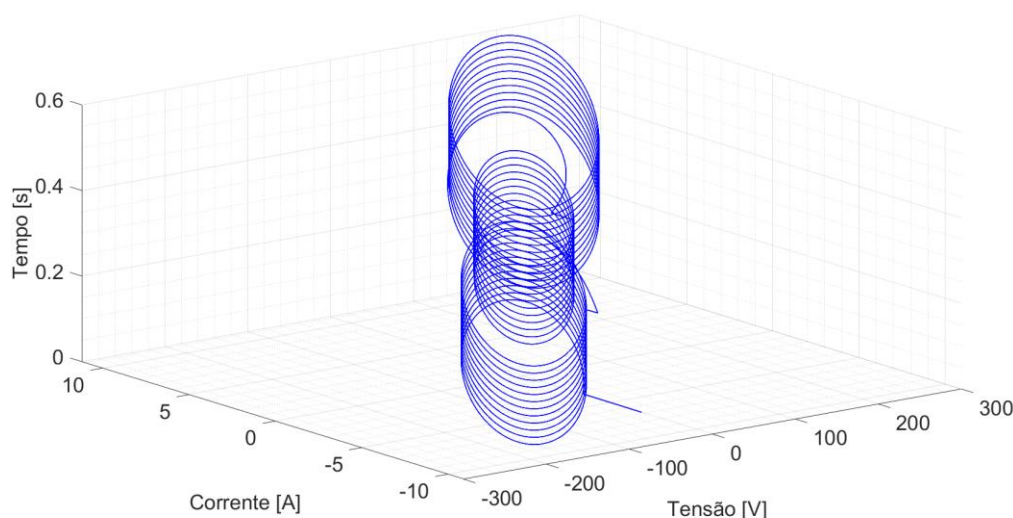
Figura 21 - Trajetórias V-I separadas para o Caso II.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 22, ao plotar a trajetória VI para o Caso II de maneira tridimensional, incluindo o eixo do tempo, é possível acompanhar a mudança no tamanho da trajetória elíptica ao longo do tempo, claramente notando-se os intervalos em que cada evento de variação de tensão ocorre.

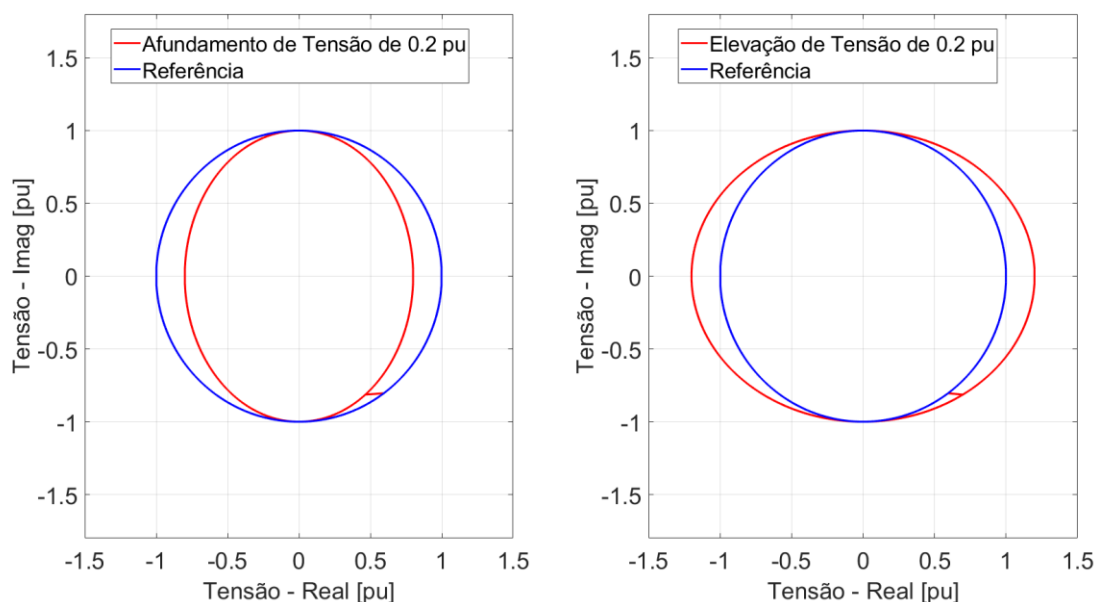
Figura 22 - Trajetória V-I tridimensional para o Caso II.



Fonte: Autoria própria.

Por outro lado, a Figura 23 mostra a Elipse de Espaço Vetorial no plano complexo para o Caso II, no qual ocorre o afundamento e a elevação de tensão. A elipse de referência pode ser vista em azul. À esquerda, está representado em vermelho um afundamento de tensão, onde observa-se um achatamento de 20% no eixo real em relação à referência, caracterizando um afundamento de tensão de 0.2 pu. À direita está representada a elevação de tensão, com sua elipse apresentando um estiramento no eixo real de 20%, relativo a uma elevação de tensão de 0.2 pu.

Figura 23 - Elipse de Espaço Vetorial no Plano Complexo para o Caso II intervalo II - Afundamento e Elevação de Tensão.



Fonte: Autoria própria.

Para ambos os casos, afundamento e elevação, a mudança é observada apenas no eixo real da elipse, sendo que os valores no eixo imaginário foram iguais aos da tensão de referência (sem distúrbios).

Os dados obtidos na simulação estão descritos na Tabela 4:

Tabela 4 - Grandezas obtidas para o circuito do Caso II.

	Intervalo I: Tensão Nominal	Intervalo II: Afundamento de Tensão	Intervalo III: Elevação de Tensão
Tensão Eficaz [V]	127,3	101,8	152,7
Corrente Eficaz [A]	6,4	5,1	7,7
DHT na Tensão [%]	0	0	0
DHT na Corrente [%]	0	0	0
Potência Ativa [W]	753	481	1085
Potência Reativa [var]	324	209	470
Potência Aparente [VA]	821	525	1182
FP	0,92	0,92	0,92

Fonte: Autoria própria.

Assim como visto graficamente, a Tabela 4 mostra que o afundamento e a elevação de tensão implicam respectivamente em uma diminuição e em um aumento dos valores de tensão e corrente eficazes no circuito, que se refletem nos valores de potência medidos.

Além disso, a DHT manteve-se em zero nos três intervalos devido à ausência de componentes harmônicas.

4.3 Caso III – Presença de 3ª harmônica na tensão antes e depois de compensação capacitiva

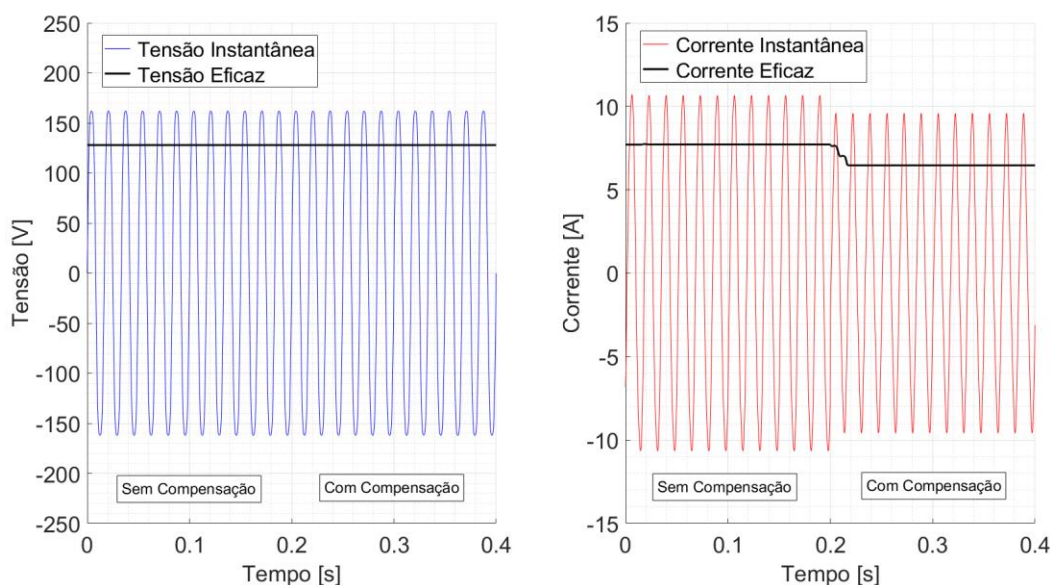
A fim de se estudar o distúrbio da distorção harmônica em um circuito, o Caso III traz a presença de uma tensão harmônica na fonte de alimentação juntamente com a tensão fundamental.

A tensão harmônica considerada para este caso é uma harmônica de 3ª ordem, com 180 Hz e amplitude no valor de 10% da tensão fundamental de alimentação.

A simulação do Caso III está dividida em dois intervalos: no primeiro intervalo, é conectada a carga de referência, que possui um fator de potência de 0,77 considerando a frequência fundamental de 60 Hz. Já no segundo intervalo, há a conexão de um capacitor, projetado para corrigir o fator de potência para 0,92 na fundamental.

A Figura 24 mostra as formas de tensão e corrente para o Caso III. A tensão eficaz manteve-se constante em ambos os intervalos e a corrente eficaz medida na fonte apresentou uma diminuição após a compensação do fator de potência.

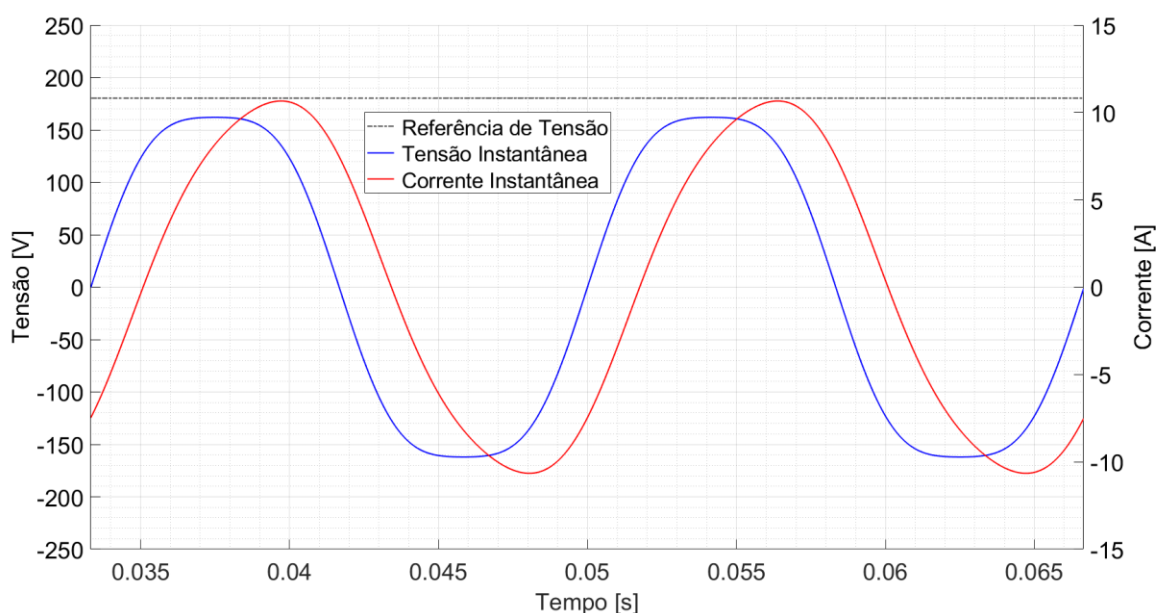
Figura 24 - Formas de tensão e corrente para o Caso III.



Fonte: Autoria própria.

Ao analisar as formas de onda no intervalo I, apresentados na Figura 25, é possível observar uma ligeira deformação nas formas de onda de tensão e corrente, causadas pela presença da componente harmônica de terceira ordem na alimentação do circuito. A Figura 25 também mostra a corrente atrasada em relação à tensão, devido ao fator de potência indutivo da carga.

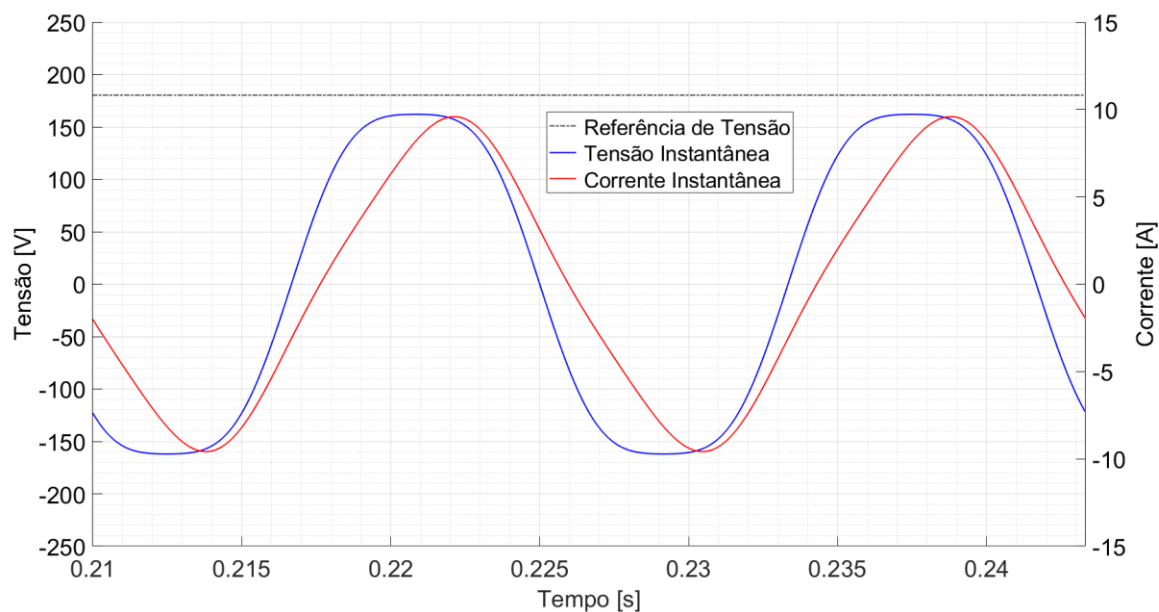
Figura 25 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso III intervalo I – Sem Compensação Capacitiva.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 26 traz as formas de onda de tensão e corrente para o Caso III no intervalo II com a compensação do fator de potência. A defasagem da corrente em relação à tensão diminuiu, entretanto, é possível notar uma maior distorção na forma de onda da corrente. Isto era esperado, uma vez que o capacitor sob tensão distorcida amplifica as harmônicas.

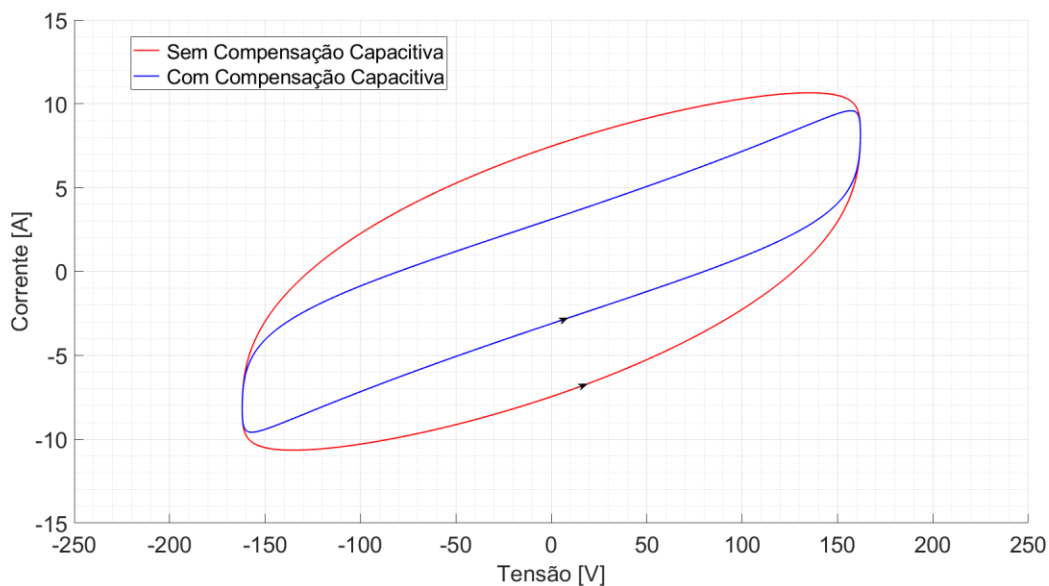
Figura 26 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso III intervalo II – Com Compensação Capacitiva.



Fonte: Autoria própria.

Com os gráficos das Trajetórias V-I para o Caso III, exibidos na Figura 27 fica nítida a deformação causada pela presença de distorção Harmônica no circuito, pois as trajetórias não apresentam mais as formas elípticas observadas nos casos anteriores. Além disso, observa-se que as curvas V-I apresentam rotação em sentido anti-horário, em função do comportamento indutivo da carga.

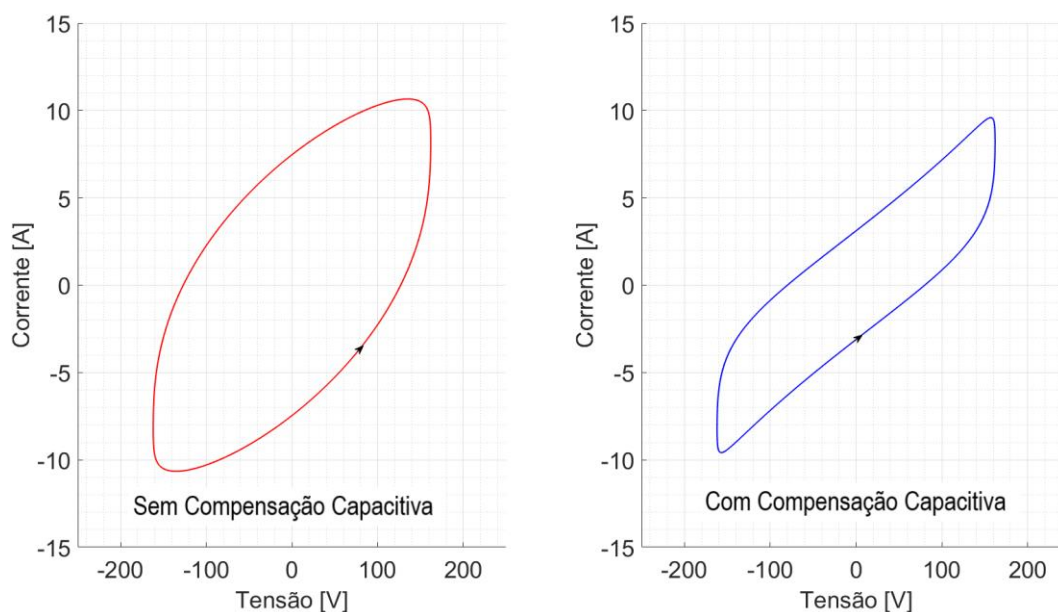
Figura 27 - Trajetórias V-I sobrepostas para o Caso III.



Fonte: Autoria própria.

Ao observar separadamente as trajetórias V-I para o Caso III, apresentadas na Figura 28 nota-se que a distorção foi maior para o intervalo II, com a presença do banco de capacitores, conforme verificado anteriormente nas formas de onda de tensão e corrente mostradas nas Figuras 25 e 26.

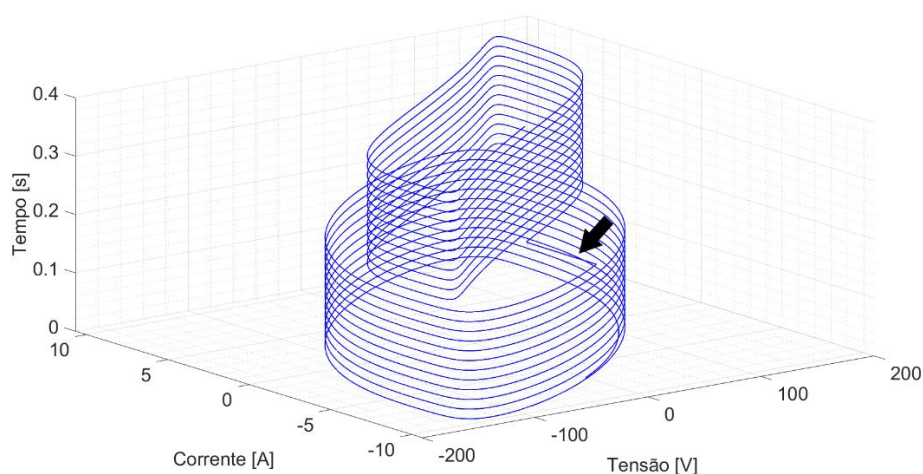
Figura 28 - Trajetórias V-I separadas para o Caso III.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 29 traz a representação tridimensional da Trajetória V-I incluindo o eixo do tempo. Desta forma, pode-se observar o intervalo no qual ocorreu a compensação do fator de potência, apontado pela seta na trajetória.

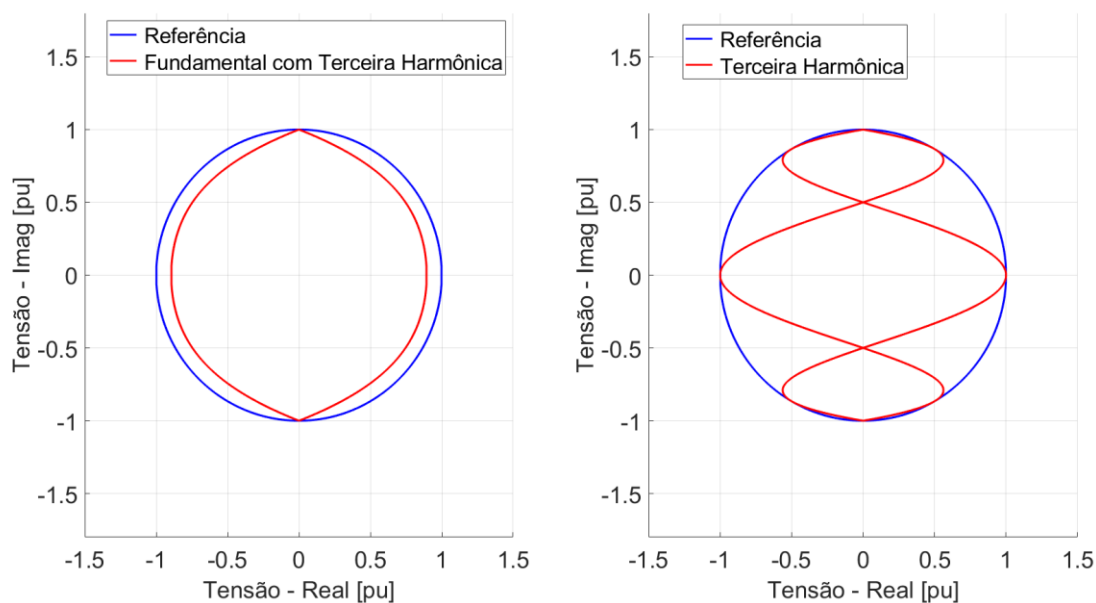
Figura 29 - Trajetória V-I tridimensional para o Caso III.



Fonte: Autoria própria.

Elipses de Espaço Vetorial também podem ser utilizadas para a análise da presença de distorções harmônicas no circuito, conforme visto na Figura 30.

Figura 30 - Elipse de Espaço Vetorial no Plano Complexo para o Caso III - Harmônica de Terceira Ordem.



Fonte: Autoria própria.

À esquerda, está representada a Elipse de Espaço Vetorial referente à combinação da tensão fundamental com a componente harmônica de 3ª ordem. Neste exemplo, é possível observar que a figura possui duas extremidades, além de apresentar um

achatamento no eixo real da tensão. Já na direita, está representada a Elipse para a componente harmônica de 3ª ordem isoladamente. Nesta figura, a elipse delimita três áreas diferentes. Isto é característico de uma harmônica de terceira ordem, pois o número de áreas delimitadas pela elipse é igual à ordem da harmônica presente.

A Tabela 5 mostra os valores obtidos para o Caso III.

Tabela 5 - Grandezas obtidas para o circuito do Caso III.

	Intervalo I: Sem Compensação Capacitiva	Intervalo II: Com Compensação Capacitiva
Tensão Eficaz [V]	128	128
Corrente Eficaz [A]	7,7	6,5
DHT na Tensão [%]	10,0	10,0
DHT na Corrente [%]	4,8	19,3
Potência Ativa [W]	755	755
Potência Reativa [var]	635	336
Potência Aparente [VA]	987	827
FP	0,77	0,91

Fonte: Autoria própria.

De acordo com os dados numéricos obtidos, alguns pontos importantes podem ser mencionados. O primeiro ponto é o valor da DHT na tensão de 10%, sendo este valor igual à proporção do valor da terceira harmônica em relação à tensão fundamental.

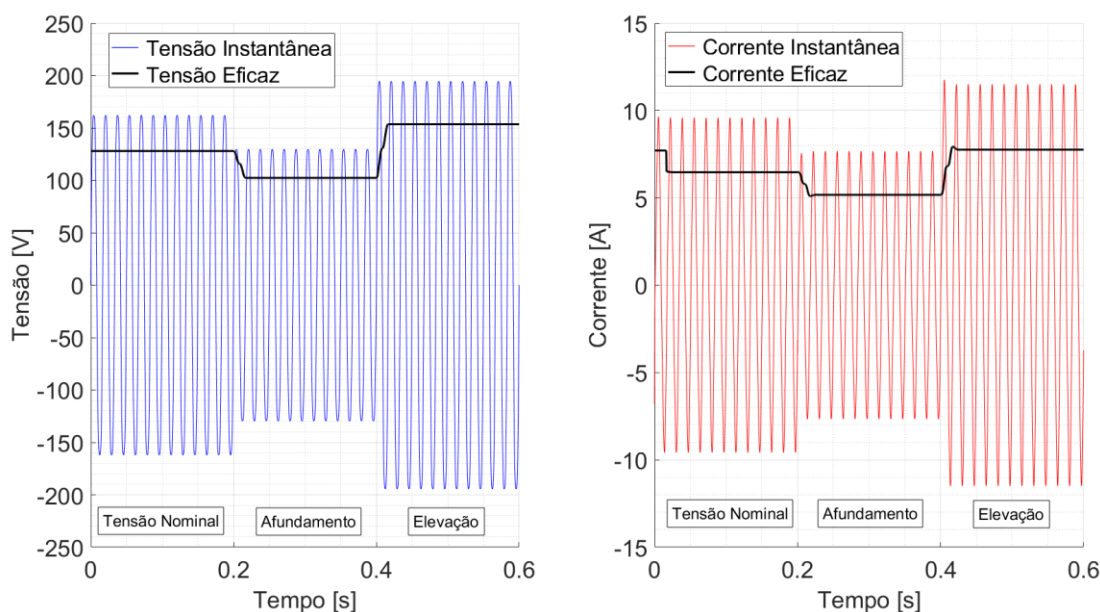
Outro ponto importante é o FP no intervalo II ser igual a 0,91, diferentemente do valor observado nos Casos I e II, nos quais o valor do FP obtido com o banco de capacitores era de 0,92. Isto se deve ao fato da compensação capacitiva ter sido projetada levando em consideração apenas a frequência fundamental de 60 Hz. Como os capacitores e indutores presentes em cargas reativas têm seus valores de reatância dependentes da frequência da tensão e corrente no circuito, os valores se alteraram devido à inclusão de uma frequência diferente da fundamental, acarretando então em uma divergência no valor do fator de potência obtido com relação ao esperado.

4.4 Caso IV – Presença de 3ª Harmônica na Tensão com Afundamento e Elevação de Tensão

Conforme mencionado anteriormente, existem momentos em que ocorrem múltiplos distúrbios simultaneamente. O Caso IV tem como objetivo simular os distúrbios de afundamento e elevação de tensão em um circuito com a presença de distorção harmônica.

Para os distúrbios de afundamento e elevação de tensão do Caso IV, foram consideradas as mesmas magnitudes e os mesmos intervalos considerados no Caso II, enquanto a distorção harmônica é a mesma aplicada no Caso III. Com isso, foi possível obter o gráfico de tensão e corrente eficaz exposto na Figura 31:

Figura 31 - Formas de tensão e corrente para o Caso IV.

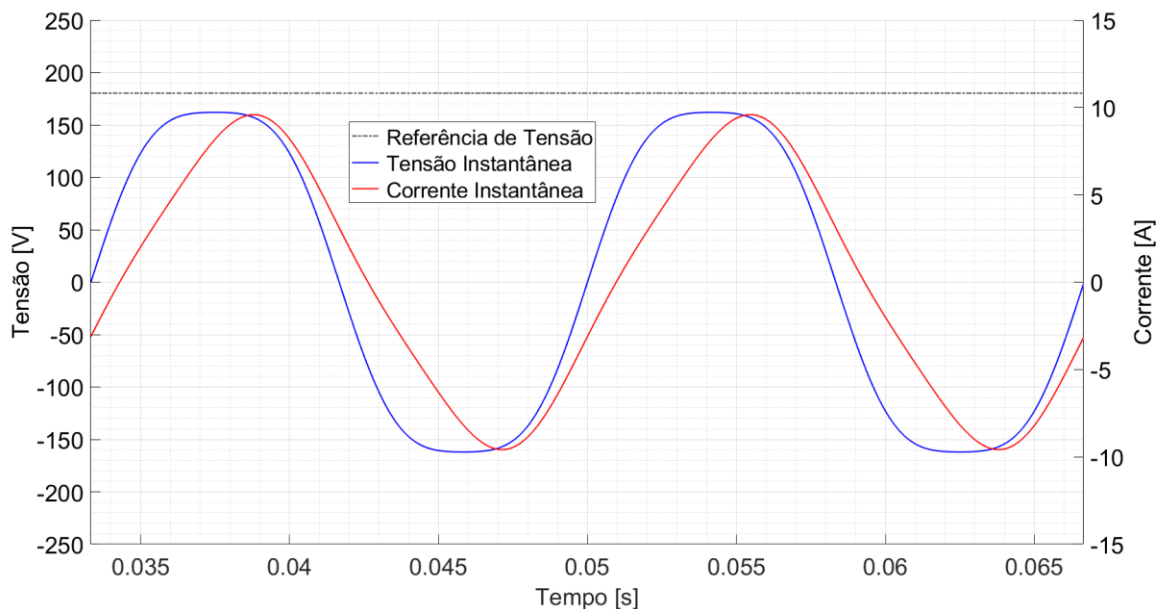


Fonte: Autoria própria.

Os resultados observados na Figura 31 são semelhantes aos resultados observados no Caso II, com a diminuição da tensão e corrente eficazes ao provocar um afundamento de tensão e aumento nesses valores ao se provocar uma elevação de tensão.

A Figura 32 mostra as formas de onda de tensão e corrente para o Caso IV no intervalo I, com a presença da componente harmônica de 3ª ordem, mas sem a presença de Afundamento ou Elevação de tensão, sendo tomado como referência no Caso IV.

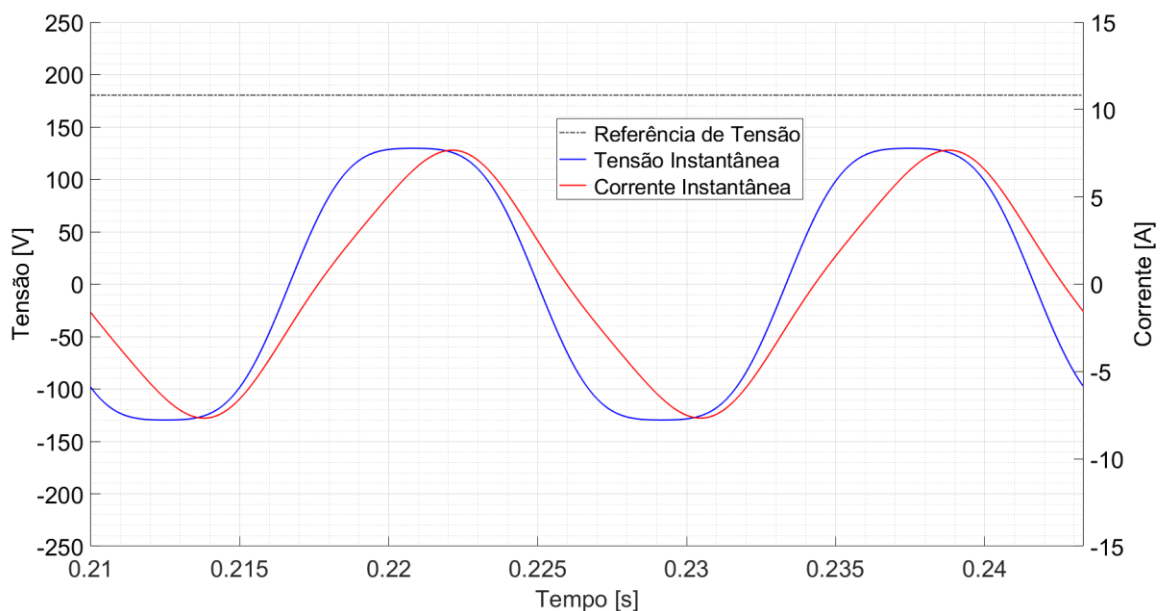
Figura 32 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso IV intervalo I – Tensão Nominal com 3ª Harmônica.



Fonte: Autoria própria.

Conforme já verificado anteriormente a respeito da presença do afundamento de tensão, a Figura 33 mostra que houve diminuição na amplitude nas formas de onda de tensão e corrente. Entretanto, é possível também observar a presença de distorção nas formas de onda causadas pela presença da componente harmônica de 3ª ordem.

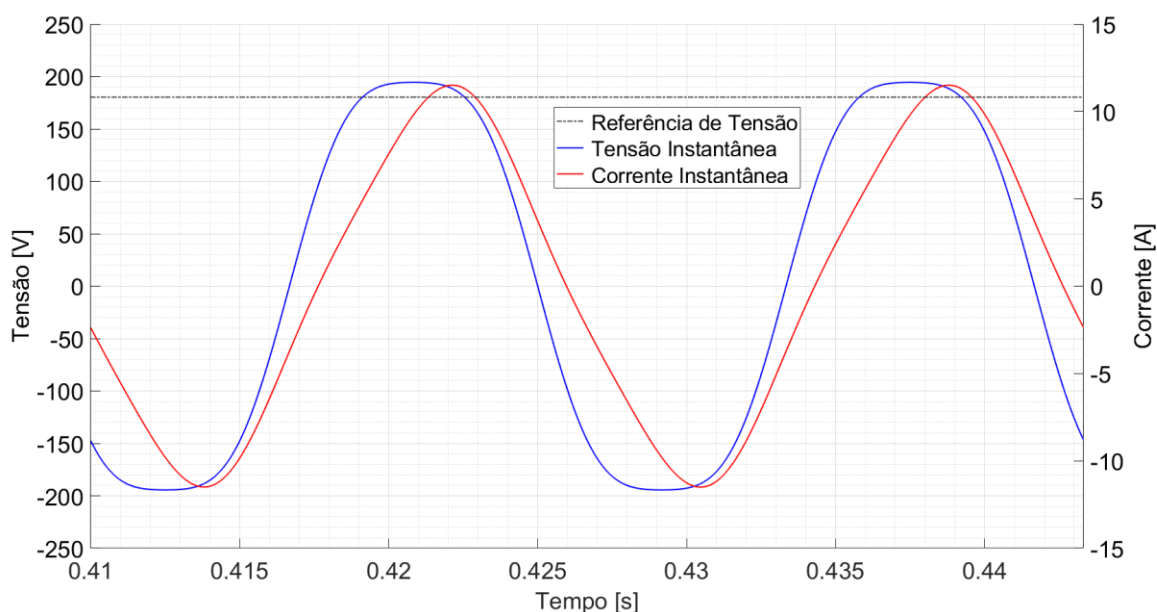
Figura 33 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso IV intervalo II – Afundamento de Tensão com 3ª Harmônica.



Fonte: Autoria própria.

Ao analisar a Figura 34, com enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o intervalo III, é possível observar a combinação dos dois distúrbios, com a presença de distorção harmônica e com aumento na amplitude de tensão e corrente em comparação com o intervalo de referência.

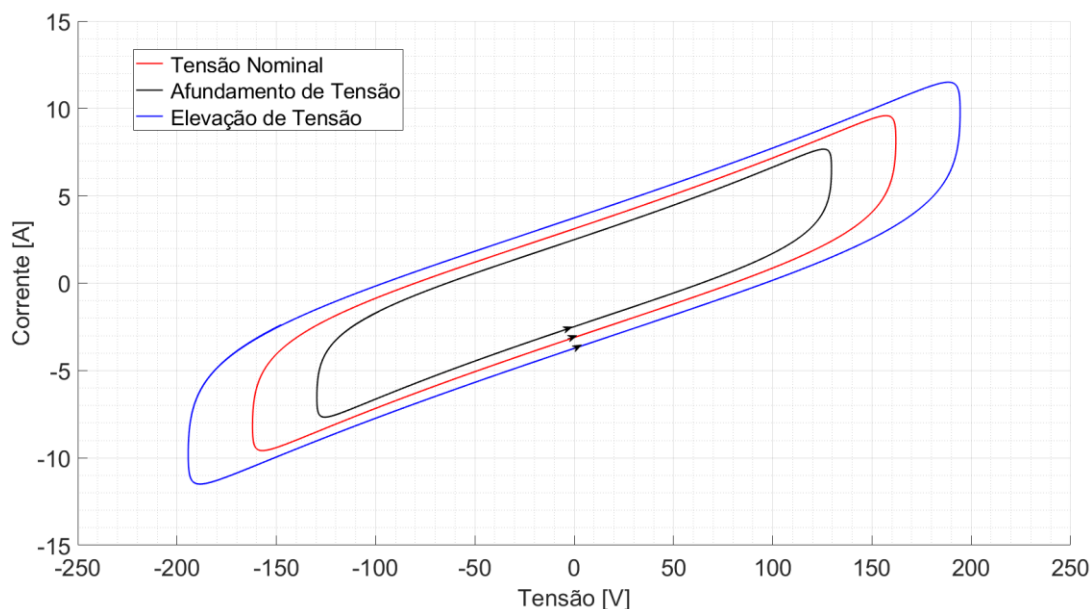
Figura 34 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso IV intervalo III – Elevação de Tensão com 3ª Harmônica.



Fonte: Autoria própria.

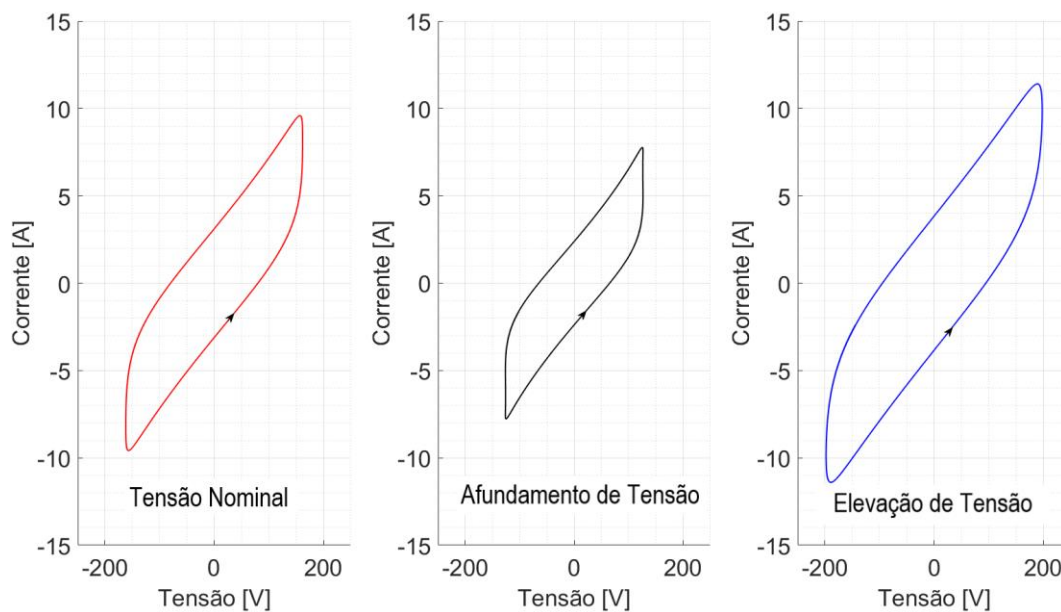
É importante destacar que, as trajetórias V-I dos três intervalos, expostas na Figura 35, apresentam uma diferença nos tamanhos das trajetórias, causada pelo Afundamento e Elevação de tensão, conforme já discutido no Caso II. É possível observar também a distorção provocada pela presença da componente harmônica, conforme ilustrado nas trajetórias individuais da Figura 36.

Figura 35 - Trajetórias V-I sobrepostas para o Caso IV.



Fonte: Autoria própria.

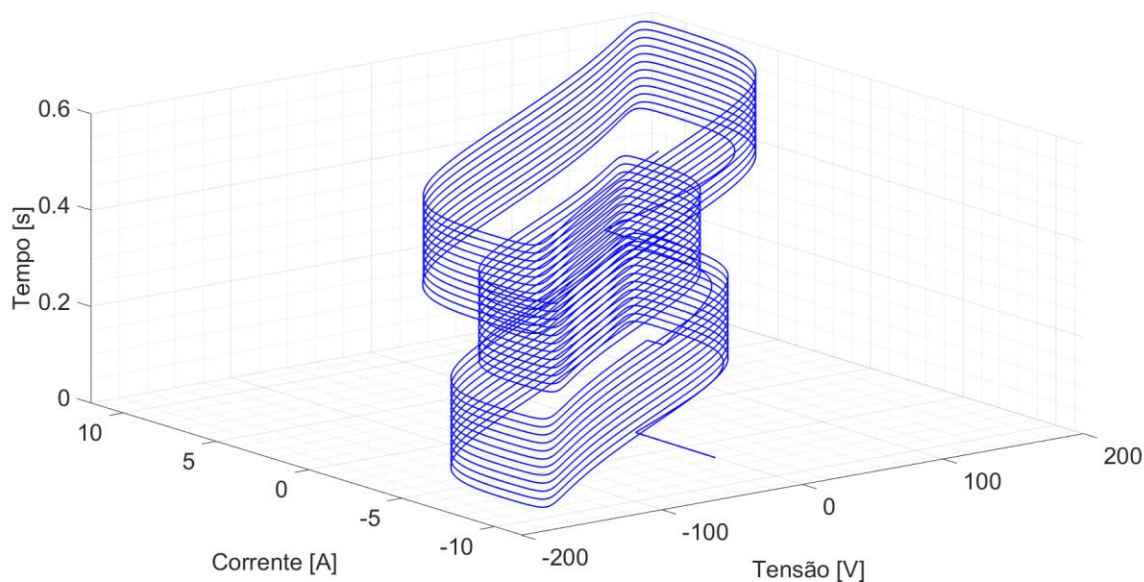
Figura 36 - Trajetórias V-I separadas para o Caso IV.



Fonte: Autoria própria.

A trajetória V-I tridimensional para o Caso IV apresentada na Figura 37 mostra a evolução ao longo do tempo dos distúrbios presentes, sendo possível diferenciar os três intervalos analisados, bem como os momentos em que há a transição entre eles. Observa-se que as trajetórias para os três intervalos apresentam o mesmo formato, mudando apenas o seu tamanho para cada intervalo.

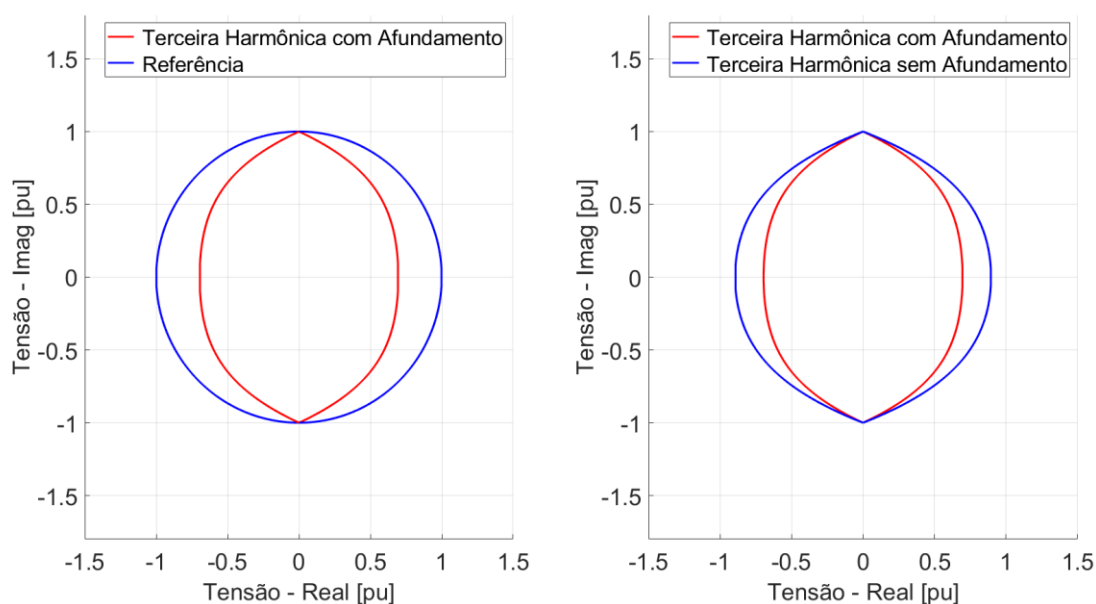
Figura 37 - Trajetória V-I tridimensional para o Caso IV.



Fonte: Autoria própria.

Agora, analisando a Elipse de Espaço Vetorial na Figura 38 à esquerda, constata-se a diferença da elipse que representa o distúrbio de distorção harmônica de terceira ordem com afundamento (em vermelho) em relação à referência de um circuito sem distúrbios (em azul).

Figura 38 - Elipse de Espaço Vetorial no Plano Complexo para o Caso IV Intervalo I - Harmônica de Terceira Ordem Com Afundamento de Tensão.

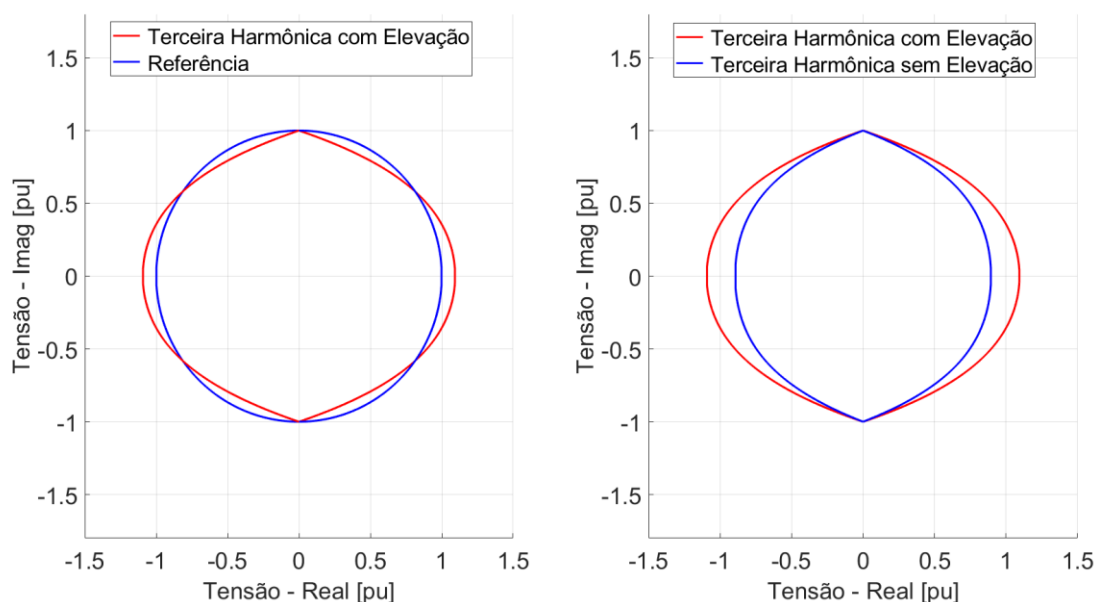


Fonte: Autoria própria.

A Figura 38 à direita mostra que é possível fazer uma análise dos distúrbios de QEE de maneira isolada utilizando as Elipses Vetoriais no espaço complexo, pois desta vez, a referência em azul é relacionada a um circuito com apenas o distúrbio de terceira harmônica (sem afundamento), enquanto a trajetória em vermelho representa a combinação dos dois distúrbios. Desta forma, torna-se mais fácil separar os distúrbios de QEE.

Partindo do mesmo pressuposto, na Figura 39 é possível observar a combinação dos distúrbios de elevação de tensão e distorção harmônica a partir de duas referências diferentes.

Figura 39 - Elipse de Espaço Vetorial no Plano Complexo para o Caso IV Intervalo II - Harmônica de Terceira Ordem Com Afundamento de Tensão.



Fonte: Autoria própria.

Por fim, os parâmetros obtidos na simulação puderam ser obtidos e tabelados na Tabela 6:

Tabela 6 - Grandezas obtidas para o circuito do Caso IV.

	Intervalo 1: Tensão Nominal	Intervalo 2: Afundamento de Tensão	Intervalo 2: Elevação de Tensão
Tensão Eficaz [V]	127,9	102,3	153,5
Corrente Eficaz [A]	6,5	5,2	7,8
DHT na Tensão [%]	10	10	10
DHT na Corrente [%]	6,1	6,1	6,1
Potência Ativa [W]	755	484	1087
Potência Reativa [var]	336	215	484
Potência Aparente [VA]	827	529	1190
FP	0,91	0,91	0,91

Fonte: Autoria própria.

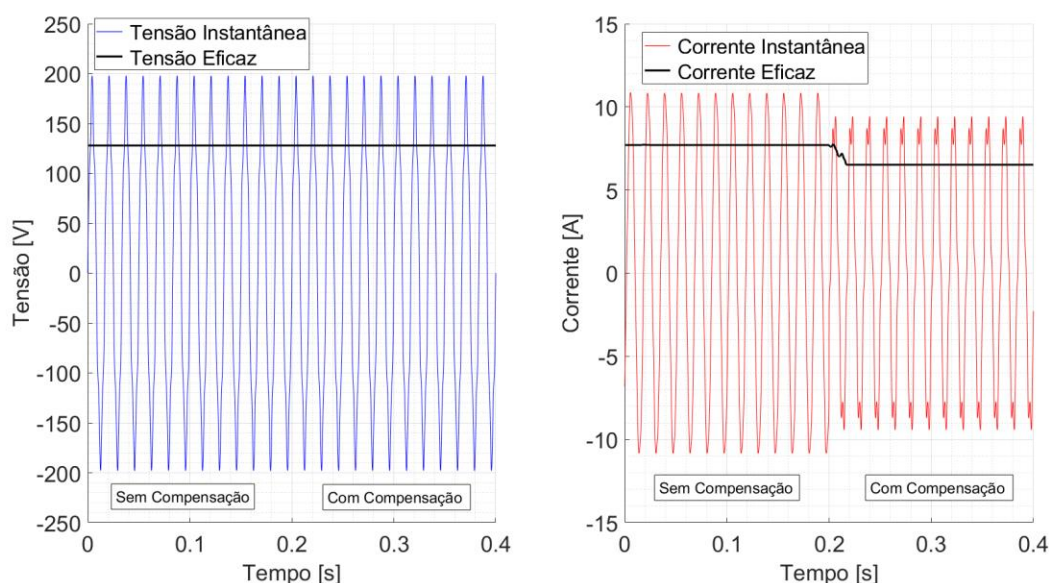
Em relação aos dados apresentados na Tabela 6, é importante atentar-se ao fato que o fator de potência é 0,91 e não de 0,92 como projetado, pois assim como explicado no Caso III, a presença de uma componente harmônica altera os valores de reatância indutiva e capacitiva da carga.

4.5 Caso V – Presença de 5ª Harmônica na Tensão antes e depois de compensação capacitiva

Prosseguindo com o estudo do distúrbio de distorção harmônica em circuitos monofásicos, o Caso V tem como objetivo simular e discutir a presença de uma componente harmônica de 5ª ordem na alimentação do circuito.

A tensão harmônica aplicada possui frequência de 300 Hz e amplitude igual a 10% da amplitude da tensão fundamental do circuito. A simulação é dividida em dois intervalos: O primeiro intervalo com a carga de referência, com fator de potência de 0,77 e o segundo intervalo com o chaveamento de um banco de capacitores projetado para corrigir o fator de potência para 0,92.

Figura 40 - Formas de tensão e corrente para o Caso V.

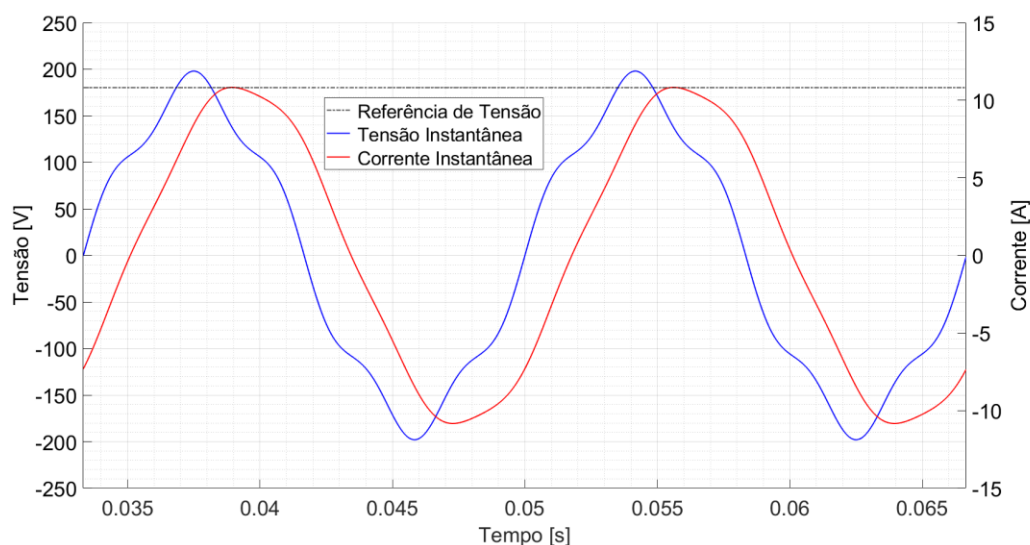


Fonte: Autoria própria.

As formas de onda de tensão e corrente para o período inteiro de simulação podem ser vistas na Figura 40, juntamente com o valor eficaz de tensão e corrente.

Com o enfoque nas formas de onda de tensão e corrente, apresentadas na Figura 41, é possível observar a distorção causada pela componente harmônica. Nota-se que a distorção causada por uma componente harmônica de 5ª ordem é maior que a distorção causada pela componente harmônica de 3ª ordem.

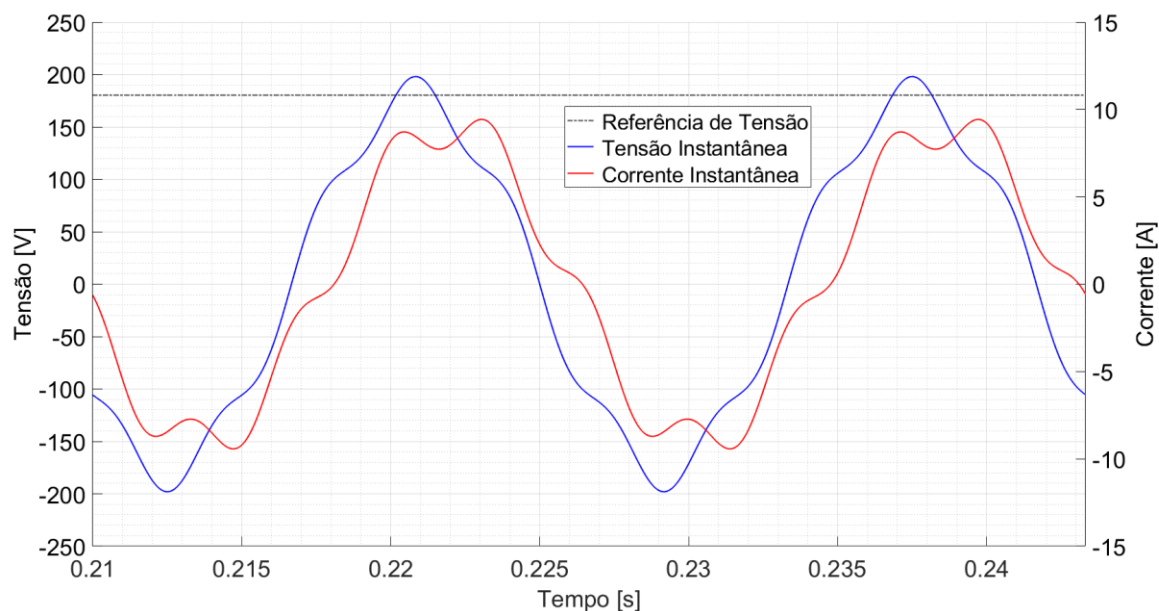
Figura 41 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso V intervalo I – Sem Compensação Capacitiva.



Fonte: Autoria própria.

A adição de um banco de capacitores acentua ainda mais a distorção causada pela componente harmônica, conforme pode ser observado na Figura 42.

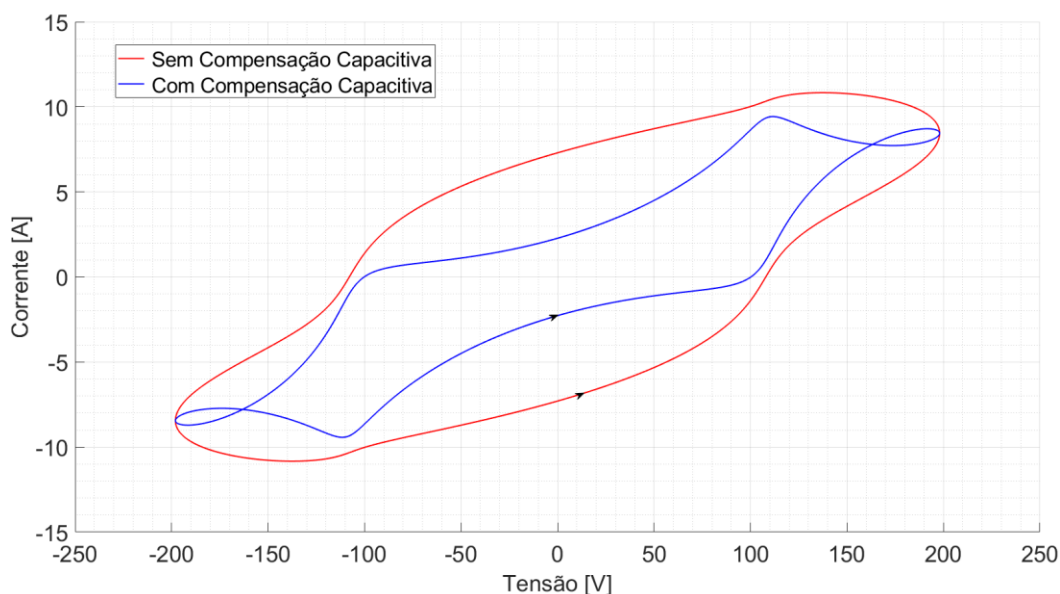
Figura 42 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso V intervalo II – Com Compensação Capacitiva.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 43 traz as Trajetórias V-I relativas à presença de uma harmônica de 5ª ordem no circuito. Pode-se notar mais uma vez a maior distorção causada pela harmônica de 5ª ordem em relação à distorção causada pela harmônica de 3ª ordem.

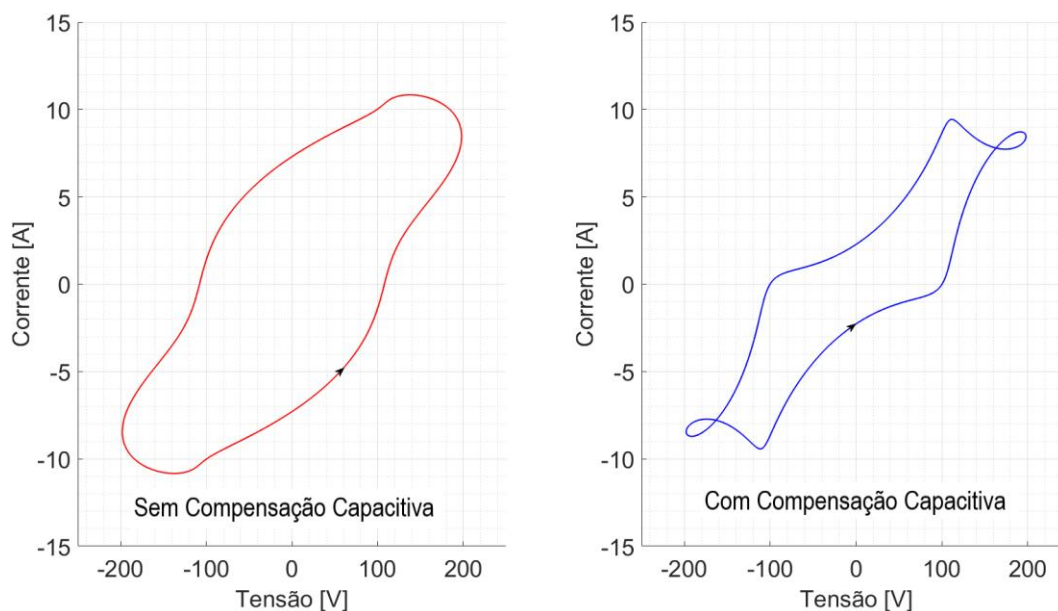
Figura 43 - Trajetórias V-I sobrepostas para o Caso V.



Fonte: Autoria própria.

Outro ponto a ser mencionado é o acentuamento da deformação na Trajetória V-I para o circuito com a presença de compensação capacitiva, visto na Figura 44 à direita, em relação ao circuito sem a presença de compensação capacitiva, visto na Figura 44 à esquerda. A presença de compensação capacitiva no circuito gerou uma Trajetória V-I com a presença de seis “saliências”.

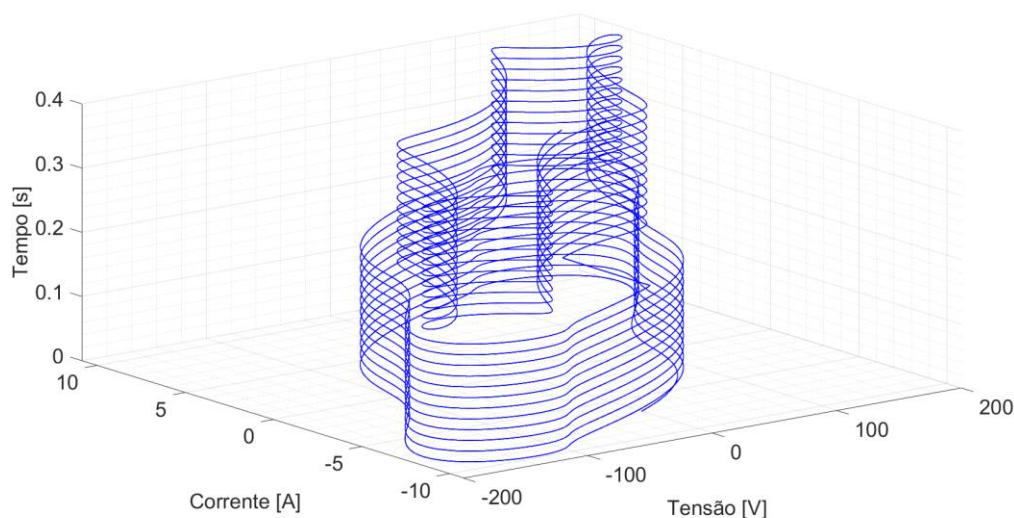
Figura 44 - Trajetórias V-I separadas para o Caso V.



Fonte: Autoria própria.

A trajetória V-I tridimensional, presente na Figura 45, permite observar ao longo do tempo os efeitos da compensação capacitiva ao longo do tempo, que ampliam as distorções na trajetória.

Figura 45 - Trajetória V-I tridimensional para o Caso V.

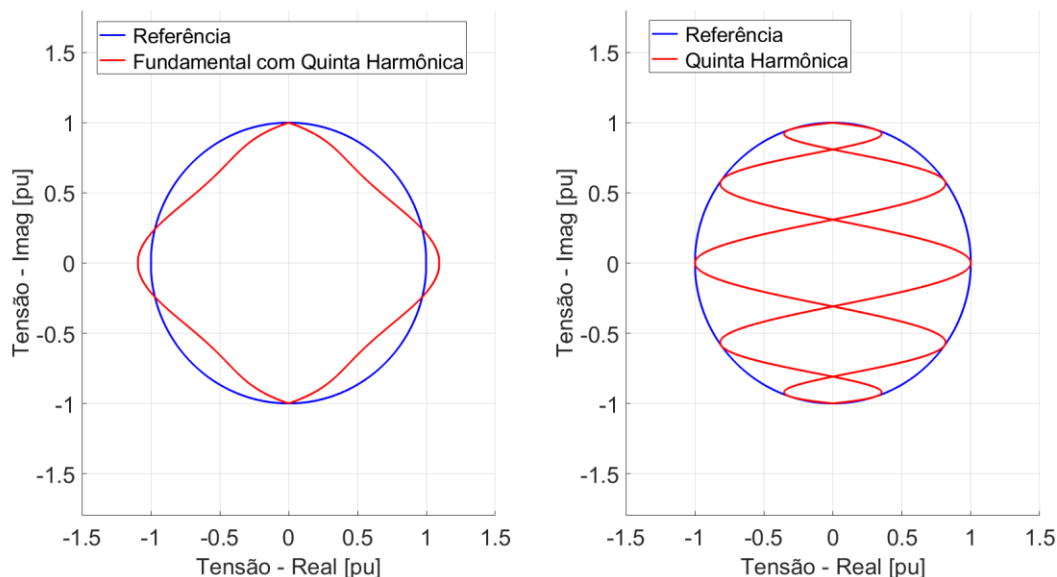


Fonte: Autoria própria.

A Figura 46 destaca à esquerda a presença da componente harmônica de 5ª ordem no circuito, juntamente com a tensão harmônica. Desta forma, é possível observar uma distorção peculiar na Elipse, com a formação de uma figura com quatro extremidades.

Na Figura 46 à direita, a elipse em vermelho representa somente a componente harmônica de 5ª ordem, sendo possível observar que a elipse delimita cinco diferentes áreas, permitindo assim a identificação da Harmônica de 5ª Ordem.

Figura 46 - Elipse de Espaço Vetorial no Plano Complexo para o Caso V - Harmônica de Quinta Ordem.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados numéricos obtidos com a simulação do circuito com a Harmônica de 5ª ordem estão organizados na Tabela 7:

Tabela 7 - Grandezas obtidas para o circuito do Caso V.

	Intervalo 1: Sem Compensação Capacitiva	Intervalo 2: Com Compensação Capacitiva
Tensão Eficaz [V]	128	128
Corrente Eficaz [A]	7,7	6,5
DHT na Tensão [%]	10,0	10,0
DHT na Corrente [%]	3,0	37,9
Potência Ativa [W]	754	754
Potência Reativa [var]	635	357
Potência Aparente [VA]	986	834
FP	0,77	0,90

Fonte: Autoria própria

Com os resultados numéricos obtidos para o Caso V, é possível notar que as grandezas apresentaram resultados semelhantes aos obtidos no Caso III. O fator de potência no intervalo II é ainda menor em relação ao fator de potência projetado para um circuito com tensão fundamental. Isso mostra que uma harmônica de ordem maior possui ainda mais influência sobre as cargas reativas de um circuito. Além disso, é possível observar que a adição de um capacitor amplifica a DHT na corrente, tendo seu impacto ainda maior para componentes harmônicas de maior ordem.

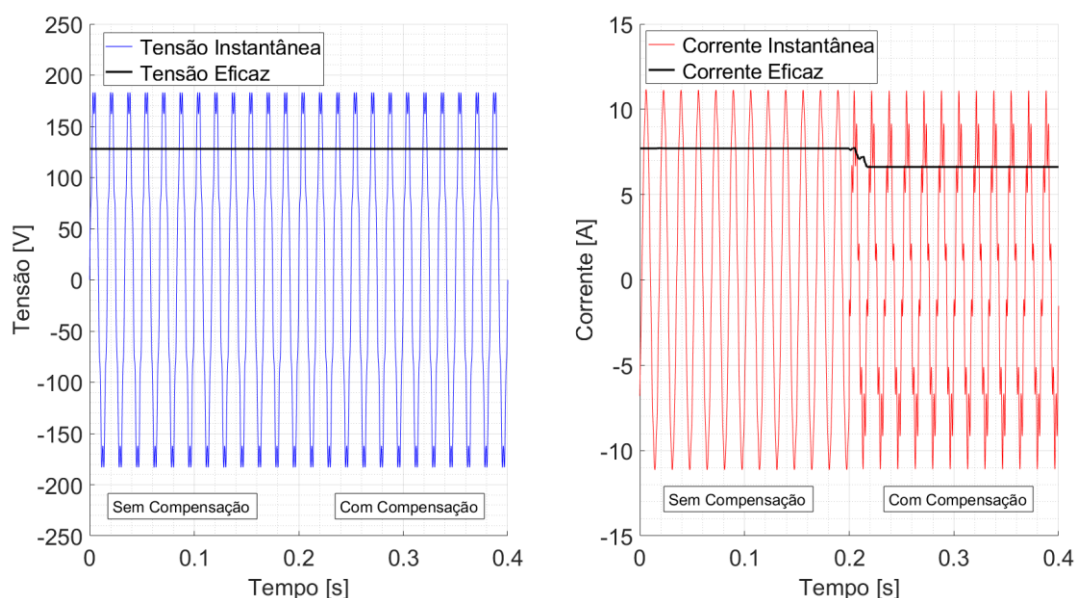
4.6 Caso VI – Presença de 7ª Harmônica na Tensão antes e depois de compensação capacitiva

Dando continuidade aos estudos da distorção harmônica, o Caso VI traz a simulação de uma componente harmônica de 7ª ordem na alimentação do circuito.

Com efeito, a tensão harmônica aplicada possui frequência de 420 Hz e amplitude igual a 10% da amplitude da tensão fundamental do circuito. A simulação é dividida em dois intervalos: o primeiro intervalo com a carga tendo fator de potência de 0,77 e o segundo intervalo com um banco de capacitores para corrigir o fator de potência para 0,92 na frequência fundamental.

A Figura 47 traz os resultados de tensão e corrente eficazes para o Caso VI, bem como as formas de onda de tensão e corrente instantâneas.

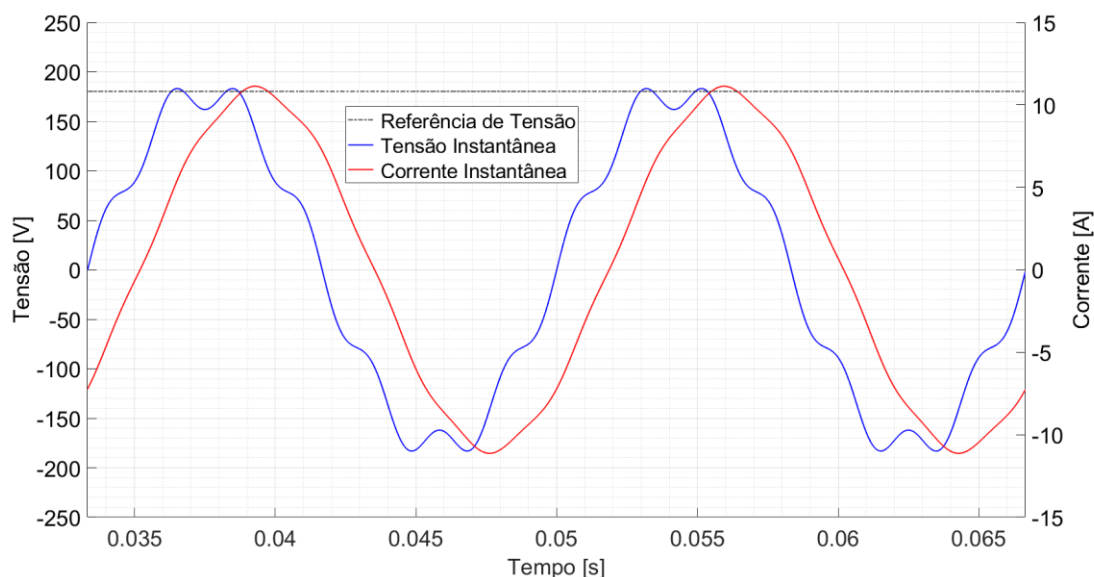
Figura 47 - Formas de tensão e corrente para o Caso VI.



Fonte: Autoria própria.

No que concerne o enfoque nas formas de onda, observa-se na Figura 48 uma grande distorção causada pela presença da componente harmônica de sétima ordem.

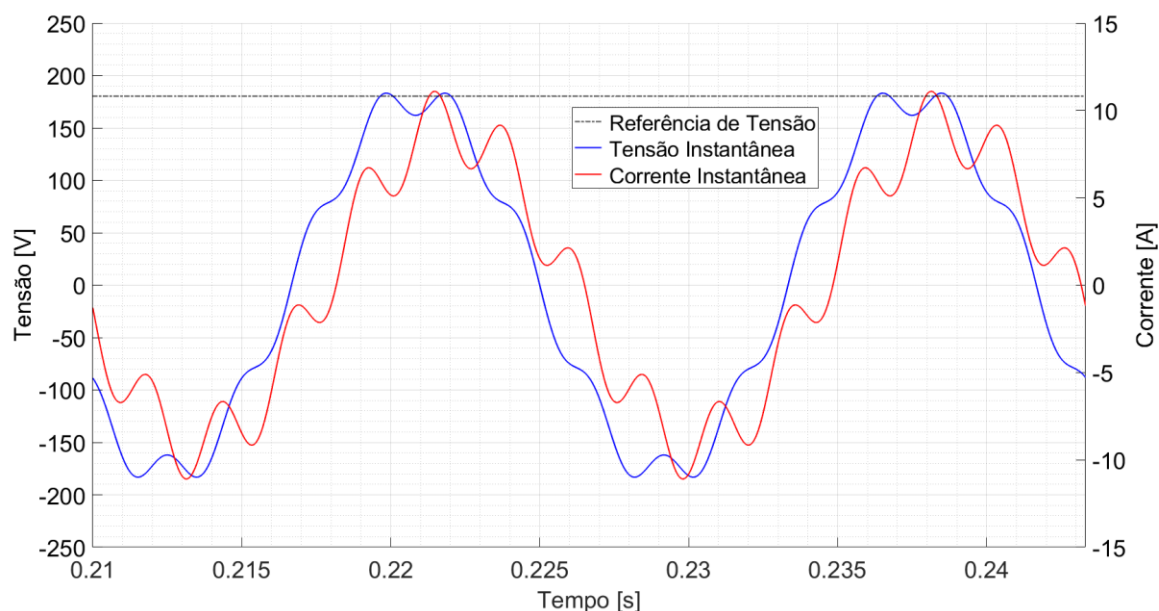
Figura 48 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso VI intervalo I – Sem Compensação Capacitiva.



Fonte: Autoria própria.

O enfoque nas formas de tensão e corrente para o intervalo II do Caso VI evidencia mais uma vez a presença das distorções causadas pela componente harmônica, sendo esta distorção ainda mais acentuada com a correção do fator de potência, conforme visto na Figura 49.

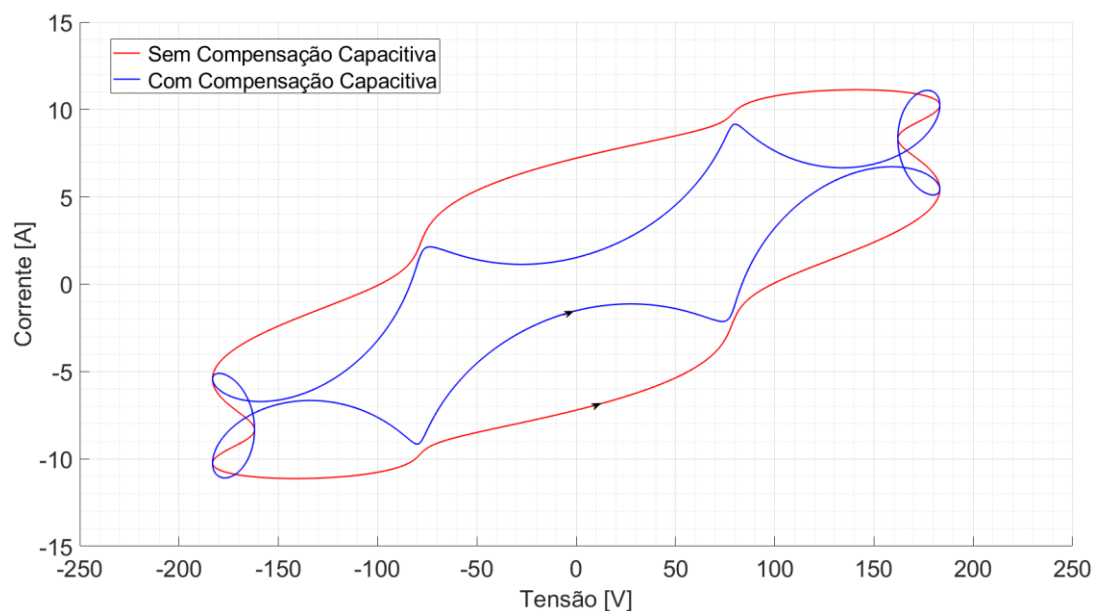
Figura 49 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso VI intervalo II – Com Compensação Capacitiva.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 50 demonstra as trajetórias V-I sobrepostas para o Caso VI, com a presença de uma componente harmônica de 7^a ordem. Estas trajetórias possuem uma forma característica, apresentando seis inflexões, que são mais acentuadas para a carga com a presença de compensação capacitiva.

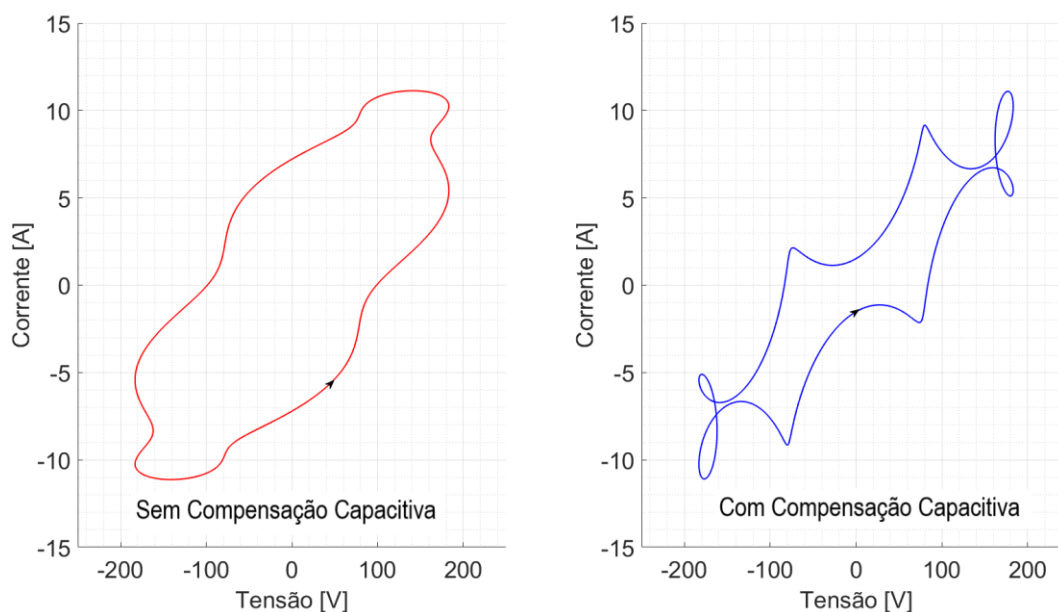
Figura 50 - Trajetórias V-I sobrepostas para o Caso VI.



Fonte: Autoria própria.

As Trajetórias V-I presentes na Figura 51 apresentam a deformação característica de uma harmônica de 7ª ordem, que ficam mais evidentes com a presença do banco de capacitores para compensação de FP.

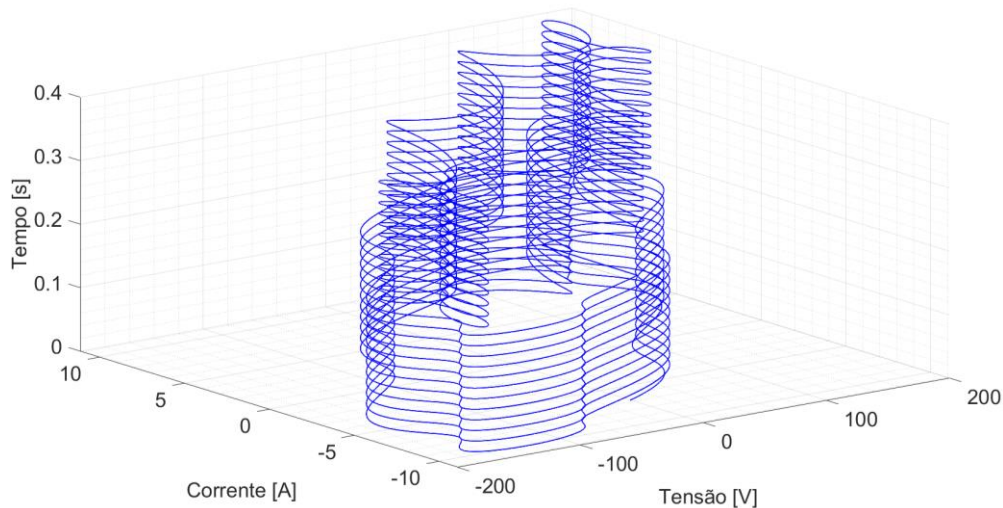
Figura 51 - Trajetórias V-I separadas para o Caso VI.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 52 mostra evolução das Trajetórias V-I ao decorrer dos dois intervalos analisados, com a presença de um terceiro eixo para o tempo.

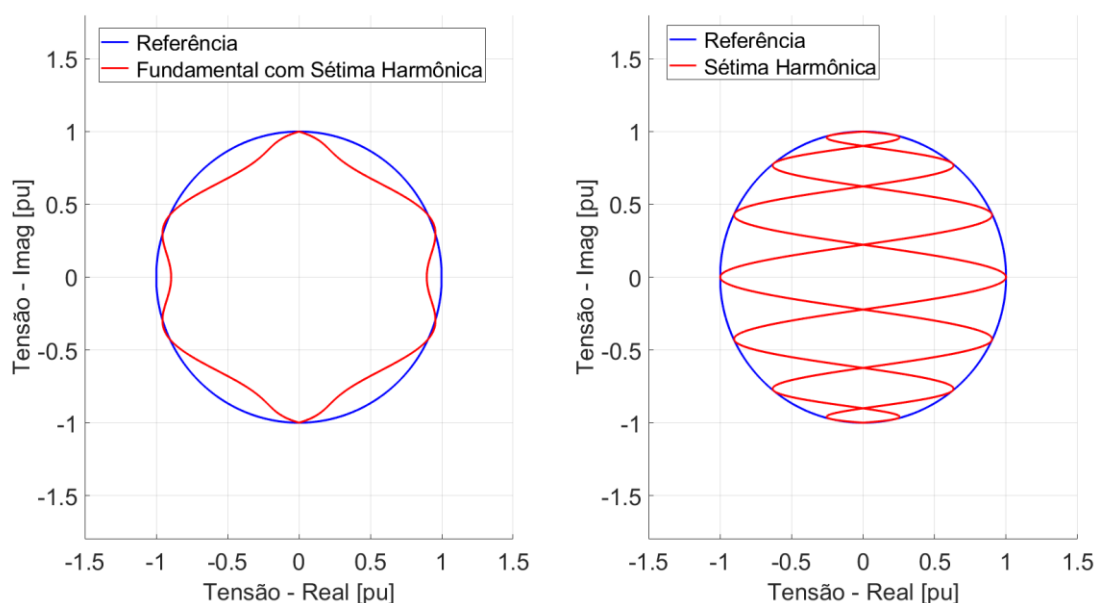
Figura 52 - Trajetória V-I tridimensional para o Caso VI.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 53 faz uma comparação entre a tensão fundamental combinada com a distorção harmônica de sétima ordem à esquerda e apenas a componente harmônica de sétima ordem à direita. Na Figura 53 à esquerda, a elipse descreve uma imagem com seis extremidades, caracterizando a distorção causada pela presença desta componente harmônica. Na Figura 53 à direita, a elipse divide-se em sete áreas diferentes, sendo possível inferir a presença de uma harmônica de 7ª ordem.

Figura 53 - Elipse de Espaço Vetorial no Plano Complexo para o Caso VI - Harmônica de Sétima Ordem.



Fonte: Autoria própria.

Finalmente, os dados numéricos relativos aos parâmetros do circuito com a presença da componente harmônica de 7ª ordem puderam ser obtidos e organizados na Tabela 8:

Tabela 8 - Grandezas obtidas para o circuito do Caso VI.

	Intervalo 1: Sem Compensação Capacitiva	Intervalo 2: Com Compensação Capacitiva
Tensão Eficaz [V]	128	128
Corrente Eficaz [A]	7,7	6,6
DHT na Tensão [%]	10	10
DHT na Corrente [%]	2,2	55,8
Potência Ativa [W]	754	754
Potência Reativa [var]	635	386
Potência Aparente [VA]	986	846
FP	0,76	0,89

Fonte: Autoria própria.

Com os dados obtidos, pode-se observar mais uma vez que uma harmônica de ordem maior causa um maior efeito no Fator de Potência do circuito, que foi de 0,77 para 0,76 no intervalo sem a presença de capacitor e de 0,92 para 0,89 no intervalo com a presença de capacitor. Em relação à DHT, embora tenha sido menor em relação aos casos anteriores no intervalo sem capacitor, no intervalo com capacitor passou a ter um valor ainda maior, devido à amplificação causada por capacitores nas distorções harmônicas.

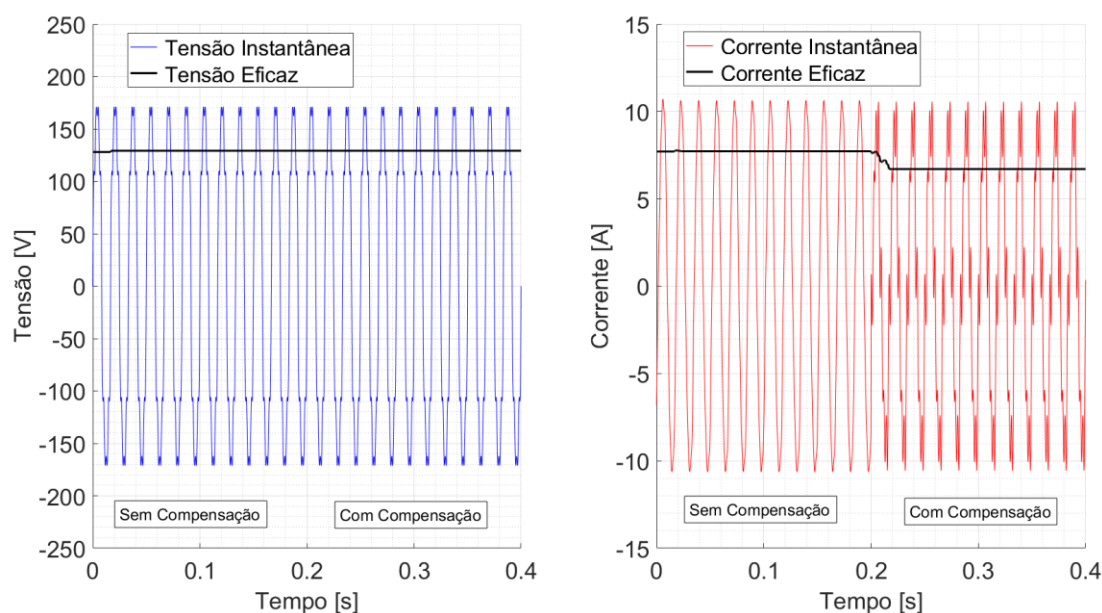
4.7 Caso VII – Presença das 3^a, 5^a e 7^a Harmônicas simultaneamente na Tensão antes e depois de compensação capacitiva

Finalizando os estudos relacionados à presença de distorção harmônica nos circuitos, o Caso VII simula a combinação da tensão fundamental com tensões harmônicas de 3^a, 5^a e 7^a ordem.

As componentes harmônicas neste exemplo possuem cada uma amplitude de 10% em relação à tensão fundamental, assim como aplicado nos outros exemplos estudados para distorções harmônicas.

O gráfico contendo as formas de tensão e corrente eficazes, presente na Figura 54, mostra mais uma vez o efeito da compensação do fator de potência em reduzir a corrente de alimentação para a carga.

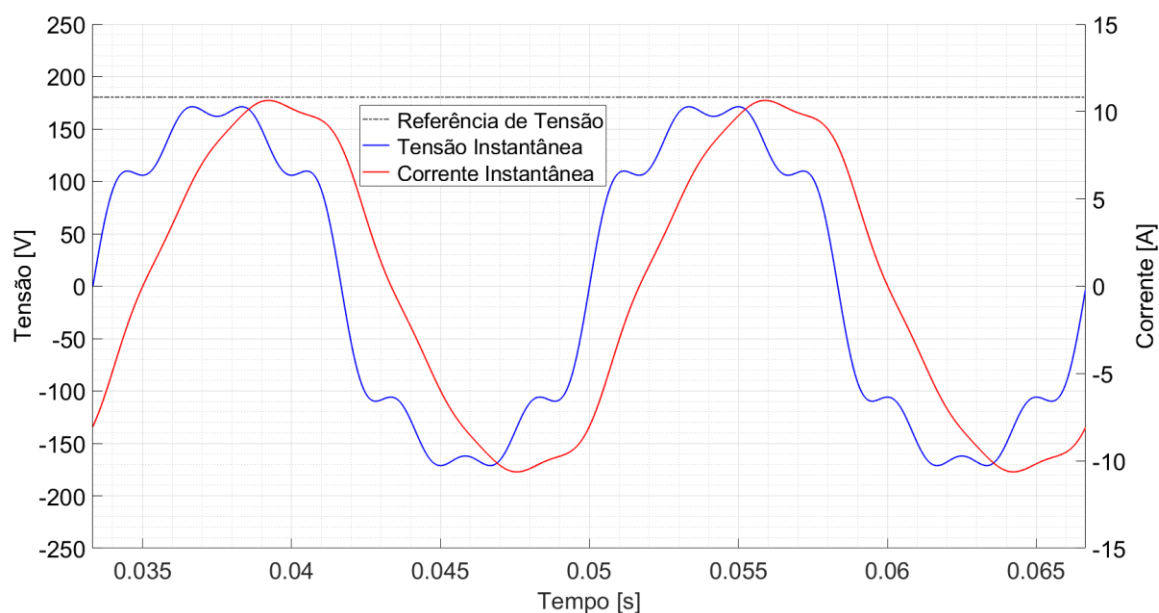
Figura 54 - Formas de tensão e corrente para o Caso VII.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 55 destaca o enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso VII no intervalo I, onde não há compensação capacitiva e pontua a combinação de várias componentes harmônicas, provocando novamente uma grande distorção nas formas de onda.

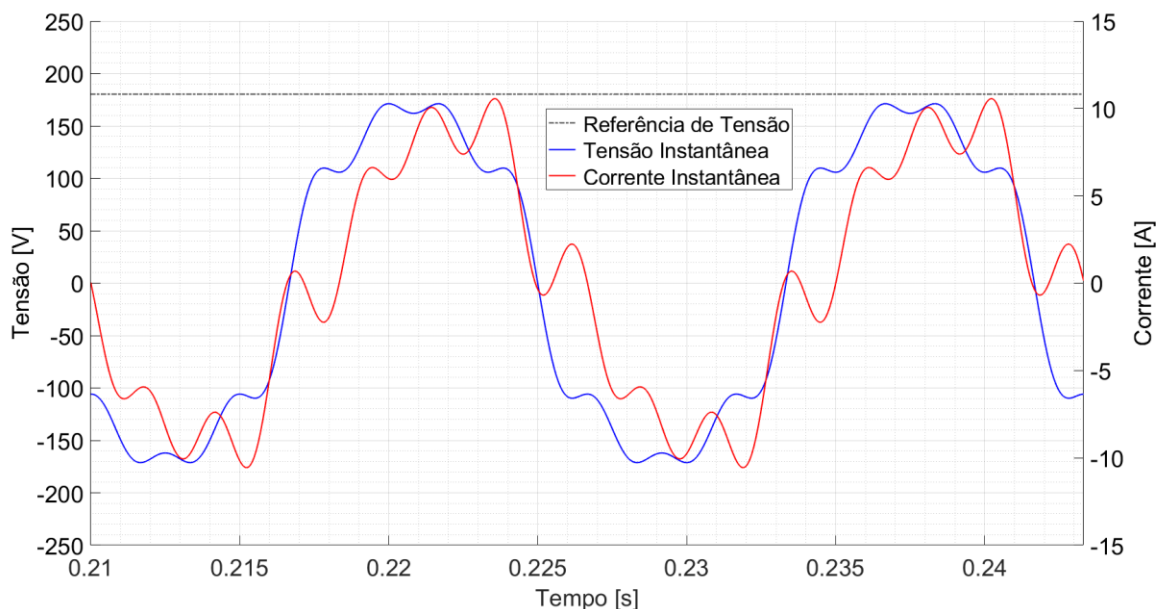
Figura 55 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso VII intervalo I – Sem Compensação Capacitiva.



Fonte: Autoria própria.

De maneira similar, a figura 56 dá enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o intervalo II do Caso VII, com a presença de compensação capacitiva.

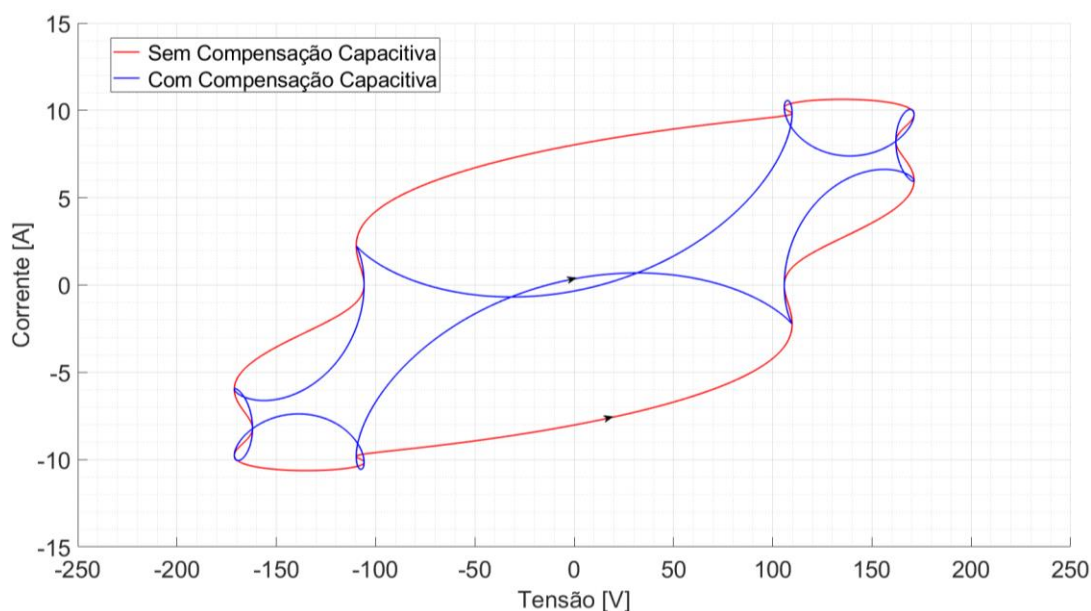
Figura 56 - Enfoque nas formas de onda de tensão corrente para o Caso VII intervalo II – Com Compensação Capacitiva.



Fonte: Autoria própria.

Vale notar que a Figura 57 evidencia as Trajetórias V-I sobrepostas para o Caso VII, sendo possível observar uma certa peculiaridade, pois, além da grande distorção apresentada há um laço no centro da Trajetória para o intervalo II, com a presença de compensação capacitiva.

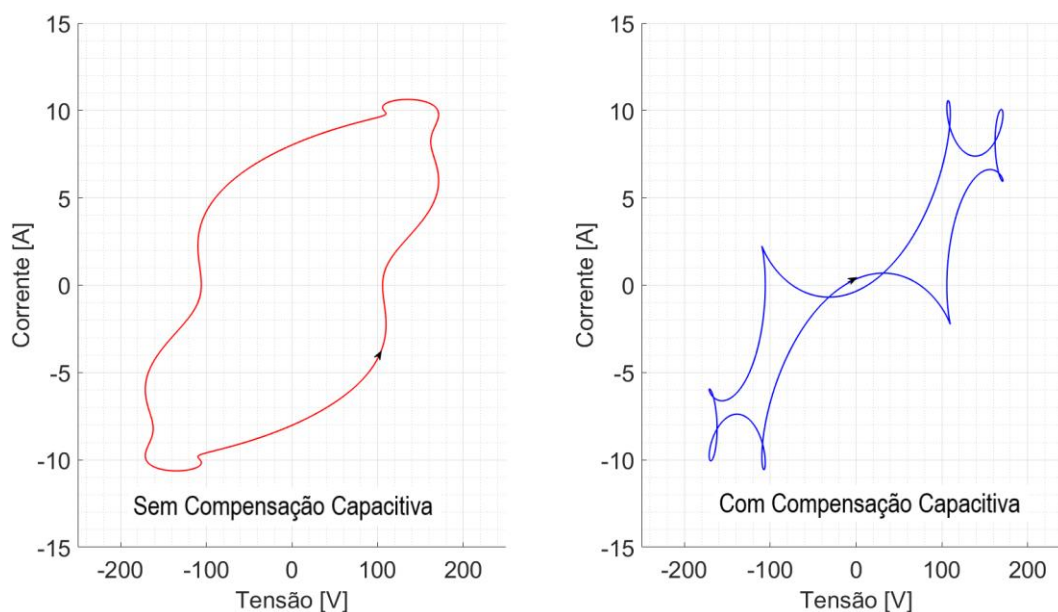
Figura 57 - Trajetórias V-I sobrepostas para o Caso VII.



Fonte: Autoria própria.

De forma análoga, a Figura 58 apresenta as trajetórias V-I separadas para o Caso VII e reforça ideia de que a combinação das diferentes componentes harmônicas causa uma grande distorção na trajetória V-I, apresentando seis “saliências”, assim como observado para uma distorção harmônica e 7ª ordem.

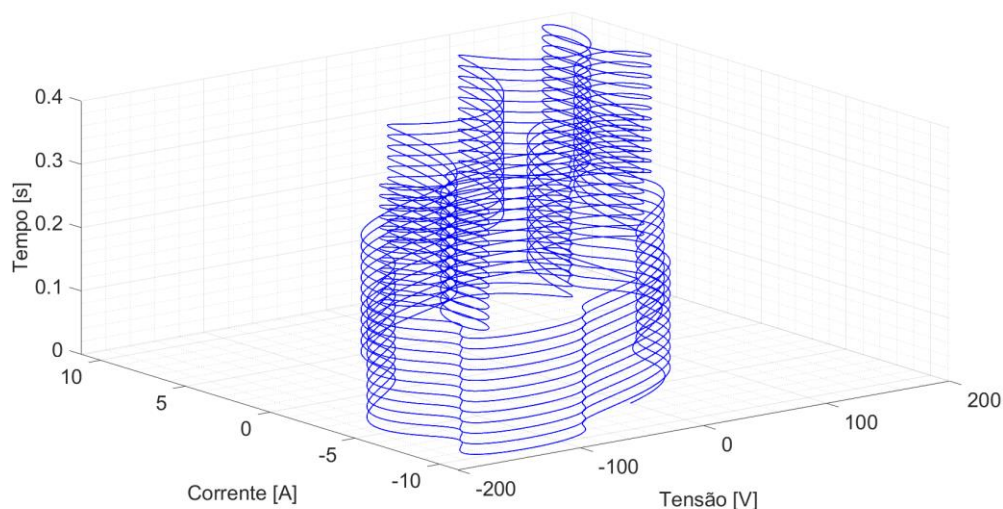
Figura 58 - Trajetórias V-I separadas para o Caso VII.



Fonte: Autoria própria.

Em análise convergente, a Figura 59 possibilita a percepção da evolução da trajetória VI através da vista tridimensional, com a adição do eixo do tempo.

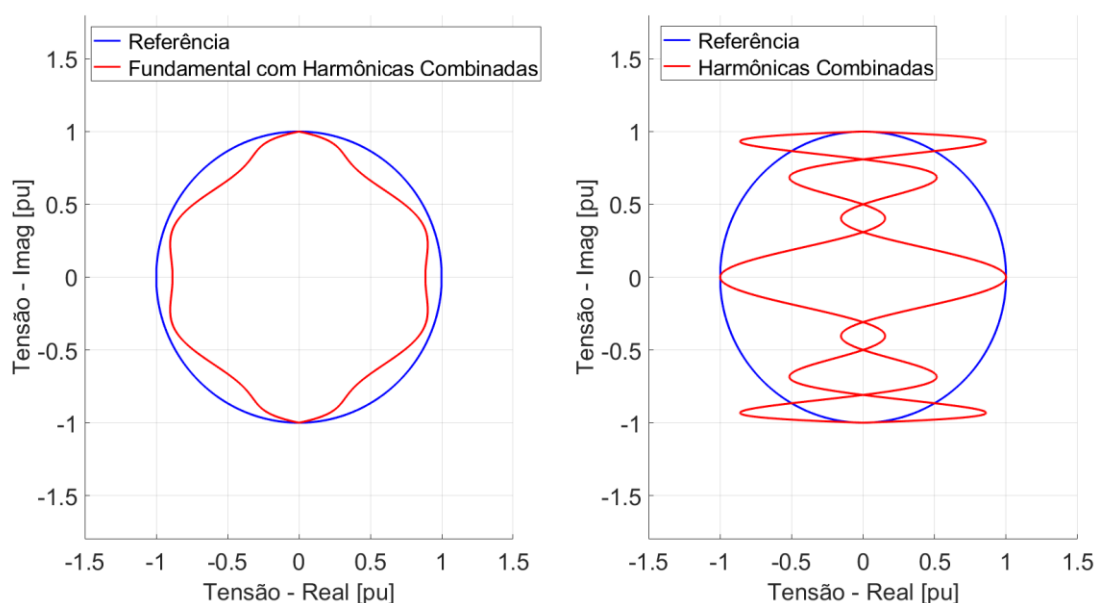
Figura 59 - Trajetória V-I tridimensional para o Caso VII.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 60 à esquerda, é possível observar que a elipse gerada com a combinação das componentes harmônicas com a tensão fundamental é similar à elipse identificada no Caso VI, pois nota-se a predominância da harmônica de 7ª ordem, formando uma figura com seis extremidades. Já na Figura 60 à direita, com a presença apenas das componentes harmônicas, observa-se a divisão da Elipse de Espaço Vetorial em 7 diferentes áreas, evidenciando a presença de uma componente harmônica de 7ª ordem.

Figura 60 - Elipse de Espaço Vetorial no Plano Complexo para o Caso VII - Harmônicas de Terceira, Quinta e Sétima Ordem Combinadas.



Fonte: Autoria própria.

Tomando como base as simulações realizadas, é possível elaborar a Tabela 9 com os parâmetros obtidos do circuito com a presença das componentes harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem juntamente com a tensão fundamental.

Assim como no exemplo com distorção harmônica de 7ª ordem, nota-se o acentuamento dos efeitos causados pela distorção harmônica com a adição de um capacitor na carga, evidenciado pelos valores de FP e DHT.

Tabela 9 - Grandezas obtidas para o circuito do Caso VII.

	Intervalo 1: Sem Compensação Capacitiva	Intervalo 2: Com Compensação Capacitiva
Tensão Eficaz [V]	129	129
Corrente Eficaz [A]	7,7	6,7
DHT na Tensão [%]	17,3	17,3
DHT na Corrente [%]	6,1	64,0
Potência Ativa [W]	756	756
Potência Reativa [var]	650	421
Potência Aparente [VA]	997	865
FP	0,76	0,87

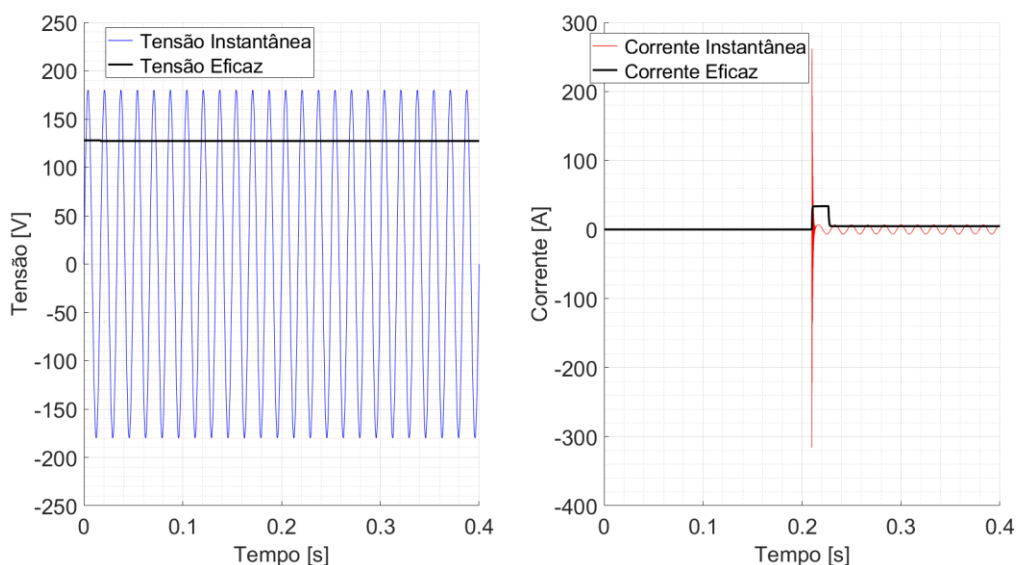
Fonte: Autoria própria.

4.8 Caso VIII – Oscilação Transitória

Outro distúrbio no qual é possível a aplicação de técnicas de visualização são as oscilações transitórias. O Caso VIII tem como objetivo a simulação de uma oscilação transitória causada pelo chaveamento de um banco de capacitores, situação que pode ocorrer em momentos de compensação de fator de potência.

O chaveamento do banco de capacitores é provocado no instante 0.21 da simulação, como pode ser visto na Figura 61:

Figura 61 - Formas de tensão e corrente para o Caso VIII.

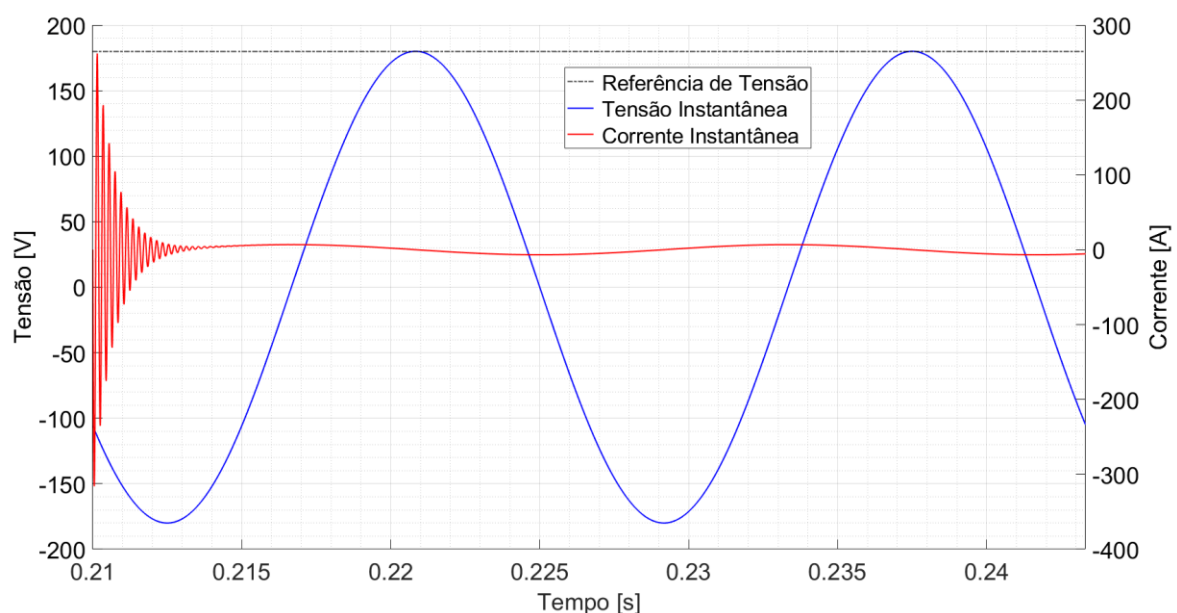


Fonte: Autoria própria.

Observando o gráfico da Figura 61, é possível identificar que o chaveamento do banco de capacitores provoca um súbito aumento na corrente, que vai de zero a um valor próximo de 300 A, estabilizando-se após este pico.

A Figura 62 demonstra o enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o momento do chaveamento do banco de capacitores. Sob esta ótica, foi possível perceber que o pico de tensão possui uma curta duração, com o circuito entrando em regime permanente em um período de tempo menor que 5 ms.

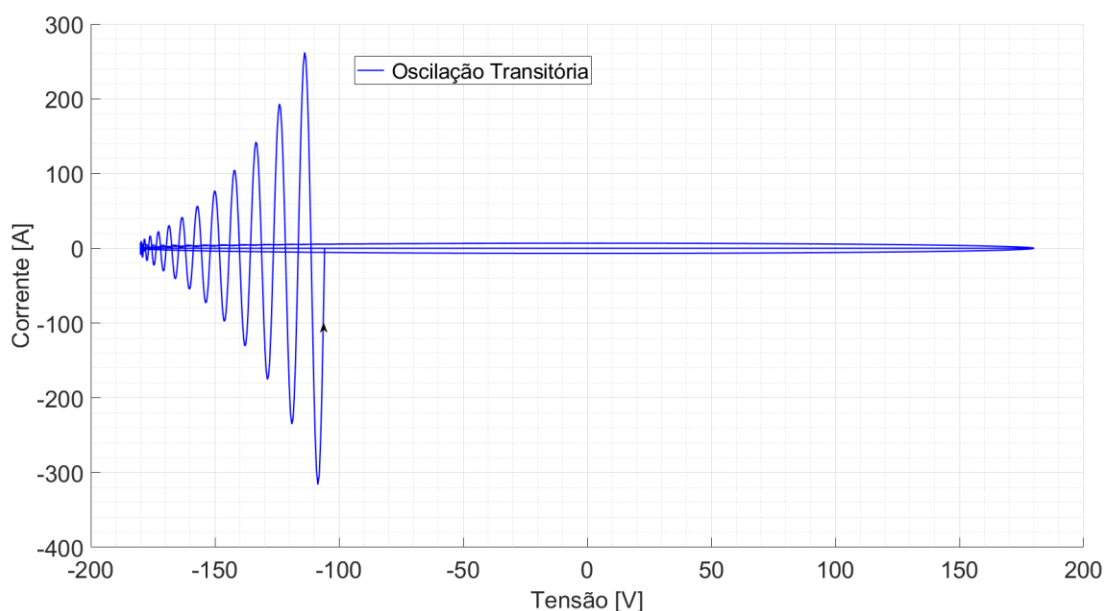
Figura 62 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o momento do chaveamento do banco de capacitores.



Fonte: Autoria própria.

A trajetória V-I para o Caso VIII, presente na Figura 63, demonstra a oscilação transitória em termos de tensão e corrente, sendo possível observar o pico de corrente, assim como sua subsequente entrada em regime permanente.

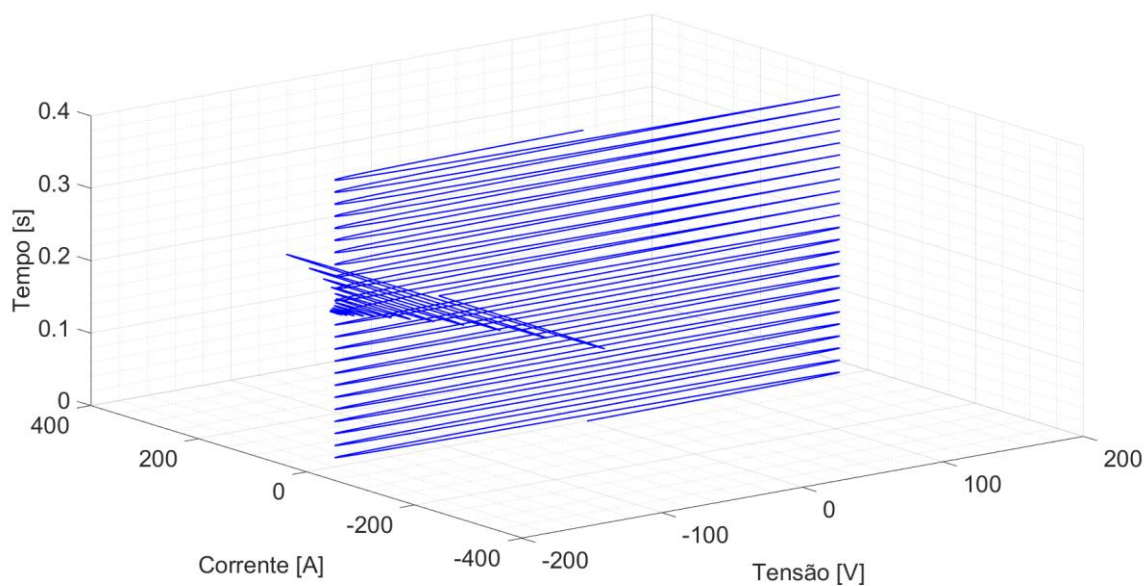
Figura 63 - Trajetória V-I para o Caso VIII.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 64 traz a Trajetória V-I tridimensional com a adição do eixo do tempo para o Caso VIII, no qual há a presença de oscilação transitória. É possível observar o instante exato em que ocorre o chaveamento do banco de capacitores com esta forma de visualização.

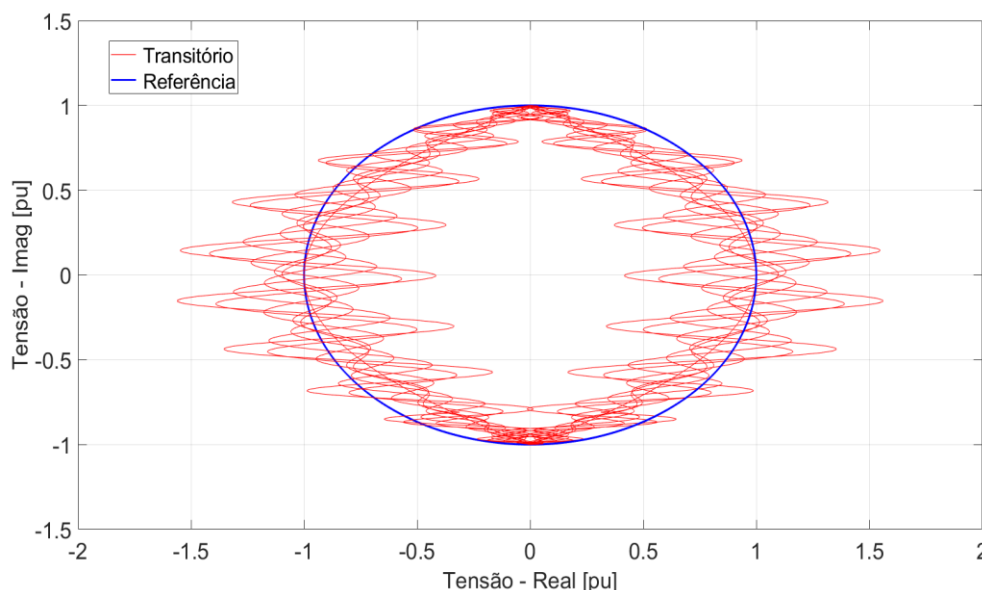
Figura 64 - Trajetória V-I Tridimensional para o Caso VIII.



Fonte: Autoria própria.

A Elipse de Espaço Vetorial no plano complexo que representa um transitório pode ser vista na Figura 65. Esta elipse é caracterizada por uma grande distorção irregular no eixo real.

Figura 65 - Trajetória V-I Tridimensional para o Caso VIII.



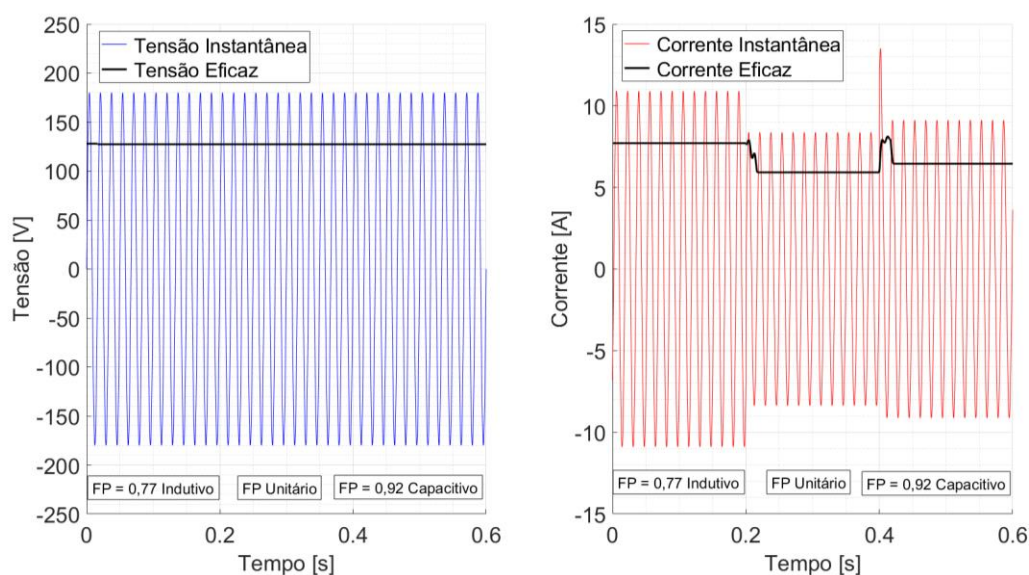
Fonte: Autoria própria.

4.9 Caso IX – Carga indutiva, com correção de fator de potência para unitário e sobre compensação capacitiva

Uma grande utilidade dos métodos gráficos de visualização de distúrbios de QEE é a facilidade para a caracterização de cargas elétricas. Conforme discutido anteriormente, o sentido de uma trajetória V-I é diferente para cada tipo de carga. Para cargas indutivas, a Trajetória V-I possui sentido anti-horário; para cargas capacitivas, possui sentido horário e para cargas resistivas, a trajetória V-I não apresenta rotação, sendo apenas uma linha reta. Sendo assim, o Caso IX possui como objetivo a simulação do circuito em três intervalos: o intervalo I com uma carga indutiva com fator de potência de 0,77; o intervalo II com a entrada de um banco de capacitores para elevar o fator de potência a unitário e o intervalo III com sobre compensação capacitiva, levando o fator de potência a 0,92 capacitivo.

O gráfico da Figura 66 evidencia os três intervalos da simulação. A corrente na carga diminui no intervalo II em razão da elevação do FP para o valor unitário mas aumenta no intervalo III, quando o banco de capacitores é superior à carga elétrica indutiva, sendo um exemplo de sobre compensação capacitiva.

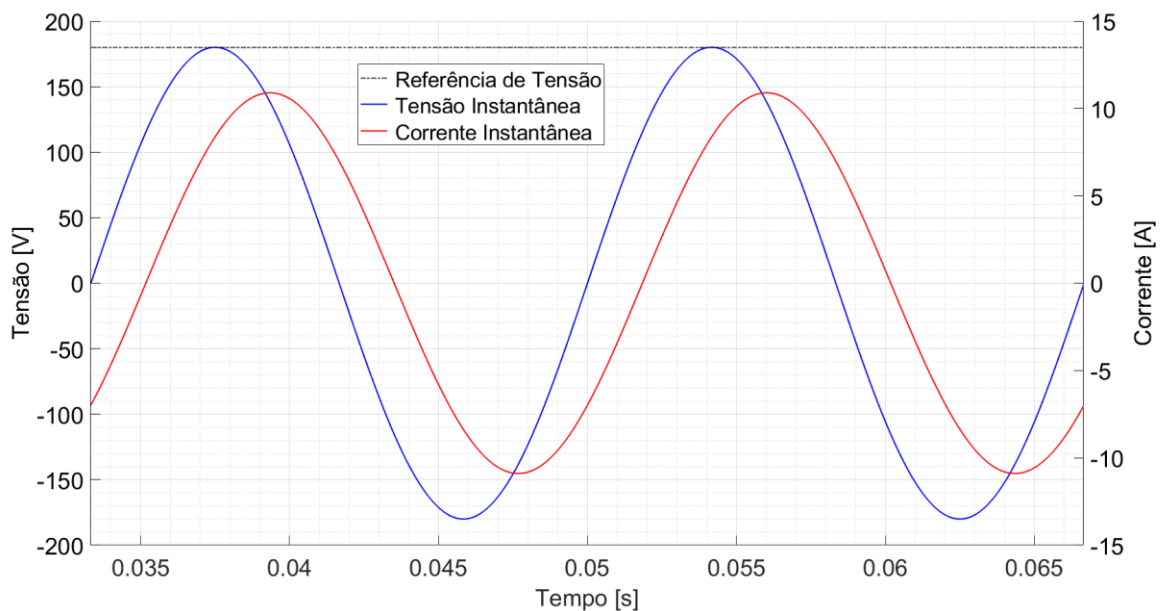
Figura 66 - Formas de tensão e corrente para o Caso IX.



Fonte: Autoria própria.

Ao dar enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o intervalo I, com $FP = 0,77$ Indutivo, presentes na Figura 67, é possível compará-las e observar que a corrente está atrasada em relação à tensão.

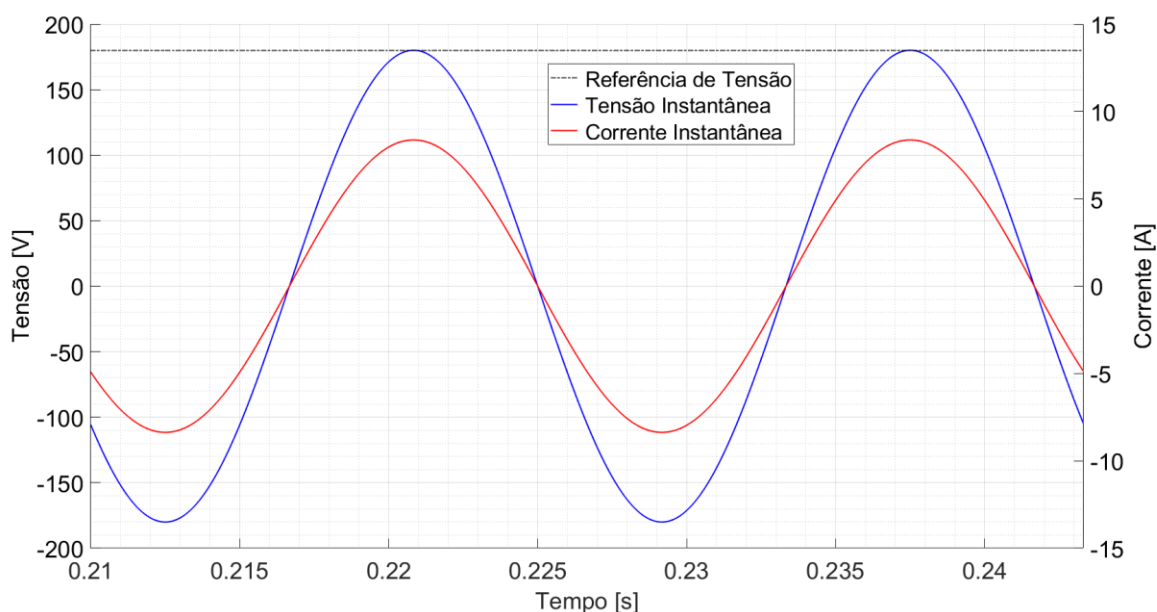
Figura 67 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso IX intervalo I – $FP = 0,77$ Indutivo.



Fonte: Autoria própria.

Conquanto, ao corrigir o fator de potência para unitário, as formas de onda de tensão e corrente encontram-se em fase. Tal constatação pode ser observada na Figura 68, que dá enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso IX no intervalo II, com FP unitário.

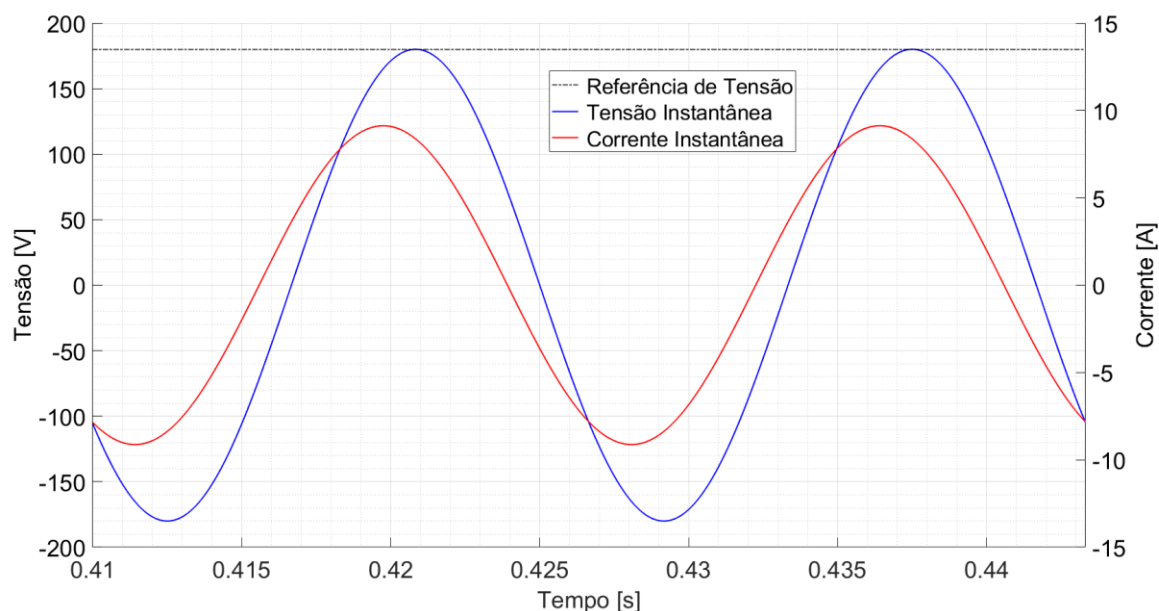
Figura 68 - Enfoque nas formas de onda de tensão corrente para o Caso IX intervalo II – FP Unitário.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 69 deu enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o intervalo III do Caso IX, com $FP = 0,92$ capacitivo e indica que com a sobre compensação capacitiva, a forma de onda de corrente passa a ser adiantada em relação à forma de onda de tensão. Além disso, a corrente na carga aumenta em relação ao intervalo II.

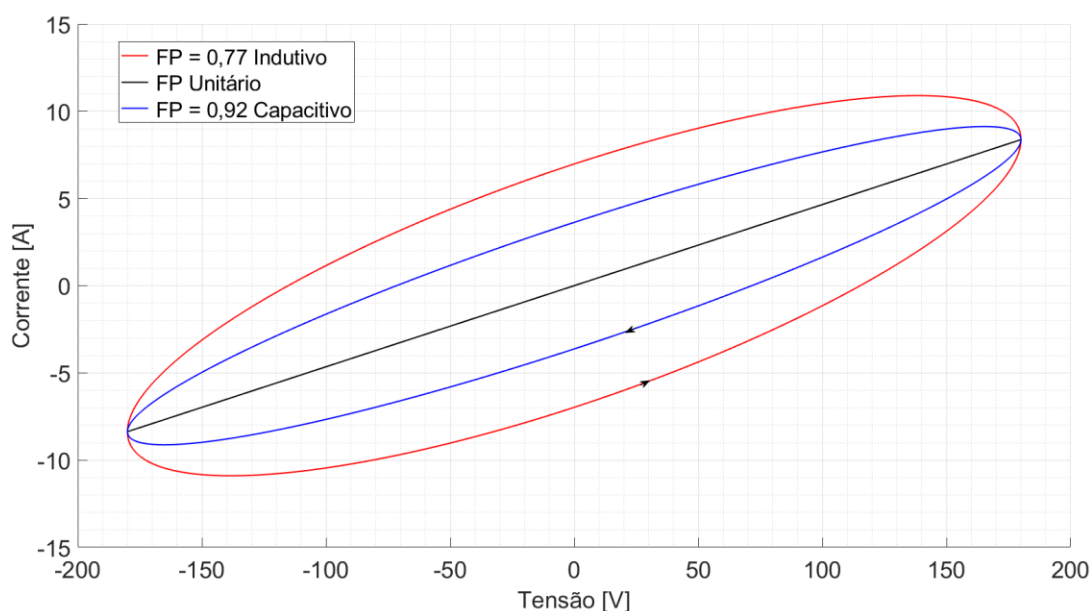
Figura 69 - Enfoque nas formas de onda de tensão corrente para o Caso IX intervalo III – FP = 0,92 Capacitivo.



Fonte: Autoria própria.

Observando as Trajetórias V-I sobrepostas dos três intervalos, presentes na Figura 70, é possível claramente caracterizar a carga presente nos três intervalos. A trajetória do intervalo I rotaciona em sentido anti-horário, caracterizando uma carga indutiva. A trajetória no intervalo II é uma reta, indicando uma carga puramente resistiva, enquanto a trajetória no intervalo III rotaciona no sentido horário mostrando a presença de uma carga predominantemente capacitiva.

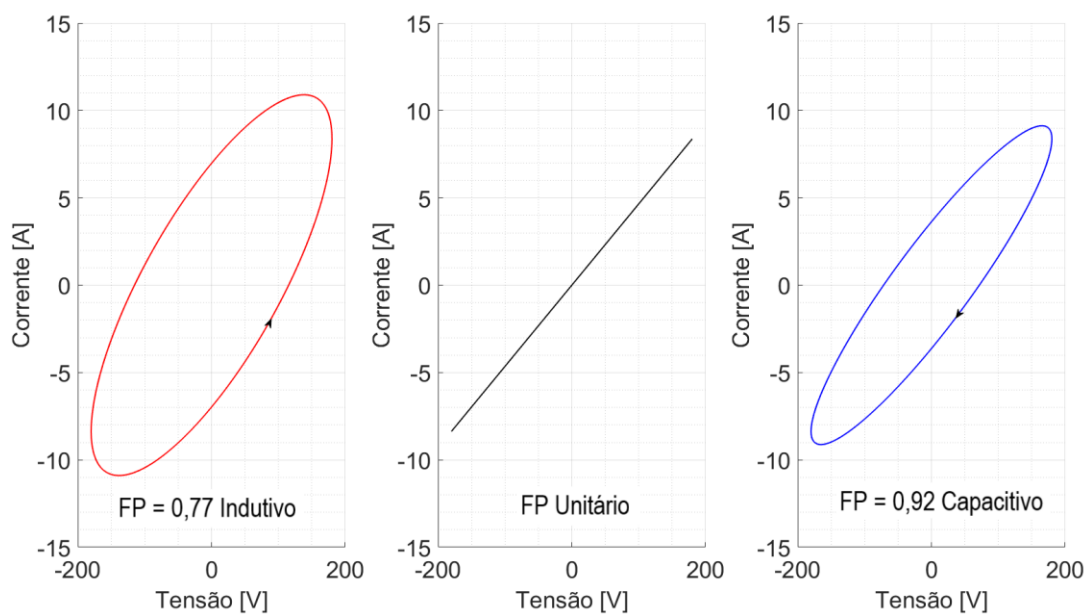
Figura 70 - Trajetórias V-I sobrepostas para o Caso IX.



Fonte: Autoria própria.

Com as Trajetórias V-I separadas, conforme observadas na Figura 71, é possível observar mais claramente a inversão no sentido de rotação que ocorre ao se alterar a característica de uma carga indutiva para uma carga capacitiva.

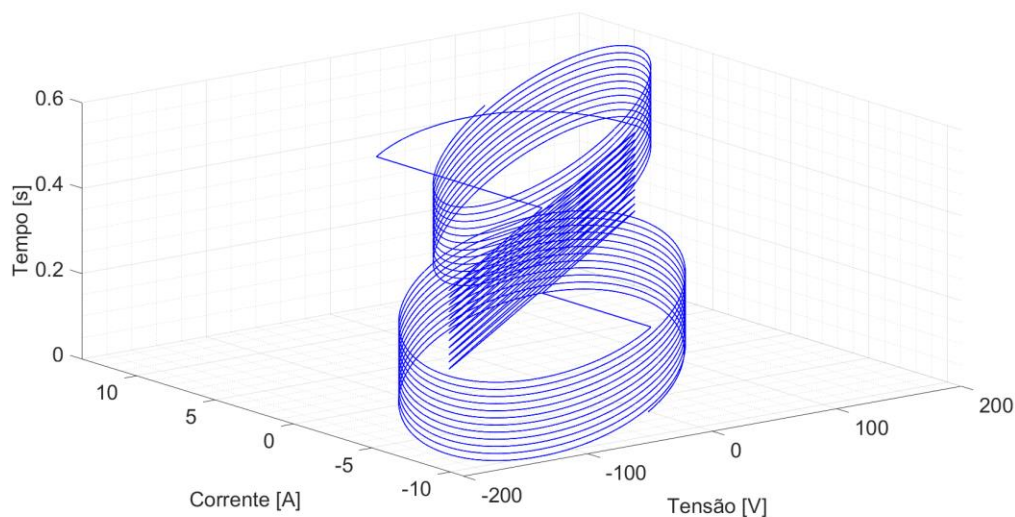
Figura 71 - Trajetórias V-I separadas para o Caso IX.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 72 demonstra o gráfico tridimensional das trajetórias V-I e apresenta retas ortogonais às trajetórias, as quais ocorrem nos momentos em que há uma inversão do sentido de rotação das trajetórias.

Figura 72 - Trajetória V-I tridimensional para o Caso IX.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 11 apresenta os valores esperados de tensão, corrente, potência e fator de potência para o Caso IX. A DHT na tensão e na corrente é zero, pois não há a presença de nenhuma distorção harmônica nesta simulação.

Tabela 10 - Grandezas obtidas para o circuito do Caso IX.

	Intervalo 1: FP = 0,77 Indutivo	Intervalo 2: FP Unitário	Intervalo 1: FP = 0,92 Capacitivo
Tensão Eficaz [V]	127,3	127,3	127,3
Corrente Eficaz [A]	7,7	6,0	6,5
THD na Tensão [%]	0	0	0
THD na Corrente	0	0	0
Potência Ativa [W]	753	753	753
Potência Reativa [var]	628	0	326
Potência Aparente [VA]	981	753	821
Fator de Potência	0,77	1	0,92

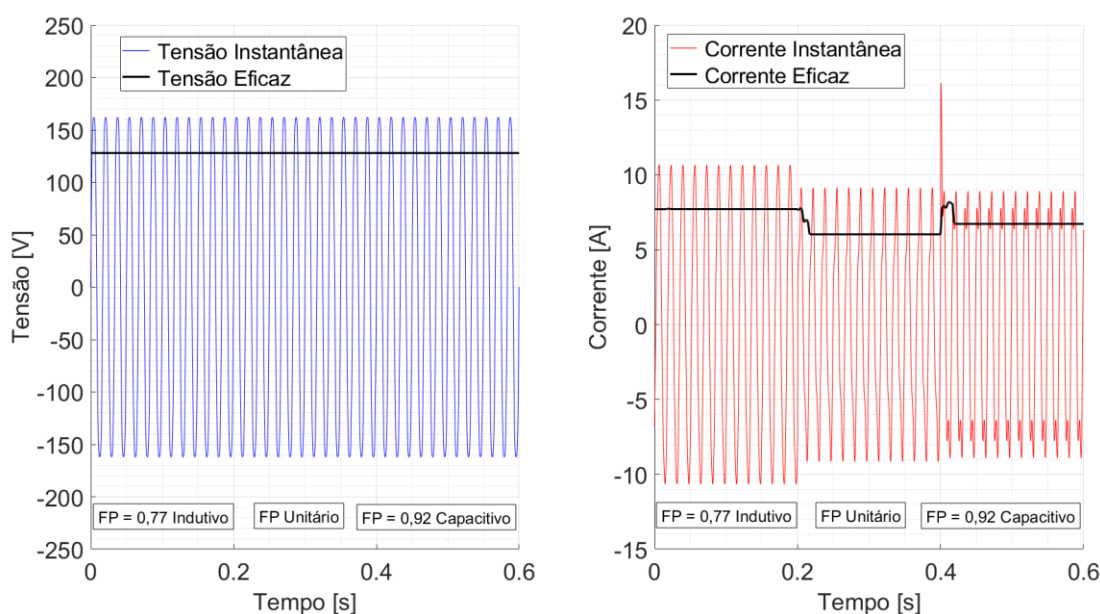
Fonte: Autoria própria.

4.10 Caso X - Carga indutiva, com correção de fator de potência para unitário e sobre compensação capacitiva com a presença de harmônica de 3ª ordem na alimentação

A fim de dar continuidade ao estudo da caracterização de cargas através das Trajetórias V-I, o Caso X utiliza os mesmos parâmetros do Caso IX e adiciona a presença de uma componente harmônica de terceira ordem na tensão de alimentação.

A Figura 73 explicita as formas de onda de tensão e corrente para o Caso X, bem como seus valores eficazes ao longo do tempo. Conforme esperado, a tensão eficaz na carga manteve-se constante, enquanto a corrente diminuiu com a compensação do fator de potência aparente no intervalo II e sofreu aumento com a sobre compensação do fator de potência aparente no intervalo III.

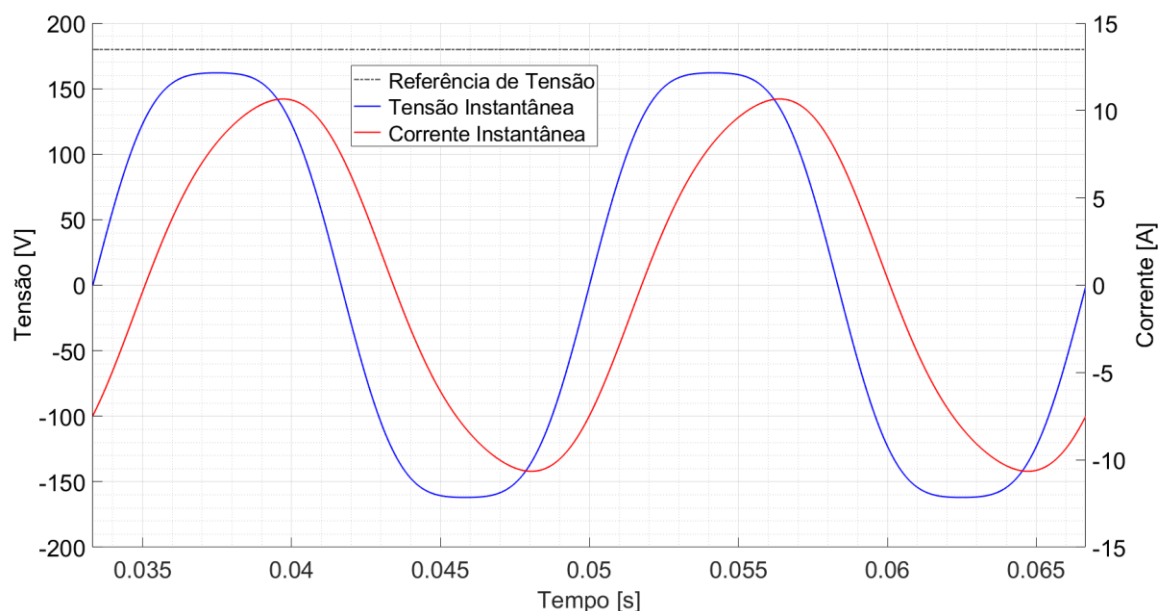
Figura 73 - Formas de tensão e corrente para o Caso X.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 74, ao dar enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o intervalo I do Caso X, reforça o exposto nos casos anteriores, o que possibilita a observação de distorções nas formas de onda de tensão e corrente causados pela presença da componente harmônica.

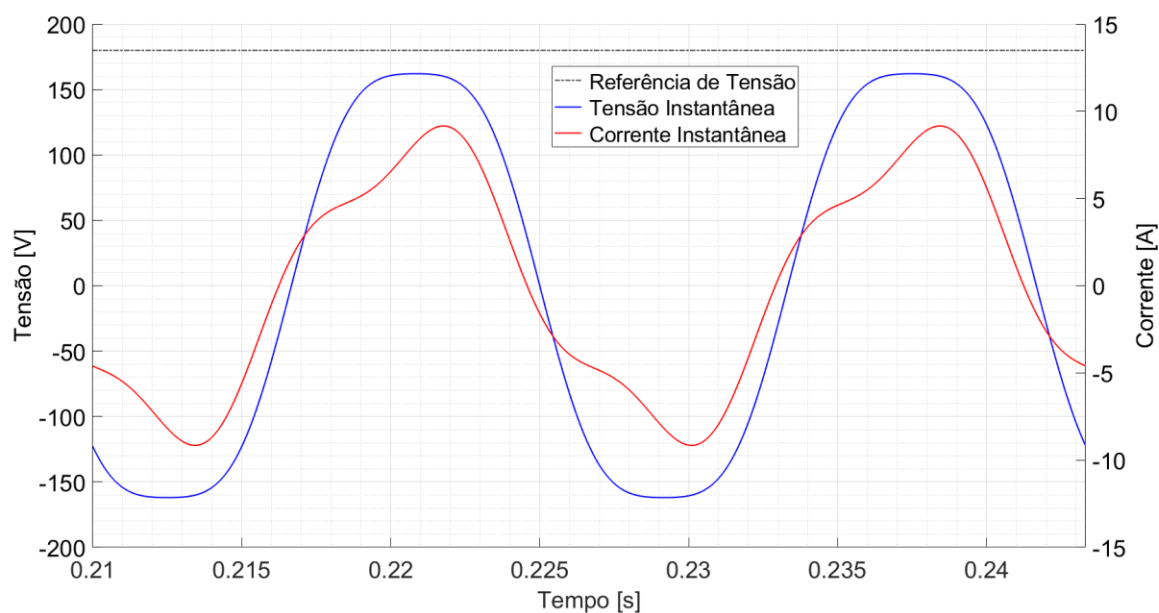
Figura 74 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso X intervalo I – $FP = 0,77$ Capacitivo.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 75 menciona as formas de onda de tensão e corrente para o Caso X no intervalo II, com FP aparente unitário. Em relação à tensão de pico, um ponto importante a se notar é que a tensão de pico no intervalo II (compensação unitária) é maior que a tensão de pico no intervalo III (sobre compensação capacitiva), mesmo com a tensão eficaz sendo maior no intervalo III. Isto se deve à distorção na forma de onda causada pela presença da componente harmônica.

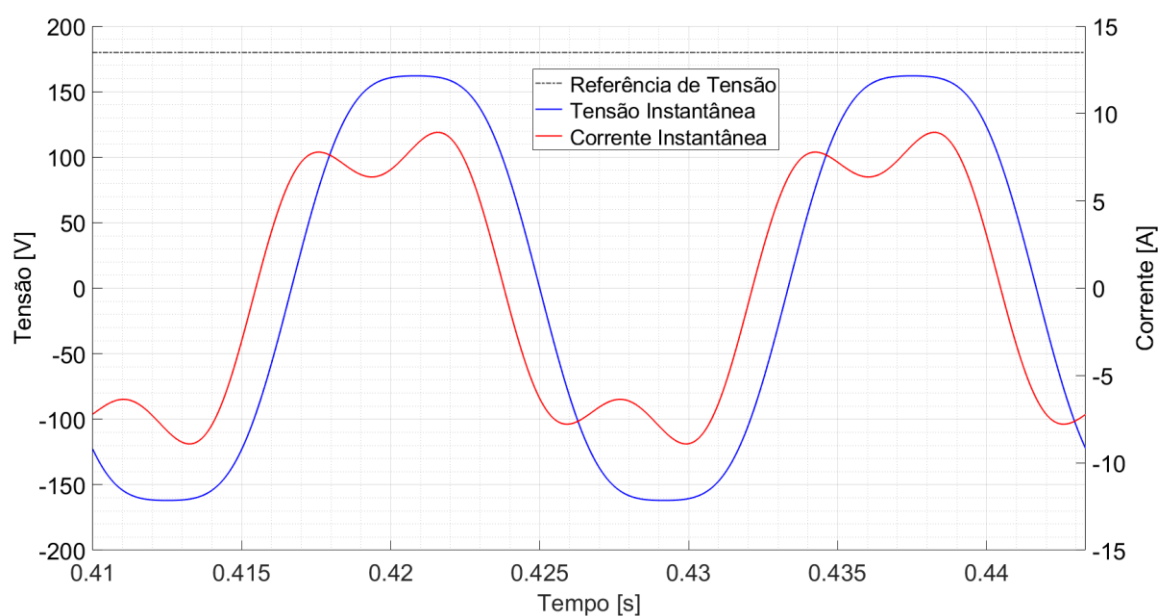
Figura 75 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso X intervalo II – FP Unitário.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 76, é possível observar o enfoque nas formas de onda de tensão e corrente no intervalo III do Caso X, com a presença de sobre compensação capacitiva. Na imagem é possível observar que a corrente está adiantada em relação à tensão.

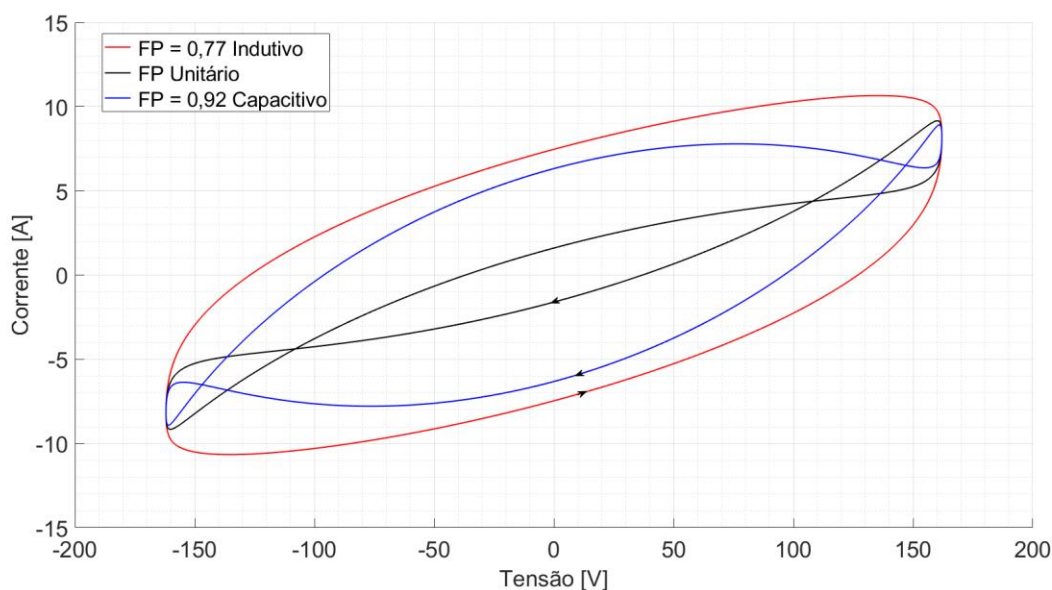
Figura 76 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso I intervalo IX – $FP = 0,92$ Indutivo.



Fonte: Autoria própria.

Analisando as Trajetórias V-I dos três intervalos do Caso X, presentes na Figura 77, é possível claramente notar que o intervalo II não possui fator de potência aparente unitário. Conforme observado ao decorrer deste estudo, isto se deve ao banco de capacitores ter sido projetado para um circuito alimentado por uma tensão fundamental. Sendo assim, é possível concluir novamente que um projeto de banco de capacitores para compensação de fator de potência aparente deve levar em consideração a presença de distorções harmônicas no circuito.

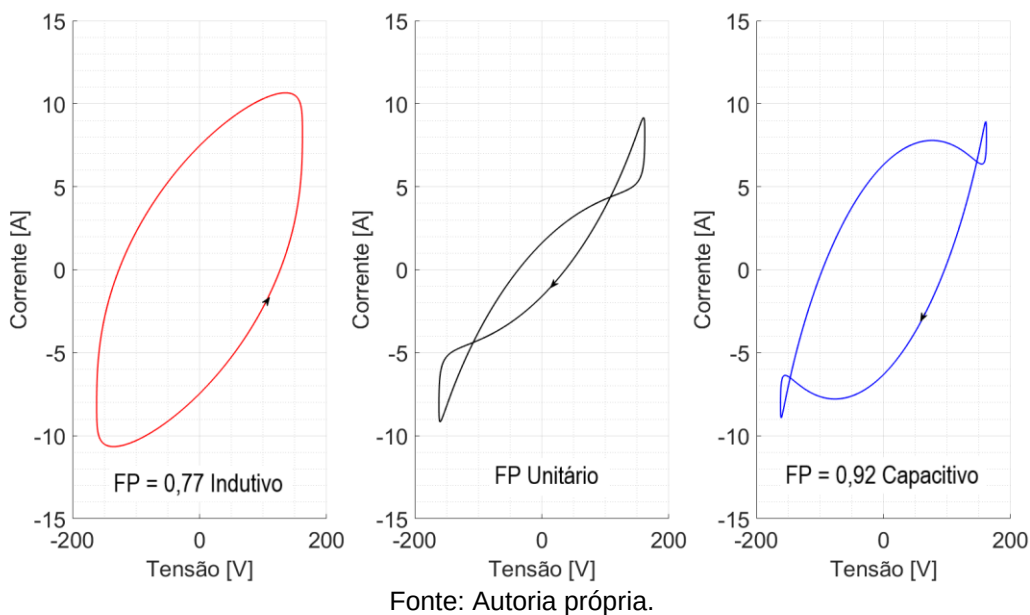
Figura 77 - Trajetórias V-I sobrepostas para o Caso X.



Fonte: Autoria própria.

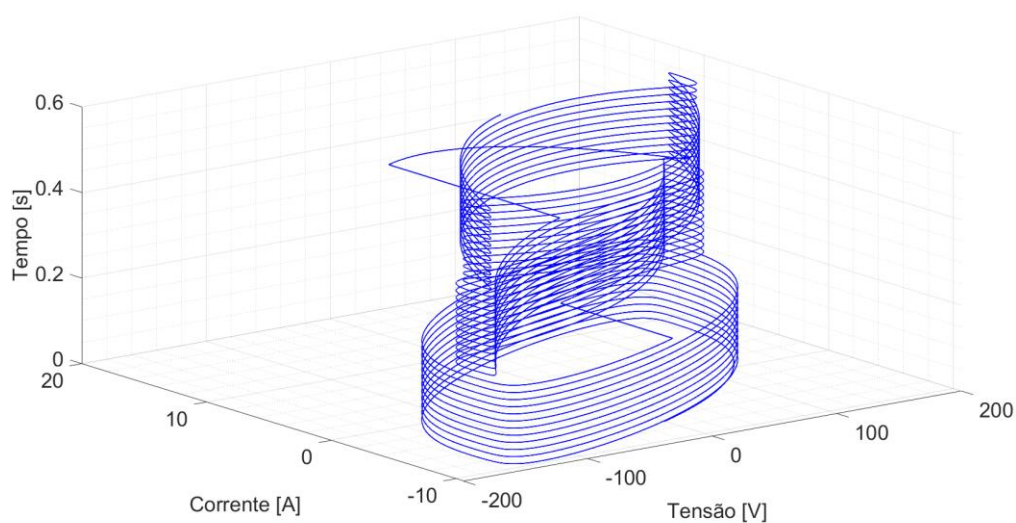
As Trajetórias V-I para o Caso X podem ser vistas separadamente na Figura 78. O intervalo II apresenta uma trajetória que indica a predominância capacitiva na carga, devido ao sentido de rotação horário.

Figura 78 - Trajetórias V-I separadas para o Caso X.



O gráfico tridimensional presente na Figura 79 apresenta a evolução da Trajetória V-I ao longo do tempo para o Caso X, evidenciando os intervalos em que ocorre a inversão no sentido de rotação da trajetória, indicado pelas retas ortogonais à trajetória.

Figura 79 - Trajetória V-I tridimensional para o Caso X.



Fonte: Autoria própria.

Os parâmetros apresentados na Tabela 12 comprovam a divergência entre o fator de potência esperado e o fator de potência obtido. A DHT no circuito possui valor de 10% na tensão, devido à presença da harmônica de 3ª ordem com 10% do valor da fundamental. Já o valor da DHT na corrente aumenta progressivamente com a adição de capacitores no circuito, em decorrência do acentuamento na distorção harmônica causada por cargas capacitivas.

Tabela 11 - Grandezas obtidas para o circuito do Caso X.

	Intervalo 1: FP = 0,77 Indutivo	Intervalo 2: FP Unitário	Intervalo 1: FP = 0,92 Capacitivo
Tensão Eficaz [V]	128	128	128
Corrente Eficaz [A]	7,7	6,1	6,7
DHT na Tensão [%]	10	10	10
DHT na Corrente [%]	4,8	19,3	29,6
Potência Ativa [W]	755	755	755
Potência Reativa [var]	635	156	412
Potência Aparente [VA]	987	771	860
FP	- 0,76	0,98	0,66

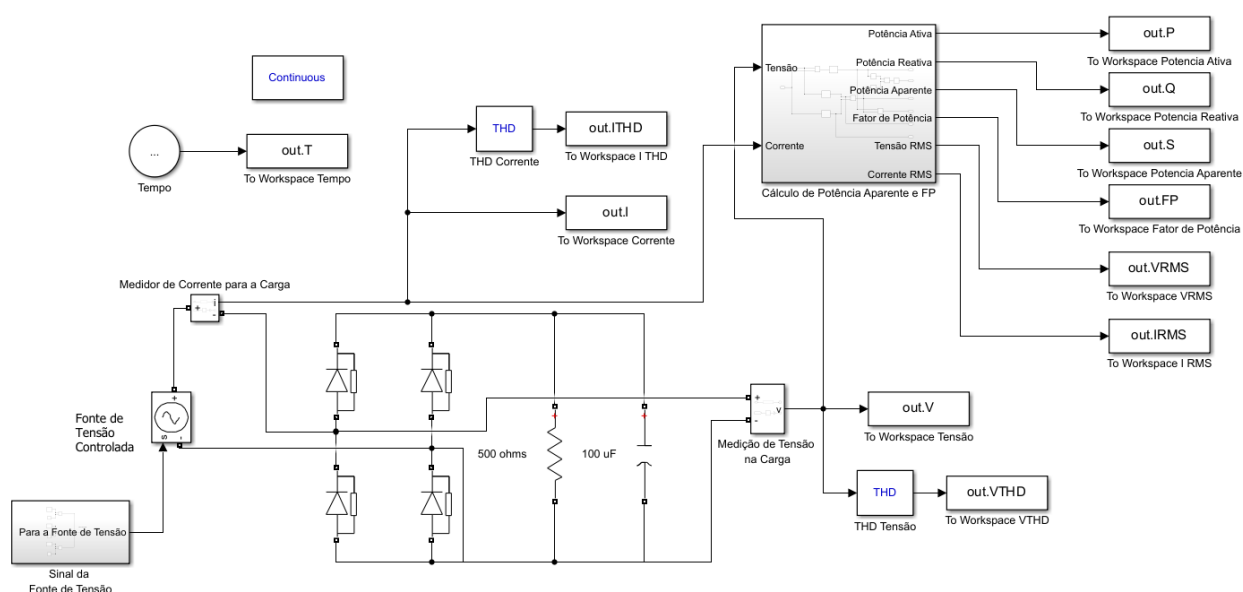
Fonte: Autoria própria.

4.11 Caso XI – Carga Não Linear tipo Fonte de Tensão

Os avanços da eletrônica de potência aumentaram a proliferação de cargas não lineares em utilizações residenciais e industriais. Sendo assim, a presença de cargas não lineares em um circuito pode ser caracterizada como uma forma de distúrbio elétrico.

O Caso XI visa o estudo da interferência de cargas não-lineares no circuito simulando uma carga do tipo Fonte de Tensão em dois intervalos, o primeiro intervalo com tensão nominal e o segundo intervalo com distorção harmônica de terceira ordem. Para isso, o circuito considerado para o Caso XI é um circuito do tipo Fonte de Tensão utilizando diodos, que são componentes não lineares, conforme mostrado na Figura 80:

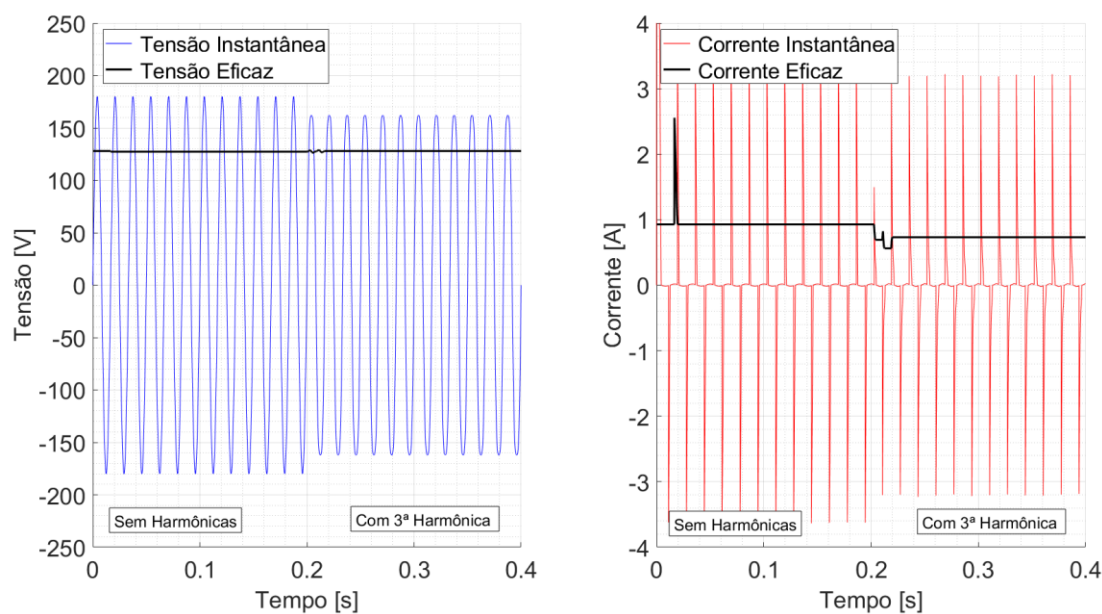
Figura 80 - Circuito do tipo Fonte de Tensão.



Fonte: Autoria própria.

Para este exemplo, foram considerados os valores de 500 Ω e 100 μF para o resistor e capacitor do lado de corrente contínua, respectivamente. Medindo as formas de onda de tensão e corrente na carga, é possível obter os resultados presentes da Figura 81:

Figura 81 - Formas de tensão e corrente para o Caso XI.

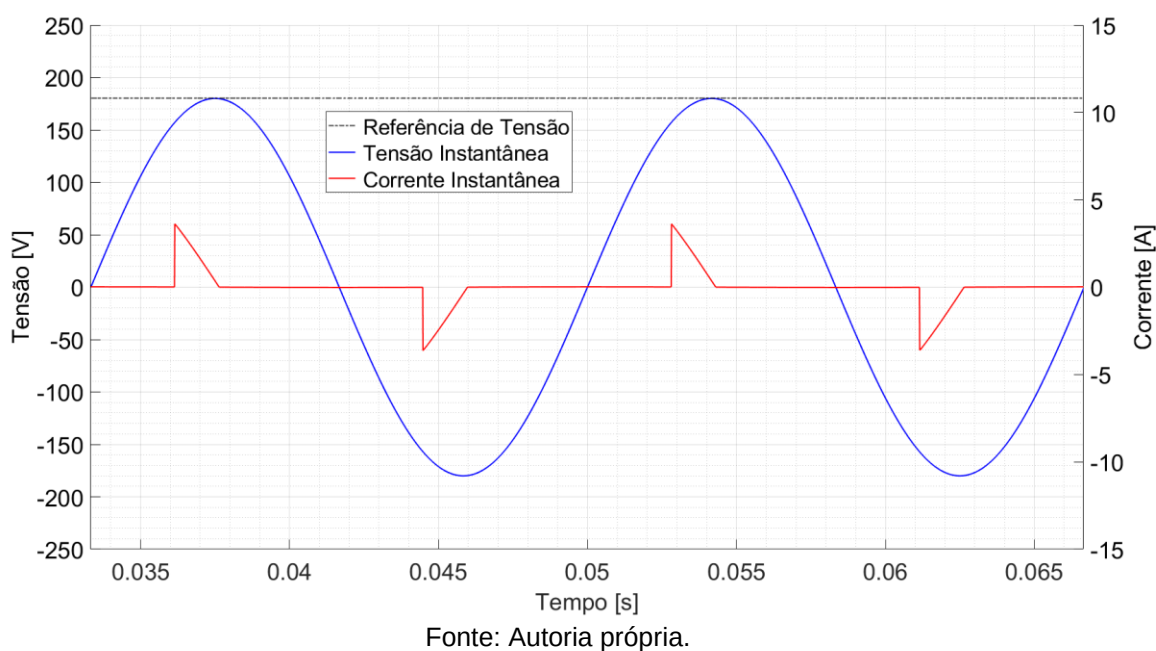


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 81, observa-se que a presença de distorção harmônica causa uma diminuição na corrente fornecida para a fonte não linear, causando uma redução da potência fornecida ao dispositivo consumidor.

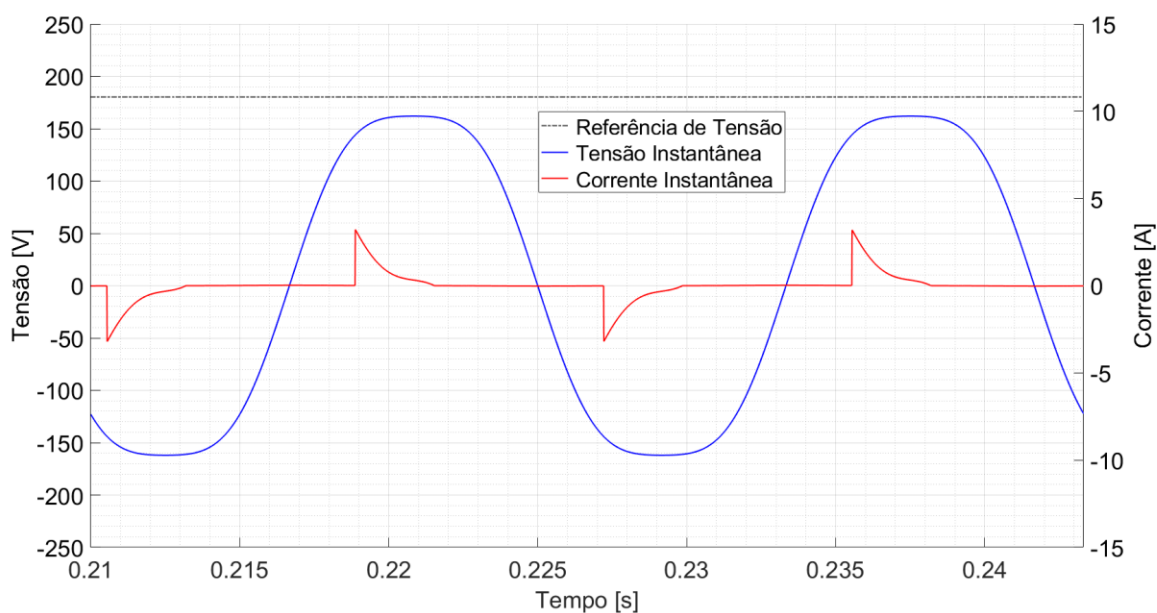
A Figura 82 mostra com enfoque as formas de onda de tensão e corrente para a carga do tipo Fonte de Tensão harmônica para o intervalo I, sem a presença de distorção harmônica. A forma de onda de tensão permanece senoidal, enquanto a forma de onda de corrente é não senoidal.

Figura 82 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso XI intervalo I.



Conforme já observado na Figura 81, ao dar um enfoque no intervalo II para a carga do tipo Fonte de Tensão harmônica, a presença de uma componente harmônica de 3ª ordem diminui o nível de tensão na carga. As características da corrente na forma de onda não senoidal se mantém entretanto, mesmo com a presença de distorção harmônica, como mostra a Figura 83.

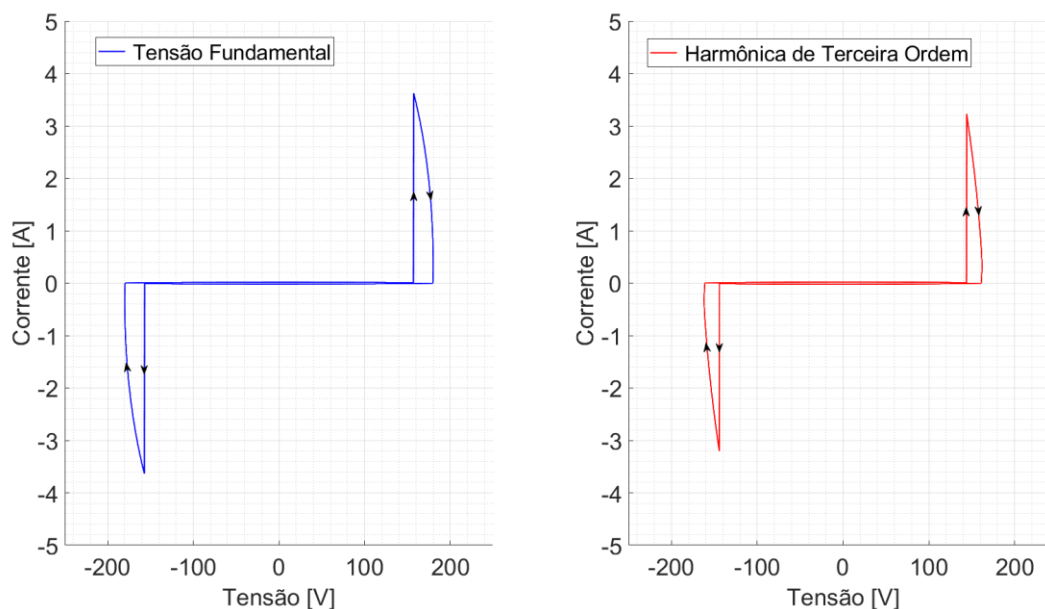
Figura 83 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso XI intervalo II.



Fonte: Autoria própria.

A trajetória V-I para a carga do tipo Fonte de Tensão harmônica, presente na Figura 84, é nitidamente diferente dos casos lineares anteriormente estudados, sendo constituída de uma parte reta na qual a corrente é igual a zero e de duas áreas, uma sendo referente ao pulso negativo da forma de onda de corrente e a outra sendo referente ao pulso positivo. Além disso, observa-se que o sentido de rotação é horário, característica típica de cargas com comportamento capacitivo.

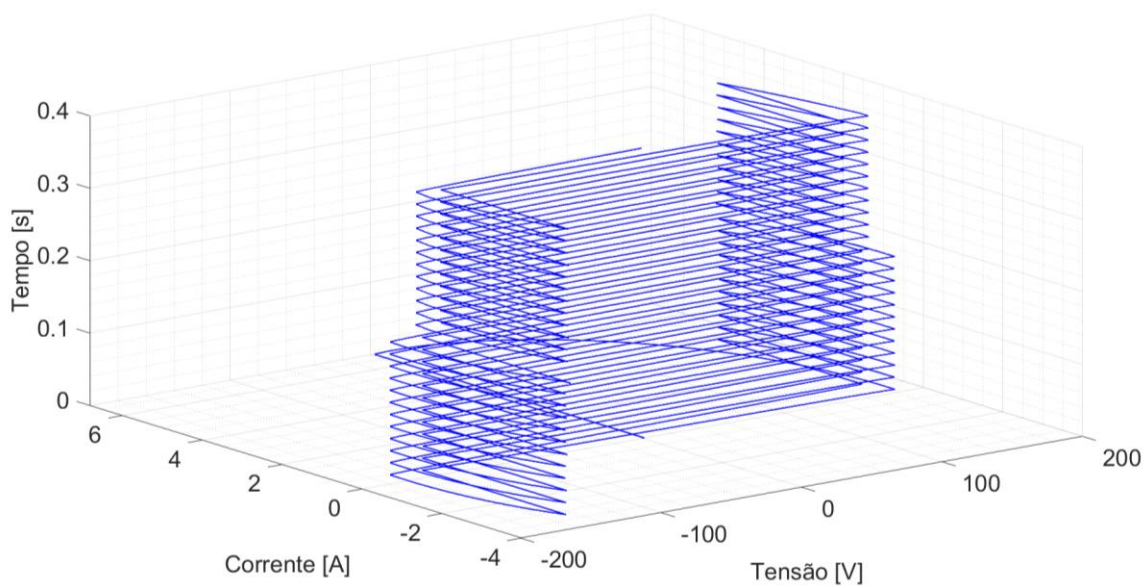
Figura 84 - Trajetórias V-I para o Caso XI.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 85 traz a Trajetória V-I para o Caso XI de forma tridimensional, com o eixo do tempo, permitindo obter a evolução da relação entre a tensão e a corrente ao decorrer da simulação.

Figura 85 - Trajetória V-I tridimensional para o Caso XI.



Fonte: Autoria própria.

Por meio das simulações realizadas, é possível obter os parâmetros numéricos relativos a carga do tipo Fonte de Tensão harmônica, que estão organizados na Tabela 12.

Tabela 12 - Grandezas obtidas para o circuito do Caso XI.

	Intervalo 1	Intervalo 2
Tensão Eficaz [V]	127,3	127,9
Corrente Eficaz [A]	0,9	0,73
DHT na Tensão [%]	Zero	10,0
DHT na Corrente [%]	236,2	193,3
Potência Ativa [W]	58	48
Potência Reativa [var]	102	80
Potência Aparente [VA]	118	93
FP	0,49	0,50

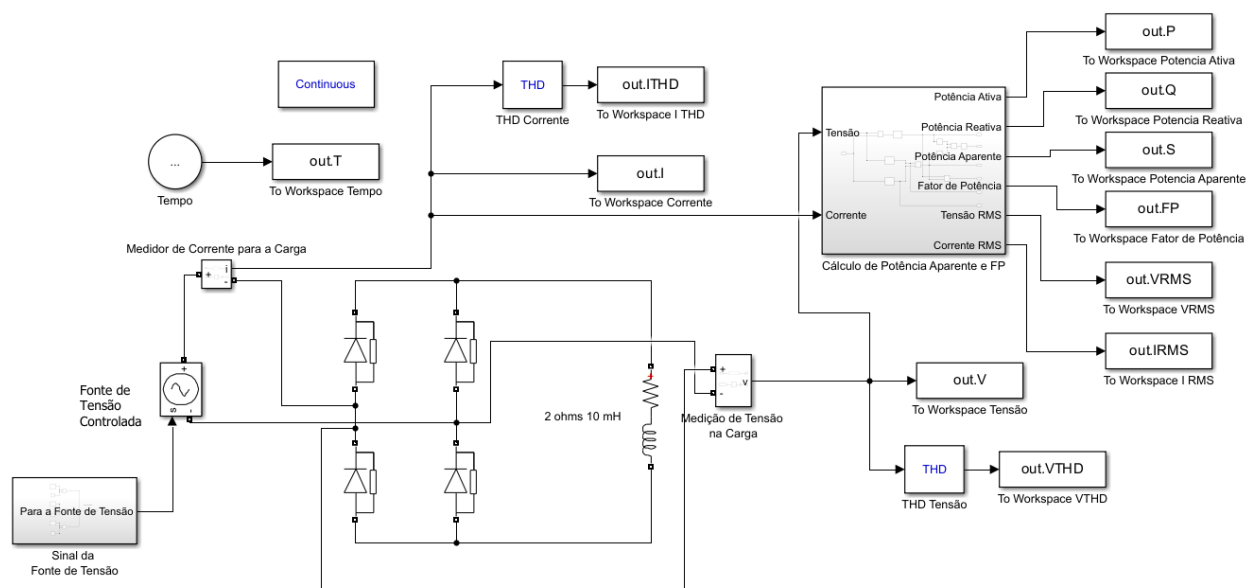
Fonte: Autoria própria.

Analisando os dados da Tabela 12, é possível notar que a carga não linear do tipo Fonte de Tensão harmônica possui um alto valor de DHT na corrente, mesmo para o intervalo sem a presença de componente harmônica na tensão, devido à alta distorção na forma de onda de corrente causada pela característica não linear da carga.

4.12 Caso XII Carga não Linear Tipo fonte de Corrente

Continuando com o estudo das cargas não lineares, o Caso XII aborda a simulação de uma carga do tipo Fonte de Corrente harmônica. Sendo assim, o circuito possui um resistor e um indutor em série no lado CC, com os valores de $2\ \Omega$ e 10 mH respectivamente, conforme mostra a Figura 86:

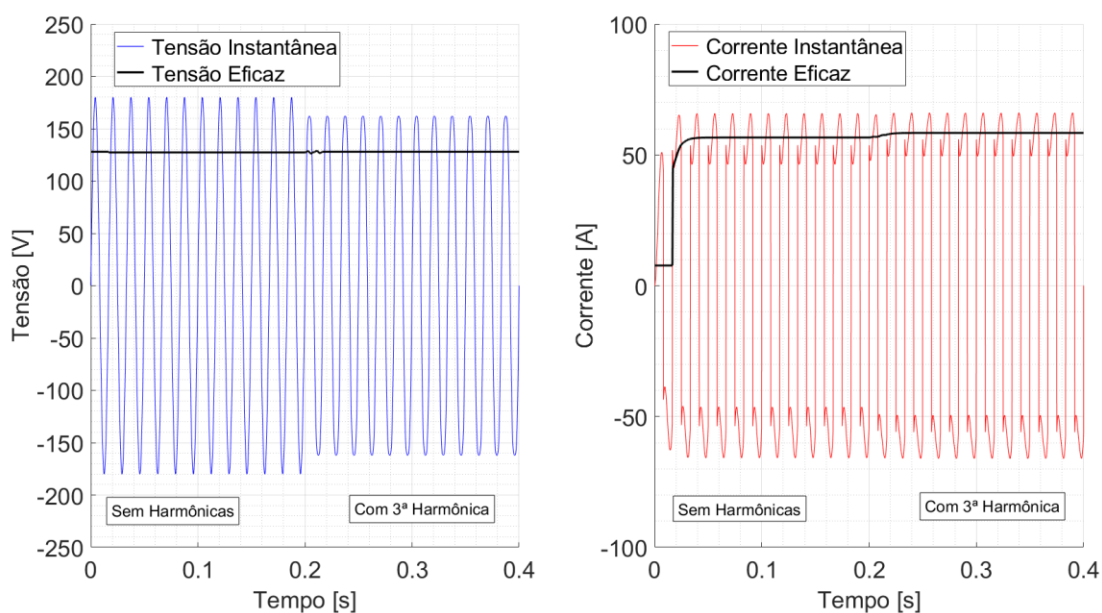
Figura 86 - Carga do tipo Fonte de Corrente.



Fonte: Autoria própria.

Assim como no exemplo da carga do tipo Fonte de Tensão harmônica, apresentado na Figura 80, a simulação é dividida em dois intervalos. O primeiro intervalo possui tensão nominal de alimentação e o segundo intervalo possui a presença de harmônica de terceira ordem. As formas de onda resultantes estão presentes na Figura 87.

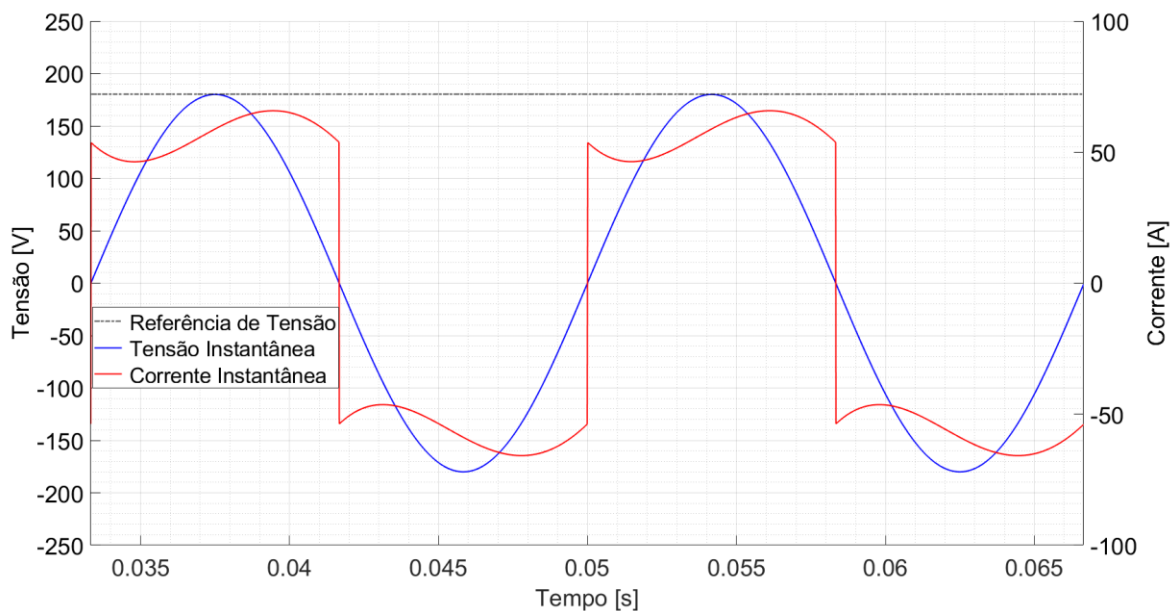
Figura 87 - Formas de tensão e corrente para o Caso XII.



Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Figura 87, houve uma pequena diminuição na tensão eficaz na carga, no valor de 1 V, mostrado na Tabela 13, embora o valor da corrente de pico apresentou uma redução significativa. Já em relação à corrente, houve uma maior diminuição em seu valor eficaz.

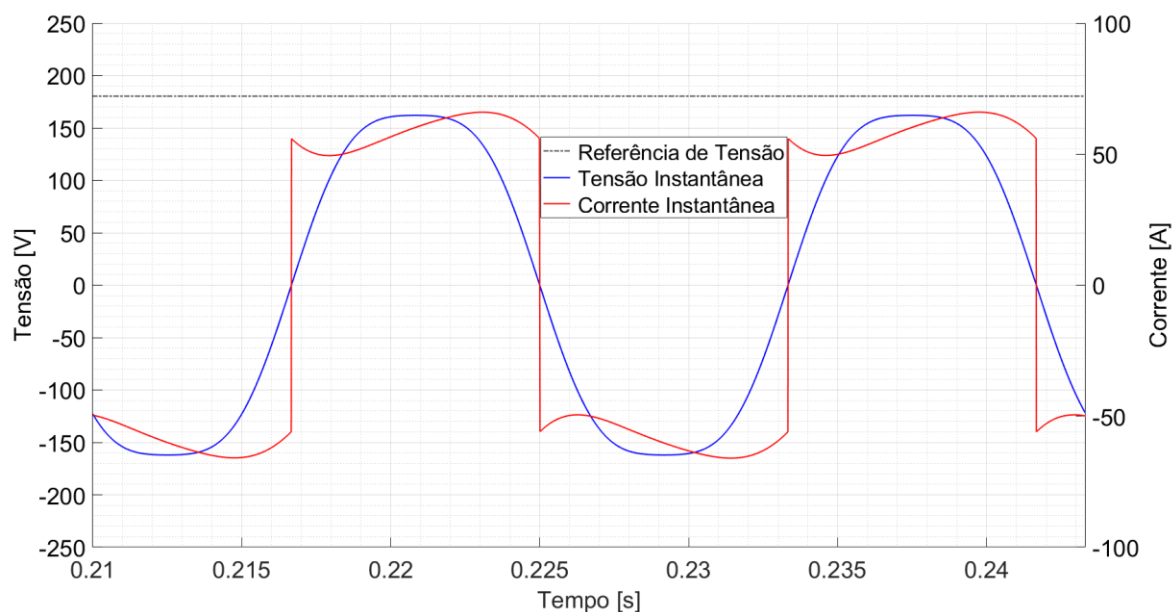
Figura 88 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso XII intervalo I.



Fonte: Autoria própria.

O gráfico presente na Figura 88 mostra o enfoque nas formas de onda de tensão e corrente na carga no intervalo I, no qual não há a presença de componentes harmônicas. É possível notar que a corrente demandada por este tipo de carga é não senoidal.

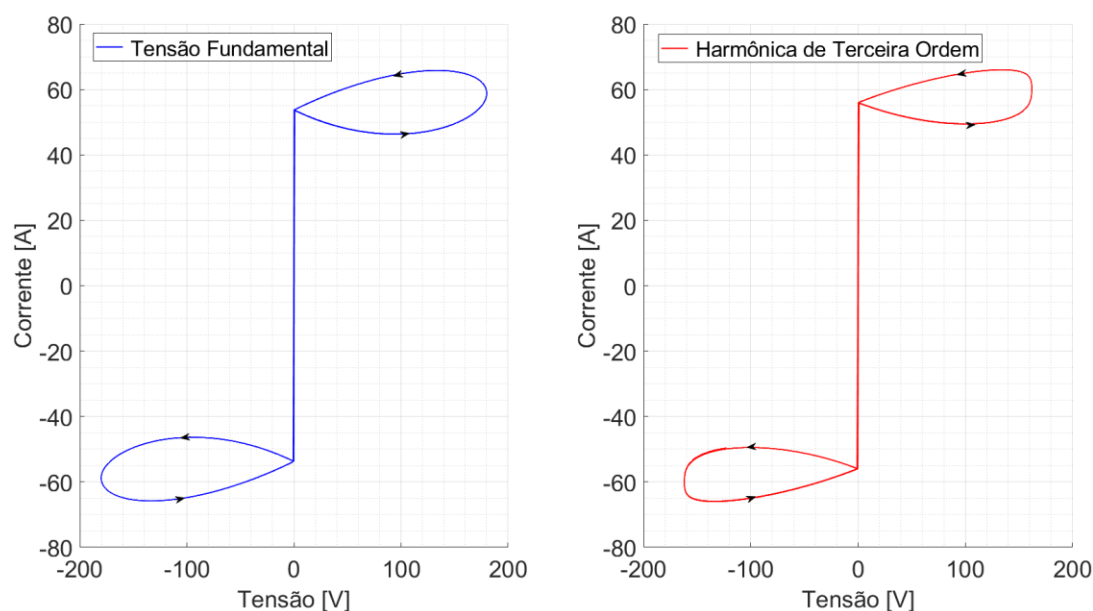
Figura 89 - Enfoque nas formas de onda de tensão e corrente para o Caso XII intervalo II.



A adição de uma componente harmônica no circuito não altera a característica de onda retangular da corrente fornecida, como pode ser visto na Figura 89, com o enfoque nas formas de onda de tensão e corrente no intervalo II.

A trajetória VI para este caso, observada na Figura 90, é similar à carga do tipo Fonte de Tensão harmônica, sendo dividida em duas áreas, relativas ao semiciclo positivo e negativo da forma de onda fornecida pela fonte de corrente não linear. No entanto, o sentido de rotação é anti-horário, característica esta típica de cargas com comportamento indutivo.

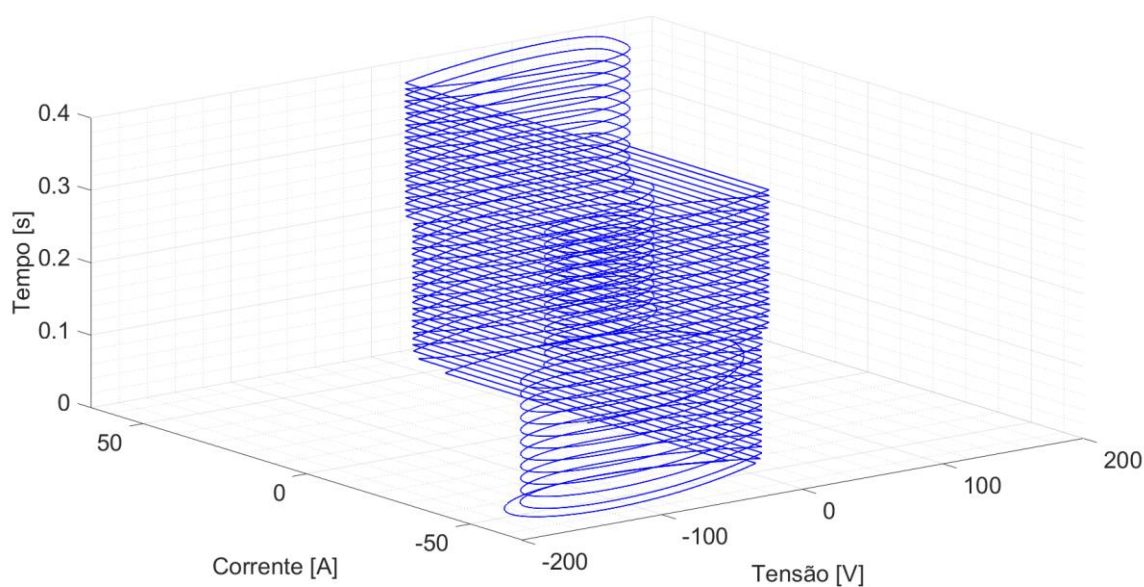
Figura 90 - Trajetórias VI para o Caso XII.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 91 traz a Trajetória V-I tridimensional ao longo do tempo de simulação do circuito tipo Fonte de Corrente, permitindo visualizar o intervalo em que ocorreu a adição da componente harmônica de 3ª ordem.

Figura 91 - Trajetória V-I tridimensional para o Caso XII.



Fonte: Autoria própria.

Finalizando os casos de simulação de distúrbios de QEE, a Tabela 13 traz as grandezas medidas para o Caso XII, com a carga do tipo Fonte de Corrente harmônica.

Tabela 13 - Grandezas obtidas para o circuito do Caso XII.

	Intervalo 1	Intervalo 2
Tensão Eficaz [V]	127,3	126,3
Corrente Eficaz [A]	56,8	58
DHT na Tensão [%]	Zero	10
DHT na Corrente [%]	43,5	44,1
Potência Ativa [W]	6564	6976
Potência Reativa [var]	2971	2660
Potência Aparente [VA]	7205	7466
FP	0.91	0.93

Fonte: Autoria própria.

Pelos dados obtidos na tabela para o circuito do tipo Fonte de Corrente, observa-se o alto valor de DHT causado pela presença de cargas não lineares em ambos os intervalos de tempo, assim como observado na carga do tipo Fonte de Tensão harmônica.

5 CONCLUSÃO

A Qualidade de Energia Elétrica é um tema bastante abrangente da área de Engenharia Elétrica, e traz muitas oportunidades de estudos e inovações, visto que há um grande potencial econômico na implementação de soluções e estratégias para melhorar a QEE fornecida.

Os avanços na tecnologia digital, com o advento de equipamentos eletrônicos mais baratos e com maior capacidade de processamento permitiram que houvesse um aprimoramento nos métodos de medição, monitoramento e análise dos fenômenos de QEE, possibilitando também o desenvolvimento de melhores métodos gráficos de visualização.

No decorrer deste trabalho, foram abordados os métodos tradicionais de análise de QEE e os métodos das figuras de Lissajous ou Trajetórias V-I e das Elipses de Espaço Vetorial no Plano Complexo, dois métodos gráficos de visualização de distúrbios. Também foi possível descrever e simular alguns distúrbios que afetam a QEE, aplicando os métodos de análise para os doze casos simulados.

Comparando as Figuras de Lissajous às Elipses de Espaço Vetorial no Plano Complexo, foi possível concluir que ambos os métodos permitem a visualização e caracterização de distúrbios relacionados à QEE.

As Figuras de Lissajous permitem a identificação de distúrbios de QEE, bem como a caracterização de cargas lineares e não lineares quanto ao tipo e à defasagem entre tensão e corrente.

As Elipses de Espaço Vetorial não permitem a caracterização das cargas, entretanto, permitem uma melhor identificação e desacoplamento dos distúrbios de QEE ao se comparar com as Figuras de Lissajous, especialmente na identificação de componentes harmônicas.

Com o desenvolvimento do trabalho, foi possível obter um entendimento sobre o tema da QEE, seus índices de qualidade e os distúrbios que a afetam. Também foi possível validar a utilização das Trajetórias V-I e das Elipses de Espaço Vetorial como métodos de visualização de distúrbios e caracterização de cargas elétricas.

Visando a evolução do presente estudo, outros métodos de visualização de distúrbios de QEE podem ser trabalhados, como por exemplo a Transformada de Clarke e a Transformada de Stockwell, bem como sua utilização em circuitos trifásicos.

O estudo da temática não se esgota com esta conclusão, ao contrário, aponta para a continuidade da pesquisa com a aplicação de técnicas de processamento de imagem para obter análises computacionais utilizando os métodos gráficos estudados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Diretor Geral. **Resolução Normativa Aneel Nº 1.000, de 07 de dezembro de 2021**. Brasília: ANEEL, 07 dez. 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2023.

ALAM, M. R. Classification and visualization of power quality disturbance-events using space vector ellipse in complex plane. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [S.l.], v. 46, n. 10, p. 1380 - 1389, jun. 2021.

BAGGINI, A. **Handbook of power quality**. 6. ed. Bergamo: Wiley, 2008.

BRAGA, N. C. **Figuras de Lissajous**. [S.l.], 2009. Disponível em: Instituto NCB: <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/usando-os-instrumentos/689-figuras-de-lissajous.html>. Acesso em: 01 jun. 2023.

GRANADOS-LIEBERMAN, D. et al. Techniques and methodologies for power quality analysis and disturbances classification in power systems: a review. **IET Generation, Transmission & Distribution**, [S.l.], v. 5, n. 4, p. 519–529, abr. 2011.

International Eletrotechnical Comission. **International Standard IEC 61000-4-30**. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods. Genebra: IEC, 2021.

LEONARDO ENERGY. Poor power quality costs european business more than €150 billion a year. [S.l.] **European Power Quality Survey**, 2008. Disponível em: <https://leonardo-energy.pl/wp-content/uploads/2017/08/Poor-power-quality-costs-european-business-more-than-150-billion-a-year.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2023.

LIMA, P. K. **Transformada de Clarke e Park**. Fortaleza: UFC, 2015. Disponível em: <https://www.coe.ufrj.br/~kleber/Transformadas.pdf>. Acesso: em 24 jun. 2023.

OSAWA, J. **A gift for music lovers who have it all: a personal utility pole**. Tóquio, 2016. Disponível em: <https://www.wsj.com/articles/a-gift-for-music-lovers-who-have-it-all-a-personal-utility-pole-1471189463>. Acesso em: 21 jun. 2022.

PAREDES, H. K. 2011. **Teoria de potência conservativa: uma nova abordagem para o controle cooperativo de condicionadores de energia e considerações sobre atribuição de responsabilidades**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011

POMILIO, J. A. **A importância da qualidade da energia elétrica**. Campinas: UNICAMP, 2020 Disponível em: <https://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/it012.html>. Acesso em: 17 jul. 2023.

WEG. **Motores para aplicações comerciais e residenciais: Motor de chapa aberto (IP21)**. Jaraguá do Sul, 2021. Disponível em: https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-EI%C3%A9tricos/Monof%C3%A1sico/Uso-Geral/Motor-de-Chapa-Aberto-%28IP21%29/Motor-de-Chapa-Aberto%28IP21%29/p/MKT_WMO_TEXT_IMAGE_BR_MT_1PHASE_ODP_OPENSTEELMOTOR. Acesso em: 29 mar. 2023.

APÊNDICE A – Código utilizado para geração das figuras de Lissajous

```
% Código utilizado para plotar os gráficos do caso I
%Declaração de Variáveis
T = out.T;
V = out.V;
I = out.I;
VRMS = out.VRMS;
IRMS = out.IRMS;
T1 = (T >= 0.033333) & (T <= 0.066666);
T2 = (T >= 0.21) & (T <= 0.243333);
T3 = (T >= 0.41) & (T <= 0.443333);

%Ciclo Completo - Tensão e Corrente com RMS Sobrepostas

figure('Name','Caso I Tensao e Corrente com RMS Sobrepostas' , 'NumberTitle' , 'off');

% Tensão
subplot(1,2,1)
grid on
grid minor
hold on
ylim([-250 250])
plot(T, V, 'g', 'LineWidth',1.0)
plot(T, VRMS, 'b', 'LineWidth',2.5)
hold off
legend(' Tensão Instantânea', ' Tensão Eficaz')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Tensão [V]')
fontsize(gca,35,"pixels")

% Corrente
subplot(1,2,2)
grid on
grid minor
hold on
plot(T, I, 'r', 'LineWidth',1.0)
plot(T, IRMS, 'b', 'LineWidth',2.5)
hold off
legend(' Corrente Instantânea', ' Corrente Eficaz')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Corrente [A]')
fontsize(gca,35,"pixels")

%Enfoque nos Intervalos
%Intervalo 1 - Sem Capacitor
figure('Name','Caso I Tensao e Corrente Intervalo 1','NumberTitle','off');

grid on
grid minor
hold on
colororder({'k','k'})
yyaxis left
ylabel('Tensão [V]')
plot(T(T1), V(T1), 'g', 'LineWidth',1.5)
yyaxis right
```

```

ylim([-15 15])
ylabel('Corrente [A]')
plot(T(T1), I(T1), 'r', 'LineWidth',1.5)
hold off
legend(' Tensão', ' Corrente')
xlim tight
xlabel('Tempo [s]')
fontsize(gca,35,"pixels")

%Intervalo 2 - Com capacitor compensando a 0,92 de FP
figure('Name','Caso I Tensao e Corrente Intervalo 2 FP 092','NumberTitle','off');
grid on
grid minor
hold on
colororder({'k','k'})
yyaxis left
ylabel('Tensão [V]')
plot(T(T2), V(T2), 'g', 'LineWidth',1.5)
yyaxis right
ylim([-15 15])
ylabel('Corrente [A]')
plot(T(T2), I(T2), 'r', 'LineWidth',1.5)
hold off
xlim tight
legend(' Tensão', ' Corrente')
xlabel('Tempo [s]')
fontsize(gca,35,"pixels")

%Intervalo 3 - Com capacitor compensando a 1 de FP
figure('Name','Caso I Tensao e Corrente Intervalo 3 FP 1','NumberTitle','off');
grid on
grid minor
hold on
colororder({'k','k'})
yyaxis left
ylabel('Tensão [V]')
plot(T(T3), V(T3), 'g', 'LineWidth',1.5)
yyaxis right
ylim([-15 15])
ylabel('Corrente [A]')
plot(T(T3), I(T3), 'r', 'LineWidth',1.5)
hold off
legend(' Tensão', ' Corrente')
xlim tight
xlabel('Tempo [s]')
fontsize(gca,35,"pixels")

% Trajetória de Tensão X Corrente
% Sobrepostas
figure('Name','Caso I Trajetória VI Sobreposta','NumberTitle','off');
subplot(1,1,1)
grid on
grid minor
hold on

```

```

plot(V(T1), I(T1), 'r', 'LineWidth',1.5)
plot(V(T2), I(T2), 'g', 'LineWidth',1.5)
plot(V(T3), I(T3), 'b', 'LineWidth',1.5)
xlim([-200 200])
ylim([-15 15])
legend(' FP = 0,77', ' FP = 0,92', ' FP = 1')
hold off
xlabel('Tensão [V]')
ylabel('Corrente [A]')
fontsize(gca,35,"pixels")

% Separadas
figure('Name','Caso I Trajetória VI Separadas','NumberTitle','off');

subplot(1,3,1)
grid on
grid minor
hold on
plot(V(T1), I(T1), 'r', 'LineWidth',1.5)
hold off
xlim([-200 200])
ylim([-15 15])
xlabel('Tensão [V]')
ylabel('Corrente [A]')
fontsize(gca,35,"pixels")

subplot(1,3,2)
grid on
grid minor
hold on
plot(V(T2), I(T2), 'g', 'LineWidth',1.5)
hold off
xlim([-200 200])
ylim([-15 15])
xlabel('Tensão [V]')
ylabel('Corrente [A]')
fontsize(gca,35,"pixels")

subplot(1,3,3)
grid on
grid minor
hold on
plot(V(T3), I(T3), 'b', 'LineWidth',1.5)
hold off
xlim([-200 200])
ylim([-15 15])
xlabel('Tensão [V]')
ylabel('Corrente [A]')
fontsize(gca,35,"pixels")

%Trajetórias VI em 3D
figure('Name','Caso I Trajetória VI 3D','NumberTitle','off');
plot3(V, I, T, 'b', 'LineWidth',1.5)
grid on
grid minor
ylabel('Corrente [A]')
xlabel('Tensão [V]')

```

```

xlabel('Tempo [s]')
fontsize(gca,35,"pixels")

%Dados para consulta
%THD
figure('Name','Caso I THD','NumberTitle','off');
% Tensão
subplot(1,2,1)
grid on
grid minor
hold on
plot(out.T, out.VTHD*100, 'g', 'LineWidth',2.5)
hold off
ylim([0 50])
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('THD da Tensão [%]')
fontsize(gca,35,"pixels")

% Corrente
subplot(1,2,2)
grid on
grid minor
hold on
plot(out.T, out.ITHD*100, 'r', 'LineWidth',2.5)
hold off
ylim([0 50])
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('THD da Corrente [%]')
fontsize(gca,35,"pixels")

% POTÊNCIA ATIVA E REATIVA

figure('Name','Caso I Potência Ativa e Reativa','NumberTitle','off');

% Potência Ativa
subplot(1,2,1)
grid on
grid minor
hold on
plot(out.T, out.P, 'g', 'LineWidth',2.5)
hold off
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Potência Ativa [W]')
fontsize(gca,35,"pixels")

% Potência Reativa
subplot(1,2,2)
grid on
grid minor
hold on
plot(out.T, out.Q, 'r', 'LineWidth',2.5)
hold off
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Potência Reativa [var]')
fontsize(gca,35,"pixels")

```

```
% POTÊNCIA APARENTE E FP

figure('Name','Caso I Potência Aparente e FP','NumberTitle','off');

% Potência Aparente
subplot(1,2,1)
grid on
grid minor
hold on
plot(out.T, out.S, 'g', 'LineWidth',2.5)
hold off
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Potência Aparente [VA]')
fontsize(gca,35,"pixels")

% Fator de Potência
subplot(1,2,2)
grid on
grid minor
hold on
plot(out.T, out.FP, 'r', 'LineWidth',2.5)
hold off
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Fator de Potência')
fontsize(gca,35,"pixels")
```