

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ADRIANO DOS SANTOS E SOUZA

**METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DE HARMÔNICAS EM CONVERSORES DE
POTÊNCIA NO SISTEMA HVDC**

Ilha Solteira

2013

ADRIANO DOS SANTOS E SOUZA

Orientando

**METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DE HARMÔNICAS EM CONVERSORES DE
POTÊNCIA NO SISTEMA HVDC**

Dissertação apresentado à Faculdade de
Engenharia do Campus de Ilha Solteira –
UNESP como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Elétrica

Área de Conhecimento: Automação

JÚLIO BORGES DE SOUZA

Orientador

Ilha Solteira

2013

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

S729m

Souza, Adriano dos Santos e.

Metodologia para o cálculo de harmônicas em conversores de potência no sistema HVDC / Adriano dos Santos e Souza. – Ilha Solteira : [s.n.], 2013
96 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2013

Orientador: Júlio Borges de Souza
Inclui bibliografia

1. Energia elétrica - Transmissão - Corrente contínua. 2. Funções harmônicas.
3. Eletrônica de potência. 4. Conversores de corrente elétrica. 5. Conversores de potência. 6. HVDC.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

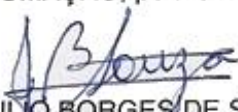
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

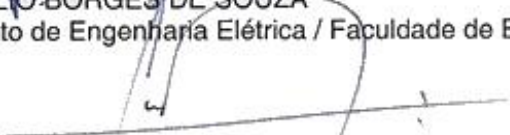
TÍTULO: Metodologia para o cálculo de harmônicas em conversores de potência no sistema HVDC

AUTOR: ADRIANO DOS SANTOS E SOUZA

ORIENTADOR: Prof. Dr. JÚLIO BORGES DE SOUZA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica
Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JÚLIO BORGES DE SOUZA
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. LUIS CARLOS ORIGA DE OLIVEIRA
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. GIULIANO PIERRE ESTEVAM
Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo / Unidade de Araçatuba - SP

Data da realização: 28 de novembro de 2013.

DEDICO

Aos meus pais Dorvalino Batista de Souza e Maria Ornelia Almeida dos Santos e Souza por todo o incentivo, motivação e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me guiar durante o desenvolvimento deste trabalho, por me abençoar com a sabedoria e o conhecimento necessário, por me abençoar com o dom da fé, perseverança e persistência para que nos momentos de dificuldades eu tivesse forças para não desistir dos meus objetivos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Júlio Borges de Souza, agradeço pela atenção, confiança, dedicação, empenho e pelas contribuições na minha formação profissional, acadêmica e pessoal. Agradeço por todo apoio, ajuda e direcionamento na orientação dos trabalhos realizados, onde tive muito aprendizado e experiência obtida. Agradeço pelo amigo que se mostra sempre com bons conselhos nos momentos necessários.

Ao Prof. Dr. Luís Carlos Origa de Oliveira por toda a contribuição, orientação, ideias no desenvolvimento deste projeto de mestrado. Agradeço por toda a ajuda, atenção, confiança e por auxiliar na minha formação acadêmica e profissional.

Aos meus pais, Dorvalino Batista de Souza e Maria Ornelia Almeida dos Santos e Souza, por toda a ajuda, incentivo, pela força nos momentos difíceis. Por sempre estarem ao meu lado me apoiando e contribuindo para o meu crescimento pessoal e profissional. Sou muito grato por tudo o que já fizeram por mim durante, para que eu pudesse realizar os meus sonhos e continuar buscando os meus ideais e indo atrás dos meus objetivos.

Agradeço ao meu irmão Jean Carlos de Souza, a minha cunhada Izamara Cristina Leite Pagotto e as minhas sobrinhas Lorena Leite de Souza e Laura Leite de Souza, pelo carinho e todo o apoio e motivação.

Agradeço ao Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato pela participação na banca de qualificação e contribuir com ideias, sugestões e melhorias para este trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Luís Carlos Origa de Oliveira e Prof^o Dr. Giuliano Pierre Estevam pela participação na banca de defesa deste projeto de mestrado, e por contribuírem com sugestões, ideias para a melhoria do trabalho.

A todos os meus amigos em especial Fernando Parra dos Anjos Lima, James Clauton da Silva, Simone Silva Frutuoso de Souza e ao Hélio Ribeiro de Souza que sempre estiveram ao meu lado me dando forças e apoiando.

Agradeço aos Professores do UniSALESIANO de Araçatuba, em particular, Giuliano Pierre Estevam, Nelson Hitoshi Takiy, Maria Teixeira, Pedro Pereira de Souza, Alexandre

Marcelino da Silva, Antônio Francisco de Souza e Carlos Eduardo Zambon pela amizade, ajuda e incentivo para continuar na carreira acadêmica.

Agradeço ao CNPq pelo auxílio financeiro concedido, através de bolsa de estudo de Mestrado, que permitiu que eu pudesse me dedicar exclusivamente ao desenvolvimento desta pesquisa.

“Determinação, coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso. Não importam quais sejam os obstáculos e as dificuldades. Se estamos possuídos de uma inabalável determinação, conseguiremos superá-los independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho.”

Dalai Lama.

RESUMO

A transmissão de energia elétrica em corrente contínua em alta tensão é uma tecnologia utilizada para atender os requisitos cada vez mais rigorosos para a transmissão de energia elétrica, como por exemplo: adoção de fontes de energia localizadas em regiões remotas, a expansão das cargas industriais e urbanas, transmissão de energia elétrica por canais marítimos, etc. Esta tecnologia tem-se demonstrado comprovadamente eficaz e altamente confiável com a capacidade de modular a potência transmitida de forma rápida e precisa, apresentando características vantajosas do ponto de vista técnico e econômico. Porém, este tipo de tecnologia possui a desvantagem operacional de gerar conteúdo harmônico no sistema devido ao comportamento não linear dos conversores de potência utilizados para a conversão de corrente alternada em corrente contínua. Neste contexto, com o intuito de aplicar a metodologia de cálculo do conteúdo harmônico para o conversor de seis pulsos, o objetivo central do trabalho consiste no desenvolvimento de um simulador computacional para a determinação das harmônicas de correntes geradas pelas estruturas chaveadas dos conversores estáticos trifásicos, considerando condições não ideais de operação. O principal diferencial deste aplicativo computacional é proporcionar um ambiente visual interativo e intuitivo para a realização das simulações, apresentando de uma forma clara o objetivo os resultados dos parâmetros calculados pelo aplicativo e o resultado de cálculo do conteúdo harmônico de corrente gerado pelos conversores de potência.

Palavras-chave: Transmissão em alta tensão em corrente contínua. Harmônicas. Conversores de potência. HVDC.

ABSTRACT

The power transmission in high voltage in direct current is a technology used to meet the increasingly stringent requirements for the transmission of electricity, such as: Adoption of energy sources located in remote areas, the expansion of industrial loads and urban, electrical transmission channels, marine, etc. This technology has demonstrated proven effective and highly reliable with the ability to model the power transmitted quickly and accurately, with advantageous features in terms of technical and economic. However, this type of technology has the disadvantage of generating harmonic content operating in the system due to nonlinear behavior of power converters used to convert alternating current into direct current. In this context, in order to apply the methodology of calculation of harmonic content for the six-pulse converter, the central objective of the work is to develop a software to determine the harmonic currents generated by switching structures of three-phase static converters, considering non-ideal operation. The main distinguishing feature of this application is to provide a computational interactive and intuitive visual environment to perform the simulations, showing a clear objective results of the parameters calculated by the application and the result of calculating the current harmonic content generated by power converters.

Keywords: Power transmission direct current high voltage. Harmonics. Power converters. HVDC.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Estrutura esquematizada do sistema de transmissão em HVDC.	23
Figura 2 -	Esquema da ponte conversora trifásica de seis pulsos.	24
Figura 3 -	Tensão média de saída em função do ângulo de disparo.	26
Figura 4 -	Produção do terceiro pulso através do método CIP.	27
Figura 5 -	Sistema desequilibrado com produção de pulsos igualmente espaçados.	28
Figura 6 -	Corrente de alimentação na fase b, com tempos de comutação assimétricos.	29
Figura 7 -	Circuito equivalente para o período de comutação.	31
Figura 8 -	Ângulo de comutação para a válvula k.	35
Figura 9 -	Fluxograma da rotina de cálculo dos ângulos de comutação	36
Figura 10 -	Fluxograma da rotina de cálculo dos ângulos de ignição	37
Figura 11 -	Determinação dos Períodos de Integração.	43
Figura 12 -	Componentes seno e cosseno dos coeficientes de Fourier	44
Figura 13 -	Instantes de condução de corrente contínua e de comutação	45
Figura 14 -	Instantes de contribuição da corrente I_d para condução plena	46
Figura 15 -	Instantes de contribuição da comutação para as correntes I_{ck}	47
Figura 16 -	Fluxograma da rotina de cálculo do conteúdo harmônico	50
Figura 17 -	Resultados dos ângulos para a primeira simulação	52
Figura 18 -	Tela de resultados gráficos	53
Figura 19 -	Tela de resultados do cálculo do conteúdo harmônico da primeira simulação	54
Figura 20 -	Resultados dos ângulos de ignição e comutação	55
Figura 21 -	Resultados gráficos	56
Figura 22 -	Resultados do conteúdo harmônico calculado na segunda simulação	56
Figura 23 -	Tela de resultados dos ângulos obtidos	57
Figura 24 -	Resultado do conteúdo calculado para a terceira simulação	58
Figura 25 -	Resultados dos ângulos de ignição para o método de cálculo PIE	59
Figura 26 -	Resultados gráficos	59
Figura 27 -	Tela de resultados do conteúdo harmônico obtido através do método de calculo PIE	60
Figura 28 -	Tela de resultados dos ângulos de ignição e comutação para a quarta simulação CIP	61
Figura 29 -	Resultados do conteúdo harmônico	62

Figura 30 - Tela de resultados dos ângulos de ignição e comutação para a quarta simulação PIE	62
Figura 31 - Tela de resultados gráficos dos métodos de cálculos	63
Figura 32 - Resultados para o conteúdo harmônico de corrente com método PIE	64
Figura 33 - Resultados dos ângulos de ignição e comutação	65
Figura 34 - Resultados gráficos	65
Figura 35 - Resultados dos valores do conteúdo harmônico de corrente	66
Figura 36 - Resultado dos ângulos de ignição para o método PIE	67
Figura 37 - Resultado do conteúdo harmônico calculado	67
Figura 38 - Resultado dos ângulos de ignição e comutação	68
Figura 39 - Resultados Gráficos	69
Figura 40 - Resultados obtidos para o conteúdo harmônico	69
Figura 41 - Resultados dos ângulos de ignição e comutação	70
Figura 42 - Resultados do conteúdo harmônico obtido	71
Figura 43 - Tela principal do aplicativo computacional	77
Figura 44 - Ferramentas iniciais do aplicativo computacional	77
Figura 45 - Tela de criação do arquivo de erros	78
Figura 46 - Tela para criar arquivo de tensões	78
Figura 47 - Tela de simulações com funções destacadas	79
Figura 48 - Tela de escolha do domínio	80
Figura 49 - Domínio da frequência selecionado	80
Figura 50 - Domínio do tempo selecionado	80
Figura 51 - Tela utilizada para abrir arquivo de tensões	81
Figura 52 - Abrir o arquivo de erros	82
Figura 53 - Escolha do método de cálculo	82
Figura 54 - Inserir o valor do ângulo de disparo	83
Figura 55 - Botão para o cálculo dos ângulos de ignição	83
Figura 56 - Tela de resultados obtidos	83
Figura 57 - Resultados gráficos	84
Figura 58 - Resultado do desvio em graus entre os métodos de cálculos	84
Figura 59 - Botão para inserir dados das reatâncias de fase	85
Figura 60 - Inserir valores das reatâncias de fase	85
Figura 61 - Resultado dos ângulos de comutação	86

Figura 62 - Componente utilizado para calcular o conteúdo harmônico	86
Figura 63 - Tela de resultados do conteúdo harmônico de corrente	87
Figura 64 - Diagrama das funções do aplicativo computacional desenvolvido	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Relação número de pulsos e ordem harmônica	40
Tabela 2 -	Tabela de contribuição para o período de condução	46
Tabela 3 -	Tabela de contribuição para o período de comutação	48
Tabela 4 -	Coeficientes	50
Tabela 5 -	Resultados para a segunda simulação existente na literatura	89
Tabela 6 -	Resultados para os ângulos de ignição e comutação obtidos neste trabalho	90
Tabela 7 -	Resultado para o conteúdo harmônico calculado existente na literatura	90
Tabela 8 -	Resultados obtidos para o conteúdo harmônico neste trabalho	91
Tabela 9 -	Resultados para a terceira simulação existente na literatura	91
Tabela 10 -	Resultado dos ângulos de ignição e comutação existente na literatura	92
Tabela 11 -	Resultado para o conteúdo harmônico calculado existente na literatura	92
Tabela 12 -	Resultados obtidos para o conteúdo harmônico neste trabalho	93
Tabela 13 -	Resultados para os ângulos de ignição e comutação existentes na literatura	93
Tabela 14 -	Resultado para o conteúdo harmônico calculado existente na literatura	94
Tabela 15 -	Resultados para os ângulos de ignição e comutação calculados neste trabalho	95
Tabela 16 -	Resultados obtidos para o conteúdo harmônico neste trabalho	96

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Ampère
α	ÂNGULO DE DISPARO
μ	ÂNGULO DE COMUTAÇÃO
CA	CORRENTE ALTERNADA
CC	CORRENTE CONTÍNUA
CIP	CONTROLE INDIVIDUAL DE PULSOS
HVDC	HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT (TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM CORRENTE CONTÍNUA EM ALTA TENSÃO)
ATCA	ALTA TENSÃO EM CORRENTE ALTERNADA
I_d	INTERVALO DE CONDUÇÃO DE CORRENTE TOTAL POSITIVA
$-I_d$	INTERVALO DE CONDUÇÃO DE CORRENTE TOTAL NEGATIVA
km	Quilômetros
kW	Quilowatts
kV	Quilovolts
L_a	INDUTÂNCIA DA FASE A
L_b	INDUTÂNCIA DA FASE B
L_c	INDUTÂNCIA DA FASE C
L_d	REATÂNCIA DE ALISAMENTO
MW	Megawatts
PIE	PULSOS IGUALMENTE ESPAÇADOS
R_a	RESISTÊNCIA DE LINHA DA FASE A
R_b	RESISTÊNCIA DE LINHA DA FASE B
R_c	RESISTÊNCIA DE LINHA DA FASE C
RCT	REATOR CONTROLADO A TIRISTOR
t	TEMPO

T1	TIRISTOR 1
T2	TIRISTOR 2
T3	TIRISTOR 3
T4	TIRISTOR 4
T5	TIRISTOR 5
T6	TIRISTOR 6
TC	TEMPO DE COMUTAÇÃO
TE	TRANSFORMADORES ESPECIAIS
Va	TENSÃO NA FASE A
Vb	TENSÃO NA FASE B
Vc	TENSÃO NA FASE C
Vn	Tensão média
Vab	TENSÃO ENTRE A FASE A E A FASE B
Vac	TENSÃO ENTRE A FASE A E A FASE C
Vca	TENSÃO ENTRE A FASE C E A FASE A
Vcb	TENSÃO ENTRE A FASE C E A FASE B
(n)	VALVULA EM CUNDUÇÃO NA FASE N
(m)	VÁLVULA EM CONDUÇÃO NA FASE M

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Revisão bibliográfica	18
1.2	Motivação	19
1.3	Objetivos e contribuições	19
1.4	Proposta	20
1.5	Organização da dissertação	21
2	CONVERSOR DE POTÊNCIA DE SEIS PULSOS	23
2.1	Introdução	23
2.2	Característica Estrutural do sistema HVDC	23
2.3	Características de operação dos conversores de potência	24
2.4	Sistema de produção dos pulsos de ignição em conversores de potência	27
2.4.1	<i>Controle individual de pulsos (CIP)</i>	27
2.4.2	<i>Pulsos Iguamente Espaçados (PIE)</i>	28
2.5	Tempo de comutação	29
2.6	Cálculo dos ângulos de comutação.	30
2.7	Comentários.	37
3	METODOLOGIA DE CÁLCULO DO CONTEÚDO HARMÔNICO DE CORRENTE	39
3.1	Harmônicas nos conversores de potência	39
3.1.1	<i>Distribuição Sequencial das Harmônicas</i>	41
3.1.2	<i>Efeito das distorções harmônicas</i>	41
3.2	Séries de Fourier	42
3.3	Comentários	51
4	TESTES E RESULTADOS	52
4.1	Primeira Simulação	52
4.2	Segunda Simulação	54
4.3	Terceira Simulação	57
4.4	Quarta Simulação	60
4.5	Quinta Simulação	64

4.6	Sexta Simulação	68
4.7	Sétima Simulação	70
4.8	Comentários	71
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	72
	REFERÊNCIAS	73
	APÊNDICE A - PUBLICAÇÕES	75
	APÊNDICE B - APLICATIVO COMPUTACIONAL	76
	APÊNDICE C – COMPARATIVO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS NESTE TRABALHO E OS RESULTADOS EXISTENTES NA LITERATURA	89

1 INTRODUÇÃO

Em meados de 1941 e 1945, foi assinado o primeiro contrato comercial para o desenvolvimento de um sistema de transmissão de energia elétrica em alta tensão em corrente contínua, do termo em inglês “*High Voltage Direct Current*” (HVDC). A instalação possuía a capacidade de 60 MW (*Megawatts*), 200 kV e 150 ampères (A), para o abastecimento da cidade de Berlim na Alemanha em uma estrutura subterrânea, com cabos de 115 Km de comprimento, porém este projeto nunca foi posto em operação (SIEMENS, 2013).

O grande desafio da utilização do sistema HVDC foi dado ao desenvolvimento de válvulas confiáveis e econômicas que realizasse a conversão de alta tensão em corrente alternada para alta tensão em corrente contínua e vice-versa (ABB, 2013).

Embora houvesse tecnologia desenvolvida para atender tal propósito em 1920, somente em meados da década de 1940 descobertas relevantes permitiu o avanço tecnológico nesta área (ABB, 2013).

Estas descobertas contribuíram para o desenvolvimento da primeira linha de transmissão em HVDC que interligava a ilha de Gotland e o continente sueco, a uma distância de 96 km. Com a capacidade de transmissão de 20 MW, 10 kV a 200 A, este sistema HVDC entrou em operação no ano de 1954 e foi o primeiro sistema HVDC no mundo (ABB, 2013).

A transmissão em HVDC é utilizada principalmente para o transporte de grandes blocos de energia através de longas distâncias, possuindo grande flexibilidade no controle do fluxo de energia elétrica. É de conhecimento que o sistema de transmissão em corrente alternada em alta tensão (ATCA) possui algumas limitações operacionais para a transmissão de potência por grandes distâncias, que prejudicam a capacidade de transmissão de energia elétrica em alta tensão, devido principalmente às características indutivas e capacitivas das linhas aéreas. A transmissão em ATCA possui uma característica estrutural complexa e de grande porte com relação à estrutura utilizada para a transmissão em HVDC. Com isso, prejudicando o transporte de potência para linhas de transmissão acima de 100 km de comprimento.

Na transmissão (ATCA) a conexão entre sistemas de transmissão de energia elétrica com frequências distintas não é possível de ser realizada (SIEMENS, 2013).

Com o avanço tecnológico foram desenvolvidas pesquisas para a adoção da transmissão em (HVDC), com o intuito de complementar as transmissões em corrente alternada, pois a tecnologia HVDC demonstra-se comprovadamente eficaz no âmbito operacional com características peculiares que são fundamentais para a transmissão de

grandes blocos de potência, possuindo maior eficiência de transmissão a longas distâncias com menores perdas, com maior confiabilidade tornando o sistema mais estável com a possibilidade de controle do fluxo de potência. As características estruturais de uma linha de transmissão de energia elétrica do sistema HVCD são consideravelmente menores, comparada com as características estruturais de uma linha de transmissão em ATCA para o transporte de potência, assim diminuindo o custo para tal operação (SIEMENS, 2013).

Basicamente o sistema (HVDC) é composto por duas estações conversoras terminais, sendo que uma opera como retificadora e a outra como inversora. Estas estações conversoras são interligadas por uma linha de transmissão em CC. Também fazendo parte do sistema os equipamentos utilizados para manobras e proteção, transformadores especiais (TE) dotados de *taps* que operam sob carga e os filtros harmônicos, acoplados tanto do lado CA dos conversores como do lado CC. Como propriamente ditos, esses são fundamentais no processo de mitigação do conteúdo harmônico gerado pelos conversores de potência (KIMBARK, 1971).

As pontes conversoras demonstram-se eficazes no ponto de vista operacional e são os principais componentes do sistema HVDC, onde operam como retificador transformando o sinal alternado em contínuo e/ou como inversor, transformando o sinal contínuo em alternado dependendo da necessidade e funcionalidade do sistema. Apesar de eficientes estes componentes são responsáveis por gerar conteúdo harmônico considerável no sistema, portanto pesquisas são realizadas para identificar e mitigar tais distúrbios gerados pelos conversores a fim de minimizar seus efeitos.

Neste trabalho o componente de estudos, foi o conversor de potência de seis pulsos utilizados na transmissão HVDC, devido à modelagem dos métodos de cálculos serem desenvolvidos e aplicados para este tipo de conversor, cujo mesmo possui uma grande aceitação no mercado devido a sua relação custo/benefício.

1.1 Revisão bibliográfica

Na dissertação de mestrado de Borges (2005) foi modelada uma técnica computacional utilizada para o cálculo do conteúdo harmônico em conversores de potência com capacitores de comutação. São apresentadas técnicas, metodologias e modelagens computacionais para o cálculo do conteúdo harmônico de corrente.

No trabalho de Oliveira (1983), foi proposta uma técnica computacional para o cálculo de harmônicos trifásicos gerados por conversores e compensadores estáticos. São

apresentadas as técnicas e metodologias de cálculo, utilizadas para o desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

No artigo de Kus (2006), Drabek (2006), Fort (2006) e Pittermann (2006) é proposta uma técnica modificada para o cálculo do conteúdo harmônico em conversores de frequência.

No artigo de Drabek (2011) e Pittermann (2011) propõe-se uma técnica para o tratamento dos efeitos desfavoráveis do conteúdo harmônico na rede elétrica, causado pelos conversores de potências através das técnicas de Fourier.

É proposto por Lehn (2003) uma técnica para o cálculo do conteúdo harmônico característico e não característico em conversores com fontes de tensão, oferecendo uma solução com a utilização de um método robusto para determinar as harmônicas de corrente, evitando problemas de convergência.

1.2 Motivação

Através de buscas realizadas na literatura observou-se a existência de *softwares* com a mesma proposta deste trabalho, como por exemplo: Oliveira (1983), no entanto estes aplicativos foram desenvolvidos em ambiente console, em uma linguagem de baixo nível, impossibilitando a implementação de uma interface visual, dificultando a sua utilização e a interatividade por parte dos usuários. Devido ao fato de tais softwares serem implementados em ambiente console é necessário uma pessoa capacitada com conhecimento da linguagem.

Com isso, dificultando a utilização do mesmo em âmbito empresarial e de pesquisa, desta forma, a motivação deste trabalho é propor uma ferramenta computacional, intuitiva com interface gráfica para a realização do cálculo do conteúdo harmônico de forma que possibilite uma maior interação entre o usuário e a máquina.

Os resultados são apresentados de uma forma detalhados em um ambiente visual gráfico, facilitando a utilização por parte de qualquer profissional com noções mínimas de informática e com domínio básico da área de transmissão em corrente contínua.

1.3 Objetivos e contribuições

Esta dissertação de mestrado tem como principal objetivo o desenvolvimento de um aplicativo computacional que possibilite o cômputo do conteúdo harmônico de corrente gerado pela ponte conversora em um sistema de transmissão em alta tensão em corrente contínua. O mesmo deve ser capaz de realizar uma simulação completa em condições não

ideais de operação, ou seja, desequilíbrio e distorções harmônicas nas tensões de alimentação, reatâncias de comutação com características assimétricas no sistema de alimentação dos conversores, erros nos sistemas de ignição dos tiristores e ângulos de comutação e de ignição assimétricos. Demonstrar através do desenvolvimento de um aplicativo computacional à aplicação dos métodos necessários para o cálculo do conteúdo harmônico gerado pelos conversores de potência de seis pulsos no sistema HVDC. Utiliza-se o método de matrizes de contribuições para determinação dos momentos de condução da corrente, com o intervalo de condução plena e com o intervalo de comutação.

Este trabalho contribui com a área de engenharia elétrica apresentando um aplicativo computacional que efetua o cálculo do conteúdo harmônico de forma simples e integrada em um ambiente visual (interface gráfica), que facilita a sua utilização por qualquer usuário.

Visando contribuir com possíveis usuários do software desenvolvido neste trabalho, foi reservado um apêndice desta dissertação para a apresentação de um tutorial explanando a forma de utilização do aplicativo desenvolvido, com o intuito de proporcionar a novos usuários facilidade e familiaridade com a ferramenta desenvolvida.

Também contribui-se com a área de engenharia elétrica, mais precisamente em qualidade de energia elétrica através de simulações e demonstrações da metodologia utilizada para o cálculo do conteúdo harmônico de corrente gerado pelos conversores de potência no sistema HVDC, utilizando o *software* desenvolvido.

1.4 Proposta

Com a necessidade e o crescimento da utilização do sistema HVDC para atender os requisitos rigorosos da transmissão de energia elétrica, tais como: assegurar a qualidade da transmissão de grandes blocos de potência por longas distâncias e com menores perdas causadas pelos fatores já descritos.

A fim de atender a demanda de energia elétrica exigida atualmente com eficiência operacional e econômica. É exigido a realização de pesquisas na área visando atender a qualidade de energia elétrica que é fornecida através da utilização do sistema HVDC.

A proposta deste trabalho é apresentar um aplicativo computacional para o cálculo do conteúdo harmônico de corrente gerado pelos conversores de potência existentes visando à demonstração computacional em um ambiente intuitivo e interativo das técnicas utilizadas para o cálculo de harmônicas no sistema HVDC.

1.5 Organização da dissertação

Os capítulos subsequentes estão organizados da seguinte forma:

Capítulo 2: Conversor de potência de seis pulsos

Neste capítulo destaca-se o conversor de potência de seis pulsos, as suas características operacionais, os métodos trivialmente utilizados para o sistema de produção de pulsos. Discorre-se sobre os tempos de comutação das válvulas tiristorizadas dos conversores, e a metodologia utilizada para o cálculo da corrente de comutação e consequentemente dos ângulos de comutação.

Capítulo 3: Metodologia de cálculo de harmônicas de corrente

É descrito neste capítulo os conceitos básicos sobre o distúrbio harmônico, com ênfase no conteúdo harmônico gerado pelos conversores de potência de seis pulsos, as causas e os efeitos deste distúrbio. Abordam-se a metodologia utilizada para o cômputo do conteúdo harmônico de corrente gerado pelo conversor através da aplicação da série de Fourier.

Capítulo 4: Testes e Resultados

Neste capítulo realizou-se testes e simulações através do aplicativo computacional desenvolvido, para demonstrar a metodologia de cálculo implementada e demonstrar a geração do conteúdo harmônico de acordo com as situações de operação adotadas para o sistema.

Capítulo 5: Conclusões e sugestões para futuros trabalhos

São apresentados neste capítulo as conclusões e sugestões para a continuação do trabalho.

Apêndice A: Publicações

Neste apêndice constam as publicações realizadas para o trabalho desenvolvido.

APÊNDICE B: Aplicativo computacional

Apresenta-se neste apêndice o aplicativo computacional desenvolvido, criou-se um tutorial para familiarizar os usuários com a ferramenta desenvolvida, será descrito a sequência à ser adotada para a realização de simulações.

APÊNDICE C: Comparativo entre os resultados obtidos e os resultados existentes na literatura

Neste apêndice apresentam-se as tabelas com os resultados obtidos em um trabalho publicado na literatura: OLIVEIRA (1983) e tabelas dos resultados obtidos neste trabalho, visando à comparação dos resultados obtidos nos dois trabalhos; Com o intuito de demonstrar a coerência dos resultados obtidos neste trabalho.

2 CONVERSOR DE POTÊNCIA DE SEIS PULSOS

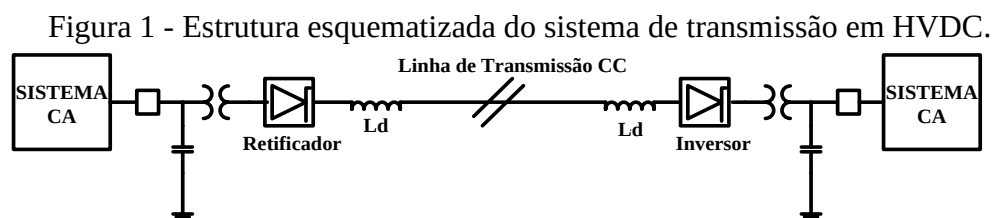
2.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentados os principais componentes utilizados no sistema de transmissão em HVDC. Destacando-se as principais características operacionais do conversor de potência trifásico de seis pulsos, este componente é o componente central de estudo desta pesquisa.

Descrevem-se os métodos de cálculo do sistema de produção de pulsos para a geração dos ângulos de ignição dos conversores de potência em questão. Apresenta-se o tempo de comutação das válvulas tiristorizadas e a metodologia de cálculo das correntes e dos ângulos de comutação.

2.2 Característica Estrutural do sistema HVDC

Na Figura 1 a seguir, é demonstrado de forma esquemática os principais componentes do sistema HVDC, em que utilizou-se a conexão de dois sistemas em (CA) através de uma linha de transmissão em (CC).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os sistemas em (CA) são interligados por dois conversores, na estrutura esquemática da figura anterior, cada conversor realiza operações distintas, sendo que uma estação conversora opera como retificadora e a outra como inversora, o bloco de potência é transmitido da estação retificadora para a inversora (BORGES, 2005).

Para o suprimento da potência reativa indutiva são conectados bancos de capacitores em paralelo do lado (CA) dos conversores, estes componentes são alimentados por transformadores trifásicos.

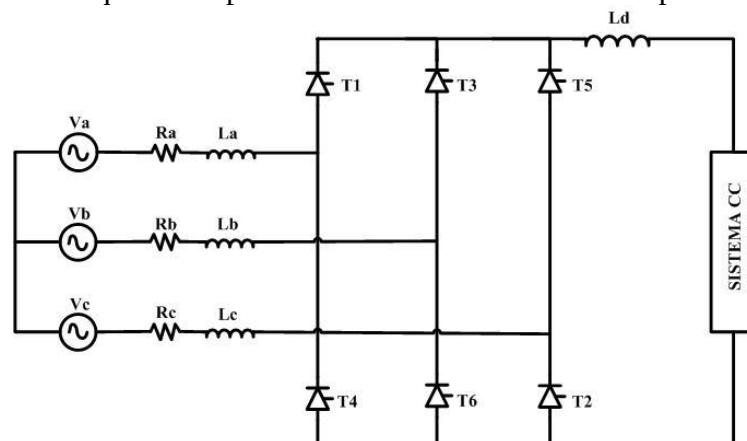
Reatores de alisamento conectados em série com a linha de transmissão em CC exercem a função de diminuir o efeito “*ripple*”, com o objetivo de fazer a corrente CC possua a característica mais próxima da contínua.

Os conversores de potência são os principais equipamentos das estações terminais, demonstrando-se confiáveis do ponto de vista operacional. É o componente que representa a maior parcela de custo no desenvolvimento do sistema HVDC (BORGES, 2005).

2.3 Características de operação dos conversores de potência

As linhas HVDC tradicionais operam em doze pulsos, porém para este trabalho considerou-se a operação de uma célula de seis pulsos. Na Figura 2 pode-se visualizar esquematicamente a ponte conversora trifásica de seis pulsos, também denominada de circuito de *Graetz* (COGO; OLIVEIRA, 1981).

Figura 2 - Esquema da ponte conversora trifásica de seis pulsos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O princípio de funcionamento das pontes conversoras tem por base a operação de válvulas tiristorizadas. Compostas por uma associação em paralelo de colunas de tiristores conectados em série. Estes componentes são utilizados nos conversores de potência, devido o rápido chaveamento e por suportar valores altos de tensão e corrente elétrica (KIMBARK, 1971).

Os tiristores são semicondutores controlados a silício em sua grande maioria, porém pode ser construindo utilizando germânio, selênio, entre outros. As válvulas entram em condução através acionamento do “*Gate*”, o tiristor passará a conduzir quando é aplicado um sinal de corrente através do sistema de controle. Com tiristor em condução o valor da tensão

entre o anodo e o catodo seja positivo, ao contrário o componente bloqueará a corrente consequentemente a válvula estará operando como uma chave em aberto (OLIVEIRA, 1983).

A cada período da tensão no lado CA, as seis válvulas que compõem a ponte conversora devem entrar e sair de operação, transferindo, desta forma, o valor da tensão do lado CA para o lado CC, no caso de operação como retificador e vice-versa. A sequência de entrada de operação destas válvulas obedece à numeração das mesmas, conforme Figura 2. As válvulas tiristorizadas T1, T3 e T5 são acionados durante o semiciclo positivo da tensão média de fase, e as válvulas tiristores T2, T4 e T6 são acionados durante o semiciclo negativo, produzindo pulsos com desvio de 60° um do outro (BORGES, 2005).

A quantidade de pulsos gerada pelo conversor corresponde ao número de pulsações da tensão média (V_n) do sistema em CC, em um intervalo de tempo correspondente a um período de tensão do sistema CA. Para o conversor de potência em análise são gerados seis pulsos por cada ciclo de onda (COGO; OLIVEIRA, 1981).

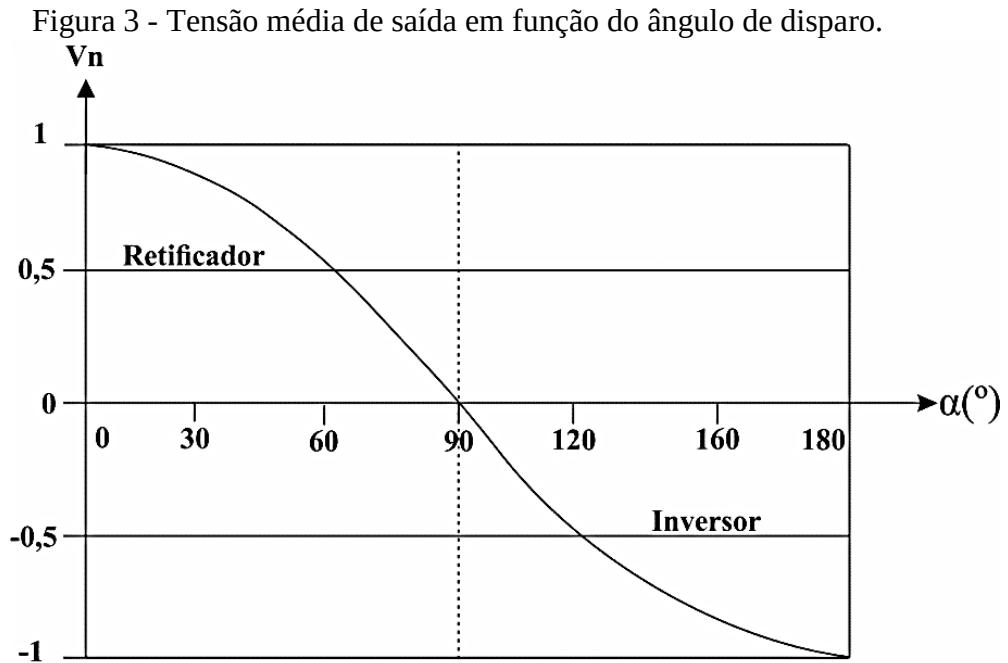
Sabe-se que estas válvulas saem de operação à medida que a válvula seguinte na sequência estabelecia, de um mesmo lado da ponte, entra em operação. Desta forma, quando a ponte opera como retificador, segmentos da parte superior da tensão são transferidos para o terminal superior do lado CC e segmentos da parte inferior da tensão são transferidos para o terminal do lado CC, constituindo sua diferença a tensão média do lado CC (KIMBARK, 1971; OLIVEIRA, 1983).

Caso o sistema de alimentação da ponte conversora seja simétrico, o período de condução de cada válvula será de 120° elétricos. No caso de um sistema de tensão assimétrico o período de condução será diferente de 120° elétricos (COGO; OLIVEIRA, 1981).

Devido à existência das reatâncias indutivas e resistivas nos sistemas de alimentação dos conversores, do ponto de vista analítico pode-se, basicamente identificar três intervalos distintos nas correntes drenadas no sistema, durante um período de forma de onda. Tem-se os intervalos de condução plena, cuja corrente apresenta valores constantes e iguais a I_d e $-I_d$, os intervalos de bloqueio em que a corrente apresenta um valor nulo e os intervalos de comutação de corrente entre as válvulas de um mesmo lado da ponte conversora nos quais a corrente apresenta valores variáveis e dependentes dos valores das indutâncias do sistema de alimentação.

Os conversores podem operar como retificador convertendo um sinal alternado para um sinal contínuo, e como inversor, convertendo um sinal contínuo em um sinal alternado. Quando da operação como inversor, o processo consiste na transferência de segmentos da tensão CC para o lado CA, constituindo-se uma forma de onda alternada, a sua operação

difere devido o valor do ângulo de disparo (α) utilizado. Conforme ilustrado na Figura 3 (COGO; OLIVEIRA, 1981).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Conforme ilustrado na Figura 3, o valor médio da tensão (V_n) é proporcional ao valor adotado para ângulo de disparo. Adotando o valor de $\alpha = 0^{\circ}$ o valor de V_n estará no seu valor máximo positivo, para $\alpha = 90^{\circ}$ a tensão média de saída é nula (BORGES, 2005).

Sendo $90^{\circ} < \alpha < 180^{\circ}$, a tensão média de saída CC estará operando com valores negativos, então o bloco de potência será direcionado do sistema CC para o lado CA (BORGES, 2005).

Dessa forma, verifica-se que o efeito do ângulo de atraso é reduzir o valor da tensão média, uma vez que $0^{\circ} < \alpha < 180^{\circ}$ o valor de V_n pode variar de V_n à $-V_n$. Este é um fator crucial para que o conversor opere como inversor, pois sabe-se que a corrente I_d não pode ter sua direção com o sentido oposto, quando o mesmo já é definido pelas válvulas. Por isso, realiza-se a reversão da potência, onde há uma tensão V_n negativa em conjunto com a corrente I_d positiva. Portanto, o conversor de potência não possui a capacidade de operar como inversor sem o auxílio de um sistema de controle de ignição das válvulas.

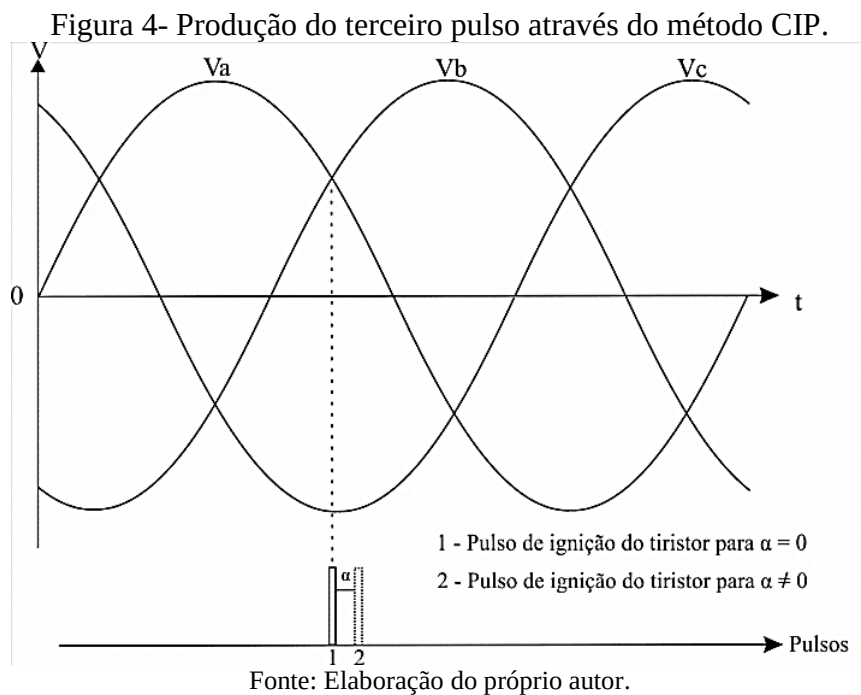
2.4 Sistema de produção dos pulsos de ignição em conversores de potência

Para a produção dos seis ângulos de ignição dos conversores, é necessária a utilização do sistema de produção de pulsos, tal sistema não opera de forma independente do sistema, e sim de modo integrado através de um sistema de controle que utiliza fundamentalmente dois métodos conhecidos para a determinação dos seis pulsos a serem produzidos. Os sistemas adotados são descritos nos tópicos a seguir.

2.4.1 Controle individual de pulsos (CIP)

Este sistema de produção de pulsos tem por base a determinação do instante exato de cruzamento das tensões CA fase-neutro. Este método é também conhecido como “método das tensões nulas”, devido à metodologia de cálculo utilizado para a determinação dos pulsos.

Caso necessário, adota-se um valor para o ângulo de atraso (α) para o controle do momento de ignição da válvula tiristor, para controlar a operação dos conversores e consequentemente o tempo de comutação é diminuído de acordo com o valor adotado para α . Na Figura 4 ilustra-se a base deste método (COGO; OLIVEIRA, 1981).



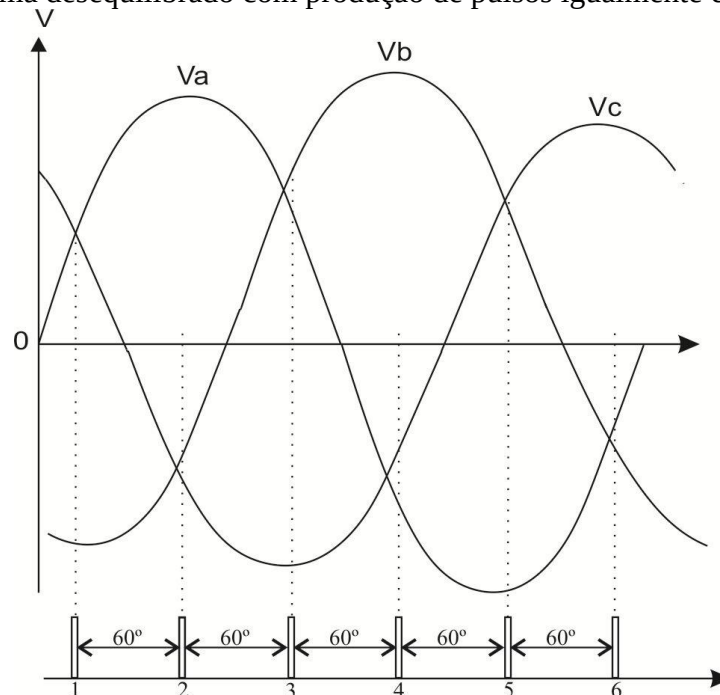
Conforme ilustrado na Figura 4 anteriormente, se o ângulo de atraso fosse nulo o instante de disparo do tiristor seria exatamente no instante de “cruzamento” entre as tensões

Va e Vb, porém adotando-se um valor para α o momento de ignição é desviado. Observa-se que o sistema de alimentação adotado é perfeitamente equilibrado e livre de distorções harmônicas, portanto os seis pulsos estarão espaçados por 60° . Com isto, o método do controle individual de pulsos demonstrou-se muito sensível a qualquer distorção ou desequilíbrio das tensões de alimentação, assim alterando a característica simétrica entre os pulsos gerados caso o sistema esteja operando em condições não idealizadas (COGO; OLIVEIRA, 1981).

2.4.2 Pulsos Igualmente Espaçados (PIE)

A principal característica do sistema de pulsos igualmente espaçados (PIE) é devido a sua operação ser quase totalmente independente do instante de cruzamento das tensões de alimentação. Neste sistema determina-se o instante de cruzamento das tensões fase neutro para o primeiro tiristor a entrar em ignição e soma-se ao mesmo o intervalo de tempo correspondente ao atraso na ignição do mesmo. A partir deste instante enviam-se pulsos de ignição a intervalos de tempo correspondentes a 60° na frequência fundamental para os outros tiristores da ponte em operação. Conforme ilustrado na Figura 5 abaixo (COGO; OLIVEIRA, 1981).

Figura 5 - Sistema desequilibrado com produção de pulsos igualmente espaçados.



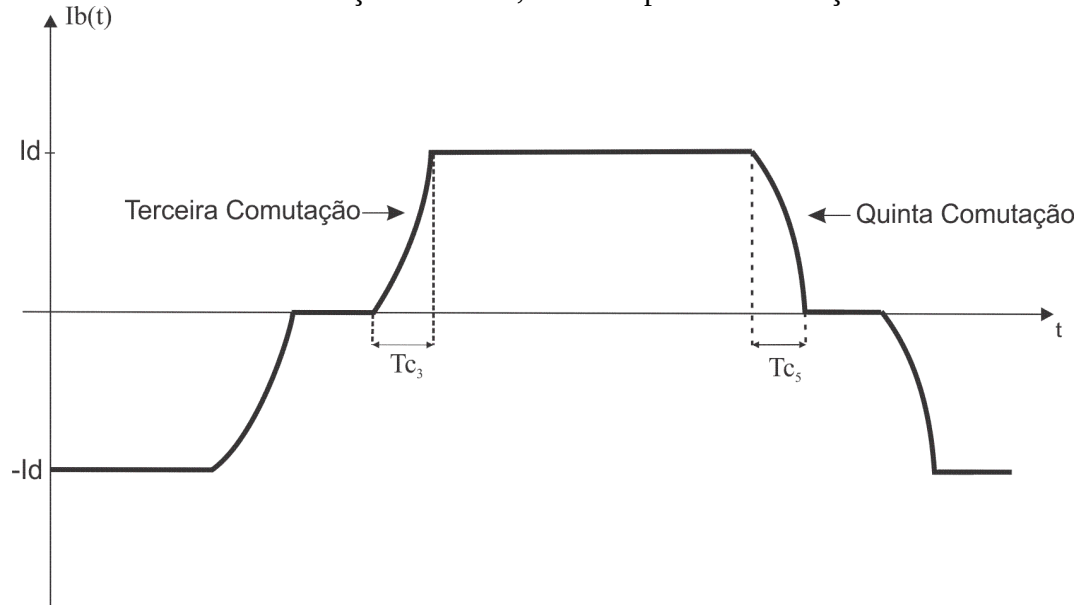
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Visualiza-se na Figura 5 anterior, que independente do sistema de alimentação estar desequilibrado, os pulsos de 1 a 6 são gerados com desvio igual a 60° um do outro. Desta forma, as correntes de alimentação apresentarão formas de ondas simétricas, ou seja, com intervalos de condução de 120° (COGO; OLIVEIRA, 1981).

2.5 Tempo de comutação

As formas de onda da tensão e da corrente são ainda dependentes dos parâmetros dos sistemas CA. Particularmente, a transferência da corrente de uma válvula para a válvula seguinte na sequência definida para o mesmo lado da ponte conversora ocorrerá em um intervalo de tempo finito devido à indutância do sistema CA, este processo resulta na variação da corrente de condução I_d , conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Corrente de alimentação na fase b, com tempos de comutação assimétricos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O tempo de comutação interfere no instante em que as válvulas assumirão o instante de condução plena da corrente I_d , no exemplo demonstrado na Figura 6, tomou-se como exemplo a corrente da fase b com assimetrias entre o tempo da terceira comutação (T_{c3}) e o tempo da quinta comutação (T_{c5}).

2.6 Cálculo dos ângulos de comutação.

Conforme discorrido anteriormente, a presença das reatâncias no lado CA dos conversores faz com que a troca de condução entre as válvulas tiristorizadas seja processada em um tempo finito, denominado de tempo de comutação. Portanto, para determinar os coeficientes da série de Fourier necessários para o cálculo do conteúdo harmônico de corrente, precisam-se identificar os ângulos de comutação para que seja possível definir os instantes de integração das séries de Fourier.

Para a determinação da corrente de comutação para a válvula que está entrando em condução utilizou-se a equação genérica (OLIVEIRA, 1983), que pode ser utilizada tanto nos conversores estáticos e outros componentes, A seguir na equação (1) é estabelecida a expressão genérica.

$$I_n(t) = \sum_{j=1}^{J=NH} \frac{B_j}{L_{nm}} \left[\left(\left(\frac{H_j - \frac{1}{T_{nm}}}{(J^2 \cdot \omega^2) + \left(\frac{1}{T_{nm}^2} \right)} \right) \cdot e^{\frac{-t}{T_{nm}}} \right) + \left(\frac{1}{J \cdot \omega} \cdot \sqrt{\left(\frac{(H^2 + (J^2 \cdot \omega^2))}{(J^2 \cdot \omega^2) + \left(\frac{1}{T_{nm}^2} \right)} \right)} \cdot \text{sen}(J \cdot \omega \cdot t + \phi_j) \right) \right] + \frac{R_m \cdot Id}{R_{nm}} \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{T_{nm}}} \right) + K_{nm} \quad (1)$$

Sendo:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (2)$$

$$R_{nm} = R_n + R_m \quad (3)$$

$$L_{nm} = L_n + L_m \quad (4)$$

$$T_{nm} = \frac{L_{nm}}{R_{nm}} \quad (5)$$

$$A_j = V_{nj} \cdot \cos(\phi_{nj}) - V_{mj} \cdot \cos(\phi_{mj}) \quad (6)$$

$$B_j = V_{nj} \cdot \text{sen}(\phi_{nj}) - V_{mj} \cdot \text{sen}(\phi_{mj}) \quad (7)$$

$$H_j = \left(\frac{J \cdot \omega \cdot A_j}{B_j} \right) \quad (8)$$

$$\phi_j = \text{tg}^{-1} \left[\frac{R_{nm}}{L_{nm}} \right] - \text{tg}^{-1} \left[\frac{A_j}{B_j} \right] \quad (9)$$

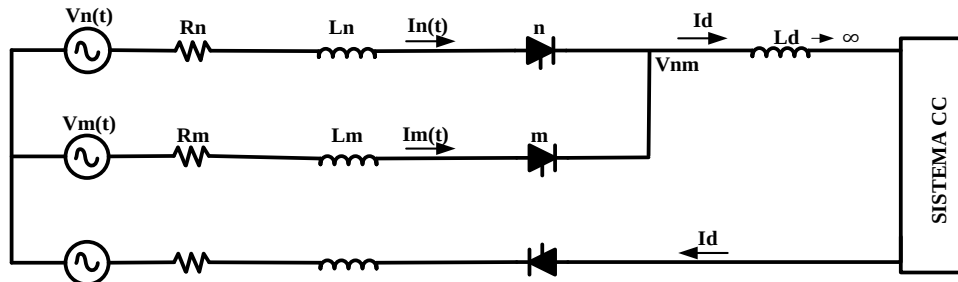
$$K_{nm} = \text{Constante de Integração.}$$

A equação (1) é obtida através da análise do circuito equivalente ilustrado na Figura 7, a seguir o mesmo é obtido analisando-se as válvulas tiristorizadas do conversor durante o tempo de comutação. Com a condução da válvula (m) sendo interrompida e a condução da

válvula (n) é inicializada. Conforme os objetivos inicialmente propostos neste trabalho, foram considerados para a formulação da equação genérica as seguintes condições não ideais:

- Tensões de alimentação desequilibradas;
- Distorções Harmônicas que também podem ser desequilibradas;
- Reatâncias e/ou resistências do sistema CA desequilibradas;

Figura 7 - Circuito equivalente para o período de comutação.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Sendo:

R_n – Resistência total da fase (n);

L_n – Indutância total da fase (n);

R_m – Resistência total da fase (m);

L_m – Indutância total da fase(m);

$V_n(t)$ – Tensão da fase (m) para o neutro;

$V_m(t)$ – Tensão da fase (m) para o neutro.

Portanto, a tensão V_{nm} é dada pela equação a seguir:

$$V_{nm} = V_n - R_n \cdot I_n - L_n \left(\frac{d_{in}}{dt} \right) = V_m - R_m \cdot I_m - L_m \left(\frac{d_{im}}{dt} \right) \quad (10)$$

Rearranjando, tem-se:

$$V_n - V_m = R_n \cdot I_n - L_n \left(\frac{d_{in}}{dt} \right) - R_m \cdot I_m - L_m \left(\frac{d_{im}}{dt} \right) \quad (11)$$

Para qualquer valor de tempo (t) durante a comutação, a soma das correntes será igual a corrente de condução plena I_d .

$$I_n + I_m = I_d \quad (12)$$

$$I_m = I_d - I_n \quad (13)$$

Então:

$$\frac{d_{im}}{d_t} = -\frac{d_{in}}{d_t} \quad (14)$$

Substituindo as equações (12), (13) e (14) em (11), tem-se:

$$V_n - V_m = (R_n + R_m) \cdot I_n + (L_n + L_m) \left(\frac{d_{in}}{d_t} \right) - R_m \cdot I_d \quad (15)$$

E substituindo as equações (3) e (4) na equação (15), tem-se:

$$V_n - V_m = (R_{nm}) \cdot I_n + (L_{nm}) \left(\frac{d_{in}}{d_t} \right) - R_m \cdot I_d \quad (16)$$

Considerando o efeito das distorções harmônicas nas tensões no sistema de alimentação do lado CA dos conversores, as equações de V_n e V_m são dadas por:

$$V_n(t) = \sum_{j=1}^{J=Maxh} V_{nj} \cdot \text{sen}(J \cdot \omega \cdot t + \phi_{nj}) \quad (17)$$

$$V_m(t) = \sum_{j=1}^{J=Maxh} V_{mj} \cdot \text{sen}(J \cdot \omega \cdot t + \phi_{mj}) \quad (18)$$

Sendo:

V_{nj} – Valor de pico do j-ésimo componente harmônico de tensão da fase (n) para o neutro.

V_{mj} – Valor de pico do j-ésimo componente harmônico de tensão da fase (m) para o neutro.

ϕ_{nj} – Ângulo de fase do j-ésimo componente harmônico da tensão da fase (n) para o neutro.

ϕ_{mj} – Ângulo de fase do j-ésimo componente harmônico da tensão da fase (m) para o neutro.

Substituindo (17) e (18) em (16), tem-se:

$$\begin{aligned}
& \sum_{j=1}^{J=MaxJ} V_{nj} \cdot \text{sen}(J \cdot \omega \cdot t + \phi_{nj}) - \sum_{j=1}^{J=MaxJ} V_{mj} \cdot \text{sen}(J \cdot \omega \cdot t + \phi_{mj}) \\
& = (R_{nm}) \cdot I_n + (L_{nm}) \left(\frac{d_{in}}{dt} \right) - R_m \cdot I_d
\end{aligned} \tag{19}$$

Ou

$$\begin{aligned}
& \sum_{j=1}^{J=MaxJ} [V_{nj} \cdot \cos(\phi_{mj}) - V_{mj} \cdot \cos(\phi_{nj})] \cdot \text{sen}(j \cdot \omega \cdot t) \\
& + \sum_{j=1}^{J=MaxJ} [V_{nj} \cdot \text{sen}(\phi_{mj}) - V_{mj} \cdot \text{sen}(\phi_{nj})] \cdot \cos(j \cdot \omega \cdot t) \\
& = (R_{nm}) \cdot I_n + (L_{nm}) \left(\frac{d_{in}}{dt} \right) - R_m \cdot I_d
\end{aligned} \tag{20}$$

Substituindo (6) e (7) em (20), tem-se:

$$\sum_{j=1}^{J=MaxJ} A_j \cdot \text{sen}(j \cdot \omega \cdot t) + \sum_{j=1}^{J=MaxJ} B_j \cdot \cos(j \cdot \omega \cdot t) = (R_{nm}) \cdot I_n + (L_{nm}) \left(\frac{d_{in}}{dt} \right) - R_m \cdot I_d \tag{21}$$

Para solucionar a equação (21), aplica-se a Transformada de Laplace. Portanto, a mesma é reescrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
& \sum_{j=1}^{J=MaxJ} j \cdot \omega \cdot A_j \left[\frac{\text{sen}(j \cdot \omega \cdot t)}{(j \cdot \omega)} \right] + \sum_{j=1}^{J=MaxJ} B_j \cdot \cos(j \cdot \omega \cdot t) = (R_{nm}) \cdot I_n + (L_{nm}) \left(\frac{d_{in}}{dt} \right) \\
& - R_m \cdot I_d
\end{aligned} \tag{22}$$

Aplicando a Transformada de Laplace, tem-se:

$$I_n(s) = \sum_{j=1}^{J=MaxJ} \frac{B_j}{L_{nm}} \cdot \left[\frac{\left(\left(\frac{j \cdot \omega \cdot A_j}{B_j} \right) + s \right)}{(s^2 + j^2 \cdot \omega) \cdot \left(s + \frac{R_{nm}}{L_{nm}} \right)} + \frac{R_m \cdot I_d}{L_{nm}} \cdot \left(\frac{1}{L_{nm} \cdot s \left(s + \frac{R_{nm}}{L_{nm}} \right)} \right) \right] \tag{23}$$

Substituindo-se as equações (5) e (8) na equação (23), tem-se:

$$In(s) = \sum_{j=1}^{J=MaxJ} \frac{B_j}{L_{nm}} \cdot \left[\frac{(H_j + s)}{(s^2 + J^2 \cdot \omega) \cdot (s + \frac{1}{T_{nm}})} + \frac{R_m \cdot I_d}{L_{nm}} \cdot \left(\frac{1}{s(s + \frac{1}{T_{nm}})} \right) \right] \quad (24)$$

Aplicando a antitransformada de Laplace na equação (24), determina-se a equação (1).
Cuja mesma torna-se compacta através da reorganização dos seus fatores organizando-os em coeficientes (K_1 , K_{2j} , K_{3j} e K_4). Com o intuito de facilitar a interpretação da equação genérica no momento de implementá-la computacionalmente. Na equação (25) a seguir observa-se a expressão analítica obtida de forma compacta e organizada em coeficientes.

$$In(t) = K_1 \cdot e^{\frac{-t}{T_{nm}}} + \sum_{j=1}^{J=MaxJ} K_{2j} \cdot \cos(J \cdot \omega \cdot t) + \sum_{j=1}^{J=MaxJ} K_{3j} \cdot \sin(J \cdot \omega \cdot t) + K_4 \quad (25)$$

Sendo:

$$K_1 = \left(\sum_{j=1}^{J=MaxJ} X_j \right) - Y \quad (26)$$

$$K_{2j} = S_j \cdot \sin(\delta_j) \quad (27)$$

$$K_{3j} = S_j \cdot \cos(\delta_j) \quad (28)$$

$$K_4 = Y + K_{nm} \quad (29)$$

$$X_j = \frac{B_j}{L_{nm}} \cdot \left(\frac{\left(H_j - \frac{1}{T_{nm}} \right)}{(J^2 \cdot \omega^2) + \left(\frac{1}{T_{nm}^2} \right)} \right) \quad (30)$$

$$S_j = \frac{B_j}{J \cdot \omega \cdot L_{nm}} \cdot \sqrt{\left(\frac{(H_j^2 + (J^2 \cdot \omega^2))}{\left((J^2 \cdot \omega^2) + \left(\frac{1}{T_{nm}^2} \right) \right)} \right)} \quad (31)$$

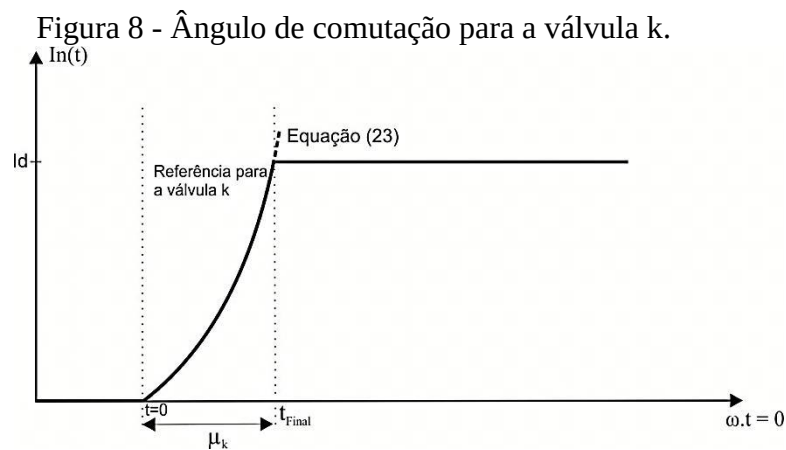
$$Y = \frac{R_m \cdot I_d}{R_n} \quad (32)$$

$$\delta_j = \phi_j + J \cdot \theta_k \quad (33)$$

$$K_{nm} = -(K_1 + \sum_{j=1}^{J=MaxJ} K_{2j}) \quad (34)$$

Para a solução da equação (25) visto que a mesma é transcendental, utilizou-se um método numérico para o cômputo do valor da corrente de comutação. Para a referência do tempo (t) utiliza-se o instante de disparo para a válvula que esta entrando em condução.

Calcula-se o valor da corrente $I_n(t)$ de forma amíúde com incremento de (t) controlado, adotou-se o valor de $0^\circ \leq t \leq 60^\circ$ como tolerância de intervalo de incremento. A solução é obtida quando o valor numérico da corrente $I_n(t)$ for considerada aproximadamente igual a $\pm I_d$, dependendo das fases envolvidas no processo de comutação a ser calculado. O valor de tolerância é de um décimo, ou seja, $\pm 100 \leq I_n(t) \leq \pm 100,10$ para a realização da implementação e cálculo da corrente de comutação através da equação genérica. Conforme ilustrado na Figura 8 a seguir.

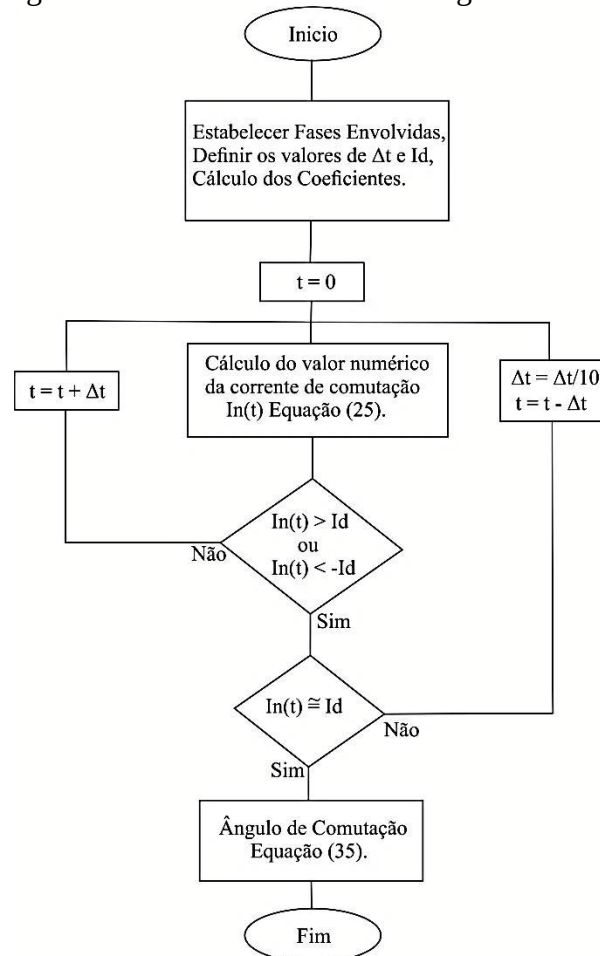


Em destaque na Figura 7 é ilustrado o comportamento da corrente de condução no instante de comutação, para $t = 0$ até $t = t_{\text{final}}$ é equivalente ao tempo de comutação, e o ângulo correspondente é definido como ângulo de comutação. Após a determinação do tempo de comutação através da equação (27), utiliza-se a equação (35) para o cálculo do ângulo de comutação.

$$\mu_k = t \cdot \omega \quad (35)$$

A rotina de cálculo computacional para o instante de comutação pode ser visualizada na Figura 9 a seguir.

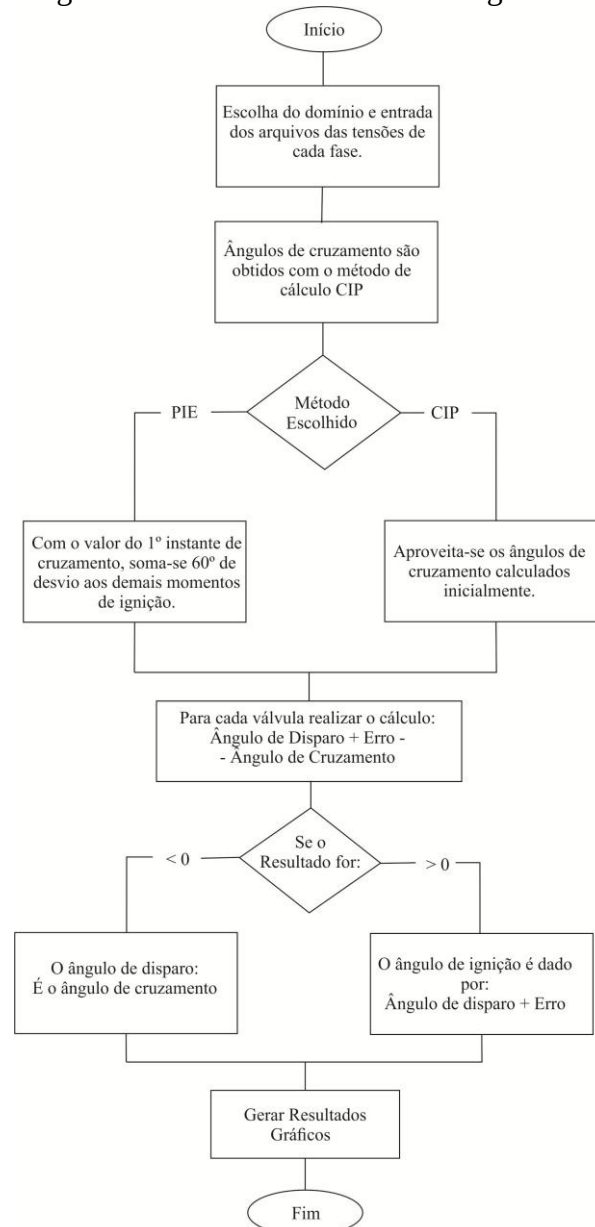
Figura 9 - Fluxograma da rotina de cálculo dos ângulos de comutação



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Neste contexto pode-se visualizar na Figura 10, o fluxograma utilizado para demonstrar a rotina implementada para o cálculo dos ângulos de ignição das válvulas tiristorizadas.

Figura 10 - Fluxograma da rotina de cálculo dos ângulos de ignição



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Ambas as rotinas são utilizadas para o cômputo dos ângulos de comutação e dos ângulos de ignição das válvulas tiristores, cujo estes parâmetros são utilizados para o cálculo dos coeficientes da Série de Fourier e consequentemente calcular os valores fundamentais do conteúdo harmônico de corrente.

2.7 Comentários

Neste capítulo, abordaram-se os conceitos básicos de transmissão HVDC, foi dada uma ênfase no conversor de potência de seis pulsos, que é o objeto de estudo deste trabalho.

Descreveram-se as formas de operação e os métodos de cálculo dos ângulos de ignição das válvulas tiristores com ângulos de disparos definidos no sistema de controle dos conversores.

Apresenta-se uma explanação dos conceitos de tempo de comutação existentes nos conversores de potência, e o método de cálculo das correntes de comutação e consequentemente dos ângulos de comutação.

3 METODOLOGIA DE CÁLCULO DO CONTEÚDO HARMÔNICO DE CORRENTE

Neste capítulo apresenta-se a metodologia utilizada para o cálculo do conteúdo harmônico de corrente, aborda-se a Teoria de Fourier, com ênfase no cálculo e determinação dos coeficientes da série de Fourier, que são utilizadas para o cômputo das componentes harmônicas no sistema. Descreve-se o processo utilizado para a determinação dos períodos de conduções e comutações.

3.1 Harmônicas nos conversores de potência

Os conversores de potência operando como retificador e/ou inversor possui a característica indesejável de gerar conteúdo harmônico de corrente no sistema de alimentação do lado CA (COGO; OLIVEIRA, 1981).

Dado as condições ideais de operação do sistema:

- Tensões de alimentação CA perfeitamente equilibradas e sem distorções harmônicas;
- Resistências Indutivas e Resistivas desprezíveis;
- Erros no circuito de disparo inexistentes;
- Efeitos de saturação dos transformadores desconsiderados;
- Reatância de alisamento (Ld) infinita;
- Ângulos de comutação com valores inferiores a 60°.

Com o sistema operando em condições idealizadas descritas anteriormente, somente as ordens harmônicas características são geradas.

Considerando estas características de operação, o conteúdo harmônico produzido pelos conversores de seis pulsos seguem as relações clássicas, expressas pelas equações (36), (37) e (38) a seguir, este conteúdo harmônico gerado é denominado de harmônicas características.

$$h = p \cdot k \quad (36)$$

$$h = p \cdot k \pm 1 \quad (37)$$

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (38)$$

Sendo:

p – número de pulsos da ponte conversora.

$k - k \in \mathbb{Z}^+$.

h – Ordem harmônica esperada.

I_h – Amplitude do componente harmônico de ordem n .

I_1 – Amplitude da corrente fundamental.

O conteúdo harmônico característico esperado é relacionado ao número de pulsos de um conversor, para o conversor de potência de seis pulsos tal relação pode ser visualizada na Tabela 1.

Tabela 1 - Relação número de pulsos e ordem harmônica

Pulsos	Ordens Harmônicas
Lado CC do Sistema	6, 12, 18, 24, etc.
Lado CA do Sistema	5, 7, 11, 13, 17, 19, etc.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Normalmente os harmônicos característicos produzidos pelos conversores possuem magnitudes reduzidas no sistema, devido aos filtros conectados junto ao barramento dos conversores. Entretanto, para o desenvolvimento deste trabalho considerou-se as condições não idealizadas de operação dos conversores. Para isso, foi desenvolvido o aplicativo computacional para a demonstração da metodologia de cálculo do conteúdo harmônico de corrente em condições não ideais de operação. Portanto, as condições de operação consideradas para o desenvolvimento deste trabalho são:

- Tensões de alimentação desequilibradas;
- Distorções harmônicas nas tensões de alimentação, também desequilibradas;
- Ângulos de Ignição assimétricos;
- Reatâncias de comutação no sistema, podendo estar assimétricas;
- Erros nos sistemas de ignição dos tiristores;
- Assimetrias entre os ângulos de comutação do sistema.

Tais condições acarretam o surgimento de ordens harmônicas de corrente e tensão denominadas de harmônicas não características, como se sabe, é um conteúdo harmônico extra que é injetado no sistema além das harmônicas características existentes. A metodologia para o cálculo deste conteúdo harmônico será descrito no decorrer deste capítulo.

3.1.1 Distribuição Sequencial das Harmônicas

As harmônicas são divididas em sequências de acordo com a sua ordem, sendo estas:

- Sequência Positiva;
- Sequência Negativa;
- Sequência Zero.

As ordens harmônicas múltiplas de três da relação $(3.n)$, para, $n = 1, 2, 3$, representam as harmônicas de sequência zero, isto significa que poderá existir um conteúdo harmônico significativo circulando no neutro, para a conexão Y a quatro fios, no caso da conexão Δ o conteúdo harmônico de sequência zero irá circular em sua malha (DECKMANN, 2013; POMILIO, 2013).

As harmônicas de ordem $(3.n - 1)$, para $n \in \mathbb{Z}^+$. Esta relação resulta em harmônicas de sequência negativa de segunda, quinta, oitava ordem, etc. Os principais efeitos das harmônicas desta ordem são vibrações, perdas adicionais, aquecimento, redução no torque médio (DECKMANN, 2013; POMILIO, 2013).

As harmônicas restantes, de quarta, sétima ordem além da fundamental, da relação $(3.n-2)$, para $n = 1, 2, 3, \dots, n$. Apresentam sequência positiva, se estiverem equilibradas. Por serem múltiplas da fundamental, são responsáveis por provocarem perdas adicionais, vibrações e aquecimentos em equipamentos (DECKMANN, 2013; POMILIO, 2013).

3.1.2 Efeito das distorções harmônicas

A presença de distorções harmônicas no sistema pode acarretar em sérios efeitos no sistema elétrico de potência, tais como:

- Perturbação de correntes ou tensões ressonantes entre os capacitores e indutores;
- Surgimento de vibrações e ruídos;
- Sobreaquecimento de núcleos ferromagnéticos;
- Erros na medição de grandezas elétricas;
- Sobreaquecimento de capacitores;
- Erros de controle em conversores de potência;
- Erros de atuação da proteção;
- Interferência e ruídos eletromagnéticos.

Nota-se que os distúrbios harmônicos podem afetar seriamente a qualidade da energia elétrica e consequentemente causar danos consideráveis em equipamentos acoplados no sistema. A solução para a mitigação do conteúdo harmônico é a instalação de filtros sintonizados e conectados em derivação no alimentador (DECKMANN, 2013; POMILIO, 2013).

3.2 Séries de Fourier

Por definição, seja uma função $f(x) = f(x + 2\pi)$ uma função periódica com intervalos de período T. A série de Fourier de $f(x)$ é composta pela série trigonométrica equação (39) (SANTOS, 2004).

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cdot \cos(h\omega t) + b_h \cdot \sin(h\omega t)] \quad (39)$$

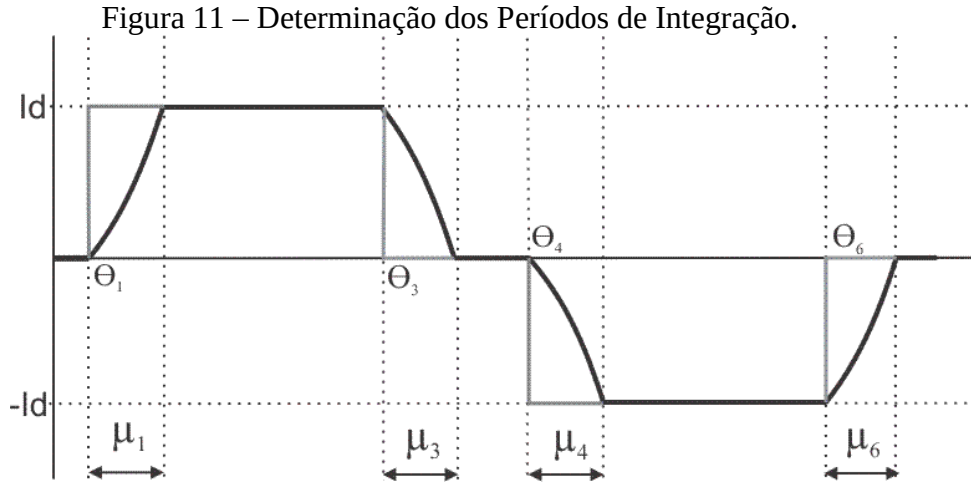
Sendo a_0 , a_n e b_n os coeficientes de Fourier da função $f(x)$. A seguir pode-se visualizar as equações para o cálculo destes coeficientes (SANTOS, 2004).

$$a_0 = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dt \quad (40)$$

$$a_h = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot \cos(h\omega t) dt \quad (41)$$

$$b_h = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot \sin(h\omega t) dt \quad (42)$$

Para o cálculo dos coeficientes da Série de Fourier, em uma função periódica devem-se determinar os instantes de integração da corrente em análise, que são os ângulos de ignição e os ângulos de comutação presentes no sistema conforme ilustrado na Figura 11 a seguir.



Determinados os valores dos ângulos de Ignição e os valores dos ângulos de comutação, aplicam-se tais períodos de integração à Série de Fourires, obtendo as seguintes equações:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{\theta}^{\theta_1+\mu_1} i_{c1}(\theta) d\theta + \int_{\theta_1+\mu_1}^{\theta_3} I_d(\theta) d\theta + \int_{\theta_3}^{\theta_3+\mu_3} i_{c3}(\theta) d\theta + \int_{\theta_4}^{\theta_4+\mu_4} i_{c4}(\theta) d\theta +$$

$$+ \int_{\theta_4+\mu_4}^{\theta_6} (-I_d)(\theta) d\theta + \int_{\theta_6}^{\theta_6+\mu_6} i_{c6}(\theta) d\theta \quad (43)$$

$$a_h = \frac{1}{\pi} \int_{\theta}^{\theta_1+\mu_1} i_{c1} \cdot \cos(h\theta) d\theta + \int_{\theta_1+\mu_1}^{\theta_3} I_d \cdot \cos(h\theta) d\theta + \int_{\theta_3}^{\theta_3+\mu_3} i_{c3} \cdot \cos(h\theta) d\theta$$

$$+ \int_{\theta_4}^{\theta_4+\mu_4} i_{c4} \cdot \cos(h\theta) d\theta + \int_{\theta_4+\mu_4}^{\theta_6} (-I_d) \cos(h\theta) d\theta \quad (44)$$

$$+ \int_{\theta_6}^{\theta_6+\mu_6} i_{c6} \cdot \cos(h\theta) d\theta$$

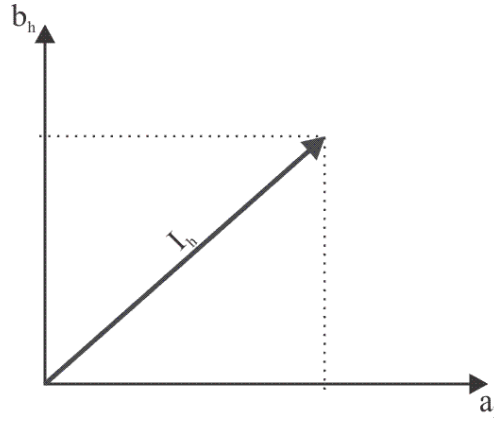
$$b_h = \frac{1}{\pi} \int_{\theta}^{\theta_1+\mu_1} i_{c1} \cdot \sen(h\theta) d\theta + \int_{\theta_1+\mu_1}^{\theta_3} I_d \cdot \sen(h\theta) d\theta + \int_{\theta_3}^{\theta_3+\mu_3} i_{c3} \cdot \sen(h\theta) d\theta$$

$$+ \int_{\theta_4}^{\theta_4+\mu_4} i_{c4} \cdot \sen(h\theta) d\theta + \int_{\theta_4+\mu_4}^{\theta_6} (-I_d) \sen(h\theta) d\theta \quad (45)$$

$$+ \int_{\theta_6}^{\theta_6+\mu_6} i_{c6} \cdot \sen(h\theta) d\theta$$

Para se determinar o valor da corrente fundamental de cada ordem harmônica, calcula-se o módulo dos componentes seno e cosseno da Série de Fourier, conforme ilustrado na Figura 12 a seguir.

Figura 12 - Componentes seno e cosseno dos coeficientes de Fourier



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Obtem-se os valores das correntes de pico para cada ordem harmônica correspondente, através da equação (46).

$$I_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad (46)$$

$$\beta_h = \operatorname{tg}^{-1} \frac{a_h}{b_h} \quad (47)$$

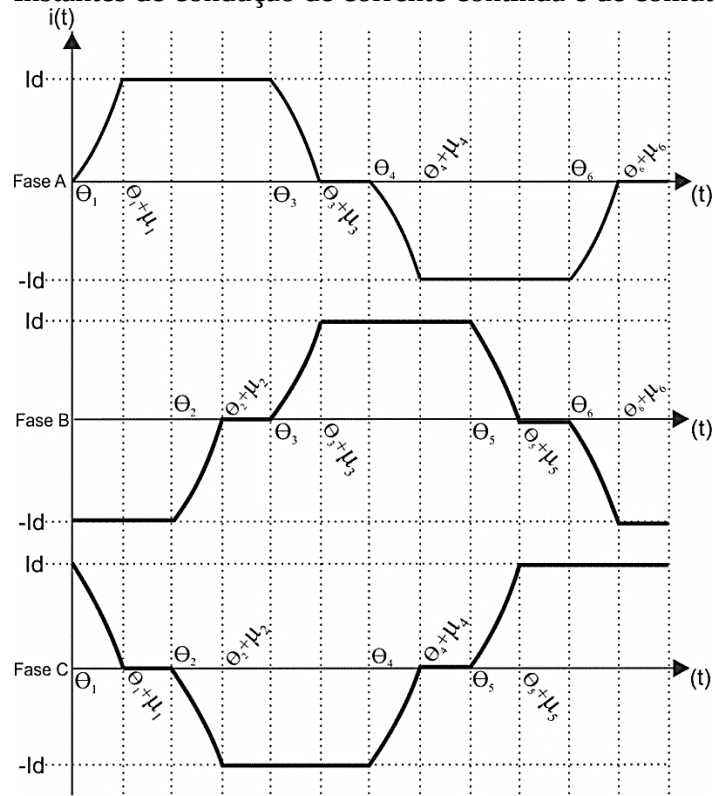
O valor determinado pelo coeficiente a_0 corresponde ao valor médio da corrente.

Para este trabalho, dividiram-se os períodos de contribuição das conduções em partes distintas:

- Contribuição de condução plena, que determinam-se os instantes de integração, os instantes que a corrente I_d esteja conduzindo.
- Contribuição da comutação utiliza-se os instantes de integração do período da condução da corrente de comutação I_{ck}

De acordo com os instantes de condução de corrente contínua e de comutação em um sistema trifásico periódico conforme ilustrado na Figura 13, é possível identificar cada período de integração e seus respectivos instantes de contribuição.

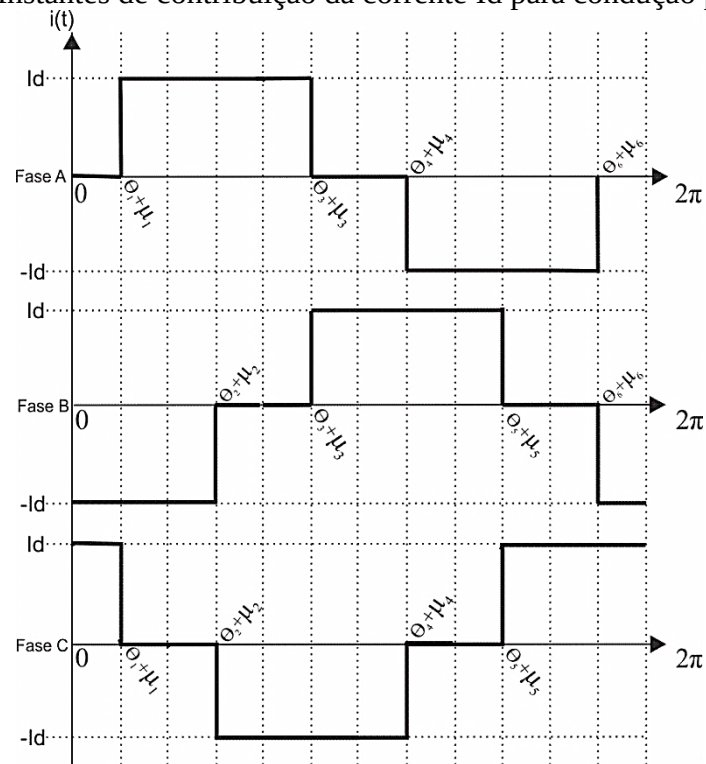
Figura 13 - Instantes de condução de corrente contínua e de comutação



Fonte: Elaboração do próprio autor

Desta forma, identificam-se os períodos de contribuição da corrente I_d , para os instantes de condução plena conforme ilustrado na Figura 14 a seguir.

Figura 14- Instantes de contribuição da corrente I_d para condução plena



Fonte: Elaboração do próprio autor

Através da determinação dos períodos de integração no instante de condução plena, utiliza-se a matriz de contribuição ilustrada na Tabela 2, para a identificação dos instantes de integração para que o cômputo dos coeficientes de Fourier seja realizado simultaneamente (OLIVEIRA, 1983).

Tabela 2 - Tabela de contribuição para o período de condução

Ângulo Inicial	Ângulo Final	Ia	Ib	Ic	Função
0	$\theta_1+\mu_1$	0	-1	1	I_d
$\theta_1+\mu_1$	$\theta_2+\mu_2$	1	-1	0	I_d
$\theta_2+\mu_2$	$\theta_3+\mu_3$	1	0	-1	I_d
$\theta_3+\mu_3$	$\theta_4+\mu_4$	0	1	-1	I_d
$\theta_4+\mu_4$	$\theta_5+\mu_5$	-1	1	0	I_d
$\theta_5+\mu_5$	$\theta_6+\mu_6$	-1	0	1	I_d
$\theta_6+\mu_6$	2π	0	-1	1	I_d

Fonte: Elaboração do próprio autor.

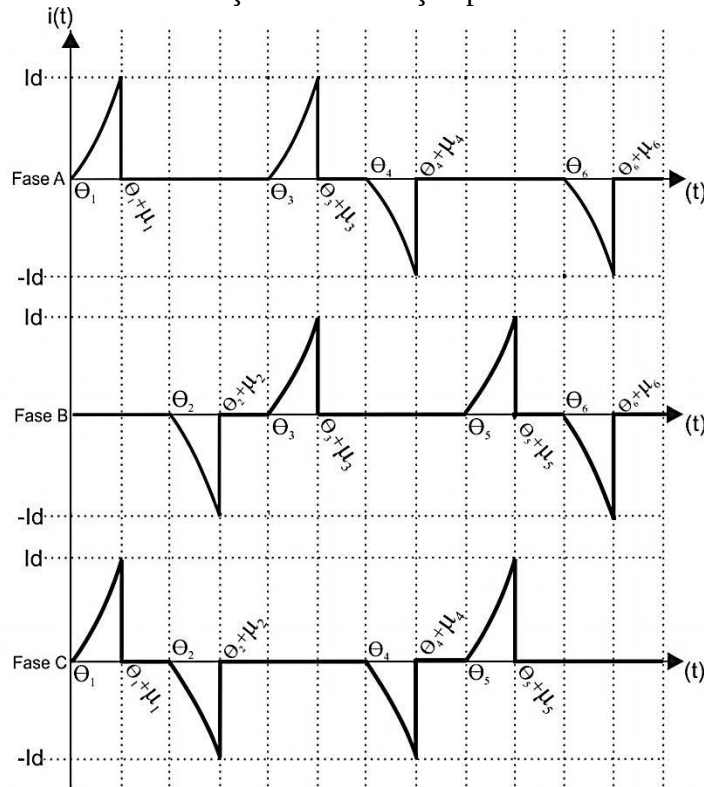
De acordo com os dados da matriz de integração, pode-se efetuar o cálculo dos Coeficientes de Fourier para o período de condução plena de cada fase. Considerando somente os intervalos de condução da corrente I_d , conforme ilustrado nas equações a seguir utilizadas para o cálculo dos coeficientes de Fourier para a “Fase A” da Figura 14 ilustrada anteriormente.

$$a_h = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\theta_1+\mu_1}^{\theta_3+\mu_3} I_d \cdot \cos(h\theta) d\theta + \int_{\theta_4+\mu_4}^{\theta_6+\mu_6} (-I_d) \cos(h\theta) d\theta \right] \quad (48)$$

$$b_h = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\theta_1+\mu_1}^{\theta_3+\mu_3} I_d \cdot \cos(h\theta) d\theta + \int_{\theta_4+\mu_4}^{\theta_6+\mu_6} (-I_d) \cos(h\theta) d\theta \right] \quad (49)$$

Após a determinação dos coeficientes de Fourier para os instantes de contribuição da corrente I_d em condução plena, identificam-se os instantes de contribuição das comutações, conforme ilustrado na Figura 15 a seguir.

Figura 15 - Instantes de contribuição da comutação para as correntes I_{ck}



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Desta forma, é possível identificar os períodos de contribuição da corrente de comutação i_{ck} , conforme ilustrada na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 - Tabela de contribuição para o período de comutação

Ângulo Inicial	Ângulo Final	Ia	Ib	Ic	Função
θ_1	$\theta_1+\mu_1$	1	0	1	I_{ck}
θ_2	$\theta_2+\mu_2$	0	-1	-1	I_{ck}
θ_3	$\theta_3+\mu_3$	1	1	0	I_{ck}
θ_4	$\theta_4+\mu_4$	-1	0	-1	I_{ck}
θ_5	$\theta_5+\mu_5$	0	1	1	I_{ck}
θ_6	$\theta_6+\mu_6$	-1	-1	0	I_{ck}

Fonte: Elaboração do próprio autor

O passo seguinte é realizar o cálculo dos Coeficientes de Fourier para as contribuições de comutação. Para este caso, adotam-se os coeficientes da equação (25) para substituir os valores de $f(x)$ para o cálculo dos Coeficientes de Fourier. Desta forma, os mesmos podem ser calculados genericamente pelas expressões a seguir.

$$a_{0c} = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx \quad (50)$$

$$a_{hc} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot \cos(hx) dx \quad (51)$$

$$b_{hc} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot \sin(hx) dx \quad (52)$$

Componente Contínua:

$$a_{0c} = a_{0c1} + \sum_{h=1}^{h=Maxh} a_{0c2j} + a_{0c3} \quad (53)$$

Sendo:

$$a_{0c1} = \left[-K_1 \cdot T_{nm} \cdot e^{\frac{-(\theta)}{\omega \cdot T_{nm}}} \right] \frac{\theta f}{\theta i} \quad (54)$$

$$a_{0c2j} = \left[K_{3j} \cdot \frac{-\cos(h\theta)}{h\omega} \right] \frac{\theta f}{\theta i} + \left[K_{2j} \cdot \frac{\sin(h\theta)}{h\omega} \right] \frac{\theta f}{\theta i} \quad (55)$$

$$a_{0c3} = \left[\frac{K_4 \cdot \theta}{\omega} \right] \frac{\theta f}{\theta i} \quad (56)$$

Expressões para a determinação do componente cosseno de Fourier:

$$a_{hc} = a_{hc1} + \sum_{h=1}^{h=Maxh} a_{hc2j} + a_{hc3} \quad (57)$$

$$a_{hc1} = \left[K_1 \cdot \frac{\frac{-\theta}{e^{\omega \cdot T_{nm}}}}{\omega \cdot T_{nm}} \cdot h\omega \cdot \frac{1}{h^2 \cdot \omega^2 + \frac{1}{T_{nm}}} \cdot \text{sen}(h\theta) - \frac{1}{T_{nm}} \cdot \text{cos}(h\theta) \right] \frac{\theta f}{\theta i} \quad (58)$$

$$a_{hc2j} = K_{3j} \cdot \left[-\frac{1}{2} \cdot \frac{\text{cos}(J\theta + h\theta)}{(J\omega + h\omega)} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\text{cos}(J\theta - h\theta)}{(J\omega - h\omega)} \right] \frac{\theta f}{\theta i} \quad (59)$$

$$+ K_{2j} \cdot \left[-\frac{1}{2} \cdot \frac{\text{sen}(J\theta + h\theta)}{(J\omega + h\omega)} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\text{sen}(J\theta - h\theta)}{(J\omega - h\omega)} \right] \frac{\theta f}{\theta i}$$

Para $h \neq J$, tem-se:

$$a_{hc2j} = K_{3j} \left[\frac{-\text{cos}(2h\theta)}{(4h\omega)} \right] \frac{\theta f}{\theta i} + K_{2j} \cdot \left[\frac{\theta}{2\omega} + \frac{\text{sen}(2h\theta)}{(4h\omega)} \right] \frac{\theta f}{\theta i} \quad (60)$$

Para $h = J$, tem-se:

$$a_{hc3} = K_4 \left[\frac{\text{sen}(h\theta)}{(h\omega)} \right] \frac{\theta f}{\theta i} \quad (61)$$

Expressões para a determinação do componente seno de Fourier:

$$b_{hc} = b_{hc1} + \sum_{h=1}^{h=Maxh} b_{hc2j} + b_{hc3} \quad (62)$$

$$b_{hc1} = \left[K_1 \cdot \frac{\frac{-\theta}{e^{\omega \cdot T_{nm}}}}{\omega \cdot T_{nm}} \cdot h\omega \cdot \frac{1}{h^2 \cdot \omega^2 + \frac{1}{T_{nm}}} \cdot \text{cos}(h\theta) - \frac{1}{T_{nm}} \cdot \text{sen}(h\theta) \right] \frac{\theta f}{\theta i} \quad (63)$$

$$b_{hc2j} = K_{3j} \cdot \left[-\frac{1}{2} \cdot \frac{\text{sen}(J\theta + h\theta)}{(J\omega + h\omega)} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\text{sen}(J\theta - h\theta)}{(J\omega - h\omega)} \right] \frac{\theta f}{\theta i} \quad (64)$$

$$+ K_{2j} \cdot \left[-\frac{1}{2} \cdot \frac{\text{cos}(J\theta + h\theta)}{(J\omega + h\omega)} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\text{cos}(J\theta - h\theta)}{(J\omega - h\omega)} \right] \frac{\theta f}{\theta i}$$

Para $h \neq J$, tem-se:

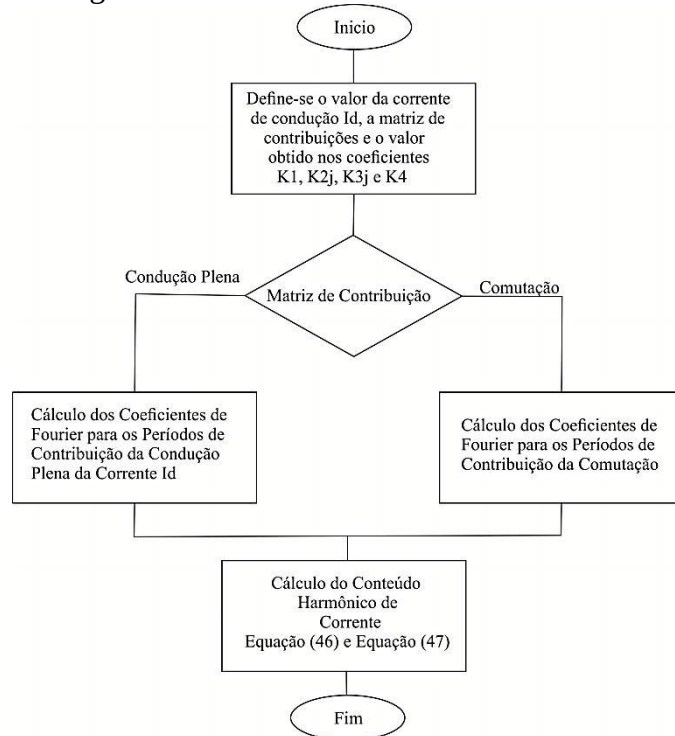
$$b_{hc2j} = K_{3j} \left[\frac{-\text{sen}(2h\theta)}{(4h\omega)} \right] \frac{\theta f}{\theta i} + K_{2j} \cdot \left[\frac{\theta}{2\omega} + \frac{\text{cos}(2h\theta)}{(4h\omega)} \right] \frac{\theta f}{\theta i} \quad (65)$$

Para $h = J$, tem-se:

$$b_{hc3} = K_4 \left[\frac{\cos(h\theta)}{(h\omega)} \right] \theta f \quad (66)$$

Na Figura 16, ilustra-se o fluxograma utilizado para demonstrar a rotina implementada para o cálculo do conteúdo harmônico de corrente.

Figura 16 - Fluxograma da rotina de cálculo do conteúdo harmônico



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Tabela 4 são apresentadas de maneira concisa as expressões utilizadas para o cômputo dos coeficientes K_1 , K_{2j} , K_{3j} e K_4 da equação (1).

Tabela 4 - Coeficientes

Coeficientes	K_1	K_{2j}	K_{3j}	K_4
Contribuição da Comutação	$\sum_{j=1}^{J=MaxJ} X_j - Y$	$S_j \cdot \text{sen}(\delta_j)$	$S_j \cdot \text{cos}(\delta_j)$	$Y + K_{nm}$
Contribuição da Condução Plena	0	0	0	I_d

Fonte: Elaboração do próprio autor

Para a contribuição da condução plena o coeficiente K_4 é adotado como sendo o próprio valor da corrente I_d , pois para este instante a função de integração é considerada como sendo o valor da corrente de condução plena.

Ao determinar os valores dos conteúdos harmônicos para as contribuições da condução plena e para as contribuições da comutação, somam-se os resultados obtidos para as correntes harmônicas para ambas as contribuições, resultando no conteúdo harmônico de corrente injetado no lado CA dos conversores.

3.3 Comentários

Neste capítulo apresentou-se a metodologia utilizada para a determinação do conteúdo harmônico de corrente. Abordou-se o processo de cálculo dos coeficientes de Fourier necessários para a determinação das correntes harmônicas e as matrizes de contribuição de cada período de condução existente em um ciclo de onda da corrente contínua.

4 TESTES E RESULTADOS

Apresentam-se a seguir os testes realizados para condições particulares de operação do sistema, conforme serão mostrados nos resultados obtidos a seguir. Entre várias simulações realizadas, foram selecionadas as que apresentaram resultados mais significativos.

Para as simulações considerou-se:

- Corrente $I_d = 200$ A;
- Conversor de seis pulsos;
- Indutância de alisamento $L_d \rightarrow \infty$;
- Condições de operação particulares para cada simulação.

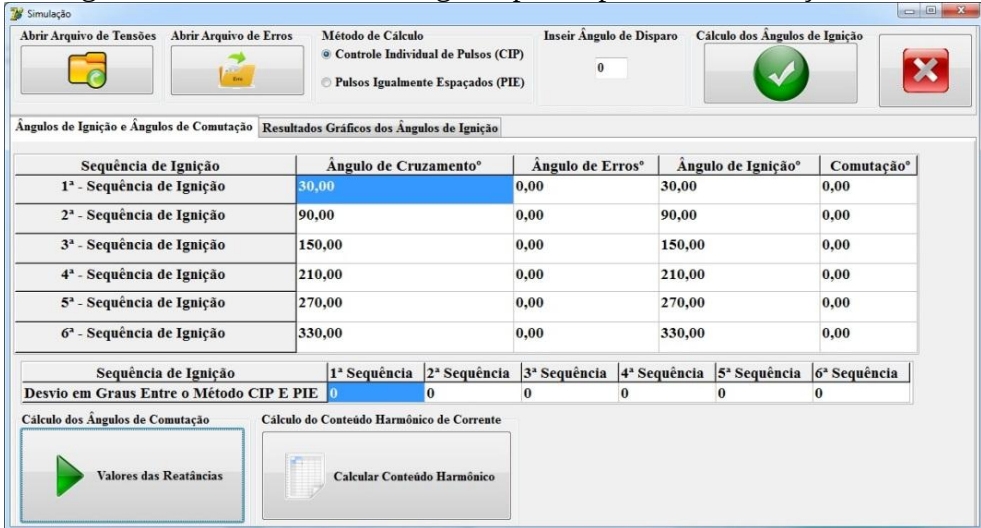
4.1 Primeira Simulação

Para esta simulação considerou-se as seguintes condições de operação:

- Tensões de alimentação equilibradas e sem distorções harmônicas;
- Reatâncias e Resistencia nas fases para a comutação nulas;
- Ângulos de atraso ($\alpha = 0$);
- Sistema de produção de pulsos CIP.

De acordo com estas condições foram obtidos os seguintes resultados para os ângulos de ignição e comutação, conforme ilustrado na Figura 17 a seguir.

Figura 17 - Resultados dos ângulos para a primeira simulação



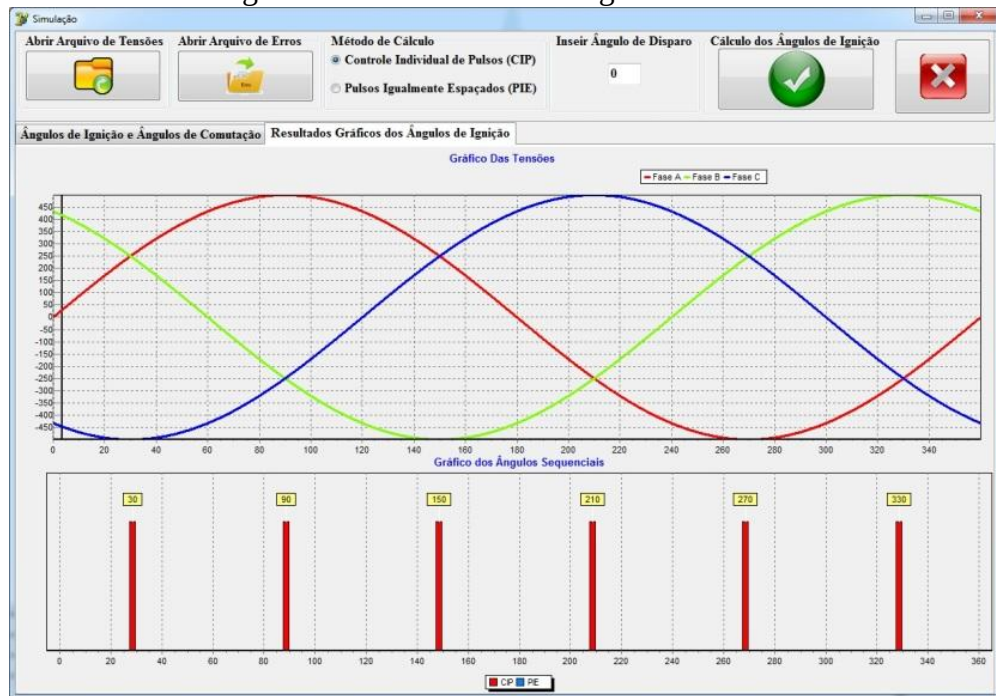
Sequência de Ignição	Ângulo de Cruzamento°	Ângulo de Erros°	Ângulo de Ignição°	Comutação°
1ª - Sequência de Ignição	30,00	0,00	30,00	0,00
2ª - Sequência de Ignição	90,00	0,00	90,00	0,00
3ª - Sequência de Ignição	150,00	0,00	150,00	0,00
4ª - Sequência de Ignição	210,00	0,00	210,00	0,00
5ª - Sequência de Ignição	270,00	0,00	270,00	0,00
6ª - Sequência de Ignição	330,00	0,00	330,00	0,00

Sequência de Ignição	1ª Sequência	2ª Sequência	3ª Sequência	4ª Sequência	5ª Sequência	6ª Sequência
Desvio em Graus Entre o Método CIP E PIE	0	0	0	0	0	0

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados para o ângulo de ignição pode ser visualizado de forma gráfica a seguir na Figura 18.

Figura 18- Tela de resultados gráficos



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 19 a seguir, visualiza-se os resultados obtidos para o conteúdo harmônico calculado.

Figura 19 - Tela de resultados do cálculo do conteúdo harmônico da primeira simulação

Fase A				Fase B				Fase C			
Ordem Harm.	Ia(A)	Ângulo°	% da Funda.	Ordem Harm.	Ib(A)	Ângulo°	% da Funda.	Ordem Harm.	Ic(A)	Ângulo°	% da Funda.
1	220,53	0,00	100,00	1	220,53	120,00	100,00	1	220,53	-120,00	100,00
2	0,00	0,00	0,00	2	0,00	0,00	0,00	2	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	3	0,00	0,00	0,00	3	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	4	0,00	0,00	0,00	4	0,00	0,00	0,00
5	44,11	-31,22	20,00	5	44,11	87,86	20,00	5	44,11	-88,06	20,00
6	0,00	0,00	0,00	6	0,00	0,00	0,00	6	0,00	0,00	0,00
7	31,50	-174,81	14,29	7	31,50	-88,09	14,29	7	31,50	87,82	14,29
8	0,00	0,00	0,00	8	0,00	0,00	0,00	8	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	9	0,00	0,00	0,00	9	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	10	0,00	0,00	0,00	10	0,00	0,00	0,00
11	20,05	74,53	9,09	11	20,05	87,75	9,09	11	20,05	-88,17	9,09
12	0,00	0,00	0,00	12	0,00	0,00	0,00	12	0,00	0,00	0,00
13	16,96	56,06	7,69	13	16,96	-88,21	7,69	13	16,96	87,71	7,69
14	0,00	0,00	0,00	14	0,00	0,00	0,00	14	0,00	0,00	0,00
15	0,00	0,00	0,00	15	0,00	0,00	0,00	15	0,00	0,00	0,00
16	0,00	0,00	0,00	16	0,00	0,00	0,00	16	0,00	0,00	0,00
17	12,97	-32,56	5,88	17	12,97	87,63	5,88	17	12,97	-88,29	5,88
18	0,00	0,00	0,00	18	0,00	0,00	0,00	18	0,00	0,00	0,00
19	11,61	-81,57	5,26	19	11,61	-88,33	5,26	19	11,61	87,59	5,26
20	0,00	0,00	0,00	20	0,00	0,00	0,00	20	0,00	0,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00	21	0,00	0,00	0,00	21	0,00	0,00	0,00
22	0,00	0,00	0,00	22	0,00	0,00	0,00	22	0,00	0,00	0,00
23	9,59	9,49	4,35	23	9,59	87,52	4,35	23	9,59	-88,41	4,35
24	0,00	0,00	0,00	24	0,00	0,00	0,00	24	0,00	0,00	0,00
25	8,82	130,20	4,00	25	8,82	-88,44	4,00	25	8,82	87,48	4,00

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para esta simulação, de acordo com as condições impostas, os pulsos de ignição das válvulas estão igualmente espaçados a 60°. E com as condições de operação idealizadas. Portanto são gerados apenas o conteúdo harmônico característico correspondente a um conversor de seis pulsos.

4.2 Segunda Simulação

Para esta simulação, foram adotadas as seguintes condições de funcionamento:

- Tensões de alimentação equilibradas e sem distorções harmônicas;
- Presença de reatâncias de alimentação de comutação por fase e equilibradas;
- Ângulos de atraso ($\alpha = 10^\circ$)
- Sistema de produção de pulsos CIP

Os resultados obtidos para os ângulos de ignição para esta simulação foram modificados devido à presença do ângulo de disparo na simulação, para este caso foi considerado a presença de reatâncias de comutação, portanto, o tempo de troca de condução entre uma válvula e outra é processada em um tempo finito, como discutido anteriormente. Na

Figura 20 a seguir pode-se visualizar dos ângulos de ignição e comutação obtidos para esta simulação.

Figura 20 - Resultados dos ângulos de ignição e comutação

Simulação

Abrir Arquivo de Tensões Abrir Arquivo de Erros Método de Cálculo: ☒ Controle Individual de Pulsos (CIP) ☐ Pulsos Igualmente Espaçados (PIE) Inserir Ângulo de Disparo: 10 Cálculo dos Ângulos de Ignição:

Ângulos de Ignição e Ângulos de Comutação Resultados Gráficos dos Ângulos de Ignição

Sequência de Ignição	Ângulo de Cruzamento°	Ângulo de Erros°	Ângulo de Ignição°	Comutação°
1ª - Sequência de Ignição	30,00	0,00	40,00	12,87
2ª - Sequência de Ignição	90,00	0,00	100,00	12,87
3ª - Sequência de Ignição	150,00	0,00	160,00	12,87
4ª - Sequência de Ignição	210,00	0,00	220,00	12,87
5ª - Sequência de Ignição	270,00	0,00	280,00	12,87
6ª - Sequência de Ignição	330,00	0,00	340,00	12,87

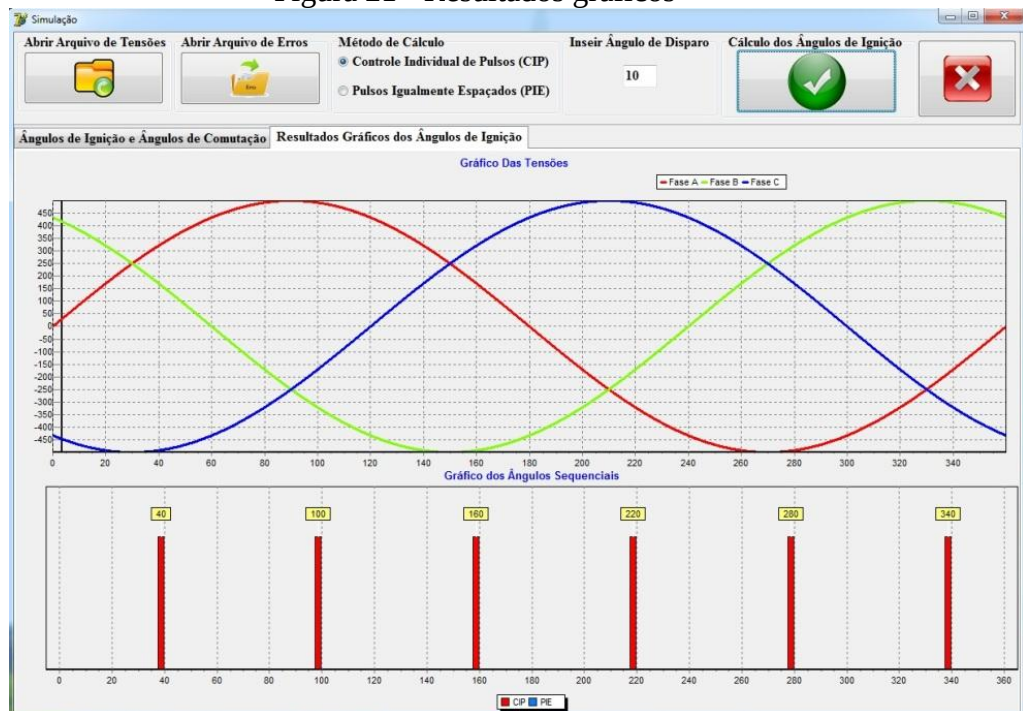
Sequência de Ignição	1ª Sequência	2ª Sequência	3ª Sequência	4ª Sequência	5ª Sequência	6ª Sequência
Desvio em Graus Entre o Método CIP E PIE	0	0	0	0	0	0

Cálculo dos Ângulos de Comutação: Valores das Reatâncias Cálculo do Conteúdo Harmônico de Corrente: Calcular Conteúdo Harmônico

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados para o ângulo de ignição pode ser visualizado de forma gráfica a seguir na Figura 21.

Figura 21 - Resultados gráficos



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A seguir na Figura 22 pode-se visualizar o resultado do conteúdo harmônico calculado.

Figura 22 - Resultados do conteúdo harmônico calculado na segunda simulação

Fase A				Fase B				Fase C			
Ordem Harm.	Ia(A)	Ângulo°	% da Funda.	Ordem Harm.	Ib(A)	Ângulo°	% da Funda.	Ordem Harm.	Ic(A)	Ângulo°	% da Funda.
1	220,38	0,00	100,00	1	220,38	120,00	100,00	1	220,38	-120,00	100,00
2	0,00	0,00	0,00	2	0,00	0,00	0,00	2	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	3	0,00	0,00	0,00	3	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	4	0,00	0,00	0,00	4	0,00	0,00	0,00
5	43,30	41,30	19,65	5	43,30	-186,67	19,65	5	43,30	-32,81	19,65
6	0,00	0,00	0,00	6	0,00	0,00	0,00	6	0,00	0,00	0,00
7	30,05	35,42	13,64	7	30,05	-125,28	13,64	7	30,05	61,80	13,64
8	0,00	0,00	0,00	8	0,00	0,00	0,00	8	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	9	0,00	0,00	0,00	9	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	10	0,00	0,00	0,00	10	0,00	0,00	0,00
11	19,04	123,25	8,64	11	19,04	-62,81	8,64	11	18,96	-79,21	8,60
12	0,00	0,00	0,00	12	0,00	0,00	0,00	12	0,00	0,00	0,00
13	15,83	25,66	7,18	13	15,83	-42,17	7,18	13	15,83	182,96	7,18
14	0,00	0,00	0,00	14	0,00	0,00	0,00	14	0,00	0,00	0,00
15	0,00	0,00	0,00	15	0,00	0,00	0,00	15	0,00	0,00	0,00
16	0,00	0,00	0,00	16	0,00	0,00	0,00	16	0,00	0,00	0,00
17	11,95	143,03	5,42	17	11,95	-3,82	5,42	17	11,95	-27,33	5,42
18	0,00	0,00	0,00	18	0,00	0,00	0,00	18	0,00	0,00	0,00
19	10,09	1,83	4,58	19	10,09	23,78	4,58	19	10,09	143,03	4,58
20	0,00	0,00	0,00	20	0,00	0,00	0,00	20	0,00	0,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00	21	0,00	0,00	0,00	21	0,00	0,00	0,00
22	0,00	0,00	0,00	22	0,00	0,00	0,00	22	0,00	0,00	0,00
23	8,37	-190,52	3,80	23	8,37	-40,46	3,80	23	8,37	40,44	3,80
24	0,00	0,00	0,00	24	0,00	0,00	0,00	24	0,00	0,00	0,00
25	7,62	60,79	3,46	25	7,62	11,35	3,46	25	7,62	-127,34	3,46

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se na figura anterior, que houve uma pequena mitigação no conteúdo harmônico obtido, este fato é devido à comutação estabelecida durante alguns instantes que contribui para que a forma de onda tenha a característica senoidal pura.

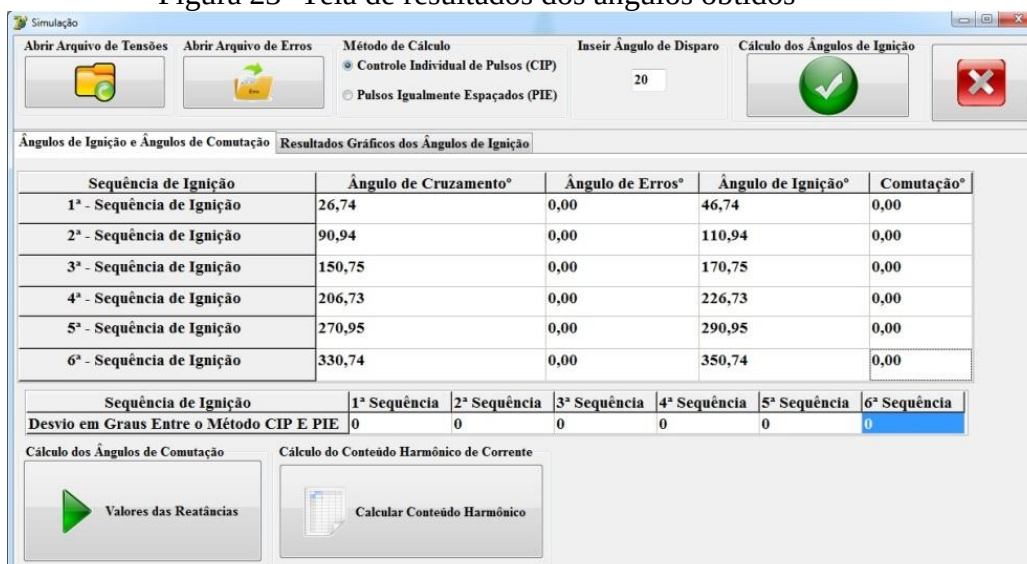
4.3 Terceira Simulação

Para esta simulação considerou-se as seguintes condições de operação para o sistema:

- Tensões de alimentação desequilibradas e ausência de distorções harmônicas;
- Reatâncias de comutação nulas;
- Ângulos de atraso ($\alpha = 20^\circ$);
- Sistema de produção de pulsos CIP e PIE.

Os resultados obtidos para os ângulos de ignição para este caso, não estabelece uma sequência simétrica, devido ao desequilíbrio das tensões de entrada resultando em ângulos de cruzamento de fases não igualmente espaçados. Na Figura 23 a seguir ilustra-se os resultados obtidos para esta simulação.

Figura 23- Tela de resultados dos ângulos obtidos



Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com os dados obtidos anteriormente, na Figura 24 ilustram-se os resultados obtidos para o conteúdo harmônico de corrente.

Figura 24 - Resultado do conteúdo calculado para a terceira simulação

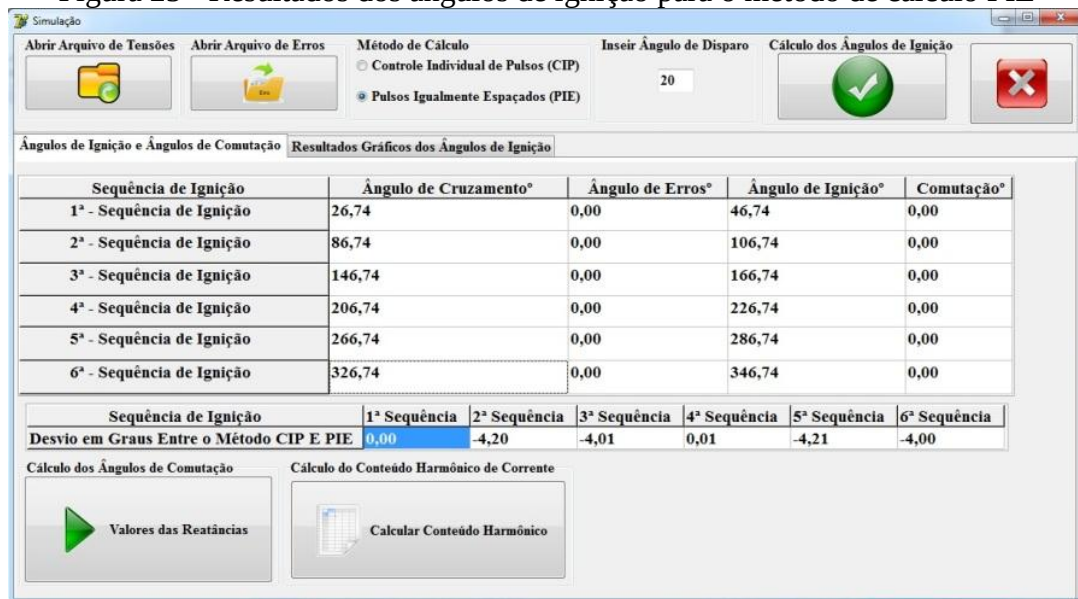
Fase A				Fase B				Fase C			
Ordem Harm.	Ia(A)	Ângulo°	% da Funda.	Ordem Harm.	Ic(A)	Ângulo°	% da Funda.	Ordem Harm.	Ib(A)	Ângulo°	% da Funda.
1	224,85	0,00	100,00	1	220,75	125,00	100,00	1	215,71	237,00	100,00
2	0,00	0,00	0,00	2	0,00	0,00	0,00	2	0,00	0,00	0,00
3	8,89	-72,53	3,95	3	0,45	0,00	0,20	3	9,33	-73,67	4,32
4	0,00	0,00	0,00	4	0,00	0,00	0,00	4	0,00	0,00	0,00
5	39,01	143,03	17,35	5	43,88	134,93	19,88	5	48,01	-5,79	22,26
6	0,00	0,00	0,00	6	0,00	0,00	0,00	6	0,00	0,00	0,00
7	34,97	47,77	15,55	7	31,72	143,03	14,37	7	25,85	1,56	11,98
8	0,00	0,00	0,00	8	0,00	0,00	0,00	8	0,00	0,00	0,00
9	8,76	-17,31	3,89	9	0,45	-23,58	0,20	9	9,18	-52,13	4,25
10	0,00	0,00	0,00	10	0,00	0,00	0,00	10	0,00	0,00	0,00
11	14,24	28,54	6,33	11	19,82	156,62	8,98	11	22,98	0,77	10,65
12	0,00	0,00	0,00	12	0,00	0,00	0,00	12	0,00	0,00	0,00
13	19,54	-106,23	8,69	13	17,18	5,29	7,78	13	10,57	68,06	4,90
14	0,00	0,00	0,00	14	0,00	0,00	0,00	14	0,00	0,00	0,00
15	8,50	286,35	3,78	15	0,44	43,32	0,20	15	8,88	250,49	4,12
16	0,00	0,00	0,00	16	0,00	0,00	0,00	16	0,00	0,00	0,00
17	6,55	26,56	2,92	17	12,74	-65,91	5,77	17	14,90	-334,17	6,91
18	0,00	0,00	0,00	18	0,00	0,00	0,00	18	0,00	0,00	0,00
19	13,27	-50,51	5,90	19	11,82	-46,97	5,36	19	4,59	-79,65	2,13
20	0,00	0,00	0,00	20	0,00	0,00	0,00	20	0,00	0,00	0,00
21	8,12	-3,90	3,61	21	0,00	0,00	0,00	21	8,45	-10,50	3,92
22	0,00	0,00	0,00	22	0,00	0,00	0,00	22	0,00	0,00	0,00
23	2,67	-161,04	1,19	23	9,36	9,40	4,24	23	10,51	-33,20	4,87
24	0,00	0,00	0,00	24	0,00	0,00	0,00	24	0,00	0,00	0,00
25	9,57	163,59	4,25	25	9,04	285,70	4,09	25	1,32	143,03	0,61

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se que o conteúdo harmônico calculado para este caso, é devido ao desequilíbrio das tensões de alimentação, já que a troca de condução entre as válvulas tiristorizadas é instantânea. Cujo conteúdo harmônico adicional é gerado devido ao período de condução ser diferente de 120° .

Utilizando os mesmos dados desta simulação, porém com o método de cálculo de pulsos igualmente espaçados, onde os resultados são ilustrados na Figura 24, a seguir pode-se visualizar na Figura 27 os resultados obtidos para o conteúdo harmônico.

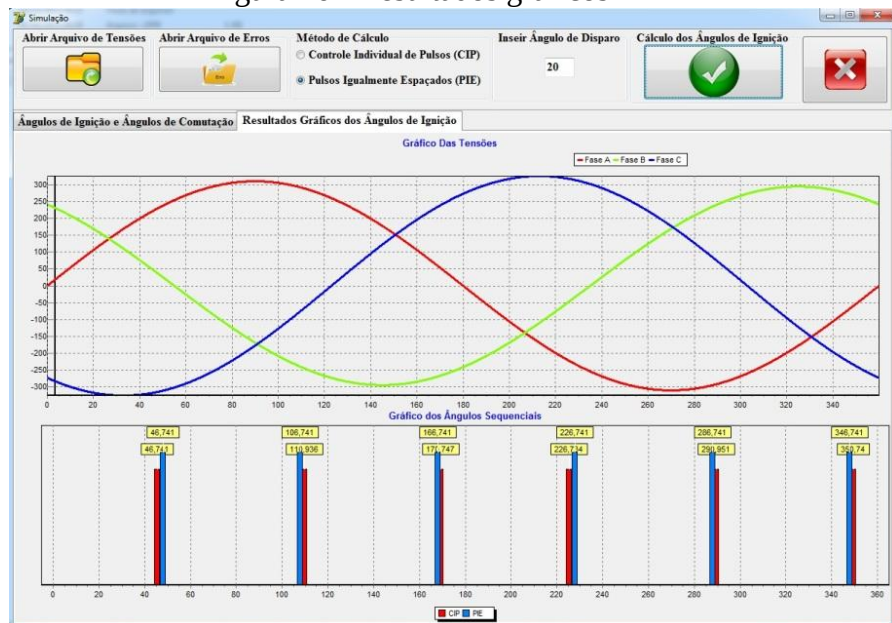
Figura 25 - Resultados dos ângulos de ignição para o método de cálculo PIE



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 26 a seguir, pode-se observar o resultado gráfico obtido para a simulação, ilustrado na figura anterior.

Figura 26 - Resultados gráficos



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados do conteúdo harmônico calculado pode ser visualizado na Figura 27 a seguir.

Figura 27 - Tela de resultados do conteúdo harmônico obtido através do método de calculo PIE

Fase A				Fase B				Fase C			
Ordem Harm.	Ia(A)	Ângulo°	% da Funda.	Ordem Harm.	Ic(A)	Ângulo°	% da Funda.	Ordem Harm.	Ib(A)	Ângulo°	% da Funda.
1	220,53	0,00	100,00	1	220,53	125,00	100,00	1	220,53	237,00	100,00
2	0,00	0,00	0,00	2	0,00	0,00	0,00	2	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	3	0,00	0,00	0,00	3	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	4	0,00	0,00	0,00	4	0,00	0,00	0,00
5	44,11	143,03	20,00	5	44,11	12,10	20,00	5	44,11	48,70	20,00
6	0,00	0,00	0,00	6	0,00	0,00	0,00	6	0,00	0,00	0,00
7	31,50	101,41	14,29	7	31,50	-76,31	14,29	7	31,50	-8,42	14,29
8	0,00	0,00	0,00	8	0,00	0,00	0,00	8	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	9	0,00	0,00	0,00	9	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	10	0,00	0,00	0,00	10	0,00	0,00	0,00
11	20,05	-32,05	9,09	11	20,05	-109,13	9,09	11	20,05	70,92	9,09
12	0,00	0,00	0,00	12	0,00	0,00	0,00	12	0,00	0,00	0,00
13	16,96	-16,25	7,69	13	16,96	-67,36	7,69	13	16,96	143,03	7,69
14	0,00	0,00	0,00	14	0,00	0,00	0,00	14	0,00	0,00	0,00
15	0,00	0,00	0,00	15	0,00	0,00	0,00	15	0,00	0,00	0,00
16	0,00	0,00	0,00	16	0,00	0,00	0,00	16	0,00	0,00	0,00
17	12,97	213,87	5,88	17	12,97	103,45	5,88	17	12,97	-35,85	5,88
18	0,00	0,00	0,00	18	0,00	0,00	0,00	18	0,00	0,00	0,00
19	11,61	27,96	5,26	19	11,61	-269,25	5,26	19	11,61	143,03	5,26
20	0,00	0,00	0,00	20	0,00	0,00	0,00	20	0,00	0,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00	21	0,00	0,00	0,00	21	0,00	0,00	0,00
22	0,00	0,00	0,00	22	0,00	0,00	0,00	22	0,00	0,00	0,00
23	9,59	35,94	4,35	23	9,59	143,03	4,35	23	9,59	7,80	4,35
24	0,00	0,00	0,00	24	0,00	0,00	0,00	24	0,00	0,00	0,00
25	8,82	-82,03	4,00	25	8,82	40,14	4,00	25	8,82	94,32	4,00

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Com a substituição do sistema de produção de pulsos de CIP para PIE. Nestas condições os instantes de ignição são igualmente espaçados em 120° para os blocos das correntes de linha, consequentemente nos blocos o conteúdo harmônico gerado é idêntico ao conteúdo harmônico obtido na Figura 22.

4.4 Quarta Simulação

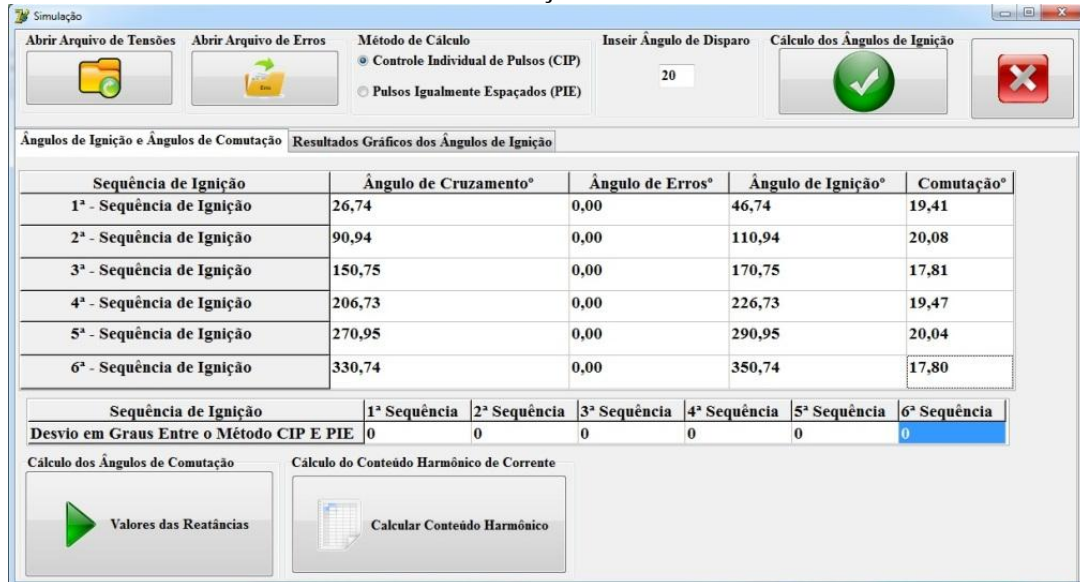
Foram consideradas para esta simulação as condições de operação descritas a seguir:

- Tensões de alimentação desequilibradas e livres de distorções harmônicas (as mesmas adotadas para a simulação anterior);
- Reatâncias de comutação diferentes de zero;
- Ângulo de atraso ($\alpha = 20^\circ$);
- Sistema de produção CIP e PIE.

Na Figura 28 a seguir observam-se os resultados obtidos para os ângulos de ignição e comutação para o método de cálculo de controle individual de pulsos. Nota-se que o resultado

obtido possui as mesmas características da terceira simulação. Porém com uma pequena atenuação do conteúdo harmônico, pelos mesmos motivos expostos no tópico anterior.

Figura 28 - Tela de resultados dos ângulos de ignição e comutação para a quarta simulação CIP



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A seguir podem-se visualizar os resultados obtidos de acordo com os dados obtidos no processo de cálculo demonstrados na Figura 28 anteriormente.

Figura 29- Resultados do conteúdo harmônico

Fase A				Fase B				Fase C			
Ordem Harm.	Ia(A)	Ângulo°	% da Funda.	Ordem Harm.	Ib(A)	Ângulo°	% da Funda.	Ordem Harm.	Ic(A)	Ângulo°	% da Funda.
1	217,49	0,00	100,00	1	214,21	125,00	100,00	1	228,62	237,00	100,00
2	0,00	0,00	0,00	2	0,00	0,00	0,00	2	0,00	0,00	0,00
3	5,67	-6,81	2,61	3	11,82	-37,65	5,52	3	17,41	10,11	7,62
4	0,00	0,00	0,00	4	0,00	0,00	0,00	4	0,00	0,00	0,00
5	45,85	124,62	21,08	5	47,98	-182,06	22,40	5	32,11	49,61	14,04
6	0,00	0,00	0,00	6	0,00	0,00	0,00	6	0,00	0,00	0,00
7	26,85	-53,43	12,34	7	22,57	27,68	10,53	7	34,89	295,94	15,26
8	0,00	0,00	0,00	8	0,00	0,00	0,00	8	0,00	0,00	0,00
9	5,64	1,32	2,59	9	11,52	51,32	5,38	9	16,43	-0,21	7,19
10	0,00	0,00	0,00	10	0,00	0,00	0,00	10	0,00	0,00	0,00
11	21,25	204,34	9,77	11	22,14	143,03	10,33	11	5,52	-69,61	2,41
12	0,00	0,00	0,00	12	0,00	0,00	0,00	12	0,00	0,00	0,00
13	12,33	-30,12	5,67	13	7,24	-29,12	3,38	13	17,12	143,03	7,49
14	0,00	0,00	0,00	14	0,00	0,00	0,00	14	0,00	0,00	0,00
15	5,57	-134,21	2,56	15	10,92	-20,41	5,10	15	14,58	138,88	6,38
16	0,00	0,00	0,00	16	0,00	0,00	0,00	16	0,00	0,00	0,00
17	13,80	143,03	6,35	17	13,42	219,14	6,26	17	0,00	0,00	0,00
18	0,00	0,00	0,00	18	0,00	0,00	0,00	18	0,00	0,00	0,00
19	6,31	-6,96	2,90	19	0,00	0,00	0,00	19	7,96	34,81	3,48
20	0,00	0,00	0,00	20	0,00	0,00	0,00	20	0,00	0,00	0,00
21	5,47	-17,91	2,52	21	10,05	-67,27	4,69	21	12,03	18,51	5,26
22	0,00	0,00	0,00	22	0,00	0,00	0,00	22	0,00	0,00	0,00
23	9,85	143,03	4,53	23	8,23	88,02	3,84	23	4,44	6,66	1,94
24	0,00	0,00	0,00	24	0,00	0,00	0,00	24	0,00	0,00	0,00
25	3,59	26,17	1,65	25	0,00	0,00	0,00	25	2,51	-2,54	1,10

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para a próxima simulação utilizou-se os mesmos dados, o método de cálculo dos ângulos de cruzamento de fase foi o controle individual de pulsos. Conforme ilustrado na Figura 30 a seguir.

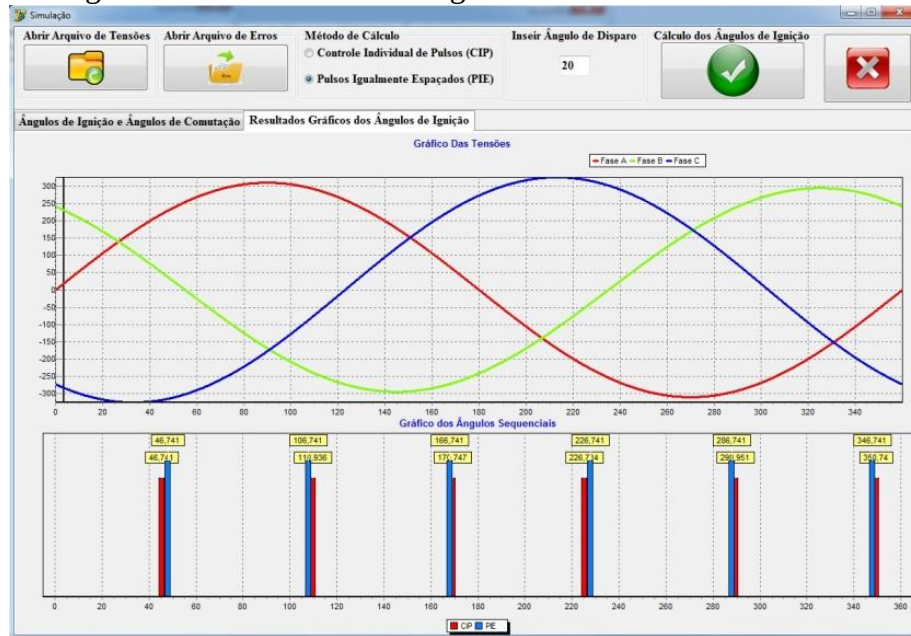
Figura 30 - Tela de resultados dos ângulos de ignição e comutação para a quarta simulação PIE

Abrir Arquivo de Tensões		Abrir Arquivo de Erros		Método de Cálculo ☐ Controle Individual de Pulsos (CIP) ☒ Pulsos Igualmente Espaçados (PIE)		Inserir Ângulo de Disparo 20		Cálculo dos Ângulos de Ignição ☒ ☐	
Ângulos de Ignição e Ângulos de Comutação					Resultados Gráficos dos Ângulos de Ignição				
Sequência de Ignição	Ângulo de Cruzamento°	Ângulo de Erros°	Ângulo de Ignição°	Comutação°					
1ª - Sequência de Ignição	26,74	0,00	46,74	19,41					
2ª - Sequência de Ignição	86,74	0,00	106,74	19,75					
3ª - Sequência de Ignição	146,74	0,00	166,74	17,84					
4ª - Sequência de Ignição	206,74	0,00	226,74	19,47					
5ª - Sequência de Ignição	266,74	0,00	286,74	19,71					
6ª - Sequência de Ignição	326,74	0,00	346,74	17,83					
Sequência de Ignição	1ª Sequência	2ª Sequência	3ª Sequência	4ª Sequência	5ª Sequência	6ª Sequência			
Desvio em Graus Entre o Método CIP E PIE	0,00	-4,20	-4,01	0,01	-4,21	-4,00			
Cálculo dos Ângulos de Comutação ☒ Valores das Reatâncias		Cálculo do Conteúdo Harmônico de Corrente ☐ Calcular Conteúdo Harmônico							

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados obtidos podem ser visualizados de forma gráfica, conforme apresentado na Figura 31 a seguir.

Figura 31 - Tela de resultados gráficos dos métodos de cálculos



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados para o conteúdo harmônico de corrente obtidos através do método de cálculo (PIE), pode ser observado na Figura 32 a seguir.

Figura 32 - Resultados para o conteúdo harmônico de corrente com método PIE

Fase A				Fase B				Fase C			
Ordem Harm.	Ia(A)	Ângulo°	% da Funda.	Ordem Harm.	Ib(A)	Ângulo°	% da Funda.	Ordem Harm.	Ic(A)	Ângulo°	% da Funda.
1	212,27	0,00	100,00	1	221,15	125,00	100,00	1	227,00	237,00	100,00
2	0,00	0,00	0,00	2	0,00	0,00	0,00	2	0,00	0,00	0,00
3	15,35	-42,74	7,23	3	1,54	-176,96	0,70	3	13,83	0,00	6,09
4	0,00	0,00	0,00	4	0,00	0,00	0,00	4	0,00	0,00	0,00
5	48,89	257,15	23,03	5	42,50	-79,41	19,22	5	34,81	-187,19	15,33
6	0,00	0,00	0,00	6	0,00	0,00	0,00	6	0,00	0,00	0,00
7	19,78	-9,19	9,32	7	30,79	101,55	13,93	7	34,56	-23,03	15,23
8	0,00	0,00	0,00	8	0,00	0,00	0,00	8	0,00	0,00	0,00
9	14,68	-2,62	6,91	9	1,54	143,03	0,70	9	13,34	7,78	5,88
10	0,00	0,00	0,00	10	0,00	0,00	0,00	10	0,00	0,00	0,00
11	21,90	143,03	10,32	11	18,22	-70,13	8,24	11	8,92	30,12	3,93
12	0,00	0,00	0,00	12	0,00	0,00	0,00	12	0,00	0,00	0,00
13	3,89	-52,99	1,83	13	16,55	115,18	7,48	13	18,12	52,56	7,98
14	0,00	0,00	0,00	14	0,00	0,00	0,00	14	0,00	0,00	0,00
15	13,39	60,75	6,31	15	1,54	143,03	0,70	15	12,39	79,83	5,46
16	0,00	0,00	0,00	16	0,00	0,00	0,00	16	0,00	0,00	0,00
17	12,08	-88,15	5,69	17	11,11	-61,69	5,02	17	0,00	0,00	0,00
18	0,00	0,00	0,00	18	0,00	0,00	0,00	18	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00	19	10,77	131,29	4,87	19	10,15	189,10	4,47
20	0,00	0,00	0,00	20	0,00	0,00	0,00	20	0,00	0,00	0,00
21	11,59	195,20	5,46	21	1,54	154,22	0,69	21	11,04	143,03	4,86
22	0,00	0,00	0,00	22	0,00	0,00	0,00	22	0,00	0,00	0,00
23	5,92	-19,67	2,79	23	7,50	-53,89	3,39	23	1,06	143,03	0,47
24	0,00	0,00	0,00	24	0,00	0,00	0,00	24	0,00	0,00	0,00
25	3,39	-17,48	1,60	25	8,28	150,80	3,75	25	5,59	143,03	2,46

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota-se ao contrário do resultado do conteúdo harmônico obtido na terceira simulação, no tópico anterior, utilizando o método de cálculo de pulso igualmente espaçado, o conteúdo harmônico não característico continua presentes. Este fator é causado pela presença de tempos de comutação assimétricos.

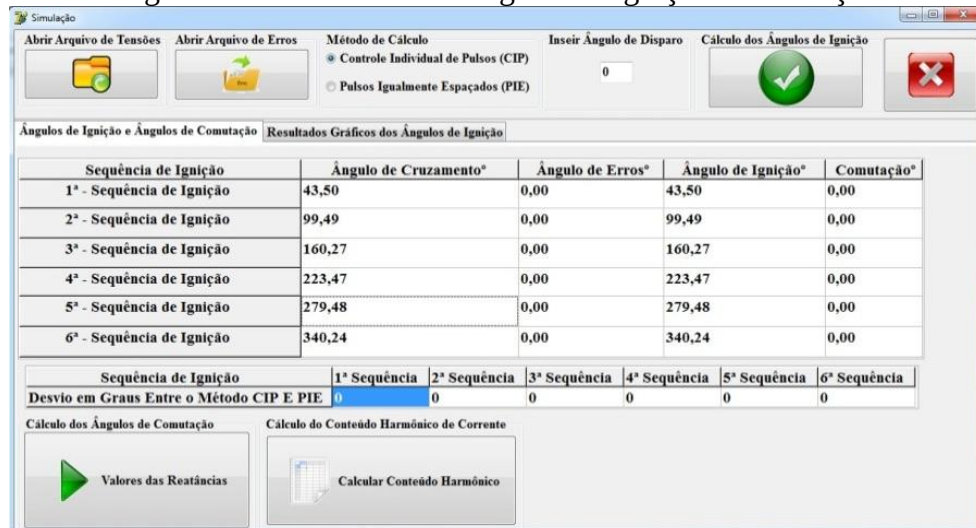
4.5 Quinta Simulação

Para estas simulações foram considerados as seguintes condições:

- Tensões de alimentação equilibradas e com 5% do valor da terceira harmônica também equilibrada;
- Reatâncias de comutação desprezíveis;
- Ângulo de atraso = 0°;
- Sistema de produção de pulsos CIP e PIE.

Para as condições de operação descritas acima, acarreta o desequilíbrio dos ângulos de ignição das válvulas. Na Figura 33 a seguir ilustram-se os valores obtidos para os ângulos de comutação e ignição.

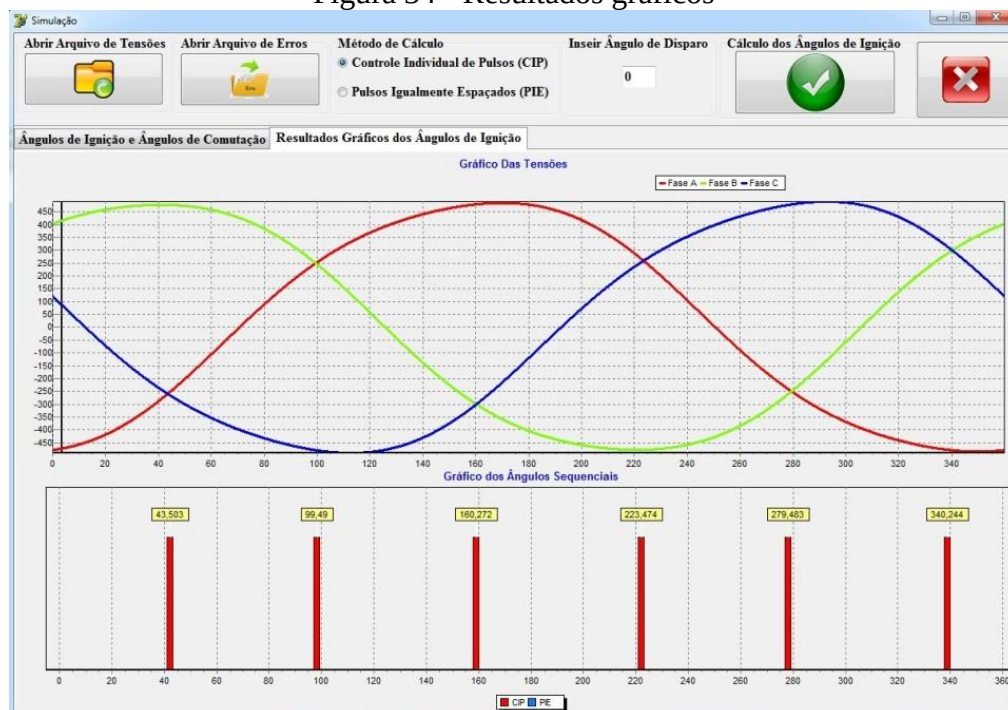
Figura 33 - Resultados dos ângulos de ignição e comutação



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados gráficos obtidos para os ângulos de ignição demonstrados na figura anterior são ilustrados na Figura 34 a seguir.

Figura 34 - Resultados gráficos



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O resultado obtido para o cômputo dos valores do conteúdo harmônico de corrente é ilustrado na Figura 35 a seguir.

Figura 35 - Resultados dos valores do conteúdo harmônico de corrente

Fase A				Fase B				Fase C			
Ordem Harm.	Ia(A)	Ângulo°	% da Funda.	Ordem Harm.	Ib(A)	Ângulo°	% da Funda.	Ordem Harm.	Ic(A)	Ângulo°	% da Funda.
1	216,86	0,00	100,00	1	224,84	53,50	100,00	1	219,67	165,60	100,00
2	0,00	0,00	0,00	2	0,00	0,00	0,00	2	0,00	0,00	0,00
3	7,17	-10,13	3,31	3	8,88	-6,54	3,95	3	1,71	10,92	0,78
4	0,00	0,00	0,00	4	0,00	0,00	0,00	4	0,00	0,00	0,00
5	47,25	-85,17	21,79	5	39,01	158,05	17,35	5	44,94	156,28	20,46
6	0,00	0,00	0,00	6	0,00	0,00	0,00	6	0,00	0,00	0,00
7	27,33	143,03	12,60	7	34,97	21,66	15,55	7	30,61	143,03	13,94
8	0,00	0,00	0,00	8	0,00	0,00	0,00	8	0,00	0,00	0,00
9	7,10	183,24	3,27	9	8,75	236,19	3,89	9	1,71	143,03	0,78
10	0,00	0,00	0,00	10	0,00	0,00	0,00	10	0,00	0,00	0,00
11	22,62	49,60	10,43	11	14,25	-122,43	6,34	11	20,85	-14,33	9,49
12	0,00	0,00	0,00	12	0,00	0,00	0,00	12	0,00	0,00	0,00
13	12,33	-32,19	5,69	13	19,54	12,13	8,69	13	16,04	-136,61	7,30
14	0,00	0,00	0,00	14	0,00	0,00	0,00	14	0,00	0,00	0,00
15	6,97	-16,43	3,21	15	8,49	27,47	3,78	15	1,71	-2,00	0,78
16	0,00	0,00	0,00	16	0,00	0,00	0,00	16	0,00	0,00	0,00
17	14,96	75,82	6,90	17	6,56	35,99	2,92	17	13,74	-44,93	6,26
18	0,00	0,00	0,00	18	0,00	0,00	0,00	18	0,00	0,00	0,00
19	6,56	-38,47	3,03	19	13,27	143,03	5,90	19	10,66	59,16	4,85
20	0,00	0,00	0,00	20	0,00	0,00	0,00	20	0,00	0,00	0,00
21	6,77	-144,66	3,12	21	8,12	-93,67	3,61	21	1,71	21,89	0,78
22	0,00	0,00	0,00	22	0,00	0,00	0,00	22	0,00	0,00	0,00
23	10,99	143,03	5,07	23	2,67	43,87	1,19	23	10,33	180,77	4,70
24	0,00	0,00	0,00	24	0,00	0,00	0,00	24	0,00	0,00	0,00
25	3,42	103,44	1,58	25	9,57	18,76	4,26	25	7,84	33,04	3,57

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O conteúdo harmônico adicional múltiplo da terceira harmônica deve-se aos desequilíbrios nos ângulos de ignição dado as condições de operação do sistema, conforme descritos anteriormente.

Com a substituição do sistema de produção de pulsos do método (CIP) para o método (PIE), obtém-se os seguintes valores para os ângulos de ignição ilustrado na Figura 36. E o conteúdo harmônico gerado pode ser observado na Figura 37 a seguir.

Figura 36 - Resultado dos ângulos de ignição para o método PIE

Simulação

Abrir Arquivo de Tensões
 Abrir Arquivo de Erros
 Método de Cálculo
☐ Controle Individual de Pulsos (CIP)
☒ Pulsos Igualmente Espaçados (PIE)
 Inserir Ângulo de Disparo
 0
 Cálculo dos Ângulos de Ignição

Ângulos de Ignição e Ângulos de Comutação
 Resultados Gráficos dos Ângulos de Ignição

Sequência de Ignição	Ângulo de Cruzamento°	Ângulo de Erros°	Ângulo de Ignição°	Comutação°
1ª - Sequência de Ignição	43,50	0,00	43,50	0,00
2ª - Sequência de Ignição	103,50	0,00	103,50	0,00
3ª - Sequência de Ignição	163,50	0,00	163,50	0,00
4ª - Sequência de Ignição	223,50	0,00	223,50	0,00
5ª - Sequência de Ignição	283,50	0,00	283,50	0,00
6ª - Sequência de Ignição	343,50	0,00	343,50	0,00

Sequência de Ignição	1ª Sequência	2ª Sequência	3ª Sequência	4ª Sequência	5ª Sequência	6ª Sequência
Desvio em Graus Entre o Método CIP E PIE	0,00	4,01	3,23	0,03	4,02	3,26

Cálculo dos Ângulos de Comutação
 Valores das Reatâncias
 Cálculo do Conteúdo Harmônico de Corrente
 Calcular Conteúdo Harmônico

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 37 - Resultado do conteúdo harmônico calculado

Fase A				Fase B				Fase C			
Ordem Harm.	Ia(A)	Ângulo°	% da Funda.	Ordem Harm.	Ib(A)	Ângulo°	% da Funda.	Ordem Harm.	Ic(A)	Ângulo°	% da Funda.
1	220,53	0,00	100,00	1	220,53	53,50	100,00	1	220,53	165,60	100,00
2	0,00	0,00	0,00	2	0,00	0,00	0,00	2	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	3	0,00	0,00	0,00	3	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	4	0,00	0,00	0,00	4	0,00	0,00	0,00
5	44,11	-130,41	20,00	5	44,11	-15,92	20,00	5	44,11	59,36	20,00
6	0,00	0,00	0,00	6	0,00	0,00	0,00	6	0,00	0,00	0,00
7	31,50	143,03	14,29	7	31,50	-33,37	14,29	7	31,50	-6,72	14,29
8	0,00	0,00	0,00	8	0,00	0,00	0,00	8	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	9	0,00	0,00	0,00	9	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	10	0,00	0,00	0,00	10	0,00	0,00	0,00
11	20,05	-3,60	9,09	11	20,05	143,03	9,09	11	20,05	15,79	9,09
12	0,00	0,00	0,00	12	0,00	0,00	0,00	12	0,00	0,00	0,00
13	16,96	241,75	7,69	13	16,96	-69,93	7,69	13	16,96	110,68	7,69
14	0,00	0,00	0,00	14	0,00	0,00	0,00	14	0,00	0,00	0,00
15	0,00	0,00	0,00	15	0,00	0,00	0,00	15	0,00	0,00	0,00
16	0,00	0,00	0,00	16	0,00	0,00	0,00	16	0,00	0,00	0,00
17	12,97	-50,05	5,88	17	12,97	-48,81	5,88	17	12,97	154,58	5,88
18	0,00	0,00	0,00	18	0,00	0,00	0,00	18	0,00	0,00	0,00
19	11,61	-234,94	5,26	19	11,61	32,45	5,26	19	11,61	-251,38	5,26
20	0,00	0,00	0,00	20	0,00	0,00	0,00	20	0,00	0,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00	21	0,00	0,00	0,00	21	0,00	0,00	0,00
22	0,00	0,00	0,00	22	0,00	0,00	0,00	22	0,00	0,00	0,00
23	9,59	49,75	4,35	23	9,59	-155,52	4,35	23	9,59	43,83	4,35
24	0,00	0,00	0,00	24	0,00	0,00	0,00	24	0,00	0,00	0,00
25	8,82	-65,34	4,00	25	8,82	-15,89	4,00	25	8,82	143,03	4,00

Fonte: Elaboração do próprio autor

Pelo método utilizado de pulsos igualmente espaçados, as correntes de alimentação voltam a apresentar apenas os valores harmônicos não característicos, como ilustrado na Figura 37.

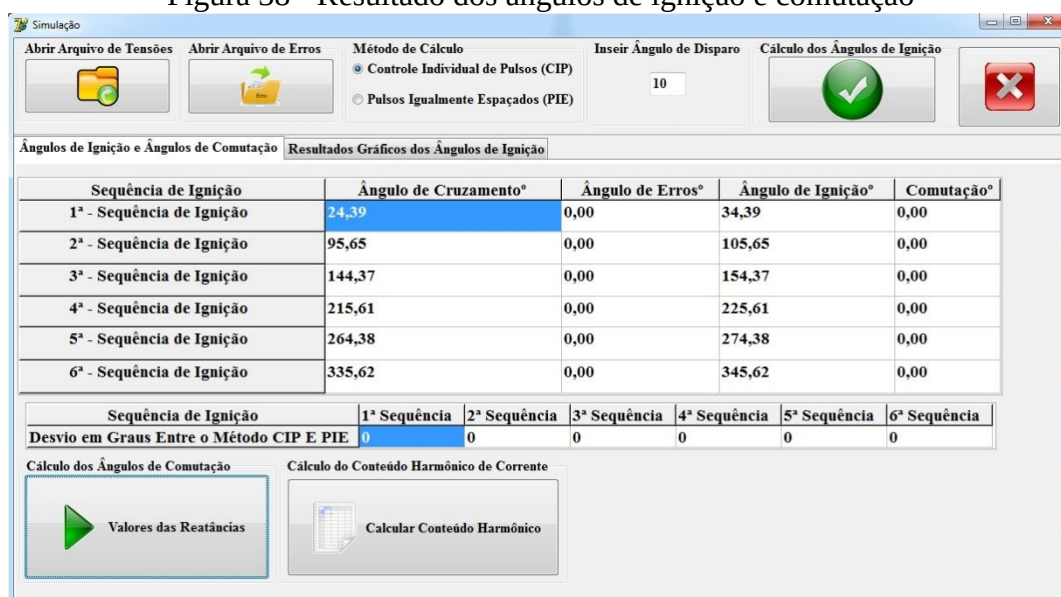
4.6 Sexta Simulação

Para a simulação realizada neste tópico foram considerados as seguintes condições de operação do sistema:

- Equilíbrio entre as tensões de alimentação e com 10% de segunda harmônica também equilibrada;
- Reatâncias de comutação nulas;
- Ângulo de atraso = 10°
- Sistema de produção de pulsos (CIP).

De acordo com as condições destacadas, foram obtidos os resultados para os ângulos de ignição e comutação conforme ilustrado na Figura 38 a seguir.

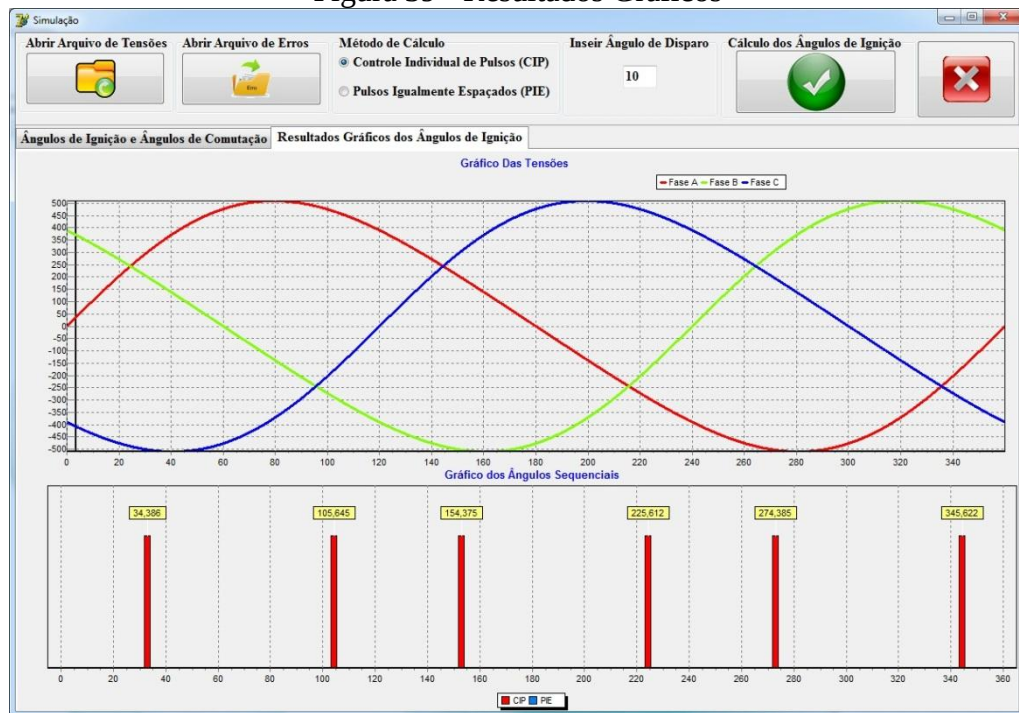
Figura 38 - Resultado dos ângulos de ignição e comutação



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados gráficos para os ângulos de ignição obtidos podem ser observados na Figura 39 a seguir.

Figura 39 - Resultados Gráficos



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Portanto, os resultados obtidos para esta simulação pode ser observado na Figura 40 a seguir.

Figura 40 - Resultados obtidos para o conteúdo harmônico

Fase A				Fase B				Fase C			
Ordem Harm.	Ia(A)	Ângulo°	% da Funda.	Ordem Harm.	Ic(A)	Ângulo°	% da Funda.	Ordem Harm.	Ib(A)	Ângulo°	% da Funda.
1	219,47	0,00	100,00	1	219,49	-120,00	100,00	1	219,45	120,00	100,00
2	21,49	135,64	9,79	2	21,52	-322,96	9,80	2	21,50	22,90	9,80
3	0,00	0,00	0,00	3	0,00	0,00	0,00	3	0,00	0,00	0,00
4	21,07	-22,77	9,60	4	21,11	-139,20	9,62	4	21,08	318,44	9,61
5	38,91	-51,47	17,73	5	38,88	149,97	17,71	5	38,92	-89,16	17,74
6	0,00	0,00	0,00	6	0,00	0,00	0,00	6	0,00	0,00	0,00
7	24,37	-150,75	11,10	7	24,36	73,56	11,10	7	24,35	51,30	11,10
8	19,47	-323,20	8,87	8	19,48	22,53	8,88	8	19,49	134,95	8,88
9	0,00	0,00	0,00	9	0,00	0,00	0,00	9	0,00	0,00	0,00
10	18,32	321,28	8,35	10	18,36	-23,09	8,36	10	18,31	-146,82	8,35
11	9,47	150,69	4,32	11	9,44	-90,16	4,30	11	9,47	-52,15	4,32
12	0,00	0,00	0,00	12	0,00	0,00	0,00	12	0,00	0,00	0,00
13	4,95	50,92	2,26	13	4,92	-152,43	2,24	13	4,93	89,31	2,25
14	15,45	22,68	7,04	14	15,43	129,22	7,03	14	15,46	-326,45	7,05
15	0,00	0,00	0,00	15	0,00	0,00	0,00	15	0,00	0,00	0,00
16	13,78	-140,55	6,28	16	13,80	315,87	6,29	16	13,77	-23,33	6,27
17	1,24	-231,19	0,57	17	1,28	-53,07	0,58	17	1,26	156,76	0,57
18	0,00	0,00	0,00	18	0,00	0,00	0,00	18	0,00	0,00	0,00
19	3,34	98,00	1,52	19	3,38	51,19	1,54	19	3,35	-155,31	1,53
20	10,20	135,87	4,65	20	10,17	135,87	4,63	20	10,21	22,07	4,65
21	0,00	0,00	0,00	21	0,00	0,00	0,00	21	0,00	0,00	0,00
22	8,35	-23,13	3,80	22	8,35	-155,11	3,80	22	8,33	315,86	3,79
23	6,06	-51,93	2,76	23	6,08	147,73	2,77	23	6,08	-94,93	2,77
24	0,00	0,00	0,00	24	0,00	0,00	0,00	24	0,00	0,00	0,00
25	6,80	-150,49	3,10	25	6,84	62,45	3,12	25	6,80	50,26	3,10

Fonte: Elaboração do próprio autor

Nestas condições pode-se observar a geração de correntes harmônicas de ordens pares que são múltiplos da segunda ordem. Sabe-se que esta característica é dado pelos instantes de condução ser diferentes de 120° e com intervalos de não condução assimétricos.

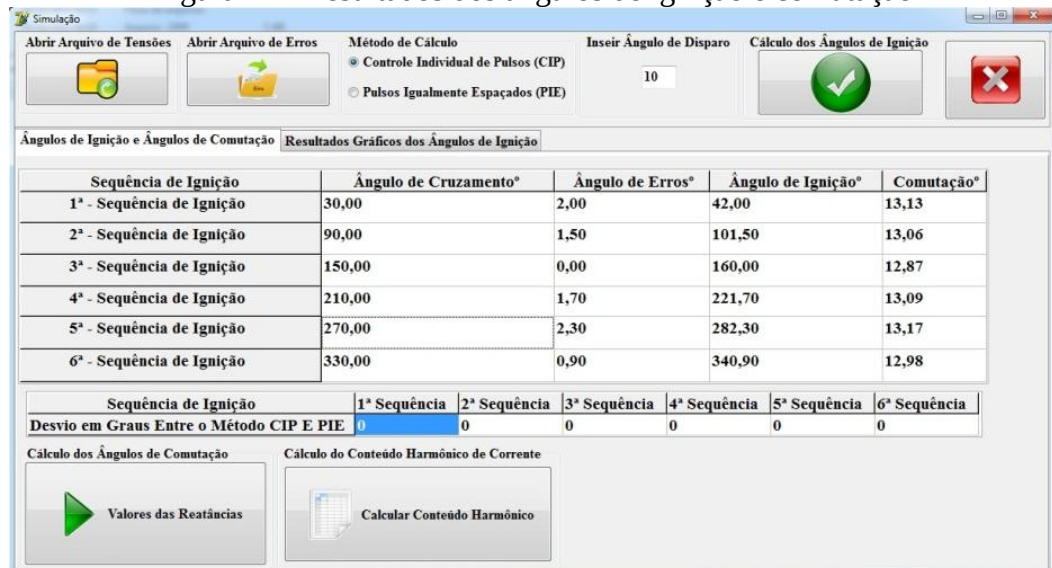
4.7 Sétima Simulação

Para este caso adotou-se as seguintes características de operação do sistema:

- Tensões de alimentação equilibradas e livres de distorções harmônicas;
- Reatâncias de comutação presentes no sistema;
- Ângulo de atraso ($\alpha = 10^\circ$);
- Sistema de produção de pulsos CIP;
- Erros no circuito de disparo aleatórios.

Nestas condições na Figura 41 ilustra os resultados obtidos para os ângulos de ignição e comutação calculados.

Figura 41 - Resultados dos ângulos de ignição e comutação



Fonte: Elaboração do próprio autor

O conteúdo harmônico determinado através dos cálculos dos coeficientes de Fourier pode ser observado na Figura 42 a seguir.

Figura 42 - Resultados do conteúdo harmônico obtido

Fase A				Fase B				Fase C			
Ordem Harm.	Ia(A)	Ângulo°	% da Funda.	Ordem Harm.	Ib(A)	Ângulo°	% da Funda.	Ordem Harm.	Ic(A)	Ângulo°	% da Funda.
1	218,08	0,00	100,00	1	220,29	120,00	100,00	1	222,67	-120,00	100,00
2	0,00	0,00	0,00	2	1,62	22,74	0,73	2	1,46	-62,52	0,66
3	4,51	92,63	2,07	3	0,00	0,00	0,00	3	4,68	0,00	2,10
4	1,33	211,31	0,61	4	1,61	-79,56	0,73	4	1,20	-24,25	0,54
5	45,33	292,33	20,79	5	43,35	11,16	19,68	5	40,71	-289,75	18,28
6	1,91	6,58	0,88	6	0,00	0,00	0,00	6	2,72	-3,39	1,22
7	27,51	143,03	12,62	7	29,92	61,33	13,58	7	32,03	-18,65	14,39
8	1,13	61,81	0,52	8	1,62	-168,96	0,73	8	1,71	138,97	0,77
9	4,48	143,03	2,05	9	0,00	0,00	0,00	9	4,64	143,03	2,08
10	1,43	-64,88	0,65	10	1,61	75,57	0,73	10	0,00	0,00	0,00
11	20,81	-247,77	9,54	11	19,05	13,88	8,65	11	16,10	29,19	7,23
12	1,88	95,96	0,86	12	0,00	0,00	0,00	12	2,67	0,00	1,20
13	13,07	-57,50	5,99	13	15,66	-52,46	7,11	13	17,49	143,03	7,85
14	1,04	-41,57	0,48	14	1,62	31,53	0,73	14	1,93	-45,53	0,86
15	4,42	-67,80	2,03	15	0,00	0,00	0,00	15	4,56	-73,99	2,05
16	1,52	5,40	0,70	16	1,60	-43,42	0,73	16	0,00	0,00	0,00
17	13,44	34,92	6,16	17	11,92	143,03	5,41	17	8,85	-243,54	3,98
18	1,84	-232,39	0,84	18	0,00	0,00	0,00	18	2,58	143,03	1,16
19	7,11	-11,12	3,26	19	9,87	113,82	4,48	19	11,40	-45,74	5,12
20	0,00	0,00	0,00	20	1,62	75,32	0,73	20	2,12	143,03	0,95
21	4,34	127,08	1,99	21	0,00	0,00	0,00	21	4,45	112,21	2,00
22	1,61	143,03	0,74	22	1,60	-179,33	0,72	22	0,00	0,00	0,00
23	9,57	-53,79	4,39	23	8,30	-93,27	3,77	23	5,05	-214,53	2,27
24	1,78	46,41	0,81	24	0,00	0,00	0,00	24	2,45	11,78	1,10
25	4,46	143,03	2,05	25	7,37	48,69	3,35	25	8,60	-7,39	3,86

Fonte: Elaboração do próprio autor

Para as características de operação do sistema foi determinado o conteúdo harmônico ilustrado na figura anterior, a fim de verificar as influências dos erros no circuito de disparo no conteúdo harmônico gerado pelo sistema.

4.8 Comentários

Neste capítulo pode-se observar os resultados obtidos nas simulações realizadas no aplicativo computacional, para demonstrar a metodologia de cálculo e o resultado do conteúdo harmônico de corrente no sistema HVDC, de acordo com as características de operação adotada na instalação. No Anexo A, pode-se observar a comparação entre os resultados obtidos para estas simulações e os resultados obtidos em publicações do gênero, cujo os resultados obtidos demonstraram-se semelhantes de acordo com cada situação simulada.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O aplicativo computacional apresentou uma precisão aceitável nos resultados do cálculo dos ângulos de cruzamento de fases e conseqüentemente dos ângulos de ignição. O resultado do cômputo dos ângulos de comutação através da formulação de uma equação genérica estabelecida demonstrou-se coerente de acordo com os dados de entrada validando a metodologia utilizada, resultando na determinação do conteúdo harmônico existente com resultados satisfatórios.

Através da metodologia de cálculo utilizada e demonstrada através do aplicativo computacional desenvolvido, foi possível constatar as influências das condições de operação não idealizadas dos conversores na geração do conteúdo harmônico de corrente no sistema.

Nas diferentes simulações realizadas em condições de operação distintas, podem-se observar os efeitos e as influências de cada situação separadamente, com resultados úteis para os estudos de instalações desta natureza. Os resultados obtidos foram comparados com publicações do gênero e se apresentaram coerentes.

O aplicativo computacional foi projetado com uma atenção especial na parte visual para proporcionar um ambiente intuitivo, possibilitando maior interatividade entre o usuário e o software desenvolvido. Portanto o mesmo pode ser facilmente utilizado por novos usuários que desejam realizar simulações para o cálculo do conteúdo harmônico de corrente, através da metodologia apresentada neste trabalho. E com os resultados apresentados de uma maneira clara, objetiva e de forma gráfica.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para dar sequência ao trabalho, sugere-se a aplicação de um método adicional ao implementado, que realize o cálculo do conteúdo harmônico considerando a reatância de alisamento em condições não idealizadas, pois a metodologia para o cálculo adotada para este trabalho permite realizar cálculos somente para a reatância de alisamento tendendo ao infinito.

REFERÊNCIAS

- ABB. **A Evolução do HVDC**. São Paulo, 2013. Disponível em:
<<http://www.abb.com.br/cawp/db0003db002698/16694bafb3803636c12576e40047e801.aspx>>. Acesso em: 27 abr. 2013.
- ANSELMO, F. A. F. **Desvendando o caminho das pedras**: Borland Delphi. [S.l.: s.n., 1997]. Disponível em:
<<http://www.greantoniobraga.seed.pr.gov.br/redeescola/escolas/13/870/10/arquivos/File/Adenildo/Biblia-Delphi-7-PtBr.pdf>>. Acesso em: 27 abr. 2013.
- BORGES, W. M. **Harmônicas em conversores com capacitores de comutação**. 2005. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2005.
- CARNEIRO, J. R. V.; GRANDI, A. L. Z. de. Caracterização das distorções harmônicas de tensão em circuitos secundários de baixa tensão. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA – CBQEE, 8., 2009, Blumenau. **Anais...** Blumenau: SBQEE, 2009. 6 p.
- COGO, J. R.; OLIVEIRA, J. C. de. **Curso básico de transmissão de energia elétrica em corrente contínua**. Itajubá: Centro Elétrico Brasileiro – ELETROBRAS: Fundação de Pesquisa e Assessoramento a Indústria – FUPAI, 1981.
- DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. **Avaliação da qualidade da energia elétrica**. Campinas: Unicamp, 2013. Disponível em:
<<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/it012.html>>. Acesso em: 27 abr. 2013.
- DRABEK, P.; FORT, J.; KUS, V.; PITTERMANN, M. **Harmonic currents of frequency converters with voltage source inverters**. Pilsen, Czech Republic: West Bohemia University, 2006.
- DRABEK, P.; PITTERMANN, M. Calculation of interharmonics of power electronic converters: using of harmonic analysis. **Annals of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering**, Hunedoara, v. 9, n. 1, p. 151-154, 2011.
- KIMBARK, E. W. **Direct current transmission**. New York: John Wiley & Sons, 1971.
- LEHN, W. P. Direct harmonic analysis of the voltage source converter. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 18, n. 3, p. 1034-1042, July 2003.
- OLIVEIRA, L. C. O. de. **Cálculo de harmônicos trifásicos gerados por conversores e compensadores estáticos**. 1983. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de Itajubá, Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Itajubá, 1983.
- PIRES, I. A. Medidas de mitigação de harmônicos. **O Setor Elétrico**, São Paulo, p. 38-47, dez. 2010.

SANTOS, F. J. **Introdução às séries de Fourier**. Belo Horizonte: PUC Minas, Instituto de Ciências Exatas e Informática, jul. 2004. 54 f. Disponível em: <http://www.matematica.pucminas.br/profs/web_fabiano/calculo4/sf.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2013.

SIEMENS. **High voltage direct current transmission**. Erlangen: Siemens, 2012. Disponível em: <<http://www.energy.siemens.com/hq/en/>>. Acesso em: 10 maio 2013.

VÓRTEX EQUIPAMENTOS. **Compreendendo harmônicos de energia**. Belo Horizonte: Vórtex Equipamentos, 2000.

APÊNDICE A - PUBLICAÇÕES

Neste apêndice apresenta-se a publicação realizada para o trabalho de pesquisa realizado, tal publicação faz parte dos requisitos exigidos do regulamento do PPGEE (Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica), cujo aluno de mestrado deve submeter ao mínimo um artigo completo em periódicos, congressos ou eventos que possuam corpo técnico de revisores reconhecidos pela comunidade científica. A seguir confere-se o artigo submetido:

SOUZA, A. S; SOUZA, J. B. de; OLIVEIRA, L. C. O. de; OLIVEIRA, R. A. N. Metodologia para o cálculo de harmônicas em conversores de potência no Sistema HVDC. In: LATIN AMERICAN CONGRESS ON GENERATION, TRANSMISSION AND DISTRIBUTION – CLAGTEE, 10., 6-9 Oct. 2013, Viña del Mar, Chile. **Proceedings...** Viña del Mar: CLAGTEE, 2013. (Artigo submetido a um congresso internacional).

SOUZA, A. S; SOUZA, J. B. de; OLIVEIRA, L. C. O. de. Simulador para o cálculo de harmônicas geradas por Sistemas HVDC. In: SIMPÓSIO DE ESPECIALISTAS EM PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO E EXPANSÃO ELÉTRICA – SEPOPE, 13., 18-21 Maio 2014, Foz do Iguaçu. (Artigo aceito para publicação ao congresso nacional).

APÊNDICE B - APLICATIVO COMPUTACIONAL

Neste apêndice é apresentado o tutorial desenvolvido para o aplicativo computacional desenvolvido descrevendo-se a sua funcionalidade. O programa computacional foi desenvolvido de modo a oferecer ao usuário um ambiente interativo e intuitivo apresentando os resultados graficamente de forma clara e objetiva.

- **Telas desenvolvidas e funcionalidade do software**

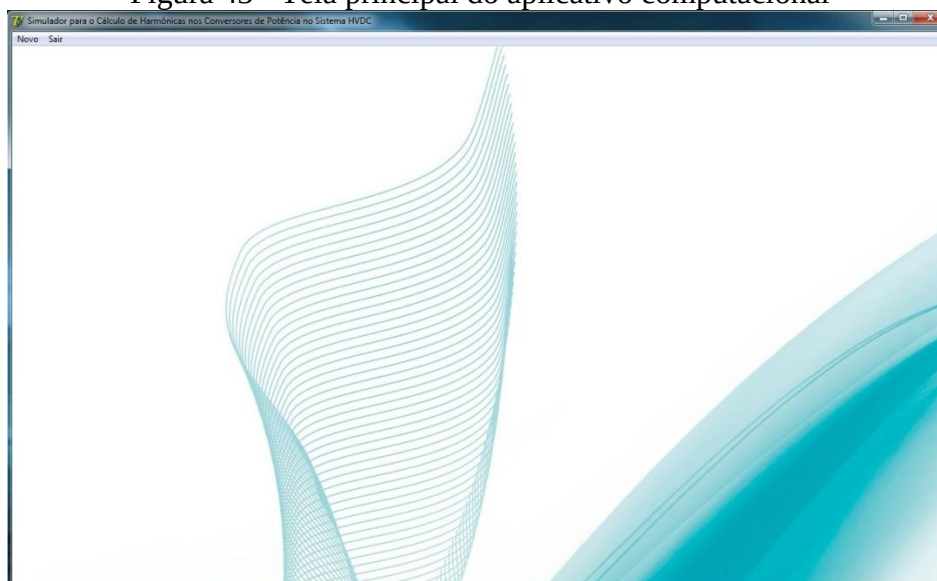
Para o desenvolvimento do aplicativo computacional utilizou-se a plataforma Delphi 7.0, devido à vantagem em oferecer ao usuário final um ambiente interativo e intuitivo através de uma interface gráfica.

O aplicativo computacional desenvolvido oferece ao usuário as seguintes funções:

- Criação do arquivo de tensões trifásica no domínio da frequência, cujo mesmo pode ser aproveitado nas simulações;
- Pode ser criado o arquivo de erros no circuito de disparo;
- As tensões de entrada do aplicativo para a realização dos cálculos podem estar no domínio do tempo ou da frequência;
- Efetua-se o cálculo dos ângulos de ignição das válvulas a tiristores, com as condições não ideais de operação descritas anteriormente;
- É possível visualizar os resultados obtidos para os ângulos de ignição de forma gráfica;
- Realiza-se os cálculos dos ângulos de comutação, de acordo com os valores das reatâncias das fases envolvidas e o valor da corrente de condução I_d , fornecidas pelo usuário;
- Com cálculo dos parâmetros descritos acima, realizam-se os cálculos do conteúdo harmônico de corrente.

Na Figura 43 pode-se visualizar a tela principal do aplicativo computacional desenvolvido.

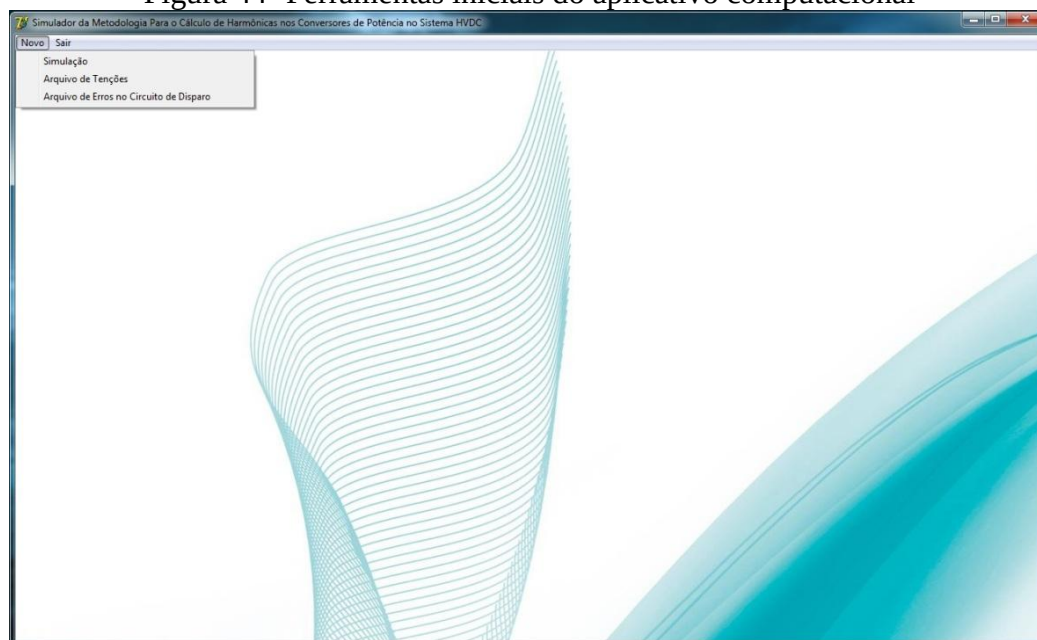
Figura 43 - Tela principal do aplicativo computacional



Fonte: Elaboração do próprio autor.

É possível observar na figura anterior os menus existentes que proporcionam a opção de criar o arquivo de erros no circuito de disparo, abrir um arquivo de tensões ou inicializar uma nova simulação, conforme ilustrado na Figura 44 a seguir.

Figura 44- Ferramentas iniciais do aplicativo computacional



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Ao clicar na opção “Arquivo de Erros no Circuito de Disparo” do menu “Novo”, a tela de criação dos arquivos de erros, ilustrada na Figura 45 a seguir, é aberta possibilitando ao usuário a criação de um arquivo no formato “.txt”. É possível inserir o valor em graus

correspondente aos erros do circuito de disparo para cada válvula. O arquivo de erros criado pode ser utilizado na simulação para o cálculo dos ângulos de ignição.

Figura 45 - Tela de criação do arquivo de erros

Sequência	1	2	3	4	5	6
Erros						

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para salvar o arquivo de erros, clica-se no botão intitulado de “Salvar Arquivo”, o botão “Novo” permite criar um novo arquivo de erros.

A função implementada no menu “Arquivo de Tensões” da Figura 44 é criar o arquivo de tensões no domínio da frequência com os valores de pico da tensão fundamental de cada fase e do conteúdo harmônico existente, com os seus referentes ângulos de fase. O arquivo é salvo no formato “.txt”. Na Figura 46 a seguir ilustra-se a tela criada para gerar o arquivo de tensões.

Figura 46 - Tela para criar arquivo de tensões

Ordem Harmônica	Tensão Fase A (V)	Ângulo Fase A °	Tensão Fase B (V)	Ângulo Fase B °	Tensão Fase C (V)	Ângulo Fase C °

Fonte: Elaboração do próprio autor.

No campo “Ordem Harmônica Desejada” insere-se a quantidade de ordens harmônicas que deseja-se inserir, os valores das ordens harmônicas, das tensões de pico e dos ângulos de fase são inseridos diretamente no “Grid” do campo intitulado de “Inserir Valores:”. Para salvar o arquivo criado clica-se no botão “Salvar Arquivo de Tensões”, o botão “Novo Arquivo de Tensões” é responsável por limpar a tela e permitir que o usuário crie um novo arquivo de tensões.

Para iniciar a tela de simulações, onde serão calculados os ângulos de ignição, os ângulos de comutação, o conteúdo harmônicos e apresentam-se os resultados gráficos obtidos

para os ângulos de ignição. Deve-se escolher a opção “Simulação” do menu “Novo”. Na Figura 47 a seguir ilustra-se a tela de simulações.

Figura 47 - Tela de simulações com funções destacadas

The screenshot shows the 'Simulação' (Simulation) window. It contains several functional buttons and a data table. The buttons are numbered 1 through 11:

- 1: Abrir Arquivo de Tensões (Open Voltage File)
- 2: Abrir Arquivo de Erros (Open Error File)
- 3: Método de Cálculo (Calculation Method) with radio buttons for 'Controle Individual de Pulsos (CIP)' and 'Pulsos Igualmente Espaçados (PIE)'
- 4: Inserir Ângulo de Disparo (Enter Firing Angle) with a numeric input field showing '0'
- 5: Cálculo dos Ângulos de Ignição (Calculation of Ignition Angles) with a green checkmark icon
- 6: Cálculo dos Ângulos de Comutação (Calculation of Commutation Angles) with a green play button icon and the text 'Valores das Reatâncias' (Reactance Values)
- 7: Cálculo do Conteúdo Harmônico de Corrente (Calculation of Current Harmonic Content) with a document icon and the text 'Calcular Conteúdo Harmônico' (Calculate Harmonic Content)
- 8: Results table for ignition and commutation angles
- 9: Resultados Gráficos dos Ângulos de Ignição (Graphical Results of Ignition Angles)
- 10: Devio em Graus Entre o Método CIP E PIE (Deviation in Degrees Between CIP and PIE Methods)
- 11: Exit button with a red X icon

Sequência de Ignição	Ângulo de Cruzamento°	Erro	Ângulo de Ignição°	Comutação	
1ª - Sequência de Ignição					8
2ª - Sequência de Ignição					
3ª - Sequência de Ignição					
4ª - Sequência de Ignição					
5ª - Sequência de Ignição					
6ª - Sequência de Ignição					

Sequência de Ignição	1ª Sequência	2ª Sequência	3ª Sequência	4ª Sequência	5ª Sequência	6ª Sequência	
Devio em Graus Entre o Método CIP E PIE							10

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 47 ilustrada anteriormente, estão destacadas e enumeradas as funções que são realizadas na tela de simulações aplicativo computacional desenvolvido. Cada função será descrita de uma forma detalhada nos tópicos a seguir.

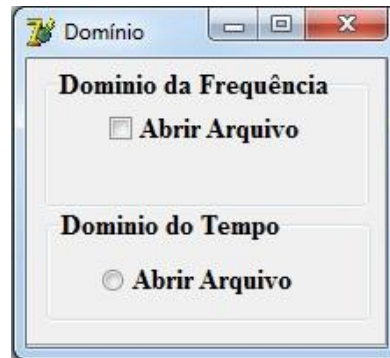
- **Tela de simulações**

A seguir listam-se as funções de cada componente destacado e enumerado da tela de simulações. Para realizar as simulações deve ser estabelecida a seguinte sequência:

- **Abrir arquivo de tensões**

Para iniciar a simulação, deve-se entrar com o arquivo de tensões para o cálculo dos ângulos de ignição e comutação, com isso, realizar do processo de cálculo do conteúdo harmônico de corrente. O botão da tela de simulações destacado pelo item (1) da Figura 47, é responsável por este processo. Ao pressiona-lo a seguinte tela será aberta, conforme ilustrado na Figura 48.

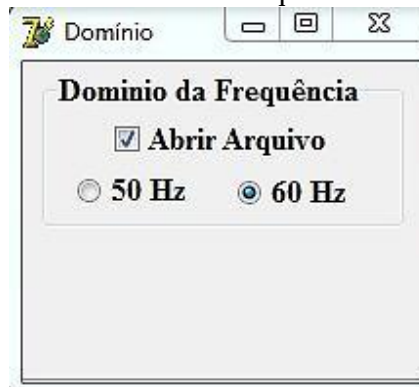
Figura 48- Tela de escolha do domínio



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Pode-se optar em abrir o arquivo de tensões no domínio do tempo ou no domínio da frequência. Somente uma opção poderá ser escolhida por vez, tornando um processo intuitivo, conforme ilustrado nas Figuras 49 e 50 a seguir.

Figura 49 – Domínio da frequência selecionado



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 50 – Domínio do tempo selecionado



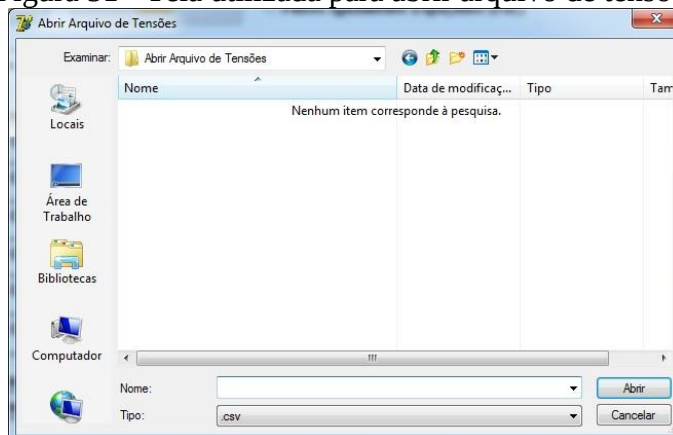
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para abrir o arquivo no domínio da frequência, deve-se optar por selecionar 50 Hz ou 60 Hz conforme ilustrado na Figura 49, na qual foi escolhida a opção de 60 Hz, ao clicar em

uma destas opções a tela para abrir o arquivo de tensões é inicializado. O mesmo processo é válido para abrir os arquivos no domínio do tempo conforme ilustrado na Figura 50.

Em destaque na Figura 51 a seguir, pode-se observar a tela utilizada para abrir o arquivo de tensões, esta tela foi criada por um componente nativo da plataforma Delphi 7.

Figura 51 - Tela utilizada para abrir arquivo de tensões



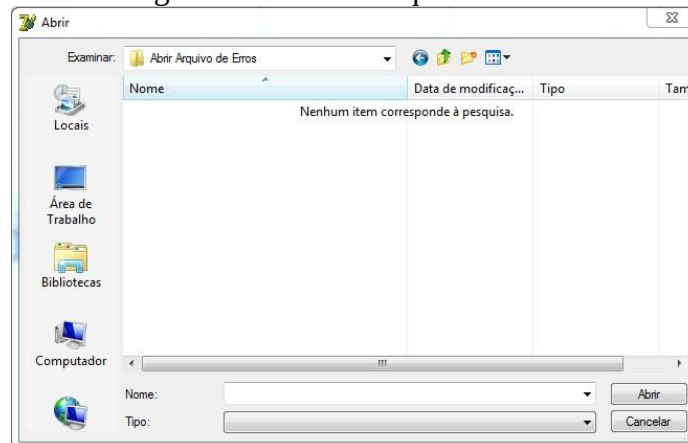
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os arquivos das tensões utilizados nas simulações podem ser abertos na extensão “.txt” ou na extensão “.csv”.

- **Abrir arquivo de erros no circuito de disparo**

Considerando as condições não idealizadas já descritas anteriormente, que são utilizadas no processo de cálculo dos ângulos de ignição, comutação e do conteúdo harmônico de corrente. Pode ser acrescentado o valor dos ângulos dos erros no circuito de disparo, expresso em graus, no cômputo dos ângulos de ignição das válvulas tiristorizadas. Para inserir estes ângulos deve-se clicar no botão destacado no item (2), no campo intitulado de “Abrir Arquivo de Erros” ilustrado na Figura 47, para inicializar a função responsável por abrir o arquivo de erros. Na Figura 51 a seguir pode-se visualizar a tela responsável por tal função.

Figura 52 - Abrir o arquivo de erros



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os arquivos de erros no circuito de disparo devem estar na extensão “.txt” para serem abertos pelo aplicativo computacional.

- **Cálculo dos ângulos de ignição**

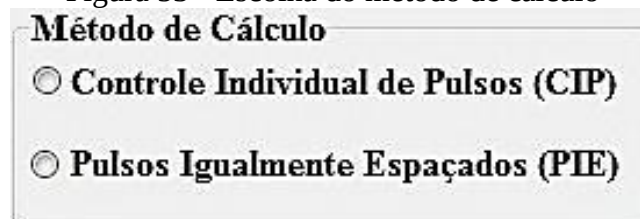
Com os dados de entrada do aplicativo carregados, pode-se realizar o cálculo dos ângulos de ignição das válvulas tiristorizadas. Para efetuar esta função devem-se executar os seguintes passos:

1º - Escolha do método de cálculo.

Conforme discorrido anteriormente, para realizar o cálculo dos ângulos de ignição primeiro deve-se selecionar o método de cálculo dos instantes de cruzamento de fases e obter o valor dos respectivos ângulos.

No aplicativo computacional desenvolvido, a escolha do método pode ser realizada pela função destacada no item (3) no campo “Método de Cálculo”. Conforme destacada na Figura 53 a seguir:

Figura 53 - Escolha do método de cálculo

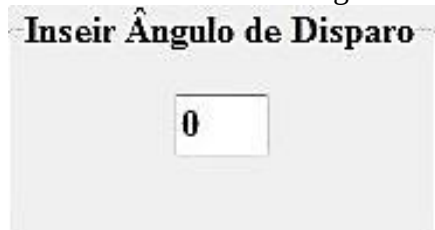


Fonte: Elaboração do próprio autor.

2° - Inserir o valor para o ângulo de ignição.

Após a escolha do método de cálculo dos ângulos de cruzamento de fase, pode-se inserir o valor correspondente ao ângulo de disparo das válvulas, tal função é efetuada pelo item destacado com o número (4). Conforme ilustrado na Figura 54 a seguir.

Figura 54 - Inserir o valor do ângulo de disparo



Fonte: Elaboração do próprio autor

3° - Realizar o cálculo dos ângulos de ignição e visualizar os resultados.

Ao realizar estes processos, calculam-se os valores dos ângulos de ignição, tal função pode ser realizada ao clicar no botão destacado pelo item (5) da tela de simulações, conforme ilustrado na Figura 55 a seguir.

Figura 55 - Botão para o cálculo dos ângulos de ignição



Fonte: Elaboração do próprio autor

Os valores obtidos para os ângulos de cruzamento de fase, os valores dos erros no circuito de disparo e dos ângulos de ignição podem ser visualizados ao selecionar a aba destacada pelo item (8) da tela de resultados, conforme ilustrado na Figura 56 a seguir.

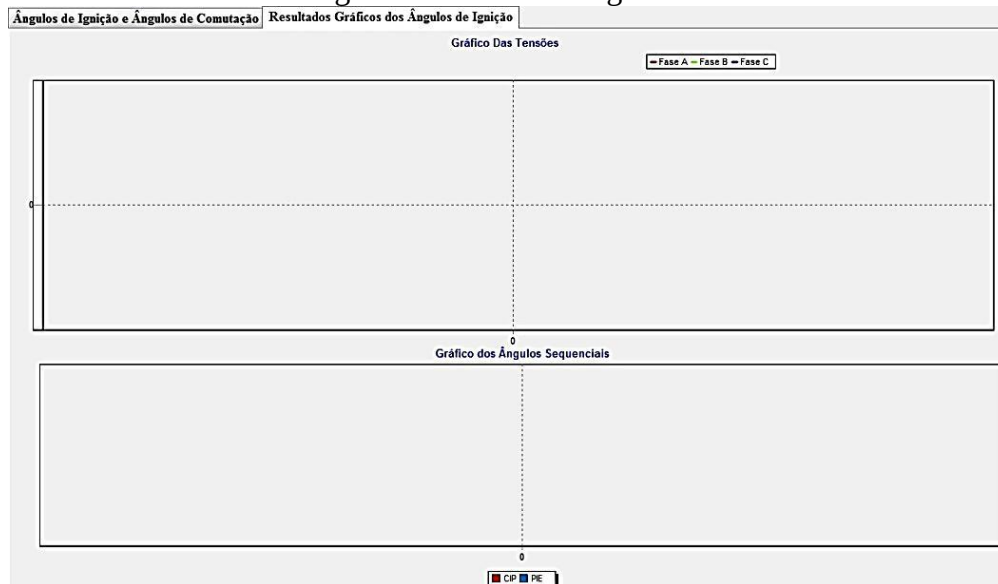
Figura 56 - Tela de resultados obtidos

Ângulos de Ignição e Ângulos de Comutação				
Sequência de Ignição	Ângulo de Cruzamento°	Erro	Ângulo de Ignição°	Comutação
1ª - Sequência de Ignição				
2ª - Sequência de Ignição				
3ª - Sequência de Ignição				
4ª - Sequência de Ignição				
5ª - Sequência de Ignição				
6ª - Sequência de Ignição				

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados dos ângulos de ignição podem ser visualizados de forma gráfica, esta função pode ser realizada ao selecionar a aba destacada pelo item (9) da tela de resultados conforme ilustrado na Figura 57 a seguir.

Figura 57 - Resultados gráficos



Fonte: Elaboração do próprio autor.

No campo “Resultados Gráficos dos ângulos de Ignição” ilustrado na Figura 57 anterior denominado “Gráfico das Tensões”, visualiza-se o diagrama das tensões trifásicas de entrada do aplicativo computacional. No campo do “Gráfico dos Ângulos Sequenciais” são marcados os instantes de ignição de cada válvula através do gráfico de barras. Podem ser visualizados os instantes de ignição para cada método de cálculo escolhido.

Conforme descrito anteriormente, conforme as condições adotadas para o sistema a ser analisado, pode ocorrer um desvio em graus para os ângulos de ignição de cada válvula, de acordo com o método escolhido. Este desvio pode ser visualizado no item (10) destacado na tela de resultados. Este “grid” de resultados dos desvios é ilustrado na Figura 58 a seguir.

Figura 58 - Resultado do desvio em graus entre os métodos de cálculos

Sequência de Ignição	1ª Sequência	2ª Sequência	3ª Sequência	4ª Sequência	5ª Sequência	6ª Sequência
Desvio em Graus Entre o Método CIP E PIE						

Fonte: Elaboração do próprio autor.

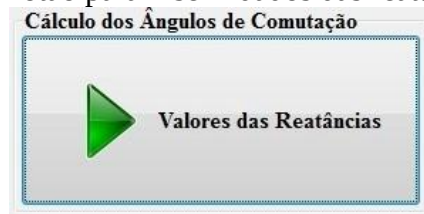
Estas etapas descritas são necessárias para a realização do cálculo dos ângulos de ignição das válvulas tiristores.

- **Cálculo dos ângulos de comutação**

Após o cálculo dos ângulos de ignição, efetua-se o cômputo dos ângulos de computação, como descrito anteriormente estes parâmetros são fundamentais para o cálculo do conteúdo harmônico de corrente.

Primeiramente devem ser inseridos os dados das reatâncias indutivas e das resistências de cada fase do sistema de alimentação trifásico, para realizar este processo clica-se no botão “Valores das Reatâncias”, destacado pelo item (6) da tela de resultados. Conforme ilustrado na Figura 59 a seguir.

Figura 59 - Botão para inserir dados das reatâncias de fase



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na sequência é apresentado ao usuário a tela de inserção dos dados necessários para o cálculo das correntes de comutação e conseqüentemente dos ângulos de comutação, conforme ilustrado na Figura 60 a seguir.

Figura 60 - Inserir valores das reatâncias de fase

 A imagem mostra uma janela de software intitulada "Computo do Ângulo de Comutação". Ela contém campos de entrada para "Reatâncias Indutivas (Ohms)" e "Resistências (Ohms)", ambas com subcampos para "Fase A", "Fase B" e "Fase C". À direita, há um campo para "Corrente de Condução Id (A)" com o valor "100" preenchido. No canto inferior direito, há um botão "Calcular" com um símbolo de igualdade (=).

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Após inserir os valores das reatâncias de cada fase e o valor da corrente de condução Id, necessários para o cálculo dos valores das correntes de comutação, clica-se no botão “Calcular” e os resultados dos ângulos de comutação serão expostos na tela de resultados. Em destaque na Figura 61 a seguir.

Figura 61- Resultado dos ângulos de comutação

Ângulos de Ignição e Ângulos de Comutação				
Sequência de Ignição	Ângulo de Cruzamento°	Erro	Ângulo de Ignição°	Comutação
1ª - Sequência de Ignição				
2ª - Sequência de Ignição				
3ª - Sequência de Ignição				
4ª - Sequência de Ignição				
5ª - Sequência de Ignição				
6ª - Sequência de Ignição				

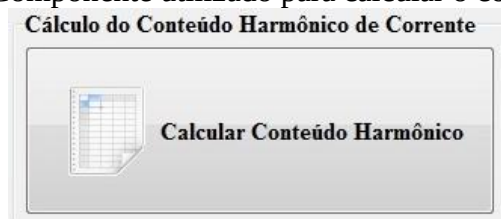
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Neste tópico foram apresentados os passos necessários para o cálculo das correntes e dos ângulos de comutação, através do aplicativo computacional desenvolvido.

- **Cálculo do conteúdo harmônico de corrente**

Após serem efetuados os cálculos dos ângulos de ignição e comutação pelo aplicativo computacional, pode ser calculado o conteúdo harmônico de corrente. Este processo é realizado ao clicar no botão “Calcular Conteúdo Harmônico” destacado pelo item (7) da tela de simulações em destaque na Figura 62 a seguir.

Figura 62 - Componente utilizado para calcular o conteúdo harmônico



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Em seguida é aberta a tela utilizada para mostrar os resultados dos cálculos dos valores do conteúdo harmônico de corrente. Conforme ilustrado na Figura 63 a seguir.

Figura 63- Tela de resultados do conteúdo harmônico de corrente

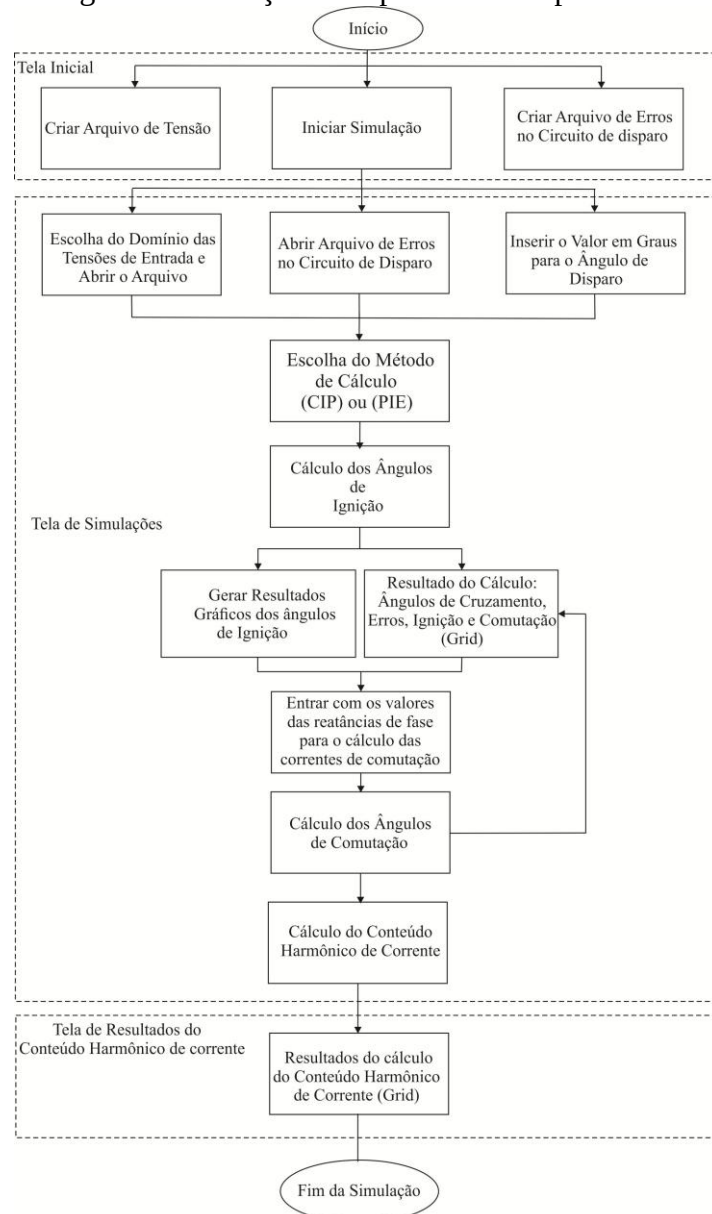
Fase A				Fase B				Fase C			
Ordem Harm.	Ia(A)	Ângulo°	% da Funda.	Ordem Harm.	Ib(A)	Ângulo°	% da Funda.	Ordem Harm.	Ic(A)	Ângulo°	% da Funda.
1				1				1			
2				2				2			
3				3				3			
4				4				4			
5				5				5			
6				6				6			
7				7				7			
8				8				8			
9				9				9			
10				10				10			
11				11				11			
12				12				12			
13				13				13			
14				14				14			
15				15				15			
16				16				16			
17				17				17			
18				18				18			
19				19				19			
20				20				20			
21				21				21			
22				22				22			
23				23				23			
24				24				24			
25				25				25			

Fonte: Elaboração do próprio autor

Conforme ilustrado na figura anterior são apresentados o conteúdo harmônico com vinte e cinco ordens harmônicas e os respectivos valores fundamentais de corrente para cada fase envolvida em Ampère. Apresenta-se o valor do ângulo de cada valor da corrente obtida e a porcentagem da corrente harmônica obtida com relação ao valor da corrente fundamental.

Na Figura 64 a seguir é apresentado o diagrama dos processos descritos anteriormente para o *software* desenvolvido.

Figura 64 - Diagrama das funções do aplicativo computacional desenvolvido



Fonte: Elaboração do próprio autor

Neste anexo apresentaram-se as funcionalidades de uma forma detalhada do aplicativo computacional desenvolvido e a sequência necessária para a realização das simulações propostas.

APÊNDICE C – COMPARATIVO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS NESTE TRABALHO E OS RESULTADOS EXISTENTES NA LITERATURA

Para que fosse possível efetuar a comparação dos resultados obtidos neste trabalho com resultados obtidos na literatura, foi considerado as mesmas condições de operação do sistema. Em algumas simulações foram adotados valores diferentes para as reatâncias de comutação, no ângulo de disparo e para o valor da corrente de condução I_d .

Os resultados para cada simulação segue as condições adotadas para cada simulação conforme descritos no Capítulo 4.

- **Comparação dos resultados para a segunda simulação. Tópico 4.2 do Capítulo 4:**

Os resultados para a determinação dos ângulos de ignição podem ser comparados através das Tabelas 5 e Tabelas 6 a seguir.

Tabela 5 - Resultados para a segunda simulação existente na literatura

Sequência de Ignição	Ângulos de Cruzamento Graus	Erros no Circuito de Disparo (Graus)	Ângulos de Ignição (Graus)	Ângulos de Comutação (Graus)
1	30,00	0,00	50,00	7,37
2	90,00	0,00	110,00	7,37
3	150,00	0,00	170,00	7,37
4	210,00	0,00	230,00	7,37
5	270,00	0,00	290,00	7,37
6	330,00	0,00	350,00	7,37

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 6 - Resultados para os ângulos de ignição e comutação obtidos neste trabalho

Sequência de Ignição	Ângulos de Cruzamento Graus	Erros no Circuito de Disparo (Graus)	Ângulos de Ignição (Graus)	Ângulos de Comutação (Graus)
1	30,00	0,00	40,00	12,87
2	90,00	0,00	100,00	12,87
3	150,00	0,00	160,00	12,87
4	210,00	0,00	220,00	12,87
5	270,00	0,00	280,00	12,87
6	330,00	0,00	340,00	12,87

Fonte: Elaboração do próprio autor

Para a determinação dos ângulos de ignição pode-se observar a coerência dos valores obtidos de acordo com as situações adotadas.

A seguir observam-se nas Tabelas 7 e 8 os resultados obtidos para o cálculo do conteúdo harmônico para a segunda simulação.

Tabela 7 - Resultado para o conteúdo harmônico calculado existente na literatura

Ordem Harmônica	Fase A			Fase B			Fase C		
	Modulo	Ângulo	%	Modulo	Ângulo	%	Modulo	Ângulo	%
1	220,4	336,1	100,00	220,4	218,1	100,00	220,4	96,1	100,00
5	43,4	60,7	19,7	43,4	180,7	19,7	43,4	300,7	19,7
7	30,5	12,9	13,8	30,5	252,9	13,8	30,5	132,9	13,8
11	18,4	97,4	8,4	18,4	217,4	8,4	18,4	337,4	8,4
13	15,1	49,6	6,8	15,1	289,6	6,8	15,1	169,6	6,8
17	10,6	134,0	4,8	10,6	254,0	4,8	10,6	14,0	4,8
19	8,9	86,2	4,1	8,9	326,2	4,1	8,9	206,2	4,1
23	6,5	170,4	2,9	6,5	290,4	2,9	6,5	50,4	2,9
25	5,5	122,4	2,5	5,5	2,4	2,5	5,5	242,4	2,5

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 8 - Resultados obtidos para o conteúdo harmônico neste trabalho

Ordem Harm.	Fase A			Fase B			Fase C		
	Modulo	Ângulo	%	Modulo	Ângulo	%	Modulo	Ângulo	%
1	220,38	0,00	100,00	220,38	120,00	100,00	220,38	-120,00	100,00
5	43,30	41,30	19,65	43,30	-186,67	19,65	43,30	-32,81	19,65
7	30,05	35,42	13,64	30,05	-125,2	13,64	30,05	61,80	13,64
11	19,04	123,25	8,64	19,04	-62,81	8,64	19,04	-79,21	8,64
13	15,89	25,66	7,18	15,89	-42,17	7,18	15,89	182,96	7,18
17	11,95	143,03	5,42	11,95	-3,82	5,42	11,95	-27,33	5,42
19	10,09	1,83	4,58	10,09	23,78	4,58	10,09	143,03	4,58
23	8,37	-190,52	3,80	8,37	-40,46	3,80	8,37	40,44	3,80
25	7,62	60,79	3,46	7,62	11,35	3,46	7,62	-127,34	3,46

Fonte: Elaboração do próprio autor

- **Comparação dos resultados para a terceira simulação. Tópico 4.3 do Capítulo 4:**

Comparação dos resultados obtidos para o método CIP.

Tabela 9 - Resultados para a terceira simulação existente na literatura

Sequência de Ignição	Ângulos de Cruzamento Graus	Erros no Circuito de Disparo (Graus)	Ângulos de Ignição (Graus)	Ângulos de Comutação (Graus)
1	26,73	0,00	46,73	12,87
2	90,93	0,00	110,93	12,87
3	150,74	0,00	170,74	12,87
4	206,73	0,00	226,73	12,87
5	270,93	0,00	290,93	12,87
6	330,74	0,00	350,74	12,87

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 10 - Resultado dos ângulos de ignição e comutação existente na literatura

Sequência de Ignição	Ângulos de Cruzamento Graus	Erros no Circuito de Disparo (Graus)	Ângulos de Ignição (Graus)	Ângulos de Comutação (Graus)
1	26,74	0,00	46,74	12,87
2	90,94	0,00	110,94	12,87
3	150,75	0,00	170,75	12,87
4	206,73	0,00	226,73	12,87
5	270,95	0,00	290,95	12,87
6	330,74	0,00	350,74	12,87

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 11 - Resultado para o conteúdo harmônico calculado existente na literatura

Ordem Harmônica	Fase A			Fase B			Fase C		
	Modulo	Ângulo	%	Modulo	Ângulo	%	Modulo	Ângulo	%
1	224,9	341,3	100,00	220,7	219,2	100,00	215,7	101,3	100,00
3	8,9	303,8	4,0	0,4	297,5	0,2	9,3	123,5	4,3
5	39,0	86,3	17,3	43,9	195,38	19,9	48,0	325,3	22,3
7	35,0	48,9	15,6	31,7	274,2	14,4	25,9	165,2	12,0
9	8,8	11,4	3,9	0,4	352,5	0,2	9,2	190,5	4,7
11	14,2	153,9	6,3	19,8	250,8	9	23,0	32,9	10,7
13	19,5	116,4	8,7	17,2	329,1	7,8	16,6	235,2	4,9
15	8,5	19,0	3,8	0,4	47,5	0,2	8,9	257,5	4,1
17	6,5	221,5	2,9	12,8	305,8	5,8	14,9	99,9	6,9
19	13,3	184,0	5,9	11,8	24,1	5,4	4,6	302,2	2,1
21	8,1	146,0	3,6	0,4	102,5	0,2	8,4	324,6	3,9
23	2,7	289,1	1,2	9,4	0,8	4,2	10,5	166,9	4,9
25	9,6	251,6	4,3	9,0	79,1	4,1	1,3	9,2	0,6

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 12 - Resultados obtidos para o conteúdo harmônico neste trabalho

Ordem Harm.	Fase A			Fase B			Fase C		
	Modulo	Ângulo	%	Modulo	Ângulo	%	Modulo	Ângulo	%
1	224,85	0,00	100,00	220,75	125,00	100,00	215,71	237,00	100,00
3	8,89	-72,53	3,95	0,45	0,00	0,20	9,33	-73,67	4,32
5	39,01	143,03	17,35	43,88	134,93	19,88	48,01	-5,79	22,26
7	34,97	47,77	15,55	31,88	143,03	14,37	25,85	1,56	11,98
9	8379	-17,31	3,89	0,45	-23,58	0,20	9,18	-52,13	4,25
11	14,24	28,54	6,33	19,82	156,62	8,98	22,98	0,77	10,65
13	19,54	-106,23	8,69	17,18	5,29	7,78	10,57	68,06	4,90
15	8,50	286,35	3,78	0,44	43,32	0,20	8,88	250,49	4,12
17	6,55	26,56	2,92	12,74	-65,90	5,77	14,90	-334,3	6,91
19	13,27	-50,51	5,90	11,82	-46,97	5,36	4,59	-79,65	2,13
21	8,12	-3,90	3,61	0,00	0,00	0,00	8,45	-10,50	3,92
23	2,67	-161,04	1,19	9,36	9,40	4,24	10,51	-33,20	4,87
25	9,57	163,59	4,25	9,04	285,70	4,09	1,32	140,03	0,61

Fonte: Elaboração do próprio autor

• **Comparação dos resultados do conteúdo harmônico calculado para a sexta simulação. Tópico 4.6 do Capítulo 4:**

Na referência considerou-se o ângulo de disparo ($\alpha = 10^\circ$), conforme ilustrado na Tabela 13 os resultados para os ângulos de ignição e comutação.

Tabela 13 - Resultados para os ângulos de ignição e comutação existentes na literatura

Sequência de Ignição	Ângulos de Cruzamento Graus	Erros no Circuito de Disparo (Graus)	Ângulos de Ignição (Graus)	Ângulos de Comutação (Graus)
1	29,18	0,00	39,18	0,00
2	88,28	0,00	98,28	0,00
3	149,09	0,00	159,09	0,00
4	210,90	0,00	220,90	0,00
5	271,71	0,00	281,71	0,00
6	330,81	0,00	340,81	0,00

Fonte: Elaboração do próprio autor

Na Tabela 14 a seguir pode-se observar o conteúdo harmônico calculado, para o trabalho publicado na literatura.

Tabela 14 - Resultado para o conteúdo harmônico calculado existente na literatura

Ordem Harm.	Fase A			Fase B			Fase C		
	Modulo	Ângulo	%	Modulo	Ângulo	%	Modulo	Ângulo	%
1	220,1	343,8	100	220,2	223,8	100	220,2	103,8	100
2	3,3	337,3	1,5	3,3	217,3	1,5	3,3	97,5	1,5
3	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	3,1	99,0	1,4	3,1	45,8	1,4	3,1	165,5	1,4
5	42,4	163,4	19,3	42,4	219,4	19,2	42,1	338,9	19,1
6	1,1	66,7	0,5	4,7	174,3	2,1	5,8	352,4	2,6
7	29,0	80,2	13,2	28,9	308,5	13,1	28,9	186,8	13,1
8	3,1	0,0	1,4	3,0	300,2	1,4	3,0	180,7	1,4
9	0,00	8,0	0,1	0,4	309,7	0,2	0,3	102,0	0,1
10	16,4	161,3	1,2	2,5	128,5	1,2	2,6	247,8	1,2
11	0,9	236,3	7,5	16,2	302,5	7,3	16,0	61,0	7,3
12	12,7	149,2	0,4	3,9	258,3	1,8	4,8	74,1	2,2
13	12,7	142,4	5,8	12,5	28,0	5,7	12,4	269,4	5,6
14	2,5	86,0	1,2	2,5	22,4	1,1	2,5	263,4	1,1
15	0,0	0,0	0,1	0,5	28,2	0,2	0,3	199,1	0,1
16	1,9	282,1	0,9	1,9	210,0	0,9	1,9	328,3	0,9
17	7,8	307,7	3,6	7,6	24,6	3,4	7,4	141,4	3,4
18	0,8	230,0	0,4	2,8	341,2	1,3	3,3	134,1	1,6
19	8,1	223,1	2,8	5,8	106,8	2,7	5,7	350,5	2,6
20	1,8	243,54	0,8	1,7	102,7	0,8	1,8	344,6	0,8
21	0,0	0,0	0,1	0,4	105,2	0,2	0,3	290,5	0,1
22	1,2	165,0	0,5	1,1	287,3	0,5	1,1	44,3	0,5
23	3,5	338,7	1,6	3,3	102,9	1,5	3,2	213,2	1,4
24	0,6	16,4	0,3	1,6	60,7	0,7	2,1	229,1	0,9
25	2,06	305,7	1,2	2,4	178,6	1,1	2,2	68,5	1,0

Fonte: Elaboração do próprio autor

Para os resultados dos cálculos dos ângulos de ignição e comutação para esta simulação o ângulo de disparo foi considerado igual a zero. Na Tabela 15 a seguir podem ser visualizados tais resultados.

Tabela 15 - Resultados para os ângulos de ignição e comutação calculados neste trabalho

Sequência de Ignição	Ângulos de Cruzamento Graus	Erros no Circuito de Disparo (Graus)	Ângulos de Ignição (Graus)	Ângulos de Comutação (Graus)
1	24,39	0,00	24,39	0,00
2	98,17	0,00	98,17	0,00
3	144,37	0,00	144,37	0,00
4	215,61	0,00	215,61	0,00
5	264,38	0,00	264,38	0,00
6	335,62	0,00	335,62	0,00

Fonte: Elaboração do próprio autor

Para esta simulação foi calculado o conteúdo harmônico conforme ilustrado na Tabela

16.

Tabela 16 - Resultados obtidos para o conteúdo harmônico neste trabalho

Ordem Harm.	Fase A			Fase B			Fase C		
	Modulo	Ângulo	%	Modulo	Ângulo	%	Modulo	Ângulo	%
1	219,47	0,00	100,00	219,49	-120,00	100,00	219,45	120,00	100,00
2	21,49	135,64	9,79	21,52	-322,96	9,80	21,50	22,90	9,80
3	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	21,07	-22,77	9,60	21,11	-139,20	9,62	21,08	318,44	9,61
5	38,91	-51,47	17,73	38,88	149,97	17,71	38,92	-89,16	17,74
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	24,97	-150,75	11,10	24,36	73,56	11,10	24,35	51,30	11,10
8	19,47	-323,20	8,87	19,48	22,53	8,88	19,49	134,95	8,88
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	18,32	321,28	8,35	18,36	-23,09	8,36	18,31	-146,8	8,35
11	9,47	150,69	4,32	9,44	-90,16	4,30	9,74	-52,15	4,32
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	4,95	50,92	4,92	12,5	-152,43	2,24	4,93	89,31	2,25
14	15,45	22,68	15,43	2,5	129,22	7,03	15,46	-326,4	7,05
15	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	13,78	-140,55	13,80	1,9	315,87	6,29	13,77	-23,33	6,27
17	1,24	-231,19	1,28	7,6	-53,07	0,58	1,26	156,76	0,57
18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	3,34	98,00	3,38	5,8	51,19	1,54	3,35	-155,3	1,53
20	10,20	135,87	10,17	1,7	135,87	4,63	10,21	22,07	4,65
21	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	8,35	-23,13	8,35	1,1	-155,11	3,80	8,33	315,86	3,79
23	6,06	-51,93	6,08	3,3	147,73	2,77	6,06	-94,93	2,77
24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	6,80	-150,49	6,84	2,4	62,45	3,12	6,80	50,26	3,10

Fonte: Elaboração do próprio autor