

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Fábio Vasconcelos do Carmo Rodrigues

PROJETO E SIMULAÇÃO DE CONVERSORES DE TANQUE RESSONANTE

Leopoldina
2026

FÁBIO VASCONCELOS DO CARMO RODRIGUES

PROJETO E SIMULAÇÃO DE CONVERSORES DE TANQUE RESSONANTE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, do Campus Leopoldina, como parte do requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Josué Lima da Silva

**Leopoldina
2026**

Rodrigues, Fábio Vasconcelos do Carmo.
R696a Projeto e simulação de conversores de tanque ressonante. / Fábio
Vasconcelos do Carmo. – 2026.
113 f. : il., gráfs.; figs.

Orientador: Josué Lima da Silva.
Bibliografia: f. 82-83.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais, *Campus* Leopoldina, apresentada
a curso de Engenharia de Controle e Automação. Departamento de
Eletroeletrônica, 2026.

1. Conversores elétricos. 2. Modelagem. 3. Simulação computacional.
4. Transformadores. I. Silva, Josué Lima da. II. Título.

CDU: 621.314

Elaboração da ficha catalográfica pela bibliotecária Luzia Adriana Damasceno,
CRB 6º - 2305 / CEFET-MG *campus* Leopoldina.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO - LP



FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC N° 10/2026 - CECALP (11.51.20)

N° do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO

Leopoldina-MG, 18 de junho de 2026.

FÁBIO VASCONCELOS DO CARMO RODRIGUES

PROJETO E SIMULAÇÃO DE CONVERSORES DE TANQUE RESSONANTE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, do Campus Leopoldina, como parte do requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em 19 de junho de 2026

Banca Examinadora:

Prof. M. Eng. Josué Lima da Silva (CEFET-MG) - Presidente
Prof. M. Eng. Marlon José do Carmo (CEFET-MG)
Prof. M. Eng. Pedro Henrique Correa Lopes (WEG)

**Leopoldina
2026**

(Assinado digitalmente em 18/06/2026 16:02)

JOSUE LIMA DA SILVA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEELP (11.61.04)
Matricula: ###638#4

(Assinado digitalmente em 26/06/2026 10:43)

MARLON JOSE DO CARMO
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEELP (11.61.04)
Matricula: ###986#3

(Assinado digitalmente em 24/06/2026 15:20)

PEDRO HENRIQUE CORRÊA LOPES
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.227-##

Processo Associado: 23062.031379/2026-18

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **10**, ano: **2026**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão: **18/06/2026** e o código de verificação: **8c1b189060**

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela força, pela proteção e pela oportunidade de concluir esta etapa tão importante da minha formação acadêmica.

Agradeço à minha família, pelo apoio, pela paciência e por estar presente ao longo dessa trajetória. Mesmo diante das dificuldades, o incentivo recebido foi fundamental para que eu pudesse seguir em frente e chegar até aqui.

Ao meu orientador, Prof. Josué Lima da Silva, agradeço pela orientação, pela disponibilidade, pelas contribuições técnicas e pelo acompanhamento durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também aos professores do curso de Engenharia de Controle e Automação do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Leopoldina, pelos ensinamentos compartilhados ao longo da graduação e pela contribuição para minha formação profissional e pessoal.

Aos colegas e amigos que fizeram parte dessa caminhada, deixo meu agradecimento pelo companheirismo, pelas conversas, pelo apoio nos momentos difíceis e pelas trocas de conhecimento ao longo do curso.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso.

RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto preliminar, a modelagem, a simulação e a comparação de conversores CC-CC ressonantes de tanque LC e LLC, considerando diferentes configurações de chaveamento em meia ponte e ponte completa. O estudo contempla seis topologias: meia ponte LC série, meia ponte LC paralelo, ponte completa LC série, ponte completa LC paralelo, meia ponte LLC e ponte completa LLC. A pesquisa foi desenvolvida por meio de abordagem aplicada, quantitativa e baseada em simulação computacional, utilizando o software PLECS Standalone 5.0 para a implementação dos circuitos e o Python para automação da parametrização, execução das simulações, coleta de sinais e pós-processamento dos resultados. Foram analisadas grandezas elétricas como tensão de entrada, tensão no tanque ressonante, corrente no primário, tensão de saída, corrente de saída e potência entregue à carga. Os resultados mostraram que a utilização de uma mesma base preliminar de parâmetros não garante respostas equivalentes entre as topologias, pois cada estrutura apresenta função de ganho própria e comportamento distinto em relação à transferência de energia. Observou-se que, nas topologias LC série e LLC, as configurações em ponte completa apresentaram tensão de saída superior às respectivas versões em meia ponte, enquanto as topologias LC paralelo apresentaram ganho mais elevado para os parâmetros adotados. Para aproximar a tensão de saída da referência estabelecida, foi aplicado um ajuste iterativo da relação de transformação do transformador. Conclui-se que a simulação computacional, associada à automação em Python, constitui uma ferramenta adequada para análise preliminar, comparação e identificação de limitações em conversores ressonantes, servindo como base para estudos futuros envolvendo modelagem analítica, controle em malha fechada, análise de perdas e validação experimental.

Palavras-chave: conversores cc-cc; conversores ressonantes; tanque lc; tanque llc; PLECS; Python.

ABSTRACT

This work presents the preliminary design, modeling, simulation, and comparison of LC and LLC resonant tank DC-DC converters, considering different half-bridge and full-bridge switching configurations. The study includes six topologies: half-bridge series LC, half-bridge parallel LC, full-bridge series LC, full-bridge parallel LC, half-bridge LLC, and full-bridge LLC. The research was developed through an applied, quantitative approach based on computational simulation, using PLECS Standalone 5.0 for circuit implementation and Python for automating parameterization, simulation execution, signal acquisition, and post-processing of results. Electrical quantities such as input voltage, resonant tank voltage, primary current, output voltage, output current, and power delivered to the load were analyzed. The results showed that using the same preliminary parameter set does not ensure equivalent responses among the topologies, since each structure has its own gain function and distinct behavior regarding energy transfer. It was observed that, in the series LC and LLC topologies, the full-bridge configurations presented higher output voltage than their corresponding half-bridge versions, while the parallel LC topologies presented higher gain for the adopted parameters. In order to bring the output voltage closer to the established reference, an iterative adjustment of the transformer turns ratio was applied. It is concluded that computational simulation, combined with Python automation, is an appropriate tool for preliminary analysis, comparison, and identification of limitations in resonant converters, providing a basis for future studies involving analytical modeling, closed-loop control, loss analysis, and experimental validation.

Keywords: dc-dc converters; resonant converters; lc tank; llc tank; PLECS; Python.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO - LP



TERMO DE RESPONSABILIDADE Nº 140/2026 - CECALP (11.51.20)

Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO

Leopoldina-MG, 18 de junho de 2026.

Eu, **FÁBIO VASCONCELOS DO CARMO RODRIGUES**, matrícula **201223510166**, discente do Curso de Engenharia de Controle e Automação, declaro para os devidos fins, que o presente Trabalho de Conclusão de Curso, de título **PROJETO E SIMULAÇÃO DE CONVERSORES DE TANQUE RESSONANTE** é de minha autoria e que estou ciente dos:

- Artigos 297 a 299 do Código Penal;
 - Decreto-Lei n.º 2.848 de 7 de dezembro de 1940;
 - Lei n.º 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, sobre os Direitos Autorais;
 - Regulamento Disciplinar Discente do CEFET-MG;
- E que plágio consiste na reprodução de obra alheia e submissão dela como trabalho próprio ou na inclusão, em trabalho próprio, de ideias, textos, tabelas ou ilustrações (quadros, figuras, gráficos, fotografias, retratos, lâminas, desenhos, organogramas, fluxogramas, plantas, mapas e outros) transcritos de obras de terceiros sem a devida e correta citação da referência.

Por ser verdade, e por ter ciência do referido artigo, firmo a presente declaração, isentando o (a) professor(a) **M. Eng. Josué Lima da Silva** (orientador), os membros da banca examinadora e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Leopoldina, de qualquer responsabilidade.

*(Assinado digitalmente em
26/06/2026 12:41) Fábio
Vasconcelos do Carmo Rodrigues
DISCENTE
Matrícula: 2012#####6*

Processo Associado: 23062.031379/2026-18

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **140**, ano: **2026**, tipo: **TERMO DE RESPONSABILIDADE**, data de emissão: **18/06/2026** e o código de verificação: **7d8ed08f17**

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 – Fluxograma do procedimento metodológico adotado no trabalho.....	47
Figura 3.2 – Exemplo de modelo de conversor ressonante implementado no PLECS.	48
Figura 3.3 - Estrutura de integração entre Python e PLECS por meio de comunicação XML-RPC.....	50
Figura 3.4 – Organização das topologias de conversores ressonantes analisadas.....	51
Figura 3.5 – Pontos de medição das principais grandezas analisadas nos modelos simulados.	54
Figura 3.6 – Fluxo operacional utilizado para execução e análise das simulações.	55
Figura 4.1 – Estrutura geral considerada para os conversores ressonantes simulados.....	58
Figura 4.2 – Modelo do conversor HB_LC_Serie implementado no PLECS.....	64
Figura 4.3 - Modelo do Converso HB_LC_Paralelo implementado no PLECS.....	65
Figura 4.4 – Modelo do conversor FB_LC_Serie implementado no PLECS.	66
Figura 4.5– Modelo do conversor FB_LC_Paralelo implementado no PLECS.....	66
Figura 4.6 – Modelo do conversor HB_LLC implementado no PLECS.....	67
Figura 4.7 – Modelo do conversor FB_LLC implementado no PLECS.	68
Figura 5.1 – Exemplo de formas de onda simuladas no intervalo final de análise.	70
Figura 5.2 – Comparação das tensões de saída antes e depois do ajuste iterativo de n.....	75
Figura 5.3 – Comparação das relações de transformação finais das topologias analisadas.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Parâmetros de simulação adotados.....	52
Tabela 4.1– Parâmetros gerais adotados no projeto preliminar.....	58

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição
C_o	Capacitância do capacitor de saída.
C_r	Capacitância do capacitor ressonante.
D	Razão cíclica do sinal de chaveamento.
f_n	Frequência normalizada.
f_r	Frequência de ressonância do tanque ressonante.
f_s	Frequência de chaveamento.
i_o	Corrente de saída instantânea.
i_t	Corrente no tanque ressonante.
I_o	Corrente média de saída.
i_{o_ref}	Corrente de saída de referência.
L_m	Indutância magnetizante.
L_r	Indutância ressonante.
L_s	Indutância série do tanque ressonante.
(M_{eq})	Ganho equivalente obtido a partir da simulação.
n	Relação de transformação do transformador.
P_o	Potência de saída.
P_{o_ref}	Potência de saída de referência.
Q	Fator de qualidade do tanque ressonante.
R_{ac}	Resistência equivalente em corrente alternada vista pelo tanque ressonante.
R_e	Resistência equivalente refletida ao circuito ressonante.
R_o	Resistência de carga.
T_s	Período de chaveamento.
T_d	Tempo morto aplicado aos sinais de chaveamento.
V_1	Valor eficaz da componente fundamental da tensão aplicada ao tanque ressonante.

Símbolo	Descrição
V_{dc}	Tensão contínua de entrada.
V_o	Tensão de saída.
V_{o_ref}	Tensão de saída de referência.
V_{o_sim}	Tensão média de saída obtida por simulação.
V_t	Tensão no tanque ressonante.
Z_0	Impedância característica do tanque ressonante.
Z_r	Impedância característica do tanque ressonante.
π	Constante matemática pi, aproximadamente igual a 3,14159.
Ω	Unidade de resistência elétrica, ohm.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Contextualização e motivação.....	17
1.2	Problema de pesquisa.....	24
1.3	Objetivo geral	25
1.4	Objetivos específicos	25
1.5	Organização do trabalho.....	26
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	28
2.1	Eletrônica de Potência e conversores estáticos.....	28
2.2	Conversores CC-CC chaveados.....	30
2.3	Perdas por comutação e operação em alta frequência.....	31
2.4	Circuitos ressonantes.....	33
2.5	Tanque ressonante LC	37
2.6	Conversores ressonantes.....	39
2.7	Comutação suave: ZVS e ZCS	42
2.8	Topologias meia ponte e ponte completa	43
2.9	Conversores LC série, LC paralelo e LLC	44
3	METODOLOGIA.....	47
3.1	Caracterização da pesquisa.....	47
3.2	Ferramenta de simulação utilizada.....	48
3.3	Integração entre simulação e automação computacional.....	49
3.4	Topologias analisadas	50
3.5	Parâmetros de simulação	51
3.6	Grandezas analisadas	53
3.7	Procedimento de simulação	54
4	PROJETO E SIMULAÇÃO DOS CONVERSORES DE TANQUE RESSONANTE.....	56
4.1	Especificações gerais do projeto	56
4.2	Critérios de dimensionamento do tanque ressonante	58
4.3	Conversor meia ponte LC série	63
4.4	Conversor meia ponte LC paralelo	64
4.5	Conversor ponte completa LC série	65
4.6	Conversor ponte completa LC paralelo.....	66
4.7	Conversor meia ponte LLC.....	67

4.8	Conversor ponte completa LLC.....	67
4.9	Estratégia de varredura de frequência	68
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
5.1	Verificação funcional dos modelos simulados	69
5.2	Análise das formas de onda de tensão e corrente	69
5.3	Resultados dos conversores meia ponte	70
5.4	Resultados dos conversores ponte completa	71
5.5	Resultados dos conversores LC série.....	72
5.6	Resultados dos conversores LC paralelo	72
5.7	Resultados dos conversores LLC.....	73
5.8	Influência da frequência de chaveamento	74
5.9	Comparação geral entre as topologias	74
5.10	Limitações do estudo	76
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	77
6.1	Conclusões	77
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	79
	REFERÊNCIAS	82
	APÊNDICE A – SCRIPT DE DIMENSIONAMENTO PRELIMINAR DOS CONVERSORES	84
	APÊNDICE B – BIBLIOTECA DE COMUNICAÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS DO PLECS	89
	APÊNDICE C – SCRIPT DE CONSOLIDAÇÃO DAS SIMULAÇÕES E AJUSTE ITERATIVO DA RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO	92
	APÊNDICE D – SCRIPT DE GERAÇÃO DAS FIGURAS DE RESULTADOS.....	101

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e motivação

A Eletrônica de Potência constitui uma área da Engenharia Elétrica dedicada ao processamento, à conversão e ao controle da energia elétrica por meio de dispositivos semicondutores de potência, elementos passivos, sistemas magnéticos e estratégias de acionamento. Diferentemente de circuitos eletrônicos destinados predominantemente ao processamento de sinais, os sistemas de Eletrônica de Potência atuam diretamente sobre o fluxo de energia entre fontes e cargas, possibilitando modificar níveis de tensão e corrente, controlar a potência transferida e adequar as características elétricas disponíveis aos requisitos de diferentes aplicações (Rashid, 2014).

A importância dessa área tem aumentado à medida que diferentes setores da sociedade passam por processos de eletrificação e de integração de novas formas de geração, armazenamento e consumo de energia. Sistemas fotovoltaicos e eólicos, baterias, veículos elétricos, centros de processamento de dados, telecomunicações, automação industrial e fontes eletrônicas de alimentação dependem de estágios de conversão de potência para realizar a interface entre fontes e cargas com características elétricas distintas. Nesse contexto, a expansão das fontes renováveis aumenta a necessidade de sistemas capazes de realizar conversão, condicionamento e integração de energia entre diferentes fontes, níveis de tensão e cargas. As projeções da International Energy Agency indicam a continuidade do crescimento da participação das tecnologias renováveis nos próximos anos, reforçando a importância de soluções eficientes para sua integração aos sistemas elétricos (IEA, 2024).

A operação em frequências de chaveamento mais elevadas pode contribuir para a redução do volume de determinados componentes passivos e, conseqüentemente, para o aumento da densidade de potência dos conversores. O aumento da frequência também torna mais relevantes as perdas associadas às transições dos dispositivos semicondutores e ao comportamento dos elementos magnéticos. O desenvolvimento de conversores de alta frequência envolve, portanto, um compromisso entre frequência de operação, eficiência, volume dos componentes, tecnologia dos semicondutores e estratégia de conversão adotada (Wang et al., 2020).

Os circuitos utilizados para realizar essas funções são denominados conversores estáticos de

potência e podem ser classificados de acordo com a natureza das grandezas presentes em sua entrada e saída. Os conversores CA-CC, usualmente denominados retificadores, transformam uma grandeza alternada em uma grandeza contínua. Os conversores CC-CA, denominados inversores, realizam o processo inverso, produzindo uma tensão ou corrente alternada a partir de uma fonte contínua. Os conversores CC-CC modificam um determinado nível de tensão contínua para outro, enquanto os conversores CA-CA realizam o processamento de uma alimentação alternada mantendo a natureza alternada da saída, podendo modificar características como amplitude ou frequência (Rashid, 2014).

Essa classificação não significa que um sistema de conversão deva conter apenas um desses processos. Em um conversor CC-CC isolado de alta frequência, por exemplo, a tensão contínua de entrada pode inicialmente alimentar um estágio inversor, responsável por produzir uma tensão alternada de alta frequência. Essa grandeza é então aplicada ao estágio de transferência de energia e ao transformador, sendo posteriormente retificada e filtrada para produzir novamente uma tensão contínua na saída. Dessa forma, um único sistema CC-CC pode combinar internamente os princípios associados a inversores, transformadores de alta frequência e retificadores.

A análise utiliza duas configurações para o estágio inversor: a meia ponte, denominada Half-Bridge (HB), e a ponte completa, denominada Full-Bridge (FB). Em ambas, dispositivos semicondutores são comandados de forma a converter a tensão contínua do barramento de entrada em uma tensão alternada de alta frequência aplicada ao tanque ressonante. Entretanto, as configurações HB e FB diferem quanto ao número de dispositivos semicondutores, à utilização da tensão do barramento e à amplitude da forma de onda aplicada ao circuito ressonante. A literatura clássica sobre conversores ressonantes utiliza essas estruturas para analisar diferentes configurações de tanques série, paralelo e série-paralelo, evidenciando que a combinação entre estágio inversor e tanque influencia diretamente o comportamento do conversor (Steigerwald, 1988).

A operação dos conversores modernos de potência depende, em grande parte, da utilização dos dispositivos semicondutores como chaves eletrônicas. Em uma representação ideal, uma chave em estado de condução apresentaria tensão nula entre seus terminais, enquanto uma chave bloqueada apresentaria corrente nula. Nessas duas condições ideais, a potência dissipada seria reduzida. Na prática, entretanto, os semicondutores possuem tempos finitos de entrada e saída de condução, de modo que durante as transições podem coexistir corrente através do dispositivo

e tensão entre seus terminais.

Quando essas transições ocorrem com valores simultaneamente significativos de tensão e corrente, caracteriza-se a denominada comutação dura, ou *hard-switching*. Nessa condição, há dissipação de energia durante cada evento de chaveamento. Como esses eventos são repetidos a cada período de operação, o aumento da frequência de chaveamento tende a aumentar a participação das perdas de comutação nas perdas totais do conversor. Além disso, transições rápidas de tensão e corrente, associadas a elevados valores de dv/dt e di/dt , representam aspectos relevantes para o projeto dos semicondutores, circuitos de acionamento, layout e compatibilidade eletromagnética (Rashid, 2014; Wang et al., 2020). A literatura sobre conversores de alta frequência identifica as perdas associadas ao chaveamento e o projeto dos componentes magnéticos como limitações fundamentais para o aumento da frequência de operação (Wang et al., 2020).

Apesar dessas limitações, elevar a frequência de chaveamento pode trazer benefícios significativos. Em várias aplicações, uma maior frequência permite reduzir a quantidade de energia que precisa ser armazenada por ciclo nos elementos passivos, possibilitando a utilização de indutores, transformadores e capacitores de menores dimensões. Consequentemente, a operação em alta frequência pode contribuir para a redução de volume e massa e para o aumento da densidade de potência do sistema. Entretanto, esse benefício somente é efetivo quando o aumento da frequência não produz perdas incompatíveis com os requisitos térmicos e de eficiência do conversor (Wang et al., 2020; Guan et al., 2021). O aumento da frequência de operação e da relação de conversão impõe desafios relacionados aos esforços elétricos, às perdas e ao dimensionamento dos componentes. Essas características influenciam a seleção da topologia e dos dispositivos utilizados no estágio de potência (Guan et al., 2021).

Surge, portanto, um compromisso entre frequência de chaveamento, perdas, eficiência e densidade de potência. Frequências reduzidas tendem a aliviar determinadas perdas de comutação, mas podem demandar componentes magnéticos e filtros de maiores dimensões. Por outro lado, frequências mais elevadas favorecem a redução desses elementos, porém tornam as perdas produzidas durante as transições dos semicondutores mais relevantes. Esse compromisso motivou o desenvolvimento de técnicas de comutação destinadas a reduzir a energia dissipada durante os eventos de entrada e saída de condução (Lee, 1988; Wang et al., 2020).

Entre essas técnicas encontra-se a comutação suave, denominada *soft-switching*. Seu princípio

consiste em realizar a transição do semicondutor em uma condição na qual uma das grandezas diretamente relacionadas à potência instantânea dissipada seja reduzida. Na comutação em tensão nula, denominada Zero Voltage Switching (ZVS), busca-se realizar a transição quando a tensão sobre o dispositivo é aproximadamente nula. Na comutação em corrente nula, denominada Zero Current Switching (ZCS), busca-se realizar a transição quando a corrente através do dispositivo é aproximadamente nula.

O desenvolvimento das técnicas ZVS e ZCS está diretamente relacionado à evolução dos conversores ressonantes e quase-ressonantes de alta frequência. Lee (1988) apresenta tecnologias de conversão quase ressonante baseadas justamente nos princípios de ZCS e ZVS, relacionando essas técnicas à melhoria do desempenho de conversores operando em frequências elevadas. O trabalho constitui uma das referências clássicas sobre a utilização da ressonância para reduzir as perdas associadas às transições dos dispositivos semicondutores.

A redução da sobreposição entre tensão e corrente durante o chaveamento pode diminuir a energia dissipada em cada transição. Dessa forma, a comutação suave possibilita explorar frequências de operação mais elevadas com menor penalização decorrente das perdas de chaveamento quando comparada, nas condições adequadas, à comutação dura. Essa característica está associada ao desenvolvimento de conversores de elevada frequência e elevada densidade de potência e permanece relevante nas tecnologias contemporâneas de conversão de energia (Lee, 1988; Wang et al., 2020).

Entretanto, a simples presença de um circuito ressonante não garante automaticamente a obtenção de ZVS ou ZCS. A ocorrência dessas condições depende da topologia, dos parâmetros do circuito, da frequência de chaveamento, da carga e do ponto de operação. Em conversores LLC, por exemplo, o estabelecimento de condições de comutação suave está associado à região de operação e às características do tanque ressonante, sendo objeto específico de análise e projeto (Mudiyanselage; Keshmiri; Emadi, 2023; Rashidi et al., 2020). Rashidi et al. (2020) apresentam um conversor LLC de ponte completa cuja análise e controle consideram a manutenção da comutação suave como parte do projeto.

Os conversores ressonantes inserem-se nesse contexto como uma classe de conversores na qual os elementos reativos participam deliberadamente do processo de transferência de energia. Indutâncias e capacitâncias são associadas para constituir um tanque ressonante, cuja impedância apresenta comportamento dependente da frequência. Dessa maneira, a interação

entre o estágio inversor, o tanque e a carga modificam as formas de onda e o ganho do conversor conforme o ponto de operação (Steigerwald, 1988; Almeida, 2014).

Essa característica representa uma diferença importante em relação aos conversores PWM convencionais. Em um conversor CC-CC Buck ideal, por exemplo, operando em modo de condução contínua, a relação entre a tensão de entrada e a tensão de saída está diretamente associada à razão cíclica do chaveamento. O indutor e o capacitor desempenham funções essenciais no armazenamento de energia e na redução das ondulações das grandezas elétricas, porém o funcionamento do conversor não depende de operar deliberadamente em torno de uma condição de ressonância.

Em um conversor ressonante, por outro lado, a associação entre os elementos indutivos e capacitivos é projetada de forma que a resposta do tanque participe diretamente da transferência de energia. A corrente e a tensão associadas ao tanque podem apresentar comportamento aproximadamente senoidal, e o ganho passa a depender de variáveis como a frequência de chaveamento, a frequência de ressonância, a carga equivalente, o fator de qualidade e a própria configuração dos elementos reativos. A literatura demonstra que diferentes arranjos ressonantes apresentam características de ganho, esforços nos componentes e modos de operação distintos (Steigerwald, 1988; Johnson; Erickson, 1988). O trabalho de Johnson e Erickson (1988), especificamente, desenvolve uma análise de regime permanente e de projeto do conversor ressonante paralelo, evidenciando que essa estrutura possui modos de funcionamento próprios e não pode ser tratada como equivalente ao conversor série.

Portanto, o que caracteriza fundamentalmente um conversor ressonante não é apenas a presença de um indutor e de um capacitor em sua estrutura, mas o emprego intencional da resposta ressonante como parte do mecanismo de transferência e processamento da energia. A partir do comportamento da impedância e das relações de fase estabelecidas pelo tanque, torna-se possível moldar as formas de onda de tensão e corrente e, em determinadas condições de projeto e operação, estabelecer situações favoráveis à comutação suave (Lee, 1988; Steigerwald, 1988).

Nesse sentido, conversores ressonantes não devem ser considerados universalmente superiores às topologias PWM convencionais. A escolha de um conversor depende dos requisitos da aplicação, incluindo potência, faixa de tensão, carga, custo, complexidade, estratégia de controle e frequência de operação. Sua vantagem torna-se particularmente relevante quando se deseja elevar a frequência de chaveamento e reduzir as perdas associadas às transições dos

semicondutores. Como contrapartida, os conversores ressonantes apresentam maior dependência do ponto de operação e dos parâmetros do tanque, tornando sua análise e seu projeto mais complexos (Steigerwald, 1988; Wang et al., 2020; Mudiyansele; Keshmiri; Emadi, 2023).

Entre as configurações utilizadas em conversores ressonantes encontram-se os tanques LC série, LC paralelo e LLC. Na configuração LC série, os elementos ressonantes encontram-se associados de forma que a corrente transferida à carga esteja diretamente relacionada à corrente do ramo ressonante. Na configuração LC paralelo, a disposição do elemento capacitivo em relação à carga modifica a impedância equivalente e produz uma característica de ganho distinta da configuração série. Steigerwald (1988) analisa diferentes configurações de conversores ressonantes em meia ponte, incluindo estruturas série, paralelo e série-paralelo, evidenciando que a configuração do tanque influencia de forma significativa o comportamento do conversor.

O tanque LLC incorpora uma segunda indutância, usualmente associada à indutância magnetizante do transformador, além da indutância e da capacitância ressonantes. Essa estrutura apresenta uma resposta em frequência mais complexa e é amplamente empregada em aplicações nas quais a operação em alta frequência e a obtenção de condições favoráveis à comutação suave são desejáveis. Diferentes configurações de conversores ressonantes, incluindo a topologia LLC, têm sido investigadas em aplicações que exigem alta frequência de operação, isolamento e elevada densidade de potência. Em aplicações veiculares, esses conversores são estudados considerando aspectos de topologia, modelagem e estratégias de controle (Mudiyansele; Keshmiri; Emadi, 2023).

Os trabalhos revisados tratam de aspectos complementares dos conversores ressonantes. Almeida (2014) sistematiza fundamentos e associações de tanques; Guan et al. (2021) discutem desafios relacionados à operação em alta frequência e à elevada relação de conversão; e Mudiyansele, Keshmiri e Emadi (2023) concentram-se em topologias ressonantes e estratégias de controle para aplicações veiculares. Em conjunto, essas contribuições fundamentam a análise das estruturas estudadas, enquanto a comparação das seis configurações sob uma mesma base de simulação constitui o foco específico deste trabalho.

A utilização de modelagem matemática e simulação computacional constitui uma etapa recorrente no estudo desses circuitos. A simulação permite observar formas de onda e grandezas internas, avaliar respostas diante de diferentes parâmetros e investigar o funcionamento de uma

estrutura antes da construção de um protótipo. Entretanto, a simulação representa o comportamento do modelo implementado e seus resultados devem ser interpretados dentro das hipóteses e limitações adotadas no desenvolvimento do circuito.

Ribeiro e Silva (2023) desenvolveram a modelagem, o projeto e a análise numérica de um conversor CC-CC trifásico série ressonante aplicado à microgeração fotovoltaica, comparando os resultados simulados com os valores teóricos. O estudo evidencia o uso da simulação como etapa de verificação de conversores ressonantes em trabalhos de graduação.

Neves (2022), em Trabalho de Conclusão de Curso da Universidade Federal de Santa Catarina, realizou um estudo comparativo entre topologias de conversores CC-CC isolados aplicadas a um sistema auxiliar de baixa tensão para veículos elétricos. Embora as topologias e o objetivo específico daquele trabalho sejam diferentes dos adotados neste estudo, sua abordagem demonstra a utilização da análise comparativa como instrumento para investigar o comportamento de diferentes estruturas de conversão submetidas a requisitos de aplicação definidos.

É importante delimitar, contudo, o alcance da presente pesquisa. Os conceitos de comutação suave, ZVS e ZCS constituem parte da fundamentação teórica e da motivação para o estudo dos conversores ressonantes, mas sua ocorrência não é adotada neste trabalho como critério experimentalmente comprovado de validação das topologias. Da mesma forma, o trabalho não se propõe a realizar uma otimização analítica completa de cada conversor. A investigação é desenvolvida como um projeto preliminar apoiado por modelagem e simulação computacional, com foco na implementação das estruturas, na observação das principais grandezas elétricas e na comparação de seus comportamentos.

No contexto deste trabalho, a análise comparativa de diferentes topologias permite investigar como a estrutura do conversor influencia as formas de onda e as principais grandezas elétricas. Para isso, são consideradas configurações em meia ponte e ponte completa associadas aos tanques LC série, LC paralelo e LLC. A análise é realizada por meio de simulação computacional, que possibilita avaliar o comportamento dos circuitos, identificar limitações e comparar diferentes configurações sem os custos e riscos associados à implementação experimental inicial.

Diante desse contexto, este Trabalho de Conclusão de Curso aborda o projeto preliminar, a modelagem, a simulação e a comparação de conversores CC-CC ressonantes de tanque LC e

LLC no ambiente PLECS, com apoio de automação computacional em Python. O estudo busca contribuir para a compreensão do comportamento dessas diferentes estruturas e estabelecer uma base para análises posteriores mais abrangentes, incluindo modelagem analítica, análise de perdas, estratégias de controle e validação experimental.

1.2 Problema de pesquisa

A utilização de circuitos ressonantes em conversores de potência introduz características de funcionamento diferentes daquelas encontradas em conversores PWM convencionais. O comportamento do tanque depende da associação entre seus elementos reativos, da frequência de operação, da carga e das condições estabelecidas pelo estágio inversor. Consequentemente, topologias distintas podem apresentar respostas diferentes mesmo quando inicialmente submetidas a uma mesma base de parâmetros (Steigerwald, 1988; Johnson; Erickson, 1988).

Essa característica torna relevante investigar como diferentes configurações de tanque e de estágio inversor afetam as grandezas observadas nos modelos. A análise considera três estruturas ressonantes — LC série, LC paralelo e LLC — associadas a estágios inversores em meia ponte e ponte completa. As seis configurações resultantes são submetidas a uma base preliminar de parâmetros e analisadas por meio de simulação computacional, permitindo observar diferenças nas formas de onda, nos valores de tensão e corrente e na potência transferida à carga.

Como as diferentes topologias apresentam funções de ganho próprias e respondem de maneira distinta às condições impostas, a comparação requer a implementação sistemática dos modelos e a padronização do procedimento de simulação. Nesse contexto, a integração entre PLECS e Python é utilizada para auxiliar a parametrização, a execução das simulações, a coleta dos sinais e o processamento dos resultados.

Dessa forma, o problema de pesquisa que orienta este trabalho é formulado da seguinte maneira: como realizar o projeto preliminar, a modelagem e a simulação de conversores CC-CC ressonantes de tanque LC e LLC, considerando configurações em meia ponte e ponte completa, de modo a analisar e comparar suas principais grandezas elétricas no ambiente PLECS com apoio de automação computacional em Python?

1.3 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar o projeto preliminar, a modelagem, a simulação e a análise comparativa de conversores CC-CC ressonantes de tanque LC e LLC, considerando configurações em meia ponte e ponte completa, por meio da implementação dos modelos no ambiente PLECS e do emprego de rotinas em Python para automatização das simulações e processamento dos resultados.

1.4 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- a. realizar levantamento bibliográfico sobre Eletrônica de Potência, conversores estáticos, conversores CC-CC, circuitos ressonantes, conversores ressonantes e técnicas de comutação suave;
- b. apresentar os fundamentos relacionados à comutação dura, à comutação suave e às condições de Zero Voltage Switching (ZVS) e Zero Current Switching (ZCS), considerando esses conceitos como parte da fundamentação teórica dos conversores ressonantes;
- c. estudar os princípios de funcionamento e as principais características das estruturas ressonantes LC série, LC paralelo e LLC;
- d. apresentar as características das configurações inversoras em meia ponte (Half-Bridge – HB) e ponte completa (Full-Bridge – FB) empregadas na alimentação dos tanques ressonantes;
- e. estabelecer as especificações gerais e os critérios de projeto preliminar utilizados na construção dos modelos analisados;
- f. modelar e implementar no ambiente PLECS as topologias HB LC série, HB LC paralelo, FB LC série, FB LC paralelo, HB LLC e FB LLC;
- g. desenvolver a integração entre o PLECS e o Python para automatizar a parametrização dos modelos, a execução das simulações, a aquisição dos sinais e o pós-processamento dos resultados;
- h. analisar as principais formas de onda de tensão e corrente obtidas para as diferentes configurações;
- i. analisar a tensão de saída, a corrente de saída e a potência transferida à carga nos

modelos simulados;

- j. aplicar e analisar o procedimento iterativo de ajuste da relação de transformação utilizado para aproximar a tensão de saída da referência estabelecida, tratando esse procedimento como calibração dos modelos simulados;
- k. comparar o comportamento das topologias analisadas, considerando as diferenças associadas à estrutura do tanque ressonante e à configuração em meia ponte ou ponte completa;
- l. identificar as limitações do procedimento de projeto preliminar e da metodologia de simulação adotada, estabelecendo possibilidades de aprofundamento em trabalhos futuros.

1.5 Organização do trabalho

Este Trabalho de Conclusão de Curso está organizado em seis capítulos.

O Capítulo 1 apresenta a contextualização do tema, abordando a importância da Eletrônica de Potência, as principais classes de conversores estáticos, o compromisso entre frequência de chaveamento, perdas e densidade de potência, os princípios da comutação dura e suave e a relevância dos conversores ressonantes. Também são apresentados o problema de pesquisa, o objetivo geral, os objetivos específicos e a organização do documento.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica necessária ao desenvolvimento do estudo. São abordados os princípios da Eletrônica de Potência e dos conversores estáticos, os conversores CC-CC chaveados, as perdas associadas à comutação, os fundamentos dos circuitos ressonantes, o comportamento dos tanques LC, os princípios dos conversores ressonantes, as técnicas ZVS e ZCS, as configurações em meia ponte e ponte completa e as características das topologias LC série, LC paralelo e LLC.

O Capítulo 3 descreve a metodologia empregada no desenvolvimento do trabalho. São apresentados a caracterização da pesquisa, o ambiente de simulação, a integração entre o PLECS e a automação computacional em Python, as topologias analisadas, os parâmetros adotados, as grandezas avaliadas e o procedimento utilizado para execução e processamento das simulações.

O Capítulo 4 apresenta o projeto preliminar e a implementação dos conversores de tanque

ressonante. São descritas as especificações gerais adotadas, os critérios utilizados para o dimensionamento preliminar dos elementos do circuito, a relação entre as principais grandezas consideradas e a implementação das seis topologias analisadas.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos e sua discussão. São analisadas as formas de onda, as principais grandezas elétricas, o comportamento individual das configurações em meia ponte e ponte completa e os resultados associados às estruturas LC série, LC paralelo e LLC. Também são apresentados os resultados do procedimento iterativo de ajuste da relação de transformação e as comparações realizadas entre os modelos.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões decorrentes das análises realizadas, as limitações identificadas e as possibilidades de continuidade do estudo, incluindo o aprofundamento da modelagem analítica, a análise de perdas, a investigação específica das condições de comutação suave, o desenvolvimento de estratégias de controle e a validação experimental.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos necessários à compreensão dos conversores ressonantes analisados neste trabalho. A partir da contextualização apresentada no Capítulo 1, são aprofundados os conceitos relacionados aos conversores estáticos, à conversão CC-CC chaveada, às perdas associadas aos semicondutores, aos circuitos ressonantes, à frequência de ressonância, ao fator de qualidade e às técnicas de comutação suave. Em seguida, são discutidos os princípios dos conversores ressonantes, a Aproximação pela Primeira Harmônica (First Harmonic Approximation – FHA), as configurações em meia ponte e ponte completa e as características fundamentais dos conversores LC série, LC paralelo e LLC.

A fundamentação apresentada tem como objetivo estabelecer uma base para interpretação dos modelos e dos resultados simulados nos capítulos posteriores. Não se pretende, neste capítulo, desenvolver uma modelagem analítica completa para todas as topologias estudadas, mas apresentar as relações fundamentais necessárias para compreender a influência da frequência, da carga, do estágio inversor e da estrutura do tanque sobre o comportamento dos conversores.

2.1 Eletrônica de Potência e conversores estáticos

Conforme apresentado no Capítulo 1, a Eletrônica de Potência é a área da Engenharia Elétrica dedicada ao processamento e ao controle do fluxo de energia elétrica por meio de dispositivos semicondutores de potência, elementos passivos, componentes magnéticos e circuitos de comando. Os sistemas desenvolvidos nessa área permitem adequar características como tensão, corrente, frequência e forma de onda entre uma fonte e uma carga, sendo empregados em aplicações que abrangem desde fontes eletrônicas de alimentação até sistemas industriais, geração renovável, armazenamento de energia e mobilidade elétrica (Rashid, 2014).

Os principais circuitos utilizados para essas funções são denominados conversores estáticos de potência. A classificação mais elementar considera a natureza das grandezas elétricas presentes na entrada e na saída. Conversores CA-CC, usualmente denominados retificadores, realizam a conversão de uma grandeza alternada em uma grandeza contínua. Conversores CC-CA, denominados inversores, produzem uma grandeza alternada a partir de uma fonte contínua. Conversores CC-CC modificam os níveis de uma alimentação contínua, enquanto conversores CA-CA processam uma grandeza alternada para produzir outra grandeza também alternada, podendo modificar sua amplitude, frequência ou ambas (Rashid, 2014).

O funcionamento dos conversores estáticos modernos está fortemente associado à operação chaveada de dispositivos semicondutores de potência. Diodos, MOSFETs, IGBTs e outros dispositivos são selecionados conforme os níveis de tensão e corrente, a frequência de operação, as características de acionamento e os requisitos de eficiência do sistema. Em uma representação ideal, uma chave semicondutora apresenta tensão nula quando se encontra em condução e corrente nula quando está bloqueada. Dispositivos reais, entretanto, apresentam queda de tensão, resistência em condução, tempos finitos de comutação e outros efeitos responsáveis por dissipação de potência.

Uma das grandezas utilizadas para caracterizar energeticamente um conversor é o rendimento, definido pela razão entre a potência de saída e a potência fornecida pela fonte, conforme a Equação (1).

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \quad (1)$$

em que η representa o rendimento do conversor, P_o é a potência entregue à carga e P_{in} é a potência fornecida pela fonte.

Quando expressa em porcentagem, a eficiência é dada pela Equação (2).

$$\eta_{(\%)} = \left(\frac{P_o}{P_{in}} \right) 100\% \quad (2)$$

As perdas totais do conversor podem ser representadas, de forma simplificada, pela diferença entre a potência de entrada e a potência de saída, conforme a Equação (3)

$$P_{perdas} = P_{in} - P_o \quad (3)$$

As perdas podem ocorrer nos semicondutores, indutores, capacitores, transformadores, condutores, conexões e circuitos auxiliares. Sua redução influencia diretamente a eficiência, a temperatura de operação, a confiabilidade e a densidade de potência do equipamento. O desenvolvimento contemporâneo de conversores de alta frequência envolve justamente o compromisso entre eficiência, frequência de operação, tecnologia dos semicondutores e redução do volume dos componentes magnéticos e passivos (Rashid, 2014; Guan et al., 2021;

Wang et al., 2020).

2.2 Conversores CC-CC chaveados

Os conversores CC-CC são circuitos eletrônicos destinados a converter uma tensão contínua de entrada em uma tensão contínua de saída com valor diferente. Essa conversão é necessária quando a fonte disponível apresenta um nível de tensão distinto daquele exigido pela carga. Esses conversores são comuns em fontes chaveadas, carregadores, sistemas fotovoltaicos, veículos elétricos, equipamentos industriais e sistemas embarcados (Rashid, 2014).

Nos conversores CC-CC chaveados, a conversão de energia é realizada por meio da abertura e do fechamento periódico de dispositivos semicondutores. A energia é armazenada temporariamente em elementos passivos, como indutores e capacitores, e transferida à carga de forma controlada. Essa estratégia permite modificar a tensão média de saída e controlar o fluxo de potência com eficiência superior à de reguladores lineares (Rashid, 2014).

A operação chaveada é caracterizada pelo período de chaveamento, pela frequência de chaveamento e pela razão cíclica. A frequência de chaveamento é o inverso do período de chaveamento, conforme a Equação (4).

$$f_s = \frac{1}{T_s} \quad (4)$$

em que f_s é a frequência de chaveamento e T_s é o período de chaveamento.

A razão cíclica indica a fração do período em que a chave permanece ligada, conforme a Equação (5).

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (5)$$

em que D é a razão cíclica e T_{on} é o tempo de condução da chave durante um período de chaveamento.

Nos conversores PWM convencionais, a razão cíclica constitui uma das principais variáveis utilizadas para controlar a tensão média de saída. Para um conversor Buck ideal operando em

modo de condução contínua, por exemplo, a relação de conversão é dada pela Equação (6).

$$V_o = DV_{in} \quad (6)$$

em que V_o é a tensão de saída, V_{in} é a tensão de entrada e D é a razão cíclica.

Essa relação permite aprofundar a comparação apresentada no Capítulo 1. No conversor Buck ideal, o ganho está diretamente relacionado à razão cíclica, enquanto o indutor e o capacitor participam principalmente do armazenamento de energia e da filtragem. O funcionamento do conversor não depende da operação deliberada em torno de uma frequência natural formada pelos elementos reativos.

Em um conversor ressonante, por outro lado, a resposta em frequência dos elementos indutivos e capacitivos participa diretamente da transferência de potência. Dessa forma, frequência de chaveamento, frequência de ressonância, carga equivalente e fator de qualidade passam a influenciar diretamente o ganho do circuito (Steigerwald, 1988; Mudiyansele; Keshmiri; Emadi, 2023).

2.3 Perdas por comutação e operação em alta frequência

As perdas em conversores eletrônicos de potência podem ser classificadas, de forma geral, em perdas de condução e perdas de comutação. As perdas de condução ocorrem quando o dispositivo semicondutor está no estado ligado e conduz corrente. Nessa condição, dispositivos reais apresentam resistência equivalente ou queda de tensão, provocando dissipação de energia em forma de calor. As perdas de comutação ocorrem durante as transições entre os estados ligado e desligado, quando tensão e corrente podem coexistir no dispositivo (Rashid, 2014).

Em um dispositivo representado por uma resistência equivalente em condução, a perda de condução pode ser aproximada pela Equação (7).

$$P_{cond} = I_{rms}^2 R_{on} \quad (7)$$

em que P_{cond} é a potência dissipada por condução, I_{rms} é a corrente eficaz no dispositivo e R_{on} é a resistência equivalente em condução.

Quando o dispositivo é representado por uma queda de tensão em condução, a perda de condução pode ser aproximada pela Equação (8).

$$P_{cond} = V_{on} I_{avg} \quad (8)$$

em que V_{on} é a queda de tensão em condução e I_{avg} é a corrente média no dispositivo.

Durante a comutação, a transição entre os estados ligado e desligado não ocorre instantaneamente. Admitindo, para uma estimativa simplificada, variações aproximadamente lineares de tensão e corrente durante os tempos de transição, a energia dissipada por evento de chaveamento pode ser aproximada pela Equação (9).

$$E_{sw} \approx \left(\frac{1}{2}\right) V_{sw} I_{sw} (t_r + t_f) \quad (9)$$

em que E_{sw} é a energia dissipada por evento de comutação, V_{sw} é a tensão sobre a chave, I_{sw} é a corrente na chave, t_r é o tempo de subida e t_f é o tempo de descida.

A potência média dissipada por comutação pode ser estimada pela Equação (10).

$$P_{sw} = E_{sw} f_s \quad (10)$$

em que P_{sw} é a potência dissipada por comutação e f_s é a frequência de chaveamento.

A Equação (10) evidencia que, mantida aproximadamente constante a energia perdida em cada evento, a parcela das perdas de comutação cresce com a frequência de chaveamento. Essa expressão constitui uma aproximação e não contempla individualmente capacitâncias parasitas, recuperação reversa de diodos, indutâncias parasitas e características não lineares dos dispositivos, mas permite compreender o compromisso básico entre frequência e perdas (Rashid, 2014).

A elevação da frequência de chaveamento pode permitir a redução do volume de transformadores, indutores, capacitores e filtros. Entretanto, esse benefício é condicionado pelo aumento das perdas nos semicondutores e nos componentes magnéticos. A obtenção simultânea de elevada frequência, eficiência e densidade de potência constitui, portanto, um dos desafios

dos conversores modernos (Wang et al., 2020; Guan et al., 2021).

As técnicas de comutação suave foram desenvolvidas como uma alternativa para reduzir parte da energia dissipada durante as transições. A literatura clássica sobre conversores quase ressonantes associa a utilização controlada de elementos reativos às condições de comutação em corrente nula e em tensão nula (Lee, 1988).

É importante destacar que o presente trabalho não realiza o cálculo quantitativo das perdas dos semicondutores, dos elementos magnéticos ou dos demais componentes. As relações apresentadas nesta seção têm a finalidade de explicar a motivação técnica para o emprego de conversores ressonantes e estabelecer a base necessária à discussão da comutação suave.

2.4 Circuitos ressonantes

Circuitos ressonantes são circuitos formados pela associação de indutores e capacitores, nos quais ocorre troca periódica de energia entre o campo magnético do indutor e o campo elétrico do capacitor. Em um circuito ideal sem perdas, a energia armazenada no capacitor é transferida ao indutor e, posteriormente, retorna ao capacitor, produzindo uma oscilação natural. Em circuitos reais, resistências e perdas nos componentes provocam amortecimento, reduzindo a amplitude da oscilação ao longo do tempo caso não haja reposição de energia.

A impedância de um indutor ideal é dada pela Equação (11).

$$Z_L = j\omega L \quad (11)$$

em que Z_L é a impedância indutiva, j é a unidade imaginária, ω é a frequência angular e L é a indutância.

A impedância de um capacitor ideal é dada pela Equação (12).

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (12)$$

em que Z_C é a impedância capacitiva e C é a capacitância.

A frequência angular está relacionada à frequência em hertz pela Equação (13).

$$\omega = 2\pi f \quad (13)$$

em que ω é a frequência angular e f é a frequência em hertz.

A ressonância ocorre quando os efeitos indutivo e capacitivo se compensam. Em um circuito LC ideal, a frequência angular natural de ressonância é definida pela Equação (14).

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (14)$$

em que ω_0 é a frequência angular de ressonância.

A frequência de ressonância em hertz é dada pela Equação (15).

$$f_0 = \frac{1}{(2\pi\sqrt{LC})} \quad (15)$$

em que f_0 é a frequência de ressonância, L é a indutância e C é a capacitância.

Em um circuito RLC série, a impedância equivalente pode ser expressa pela Equação (16).

$$Z_s = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (16)$$

em que Z_s é a impedância do circuito série e R é a resistência equivalente.

O módulo da impedância do circuito série é dado pela Equação (17).

$$|Z_s| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (17)$$

Em um circuito RLC paralelo, a análise pode ser realizada por meio da admitância equivalente, conforme a Equação(18).

$$Y_p = \frac{1}{R} + j \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \quad (18)$$

em que Y_p é a admitância do circuito paralelo.

A Equação 18 expressa a admitância de um circuito RLC paralelo em função de uma componente real e de uma componente imaginária. De forma geral, a admitância elétrica pode ser representada pela Equação (19).

$$Y = G + jB \quad (19)$$

em que Y é a admitância elétrica, expressa em siemens (S), G é a condutância, também expressa em siemens, B é a susceptância, expressa em siemens, e j é a unidade imaginária.

A susceptância corresponde à componente imaginária da admitância e representa a contribuição dos elementos reativos para a circulação de corrente em regime senoidal. No circuito RLC paralelo idealizado, a susceptância resultante pode ser expressa pela Equação (20).

$$B = \omega C - \frac{1}{\omega L} \quad (20)$$

em que B é a susceptância resultante do circuito, ω é a frequência angular, expressa em radianos por segundo, C é a capacitância e L é a indutância.

O termo ωC corresponde à susceptância capacitiva, enquanto o termo $-\frac{1}{\omega L}$ corresponde à susceptância indutiva. Na frequência de ressonância, essas componentes apresentam a mesma magnitude e sinais opostos, fazendo com que a susceptância resultante seja nula. Consequentemente, para o circuito paralelo idealizado, a parcela imaginária da admitância é anulada e a impedância equivalente atinge seu valor máximo.

Outro parâmetro importante na análise dos circuitos ressonantes é o fator de qualidade Q . Essa grandeza relaciona a energia armazenada no circuito à energia dissipada e, em sistemas ressonantes, também está associada à seletividade da resposta em frequência e à sensibilidade do circuito às variações de carga e frequência.

Para um circuito RLC série, o fator de qualidade pode ser expresso pela Equação (21).

$$Q_s = \frac{\omega_0 L}{R} \quad (21)$$

em que Q_s é o fator de qualidade do circuito série, ω_0 é a frequência angular de ressonância, L é a indutância e R é a resistência equivalente do circuito.

De forma equivalente, o fator de qualidade do circuito RLC série pode ser representado pela Equação (22).

$$Q_s = \frac{1}{\omega_0 CR} \quad (22)$$

em que Q_s é o fator de qualidade do circuito série, ω_0 é a frequência angular de ressonância, C é a capacitância e R é a resistência equivalente.

Para um circuito RLC paralelo, o fator de qualidade pode ser representado pela Equação (23).

$$Q_p = \frac{R}{\omega_0 L} \quad (23)$$

em que Q_p é o fator de qualidade do circuito paralelo, R é a resistência equivalente, ω_0 é a frequência angular de ressonância e L é a indutância.

De forma equivalente, o fator de qualidade do circuito RLC paralelo pode ser representado pela Equação (24).

$$Q_p = \omega_0 CR \quad (24)$$

em que Q_p é o fator de qualidade do circuito paralelo, ω_0 é a frequência angular de ressonância, C é a capacitância e R é a resistência equivalente.

As Equações (21) a (24) representam relações fundamentais para circuitos RLC idealizados. Nos conversores ressonantes, entretanto, a resistência relevante para o tanque está associada à carga equivalente vista pelo circuito em corrente alternada. O estágio de retificação, o filtro, a carga de saída e, nos conversores isolados, o transformador modificam a resistência equivalente

apresentada ao tanque.

Consequentemente, a relação de transformação do transformador também influencia o comportamento do circuito ressonante, uma vez que sua alteração modifica a impedância refletida entre os lados do transformador. Dessa forma, mudanças na relação de transformação podem alterar a carga equivalente refletida, o fator de qualidade efetivo e, consequentemente, o ganho observado pelo conversor.

2.5 Tanque ressonante LC

O tanque ressonante LC constitui o elemento responsável pela dinâmica oscilatória empregada nos conversores estudados neste trabalho. Em sua configuração elementar, ele é formado por elementos indutivos e capacitivos entre os quais ocorre troca periódica de energia. Essa interação é responsável pela formação de uma frequência natural e influencia diretamente as formas de onda de tensão e corrente associadas ao tanque (Rashid, 2014; Lee, 1988).

A energia armazenada em um indutor é expressa pela Equação (25)

$$E_L = \left(\frac{1}{2}\right) L i_L^2 \quad (25)$$

em que E_L é a energia armazenada no indutor, expressa em joules (J), L é a indutância, expressa em henrys (H), e i_L é a corrente instantânea no indutor, expressa em ampères (A).

A energia armazenada no campo elétrico de um capacitor é expressa pela Equação (26).

$$E_C = \left(\frac{1}{2}\right) C v_C^2 \quad (26)$$

em que E_C é a energia armazenada no capacitor e v_C é a tensão no capacitor.

Durante a operação ressonante, a energia alterna entre os elementos L e C. Quando a corrente no indutor é máxima, a energia magnética armazenada no indutor é elevada. Quando a tensão no capacitor é máxima, a energia elétrica armazenada no capacitor é elevada. Esse processo de troca de energia produz oscilações naturais que podem ser aproveitadas para moldar as formas de onda do conversor e criar condições favoráveis de comutação (Rashid, 2014).

No desenvolvimento deste trabalho, adota-se f_r para representar a frequência de ressonância associada ao par formado pela indutância ressonante L_r e pela capacitância ressonante C_r . Para fins de projeto preliminar, essa frequência pode ser calculada pela Equação (27).

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (27)$$

em que f_r é a frequência de ressonância do tanque, expressa em hertz (Hz), L_r é a indutância ressonante, expressa em henrys, C_r é a capacitância ressonante, expressa em farads, e π é a constante matemática pi.

A partir dessa relação, a indutância ressonante pode ser determinada pela Equação (28).

$$L_r = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 C_r} \quad (28)$$

em que L_r é a indutância ressonante, f_r é a frequência de ressonância e C_r é a capacitância ressonante.

Da mesma forma, a capacitância ressonante pode ser definida pela Equação (29).

$$C_r = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 L_r} \quad (29)$$

As Equações (27) a (29) fornecem um ponto de partida para o dimensionamento preliminar do tanque ressonante. Entretanto, a definição de uma frequência de ressonância não constitui, isoladamente, o projeto completo de um conversor. A resposta do circuito também depende da configuração do tanque, da carga equivalente, da frequência de chaveamento, do fator de qualidade, do estágio inversor, do transformador e do estágio de retificação (Almeida, 2014; Steigerwald, 1988).

A relação entre a frequência de chaveamento f_s e a frequência de ressonância f_r é representada pela frequência normalizada, conforme a Equação (30).

$$f_n = \frac{f_s}{f_r} \quad (30)$$

Quando $f_n = 1$, a frequência de chaveamento coincide com a frequência de ressonância definida pelo par $L_r - C_r$. Essa condição, entretanto, não implica automaticamente ganho unitário, rendimento máximo ou ocorrência de comutação suave, uma vez que essas características dependem também da topologia, da carga e do ponto de operação.

A impedância característica do tanque LC pode ser representada pela Equação (31).

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (31)$$

em que Z_0 é a impedância característica do tanque, expressa em ohms (Ω), L_r é a indutância ressonante e C_r é a capacitância ressonante.

A impedância característica, a carga equivalente refletida e a frequência normalizada influenciam a resposta do tanque. Portanto, embora a frequência de ressonância seja um parâmetro fundamental, ela não determina isoladamente a tensão de saída. O ganho de um conversor ressonante depende também do fator de qualidade, da carga refletida e da função de ganho própria da topologia (Steigerwald, 1988; Johnson; Erickson, 1988).

2.6 Conversores ressonantes

Conversores ressonantes são conversores eletrônicos de potência nos quais uma rede formada por elementos indutivos e capacitivos participa deliberadamente do processo de transferência de energia. Em uma estrutura CC-CC isolada, o estágio inversor converte a tensão contínua de entrada em uma forma de onda alternada de alta frequência, que é aplicada ao tanque ressonante. A energia processada pelo tanque é posteriormente transferida pelo transformador, retificada e filtrada para produzir uma grandeza contínua na saída (Rashid, 2014; Almeida, 2014).

Em razão da presença do tanque ressonante, a tensão de saída não depende exclusivamente da relação de transformação do transformador. A forma de onda produzida pelo estágio inversor é aplicada a uma rede cuja impedância depende da frequência, fazendo com que o ganho total

esteja relacionado à estrutura do inversor, aos parâmetros do tanque, à frequência de operação, à carga equivalente e ao estágio de saída (Steigerwald, 1988).

A tensão produzida pelos estágios inversores em meia ponte e ponte completa possui forma de onda não senoidal. Uma forma de onda periódica pode ser decomposta por meio de uma série de Fourier em uma componente fundamental e em componentes harmônicas de ordens superiores.

Uma técnica amplamente utilizada para simplificar a análise dos conversores ressonantes é a Aproximação pela Primeira Harmônica, do inglês *First Harmonic Approximation* (FHA). Nessa aproximação, considera-se que a resposta do tanque pode ser analisada predominantemente a partir da componente fundamental da tensão produzida pelo estágio inversor. O circuito ressonante pode, então, ser tratado por técnicas de análise em regime senoidal, possibilitando relacionar frequência, fator de qualidade, carga e parâmetros do tanque ao ganho do conversor (Almeida, 2014; De Simone et al., 2006).

A FHA não substitui a análise temporal completa do circuito e sua precisão depende da topologia e do ponto de operação. A FHA é empregada como base conceitual para auxiliar na interpretação do comportamento e do ganho dos conversores. Não foi desenvolvida uma função analítica completa de ganho por FHA para cada uma das seis topologias analisadas.

A componente fundamental da tensão aplicada ao tanque depende da configuração do estágio inversor. Para uma ponte completa ideal alimentada por um barramento contínuo, o valor eficaz da componente fundamental pode ser aproximado pela Equação (32)

$$V_{1,FB,rms} = \left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \right) V_{dc} \quad (32)$$

em que $V_{1,FB,rms}$ é o valor eficaz da componente fundamental aplicada ao tanque por uma ponte completa e V_{dc} é a tensão do barramento CC.

Para uma configuração em meia ponte, o valor eficaz da componente fundamental pode ser aproximada pela Equação (33).

$$V_{1,HB,rms} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{dc} \quad (33)$$

em que $V_{1,HB,rms}$ é o valor eficaz da componente fundamental aplicada ao tanque por uma meia ponte.

As Equações (32) e (33) mostram que, para o mesmo barramento CC, a ponte completa aplica ao tanque uma componente fundamental aproximadamente duas vezes maior que a meia ponte. Essa diferença é relevante na análise comparativa das topologias estudadas neste trabalho.

O ganho dos conversores ressonantes depende da componente fundamental aplicada ao tanque, da função de ganho do tanque, da frequência normalizada, do fator de qualidade, da carga equivalente refletida, da relação de transformação e do estágio de retificação e filtragem. Portanto, cada topologia possui uma função de ganho própria. A formulação clássica de conversores ressonantes série pode ser usada como referência conceitual, mas não deve ser aplicada automaticamente aos conversores LC paralelo ou LLC sem considerar suas particularidades. De forma simplificada, a tensão de saída pode ser interpretada pela Equação (34).

$$V_o \approx V_{1,ponte} M_{tanque} \frac{K_{retificador}}{n} \quad (34)$$

em que V_o é a tensão de saída, $V_{1,ponte}$ é o valor eficaz da componente fundamental da tensão aplicada pelo estágio inversor, M_{tanque} é o ganho do tanque ressonante no ponto de operação considerado, $K_{retificador}$ representa de forma agregada o efeito do estágio de retificação e filtragem, e n é a relação de transformação do transformador, adotada neste trabalho como a razão entre o número de espiras do primário e o número de espiras do secundário.

A Equação (34) possui caráter conceitual e evidencia que a tensão de saída não depende exclusivamente da relação de transformação n . Como os tanques LC série, LC paralelo e LLC apresentam funções de ganho distintas, a mesma relação de transformação pode produzir tensões de saída diferentes quando aplicada a topologias distintas. Neste trabalho, os valores quantitativos finais são obtidos diretamente a partir dos modelos simulados no PLECS.

2.7 Comutação suave: ZVS e ZCS

A comutação suave corresponde a técnicas utilizadas para reduzir a energia dissipada durante os eventos de acionamento e desligamento dos dispositivos semicondutores. Na comutação dura, tensão e corrente podem apresentar simultaneamente valores significativos durante a transição do dispositivo, resultando em dissipação de energia e aquecimento (Rashid, 2014; Lee, 1988).

A potência instantânea dissipada em um dispositivo pode ser expressa pela Equação (35).

$$p_S(t) = v_S(t)i_S(t) \quad (35)$$

em que $p_S(t)$ é a potência instantânea dissipada na chave, $v_S(t)$ é a tensão instantânea entre seus terminais e $i_S(t)$ é a corrente instantânea que atravessa o dispositivo.

A energia dissipada durante um intervalo de comutação pode ser representada pela Equação (36).

$$E_{SW} = \int_{t_1}^{t_2} v_S(t)i_S(t) dt \quad (36)$$

em que E_{SW} é a energia dissipada durante o evento de comutação, t_1 e t_2 delimitam o intervalo de transição, $v_S(t)$ é a tensão instantânea sobre a chave e $i_S(t)$ é a corrente instantânea através do dispositivo.

A Equação (36) evidencia que a energia dissipada depende da sobreposição entre tensão e corrente durante a transição. Dessa forma, a redução de uma dessas grandezas no instante de chaveamento pode reduzir a energia associada ao evento.

A comutação em tensão nula, denominada Zero Voltage Switching (ZVS), corresponde à condição em que se busca realizar o evento de chaveamento quando a tensão sobre o dispositivo é aproximadamente nula. A condição ideal é representada pela Equação (37).

$$v_S(t_{SW}) \approx 0 \quad (37)$$

em que $v_s(t_{sw})$ é a tensão sobre a chave no instante de comutação t_{sw} .

A comutação em corrente nula, denominada Zero Current Switching (ZCS), corresponde à condição em que o evento de chaveamento ocorre com corrente aproximadamente nula através do dispositivo. A condição ideal é representada pela Equação (38).

$$i_s(t_{sw}) \approx 0 \quad (38)$$

A utilização da ressonância pode criar condições favoráveis à ocorrência de ZVS ou ZCS, reduzindo a sobreposição entre tensão e corrente nos dispositivos. Entretanto, a simples presença de um tanque ressonante não garante a obtenção dessas condições. Sua ocorrência depende da topologia, da frequência de operação, da carga, dos parâmetros do tanque e da estratégia de acionamento (Lee, 1988; Oeder; Duerbaum, 2013).

ZVS e ZCS são tratados como conceitos teóricos associados à motivação e ao funcionamento dos conversores ressonantes. Não foram calculados critérios específicos nem realizada comprovação dessas condições nas topologias simuladas. A confirmação efetiva de ZVS ou ZCS exigiria a análise individual das formas de onda de tensão e corrente nos semicondutores imediatamente antes e durante os eventos de comutação.

2.8 Topologias meia ponte e ponte completa

As configurações Half-Bridge (HB) e Full-Bridge (FB) foram apresentadas no Capítulo 1. Nesta seção são aprofundadas suas características como estágios inversores responsáveis pela aplicação de uma tensão alternada de alta frequência ao tanque ressonante.

A configuração meia ponte utiliza duas chaves semicondutoras conectadas em série ao barramento contínuo. O ponto médio entre os dispositivos constitui o nó de saída do estágio inversor e fornece a tensão de excitação aplicada ao tanque ressonante. As chaves são comandadas de maneira complementar e, na implementação prática, utiliza-se um intervalo de tempo morto entre os sinais de acionamento para evitar a condução simultânea dos dispositivos do mesmo braço.

A configuração ponte completa utiliza quatro chaves semicondutoras distribuídas em dois braços. O tanque ressonante é conectado entre os pontos médios desses braços, e pares

diagonais de dispositivos são acionados alternadamente, permitindo aplicar tensões de polaridades opostas ao tanque. Para o mesmo barramento contínuo ideal, essa estrutura produz uma componente fundamental de tensão superior àquela obtida com a configuração em meia ponte, conforme demonstrado pelas Equações (32) e (33) (Steigerwald, 1988; Almeida, 2014).

Essa diferença de excitação não implica, isoladamente, que a ponte completa produza o dobro da tensão ou da potência de saída. O comportamento final também depende da impedância apresentada pelo tanque, da carga refletida, da frequência de operação, da relação de transformação e do estágio de saída.

As configurações HB e FB são combinadas aos tanques LC série, LC paralelo e LLC, resultando nas seis topologias analisadas: HB_LC_Serie, HB_LC_Paralelo, HB_LLC, FB_LC_Serie, FB_LC_Paralelo e FB_LLC.

2.9 Conversores LC série, LC paralelo e LLC

Os conversores LC série, LC paralelo e LLC representam diferentes formas de organizar os elementos ressonantes responsáveis pela transferência de energia. A disposição desses elementos modifica a impedância apresentada ao estágio inversor, a resposta em frequência, as correntes circulantes e a função de ganho. Dessa forma, as diferentes topologias não devem ser interpretadas como circuitos equivalentes apenas por utilizarem valores semelhantes de indutância, capacitância e frequência (Steigerwald, 1988; Johnson; Erickson, 1988).

No conversor LC série, a indutância ressonante L_r e a capacitância ressonante C_r encontram-se no caminho série de transferência de energia entre o estágio inversor e o transformador ou carga equivalente. Na frequência de ressonância do par LC, as reatâncias indutiva e capacitiva tendem a apresentar mesma magnitude e sinais opostos, reduzindo a parcela reativa da impedância do tanque. Nessas condições, a resposta do circuito é fortemente influenciada pela resistência equivalente, pela carga associada e pelo ponto de operação do conversor (Steigerwald, 1988; Kuo-Peng; Chéron, 1996).

No conversor LC paralelo considerado neste trabalho, a configuração do tanque apresenta comportamento distinto da estrutura série. A denominação “LC paralelo” não deve ser interpretada como uma ligação direta de L_r e C_r em paralelo entre si. No modelo utilizado, o indutor ressonante participa do caminho de alimentação, enquanto o capacitor ressonante está

conectado em derivação no nó associado ao transformador e à carga equivalente. Como consequência, a carga participa diretamente da resposta da rede ressonante.

Essa característica explica por que as relações elementares do circuito RLC paralelo apresentadas na Seção 2.4 devem ser utilizadas como fundamento para compreender conceitos como admitância e susceptância, mas não representam, isoladamente, o circuito equivalente completo do conversor LC paralelo. A análise de conversores paralelo-ressonantes evidencia que essa configuração apresenta modos de operação e características de ganho próprias, dependentes da estrutura do circuito e da carga associada (Johnson; Erickson, 1988; Dal Pont et al., 2018).

Por esse motivo, os mesmos valores de L_r , C_r , carga, frequência de chaveamento e relação de transformação podem produzir respostas significativamente diferentes quando aplicados aos conversores LC série e LC paralelo. Essa característica é particularmente relevante para a análise comparativa desenvolvida neste trabalho.

A topologia LLC acrescenta uma indutância adicional ao tanque ressonante. Nos conversores isolados, essa indutância é geralmente associada à indutância magnetizante L_m do transformador. Assim, a estrutura é formada pela indutância ressonante L_r , pela capacitância ressonante C_r e pela indutância magnetizante L_m . A presença dessa terceira grandeza reativa faz com que a resposta em frequência do LLC apresente características distintas das estruturas LC simples (Mudiyanselage; Keshmiri; Emadi, 2023; Rashidi et al., 2020).

A frequência de ressonância principal associada ao par $L_r - C_r$ é aquela definida anteriormente pela Equação (27). A participação de L_m introduz outra frequência característica, representada pela Equação (39).

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_r + L_m)C_r}} \quad (39)$$

em que f_m é a frequência característica associada à participação conjunta das indutâncias L_r e L_m , L_r é a indutância ressonante, L_m é a indutância magnetizante e C_r é a capacitância ressonante.

Como $L_r + L_m$ é superior a L_r , a frequência f_m é inferior à frequência de ressonância definida exclusivamente pelo par $L_r - C_r$. A existência dessas frequências contribui para uma resposta

em frequência mais complexa no LLC. Seu ganho também depende da relação entre as indutâncias, da frequência normalizada, do fator de qualidade e da carga equivalente (De Simone et al., 2006).

As diferenças entre os conversores LC série, LC paralelo e LLC constituem a base teórica para a comparação realizada nos capítulos seguintes. Quando uma mesma base preliminar de parâmetros é aplicada a diferentes topologias, não se espera necessariamente que todas apresentem o mesmo ganho ou a mesma tensão de saída, pois a disposição dos elementos e a função de ganho são diferentes.

No presente trabalho, essa comparação é realizada predominantemente a partir das respostas obtidas nos modelos implementados no PLECS. O desenvolvimento analítico completo das curvas de ganho, a determinação rigorosa das regiões de ZVS e ZCS e a otimização individual de cada topologia permanecem fora do escopo do projeto preliminar desenvolvido.

3 METODOLOGIA

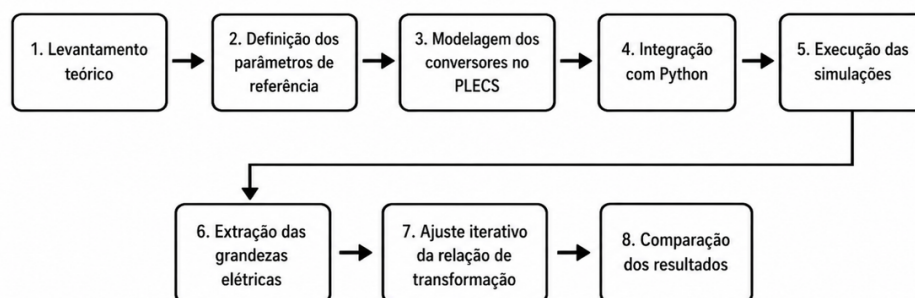
3.1 Caracterização da pesquisa

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de natureza quantitativa e com abordagem baseada em modelagem e simulação computacional. A pesquisa é aplicada porque busca utilizar fundamentos da Eletrônica de Potência e dos conversores ressonantes para desenvolver, simular e analisar diferentes topologias de conversores de tanque ressonante. O objetivo não é apenas discutir os conceitos teóricos, mas aplicar esses conceitos na construção de modelos simulados capazes de representar o comportamento elétrico das topologias estudadas.

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, o trabalho pode ser classificado como uma pesquisa experimental por simulação. Nesse tipo de abordagem, os circuitos são modelados em ambiente computacional e submetidos a diferentes condições de operação, permitindo a observação das formas de onda, das grandezas elétricas e da resposta do sistema sem a necessidade de construção física dos protótipos. Essa estratégia é adequada para a etapa inicial de estudo de conversores eletrônicos de potência, pois permite testar parâmetros, identificar limitações e comparar topologias com menor custo e maior flexibilidade.

A metodologia adotada foi organizada em etapas: levantamento teórico, definição dos parâmetros de referência, modelagem dos conversores no PLECS, integração com Python, execução das simulações, extração das grandezas elétricas, ajuste iterativo da relação de transformação e comparação dos resultados.

Figura 3.1 – Fluxograma do procedimento metodológico adotado no trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor

Neste trabalho, não foi realizada a construção física dos conversores. A verificação funcional

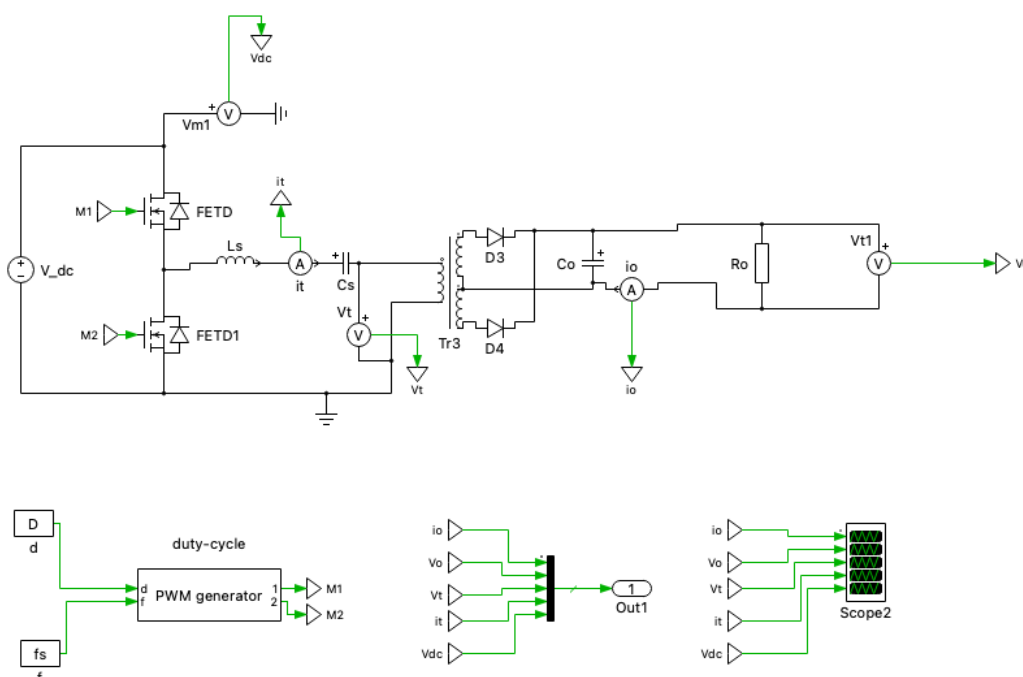
foi feita por meio da análise dos modelos simulados, observando se as formas de onda e os valores das grandezas elétricas apresentavam comportamento coerente com a operação esperada. Dessa forma, o estudo concentra-se no projeto preliminar, na modelagem, na simulação e na comparação das topologias, deixando a implementação prática como possibilidade para trabalhos futuros.

3.2 Ferramenta de simulação utilizada

As simulações foram realizadas no software PLECS Standalone 5.0, ferramenta voltada à modelagem e análise de sistemas eletrônicos de potência. O PLECS permite a representação de circuitos com dispositivos semicondutores, fontes, elementos passivos, transformadores, cargas e blocos de medição, sendo adequado para a simulação de conversores chaveados e conversores ressonantes.

No PLECS, cada topologia foi modelada considerando uma fonte de tensão contínua de entrada, um estágio de chaveamento em meia ponte ou ponte completa, um tanque ressonante, um transformador, um estágio retificador de saída, filtro capacitivo e carga resistiva equivalente. A fonte de entrada foi representada pela variável V_{dc} , correspondente à tensão contínua aplicada ao estágio de chaveamento do conversor.

Figura 3.2 – Exemplo de modelo de conversor ressonante implementado no PLECS.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 3.2 – Exemplo de modelo de conversor ressonante implementado no PLECS. apresenta um exemplo de modelo de conversor ressonante implementado no ambiente PLECS. No modelo, observa-se a representação do circuito de potência, composto pela fonte de entrada em corrente contínua, estágio de chaveamento em meia ponte, tanque ressonante LC, transformador, retificador, capacitor de saída e carga resistiva. Também são apresentados os blocos de comando PWM, responsáveis pelo acionamento das chaves semicondutoras, além dos pontos de medição utilizados para aquisição das grandezas V_{dc} , V_t , i_t , V_o e i_o .

As chaves semicondutoras foram comandadas por sinais PWM em alta frequência, de forma a produzir uma tensão alternada aplicada ao tanque ressonante. Essa tensão excita o circuito ressonante, permitindo a circulação da corrente no tanque e a transferência de energia para o estágio de saída. A relação de transformação do transformador foi parametrizada por meio da variável n , posteriormente ajustada nas simulações para adequação da tensão média de saída ao valor de referência.

3.3 Integração entre simulação e automação computacional

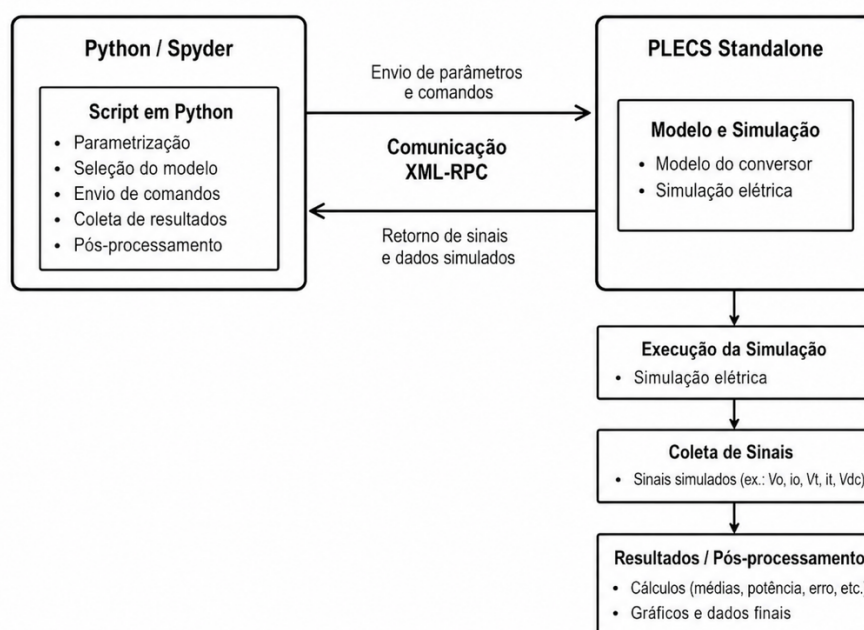
Além da modelagem dos circuitos no PLECS, este trabalho utilizou automação computacional por meio da integração entre o PLECS Standalone e o ambiente Python. Os scripts foram desenvolvidos na IDE Spyder, utilizando comunicação XML-RPC para interação com os modelos implementados no ambiente de simulação.

O PLECS foi utilizado exclusivamente como ambiente de modelagem e simulação elétrica dos conversores, sendo responsável pela solução numérica dos circuitos e pela geração das formas de onda e sinais correspondentes às grandezas analisadas. O Python, por sua vez, foi empregado como ferramenta externa de automação e pós-processamento, realizando a parametrização dos modelos, o acionamento das simulações no PLECS, a aquisição dos sinais resultantes, o cálculo das grandezas derivadas, o cálculo das médias utilizadas na análise, a determinação dos erros percentuais e a organização dos resultados.

Dessa forma, a integração entre os dois ambientes estabeleceu funções distintas e complementares: o PLECS realizou a simulação dos circuitos, enquanto o Python controlou o fluxo automatizado de execução e processou os dados obtidos após cada simulação. Portanto, o Python não atuou como ferramenta de validação do PLECS, mas como recurso para automatizar a execução dos ensaios computacionais e sistematizar a análise dos resultados.

Essa integração foi especialmente útil para a comparação entre as diferentes topologias, pois permitiu aplicar uma sequência padronizada de parametrização, execução, aquisição e processamento dos dados aos modelos analisados. Com isso, foi possível reduzir intervenções manuais e organizar os resultados de maneira uniforme para posterior comparação entre as configurações estudadas.

Figura 3.3 - Estrutura de integração entre Python e PLECS por meio de comunicação XML-RPC.



Fonte: Elaborado pelo autor

Estrutura de integração entre Python e PLECS por meio de comunicação XML-RPC.

Essa integração foi especialmente útil para a análise comparativa das topologias, pois permitiu aplicar uma lógica semelhante de simulação a diferentes modelos. As topologias foram simuladas com parâmetros equivalentes sempre que possível, permitindo avaliar como a estrutura do tanque ressonante e o tipo de ponte influenciam o comportamento das grandezas elétricas.

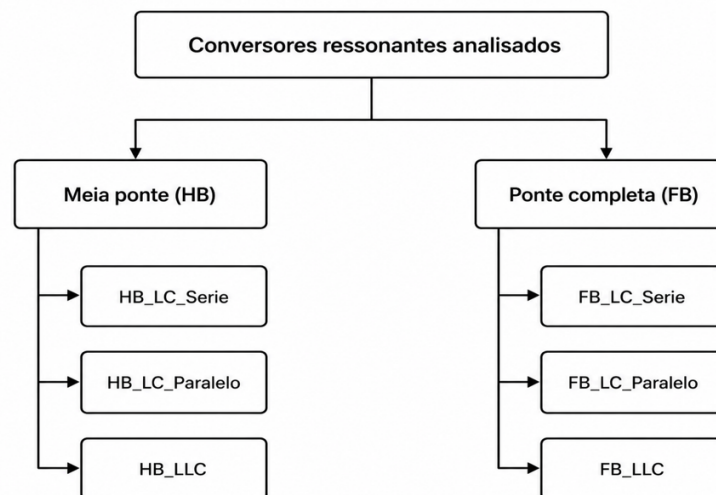
3.4 Topologias analisadas

Foram analisadas seis topologias de conversores de tanque ressonante. Essas topologias foram organizadas a partir da combinação entre duas estruturas de chaveamento e três configurações de tanque ressonante.

As estruturas de chaveamento consideradas foram a meia ponte, também denominada half bridge, e a ponte completa, também denominada full bridge. A meia ponte utiliza duas chaves semicondutoras comandadas de forma complementar, enquanto a ponte completa utiliza quatro chaves organizadas em dois braços.

As configurações de tanque ressonante consideradas foram LC série, LC paralelo e LLC. O tanque LC série é formado por uma indutância ressonante L_r e uma capacitância ressonante C_r associadas em série no caminho principal de transferência de energia. O tanque LC paralelo apresenta uma associação ressonante que modifica a distribuição de tensão e corrente em relação ao tanque série. Já o tanque LLC acrescenta uma indutância magnetizante L_m , o que altera a resposta em frequência do conversor.

Figura 3.4 – Organização das topologias de conversores ressonantes analisadas.



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dessas combinações, foram implementadas as seguintes topologias no PLECS: HB_LC_Serie, HB_LC_Paralelo, FB_LC_Serie, FB_LC_Paralelo, HB_LLC e FB_LLC.

A nomenclatura adotada segue a identificação utilizada nos arquivos de simulação. O prefixo HB indica a estrutura half bridge, enquanto o prefixo FB indica a estrutura full bridge. Os termos LC_Serie, LC_Paralelo e LLC identificam a configuração do tanque ressonante utilizada em cada modelo.

3.5 Parâmetros de simulação

Os parâmetros de simulação foram definidos com o objetivo de permitir uma análise

comparativa entre as topologias estudadas. A Tabela 3.1 apresenta os principais valores adotados nos modelos implementados no PLECS.

Tabela 3.1 - Parâmetros de simulação adotados

Parâmetro	Símbolo	Valor adotado
Tensão contínua de entrada	V_{dc}	400 V
Tensão de saída de referência	V_{o_ref}	100 V
Potência de saída de referência	P_{o_ref}	500 W
Corrente de saída de referência	i_{o_ref}	5 A
Carga resistiva equivalente	R_o	20 Ω
Frequência de ressonância	f_r	85 kHz
Frequência nominal de chaveamento	f_s	85 kHz
Indutância ressonante	L_r	73 μ H
Capacitância ressonante	C_r	$\approx$ 48 nF
Indutância magnetizante nas topologias LLC	L_m	$\approx$ 300 μ H
Relação de transformação inicial	n	3,6
Tempo total de simulação	T_{sim}	5 ms
Passo de amostragem	Δ_t	10 ns

Fonte: Elaborado pelo autor.

A corrente de saída de referência e a carga resistiva equivalente foram obtidas a partir dos valores definidos para a tensão e a potência de saída. Dessa forma, os parâmetros adotados estabelecem uma base comum para a comparação entre as topologias analisadas.

A frequência de ressonância associada ao tanque LC foi calculada a partir da relação

apresentada na Equação (27).

A potência de saída em carga resistiva pode ser estimada pela Equação (40).

$$P_0 = \frac{V_o^2}{R_o} \quad (40)$$

O tempo total de simulação utilizado foi de 5 ms, e o passo de amostragem adotado foi de 10 ns. As médias de V_o e i_o foram calculadas considerando os 20% finais do intervalo de simulação, com o objetivo de reduzir a influência dos transitórios iniciais e concentrar a análise no intervalo final da resposta simulada.

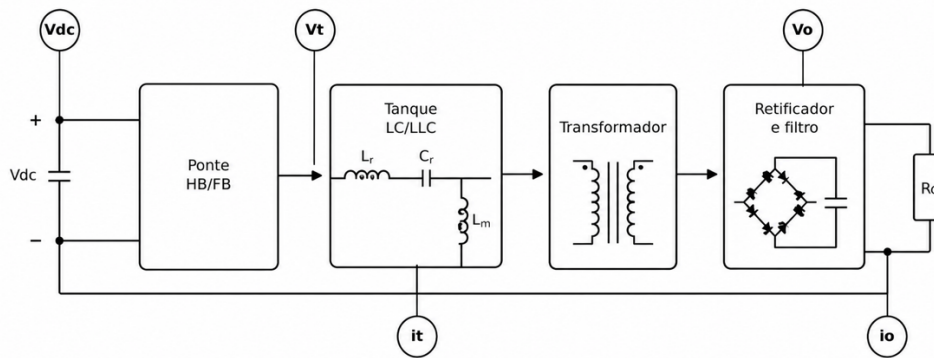
Durante as simulações, observou-se que o uso dos mesmos parâmetros em topologias diferentes não garante a mesma tensão de saída. Isso ocorre porque cada configuração apresenta uma função de ganho própria. Assim, os conversores LC série, LC paralelo e LLC podem produzir respostas diferentes mesmo quando submetidos à mesma tensão de entrada, frequência de chaveamento, carga e relação de transformação inicial.

3.6 Grandezas analisadas

As grandezas analisadas foram escolhidas com o objetivo de avaliar o funcionamento dos conversores e comparar o comportamento das diferentes topologias. A análise concentrou-se principalmente nas formas de onda de tensão e corrente associadas à entrada, ao tanque ressonante, ao transformador e à saída.

A tensão de entrada foi representada por V_{dc} . A tensão de saída foi representada por V_o . A corrente de saída foi representada por i_o . A tensão no tanque ou no primário do transformador foi representada por V_t . A corrente no tanque ou no primário do transformador foi representada por i_t .

Figura 3.5 – Pontos de medição das principais grandezas analisadas nos modelos simulados.



Fonte: Elaborado pelo autor

As grandezas V_o , i_o , V_t , i_t e V_{dc} foram utilizadas como base para a verificação funcional dos modelos. Um modelo foi considerado funcional quando apresentava formas de onda coerentes com a topologia simulada, transferência de energia para a carga e ausência de comportamentos incompatíveis com a operação esperada do conversor, como ausência de chaveamento, tensão de saída nula sem justificativa ou correntes incompatíveis com os parâmetros adotados.

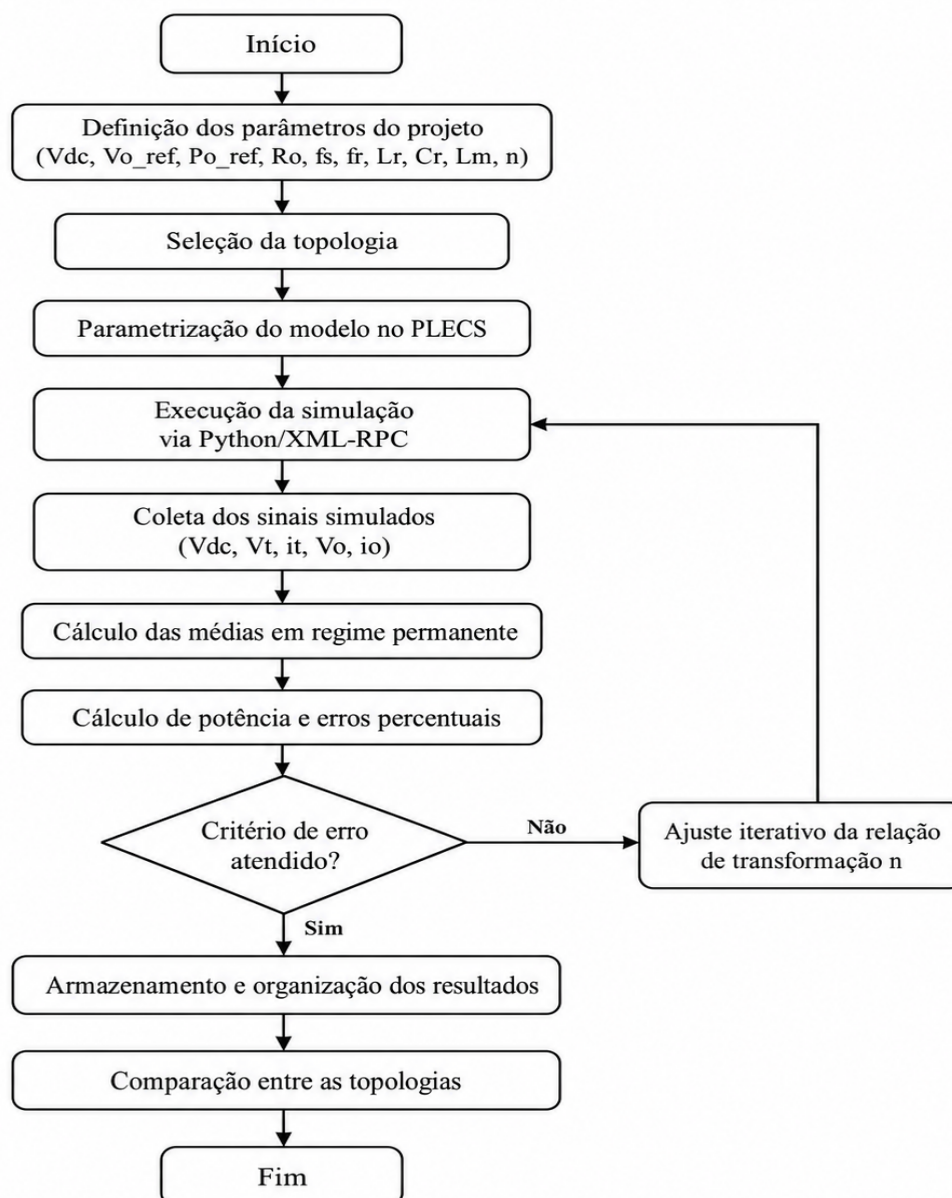
3.7 Procedimento de simulação

O procedimento de simulação foi estruturado de forma sequencial, iniciando pela definição dos parâmetros gerais do projeto e finalizando com a análise comparativa das topologias. Inicialmente, foram definidos V_{dc} , V_{o_ref} , P_{o_ref} , i_{o_ref} , R_o , f_s , f_r , L_r , C_r , L_m e n inicial. Em seguida, os modelos foram implementados no PLECS e os sinais de comando das chaves semicondutoras foram configurados.

Após a implementação dos circuitos, foram realizadas simulações iniciais com $n = 3,6$ em todas as topologias. Nessa etapa, foram observadas as grandezas V_{dc} , V_t , i_t , V_o e i_o . A análise inicial permitiu verificar que as topologias apresentavam respostas de saída significativamente diferentes, mesmo com a mesma base de parâmetros.

Posteriormente, aplicou-se um ajuste iterativo da relação de transformação n . Esse ajuste foi realizado com base na tensão média de saída simulada, com o objetivo de aproximar V_o da referência de 100 V. O procedimento foi tratado como calibração orientada por simulação, não como otimização completa do conversor.

Figura 3.6 – Fluxo operacional utilizado para execução e análise das simulações.



Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, os resultados obtidos foram organizados e comparados. A comparação considerou as diferenças entre meia ponte e ponte completa, entre tanques LC série e LC paralelo e entre estruturas LC e LLC.

4 PROJETO E SIMULAÇÃO DOS CONVERSORES DE TANQUE RESSONANTE

4.1 Especificações gerais do projeto

O projeto desenvolvido neste trabalho teve como objetivo implementar e simular diferentes topologias de conversores de tanque ressonante, permitindo a comparação entre estruturas em meia ponte e ponte completa, bem como entre configurações de tanque LC série, LC paralelo e LLC. O foco do estudo foi a verificação funcional dos modelos, a análise das grandezas elétricas e a comparação dos resultados obtidos em simulação.

As especificações gerais foram definidas de modo a estabelecer uma base comum de comparação entre os conversores. A tensão contínua de entrada foi definida como $V_{dc} = 400V$. A tensão de saída de referência foi definida como $V_{o_ref} = 100 V$, e a potência de saída de referência foi definida como $P_{o_ref} = 500 W$.

A partir da tensão e da potência de saída especificadas, calculou-se a corrente de saída de referência pela Equação (40).

$$i_{o_ref} = \frac{P_{o_ref}}{V_{o_ref}} \quad (40)$$

Substituindo os valores definidos:

$$i_{o_ref} = \frac{500}{100}$$

$$i_{o_ref} = 5 A$$

Assim, a corrente de saída de referência adotada no projeto foi $i_{o_ref} = 5 A$.

A carga resistiva equivalente foi calculada a partir da tensão e da potência de saída, conforme a Equação (19)

$$R_o = \frac{V_{o_ref}^2}{P_{o_ref}} \quad (19)$$

Substituindo os valores especificados:

$$R_o = \frac{100^2}{500}$$

$$R_o = \frac{1000}{500}$$

$$R_o = 20 \, \Omega$$

Dessa forma, a resistência de carga equivalente adotada nas simulações foi $R_o = 20 \, \Omega$. Essa escolha permitiu representar a carga de saída de forma simplificada e manter uma base comum para a comparação entre as topologias.

A frequência de ressonância de referência associada ao par $L_r - C_r$ foi estabelecida em $f_r = 85kHz$, enquanto a frequência nominal de chaveamento foi definida como $f_s = 85kHz$. A relação entre essas duas grandezas é expressa pela frequência normalizada, conforme apresentado na Equação (30).

Substituindo os valores adotados, obtém-se $f_n = 1$. Portanto, no ponto nominal de análise, a frequência de chaveamento coincide com a frequência de ressonância de referência definida pelo par $L_r - C_r$. Assim, os modelos são avaliados na frequência de ressonância de referência, e não apenas em uma frequência próxima à ressonância.

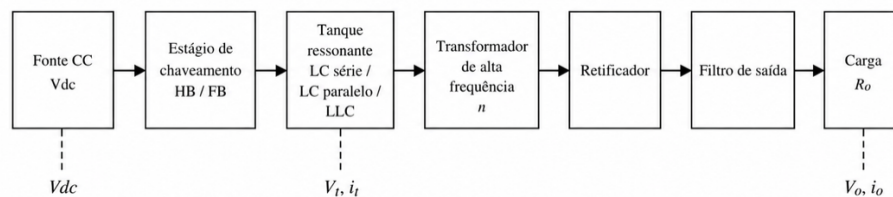
A adoção de $f_n = 1$ estabelece um ponto de operação comum para a análise comparativa das topologias. Essa condição não implica que todos os conversores apresentem o mesmo ganho, a mesma tensão de saída ou as mesmas condições de comutação, uma vez que a resposta depende da configuração do tanque, da estrutura de chaveamento, da carga equivalente refletida e da relação de transformação. No caso da topologia LLC, deve-se considerar ainda a existência de outra frequência característica associada à participação da indutância magnetizante, conforme discutido na Seção 2.9.

Tabela 4.1– Parâmetros gerais adotados no projeto preliminar.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Tensão contínua de entrada	V_{dc}	400 V
Tensão de saída de referência	$V_{o,ref}$	100 V
Potência de saída de referência	$P_{o,ref}$	500 W
Corrente de saída de referência	$I_{o,ref}$	5 A
Resistência de carga	R_o	20 Ω
Frequência de ressonância de referência	f_r	85 kHz
Frequência nominal de chaveamento	f_s	85 kHz
Indutância ressonante	L_r	73 μH
Capacitância ressonante	C_r	$\approx 48 \text{ nF}$
Indutância magnetizante — LLC	L_m	$\approx 300 \mu H$
Relação de transformação inicial	n	3,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.1 – Estrutura geral considerada para os conversores ressonantes simulados.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 4.1 deve representar a estrutura geral dos conversores simulados, contendo fonte V_{dc} , estágio de chaveamento em meia ponte ou ponte completa, tanque ressonante, transformador, retificador, filtro de saída e carga R_o . Essa figura ajuda a visualizar que a tensão de saída é resultado da interação entre vários blocos do conversor, e não apenas da relação de transformação.

4.2 Critérios de dimensionamento do tanque ressonante

O dimensionamento adotado neste trabalho possui caráter preliminar e foi estabelecido com o objetivo de definir uma base comum para a implementação e a comparação das topologias simuladas. Conforme discutido no Capítulo 2, o projeto completo de um conversor ressonante depende não apenas da frequência de ressonância, mas também da carga equivalente, do fator de qualidade, da impedância característica, da função de ganho da topologia e do ponto de

operação.

Neste trabalho, adotou-se $f_r = 85 \text{ kHz}$ como frequência de ressonância de referência, com a finalidade de estabelecer um ponto nominal comum para a comparação entre as diferentes topologias. Esse valor não corresponde a uma frequência ótima determinada individualmente para cada conversor, mas a uma especificação do projeto preliminar utilizada para manter uma base comum durante as simulações.

De maneira semelhante, adotou-se $L_r = 73 \mu\text{H}$ como indutância ressonante de referência para o dimensionamento preliminar dos tanques. A partir dos valores definidos de f_r e L_r , a capacitância ressonante C_r foi calculada de modo que o par $L_r - C_r$ apresentasse a frequência de ressonância especificada, conforme a relação apresentada no Capítulo 2, reproduzida a seguir para aplicação no dimensionamento. Como pode ser visto na Equação (29)

$$C_r = \frac{1}{(2 \pi f_r)^2 L_r}$$

Substituindo os valores adotados:

$$C_r = \frac{1}{(2 \pi 85000)^2 73 \cdot 10^{-6}}$$

$$C_r \approx 4,80 \cdot 10^{-8} \text{ F}$$

$$C_r \approx 48 \text{ nF}$$

Assim, foi adotado $C_r \approx 48 \text{ nF}$ para os tanques ressonantes analisados. Com $L_r = 73 \mu\text{H}$ e $C_r \approx 48 \text{ nF}$, obtém-se uma frequência de ressonância de aproximadamente 85 kHz , correspondente à frequência de ressonância de referência adotada no projeto.

Os valores de L_r e C_r foram mantidos como base preliminar comum para as topologias analisadas. Essa escolha possibilita observar como diferentes estruturas ressonantes respondem às mesmas condições iniciais, mas não representa a otimização individual dos parâmetros de cada conversor Equação (31).

A partir dos valores definidos para L_r e C_r , a impedância característica do tanque LC foi calculada conforme a relação apresentada no Capítulo 2.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$$

Substituindo os valores adotados:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{73 \cdot 10^{-6}}{48 \cdot 10^{-9}}}$$

$$Z_0 \approx 39 \Omega$$

esse valor caracteriza a relação entre os elementos indutivo e capacitivo do tanque e constitui um parâmetro relevante para a interpretação de sua resposta. Em conversores ressonantes, a impedância característica deve ser analisada em conjunto com a resistência equivalente refletida, o fator de qualidade, a frequência normalizada e a topologia considerada.

Para as topologias LLC, foi considerada a indutância magnetizante L_m , associado ao transformador. No projeto preliminar seu valor foi definido a partir de uma razão entre L_m e L_r . Considerando $m \approx 4,1$, tem-se a Equação (20).

$$L_m = mL_r \quad (20)$$

Substituindo:

$$L_m = 4,1 \cdot 73 \mu H$$

$$L_m \approx 299,3 \mu H$$

$$L_m \approx 300 \mu H$$

Dessa forma, foi adotado $L_m \approx 300 \mu H$ nas topologias HB_LLC e FB_LLC. Esse valor foi utilizado como parâmetro preliminar de simulação e não representa uma otimização completa do tanque LLC. O comportamento do conversor LLC depende, entre outros fatores, da relação entre L_m e L_r , da frequência normalizada, do fator de qualidade e da carga equivalente refletida.

Outro ponto importante do projeto é a diferença entre a excitação aplicada ao tanque por uma estrutura em meia ponte e por uma estrutura em ponte completa. Conforme a Aproximação pela Primeira Harmônica (*First Harmonic Approximation* – FHA), apresentada no Capítulo 2, a componente fundamental eficaz da tensão aplicada ao tanque por uma ponte completa ideal pode ser estimada pela Equação (32)

$$V_{1,FB,rms} = \left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \right) V_{dc}$$

Com $V_{dc} = 400 \text{ V}$:

$$V_{1,FB,rms} = \left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \right) 400$$

$$V_{1,FB,rms} \approx 360 \text{ V}$$

Para uma meia ponte ideal, a componente fundamental eficaz pode ser estimada pela Equação (33).

$$V_{1,HB,rms} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{dc}$$

Com $V_{dc} = 400 \text{ V}$:

$$V_{1,HB,rms} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} 400$$

$$V_{1,HB,rms} \approx 180 \text{ V}$$

Esses resultados mostram que, para o mesmo barramento CC, a ponte completa aplica ao tanque uma componente fundamental aproximadamente duas vezes maior que a meia ponte. Essa diferença ajuda a explicar por que as topologias FB_LC_Serie e FB_LLC apresentaram, na simulação inicial, tensão de saída aproximadamente duas vezes maior que suas respectivas versões em meia ponte.

A relação de transformação inicial foi definida como $n = 3,6$. Esse valor foi aplicado inicialmente a todas as topologias, permitindo observar como cada conversor responderia à mesma base preliminar de projeto. A utilização de uma mesma relação de transformação inicial teve finalidade comparativa, pois evidenciou as diferenças de ganho entre os tanques LC série, LC paralelo e LLC.

A tensão de saída dos conversores ressonantes não depende apenas da relação de transformação. Ela depende da componente fundamental aplicada pela ponte, do ganho do tanque, da frequência normalizada, do fator de qualidade, da carga equivalente refletida, da relação de transformação, do retificador e do filtro de saída. Dessa forma, a mesma base de parâmetros pode produzir tensões de saída diferentes em topologias distintas.

Após a simulação inicial com $n = 3,6$, foi aplicado um procedimento iterativo de ajuste da relação de transformação com o objetivo de aproximar a tensão média de saída $V_{o,sim}$ da referência de $V_{o,ref} = 100 \text{ V}$. A regra prática utilizada para atualização de n é apresentada na

Equação (21).

$$n_{novo} = n_{atual} \left(\frac{V_{o_sim}}{V_{o_ref}} \right) \quad (21)$$

em que n_{novo} é a nova relação de transformação estimada, n_{atual} é a relação de transformação utilizada na simulação anterior, V_{o_sim} é a tensão média de saída obtida por simulação e V_{o_ref} é a tensão de saída de referência.

Essa relação foi utilizada como regra prática de calibração por simulação. Ela não representa uma otimização completa nem substitui uma modelagem analítica completa por FHA. Como a alteração de n também modifica a carga equivalente refletida ao tanque, o ponto de operação e o fator de qualidade efetivo podem ser alterados, fazendo com que algumas topologias apresentem resposta não proporcional e justificando o uso de um procedimento iterativo.

Para o conversor FB_LC_Serie, por exemplo, a simulação inicial com $n = 3,6$ resultou em $V_{o_sim} = 110,5474$ V. Aplicando a Equação (21):

$$n_{novo} = 3,6 \left(\frac{110,5474}{100} \right)$$

$$n_{novo} \approx 3,9797$$

Esse valor corresponde à relação de transformação final utilizada na simulação ajustada do FB_LC_Serie.

Para o conversor HB_LC_Serie, a simulação inicial com $n = 3,6$ resultou em $V_{o_sim} = 54,8719$ V. Aplicando a Equação (21):

$$n_{novo} = 3,6 \left(\frac{54,8719}{100} \right)$$

$$n_{novo} \approx 1,9754$$

Esse valor corresponde à relação de transformação final utilizada na simulação ajustada do HB_LC_Serie.

Nas topologias LC série e LLC, a correção direta foi suficiente ou próxima do valor final necessário para adequar a tensão de saída. Nas as topologias LC paralelo, o comportamento foi mais sensível. O caso HB_LC_Paralelo evidenciou que a resposta não foi puramente

proporcional.

Na condição inicial, com $n = 3,6$, o HB_LC_Paralelo apresentou $V_{o_sim} = 281,4834 V$. Aplicando a Equação (21):

$$n_{novo} = 3,6 \left(\frac{281,4834}{100} \right)$$

$$n_{novo} \approx 10,1334$$

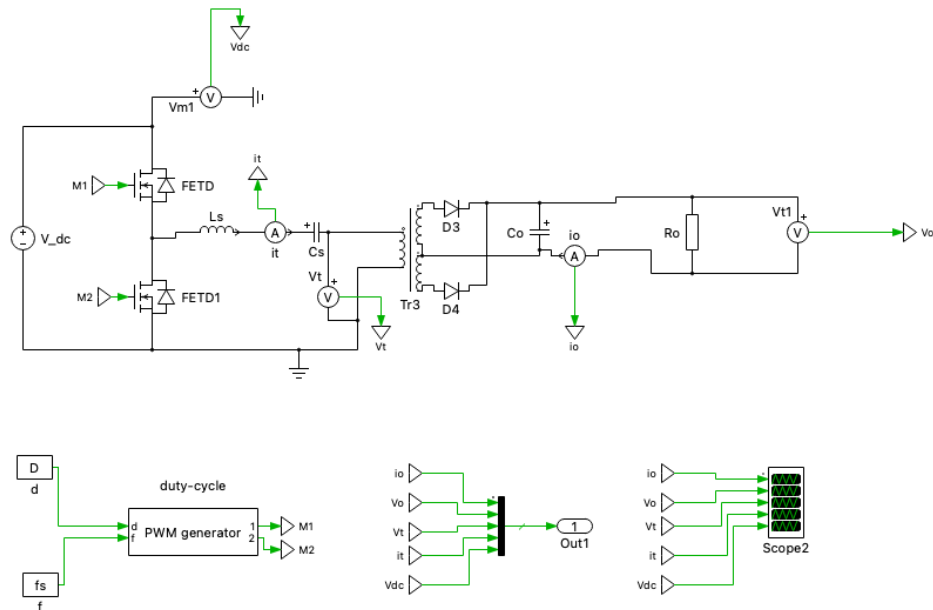
No entanto, ao simular a topologia com $n = 10,1334$, a tensão de saída aumentou para $V_o = 350,4845 V$. Esse comportamento indicou que a alteração de n modificou a carga equivalente refletida ao tanque e alterou o ganho observado. Por isso, foram necessárias iterações adicionais. Com $n = 35,5160$, obteve-se $V_o = 102,3263 V$. Em seguida, com $n = 36,3422$, obteve-se $V_o = 99,1797 V$, atendendo ao critério de erro absoluto inferior a 1%.

Esse resultado reforça que o ajuste adotado foi iterativo e orientado pela simulação. O procedimento permitiu aproximar a tensão média de saída à referência sem alterar L_r , C_r , f_s , V_{dc} ou R_o , preservando a base comum de comparação entre as topologias.

4.3 Conversor meia ponte LC série

O conversor HB_LC_Serie foi implementado com um estágio inversor em meia ponte associado a um tanque ressonante LC série. A fonte contínua V_{dc} alimenta o estágio de chaveamento, responsável por aplicar ao tanque uma tensão alternada de alta frequência. A energia processada pelo tanque é transferida ao transformador e, posteriormente, ao estágio retificador, ao filtro de saída e à carga resistiva R_o .

Figura 4.2 – Modelo do conversor HB_LC_Serie implementado no PLECS.



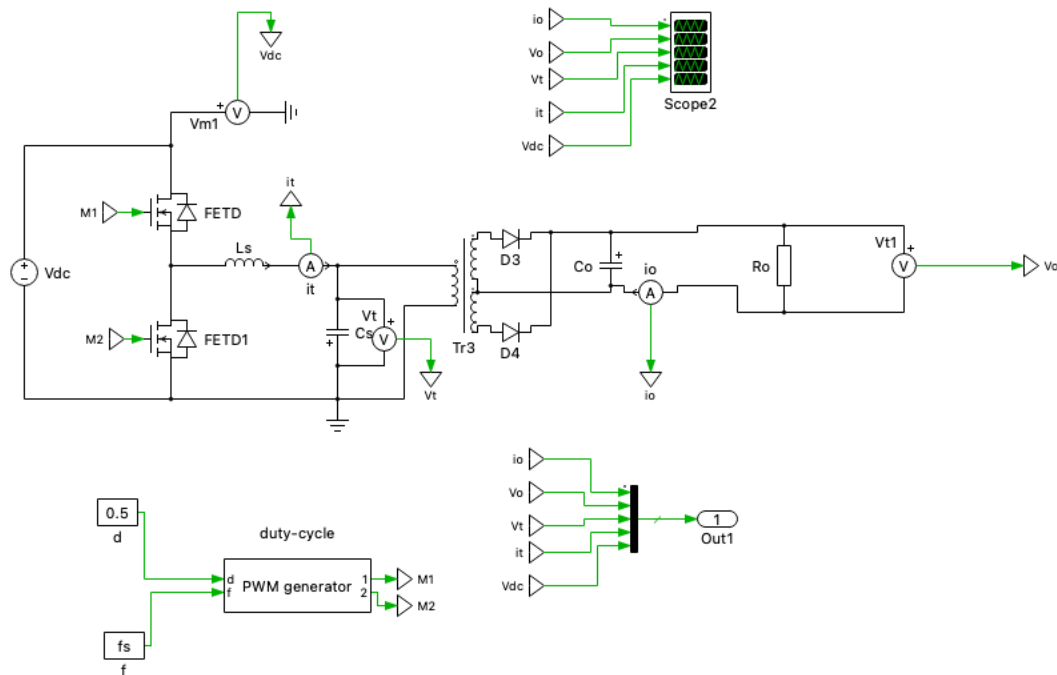
Fonte: Elaborado pelo autor

A topologia foi simulada utilizando a base preliminar de parâmetros definida nas Seções 4.1 e 4.2, incluindo $V_{dc} = 400V$, $L_r = 73\mu H$, $C_r \approx 48nF$, $R_o = 20\Omega$, $f_s = 85kHz$ e relação de transformação inicial $n = 36$. Na condição inicial, a tensão de saída permaneceu abaixo da referência estabelecida. Esse comportamento é compatível com a menor amplitude da componente fundamental aplicada ao tanque pela configuração em meia ponte, quando comparada à ponte completa para o mesmo barramento contínuo.

4.4 Conversor meia ponte LC paralelo

O conversor HB_LC_Paralelo foi implementado com a mesma estrutura de chaveamento em meia ponte, porém utilizando tanque LC paralelo. Essa configuração altera a resposta em frequência e a forma como a carga se relaciona com o tanque.

Figura 4.3 - Modelo do Converso HB_LC_Paralelo implementado no PLECS



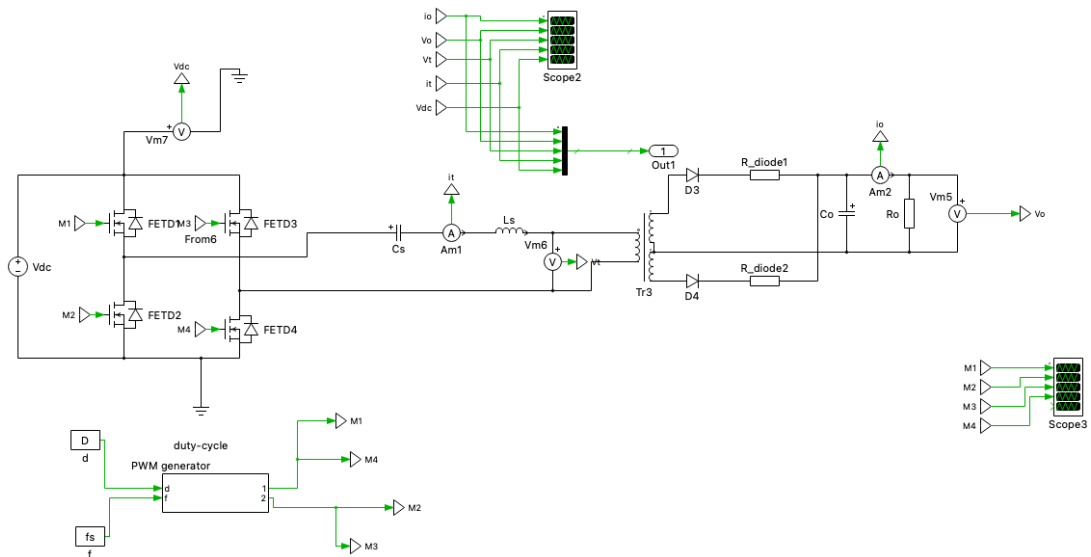
Fonte: Elaborado pelo autor

A topologia utilizou a mesma base preliminar de parâmetros adotada para os demais conversores. Durante as simulações, a topologia apresentou tensão de saída elevada na condição inicial e comportamento não diretamente proporcional durante o ajuste de n . Esse comportamento reforçou a necessidade do procedimento iterativo de calibração, uma vez que a alteração da relação de transformação modifica também a carga equivalente refletida ao tanque.

4.5 Conversor ponte completa LC série

O conversor FB_LC_Serie foi implementado com estrutura de chaveamento em ponte completa e tanque LC série. A ponte completa aplica ao tanque uma componente fundamental de maior amplitude em comparação com a meia ponte, considerando o mesmo valor de V_{dc} .

Figura 4.4 – Modelo do conversor FB_LC_Serie implementado no PLECS.



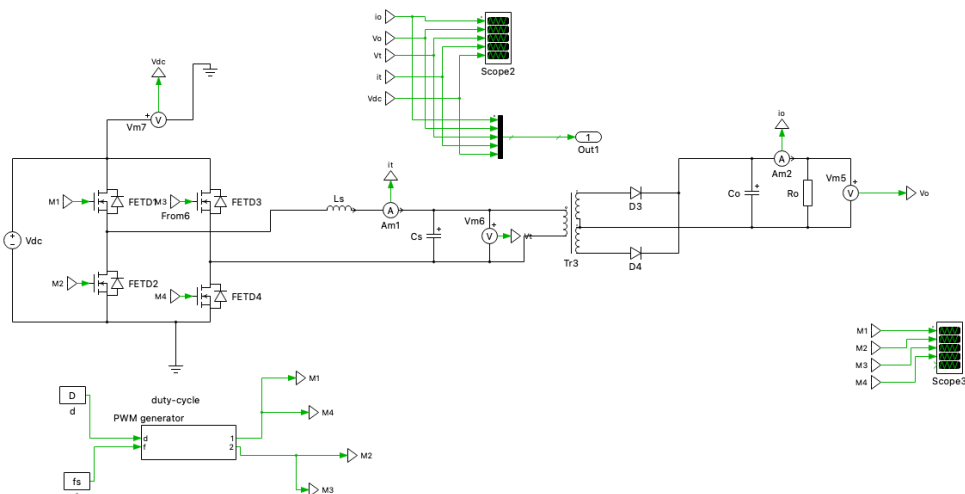
Fonte: Elaborado pelo autor

Na simulação inicial com $n = 3,6$, essa topologia apresentou tensão de saída próxima de 110 V , aproximadamente o dobro da tensão obtida na topologia HB_LC_Serie. Esse comportamento está de acordo com a diferença esperada entre a excitação em meia ponte e ponte completa.

4.6 Conversor ponte completa LC paralelo

O conversor FB_LC_Paralelo combinou a estrutura em ponte completa com o tanque LC paralelo. Essa foi a topologia que apresentou a maior tensão de saída na condição inicial com $n = 3,6$.

Figura 4.5– Modelo do conversor FB_LC_Paralelo implementado no PLECS.



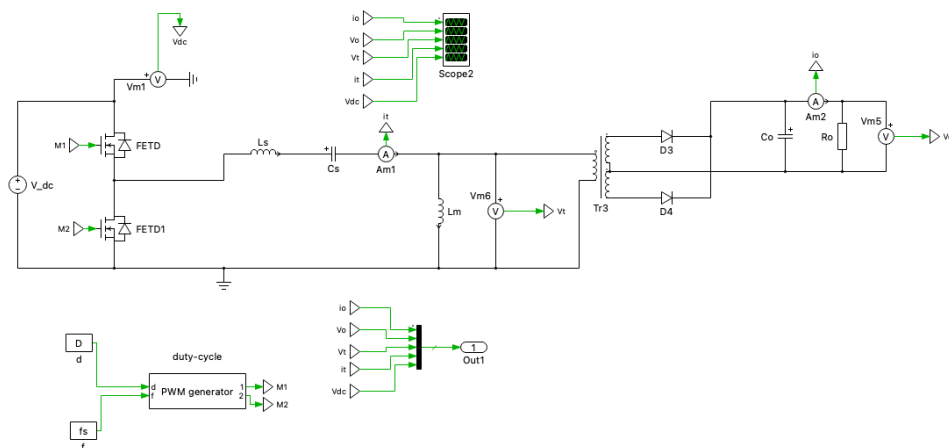
Fonte: Elaborado pelo autor

O comportamento observado indicou ganho elevado do tanque LC paralelo no ponto de operação analisado, especialmente quando associado à maior excitação da ponte completa. Esse resultado motivou o ajuste iterativo da relação de transformação para adequar a tensão de saída à referência de 100 V.

4.7 Conversor meia ponte LLC

O conversor HB_LLC foi implementado com um estágio inversor em meia ponte associado a um tanque LLC, constituído pela indutância ressonante L_r , pela capacitância ressonante C_r e pela indutância magnetizante L_m . A presença de L_m introduz uma característica adicional à resposta em frequência do tanque, diferenciando a topologia LLC das configurações LC simples.

Figura 4.6 – Modelo do conversor HB_LLC implementado no PLECS.



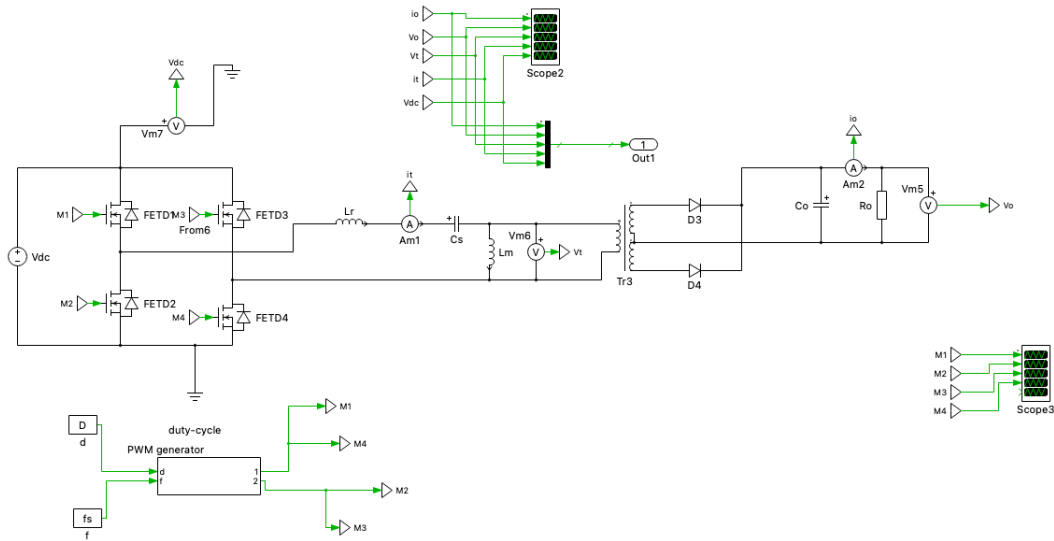
Fonte: Elaborado pelo autor

Na simulação inicial, o HB_LLC apresentou comportamento próximo ao HB_LC_Serie em relação à tensão de saída, ficando abaixo da referência de 100 V. Esse resultado foi utilizado na comparação entre tanques LC série e LLC sob a mesma estrutura de chaveamento.

4.8 Conversor ponte completa LLC

O conversor FB_LLC foi implementado com estrutura em ponte completa e tanque LLC. Essa topologia combina maior amplitude de excitação da ponte completa com a resposta característica do tanque LLC.

Figura 4.7 – Modelo do conversor FB_LLC implementado no PLECS.



Fonte: Elaborado pelo autor

Na simulação inicial com $n = 3,6$, o FB_LLC apresentou tensão de saída próxima de 110 V. Após o ajuste iterativo da relação de transformação, a topologia atingiu tensão de saída de 110V próxima da referência, com erro absoluto inferior a 1%.

4.9 Estratégia de varredura de frequência

A varredura de frequência foi prevista como estratégia complementar para avaliar a influência da frequência de chaveamento sobre a resposta dos conversores. Em conversores ressonantes, a relação entre f_s e f_r é relevante porque altera a frequência normalizada e, conseqüentemente, o ganho do tanque.

Os resultados quantitativos de varredura de frequência, carga e tensão de entrada não foram utilizados como critério conclusivo neste trabalho. Dessa forma, a análise de varreduras permanece como possibilidade de continuidade e aprofundamento. O estudo principal concentrou-se na simulação nominal das seis topologias, na comparação inicial com $n = 3,6$ e no ajuste iterativo da relação de transformação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Verificação funcional dos modelos simulados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir das simulações computacionais dos seis conversores ressonantes implementados no PLECS, com apoio de scripts em Python para parametrização, execução automatizada e pós-processamento dos dados. As topologias analisadas foram HB_LC_Serie, HB_LC_Paralelo, FB_LC_Serie, FB_LC_Paralelo, HB_LLC e FB_LLC.

Os resultados discutidos neste capítulo foram obtidos exclusivamente por simulação. Portanto, não representam validação experimental dos conversores, nem comprovação prática de rendimento, perdas, ZVS ou ZCS. O objetivo da análise foi avaliar o comportamento dos modelos simulados a partir dos parâmetros definidos no projeto preliminar, observando principalmente a tensão de saída, a corrente de saída, a potência entregue à carga e as formas de onda associadas ao tanque ressonante.

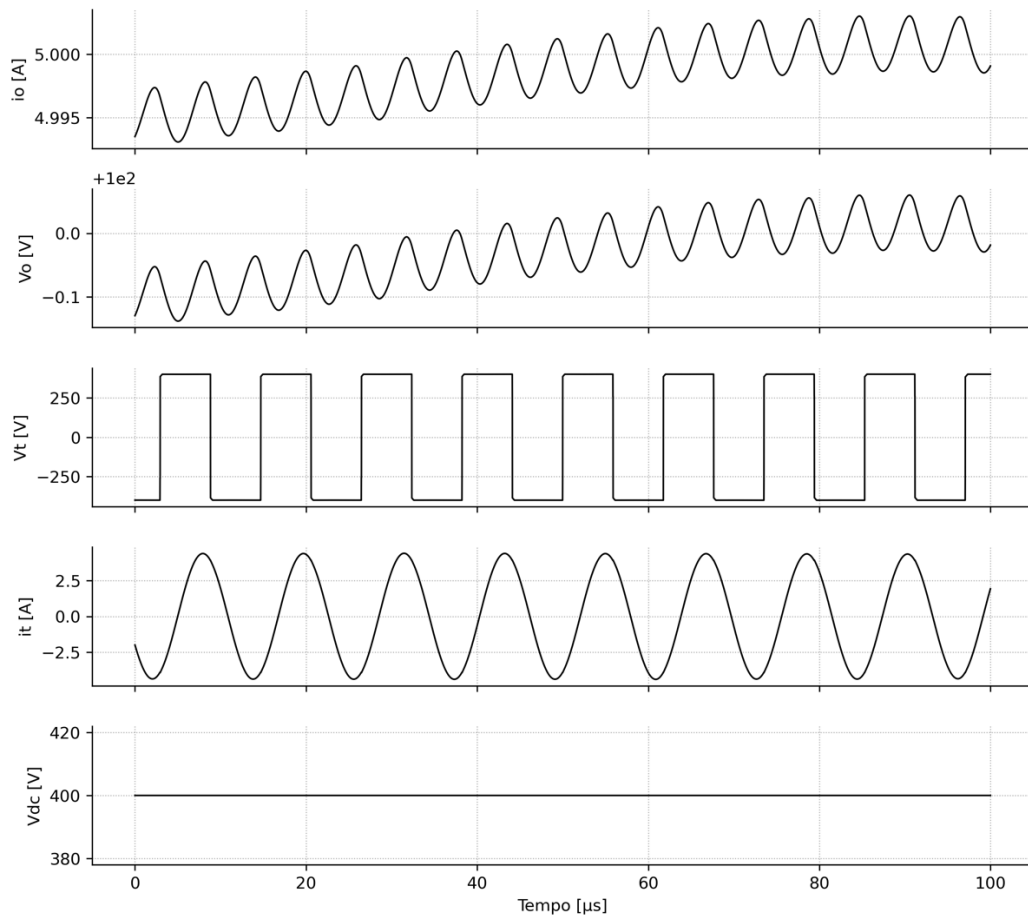
As simulações nominais foram conduzidas com uma base comum de parâmetros: $V_{dc} = 400\text{ V}$, $V_{o,ref} = 100\text{ V}$, $P_{o,ref} = 500\text{ W}$, $I_{o,ref} = 5\text{ A}$, $R_o = 20\ \Omega$, $f_r \approx 85\text{ kHz}$, $f_s = 85\text{ kHz}$, $L_r = 73\ \mu\text{H}$, $C_r \approx 48\text{ nF}$ e relação de transformação inicial $n = 3,6$. Nas topologias LLC, foi utilizada ainda uma indutância magnetizante $L_m \approx 300\ \mu\text{H}$.

A verificação funcional consistiu em observar se os modelos apresentavam chaveamento coerente, transferência de energia para a carga, formas de onda compatíveis com a topologia simulada e valores de saída fisicamente consistentes. Essa verificação não deve ser confundida com validação experimental, pois foi realizada apenas no ambiente computacional.

5.2 Análise das formas de onda de tensão e corrente

As formas de onda de V_o , i_o , V_t , i_t e V_{dc} foram utilizadas para apoiar a interpretação do comportamento dos modelos. V_o e i_o permitiram avaliar a resposta da saída após retificação e filtragem. V_t e i_t permitiram observar o comportamento do tanque ou do primário do transformador. V_{dc} foi utilizada como referência da alimentação contínua do estágio de chaveamento.

Figura 5.1 – Exemplo de formas de onda simuladas no intervalo final de análise.



Fonte: Elaborado pelo autor

As formas de onda foram analisadas no intervalo final das simulações, com o objetivo de reduzir a influência dos transitórios iniciais e apoiar a interpretação do comportamento dos modelos. Não se deve afirmar a ocorrência de ZVS, ZCS, eficiência elevada ou redução quantitativa de perdas sem que esses indicadores tenham sido calculados especificamente. Neste trabalho, as formas de onda servem para verificar o comportamento funcional dos modelos e apoiar a comparação qualitativa entre as topologias.

5.3 Resultados dos conversores meia ponte

Na simulação inicial com $n = 3,6$, as topologias em meia ponte apresentaram comportamentos distintos. O HB_LC_Serie apresentou $V_{o_inicial} = 54,8719 \text{ V}$, $i_{o_inicial} = 2,7436 \text{ A}$ e $P_{o_inicial} = 150,5464 \text{ W}$, com erro de tensão de $-45,13\%$. O HB_LLC apresentou $V_{o_inicial} = 54,8624 \text{ V}$, $i_{o_inicial} = 2,7431 \text{ A}$, $P_{o_inicial} = 150,4939 \text{ W}$, com erro de tensão de $-45,14\%$.

Esses dois resultados indicaram que, para os parâmetros adotados, as topologias em meia ponte com tanque LC série e LLC ficaram abaixo da referência de 100V. Esse comportamento é compatível com a menor amplitude da componente fundamental aplicada ao tanque pela meia ponte, considerando o mesmo barramento contínuo e a base preliminar de parâmetros adotada.

O HB_LC_Paralelo apresentou comportamento diferente. Na condição inicial com $n = 3,6$, obteve-se $V_{o,inicial} = 281,4834 \text{ V}$, $i_{o,inicial} = 14,0742 \text{ A}$ e $P_{o,inicial} = 3961,6451 \text{ W}$, com erro de tensão de +181,48%. Esse resultado indica que o tanque LC paralelo apresentou ganho elevado no ponto nominal analisado.

Após o ajuste iterativo da relação de transformação, as topologias em meia ponte apresentaram tensão média de saída próxima da referência estabelecida. O HB_LC_Serie atingiu $n_{final} = 1,9754$, $V_{o,final} = 100,3946 \text{ V}$ e $P_{o,final} = 503,9541 \text{ W}$. O HB_LC_Paralelo atingiu $n_{final} = 36,3422$, $V_{o,final} = 99,1797 \text{ V}$ e $P_{o,final} = 491,8306 \text{ W}$. O HB_LLC atingiu $n_{final} = 1,9750$, $V_{o,final} = 100,4354 \text{ V}$ e $P_{o,final} = 504,3635 \text{ W}$.

5.4 Resultados dos conversores ponte completa

As topologias em ponte completa apresentaram maior tensão de saída nas configurações LC série e LLC quando comparadas às versões em meia ponte. O FB_LC_Serie apresentou $V_{o,inicial} = 110,5474 \text{ V}$, $I_{o,inicial} = 5,5274 \text{ A}$ e $P_{o,inicial} = 611,0368 \text{ W}$, com erro de tensão de +10,55%. O FB_LLC apresentou $V_{o,inicial} = 110,3999 \text{ V}$, $I_{o,inicial} = 5,5200 \text{ A}$ e $P_{o,inicial} = 609,4071 \text{ W}$, com erro de tensão de +10,40%.

Esses resultados mostram que, nas topologias LC série e LLC, as versões em ponte completa apresentaram tensão de saída significativamente superior à das versões correspondentes em meia ponte. Esse comportamento é compatível com a maior amplitude da componente fundamental aplicada ao tanque pela ponte completa para o mesmo barramento contínuo.

O FB_LC_Paralelo apresentou o caso mais crítico da simulação inicial, com $V_{o,inicial} = 452,4132 \text{ V}$, $I_{o,inicial} = 22,6207 \text{ A}$ e $P_{o,inicial} = 10233,8848 \text{ W}$, resultando em erro de tensão de +352,41%. indica que, no ponto de operação analisado, a combinação entre a configuração LC paralelo, a excitação em ponte completa e a carga equivalente refletida produziu ganho significativamente superior ao necessário para atender à referência de saída.

Após o ajuste iterativo da relação de transformação, as topologias em ponte completa apresentaram tensão média de saída próxima da referência estabelecida. O FB_LC_Serie apresentou $n_{final} = 3,9797$, $V_{o,final} = 100,0717 V$ e $P_{o,final} = 500,7173 W$. O FB_LC_Paralelo atingiu $n_{final} = 20,8403$, $V_{o,final} = 99,9185 V$ e $P_{o,final} = 499,1850 W$.

5.5 Resultados dos conversores LC série

A comparação entre HB_LC_Serie e FB_LC_Serie evidenciou a influência da estrutura de chaveamento sobre a tensão aplicada ao tanque. Com $n = 3,6$, o HB_LC_Serie apresentou $V_o = 54,8719V$, enquanto o FB_LC_Serie apresentou $V_o = 110,5474 V$. A versão em ponte completa apresentou, portanto, tensão de saída aproximadamente duas vezes superior à observada na versão em meia ponte.

Após o ajuste iterativo da relação de transformação, ambas as topologias LC série apresentaram tensão média de saída próxima da referência estabelecida. O HB_LC_Serie apresentou $V_o = 100,3946V$, com erro de $+0,39\%$, enquanto o FB_LC_Serie apresentou $V_o = 100,0717 V$, com erro de $+0,07\%$. As relações de transformação utilizadas após o ajuste foram $n = 1,9754$ para a configuração em meia ponte e $n = 3,9797$ para a configuração em ponte completa.

Esses resultados indicam que, para os parâmetros adotados, o comportamento das topologias LC série foi compatível com a diferença de excitação entre as estruturas em meia ponte e ponte completa. O ajuste da relação de transformação permitiu aproximar a tensão média de saída de ambas as topologias da referência de $100V$.

5.6 Resultados dos conversores LC paralelo

Os conversores LC paralelo apresentaram os maiores desvios iniciais em relação à referência. O HB_LC_Paralelo apresentou $V_o = 281,4834 V$, enquanto o FB_LC_Paralelo apresentou $V_o = 452,4132 V$. Esses valores indicam que, para o ponto nominal analisado, as configurações LC paralelo apresentaram ganho significativamente superior ao observado nas topologias LC série e LLC.

O histórico do ajuste do HB_LC_Paralelo foi especialmente importante. Na condição inicial, $n = 3,6$ e $V_o = 281,4834V$. Na primeira iteração, n foi ajustado para $10,1334$, mas V_o

aumentou para 350,4845V. Na segunda iteração, com $n = 35,5160$, V_o foi reduzida para 102,3263 V. Na terceira iteração, com $n = 36,3422$, obteve-se $V_o = 99,1797$ V.

Esse comportamento mostra que a relação entre n e V_o não foi puramente proporcional nessa topologia. A alteração de n modifica a carga equivalente refletida ao tanque e, conseqüentemente, pode alterar o ponto de operação, o fator de qualidade efetivo e o ganho observado. Por esse motivo, o procedimento iterativo mostrou-se mais adequado do que uma única correção direta.

Após o ajuste iterativo, o HB_LC_Paralelo apresentou erro de tensão de $-0,82\%$, enquanto o FB_LC_Paralelo apresentou erro de $-0,08\%$. Apesar da aproximação da tensão média de saída à referência, as relações de transformação utilizadas após o ajuste foram significativamente superiores às adotadas nas demais topologias. Esse resultado evidencia a resposta particular das configurações LC paralelo no ponto de operação analisado e a maior sensibilidade dessas topologias às alterações da relação de transformação.

5.7 Resultados dos conversores LLC

As topologias LLC apresentaram comportamento semelhante às topologias LC série em relação aos valores iniciais de tensão de saída. O HB_LLC apresentou $V_o = 54,8624$ V, enquanto o FB_LLC apresentou $V_o = 110,3999$ V. A diferença observada entre as configurações em meia ponte e ponte completa é compatível com a maior amplitude da componente fundamental aplicada ao tanque pela estrutura em ponte completa.

Após o ajuste iterativo da relação de transformação, o HB_LLC apresentou $n = 1,9750$, $V_o = 100,4354$ V e $P_o = 504,3635$ W. O FB_LLC apresentou $n = 3,9744$, $V_o = 99,9576$ V e $P_o = 499,5762$ W. Em ambos os casos, o erro absoluto da tensão de saída permaneceu inferior a 1%.

Esses resultados indicam que, para os parâmetros adotados e no ponto nominal analisado, as topologias LLC apresentaram comportamento próximo ao das topologias LC série em relação à tensão média de saída. Essa observação está restrita às condições analisadas neste trabalho e não deve ser generalizada para outros pontos de operação, uma vez que a resposta do conversor LLC depende, entre outros fatores, da relação entre L_m e L_r , da frequência normalizada, do fator de qualidade e da carga equivalente refletida.

5.8 Influência da frequência de chaveamento

A influência da frequência de chaveamento foi considerada como análise complementar, uma vez que a relação entre f_s e f_r determina a frequência normalizada e influencia a resposta dos conversores ressonantes. Os resultados quantitativos de varredura de frequência não foram utilizados como critério conclusivo neste trabalho.

Dessa forma, a análise sistemática da influência de f_s permanece indicada como possibilidade de continuidade do estudo. No presente trabalho, a comparação entre as topologias foi realizada no ponto nominal definido por $f_s = f_r \approx 85 \text{ kHz}$, associado à frequência de ressonância de referência do par $L_r - C_r$, com ajuste iterativo da relação de transformação para aproximar a tensão média de saída do valor de referência.

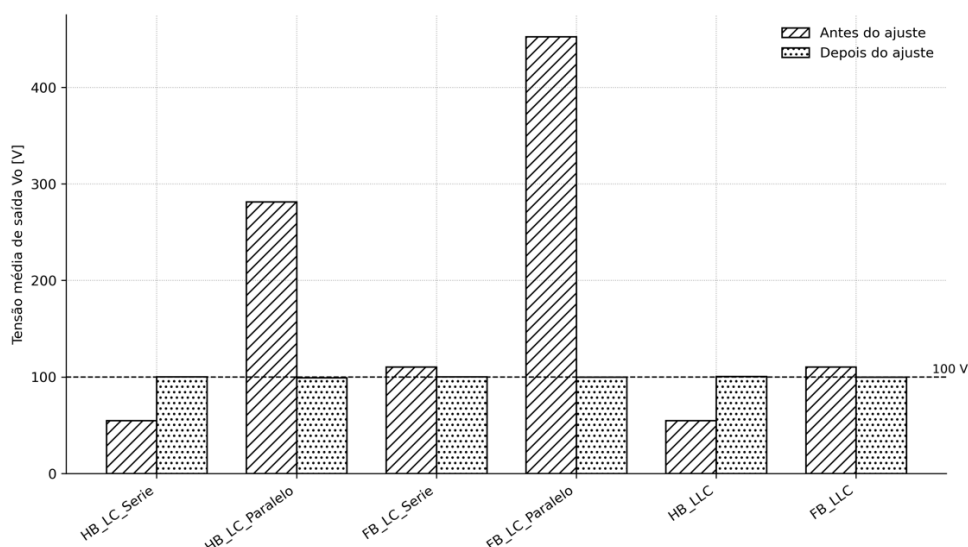
5.9 Comparação geral entre as topologias

A comparação geral permitiu identificar três grupos de comportamento na simulação inicial com $n = 3,6$. O primeiro grupo foi formado pelas topologias HB_LC_Serie e HB_LLC, com tensões de saída próximas de 55V. O segundo grupo foi formado pelas topologias FB_LC_Serie e FB_LLC, com tensões de saída próximas de 110V. O terceiro grupo foi formado pelas topologias LC paralelo, que apresentaram tensões de saída significativamente superiores à referência estabelecida.

Esses resultados mostram que a utilização de uma mesma base preliminar de parâmetros não resulta necessariamente na mesma tensão de saída para todas as topologias. Embora a frequência de ressonância definida por L_r e C_r seja um parâmetro importante, ela não determina isoladamente o ganho do conversor. A resposta também depende da frequência normalizada, do fator de qualidade, da carga equivalente refletida, da estrutura de chaveamento, da configuração do tanque ressonante, da relação de transformação e do estágio de retificação e filtragem.

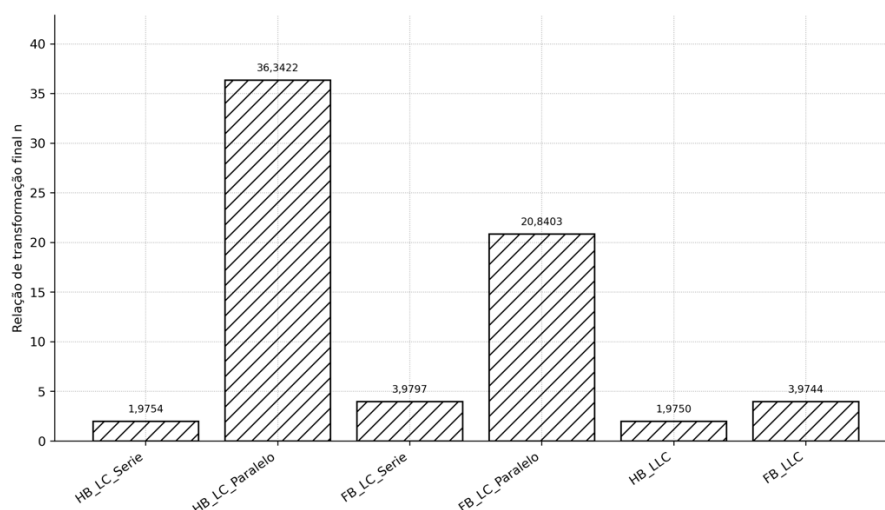
Após o ajuste iterativo de n , todas as topologias apresentaram erro absoluto de tensão inferior a 1%. Esse resultado indica que o procedimento de calibração orientado por simulação foi adequado para a finalidade comparativa adotada neste trabalho. Como $R_o = 20\Omega$ foi mantida constante, a aproximação da tensão de saída em relação à referência de 100 V também resultou em valores de potência próximos de 500W, de acordo com a relação $P_o = V_o^2/R_o$.

Figura 5.2 – Comparação das tensões de saída antes e depois do ajuste iterativo de n .



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.3 – Comparação das relações de transformação finais das topologias analisadas.



Fonte: Elaborado pelo autor

A comparação das relações de transformação utilizadas após o ajuste mostrou que HB_LC_Serie e HB_LLC apresentaram valores próximos de $n = 1,975$, enquanto FB_LC_Serie e FB_LLC apresentaram valores próximos de $n = 3,97$. As topologias LC paralelo, por sua vez, exigiram relações de transformação significativamente superiores, com $n = 36,3422$ para HB_LC_Paralelo e $n = 20,8403$ para FB_LC_Paralelo. Esse resultado evidencia a resposta diferenciada das configurações LC paralelo no ponto de operação analisado e reforça a influência da carga equivalente refletida e da configuração do tanque sobre o comportamento do conversor.

5.10 Limitações do estudo

Os resultados deste trabalho são válidos no contexto dos modelos simulados, dos parâmetros adotados e da finalidade comparativa estabelecida para o estudo. Não foram realizadas a construção física de protótipos, a validação experimental dos conversores, a medição de rendimento, a análise detalhada de perdas, a comprovação de condições de comutação em ZVS ou ZCS, nem a otimização individual das topologias analisadas.

A Aproximação pela Primeira Harmônica (First Harmonic Approximation – FHA) foi utilizada como base conceitual para auxiliar na interpretação do comportamento e do ganho dos conversores, porém não foi desenvolvida uma modelagem analítica completa e específica para cada uma das topologias estudadas.

Além disso, os resultados foram obtidos para um conjunto específico de parâmetros e para o ponto nominal definido no projeto preliminar. Dessa forma, os resultados não permitem estabelecer, de forma generalizada, uma topologia como superior às demais para diferentes condições de operação. Uma avaliação mais abrangente exigiria análises adicionais, incluindo esforços elétricos nos componentes, perdas, rendimento, estratégias de controle, comportamento em diferentes condições de carga e frequência de chaveamento, faixa de operação e validação experimental.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Este trabalho apresentou o projeto preliminar, a modelagem, a simulação e a comparação de seis topologias de conversores ressonantes no ambiente PLECS, com apoio de scripts em Python para automatização da parametrização, execução das simulações, aquisição dos sinais, cálculo das grandezas médias no intervalo final de análise e organização dos resultados.

As topologias analisadas foram HB_LC_Serie, HB_LC_Paralelo, FB_LC_Serie, FB_LC_Paralelo, HB_LLC e FB_LLC. Essas configurações permitiram comparar a influência da estrutura de chaveamento, em meia ponte e ponte completa, e da configuração do tanque ressonante, considerando as estruturas LC série, LC paralelo e LLC.

O trabalho foi desenvolvido a partir de uma base comum de projeto, definida por $V_{dc} = 400V$, $V_{o,ref} = 100V$, $P_{o,ref} = 500W$, $I_{o,ref} = 5A$, $R_o = 20\Omega$, $f_r \approx 85kHz$, $f_s = 85kHz$, $L_r = 73\mu H$, $C_r \approx 48nF$ e relação de transformação inicial $n = 3,6$. Para as topologias LLC, foi utilizada ainda a indutância magnetizante $L_m \approx 300\mu H$.

A utilização de uma base comum permitiu observar, de forma comparativa, como cada topologia respondeu aos mesmos parâmetros iniciais. Na primeira etapa de simulação, todas as topologias foram avaliadas com $n = 3,6$. Os resultados mostraram que a mesma base preliminar de projeto não produziu a mesma tensão de saída em todas as configurações. Esse comportamento evidencia que a tensão de saída dos conversores analisados depende da interação entre a estrutura de chaveamento, a configuração do tanque ressonante, a carga equivalente refletida, a relação de transformação, o estágio retificador e de filtragem e a frequência de operação.

Nas simulações iniciais, as topologias HB_LC_Serie e HB_LLC apresentaram tensões de saída próximas de $55V$, permanecendo abaixo da referência de $100V$. As topologias FB_LC_Serie e FB_LLC apresentaram tensões próximas de $110V$. Para as condições analisadas, as configurações em ponte completa apresentaram tensões de saída significativamente superiores às respectivas configurações em meia ponte, comportamento compatível com a maior amplitude da componente fundamental aplicada ao tanque pela estrutura em ponte completa.

As topologias LC paralelo apresentaram os maiores desvios em relação à referência na condição

inicial. O HB_LC_Paralelo apresentou $V_o = 281,4834V$, correspondente a um erro de +181,48%, enquanto o FB_LC_Paralelo apresentou $V_o = 452,4132V$, correspondente a um erro de +352,41%. Esses resultados indicam que, no ponto de operação analisado, as configurações LC paralelo apresentaram ganho significativamente superior ao necessário para atender à tensão de saída especificada.

A partir desses resultados, verificou-se que o dimensionamento preliminar comum do tanque ressonante foi adequado para estabelecer uma base de comparação entre as topologias, mas não foi suficiente para produzir a mesma tensão de saída em todos os conversores. Por esse motivo, foi aplicado um procedimento iterativo de ajuste da relação de transformação n , orientado pela tensão média de saída obtida nas simulações.

O ajuste de n foi tratado como uma calibração orientada por simulação, e não como uma otimização completa dos conversores. Durante esse procedimento, os demais parâmetros definidos para a condição nominal de comparação foram mantidos constantes, sendo modificada apenas a relação de transformação com o objetivo de aproximar a tensão média de saída da referência de 100V.

Após o ajuste iterativo, todas as topologias apresentaram erro absoluto de tensão inferior a 1%. Esse resultado indica que o procedimento de calibração adotado foi adequado para aproximar as seis topologias da tensão de saída especificada dentro das condições simuladas. Como a carga resistiva foi mantida em $R_o = 20\Omega$, a aproximação de V_o em relação a 100V também resultou em potências de saída próximas de 500W.

A comparação das relações de transformação utilizadas após o ajuste também evidenciou diferenças entre as topologias. As configurações HB_LC_Serie e HB_LLC apresentaram valores próximos de $n = 1,975$, enquanto FB_LC_Serie e FB_LLC apresentaram valores próximos de $n = 3,97$. As topologias LC paralelo, por sua vez, exigiram relações de transformação significativamente superiores, com $n = 36,3422$ para o HB_LC_Paralelo e $n = 20,8403$ para o FB_LC_Paralelo. Esses resultados evidenciam a resposta particular das configurações LC paralelo no ponto de operação analisado e sua maior sensibilidade ao ajuste da relação de transformação.

A utilização do Python em conjunto com o PLECS contribuiu para padronizar o processo de simulação das seis topologias. O PLECS foi responsável pela modelagem e solução numérica dos circuitos, enquanto o Python foi empregado na parametrização dos modelos, no

acionamento automatizado das simulações, na aquisição dos sinais e no pós-processamento dos resultados. Essa integração reduziu a necessidade de intervenções manuais repetitivas e permitiu aplicar um procedimento uniforme de análise às diferentes configurações estudadas.

No contexto dos modelos simulados, dos parâmetros adotados e da finalidade comparativa do estudo, considera-se que o objetivo geral do trabalho foi atendido. Os conversores foram modelados, simulados e comparados a partir de uma base comum, e o procedimento iterativo permitiu aproximar a tensão média de saída das seis topologias da referência especificada. Os resultados devem ser interpretados dentro dos limites estabelecidos para o estudo: não foram realizadas validação experimental, construção física de protótipo, medição de rendimento, análise detalhada de perdas, comprovação de condições de comutação em ZVS ou ZCS ou otimização individual das topologias.

Conclui-se, portanto, que a metodologia utilizada permitiu identificar diferenças relevantes entre as topologias analisadas, principalmente quanto à tensão de saída na condição inicial, à influência da estrutura de chaveamento e à resposta ao ajuste da relação de transformação. Os resultados não permitem estabelecer uma topologia como superior às demais em termos absolutos, mas evidenciam comportamentos distintos para as condições simuladas e fornecem uma base para estudos posteriores mais abrangentes.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como continuidade deste trabalho, recomenda-se o desenvolvimento de uma modelagem analítica mais completa, com aplicação da Aproximação pela Primeira Harmônica (*First Harmonic Approximation* – FHA) às topologias analisadas. Essa abordagem permitiria comparar o comportamento previsto pelos modelos analíticos com os resultados obtidos por simulação no PLECS e aprofundar a compreensão das diferenças observadas entre os conversores.

Também se sugere ampliar a análise das configurações LC série, LC paralelo e LLC para diferentes condições de operação, considerando variações da frequência de chaveamento, da carga e dos parâmetros do tanque ressonante. Essa investigação permitiria caracterizar de forma mais abrangente as curvas de ganho e avaliar a influência desses parâmetros sobre a resposta dos conversores. Particularmente nas configurações LC paralelo, essa análise poderia contribuir para compreender com maior profundidade o comportamento observado no ponto nominal

estudado neste trabalho.

Outra possibilidade de continuidade consiste na inclusão de modelos de perdas nos dispositivos semicondutores, no transformador, nos indutores, nos capacitores e nos demais elementos do circuito. Com isso, seria possível estimar o rendimento dos conversores e ampliar a comparação entre as topologias, considerando não apenas a tensão e a potência de saída, mas também as perdas associadas ao processamento de energia.

Sugere-se ainda investigar as condições de comutação suave, particularmente ZVS e ZCS, utilizando critérios específicos de análise. Para essa finalidade, deverão ser avaliadas as formas de onda de tensão e corrente nos dispositivos semicondutores nos instantes de comutação, permitindo verificar se as condições necessárias para a ocorrência de comutação em tensão nula ou corrente nula são efetivamente atendidas em cada topologia e condição de operação.

Outra extensão relevante consiste no desenvolvimento de um projeto mais detalhado dos elementos magnéticos. Neste trabalho, o transformador e as indutâncias foram considerados no contexto dos modelos de simulação. Em trabalhos futuros, o dimensionamento físico desses componentes poderá incluir a definição do material magnético, geometria do núcleo, número de espiras, densidade de fluxo, perdas no núcleo e no cobre, efeitos de dispersão, saturação e demais limitações construtivas.

Também se recomenda a implementação de uma estratégia de controle em malha fechada para a tensão de saída. No presente trabalho, o ajuste da relação de transformação foi utilizado como procedimento de calibração dos modelos, não sendo implementado controle dinâmico da saída. A utilização de uma estratégia de controle permitiria avaliar a capacidade de regulação dos conversores diante de variações da carga, da tensão de entrada e da referência de saída.

As análises paramétricas também podem ser ampliadas em trabalhos futuros. Recomenda-se investigar sistematicamente a influência da frequência de chaveamento f_s , da resistência de carga R_o e da tensão de entrada V_{dc} , considerando a relação de transformação adotada após o ajuste de cada topologia. Essa análise permitiria determinar como cada conversor responde a condições diferentes da condição nominal utilizada neste estudo e identificar faixas de operação de interesse para análises posteriores.

Outra etapa relevante consiste na avaliação dos esforços de tensão e corrente nos componentes. Essa análise permitiria comparar as solicitações impostas às chaves semicondutoras, diodos,

capacitores, indutores e transformadores das diferentes topologias. A obtenção dessas informações seria importante para uma avaliação mais abrangente, uma vez que a seleção de uma topologia não depende apenas das grandezas de saída, mas também dos esforços elétricos, das perdas, do custo e da complexidade de implementação.

Como etapa posterior, recomenda-se a construção de um protótipo experimental para validação dos modelos desenvolvidos. A implementação física permitiria comparar os resultados experimentais com aqueles obtidos nas simulações do PLECS, investigar efeitos não contemplados pelos modelos idealizados e avaliar o comportamento dos conversores em condições reais de operação.

Para as topologias LLC, sugere-se ainda investigar diferentes combinações de L_r , C_r e L_m , bem como diferentes relações entre L_m e L_r . Essa análise permitiria avaliar a influência dos parâmetros do tanque sobre a resposta em frequência e sobre as características de ganho do conversor, além de possibilitar a aplicação de metodologias específicas de dimensionamento para essa família de conversores.

Por fim, trabalhos futuros podem ampliar o estudo para outras configurações ressonantes, como as topologias LCC e CLLC. A inclusão dessas estruturas permitiria expandir a comparação realizada neste trabalho e avaliar alternativas de conversores CC-CC ressonantes isolados para aplicações em alta frequência.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Pedro Santos. **Síntese de conversores ressonantes com alto fator de potência e alta eficiência para o acionamento de diodos emissores de luz**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2014.
- DAL PONT, Neilor C.; BANDEIRA JUNIOR, Delvanei G.; LAZZARIN, Telles B.; BARBI, Ivo. Conversor CC-CC paralelo ressonante meia ponte assimétrico com saída em tensão. **Eletrônica de Potência, Florianópolis**, v. 23, n. 1, p. 108–117, 2018. DOI: 10.18618/REP.2018.1.2740.
- DE SIMONE, S.; ADRAGNA, C.; SPINI, C.; GATTAVARI, G. Design-oriented steady-state analysis of LLC resonant converters based on FHA. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER ELECTRONICS, ELECTRICAL DRIVES, AUTOMATION AND MOTION, 2006, Taormina. **Proceedings [...]**. [S. l.]: IEEE, 2006. p. 200–207. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2006.1649771.
- GUAN, Yueshi; CECATI, Carlo; ALONSO, J. Marcos; ZHANG, Zhe. Review of high-frequency high-voltage-conversion-ratio DC-DC converters. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics**, v. 2, n. 4, p. 374–389, 2021. DOI: 10.1109/JESTIE.2021.3051554.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables 2024: analysis and forecasts to 2030**. Paris: IEA, 2024.
- JOHNSON, Steven D.; ERICKSON, Robert W. Steady-state analysis and design of the parallel resonant converter. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 3, n. 1, p. 93–104, 1988. DOI: 10.1109/63.4335.
- KUO-PENG, Patrick; CHÉRON, Yvon. Modeling the non-reversible series-resonant converter operating in zero voltage switching mode. **Eletrônica de Potência, Florianópolis**, v. 1, n. 1, p. 71–78, 1996. DOI: 10.18618/REP.1996.1.071078.
- LEE, Fred C. High-frequency quasi-resonant converter technologies. **Proceedings of the IEEE**, v. 76, n. 4, p. 377–390, 1988. DOI: 10.1109/5.4424.
- MUDIYANSELAGE, Guvanthi A.; KESHMIRI, Niloufar; EMADI, Ali. A review of DC-DC resonant converter topologies and control techniques for electric vehicle applications. **IEEE Open Journal of Power Electronics**, v. 4, p. 945–964, 2023. DOI: 10.1109/OJPEL.2023.3331180.
- NEVES, Milena Rezende Barbosa. **Estudo comparativo entre topologias de conversores CC-CC isolados aplicadas a um sistema auxiliar de baixa tensão para veículos elétricos**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.
- OEDER, Christian; DUERBAUM, Thomas. ZVS investigation of LLC converters based on FHA assumptions. In: IEEE APPLIED POWER ELECTRONICS CONFERENCE AND EXPOSITION, 28., 2013, Long Beach. **Proceedings [...]**. [S. l.]: IEEE, 2013. p. 2643–2648. DOI: 10.1109/APEC.2013.6520669.

RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de potência: dispositivos, circuitos e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.

RASHIDI, Mohammad et al. Design and implementation of a LLC resonant solid-state transformer. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 56, n. 4, p. 3855–3864, 2020. DOI: 10.1109/TIA.2020.2982847.

RIBEIRO, Bryan de Oliveira; SILVA, Guilherme Ricardo da. **Projeto e simulação de módulo conversor CC-CC trifásico série ressonante para processamento de microgeração fotovoltaica**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2023.

STEIGERWALD, Robert L. A comparison of half-bridge resonant converter topologies. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 3, n. 2, p. 174–182, 1988. DOI: 10.1109/63.4347.

WANG, Yijie; LUCIA, Oscar; ZHANG, Zhe; GAO, Shanshan; GUAN, Yueshi; XU, Dianguo. A review of high frequency power converters and related technologies. **IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society**, v. 1, p. 247–260, 2020. DOI: 10.1109/OJIES.2020.3023691.

APÊNDICE A – SCRIPT DE DIMENSIONAMENTO PRELIMINAR DOS CONVERSORES

Este apêndice apresenta o script utilizado para organizar o dimensionamento preliminar comum às seis topologias analisadas. O programa identifica a estrutura de chaveamento e o tipo de tanque, calcula a resistência equivalente de carga, a capacitância ressonante a partir de f_r e L_r , a frequência de ressonância resultante e a impedância característica do tanque. Em seguida, os parâmetros são organizados em um dicionário compatível com as variáveis de modelo utilizadas nas simulações.

Arquivo de origem: projeto_conversores.py

Dependências: NumPy.

Entradas principais: topologia selecionada; $V_{dc} = 400\text{ V}$; $V_{o,ref} = 100\text{ V}$; $P_{o,ref} = 500\text{ W}$; $f_r = 85\text{ kHz}$; $L_r = 73\text{ }\mu\text{H}$; $n_{inicial} = 3,6$; e $m = L_m/L_r = 4,1$ para as topologias LLC.

Saídas principais: parâmetros preliminares do conversor e dicionário de variáveis destinado ao PLECS.

Código-fonte

```
import numpy as np

# =====
# ESCOLHA DA TOPOLOGIA
# =====

topologia = 'FB_LC_Serie'

# Opções disponíveis:
# 'HB_LC_Serie'
# 'HB_LC_Paralelo'
# 'FB_LC_Serie'
# 'FB_LC_Paralelo'
# 'HB_LLC'
# 'FB_LLC'

# =====
# FUNÇÕES DE PROJETO
# =====

def identifica_topologia(topologia):
    """
    Identifica se a topologia é Half-Bridge ou Full-Bridge
    e se o tanque é LC Série, LC Paralelo ou LLC.
```

```

"""

if topologia.startswith('HB'):
    ponte = 'Half-Bridge'
    fator_ponte = 0.5

elif topologia.startswith('FB'):
    ponte = 'Full-Bridge'
    fator_ponte = 1.0

else:
    raise ValueError("Topologia inválida. Use HB ou FB no início do nome.")

if 'LC_Serie' in topologia:
    tanque = 'LC Série'

elif 'LC_Paralelo' in topologia:
    tanque = 'LC Paralelo'

elif 'LLC' in topologia:
    tanque = 'LLC'

else:
    raise ValueError("Tipo de tanque inválido.")

return ponte, tanque, fator_ponte

def calcula_carga(Vo_ref, Po_ref):
    """
    Calcula a resistência equivalente da carga.
     $Ro = Vo^2 / Po$ 
    """
    Ro = Vo_ref**2 / Po_ref
    return Ro

def calcula_capacitor_ressonante(fr, Lr):
    """
    Calcula o capacitor ressonante a partir de fr e Lr.
     $fr = 1 / (2\pi \sqrt{Lr \cdot Cr})$ 
    """
    Cr = 1 / ((2 * np.pi * fr)**2 * Lr)
    return Cr

def calcula_fr(Lr, Cr):
    """
    Calcula a frequência de ressonância real.
    """
    fr = 1 / (2 * np.pi * np.sqrt(Lr * Cr))
    return fr

def calcula_impedancia_ressonante(Lr, Cr):
    """
    Calcula a impedância característica do tanque.
     $Zr = \sqrt{Lr / Cr}$ 
    """
    Zr = np.sqrt(Lr / Cr)
    return Zr

def projeta_conversor(topologia, Vdc, Vo_ref, Po_ref, fr, Lr, n, m):
    """
    Projeto base para as seis topologias:
    HB_LC_Serie
    HB_LC_Paralelo
    """

```

```

FB_LC_Serie
FB_LC_Paralelo
HB_LLC
FB_LLC
"""

ponte, tanque, fator_ponte = identifica_topologia(topologia)

Ro = calcula_carga(Vo_ref, Po_ref)
Cr = calcula_capacitor_ressonante(fr, Lr)
fr_real = calcula_fr(Lr, Cr)
Zr = calcula_impedancia_ressonante(Lr, Cr)

Vin_tanque = fator_ponte * Vdc

projeto = {
    'topologia': topologia,
    'ponte': ponte,
    'tanque': tanque,

    'Vdc': Vdc,
    'Vin_tanque_aprox': Vin_tanque,

    'Vo_ref': Vo_ref,
    'Po_ref': Po_ref,
    'Ro': Ro,

    'n': n,

    'Ls': Lr,
    'Cs': Cr,

    'fr': fr_real,
    'Zr': Zr,

    'fs_nom': fr_real,
    'D': 0.5,
    'Td': 100e-9
}

if tanque == 'LLC':
    Lm = m * Lr
    projeto['Lm'] = Lm
    projeto['m'] = m
else:
    projeto['Lm'] = None
    projeto['m'] = None

return projeto

def imprime_projeto(projeto):
    """
    Imprime os resultados do projeto.
    """

    print("\n" + "="*70)
    print(f"PROJETO DO CONVERSOR: {projeto['topologia']}")
    print("="*70)

    print(f"Tipo de ponte           = {projeto['ponte']}")
    print(f"Tipo de tanque            = {projeto['tanque']}")

    print("\n--- Especificações ---")
    print(f"Vdc                        = {projeto['Vdc']:.2f} V")
    print(f"Vin tanque aprox.         = {projeto['Vin_tanque_aprox']:.2f} V")
    print(f"Vo_ref                     = {projeto['Vo_ref']:.2f} V")

```

```

print(f"Po_ref                = {projeto['Po_ref']:.2f} W")
print(f"Ro                    = {projeto['Ro']:.4f} ohms")
print(f"n                      = {projeto['n']:.4f}")

print("\n--- Tanque ressonante ---")
print(f"Ls / Lr                = {projeto['Ls']:.6e} H")
print(f"Cs / Cr                = {projeto['Cs']:.6e} F")
print(f"fr                      = {projeto['fr']:.2f} Hz")
print(f"fs_nom                  = {projeto['fs_nom']:.2f} Hz")
print(f"Zr                      = {projeto['Zr']:.4f} ohms")

if projeto['tanque'] == 'LLC':
    print(f"Lm                = {projeto['Lm']:.6e} H")
    print(f"m = Lm/Lr            = {projeto['m']:.4f}")

print("\n--- Comando ---")
print(f"D                      = {projeto['D']:.4f}")
print(f"Td                    = {projeto['Td']:.2e} s")

print("="*70 + "\n")

def gera_parametros_para_plecs(projeto):
    """
    Converte o projeto em um dicionário compatível com os ModelVars do PLECS.
    """

    Param = {}

    Param['t_end'] = 0.005
    Param['SampleTime'] = 1e-8

    Param['Vdc'] = projeto['Vdc']

    Param['n'] = projeto['n']
    Param['Lm_tr'] = 10
    Param['im0'] = 0

    Param['Ls'] = projeto['Ls']
    Param['Cs'] = projeto['Cs']

    if projeto['Lm'] is None:
        Param['Lm'] = 300e-6
    else:
        Param['Lm'] = projeto['Lm']

    Param['iLs_ini'] = 0
    Param['vCs_ini'] = 0
    Param['iLm_ini'] = 0

    Param['Ro'] = projeto['Ro']
    Param['Co'] = 100e-6
    Param['Voini'] = 0

    Param['fs'] = projeto['fs_nom']
    Param['Ts'] = 1 / Param['fs']
    Param['D'] = projeto['D']
    Param['Td'] = projeto['Td']
    Param['Tl80'] = Param['Ts'] / 2

    return Param

def imprime_parametros_plecs(Param):
    """
    Imprime os parâmetros no formato que será enviado ao PLECS.
    """

```

```

print("\n" + "="*70)
print("PARAMETROS PARA O PLECS")
print("="*70)

for chave, valor in Param.items():
    print(f"{chave:12s} = {valor}")

print("="*70 + "\n")

# =====
# ESPECIFICAÇÕES BASE DO PROJETO
# =====

Vdc = 400          # [V]
Vo_ref = 100       # [V]
Po_ref = 500       # [W]

fr = 85e3          # [Hz]
Lr = 73e-6         # [H]
n = 3.6            # [-]

m = 4.1            # Lm/Lr para LLC

# =====
# EXECUÇÃO DO PROJETO
# =====

projeto = projeta_convertor(
    topologia=topologia,
    Vdc=Vdc,
    Vo_ref=Vo_ref,
    Po_ref=Po_ref,
    fr=fr,
    Lr=Lr,
    n=n,
    m=m
)

Param = gera_parametros_para_plecs(projeto)

# =====
# RESULTADOS
# =====

imprime_projeto(projeto)
imprime_parametros_plecs(Param)

```

APÊNDICE B – BIBLIOTECA DE COMUNICAÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS DO PLECS

Este apêndice apresenta a biblioteca auxiliar responsável pela preparação das opções de simulação e pela aquisição dos sinais retornados pelo PLECS. A função `LoadSimParameters` converte o conjunto de parâmetros em `ModelVars` e solicita a saída no formato `MatFile`. A função `avaliaCaso` executa a simulação por XML-RPC, interpreta a resposta do PLECS e separa os sinais na ordem definida no modelo: corrente de saída, tensão de saída, tensão associada ao tanque/primário, corrente associada ao tanque/primário e tensão do barramento contínuo.

Arquivo de origem: `minhalib.py`

Dependências: `SciPy`, `NumPy`, `io` e `xmlrpc.client`.

Entradas principais: dicionário de parâmetros, conexão XML-RPC e nome interno do modelo PLECS.

Saídas principais: vetores de tempo, `iout`, `Vo`, `Vt`, `it` e `Vdc`. Os valores padrão declarados em `SystemParameters` funcionam como valores iniciais da biblioteca e são sobrescritos pelos scripts finais de execução quando necessário.

Código-fonte

```
import scipy.io as sio
import io
import numpy as np
import xmlrpc.client

def SystemParameters():

    Param = {}

    # =====
    # TEMPO DE SIMULAÇÃO
    # =====
    Param['t_end'] = 0.001
    Param['SampleTime'] = 1e-8

    # =====
    # FONTE CC
    # =====
    Param['Vdc'] = 400

    # =====
    # TRANSFORMADOR
    # =====
    Param['n'] = 3.6
    Param['Lm'] = 10e-3

    # =====
    # TANQUE RESSONANTE LC SÉRIE
    # =====
```

```

Param['Ls'] = 73e-6
Param['Cs'] = 48e-9

# =====
# SAÍDA
# =====
Param['Ro'] = 20
Param['Co'] = 100e-6
Param['Voini'] = 0

# =====
# PWM / COMANDO
# =====
Param['fs'] = 100e3
Param['Ts'] = 1 / Param['fs']
Param['D'] = 0.5
Param['Td'] = 100e-9
Param['Tl80'] = Param['Ts'] / 2

return Param

def LoadSimParameters(Param):

    opts = {

        'ModelVars': {

            # tempo
            't_end': Param['t_end'],
            'SampleTime': Param['SampleTime'],

            # fonte
            'Vdc': Param['Vdc'],

            # transformador
            'n': Param['n'],
            'Lm': Param['Lm'],

            # tanque ressonante
            'Ls': Param['Ls'],
            'Cs': Param['Cs'],

            # saída
            'Ro': Param['Ro'],
            'Co': Param['Co'],
            'Voini': Param['Voini'],

            # PWM
            'fs': Param['fs'],
            'Ts': Param['Ts'],
            'D': Param['D'],
            'Td': Param['Td'],
            'Tl80': Param['Tl80']

        },

        'OutputFormat': 'MatFile'
    }

    return opts

def avaliaCaso(server, opts, MODEL_NAME):

    resultado = server.plecs.simulate(MODEL_NAME, opts)

    if isinstance(resultado, dict):

```

```

        time = np.array(resultado['Time'])
        values = np.array(resultado['Values'])

    else:
        dados = sio.loadmat(io.BytesIO(resultado.data))
        time = dados['Time'][0]
        values = dados['Values']

    if values.shape[0] == 0:
        raise ValueError(
            "O PLECS não retornou sinais. Verifique se o modelo tem Mux +
            Output/Outport configurado."
        )

    iout = values[0]
    Vo    = values[1]
    Vt    = values[2]
    it    = values[3]
    Vdc   = values[4]

    return time, iout, Vo, Vt, it, Vdc

```

APÊNDICE C – SCRIPT DE CONSOLIDAÇÃO DAS SIMULAÇÕES E AJUSTE ITERATIVO DA RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO

Este apêndice apresenta o script principal de consolidação das seis topologias. O programa estabelece a base comum de projeto, carrega sequencialmente os modelos no PLECS, executa a condição inicial com $n = 3,6$ e calcula as grandezas médias utilizando os 20% finais do intervalo de simulação. Quando o erro absoluto da tensão de saída é superior a 1%, a relação de transformação é atualizada pela regra $n_{\text{novo}} = n_{\text{atual}} \cdot V_{o_sim} / V_{o_ref}$ e uma nova simulação é executada. O procedimento é repetido até que o critério de erro seja atendido ou até o limite de iterações definido no script.

Arquivo de origem: consolidar_resultados_tcc.py

Dependências: NumPy, Pandas, xmlrpc.client, os e funções da biblioteca minhalib.py.

Entradas principais: seis modelos PLECS; $V_{dc} = 400$ V; $V_{o_ref} = 100$ V; $P_{o_ref} = 500$ W; $R_o = 20 \Omega$; $f_r = f_s = 85$ kHz; $L_r = 73 \mu\text{H}$; C_r calculado a partir de f_r e L_r ; $L_m = 4,1 \cdot L_r$; n inicial = 3,6.

Saídas principais: resultados_nominiais.csv, histórico de ajuste de n , valores de V_o , I_o , P_o , erros percentuais, ganho FHA equivalente e relação de transformação obtida após o ajuste.

Código-fonte

```
import os
import xmlrpc.client
import numpy as np
import pandas as pd

from minhalib import *

# =====
# CONFIGURAÇÕES GERAIS
# =====

PASTA_RESULTADOS = "../Resultados_TCC"
os.makedirs(PASTA_RESULTADOS, exist_ok=True)

AJUSTAR_N_AUTOMATICAMENTE = True
NUMERO_MAXIMO_ITERACOES = 5
ERRO_MAXIMO_PERCENTUAL = 1.0

# Se True, para cada topologia faz:
# simulação inicial com  $n = 3.6$ 
# ajuste iterativo de  $n$ 
# simulação final consolidada
SALVAR_HISTORICO_ITERACOES = True

# =====
# MODELOS PLECS
# =====
```

```

modelos = {
    'HB_LC_Serie': {
        'file_name': '../Modelos/HB_LC_Serie.plecs',
        'MODEL_NAME': 'HB_LC_Serie'
    },
    'HB_LC_Paralelo': {
        'file_name': '../Modelos/HB_LC_Paralelo.plecs',
        'MODEL_NAME': 'HB_LC_Paralelo'
    },
    'FB_LC_Serie': {
        'file_name': '../Modelos/FB_LC_Serie.plecs',
        'MODEL_NAME': 'FB_LC_Serie'
    },
    'FB_LC_Paralelo': {
        'file_name': '../Modelos/FB_LC_Paralelo.plecs',
        'MODEL_NAME': 'FB_LC_Paralelo'
    },
    'HB_LLC': {
        'file_name': '../Modelos/HB_LLC.plecs',
        'MODEL_NAME': 'HB_LLC'
    },
    'FB_LLC': {
        'file_name': '../Modelos/FB_LLC.plecs',
        'MODEL_NAME': 'FB_LLC'
    }
}

# =====
# ESPECIFICAÇÕES BASE DO PROJETO
# =====

VDC_BASE = 400.0
VO_REF = 100.0
PO_REF = 500.0
IO_REF = PO_REF / VO_REF
RO_BASE = VO_REF**2 / PO_REF

FR_BASE = 85e3
LR_BASE = 73e-6
CR_BASE = 1 / ((2 * np.pi * FR_BASE)**2 * LR_BASE)

M_LLC = 4.1
LM_BASE = M_LLC * LR_BASE

N_INICIAL = 3.6

# =====
# FUNÇÕES AUXILIARES
# =====

def identifica_ponte(modelo_nome):
    if modelo_nome.startswith("HB"):
        return "Half-Bridge"
    elif modelo_nome.startswith("FB"):
        return "Full-Bridge"
    else:
        raise ValueError(f"Não foi possível identificar a ponte do modelo {modelo_nome}")

def identifica_tanque(modelo_nome):
    if "LC_Serie" in modelo_nome:
        return "LC Série"
    elif "LC_Paralelo" in modelo_nome:
        return "LC Paralelo"
    elif "LLC" in modelo_nome:

```

```

        return "LLC"
    else:
        raise ValueError(f"Não foi possível identificar o tanque do modelo
{modelo_nome}")

def calcula_primeira_harmonica_ponte(Vdc, ponte):
    """
    FHA simplificada.

    Para Full-Bridge:
         $V_{l\_rms} = (2 * \sqrt{2}) / \pi * V_{dc}$ 

    Para Half-Bridge:
         $V_{l\_rms} = (\sqrt{2}) / \pi * V_{dc}$ 
    """

    Vdc = float(Vdc)

    if ponte == "Full-Bridge":
        return float((2 * np.sqrt(2) / np.pi) * Vdc)

    if ponte == "Half-Bridge":
        return float((np.sqrt(2) / np.pi) * Vdc)

    raise ValueError("Tipo de ponte inválido.")

def calcula_erros(Vo_sim, Io_sim, Po_sim):
    erro_Vo = 100 * (Vo_sim - VO_REF) / VO_REF
    erro_Io = 100 * (Io_sim - IO_REF) / IO_REF
    erro_Po = 100 * (Po_sim - PO_REF) / PO_REF

    return float(erro_Vo), float(erro_Io), float(erro_Po)

def calcula_ganho_fha_equivalente(modelo_nome, n, Vo_sim):
    """
    Ganho FHA equivalente obtido a partir da simulação.

    Não é a função analítica completa do tanque.

    Interpretação:
         $V_o \approx V_{l\_ponte\_rms} * M_{eq} / n$ 

    Logo:
         $M_{eq} \approx V_o * n / V_{l\_ponte\_rms}$ 
    """

    ponte = identifica_ponte(modelo_nome)
    Vl = calcula_primeira_harmonica_ponte(VDC_BASE, ponte)

    if abs(Vl) < 1e-9:
        return np.nan

    M_eq = (float(Vo_sim) * float(n)) / Vl

    return float(M_eq)

def cria_parametros(n_atual):
    """
    Cria o dicionário de parâmetros enviado ao PLECS.
    Todos os valores são convertidos para float para evitar erro XML-RPC.
    """

    Param = SystemParameters()

```

```

Param['t_end'] = float(0.005)
Param['SampleTime'] = float(1e-8)

Param['Vdc'] = float(VDC_BASE)

Param['n'] = float(n_atual)
Param['Lm_tr'] = float(10)
Param['im0'] = float(0)

Param['Ls'] = float(LR_BASE)
Param['Cs'] = float(CR_BASE)
Param['Lm'] = float(LM_BASE)

Param['iLs_ini'] = float(0)
Param['vCs_ini'] = float(0)
Param['iLm_ini'] = float(0)

Param['Ro'] = float(RO_BASE)
Param['Co'] = float(100e-6)
Param['Voini'] = float(0)

Param['fs'] = float(FR_BASE)
Param['Ts'] = float(1 / Param['fs'])
Param['D'] = float(0.5)
Param['Td'] = float(100e-9)
Param['Tl80'] = float(Param['Ts'] / 2)

return Param

def simula_modelo(server, modelo_nome, n_atual):
    """
    Carrega o modelo no PLECS, roda a simulação e retorna os valores médios
    no intervalo final de análise.

    As médias são calculadas usando os 20% finais da simulação, com o objetivo de
    reduzir a influência dos transitórios iniciais.
    """

    modelo = modelos[modelo_nome]

    full_path = os.path.abspath(os.getcwd())
    file_name = modelo['file_name']
    MODEL_NAME = modelo['MODEL_NAME']

    server.plecs.load(full_path + '/' + file_name)

    Param = cria_parametros(n_atual)
    opts = LoadSimParameters(Param)

    time, iout, Vo, Vt, it, Vdc_med = avaliaCaso(server, opts, MODEL_NAME)

    idx_regime = int(0.8 * len(time))

    Vo_sim = float(np.mean(Vo[idx_regime:]))
    Io_sim = float(np.mean(iout[idx_regime:]))
    Po_sim = float(Vo_sim * Io_sim)

    erro_Vo, erro_Io, erro_Po = calcula_erros(Vo_sim, Io_sim, Po_sim)

    M_eq = calcula_ganho_fha_equivalente(modelo_nome, n_atual, Vo_sim)

    return {
        'modelo': modelo_nome,
        'ponte': identifica_ponte(modelo_nome),
        'tanque': identifica_tanque(modelo_nome),

        'n': float(n_atual),
    }

```

```

        'Vo_sim': float(Vo_sim),
        'Io_sim': float(Io_sim),
        'Po_sim': float(Po_sim),

        'erro_Vo_percent': float(erro_Vo),
        'erro_Io_percent': float(erro_Io),
        'erro_Po_percent': float(erro_Po),

        'M_eq_fha': float(M_eq),

        'Vdc': float(VDC_BASE),
        'Vo_ref': float(VO_REF),
        'Io_ref': float(IO_REF),
        'Po_ref': float(PO_REF),
        'Ro': float(RO_BASE),
        'fs': float(FR_BASE),
        'fr': float(FR_BASE),
        'Ls': float(LR_BASE),
        'Cs': float(CR_BASE),
        'Lm': float(LM_BASE)
    }

def calcula_n_ajustado(n_atual, Vo_sim):
    """
    Ajuste iterativo da relação de transformação.

    Como a tensão de saída tende a variar de forma inversa com n:

        n_novo = n_atual * Vo_sim / Vo_ref
    """
    if abs(Vo_sim) < 1e-9:
        raise ValueError("Vo_sim muito próximo de zero. Não é possível ajustar n.")

    n_novo = float(n_atual) * (float(Vo_sim) / VO_REF)

    return float(n_novo)

def define_status(erro_Vo_final):
    erro_abs = abs(float(erro_Vo_final))

    if erro_abs <= 1.0:
        return "OK - erro menor ou igual a 1%"

    if erro_abs <= 5.0:
        return "ACEITAVEL - erro menor ou igual a 5%"

    if erro_abs <= 10.0:
        return "REVISAR - erro menor ou igual a 10%"

    return "CRITICO - erro maior que 10%"

# =====
# EXECUÇÃO PRINCIPAL
# =====

server = xmlrpc.client.Server("http://localhost:1080/RPC2")

resultados_finais = []
historico_iteracoes = []

print("\n" + "="*80)
print("CONSOLIDAÇÃO DE RESULTADOS DO TCC")
print("="*80)

```

```

print("Objetivo: gerar dados numéricos consolidados das seis topologias.")
print("Este script não gera imagens.")
print("="*80 + "\n")

for modelo_nome in modelos.keys():

    print("\n" + "="*80)
    print(f"PROCESSANDO TOPOLOGIA: {modelo_nome}")
    print("="*80)

    try:
        # -----
        # SIMULAÇÃO INICIAL
        # -----

        n_atual = float(N_INICIAL)

        resultado_inicial = simula_modelo(
            server=server,
            modelo_nome=modelo_nome,
            n_atual=n_atual
        )

        print("\nSIMULAÇÃO INICIAL")
        print(f"n inicial          = {resultado_inicial['n']:.4f}")
        print(f"Vo inicial           = {resultado_inicial['Vo_sim']:.4f} V")
        print(f"Io inicial           = {resultado_inicial['Io_sim']:.4f} A")
        print(f"Po inicial           = {resultado_inicial['Po_sim']:.4f} W")
        print(f"Erro Vo inicial      = {resultado_inicial['erro_Vo_percent']:.2f} %")

        historico_iteracoes.append({
            'modelo': modelo_nome,
            'iteracao': 0,
            'tipo': 'inicial',
            **resultado_inicial
        })

        # -----
        # AJUSTE ITERATIVO DE n
        # -----

        resultado_atual = resultado_inicial

        if AJUSTAR_N_AUTOMATICAMENTE:

            for k in range(1, NUMERO_MAXIMO_ITERACOES + 1):

                erro_atual = float(resultado_atual['erro_Vo_percent'])

                if abs(erro_atual) <= ERRO_MAXIMO_PERCENTUAL:
                    print("\nAjuste encerrado.")
                    print(f"Erro de Vo menor ou igual a
{ERRO_MAXIMO_PERCENTUAL:.2f} %.")
                    break

                n_novo = calcula_n_ajustado(
                    n_atual=resultado_atual['n'],
                    Vo_sim=resultado_atual['Vo_sim']
                )

                print("\nAJUSTE DE n")
                print(f"Iteração          = {k}")
                print(f"n anterior        = {resultado_atual['n']:.4f}")
                print(f"n novo            = {n_novo:.4f}")

                resultado_atual = simula_modelo(
                    server=server,
                    modelo_nome=modelo_nome,

```

```

        n_atual=n_novo
    )

    print(f"Vo ajustado      = {resultado_atual['Vo_sim']:.4f} V")
    print(f"Io ajustado      = {resultado_atual['Io_sim']:.4f} A")
    print(f"Po ajustado      = {resultado_atual['Po_sim']:.4f} W")
    print(f"Erro Vo          = {resultado_atual['erro_Vo_percent']:.2f}
%)

    historico_iteracoes.append({
        'modelo': modelo_nome,
        'iteracao': k,
        'tipo': 'ajuste',
        **resultado_atual
    })

    resultado_final = resultado_atual

    status = define_status(resultado_final['erro_Vo_percent'])

    # -----
    # RESULTADO FINAL CONSOLIDADO
    # -----

    resultados_finais.append({
        'modelo': modelo_nome,
        'ponte': resultado_final['ponte'],
        'tanque': resultado_final['tanque'],

        'Vdc': float(VDC_BASE),
        'Vo_ref': float(VO_REF),
        'Io_ref': float(IO_REF),
        'Po_ref': float(PO_REF),
        'Ro': float(RO_BASE),
        'fs': float(FR_BASE),
        'fr': float(FR_BASE),
        'Ls': float(LR_BASE),
        'Cs': float(CR_BASE),
        'Lm': float(LM_BASE),

        'n_inicial': float(resultado_inicial['n']),
        'Vo_inicial': float(resultado_inicial['Vo_sim']),
        'Io_inicial': float(resultado_inicial['Io_sim']),
        'Po_inicial': float(resultado_inicial['Po_sim']),
        'erro_Vo_inicial_percent': float(resultado_inicial['erro_Vo_percent']),
        'erro_Io_inicial_percent': float(resultado_inicial['erro_Io_percent']),
        'erro_Po_inicial_percent': float(resultado_inicial['erro_Po_percent']),
        'M_eq_fha_inicial': float(resultado_inicial['M_eq_fha']),

        'n_final': float(resultado_final['n']),
        'Vo_final': float(resultado_final['Vo_sim']),
        'Io_final': float(resultado_final['Io_sim']),
        'Po_final': float(resultado_final['Po_sim']),
        'erro_Vo_final_percent': float(resultado_final['erro_Vo_percent']),
        'erro_Io_final_percent': float(resultado_final['erro_Io_percent']),
        'erro_Po_final_percent': float(resultado_final['erro_Po_percent']),
        'M_eq_fha_final': float(resultado_final['M_eq_fha']),

        'status': status
    })

    print("\nRESULTADO FINAL")
    print(f"n final      = {resultado_final['n']:.4f}")
    print(f"Vo final      = {resultado_final['Vo_sim']:.4f} V")
    print(f"Io final      = {resultado_final['Io_sim']:.4f} A")
    print(f"Po final      = {resultado_final['Po_sim']:.4f} W")
    print(f"Erro Vo final  = {resultado_final['erro_Vo_percent']:.2f} %")
    print(f"Erro Po final  = {resultado_final['erro_Po_percent']:.2f} %")

```

```

        print(f"Status          = {status}")

except Exception as e:

    print(f"\nERRO AO PROCESSAR {modelo_nome}: {e}")

    resultados_finais.append({
        'modelo': modelo_nome,
        'ponte': identifica_ponte(modelo_nome),
        'tanque': identifica_tanque(modelo_nome),

        'Vdc': float(VDC_BASE),
        'Vo_ref': float(VO_REF),
        'Io_ref': float(IO_REF),
        'Po_ref': float(PO_REF),
        'Ro': float(RO_BASE),
        'fs': float(FR_BASE),
        'fr': float(FR_BASE),
        'Ls': float(LR_BASE),
        'Cs': float(CR_BASE),
        'Lm': float(LM_BASE),

        'n_inicial': np.nan,
        'Vo_inicial': np.nan,
        'Io_inicial': np.nan,
        'Po_inicial': np.nan,
        'erro_Vo_inicial_percent': np.nan,
        'erro_Io_inicial_percent': np.nan,
        'erro_Po_inicial_percent': np.nan,
        'M_eq_fha_inicial': np.nan,

        'n_final': np.nan,
        'Vo_final': np.nan,
        'Io_final': np.nan,
        'Po_final': np.nan,
        'erro_Vo_final_percent': np.nan,
        'erro_Io_final_percent': np.nan,
        'erro_Po_final_percent': np.nan,
        'M_eq_fha_final': np.nan,

        'status': f"ERRO - {e}"
    })

# =====
# SALVAR CSVs
# =====

df_resultados = pd.DataFrame(resultados_finais)

caminho_resultados = os.path.join(
    PASTA_RESULTADOS,
    "resultados_nominais.csv"
)

df_resultados.to_csv(
    caminho_resultados,
    index=False,
    sep=';',
    decimal=', '
)

if SALVAR_HISTORICO_ITERACOES:

    df_historico = pd.DataFrame(historico_iteracoes)

    caminho_historico = os.path.join(
        PASTA_RESULTADOS,

```

```

        "historico_ajuste_n.csv"
    )

    df_historico.to_csv(
        caminho_historico,
        index=False,
        sep=';',
        decimal=', '
    )

# =====
# RESUMO NO CONSOLE
# =====

print("\n" + "="*80)
print("PROCESSO FINALIZADO")
print("="*80)
print(f"Arquivo principal salvo em:")
print(os.path.abspath(caminho_resultados))

if SALVAR_HISTORICO_ITERACOES:
    print(f"\nHistórico de ajuste salvo em:")
    print(os.path.abspath(caminho_historico))

print("="*80 + "\n")

print("Resumo rápido:")
print(df_resultados[['modelo', 'n_inicial', 'Vo_inicial', 'n_final', 'Vo_final',
'erro_Vo_final_percent', 'status']])

```

APÊNDICE D – SCRIPT DE GERAÇÃO DAS FIGURAS DE RESULTADOS

Este apêndice apresenta o script utilizado para gerar as figuras comparativas do capítulo de resultados a partir das mesmas condições nominais e do mesmo procedimento iterativo de ajuste da relação de transformação. Além de consolidar os resultados numéricos, o programa conserva os sinais temporais retornados pelo PLECS e gera: um exemplo de formas de onda no intervalo final de análise, a comparação das tensões de saída antes e depois do ajuste de n e a comparação das relações de transformação utilizadas após o ajuste.

Arquivo de origem: gerar_figuras_resultados_tcc.py

Dependências: NumPy, Pandas, Matplotlib, xmlrpc.client, os e funções da biblioteca minhalib.py.

Entradas principais: modelos PLECS e parâmetros nominais definidos no projeto preliminar.

Saídas principais: arquivos CSV de apoio e figuras em formato PNG com resolução de 300 dpi.

Código-fonte

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
gerar_figuras_resultados_tcc.py

Gera as figuras finais do Capítulo 5:

Figura 5.1 - Exemplo de formas de onda simuladas no intervalo final de análise.
Figura 5.2 - Comparação das tensões de saída antes e depois do ajuste iterativo de
n.
Figura 5.3 - Comparação das relações de transformação finais das topologias
analisadas.

Este script usa a mesma estrutura do script de consolidação que já funciona:
- caminhos relativos para ../Modelos
- minhalib.py
- LoadSimParameters()
- avaliaCaso()
"""

import os
import xmlrpc.client
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

from minhalib import *

# =====
# CONFIGURAÇÕES GERAIS
# =====

PASTA_RESULTADOS = "../Resultados_TCC"
PASTA_FIGURAS = "../Resultados_TCC/Figuras_Capitulo_5"
```

```

os.makedirs(PASTA_RESULTADOS, exist_ok=True)
os.makedirs(PASTA_FIGURAS, exist_ok=True)

AJUSTAR_N_AUTOMATICAMENTE = True
NUMERO_MAXIMO_ITERACOES = 5
ERRO_MAXIMO_PERCENTUAL = 1.0

FIGURA_5_1_TOPOLOGIA = "FB_LLC"

SALVAR_HISTORICO_ITERACOES = True

# =====
# MODELOS PLECS
# =====

modelos = {
    'HB_LC_Serie': {
        'file_name': '../Modelos/HB_LC_Serie.plecs',
        'MODEL_NAME': 'HB_LC_Serie'
    },
    'HB_LC_Paralelo': {
        'file_name': '../Modelos/HB_LC_Paralelo.plecs',
        'MODEL_NAME': 'HB_LC_Paralelo'
    },
    'FB_LC_Serie': {
        'file_name': '../Modelos/FB_LC_Serie.plecs',
        'MODEL_NAME': 'FB_LC_Serie'
    },
    'FB_LC_Paralelo': {
        'file_name': '../Modelos/FB_LC_Paralelo.plecs',
        'MODEL_NAME': 'FB_LC_Paralelo'
    },
    'HB_LLC': {
        'file_name': '../Modelos/HB_LLC.plecs',
        'MODEL_NAME': 'HB_LLC'
    },
    'FB_LLC': {
        'file_name': '../Modelos/FB_LLC.plecs',
        'MODEL_NAME': 'FB_LLC'
    }
}

# =====
# ESPECIFICAÇÕES BASE DO PROJETO
# =====

VDC_BASE = 400.0
VO_REF = 100.0
PO_REF = 500.0
IO_REF = PO_REF / VO_REF
RO_BASE = VO_REF**2 / PO_REF

FR_BASE = 85e3
LR_BASE = 73e-6
CR_BASE = 1 / ((2 * np.pi * FR_BASE)**2 * LR_BASE)

M_LLC = 4.1
LM_BASE = M_LLC * LR_BASE

N_INICIAL = 3.6

# =====
# FUNÇÕES AUXILIARES
# =====

```

```

def identifica_ponte(modelo_nome):
    if modelo_nome.startswith("HB"):
        return "Half-Bridge"
    elif modelo_nome.startswith("FB"):
        return "Full-Bridge"
    else:
        raise ValueError(f"Não foi possível identificar a ponte do modelo {modelo_nome}")

def identifica_tanque(modelo_nome):
    if "LC_Serie" in modelo_nome:
        return "LC Série"
    elif "LC_Paralelo" in modelo_nome:
        return "LC Paralelo"
    elif "LLC" in modelo_nome:
        return "LLC"
    else:
        raise ValueError(f"Não foi possível identificar o tanque do modelo {modelo_nome}")

def calcula_primeira_harmonica_ponte(Vdc, ponte):
    """
    FHA simplificada.

    Para Full-Bridge:
         $V_{l\_rms} = (2 \cdot \sqrt{2}) / \pi \cdot V_{dc}$ 

    Para Half-Bridge:
         $V_{l\_rms} = (\sqrt{2}) / \pi \cdot V_{dc}$ 
    """
    Vdc = float(Vdc)

    if ponte == "Full-Bridge":
        return float((2 * np.sqrt(2) / np.pi) * Vdc)

    if ponte == "Half-Bridge":
        return float((np.sqrt(2) / np.pi) * Vdc)

    raise ValueError("Tipo de ponte inválido.")

def calcula_erros(Vo_sim, Io_sim, Po_sim):
    erro_Vo = 100 * (Vo_sim - VO_REF) / VO_REF
    erro_Io = 100 * (Io_sim - IO_REF) / IO_REF
    erro_Po = 100 * (Po_sim - PO_REF) / PO_REF

    return float(erro_Vo), float(erro_Io), float(erro_Po)

def calcula_ganho_fha_equivalente(modelo_nome, n, Vo_sim):
    """
    Ganho FHA equivalente obtido a partir da simulação.

    Não é a função analítica completa do tanque.

    Interpretação:
         $V_o \approx V_{l\_ponte\_rms} \cdot M_{eq} / n$ 

    Logo:
         $M_{eq} \approx V_o \cdot n / V_{l\_ponte\_rms}$ 
    """
    ponte = identifica_ponte(modelo_nome)
    Vl = calcula_primeira_harmonica_ponte(VDC_BASE, ponte)

```

```

    if abs(V1) < 1e-9:
        return np.nan

    M_eq = (float(Vo_sim) * float(n)) / V1
    return float(M_eq)

def cria_parametros(n_atual):
    """
    Cria o dicionário de parâmetros enviado ao PLECS.
    Todos os valores são convertidos para float para evitar erro XML-RPC.
    """

    Param = SystemParameters()

    Param['t_end'] = float(0.005)
    Param['SampleTime'] = float(1e-8)

    Param['Vdc'] = float(VDC_BASE)

    Param['n'] = float(n_atual)
    Param['Lm_tr'] = float(10)
    Param['im0'] = float(0)

    Param['Ls'] = float(LR_BASE)
    Param['Cs'] = float(CR_BASE)
    Param['Lm'] = float(LM_BASE)

    Param['iLs_ini'] = float(0)
    Param['vCs_ini'] = float(0)
    Param['iLm_ini'] = float(0)

    Param['Ro'] = float(RO_BASE)
    Param['Co'] = float(100e-6)
    Param['Voini'] = float(0)

    Param['fs'] = float(FR_BASE)
    Param['Ts'] = float(1 / Param['fs'])
    Param['D'] = float(0.5)
    Param['Td'] = float(100e-9)
    Param['T180'] = float(Param['Ts'] / 2)

    return Param

def simula_modelo(server, modelo_nome, n_atual):
    """
    Carrega o modelo no PLECS, roda a simulação e retorna:
    - valores médios no intervalo final de análise;
    - sinais completos para geração de figuras.
    """

    modelo = modelos[modelo_nome]

    full_path = os.path.abspath(os.getcwd())
    file_name = modelo['file_name']
    MODEL_NAME = modelo['MODEL_NAME']

    caminho_modelo = full_path + '/' + file_name

    if not os.path.exists(caminho_modelo):
        raise FileNotFoundError(
            f"Modelo não encontrado:\n{caminho_modelo}\n\n"
            "Confira se você está rodando o script a partir da pasta correta. "
            "O esperado é que exista uma pasta ../Modelos em relação à pasta
    atual."
        )

```

```

server.plecs.load(caminho_modelo)

Param = cria_parametros(n_atual)
opts = LoadSimParameters(Param)

time, iout, Vo, Vt, it, Vdc_med = avaliaCaso(server, opts, MODEL_NAME)

idx_regime = int(0.8 * len(time))

Vo_sim = float(np.mean(Vo[idx_regime:]))
Io_sim = float(np.mean(iout[idx_regime:]))
Po_sim = float(Vo_sim * Io_sim)

erro_Vo, erro_Io, erro_Po = calcula_erros(Vo_sim, Io_sim, Po_sim)

M_eq = calcula_ganho_fha_equivalente(modelo_nome, n_atual, Vo_sim)

return {
    'modelo': modelo_nome,
    'ponte': identifica_ponte(modelo_nome),
    'tanque': identifica_tanque(modelo_nome),

    'n': float(n_atual),

    'Vo_sim': float(Vo_sim),
    'Io_sim': float(Io_sim),
    'Po_sim': float(Po_sim),

    'erro_Vo_percent': float(erro_Vo),
    'erro_Io_percent': float(erro_Io),
    'erro_Po_percent': float(erro_Po),

    'M_eq_fha': float(M_eq),

    'Vdc': float(VDC_BASE),
    'Vo_ref': float(VO_REF),
    'Io_ref': float(IO_REF),
    'Po_ref': float(PO_REF),
    'Ro': float(RO_BASE),
    'fs': float(FR_BASE),
    'fr': float(FR_BASE),
    'Ls': float(LR_BASE),
    'Cs': float(CR_BASE),
    'Lm': float(LM_BASE),

    # Sinais completos para figuras
    'time': time,
    'iout': iout,
    'Vo': Vo,
    'Vt': Vt,
    'it': it,
    'Vdc_sinal': Vdc_med
}

def calcula_n_ajustado(n_atual, Vo_sim):
    """
    Ajuste iterativo da relação de transformação.

    Como a tensão de saída tende a variar de forma inversa com n:

        n_novo = n_atual * Vo_sim / Vo_ref
    """
    if abs(Vo_sim) < 1e-9:
        raise ValueError("Vo_sim muito próximo de zero. Não é possível ajustar n.")

    n_novo = float(n_atual) * (float(Vo_sim) / VO_REF)

```

```

    return float(n_novo)

def define_status(erro_Vo_final):
    erro_abs = abs(float(erro_Vo_final))

    if erro_abs <= 1.0:
        return "OK - erro menor ou igual a 1%"

    if erro_abs <= 5.0:
        return "ACEITAVEL - erro menor ou igual a 5%"

    if erro_abs <= 10.0:
        return "REVISAR - erro menor ou igual a 10%"

    return "CRITICO - erro maior que 10%"

# =====
# FUNÇÕES DE FIGURAS
# =====

def estilo_preto_branco(ax):
    ax.grid(True, linestyle=":", linewidth=0.6, color="black", alpha=0.35)
    ax.spines["top"].set_visible(False)
    ax.spines["right"].set_visible(False)

def salvar_figura_5_1(resultado, caminho):
    """
    Figura 5.1 - Exemplo de formas de onda simuladas no intervalo final de análise.
    """

    time = resultado['time']
    iout = resultado['iout']
    Vo = resultado['Vo']
    Vt = resultado['Vt']
    it = resultado['it']
    Vdc = resultado['Vdc_sinal']

    idx_regime = int(0.8 * len(time))

    t_regime = time[idx_regime:]
    t_us = (t_regime - t_regime[0]) * 1e6

    janela_us = 100.0
    zoom = t_us <= janela_us

    sinais = [
        (iout[idx_regime:][zoom], "io [A]"),
        (Vo[idx_regime:][zoom], "Vo [V]"),
        (Vt[idx_regime:][zoom], "Vt [V]"),
        (it[idx_regime:][zoom], "it [A]"),
        (Vdc[idx_regime:][zoom], "Vdc [V]"),
    ]

    fig, axes = plt.subplots(len(sinais), 1, figsize=(9, 8), sharex=True)

    for ax, (y, ylabel) in zip(axes, sinais):
        ax.plot(t_us[zoom], y, color="black", linewidth=1.0)
        ax.set_ylabel(ylabel)

        # Remove notação automática tipo +1e2 no eixo y
        ax.ticklabel_format(axis='y', style='plain', useOffset=False)

    estilo_preto_branco(ax)

```

```

axes[-1].set_xlabel("Tempo [μs]")

fig.tight_layout()
fig.savefig(caminho, dpi=300, bbox_inches="tight")
plt.close(fig)

print(f"Figura salva: {os.path.abspath(caminho)}")

def salvar_figura_5_2(df_resultados, caminho):
    """
    Figura 5.2 - Comparação das tensões de saída antes e depois do ajuste iterativo
    de n.
    """

    labels = df_resultados['modelo'].tolist()
    Vo_inicial = df_resultados['Vo_inicial'].astype(float).tolist()
    Vo_final = df_resultados['Vo_final'].astype(float).tolist()

    x = np.arange(len(labels))
    largura = 0.36

    fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 5.8))

    ax.bar(
        x - largura / 2,
        Vo_inicial,
        largura,
        label="Antes do ajuste",
        facecolor="white",
        edgecolor="black",
        hatch="///",
        linewidth=1.1,
    )

    ax.bar(
        x + largura / 2,
        Vo_final,
        largura,
        label="Depois do ajuste",
        facecolor="white",
        edgecolor="black",
        hatch="...",
        linewidth=1.1,
    )

    ax.axhline(VO_REF, color="black", linestyle="--", linewidth=1.0)
    ax.text(len(labels) - 0.2, VO_REF + 4, "100 V", ha="right", fontsize=9)

    ax.set_ylabel("Tensão média de saída Vo [V]")
    ax.set_xticks(x)
    ax.set_xticklabels(labels, rotation=35, ha="right")
    ax.legend(frameon=False)

    estilo_preto_branco(ax)

    fig.tight_layout()
    fig.savefig(caminho, dpi=300, bbox_inches="tight")
    plt.close(fig)

    print(f"Figura salva: {os.path.abspath(caminho)}")

def salvar_figura_5_3(df_resultados, caminho):
    """
    Figura 5.3 - Comparação das relações de transformação finais das topologias
    analisadas.
    """

```

```

labels = df_resultados['modelo'].tolist()
n_final = df_resultados['n_final'].astype(float).tolist()

x = np.arange(len(labels))

fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 5.8))

ax.bar(
    x,
    n_final,
    facecolor="white",
    edgecolor="black",
    hatch="//",
    linewidth=1.2,
)

ax.set_ylabel("Relação de transformação final n")
ax.set_xticks(x)
ax.set_xticklabels(labels, rotation=35, ha="right")

for i, valor in enumerate(n_final):
    ax.text(
        i,
        valor + max(n_final) * 0.025,
        f"{valor:.4f}".replace(".", ", "),
        ha="center",
        fontsize=8,
    )

ax.set_ylim(0, max(n_final) * 1.18)

estilo_preto_branco(ax)

fig.tight_layout()
fig.savefig(caminho, dpi=300, bbox_inches="tight")
plt.close(fig)

print(f"Figura salva: {os.path.abspath(caminho)}")

# =====
# EXECUÇÃO PRINCIPAL
# =====

server = xmlrpc.client.Server("http://localhost:1080/RPC2")

resultados_finais = []
historico_iteracoes = []
resultados_finais_com_sinais = {}

print("\n" + "="*80)
print("GERAÇÃO DE FIGURAS DO CAPÍTULO 5")
print("="*80)
print("Objetivo: gerar Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 a partir das simulações no PLECS.")
print("Pasta de figuras:")
print(os.path.abspath(PASTA_FIGURAS))
print("="*80 + "\n")

for modelo_nome in modelos.keys():

    print("\n" + "="*80)
    print(f"PROCESSANDO TOPOLOGIA: {modelo_nome}")
    print("="*80)

    try:
        # -----

```

```

# SIMULAÇÃO INICIAL
# -----

n_atual = float(N_INICIAL)

resultado_inicial = simula_modelo(
    server=server,
    modelo_nome=modelo_nome,
    n_atual=n_atual
)

print("\nSIMULAÇÃO INICIAL")
print(f"n inicial          = {resultado_inicial['n']:.4f}")
print(f"Vo inicial          = {resultado_inicial['Vo_sim']:.4f} V")
print(f"Io inicial          = {resultado_inicial['Io_sim']:.4f} A")
print(f"Po inicial          = {resultado_inicial['Po_sim']:.4f} W")
print(f"Erro Vo inicial = {resultado_inicial['erro_Vo_percent']:.2f} %")

historico_iteracoes.append({
    'modelo': modelo_nome,
    'iteracao': 0,
    'tipo': 'inicial',
    **{k: v for k, v in resultado_inicial.items()
       if k not in ['time', 'iout', 'Vo', 'Vt', 'it', 'Vdc_sinal']}
})

# -----
# AJUSTE ITERATIVO DE n
# -----

resultado_atual = resultado_inicial

if AJUSTAR_N_AUTOMATICAMENTE:

    for k in range(1, NUMERO_MAXIMO_ITERACOES + 1):

        erro_atual = float(resultado_atual['erro_Vo_percent'])

        if abs(erro_atual) <= ERRO_MAXIMO_PERCENTUAL:
            print("\nAjuste encerrado.")
            print(f"Erro de Vo menor ou igual a
{ERRO_MAXIMO_PERCENTUAL:.2f} %.")
            break

        n_novo = calcula_n_ajustado(
            n_atual=resultado_atual['n'],
            Vo_sim=resultado_atual['Vo_sim']
        )

        print("\nAJUSTE DE n")
        print(f"Iteração          = {k}")
        print(f"n anterior          = {resultado_atual['n']:.4f}")
        print(f"n novo              = {n_novo:.4f}")

        resultado_atual = simula_modelo(
            server=server,
            modelo_nome=modelo_nome,
            n_atual=n_novo
        )

        print(f"Vo ajustado          = {resultado_atual['Vo_sim']:.4f} V")
        print(f"Io ajustado          = {resultado_atual['Io_sim']:.4f} A")
        print(f"Po ajustado          = {resultado_atual['Po_sim']:.4f} W")
        print(f"Erro Vo              = {resultado_atual['erro_Vo_percent']:.2f}
%)

        historico_iteracoes.append({
            'modelo': modelo_nome,

```

```

        'iteracao': k,
        'tipo': 'ajuste',
        **{k2: v2 for k2, v2 in resultado_atual.items()
           if k2 not in ['time', 'iout', 'Vo', 'Vt', 'it',
                        'Vdc_sinal']}]
    })

    resultado_final = resultado_atual
    resultados_finais_com_sinais[modelo_nome] = resultado_final

    status = define_status(resultado_final['erro_Vo_percent'])

    # -----
    # RESULTADO FINAL CONSOLIDADO
    # -----

    resultados_finais.append({
        'modelo': modelo_nome,
        'ponte': resultado_final['ponte'],
        'tanque': resultado_final['tanque'],

        'Vdc': float(VDC_BASE),
        'Vo_ref': float(VO_REF),
        'Io_ref': float(IO_REF),
        'Po_ref': float(PO_REF),
        'Ro': float(RO_BASE),
        'fs': float(FR_BASE),
        'fr': float(FR_BASE),
        'Ls': float(LR_BASE),
        'Cs': float(CR_BASE),
        'Lm': float(LM_BASE),

        'n_inicial': float(resultado_inicial['n']),
        'Vo_inicial': float(resultado_inicial['Vo_sim']),
        'Io_inicial': float(resultado_inicial['Io_sim']),
        'Po_inicial': float(resultado_inicial['Po_sim']),
        'erro_Vo_inicial_percent': float(resultado_inicial['erro_Vo_percent']),
        'erro_Io_inicial_percent': float(resultado_inicial['erro_Io_percent']),
        'erro_Po_inicial_percent': float(resultado_inicial['erro_Po_percent']),
        'M_eq_fha_inicial': float(resultado_inicial['M_eq_fha']),

        'n_final': float(resultado_final['n']),
        'Vo_final': float(resultado_final['Vo_sim']),
        'Io_final': float(resultado_final['Io_sim']),
        'Po_final': float(resultado_final['Po_sim']),
        'erro_Vo_final_percent': float(resultado_final['erro_Vo_percent']),
        'erro_Io_final_percent': float(resultado_final['erro_Io_percent']),
        'erro_Po_final_percent': float(resultado_final['erro_Po_percent']),
        'M_eq_fha_final': float(resultado_final['M_eq_fha']),

        'status': status
    })

    print("\nRESULTADO FINAL")
    print(f"n final          = {resultado_final['n']:.4f}")
    print(f"Vo final            = {resultado_final['Vo_sim']:.4f} V")
    print(f"Io final             = {resultado_final['Io_sim']:.4f} A")
    print(f"Po final              = {resultado_final['Po_sim']:.4f} W")
    print(f"Erro Vo final         = {resultado_final['erro_Vo_percent']:.2f} %")
    print(f"Erro Po final         = {resultado_final['erro_Po_percent']:.2f} %")
    print(f"Status                = {status}")

except Exception as e:

    print(f"\nERRO AO PROCESSAR {modelo_nome}: {e}")

    resultados_finais.append({
        'modelo': modelo_nome,

```

```

        'ponte': identifica_ponte(modelo_nome),
        'tanque': identifica_tanque(modelo_nome),

        'Vdc': float(VDC_BASE),
        'Vo_ref': float(VO_REF),
        'Io_ref': float(IO_REF),
        'Po_ref': float(PO_REF),
        'Ro': float(RO_BASE),
        'fs': float(FR_BASE),
        'fr': float(FR_BASE),
        'Ls': float(LR_BASE),
        'Cs': float(CR_BASE),
        'Lm': float(LM_BASE),

        'n_inicial': np.nan,
        'Vo_inicial': np.nan,
        'Io_inicial': np.nan,
        'Po_inicial': np.nan,
        'erro_Vo_inicial_percent': np.nan,
        'erro_Io_inicial_percent': np.nan,
        'erro_Po_inicial_percent': np.nan,
        'M_eq_fha_inicial': np.nan,

        'n_final': np.nan,
        'Vo_final': np.nan,
        'Io_final': np.nan,
        'Po_final': np.nan,
        'erro_Vo_final_percent': np.nan,
        'erro_Io_final_percent': np.nan,
        'erro_Po_final_percent': np.nan,
        'M_eq_fha_final': np.nan,

        'status': f"ERRO - {e}"
    })

# =====
# SALVAR CSVs
# =====

df_resultados = pd.DataFrame(resultados_finais)

caminho_resultados = os.path.join(
    PASTA_RESULTADOS,
    "resultados_nominiais_figuras.csv"
)

df_resultados.to_csv(
    caminho_resultados,
    index=False,
    sep=';',
    decimal=', '
)

if SALVAR_HISTORICO_ITERACOES:

    df_historico = pd.DataFrame(historico_iteracoes)

    caminho_historico = os.path.join(
        PASTA_RESULTADOS,
        "historico_ajuste_n_figuras.csv"
    )

    df_historico.to_csv(
        caminho_historico,
        index=False,
        sep=';',
        decimal=', '
    )

```

```

    )

# =====
# GERAR FIGURAS
# =====

print("\n" + "="*80)
print("GERANDO FIGURAS")
print("="*80)

if FIGURA_5_1_TOPOLOGIA in resultados_finais_com_sinais:

    caminho_fig_51 = os.path.join(
        PASTA_FIGURAS,
        "Figura_5_1_formas_de_onda_intervalo_final.png"
    )

    salvar_figura_5_1(
        resultados_finais_com_sinais[FIGURA_5_1_TOPOLOGIA],
        caminho_fig_51
    )

else:
    print(f"Não foi possível gerar Figura 5.1. Topologia ausente:
{FIGURA_5_1_TOPOLOGIA}")

caminho_fig_52 = os.path.join(
    PASTA_FIGURAS,
    "Figura_5_2_comparacao_tensoes_saida_antes_depois_ajuste_n.png"
)

salvar_figura_5_2(df_resultados, caminho_fig_52)

caminho_fig_53 = os.path.join(
    PASTA_FIGURAS,
    "Figura_5_3_comparacao_relacoes_transformacao_finais.png"
)

salvar_figura_5_3(df_resultados, caminho_fig_53)

# =====
# RESUMO NO CONSOLE
# =====

print("\n" + "="*80)
print("PROCESSO FINALIZADO")
print("="*80)

print("CSV principal salvo em:")
print(os.path.abspath(caminho_resultados))

if SALVAR_HISTORICO_ITERACOES:
    print("\nHistórico de ajuste salvo em:")
    print(os.path.abspath(caminho_historico))

print("\nFiguras salvas em:")
print(os.path.abspath(PASTA_FIGURAS))

print("\nArquivos de figura:")
print(os.path.abspath(caminho_fig_51))
print(os.path.abspath(caminho_fig_52))
print(os.path.abspath(caminho_fig_53))

print("="*80 + "\n")

```

```
print("Resumo rápido:")
print(
    df_resultados[
        [
            'modelo',
            'n_inicial',
            'Vo_inicial',
            'n_final',
            'Vo_final',
            'erro_Vo_final_percent',
            'status'
        ]
    ]
)
```