

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

ESTUDO DA INTEGRAÇÃO DE UMA REDE HÍBRIDA CC-CA EM UM SISTEMA DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

por

Matheus da Luz Manzoni Nunes

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, Agosto de 2024

CIP - Catalogação na Publicação

Nunes, Matheus da Luz Manzoni
ESTUDO DA INTEGRAÇÃO DE UMA REDE HÍBRIDA CC-CA EM
UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA /
Matheus da Luz Manzoni Nunes. -- 2024.
25 f.
Orientadora: Bibibana Petry Ferraz.

Coorientadora: Renato Gonçalves Ferraz.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia de Energia, Porto
Alegre, BR-RS, 2024.

1. Rede híbrida CC-CA. 2. Conversores de potência.
3. Redes de distribuição de energia elétrica. I.
Ferraz, Bibibana Petry, orient. II. Ferraz, Renato
Gonçalves, coorient. III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

ESTUDO DA INTEGRAÇÃO DE UMA REDE HÍBRIDA CC-CA EM UM SISTEMA DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

por

Matheus da Luz Manzoni Nunes

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientador: Profa. Dra. Bibiana Petry Ferraz

Co-orientador: Prof. Dr. Renato Gonçalves Ferraz

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Renato Gonçalves Ferraz

Prof. Dr. Fábio Fedrizzi Vidor

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne

Porto Alegre, 21 de Agosto de 2024

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado, oferecendo apoio incondicional e motivação em todas as etapas da minha vida. A dedicação, amor e fé em mim foram fundamentais para que eu pudesse alcançar chegar até aqui. Não existem palavras suficientes para agradecer por todos os sacrifícios e por tudo que fizeram para me proporcionar as melhores oportunidades. Amo vocês.

Agradeço aos meus orientadores Bibiana e Renato, por terem me orientado entre os diversos caminhos que meu trabalho tomou. Muito obrigado por todo o suporte e dedicação.

Também gostaria de agradecer aos meus amigos, que sempre estiveram presentes para compartilhar momentos de descontração e companheirismo, ajudando a aliviar a pressão ao longo do caminho. Em especial, quero expressar minha gratidão aos colegas Arthur, Delmas e Luiz.

Last but most certainly not least, I want to thank my amazing girlfriend. You were there for me in every single step of this journey, cheering me on when I was down and believing in me when I couldn't. I wouldn't have made it without your love, patience, and constant support. You kept me going when things got tough, and for that, I am forever grateful. This achievement is just as much yours as it is mine.

For me, it is far better to grasp the Universe as it really is than to persist in delusion, however satisfying and reassuring.

Carl Sagan

NUNES, Matheus da Luz Manzoni. **Estudo da Integração de uma Rede Híbrida CC-CA em um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica**. 2024. 25 FOLHAS. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

RESUMO

Esta monografia propõe estudar a integração de uma rede híbrida de corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA) em baixa tensão em um sistema de distribuição de energia elétrica (SDEE). Uma rede híbrida CC-CA oferece vantagens em termos de eficiência energética e flexibilidade na integração de fontes de geração distribuída. Do ponto de vista operacional, destaca-se a necessidade de um conversor de eletrônica de potência como elemento mediador, para que seja possível a conexão entre as redes CC e CA, além de fazer a integração dessa rede híbrida com o SDEE. A metodologia proposta foi testada para um sistema teste, que integra uma rede CC operando em 192 V e uma rede CA operando em 220 V, à um alimentador CA em 13,2 kV. Por meio de uma implementação computacional utilizando os programas Simulink[®] e MATLAB[®], foram simulados cenários de operação visando avaliar o desempenho da rede híbrida sob variadas condições de carga. A análise de indicadores operacionais, como potência, tensão e corrente, evidenciou a alta eficiência dos barramentos CC, quando comparado ao barramento CA. Por fim, a partir dos resultados obtidos nas simulações, é possível observar que utilizando uma tecnologia de conversor de eletrônica de potência, é possível a operação de uma rede híbrida integrada a uma rede de distribuição.

PALAVRAS-CHAVE: Rede híbrida CC-CA, Conversores de potência, Redes de distribuição de energia elétrica.

NUNES, Matheus da Luz Manzoni. **Study of the Integration of a Hybrid DC-AC Network in an Electrical Power Distribution System**. 2024. 25 FOLHAS. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

ABSTRACT

This monograph proposes to study the integration of a hybrid direct current (DC) and alternating current (AC) network at low voltage within an electrical distribution system (EPD). A DC-AC hybrid network offers advantages in terms of energy efficiency and flexibility in the integration of distributed generation sources. From an operational standpoint, the need for a power electronics converter as a mediating element is highlighted, to enable the connection between the DC and AC networks, as well as the integration of this hybrid network with the EPD. The proposed methodology was tested on a test system that integrates a DC network operating at 192 V and an AC network operating at 220 V, connected to an AC feeder at 13.2 kV. Through a computational implementation using Simulink[®] and MATLAB[®], operational scenarios were simulated to evaluate the performance of the hybrid network under different load conditions. The analysis of operational indicators, such as power, voltage, and current, highlighted the high efficiency of DC buses when compared to AC buses. Finally, based on the simulation results, it is possible to observe that with the use of power electronics converter technology, the operation of a hybrid network integrated into a distribution network is feasible.

KEYWORDS: Hybrid DC-AC network, Power converters, Electrical power distribution networks.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Sistemas elétricos: presente e futuro.	9
Figura 2 – Esquema de um SST como intermédio para <i>microgrids</i>	12
Figura 3 – Configuração de um inversor monofásico de meia ponte.	13
Figura 4 – Configuração de um inversor monofásico de ponte completa.	13
Figura 5 – Topologias de conversores redutores e elevadores de tensão.	14
Figura 6 – Conversor <i>Dual Active Bridge</i>	14
Figura 7 – Configuração conceitual de um SST.	15
Figura 8 – Topologia de um SST de três estados.	15
Figura 9 – Triângulo de potências.	17
Figura 10 – Fluxograma da metodologia proposta.	20
Figura 11 – Sistema teste proposto.	22
Figura 12 – Rede híbrida.	23
Figura 13 – Implementação computacional do modelo do SST utilizado.	24
Figura 14 – Modelo proposto	26
Figura 15 – Comparação estatística entre as redes.	28
Figura 16 – Correntes de fase da rede CA.	28
Figura 17 – Correntes nas diferentes cargas da rede CA.	29
Figura 18 – Corrente de alimentação da CC	29
Figura 19 – Correntes nas diferentes cargas da rede CC.	30
Figura A.1 – Modelagem da rede CA	36
Figura A.2 – Modelagem da rede CC	37

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1 OBJETIVOS	9
2. REFERENCIAL TEÓRICO	9
2.1 REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	9
2.2 REDES HÍBRIDAS CA-CC	10
2.3 CONVERSORES ELETRÔNICOS	12
2.4 FUNDAMENTOS DO SST.....	14
2.5 INDICADORES OPERACIONAIS	16
2.5.1 Potência em Circuitos CA	16
2.5.2 Potencia em Circuitos CC.....	17
2.5.3 Perdas e Eficiência	18
2.5.4 Efeito Joule e Resistência de Condutores	18
2.6 ABORDAGENS CORRELATAS	19
2.6.1 Leonardo Nozari da Silva et al. (2024).....	19
2.6.2 Nitola Martinez e Vega Vasquez (2018).....	19
3. METODOLOGIA	20
3.1 ETAPA 1 – MODELAGEM DA REDE CA	20
3.2 ETAPA 2 – MODELAGEM DA REDE CC	21
3.3 ETAPA 3 – MODELAGEM DO CONVERSOR DE POTÊNCIA	21
3.4 ETAPA 4 – INTEGRAÇÃO DA REDE HÍBRIDA AO SDEE	21
3.5 ETAPA 5 – SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO EM DIFERENTES PATAMARES DE CARGA.....	21
3.6 ETAPA 6 – ANÁLISE DOS RESULTADOS	21
4. ESTUDO DE CASO E RESULTADOS	21
4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA TESTE	22
4.1.1 Rede Híbrida CC-CA em Baixa Tensão.....	22
4.1.2 SST	24
4.1.3 Cargas	24
4.1.4 Patamares de Carga	26
4.2 RESULTADOS	26
4.2.1 Análise das potências	26
4.2.2 Análise das Tensões	27
4.2.3 Análise das correntes	27
5. CONCLUSÃO	30
Referências	31
APÊNDICE	35

1. INTRODUÇÃO

Na última década, os sistemas elétricos de potência passaram por transformações significativas impulsionadas por fatores técnicos, econômicos e ambientais. Os sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEEs), outrora concebidos como redes passivas e radiais, enfrentaram uma revolução com a ascensão dos recursos energéticos distribuídos (REDs). Segundo dados do Operador Nacional do Sistema (ONS), 13,9% da capacidade total do Sistema Interligado Nacional (SIN) é proveniente da micro e minigeração distribuída (MMGD) (ONS, 2024). De acordo com o atual Plano Decenal de Energia da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), entre as fontes que compõem a MMGD—como fotovoltaica, termelétrica, eólica e hídrica—, a energia solar fotovoltaica se mantém como a tecnologia predominante, representando 98,3% da capacidade instalada. Nesse contexto, o segmento residencial é projetado para liderar a capacidade instalada no Cenário de Referência (EPE, 2024). Esta possibilidade de geração distribuída, marca o surgimento da figura do prossumidor, expressão que provém da junção de produtor e consumidor, representando as unidades consumidoras que produzem energia elétrica e compartilham o excedente com sistema. Consequentemente, novas possibilidades operacionais têm surgido, uma vez que o fluxo de potência em um SDEE passa a ser bidirecional (ZAFAR et al., 2018).

Recentemente, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou um aprimoramento regulatório, a Resolução n.1059/2023 (ANEEL, 2023), sobre a necessidade de limitar a capacidade de conexão de mini e microgeração distribuída, visando estabelecer o escoamento da potência sem inversão de fluxo. O fluxo reverso de potência ocorre quando a geração de energia solar fotovoltaica (por exemplo) conectada em uma rede, excede a demanda local. Dentre as possibilidades de mitigar o fluxo reverso, destaca-se o uso de tecnologias de armazenamento de energia, como proposto por Uzum et al. (2020), que obteve uma redução de 44% do fluxo reverso usando banco de baterias.

Embora a distribuição de energia atualmente seja predominantemente em corrente alternada (CA), estudos recentes demonstram que as redes de distribuição em corrente contínua (CC) oferecem vantagens significativas sobre as redes em CA (OLIVEIRA et al., 2017). Especialmente, considerando que o uso de sistemas de armazenamento de energia elétrica justifica a inclusão de barramentos de corrente contínua visando reduzir as perdas de conversão de potência e auxiliar na redução do fluxo reverso na rede. Além disso, a eletromobilidade, com veículos elétricos e eletropostos, tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias de energia baseadas em CC. Para enfrentar os desafios associados à integração desses novos componentes, avanços importantes têm tornado os sistemas CC mais eficazes e eficientes, resultando em um aumento significativo de pesquisas nesta área dos sistemas de potência (HASSAN et al., 2024).

A operação conjunta de redes CA e CC pode aumentar significativamente a flexibilidade, eficiência e resiliência do sistema elétrico. Contudo, para que essa integração se torne prática e funcional, é imprescindível a implementação de uma tecnologia mediadora que integre as redes CC e CA, formando uma rede híbrida. Sistemas futuros de distribuição elétrica, ou mesmo estruturas de transmissão que combinam fontes e cargas CA e CC, são considerados extremamente promissores no contexto de sistemas híbridos CA-CC. A operação combinada de microrredes CA e CC, por meio de um conversor de interface, permite que as redes aproveitem as vantagens de ambas as topologias (DAHANE; SHARMA, 2024).

1.1. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consiste na avaliação da integração de uma rede híbrida CC-CA em um sistema de distribuição de energia elétrica. Como objetivos específicos, propõe-se:

- modelar uma rede híbrida CC-CA;
- investigar tecnologias de interconexão que permitam a coexistência entre as redes CC e CA;
- avaliar a operação de SDEEs para diferentes níveis de carregamento, considerando indicadores de potência, tensão e eficiência.

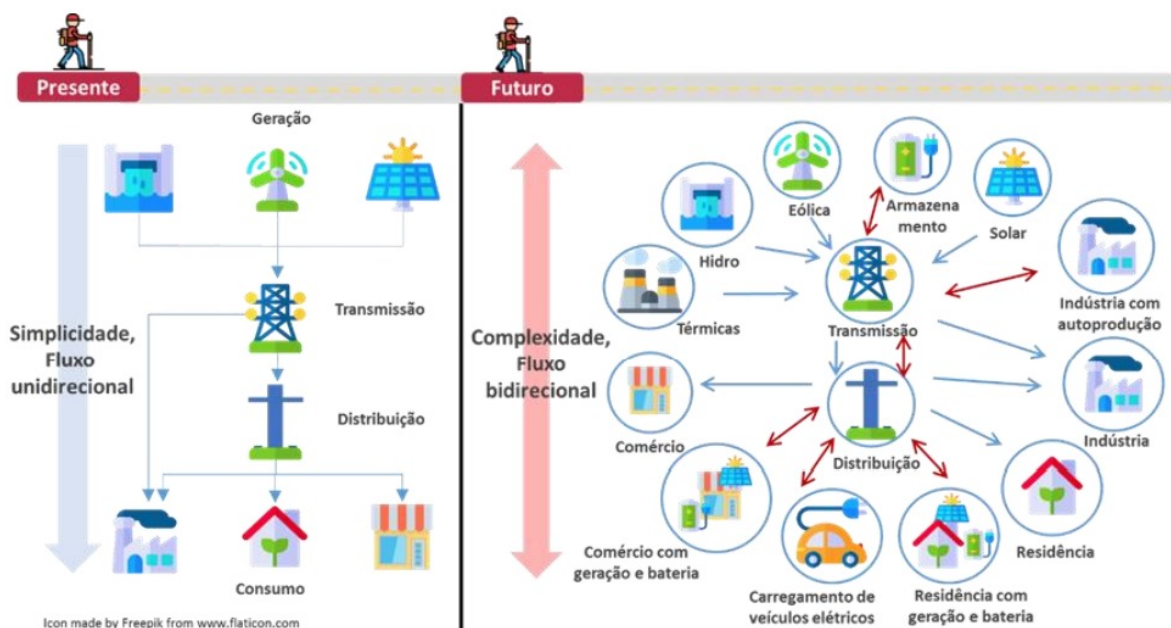
2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentadas definições, características e generalidades sobre operação de sistemas de distribuição de energia elétrica no contexto de redes híbridas CC-CA. Além disso, são apresentadas e discutidas duas abordagens correlatas ao estudo proposto, as quais contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1. Redes de Distribuição de Energia Elétrica

Desde o surgimento da eletrificação, a maneira como a eletricidade é gerada, transmitida e utilizada tem sido objeto de debates e avanços tecnológicos significativos. Conforme destaca a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), “a transição de um modelo centralizado para um modelo mais distribuído deve alterar os fluxos de energia e aumentar significativamente a complexidade dos sistemas elétricos,” conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1 – Sistemas elétricos: presente e futuro.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2019).

As redes de distribuição de energia elétrica desempenham uma função essencial no fornecimento de eletricidade, uma vez que são responsáveis por reduzir a tensão elevada proveniente

das linhas de transmissão para níveis mais baixos e seguros, adequados para o uso diário de residências, comércios e indústrias. Atualmente, a operação das redes de distribuição ocorre em corrente alternada, contando com diversas cargas variáveis (PATEL; RATHOD; MEHTA, 2020).

No início do século 20, houve um debate crucial sobre o tipo de eletricidade que deveria ser adotado para a geração, transmissão e utilização de energia, conhecido como a “guerra das correntes”. De um lado, George Westinghouse e Nikola Tesla defendiam a corrente alternada, enquanto Thomas Edison apoiava a corrente contínua. A CC era limitada a baixas tensões e enfrentava problemas significativos com a queda de tensão ao longo das distâncias, o que exigia que as usinas de Edison estivessem próximas das cargas que alimentavam, o que não se provava interessante, uma vez que os principais meios de geração da época utilizavam combustíveis fósseis. Em contraste, a CA podia ser facilmente transformada para altas tensões, facilitando a transferência de energia por longas distâncias e depois reduzida para distribuição aos usuários finais (KUMAR; ZARE; GHOSH, 2017).

Os benefícios da rede CC em comparação com a configuração CA têm sido estudados e documentados na literatura. Alguns dos principais benefícios podem ser observados no Quadro 1.

Quadro 1 – Comparativo entre o uso de CC e CA para redes de distribuição.

Condição	CA	CC
Necessidade de controle reativo ou complexo de Volt/Var	Sim	Não
Necessidade de sincronização com a frequência da rede	Sim	Não
Afundamento de tensão (<i>voltage sag</i>)	Sim	Não
Fases desequilibradas ou harmônicas de tensão	Sim	Não
Existência do efeito Skin	Sim	Não

Fonte: Baseado em Leonardo Nozari da Silva et al. (2024) e Kumar, Zare e Ghosh (2017)

A transformação completa das redes de energia existentes para sistemas de corrente contínua de uma só vez seria um desafio imenso. Desse modo, a transformação parcial, resultando em uma rede híbrida CA-CC, é uma solução mais realista e gradual para essa transição. A adoção de redes híbridas permite aproveitar as vantagens de ambos os sistemas enquanto se adapta gradualmente às mudanças tecnológicas e às necessidades energéticas emergentes (EGHTEDARPOUR; FARJAH, 2014).

2.2. Redes Híbridas CA-CC

As redes híbridas, que combinam corrente alternada e corrente contínua, estão emergindo como uma solução viável para as crescentes demandas por eficiência energética e pela integração de fontes renováveis. Este sistema híbrido é particularmente relevante diante do aumento do uso de cargas em corrente contínua e da necessidade de incorporar fontes de energia renováveis, como painéis solares e turbinas eólicas. Algumas destas tecnologias produzem energia em CC ou necessitam de múltiplas conversões, o que pode reduzir a eficiência total do sistema (YU et al., 2014). Algumas métricas de eficiência são amplamente discutidas no estudo de Jayawardena, Binduhewa e Ekanayake (2017), que compila dados de diversas pesquisas relevantes.

A conexão direta dessas fontes em CC pode reduzir as perdas de conversão, que variam entre 2,5% e 10% (ZHANG et al., 2012). Este ganho de eficiência é significativo, especialmente quando se considera a crescente utilização de sistemas de armazenamento de energia, que exigem conversores de eletrônica de potência para armazenar ou fornecer energia, resultando em perdas adicionais de conversão (HAMMERSTROM, 2007). Além da eficiência, as redes híbridas podem oferecer maior confiabilidade. Sistemas de energia ininterrupta e a capacidade de manter

operações durante quedas não planejadas de CA são exemplos de como uma conexão direta em CC pode melhorar a confiabilidade da rede (JAYAWARDENA; BINDUHEWA; EKANAYAKE, 2017). A maioria dos dispositivos eletrônicos modernos, quando conectados ao sistema CA, utiliza fontes chaveadas, também denominadas de fontes de alimentação em modo comutado (do inglês, *switched-mode power supply* - SMPS), que possuem eficiências relativamente baixas, variando entre 30% a 40% para conversores externos e 65% a 70% para conversores internos. Em contraste, os conversores CC-CC utilizados em aplicações de CC apresentam eficiências de 85% a 95%, tornando a distribuição direta em CC uma opção mais eficiente à medida que o consumo de energia dos equipamentos eletrônicos aumenta (JAYAWARDENA; BINDUHEWA; EKANAYAKE, 2017).

A implementação de redes híbridas, embora promissora, apresenta desafios. Por exemplo, uma abordagem híbrida proposta por Pasonen (2014) requer cinco fios para a distribuição separada de CA e CC, utilizando apenas o fio neutro em comum. Outros estudos, como os de Basu e Rahman (2005) e Gopi e Kishor (2016), demonstram a viabilidade de converter uma linha de circuito duplo CA em uma transmissão composta CA-CC. Nestes casos, a potência CC é obtida através de uma ponte retificadora de 12 pulsos, injetada no ponto neutro do transformador de envio e invertida na extremidade receptora. Três condutores da segunda linha fornecem o caminho de retorno para a corrente CC, utilizando enrolamentos conectados em zigue-zague para evitar a saturação do transformador devido à corrente CC.

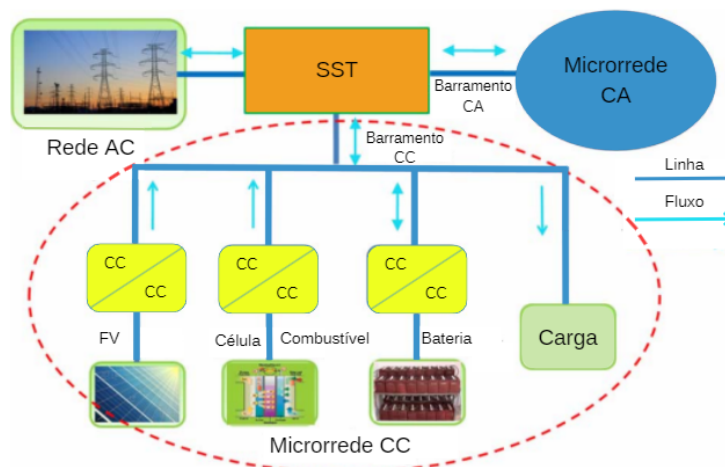
A evolução dos estudos sobre redes híbridas tem levado a uma maior atenção às microrredes, que são sistemas locais de energia capazes de operar de forma independente ou conectados à rede elétrica principal. Inicialmente focadas em aplicações de CA, as microrredes estão se tornando um tópico de pesquisa relevante por incluir cada vez mais aplicações de CC, integrando fontes de energia renovável, cargas e sistemas de armazenamento de energia. Esta transição para uma abordagem híbrida CA/CC é essencial para atender às necessidades energéticas contemporâneas, proporcionando uma maior flexibilidade e resiliência à rede elétrica (YU et al., 2014).

Para que as redes híbridas se tornem uma realidade viável, é essencial a implementação de tecnologias mediadoras, como conversores de potência, que permitam a integração eficiente de sistemas CA e CC. No contexto das microrredes, a necessidade de um fluxo bidirecional de energia é ainda mais crítica, pois essas redes locais devem ser capazes de operar tanto de forma independente quanto conectadas à rede principal. Os conversores desempenham um papel fundamental nesse processo, garantindo a flexibilidade e a resiliência necessárias para a operação eficiente das redes híbridas (JAYAWARDENA; BINDUHEWA; EKANAYAKE, 2017).

Diante dessa situação, o transformador de estado sólido (do inglês, *solid state transformer* - SST) emerge como uma possível tecnologia. Devido às suas possibilidades, o SST é reconhecido como uma das dez tecnologias mais emergentes de 2011 pela *MIT Technology Review*, além de também ser promovido pelo Centro de Sistemas de Distribuição e Gestão de Energia Renovável Futura (do inglês, *Future Renewable Electric Energy Delivery and Management System* - FREEDM), ambos sendo fontes de referência nesse tópico. O SST fornece interfaces tanto para corrente contínua quanto para corrente alternada, nos lados de média tensão e baixa tensão, permitindo o acesso ao sistema de distribuição e atuando como um verdadeiro roteador de energia dentro de uma internet de energia (SHE et al., 2012).

Dependendo da topologia escolhida para o SST, é possível conectar diretamente fontes de energia distribuídas, como painéis solares e turbinas eólicas, por meio dos seus barramentos CC. Além disso, o SST oferece a possibilidade de integração com sistemas de armazenamento de energia, outra tecnologia promissora no setor energético. Consequentemente, o SST possibilita a criação de microrredes híbridas, que podem operar de forma independente ou em conjunto com a rede elétrica principal, como ilustrado na Figura 2.

A integração de SSTs nas redes de distribuição de energia oferece uma série de benefícios

Figura 2 – Esquema de um SST como intermédio para *microgrids*.

Fonte: Adaptado de Yu et al. (2014).

relevantes no contexto das redes inteligentes. O SST pode atuar como um elemento mediador eficiente, proporcionando uma rede híbrida com funções que ajudam a otimizar a gestão e distribuição de energia.

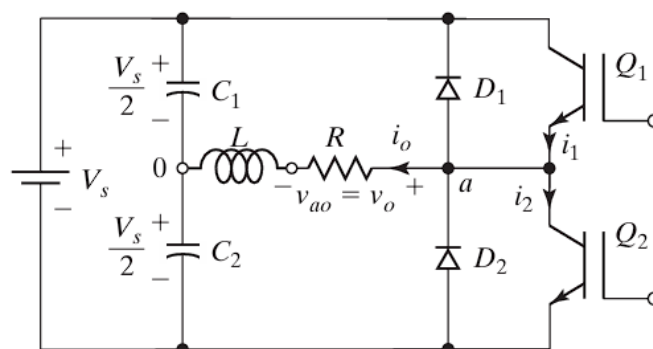
2.3. Conversores Eletrônicos

O conversor de potência é um dispositivo que realiza a transformação de uma corrente em outro tipo, e também realiza transformação de frequência, podendo variar entre conversores CC-CA, CA-CC, CC-CC e CA-CA. Os conversores CC-CA, conhecidos como inversores, têm a função de transformar uma tensão de entrada em corrente contínua em uma tensão de saída em corrente alternada simétrica, com a amplitude e a frequência desejadas. Essa tensão de saída pode ser tanto fixa quanto variável, dependendo da aplicação. Para obter uma tensão de saída variável, pode-se variar a tensão de entrada CC, mantendo o ganho do inversor constante. Alternativamente, se a tensão de entrada CC for fixa, a variação da tensão de saída pode ser alcançada ajustando o ganho do inversor, geralmente através da modulação por largura de pulso (do inglês, *pulse width modulation* - PWM). A saída ideal de um inversor seria uma onda senoidal pura, no entanto, na prática, a tensão de saída contém harmônicas indesejadas. Com o avanço dos dispositivos semicondutores e o próprio projeto dos conversores essas harmônicas podem ser significativamente reduzidas por meio de técnicas de chaveamento (MOHAN; RAJU, 2022).

Os inversores são classificados principalmente em dois tipos: monofásicos e trifásicos. A Figura 3 apresenta um exemplo de inversor monofásico. Ambos geralmente utilizam sinais de controle PWM para produzir a tensão de saída CA. Quando a tensão de entrada é constante, o inversor é chamado de inversor alimentado por tensão (do inglês, *voltage-fed inverter* - VFI). Se a corrente de entrada é mantida constante, ele é chamado de inversor alimentado por corrente (do inglês, *current-fed inverter* - CFI) (HART, 2011).

Além da classificação em monofásicos e trifásicos, os inversores também podem ser diferenciados pela topologia de ponte que utilizam. As topologias mais comuns incluem meia ponte e ponte completa. Um inversor de meia ponte utiliza dois interruptores e é adequado para aplicações de baixa potência, oferecendo simplicidade e custo reduzido. Já o inversor de ponte completa, ou ponte H, emprega quatro interruptores, permitindo a utilização eficiente em aplicações de maior potência e proporcionando uma maior qualidade na forma de onda da saída. Existem também inversores com configurações mais complexas, como os trifásicos que utilizam

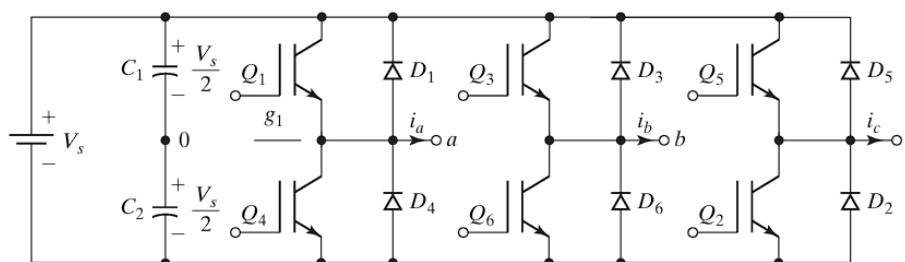
Figura 3 – Configuração de um inversor monofásico de meia ponte.



Fonte: Rashid (2017).

seis pontes ou mais, ajustando o número de pontes conforme os requisitos de tensão, corrente e complexidade do sistema. Um exemplo de conversor trifásico, com maior número de pontes, pode ser observado na Figura 4. Além dos conversores CC-CA, também existem conversores

Figura 4 – Configuração de um inversor monofásico de ponte completa.



Fonte: Rashid (2017).

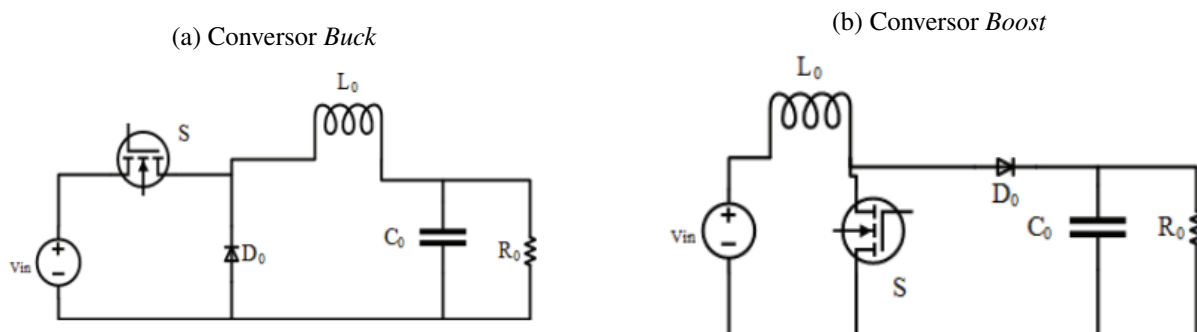
CA-CA, que são usados para modificar as características da corrente alternada, como a amplitude, frequência ou fase. Esses conversores são essenciais em aplicações que exigem ajustes precisos na forma de onda da corrente alternada, como em sistemas de controle de velocidade de motores e reguladores de tensão (RASHID, 2017).

Um conversor de potência CC-CC é um circuito utilizado para transformar a tensão contínua de um nível para outro. Este processo de conversão envolve a armazenagem temporária da energia de entrada em um componente como um indutor ou capacitor, que posteriormente libera a energia em um nível de tensão diferente para a saída. Enquanto o indutor ou transformador armazena a energia em forma de campo magnético, o capacitor armazena em forma de campo elétrico. São exemplos disso os conversores *Buck* e *Boost*. O conversor *Buck* reduz a tensão de entrada para um nível mais baixo na saída, enquanto o conversor *Boost* aumenta a tensão de entrada para um nível mais alto na saída, como pode ser observado nos circuitos ilustrados pela Figura 5.

Esses conversores podem ser projetados para operar de forma bidirecional, permitindo que a energia flua em ambas as direções. Isso é particularmente útil para manter uma potência constante ao controlar as tensões e correntes de entrada e saída. Apesar das vantagens em termos de controle de potência, os conversores chaveados possuem desvantagens, como custos elevados, geração de ruído eletrônico e complexidade das topologias (SINGH; GAWRE; DYANAMINA, 2021).

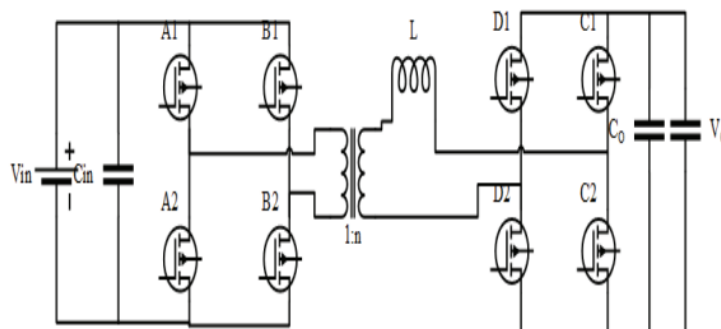
Entre as diversas topologias de conversores CC-CC, o conversor de ponte ativa dupla (do inglês, *dual active bridge* - DAB) destaca-se como uma das mais eficientes para aplicações de

Figura 5 – Topologias de conversores redutores e elevadores de tensão.



Fonte: Singh, Gawre e Dyanamina (2021).

alta potência. Um exemplo desse conversor é ilustrado pela Figura 6. Para carregadores rápidos de corrente contínua, por exemplo, os quais demandam altas potências, frequentemente são utilizados múltiplos conversores DAB em série ou paralelo, a depender das necessidades do projeto.

Figura 6 – Conversor *Dual Active Bridge*.

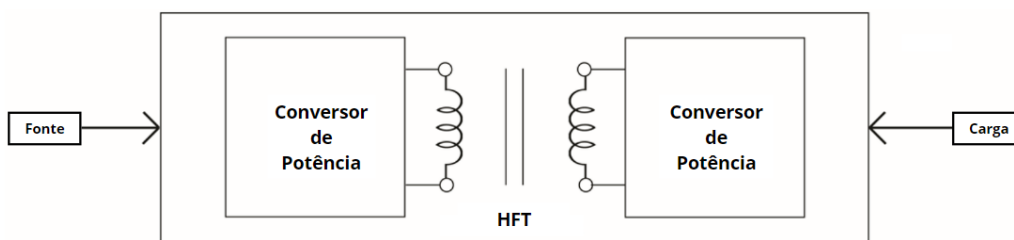
Fonte: Singh, Gawre e Dyanamina (2021).

O conversor DAB emprega um transformador de alta frequência que proporciona isolamento galvânico entre os lados de média e baixa tensão. Esse transformador de alta frequência é menor que os transformadores de frequência de linha, otimizando o espaço no sistema de carregamento. Estudos indicam que o DAB é mais eficiente que os conversores *Buck* e *Boost*, apresentando menor ondulação residual (efeito *ripple*) na corrente, o que resulta em um desempenho superior na conversão de energia (SINGH; GAWRE; DYANAMINA, 2021).

2.4. Fundamentos do SST

O transformador de estado sólido foi apresentado em 1970 por McMurray (1970). A ideia era baseada no uso de interruptores de estado sólido e isolamento de alta frequência, ou seja, fazer o uso de componentes semicondutores (transistores ou tiristores) ao invés dos dispositivos mecânicos tradicionais. Desde então, tem-se dedicado uma extensa pesquisa e estudo a respeito desse tipo de equipamento, explorando suas potencialidades, limitações e aplicações em diversos contextos. Ao longo desses estudos, especialistas têm se debruçado sobre as características intrínsecas dos SSTs, aprimorando seus designs, compreendendo as nuances de seu desempenho em diferentes ambientes e refinando os materiais utilizados na sua construção. A Figura 7 mostra um modelo padrão de SST, representando de maneira geral seus diferentes estágios.

Figura 7 – Configuração conceitual de um SST.



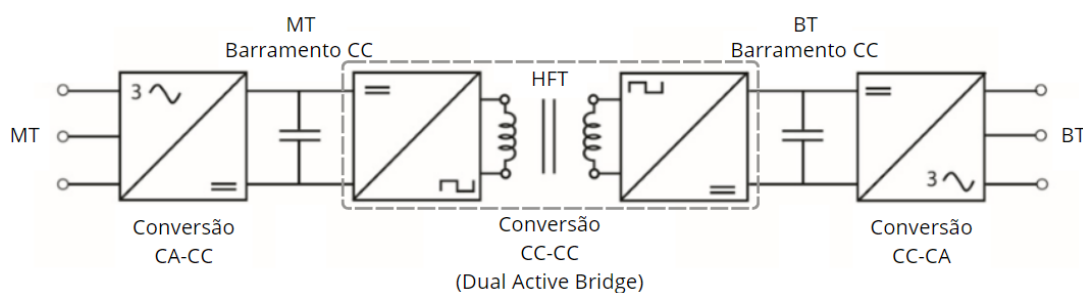
Fonte: Adaptado de Rehman et al. (2022).

A proposta do transformador de estado sólido é realizar a conversão de tensão e o isolamento galvânico entre duas linhas de corrente alternada utilizando um transformador de alta frequência (do inglês, *high frequency transformer* - HFT). As portas de entrada e saída de baixa frequência são conectadas ao HFT por meio de um ou mais estágios de conversores eletrônicos de potência em cascata (GRANATA et al., 2022).

Na etapa inicial do processo, o conversor CA-CC é conectado à rede MT, recebendo alimentação em corrente alternada com frequência padrão geralmente de 50/60 Hz. Este retificador irá converter a corrente CA proveniente da rede de média tensão (MT) em CC, promovendo também a uniformização e estabilização da tensão.

Em sequência, a energia convertida em corrente contínua avança para um HFT. Nesta etapa, a função primordial do HFT é realizar uma alteração nos níveis de tensão, embora ainda realize o papel de isolamento galvânica. Para que esse processo seja realizado de forma eficiente, os terminais de entrada do HFT são equipados com um inversor que atua com o chaveamento rápido da corrente contínua, permitindo a operação do transformador em uma frequência elevada. Essa etapa é caracterizada, em maior escala, pelo DAB, que é o conversor que possibilita de fato a bidirecionalidade de fluxo (conforme descrito na seção 2.3). É possível observar um modelo de SST com essas características na Figura 8.

Figura 8 – Topologia de um SST de três estados.



Fonte: Adaptado de Rehman et al. (2022).

Em seguida, a energia que passou pelo HFT, após a alteração nos níveis de tensão, avança para a etapa final do processo, em que ocorre a conversão de volta para corrente alternada. Essa conversão é realizada por meio de um inversor, que realiza o chaveamento da corrente contínua em alta frequência, revertendo-a para o formato de corrente alternada (VARGAS et al., 2019).

O transformador de estado sólido, especialmente na topologia de três estados, emerge como uma inovação tecnológica promissora, oferecendo uma série de vantagens em comparação com os transformadores convencionais. A substituição dos tradicionais enrolamentos de cobre e núcleos magnéticos por componentes semicondutores, como transistores de potência, confere ao SST maior eficiência energética, menor tamanho e peso, além de um controle dinâmico mais

preciso sobre o fluxo de potência entre os barramentos. Apesar das melhorias, é importante considerar também as desvantagens associadas a essa tecnologia. O Quadro 2 apresenta uma lista de vantagens e desvantagens do SST, as quais devem ser levadas em consideração na hora de se avaliar a substituição dos transformadores tradicionais por esta tecnologia.

Quadro 2 – Aspectos de um transformador de estado sólido de três estágios.

Pontos positivos	Pontos negativos
Fluxo de potência bidirecional	Perdas excessivas por chaveamento
Correção do fator de potência e regulação de tensão	Sistema de controle complexo
Possui barramentos CA e CC	Aspecto construtivo menos robusto
Proteção contra sobrecargas e curto-circuito	Sensível à variações externas de temperatura
Melhora de distorções harmônicas	Maior custo

Fonte: Baseado em Falcones, Mao e Ayyanar (2010) e Avdeev e Vyngra (2021).

2.5. Indicadores Operacionais

A seguir, são apresentados fundamentos sobre os principais indicadores operacionais de redes CA e CC, o quais serão utilizados, posteriormente, para analisar a integração de redes híbridas em SDEEs.

2.5.1. Potência em Circuitos CA

A potência elétrica é uma medida essencial para avaliar o desempenho e a eficiência de sistemas elétricos. Em circuitos de corrente alternada, a análise da potência em regime permanente é realizada por meio da transformada fasorial, envolvendo números complexos. Segundo Alexander e Sadiku (2013), o conceito de potência complexa foi criado para capturar o efeito total das cargas em paralelo. Isso é fundamental para que a análise de potência inclua todas as informações relevantes sobre a potência absorvida por uma carga específica. A potência complexa S é dada em VA e pode ser representada como o produto da tensão Raíz Média Quadrada (do inglês, *Root Mean Square* - RMS) e do conjugado complexo da corrente RMS, expressa por (ALEXANDER; SADIKU, 2013):

$$S = V_{RMS} \cdot I_{RMS}^* \quad (2.1)$$

Além disso, é possível expressar a potência complexa em termos de impedância da carga, obtendo P e Q como parte real e imaginária da potência complexa, respectivamente. Sendo P a parcela de potência real, ou também a potência média liberada para uma carga, em watts, enquanto Q , ou potência reativa, refere-se à parte imaginária da carga, medida em volt-amper reativo (var). Logo, pode-se expressar a potência complexa como (ALEXANDER; SADIKU, 2013):

$$S = P + jQ \quad (2.2)$$

É importante ressaltar que a parte reativa não realiza trabalho útil, logo pode-se introduzir um conceito para explicar suas diferentes variações, conhecido como fator de potência (FP). O FP quantifica a proporção da potência que é efetivamente utilizada para realizar trabalho em relação à potência total fornecida ao sistema. O fator de potência também pode ser expresso como o cosseno do ângulo de fase (θ) entre a tensão e a corrente. Desse modo, obtém-se (ALEXANDER;

SADIKU, 2013):

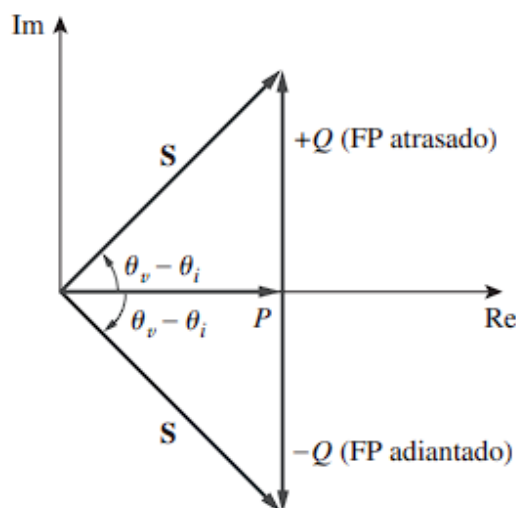
$$FP = \frac{P}{S} = \frac{V_{RMS} \cdot I_{RMS} \cdot \cos(\theta)}{V_{RMS} \cdot I_{RMS}} = \cos(\theta), \quad (2.3)$$

onde:

- $Q = 0$ para cargas resistivas (FP unitário);
- $Q < 0$ para cargas capacitivas (FP adiantado);
- $Q > 0$ para cargas indutivas (FP atrasado).

Uma maneira mais intuitiva de se observar a relação entre as potências é utilizar uma representação denominada de triângulo de potências, conforme ilustra a Figura 9.

Figura 9 – Triângulo de potências.



Fonte: Alexander e Sadiku (2013).

É possível então, tratar a potência complexa também como uma potência aparente, utilizando o triângulo de potências para representar a relação entre potência ativa e reativa, sendo S expressa por (ALEXANDER; SADIKU, 2013):

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (2.4)$$

Estendendo a análise para um circuito trifásico, tem-se que para uma carga trifásica, a potência aparente total é a soma das potências aparentes de cada fase. Logo, se a carga trifásica é equilibrada, tem-se a expressão representada por (ALEXANDER; SADIKU, 2013):

$$S_{3\theta} = 3 \cdot \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (2.5)$$

2.5.2. Potencia em Circuitos CC

Segundo Leonardo Nozari da Silva et al. (2024), em circuitos de corrente contínua, a análise de potência é simplificada em comparação aos circuitos de corrente alternada. Na CC, a tensão e a corrente são constantes ao longo do tempo, o que elimina a necessidade de considerar valores eficazes RMS e ângulos de defasagem, uma vez que apenas a potência ativa está presente. Para calcular a potência em um circuito CC, utiliza-se a relação linear entre tensão e corrente, dada

pela Lei de Ohm. Para a topologia bipolar, a potência pode ser calculada por (SILVA, L. N. da et al., 2024):

$$P = 2 \cdot V \cdot I. \quad (2.6)$$

Para entender as diferenças e semelhanças na análise de potência entre circuitos CC e CA, é útil comparar como a potência é calculada em cada tipo de circuito. Ao relacionar as fórmulas de potência de CC e CA, é possível observar como os conceitos de tensão e corrente variáveis na CA se traduzem em uma abordagem mais direta na CC, pois (SILVA, L. N. da et al., 2024):

$$I_{CC} = I_{CA}^{\text{rms}}, \quad (2.7)$$

$$V_{CC} = \sqrt{2} \cdot V_{CA}^{\text{rms}}, \quad (2.8)$$

e, portanto:

$$\frac{P_{CC}}{P_{3\theta,CA}} = \frac{2 \cdot V_{CC} \cdot I_{CC}}{3 \cdot V_{CA}^{\text{rms}} \cdot I_{CA}^{\text{rms}} \cdot \cos\theta}. \quad (2.9)$$

2.5.3. Perdas e Eficiência

Para analisar o desempenho de um sistema de conversão de energia, é fundamental considerar a potência de entrada, a potência de saída e as perdas associadas. A potência nas cargas representa a quantidade de energia útil transferida para os dispositivos conectados, enquanto as perdas correspondem à diferença entre a potência de entrada e a potência total na saída (ALEXANDER; SADIKU, 2013). Deste modo, a eficiência (η) é expressa por:

$$\eta = \frac{\text{Potência de Saída}}{\text{Potência de Entrada}} \cdot 100\%. \quad (2.10)$$

2.5.4. Efeito Joule e Resistência de Condutores

O efeito Joule descreve o processo pelo qual a energia elétrica é convertida em calor quando uma corrente elétrica passa através de um condutor. A corrente de carga que circula no condutor afeta diretamente o ganho de calor por efeito Joule (Q_j). Este fenômeno embasa a análise térmica de sistemas elétricos, pois a dissipação de calor deve ser cuidadosamente gerenciada para evitar sobreaquecimento dos componentes. Deste modo, a resistência de um condutor varia com a temperatura e pode ser descrita pela seguinte expressão (LEMOS, 2022):

$$R_{T_C} = R_{CA} [1 + \alpha_{CA}(T_C - 20)]. \quad (2.11)$$

onde:

- R_{T_C} é a resistência (Ω/m) do condutor em CA para a temperatura de projeto T_C ($^{\circ}\text{C}$);
- R_{AC} é a resistência (Ω/m) do condutor em CA a 20°C ;
- α_{AC} é o coeficiente de variação da resistência CA por unidade de grau Celsius.

Para condutores em corrente contínua, utiliza-se uma expressão análoga (LEMOS, 2022):

$$R_{T_C} = R_{CC} [1 + \alpha_{CC}(T_C - 20)]. \quad (2.12)$$

onde:

- R_{T_C} é a resistência (Ω/m) do condutor em CC para a temperatura de projeto T_C ($^{\circ}\text{C}$);
- R_{CC} é a resistência (Ω/m) do condutor em CC a 20°C ;
- α_{CC} é o coeficiente de variação da resistência CC por unidade de grau Celsius.

As expressões (2.11) e (2.12) são essenciais para o correto dimensionamento dos condutores e sua operação segura. Em conjunto com este equacionamento, são usados os parâmetros fornecidos pelos fabricantes de condutores, de modo a considerar a variação da resistência com a temperatura a partir dos coeficientes específicos para cada tipo de condutor, a depender do seu material e características intrínsecas.

2.6. Abordagens Correlatas

No desenvolvimento de redes híbridas, é fundamental analisar diversas abordagens e estudos correlatos que tenham relevância e possam proporcionar uma visão mais ampla sobre o tema. A partir de uma revisão da literatura, destacam-se dois estudos que embasaram a metodologia proposta no presente. Primeiramente, será apresentado um estudo comparativo que examina a operação de uma rede CA adaptada para uma rede CC, destacando as vantagens e desafios dessa transição. Posteriormente, é apresentado um estudo que utiliza o transformador de estado sólido em uma aplicação distinta, ressaltando a sua versatilidade e seus benefícios em diferentes contextos. Estes estudos foram significativos em proporcionar as métricas e condições necessárias para o desenvolvimento da pesquisa deste trabalho de conclusão.

2.6.1. Leonardo Nozari da Silva et al. (2024)

No estudo realizado por Leonardo Nozari da Silva et al. (2024), foi proposta uma análise da transição de um sistema de distribuição de baixa tensão em corrente alternada (BT CA) para um sistema de baixa tensão em corrente contínua (BT CC), sem a necessidade de grandes modificações ou reconfigurações na rede existente. Os resultados obtidos indicaram que o sistema (BT CC) apresenta menores perdas de linha e quedas de tensão, além de ser capaz de transferir mais potência para a carga em comparação com o sistema (BT CA). Uma das vantagens destacadas na transição para a configuração CC é a eliminação de um condutor necessário na rede CA. Este condutor extra pode ser utilizado para modificar a rede de maneira a operar como um bipolo. Como perspectiva futura, o estudo sugere a implementação de uma rede baseada em CC utilizando um transformador de estado sólido com saída em corrente contínua, ao invés de um transformador CA combinado com um conversor de CA para CC.

2.6.2. Nitola Martinez e Vega Vasquez (2018)

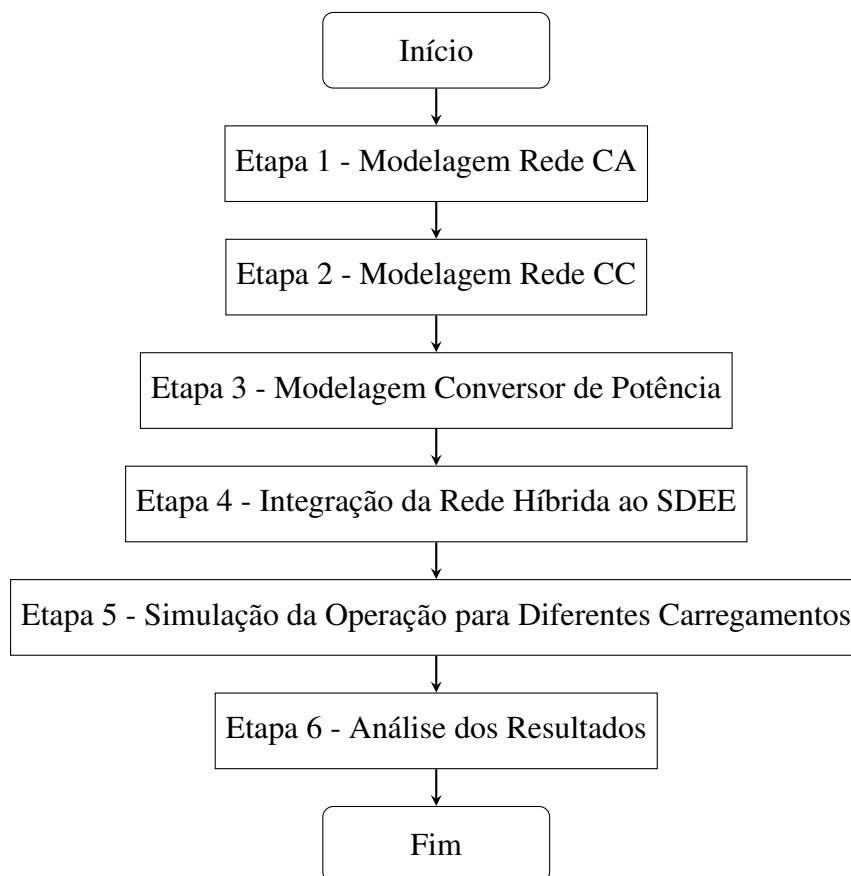
No estudo de Nitola Martinez e Vega Vasquez (2018) foi realizada a simulação de um transformador de estado sólido de três estágios, capaz de converter 13,2 kV para 220 V com fluxo unidirecional, além de ser submetido a diversas condições operacionais e testes de desempenho, juntamente com seu sistema de controle. Embora as variações de carga testadas neste trabalho, especialmente aquelas relacionadas às demandas típicas dos setores comercial e residencial, sejam apenas uma aproximação do comportamento real das variações suportadas por um transformador de distribuição convencional, ficou evidente que os SSTs conseguem suportar adequadamente essas mudanças. Eles mantêm a tensão e a potência entregues às cargas de forma estável, fazendo ajustes automáticos em um período de tempo muito curto. Com base nos resultados obtidos nos diferentes testes realizados, o transformador de estado sólido, e em

particular a topologia de três estágios, atende plenamente às exigências de estabilidade e controle de tensão diante de variações de carga.

3. METODOLOGIA

Este trabalho visa avaliar a integração de redes híbridas CC-CA em SDEEs. Deste modo, a metodologia inclui a modelagem das redes de corrente alternada e corrente contínua, do conversor de potência e da integração desses elementos, além da análise do comportamento da rede híbrida sob diferentes patamares de carga. A Figura 10 ilustra as etapas da metodologia proposta.

Figura 10 – Fluxograma da metodologia proposta.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1. Etapa 1 – Modelagem da Rede CA

Inicialmente, é necessário definir os componentes que serão conectados a cada barramento e em quais condições. Isso envolve a definição dos equipamentos e das cargas que farão parte de cada rede. Na modelagem da rede CA em baixa tensão, é necessário definir os parâmetros elétricos, como a tensão e frequência de operação, a resistência das linhas e a ampacidade dos condutores, além de verificar a necessidade de transformadores de potência e a topologia de cada rede. As cargas conectadas à rede devem estar de acordo com seu tipo e condições impostas pelos componentes da rede.

3.2. Etapa 2 – Modelagem da Rede CC

Para a rede CC em baixa tensão, o processo é semelhante à Etapa 1. É preciso definir a tensão de operação, a resistência das linhas e a ampacidade dos condutores, além de considerar a topologia da rede. As cargas devem ser compatíveis com as especificações da rede CC.

3.3. Etapa 3 – Modelagem do Conversor de Potência

A modelagem do conversor de potência, que serve como interface entre as redes em baixa tensão, CA e CC, e o SDEE em média tensão, envolve a escolha de uma tecnologia capaz de integrar as duas redes de maneira eficiente. A integração de geração distribuída, implica modelagem do conversor considerando bidirecionalidade do fluxo de energia, o que permite que o conversor possa tanto injetar energia na rede quanto absorvê-la conforme necessário. A topologia do conversor deve ser definida de forma a se adaptar às características das redes CA e CC. O controle do conversor, incluindo a regulação da tensão e a gestão do chaveamento das chaves semicondutoras.

3.4. Etapa 4 – Integração da Rede Híbrida ao SDEE

A partir das modelagens das redes CA, CC e do elemento conversor de potência, é possível integrar tais elementos a um SDEE modelado em média tensão. É necessário analisar os pontos de acoplamento entre as duas redes e implementar estratégias de controle do sistema híbrido. Deve-se considerar também que a compatibilidade entre as redes deve ser assegurada por meio da sincronização dos parâmetros operacionais.

3.5. Etapa 5 – Simulação da Operação em Diferentes Patamares de Carga

Para avaliar o comportamento da rede híbrida CC-CA sob diferentes condições de carregamento, as cargas existentes nas redes de baixa tensão são submetidas a diferentes patamares, representando cenários de carga variável e diferentes perfis de demanda. Com isso, os indicadores operacionais descritos na seção 2.5, como potência, níveis de tensão e corrente, são calculados para cada nível de carregamento.

3.6. Etapa 6 – Análise dos Resultados

A partir dos resultados obtidos na simulação computacional da operação da rede híbrida CC-CA conectada ao SDEE, é possível avaliar o desempenho em termos de eficiência energética e qualidade da energia. Os resultados obtidos para diferentes cenários de carregamento são comparados, discutindo-se as vantagens e desvantagens do sistema proposto, permitindo discussão de possíveis melhorias e aplicações futuras.

4. ESTUDO DE CASO E RESULTADOS

Os estudos numéricos, descritos neste capítulo, visam validar a metodologia proposta para integração de uma rede híbrida CC-CA, modelada em baixa tensão, em um SDEE, modelado em média tensão. Para a realização das simulações, foram utilizados os programas Simulink[®] (SIMULATION; DESIGN, 2023) e MATLAB[®] (MATLAB, 2023), ambos amplamente reconhecidos por suas capacidades de modelagem e simulação de sistemas dinâmicos. As simulações foram realizadas em um computador com as configurações descritas no Quadro 3.

Quadro 3 – Especificações do computador utilizado nas simulações.

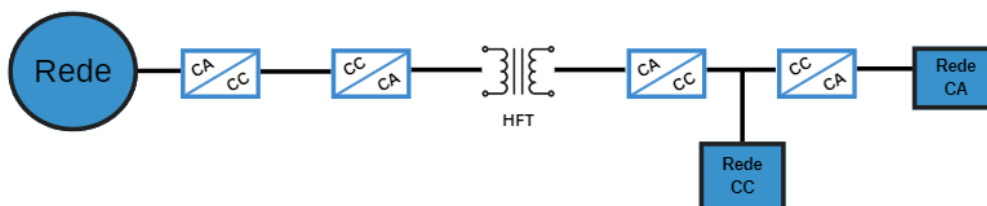
Componente	Especificação
Processador	AMD Ryzen 5 3600
Unidade de Processamento Gráfico	AMD RX 5700 XT
Memória RAM	16 GB DDR4 a 3200 MHz
Armazenamento	SSD NVMe M.2

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1. Descrição do Sistema Teste

O sistema ilustrado pela Figura 11 consiste em um alimentador trifásico que opera em média tensão, com tensão de linha nominal de 13,2 kV e 60 Hz. Visando investigar e comprovar a viabilidade da existência de uma rede híbrida, foram implementadas duas redes distintas, CA e CC, em baixa tensão. As redes foram conectadas à media tensão por meio de um conversor de potência, que opera como elemento mediador, formando então a rede híbrida. As redes CA e CC, modeladas em baixa tensão, bem como o elemento conversor de potência serão descritos a seguir.

Figura 11 – Sistema teste proposto.



Fonte: Elaborada pelo autor.

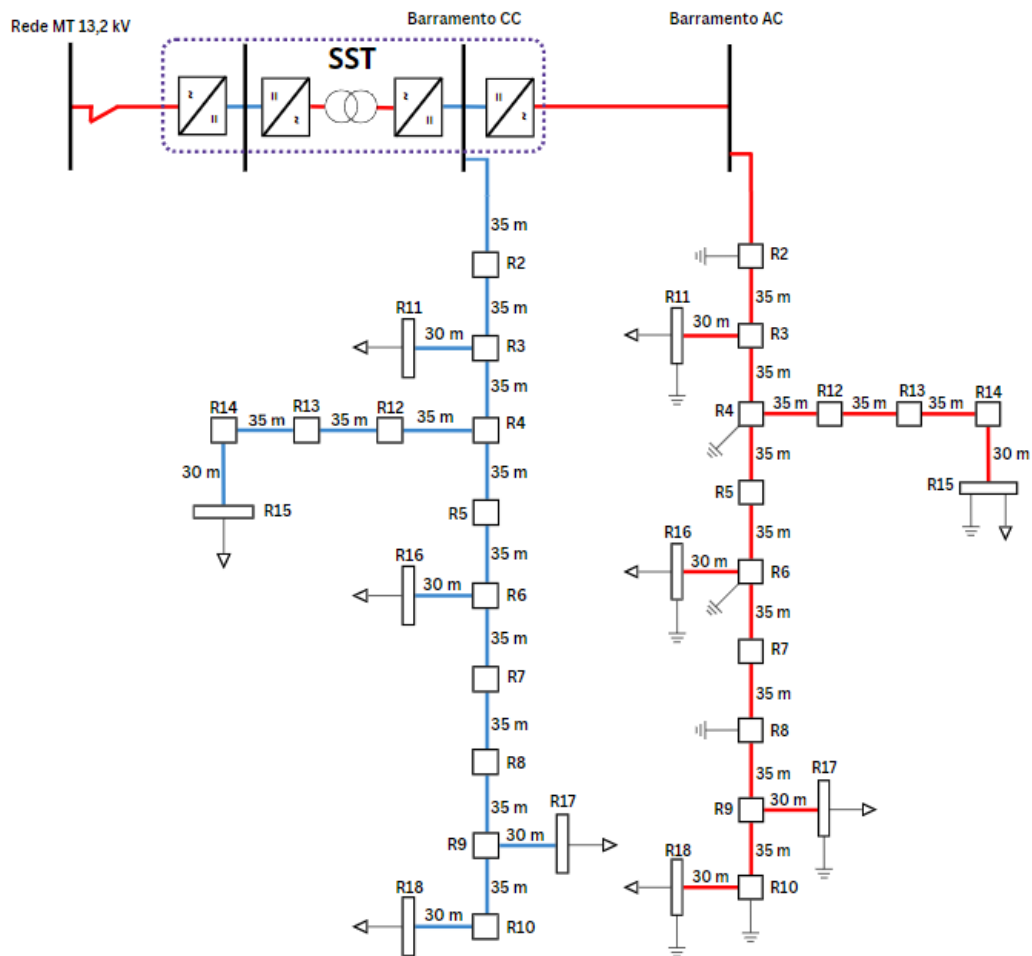
4.1.1. Rede Híbrida CC-CA em Baixa Tensão

Para a modelagem da rede CA em baixa tensão, ilustrada na Figura 11, utilizou-se uma rede de distribuição de baixa tensão do Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos (do francês, *Conseil International des Grands Réseaux Électriques* - CIGRÉ), como observado no estudo de Barsali et al. (2014). Já a modelagem da rede CC em baixa tensão, baseia-se na abordagem proposta por Leonardo Nozari da Silva et al. (2024), que utiliza a mesma rede do CIGRÉ, porém adaptada para que opere em CC. Com isso, no presente estudo planeja-se realizar simulações visando demonstrar a possibilidade de coexistência e interoperabilidade de ambas as redes utilizando o SST, conforme ilustrado na Figura 12, baseando-se em Leonardo Nozari da Silva et al. (2024).

A rede em CA foi adaptada para ter sua operação em uma tensão de 220 V (linha a linha). Para o caso da rede CC, cuja operação está no nível de tensão de 192 V, manteve-se a topologia bipolar, consistindo em três condutores: um fio positivo (+), um fio negativo (-) e um fio neutro comum entre os terminais, que serve como ponto de referência do sistema.

Para a construção das redes, foram utilizados condutores do tipo NA2XY para as redes CA e CC (WIRE; TBK, 2014). Algumas das especificações detalhadas dos cabos utilizados estão descritas na Tabela 1. Segundo o estudo de Leonardo Nozari da Silva et al. (2024), ambos sistemas são considerados para operar em 90 °C, logo, adaptou-se os valores de resistência dos

Figura 12 – Rede híbrida.



Fonte: Elaborada pelo autor.

condutores para que operem nessa temperatura de projeto, utilizando como base nas expressões (2.11) e (2.12).

Tabela 1 – Características dos condutores.

Seção Transversal Nominal	CA - Resistência a 90° C	CC - Resistência a 90° C
16 mm ²	1.79 Ω/km	1.39 Ω/km

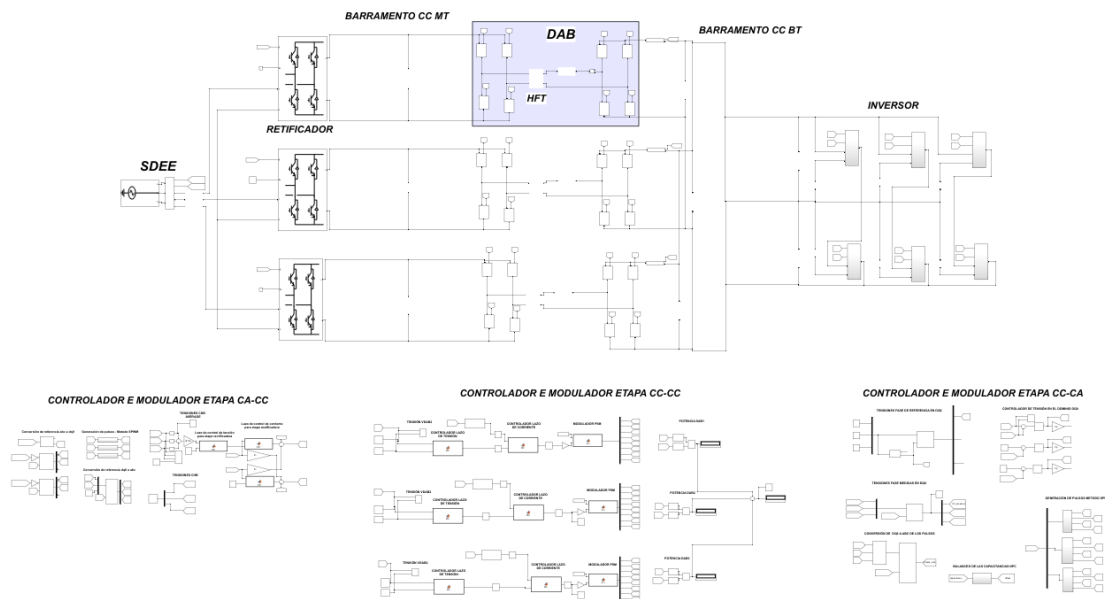
Fonte: Elaborada pelo autor.

Neste estudo foi adotado um SST como dispositivo conversor de potência, o qual permite a conexão de redes CC e CA de baixa tensão, a uma rede CA em média tensão. Deste modo, foram realizadas adaptações no início da rede, excluindo os elementos transformador e retificador, originais do trabalho de Leonardo Nozari da Silva et al. (2024) mas mantendo a alimentação nas mesmas topologias: trifásico para CA e bipolar para CC. Isso se deve ao fato de que a configuração do SST utilizado possibilita a existência de barramentos CA e CC de baixa tensão, permitindo que as redes sejam conectadas diretamente à seus respectivos barramentos, eliminando a necessidade dos elementos adicionais.

4.1.2. SST

Para o modelo de conversor funcionar como elemento mediador, promover a interconexão das redes entre si (formando a rede híbrida) e também a conexão da rede híbrida ao SDEE, optou-se por adotar o transformador de estado sólido. Desse modo, para este estudo, escolheu-se o modelo de SST implementado por Nitola Martinez e Vega Vasquez (2018), no *software* Simulink[®], conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Implementação computacional do modelo do SST utilizado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

No modelo ilustrado pela Figura 13, o SST é alimentado por uma fonte trifásica equilibrada com nível de tensão em 13,2 kV, e é capaz de fornecer uma tensão de saída de magnitude de 220 V. Nitola Martinez e Vega Vasquez (2018) simularam o controle de um transformador de estado sólido de três estágios unidirecional operando no modo *Buck*, que é uma modalidade de redução de tensão. Observa-se que caso a rede de baixa tensão contenha geração distribuída, se faz necessário realizar adaptações ao modelo proposto por Nitola Martinez e Vega Vasquez (2018), uma vez que a bidirecionalidade não foi contemplada no modelo, limitando o fluxo de energia a ser unidirecional.

O transformador tem uma capacidade nominal de 50 kVA, o que deve ser levado em consideração ao ajustar as cargas que serão alimentadas por ele. O modelo utilizado possui um nível complexo de controle, fato que torna necessário cuidado ao alterar os parâmetros da simulação. Este controle envolve a utilização de controladores PID para os conversores, que gerenciam laços de corrente e tensão, moduladores de modulação por deslocamento de fase (do inglês, *Phase Shift Modulation* - PSM) e a transformação dq0, também denominada de Transformada de Clarke e Park, que converte as correntes e tensões trifásicas em um sistema de referência rotativo para simplificar a análise e o controle de sistemas elétricos, transformando sinais CA em CC (NITOLA MARTINEZ; VEGA VASQUEZ, 2018).

4.1.3. Cargas

As cargas utilizadas presentes no sistema ilustrado pela Figura 12 foram modeladas conforme descrito no estudo de Leonardo Nozari da Silva et al. (2024). Em relação às cargas CC, estas

foram distribuídas igualmente entre os dois polos (polos A e B) para aproveitar a simetria do sistema bipolar. Para a rede CA, utilizou-se cargas trifásicas balanceadas com um fator de potência de 0,95. Deste modo, as mesmas cargas foram implementadas em suas respectivas redes (CA e CC) remodeladas, as quais estão acopladas aos devidos barramentos de baixa tensão do SST.

Devido à limitação do modelo do SST utilizado, que possui uma capacidade de 50 kVA, e considerando que as cargas do estudo original totalizavam aproximadamente 193 kW para as cargas CC e 204 kW para as cargas CA, optou-se por reduzir os valores das cargas para 10% dos seus respectivos valores originais. Estes valores são observados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente. Essa redução foi necessária para que as cargas se adequassem aos padrões de capacidade do SST, assegurando que o sistema opere dentro de suas limitações, e também para que opere perto da capacidade nominal do transformador. Dessa maneira, obtém-se uma carga total de aproximadamente 40 kW, que está dentro dos limites operacionais do SST.

Tabela 2 – Parâmetros adotados para as cargas CC.

Nó	Potência Ativa (kW)	Conexão
R11A	0,712	+Polo A - Neutro
R11B	0,712	-Polo B - Neutro
R15A	2,470	+Polo A - Neutro
R15B	2,470	-Polo B - Neutro
R16A	2,6125	+Polo A - Neutro
R16B	2,6125	-Polo B - Neutro
R17A	1,6125	+Polo A - Neutro
R17B	1,6125	-Polo B - Neutro
R18A	2,2325	+Polo A - Neutro
R18B	2,2325	-Polo B - Neutro
TOTAL	19,28	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

A inclusão de cargas CA junto com as cargas CC permite uma análise abrangente do desempenho do sistema, garantindo que todas as componentes estejam operando dentro dos parâmetros estabelecidos e contribuindo para uma avaliação detalhada da capacidade do SST de gerenciar as cargas mistas.

Tabela 3 – Parâmetros adotados para as cargas CA.

Nó	Potência Aparente (kVA)	FP
R11	1,50	0,95
R15	5,20	0,95
R16	5,50	0,95
R17	3,50	0,95
R18	4,70	0,95
TOTAL	20,40	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.4. Patamares de Carga

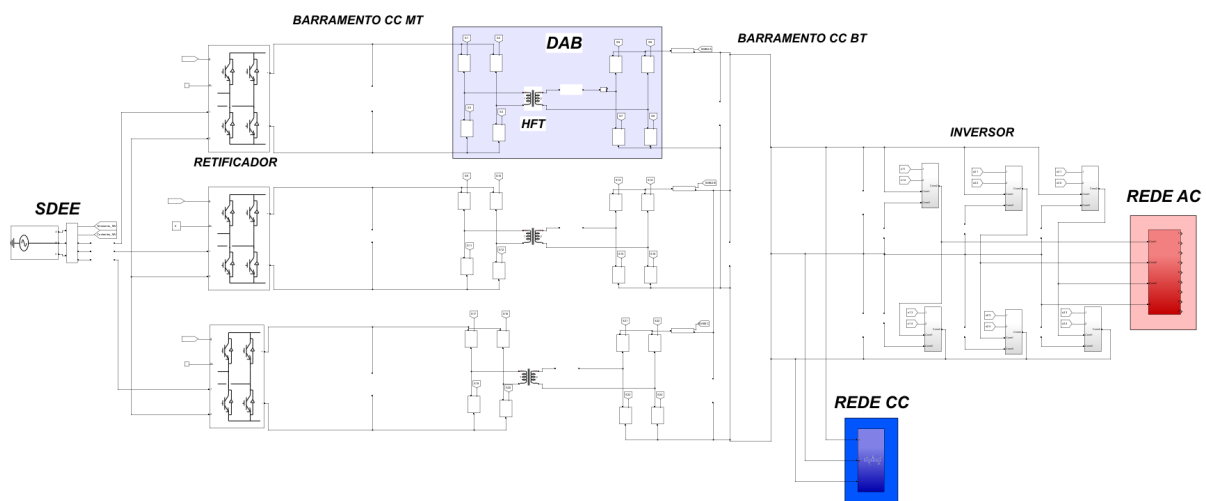
Para avaliar o desempenho da rede de distribuição híbrida sob diferentes condições de operação, foram definidos quatro patamares de carga, que correspondem a 25%, 50%, 75% e 100% da carga total prevista para as redes de CC e CA em baixa tensão. Esses patamares representam diferentes níveis de carga que a rede pode enfrentar em situações operacionais variadas, proporcionando uma análise abrangente do comportamento do sistema. Os patamares de carga foram simulados multiplicando as cargas das redes CA e CC por coeficientes que correspondem a cada um dos níveis definidos, implicando as seguintes configurações:

- **25% da carga total:** As cargas em ambas as seções foram ajustadas para 25% dos valores nominais, permitindo avaliar o desempenho da rede sob condições de baixa carga;
- **50% da carga total:** As cargas em ambas as seções foram ajustadas para 50% dos valores nominais, representando uma condição de carga intermediária;
- **75% da carga total:** As cargas em ambas as seções foram ajustadas para 75% dos valores nominais, refletindo uma carga elevada, mas não máxima;
- **100% da carga total:** As cargas foram configuradas para seus valores nominais completos, representando o cenário de carga máxima esperado para a rede.

4.2. Resultados

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir da simulação do modelo combinado das redes CA e CC, em baixa tensão, com o transformador de estado sólido, conforme pode ser observado na implementação computacional ilustrada pela Figura 14.

Figura 14 – Modelo proposto



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.1. Análise das potências

Conforme o equacionamento apresentado na seção 2.5, em conjunto com os valores simulados em diferentes pontos da rede, é possível calcular as potências de entrada e de saída das redes CA e CC, em baixa tensão. Para determinar as potências e a eficiência do sistema sob diferentes

condições de carregamento, foram realizadas simulações com diferentes patamares de carga, correspondentes a 100%, 75%, 50% e 25% da capacidade total. A Tabela 4 lista os resultados obtidos para as potências de entrada e saída nos barramentos CA e CC, além de apresentar a eficiência do sistema para cada patamar de carga.

Tabela 4 – Símula dos resultados obtidos nas simulações computacionais.

Carregamento	P_{entrada}	Barramento CC		Barramento CA		η
		$P_{\text{entrada}}^{\text{CC}}$	Somatório de Cargas	$P_{\text{entrada}}^{\text{CA}}$	Somatório de Cargas	
100%	50,0 kVA	19,5 kW	19,2 kW	21,1 kVA	20,4 kVA	81%
75%	42,3 kVA	14,8 kW	14,4 kW	16,4 kVA	15,3 kVA	74%
50%	31,3 kVA	9,7 kW	9,6 kW	11,9 kVA	10,2 kVA	69%
25%	17,9 kVA	5,1 kW	4,8 kW	6,0 kVA	5,1 kVA	62%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados obtidos ilustram que a eficiência do sistema reduz à medida que cai o nível de carregamento do sistema. Isso se deve à elevação da perdas quando o transformador opera em condições baixas de carregamento. Além disso, ao analisar os resultados de potência em CA, observa-se uma eficiência menor quando comparado à rede CC. Embora tenha sido observada essa diferença, deve-se considerar que a rede CA estava operando com uma tensão maior do que a da rede CC, o que pode ter influenciado nos resultados. Entende-se que a menor eficiência se deve ao fato de que o transformador operando com baixo carregamento, implica na redução do fator de potência (devido ao excedente em potência reativa), que por sua vez, além de não produzir trabalho, impede que o sistema forneça energia ativa, utilizada para alimentar as cargas instalada (MENDES; SILVA, R.; JÁCOME et al., 2010).

4.2.2. Análise das Tensões

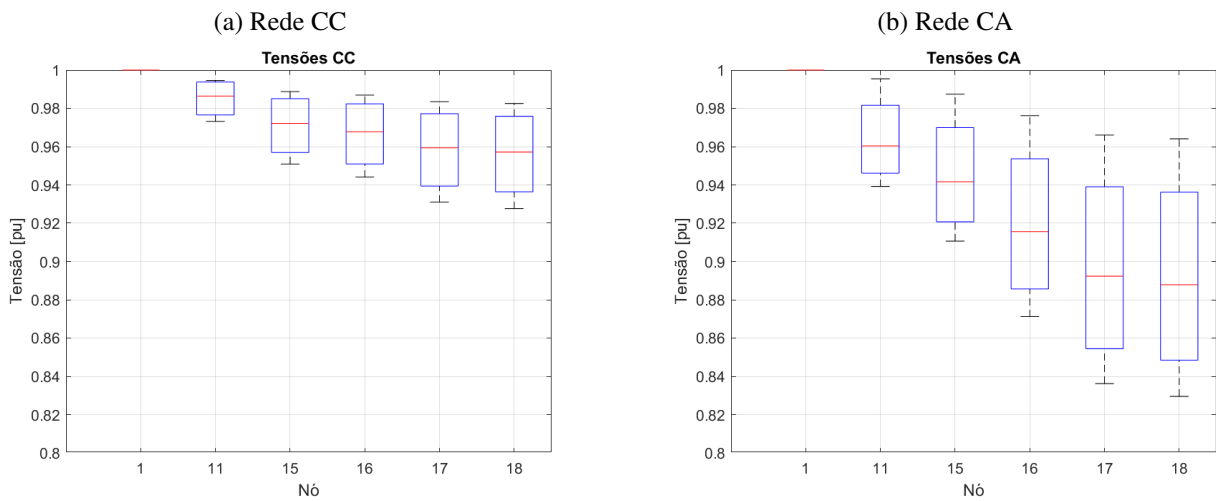
Na Figura 15 são apresentados digramas de caixa e bloco (conhecidos como *boxplot*) que ilustram as tensões (em pu) medidas em vários pontos da rede. Cada *boxplot* oferece uma representação estatística das tensões, destacando a variância, a mediana, os quartis e os possíveis *outliers*, tanto para a rede CA quanto para a rede CC. Para construção destes gráfico, foram medidas as tensões nos nós com carga, considerando os 4 patamares de carregamento propostos, o que permite visualizar o desempenho das duas redes sob os diferentes níveis de carregamento. A Figura 15 (a) evidencia que a rede CC apresenta uma menor variabilidade nas tensões, com valores mais próximos entre si, diferentemente dos resultados observados na rede CA, ilustrada pela Figura 15 (b).

4.2.3. Análise das correntes

A Figura 16 ilustra as correntes da parcela CA da rede, na condição de carga de 100%. A análise da corrente foi realizada considerando operação em regime permanente, após a estabilização da corrente, embora a figura também mostre a região transitória inicial. No regime permanente, as correntes de fase (I_a , I_b e I_c) atingem picos de aproximadamente 65 A, confirmando que o dimensionamento dos condutores está adequado para suportar as correntes na condição de carga máxima.

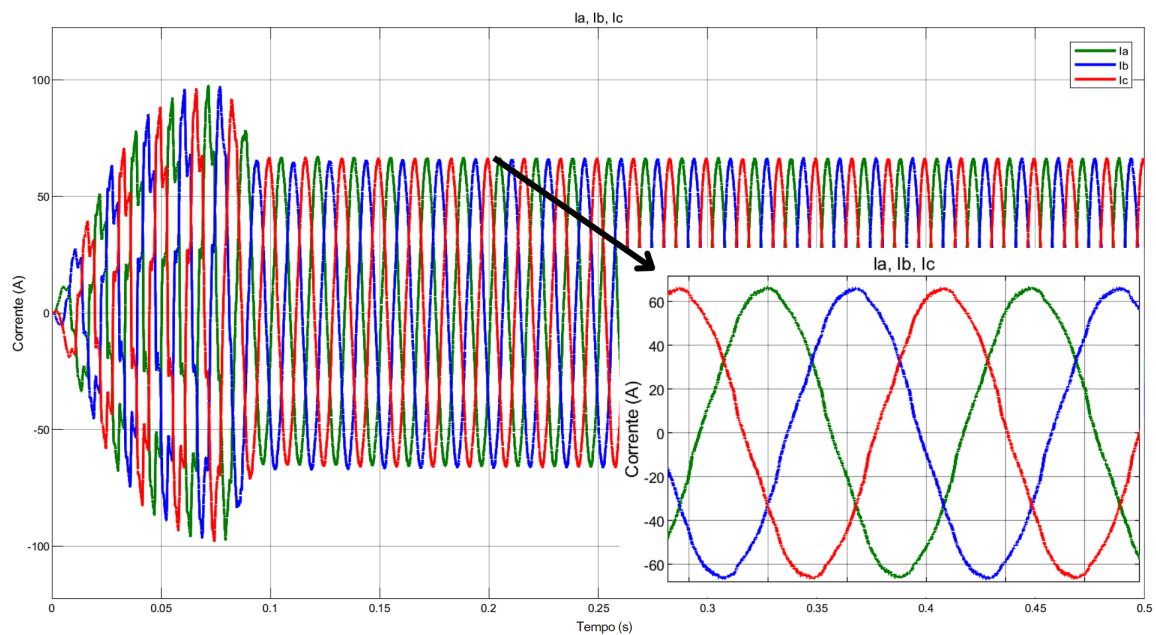
A Figura 17 ilustra as correntes de linha, que representam as correntes das cargas nos diferentes nós da rede CA. Cada gráfico Figura 17 corresponde a um ramo específico, e é possível observar a corrente de cada fase. As correntes de linha têm um padrão semelhante ao

Figura 15 – Comparação estatística entre as redes.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 16 – Correntes de fase da rede CA



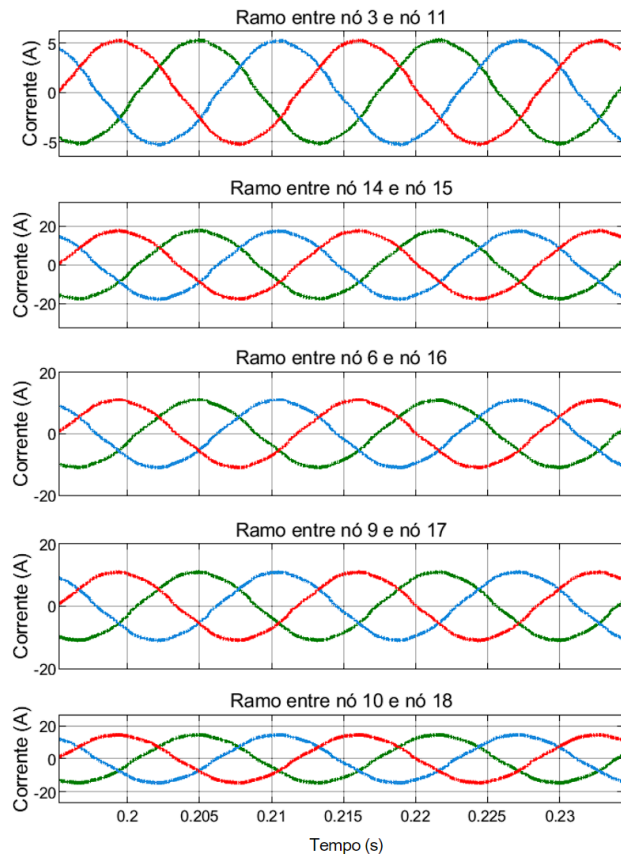
Fonte: Elaborada pelo autor.

das correntes de fase. No entanto, elas se ajustam conforme a demanda de cada carga. Percebe-se também, em evidência, que as correntes de cada fase se mantêm equilibradas, o que indica uma distribuição uniforme de carga entre as fases, comportamento que era esperado. Em cada ramo, pode-se observar que as correntes apresentam um comportamento muito próximo ao senoidal e estável no regime permanente, refletindo a capacidade da rede em fornecer a energia necessária às cargas conectadas.

A Figura 18 mostra as correntes da parcela CC da rede, na condição de carga de 100%, de maneira similar ao que foi apresentado para a parcela CA. Nesta rede CC, observa-se que as correntes A_n e B_n compartilham um neutro comum, mas têm polaridades invertidas, resultando em correntes de sinais opostos, como esperado para uma configuração bipolo.

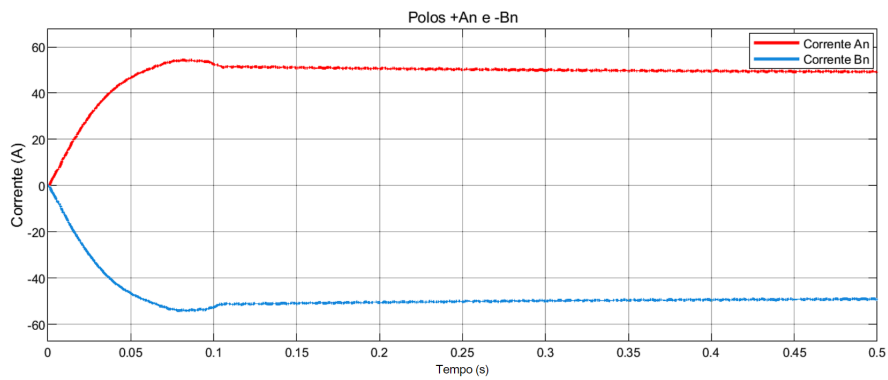
Durante a fase transitória, as correntes aumentam gradualmente até se estabilizarem no

Figura 17 – Correntes nas diferentes cargas da rede CA.



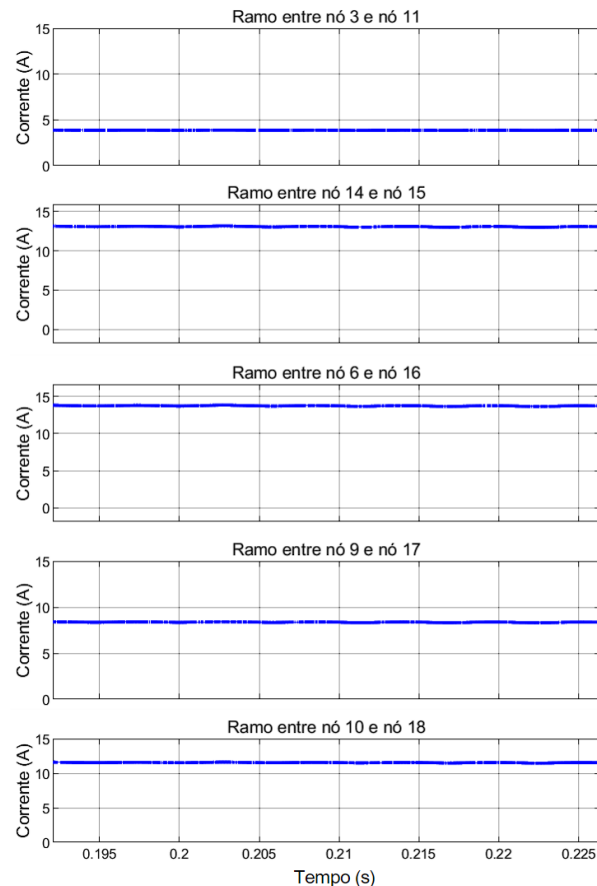
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 18 – Corrente de alimentação da CC



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 19 – Correntes nas diferentes cargas da rede CC.



Fonte: Elaborada pelo autor.

regime permanente. A partir desse ponto, ambas as correntes se comportam de maneira similar, alcançando valores estáveis. Este comportamento era esperado, dado que as cargas são equilibradas. No regime permanente, as correntes atingem aproximadamente 55 A em módulo.

Semelhante à rede CA, a Figura 19 mostra as correntes de linha em regime permanente, que representam as correntes das cargas nos diferentes ramos da rede CC. Cada gráfico na Figura 19 corresponde a um ramo específico. Embora existam dois polos alimentando a rede CC, apenas um é representado pois o comportamento da corrente de ambos é simétrico, uma vez que as cargas são equilibradas. Com isso, tem-se que para a rede CC, a análise das correntes das cargas também mostra um comportamento estável e equilibrado em regime permanente.

5. CONCLUSÃO

A adoção de uma rede híbrida como evolução das redes de distribuição atuais, diante do avanço das tecnologias e da crescente inserção de recursos energéticos distribuídos que podem operar em corrente contínua, apresenta-se como uma solução altamente promissora. Nesse contexto, é evidente a necessidade de uma evolução nos conversores de potência, que serão tecnologias-chave para viabilizar o funcionamento dessas redes.

O transformador de estado sólido se destaca como uma possível tecnologia, atuando como um elemento mediador, devido à sua ampla gama de possibilidades e controles de qualidade oferecidos, que variam conforme sua topologia e construção. O SST promove a bidirecionalidade do fluxo de energia, um aspecto crítico e indispensável para os cenários modernos de redes de distribuição. Essa capacidade de bidirecionalidade permite a integração eficiente de fontes de

geração distribuída, que têm se tornado cada vez mais predominantes no sistema elétrico.

A crescente presença da geração distribuída no sistema elétrico de potência exige que as redes sejam capazes de incorporar essas fontes de energia com a menor quantidade possível de conversores, a fim de evitar quedas excessivas na eficiência. A inclusão de barramentos CC de média e baixa tensão, juntamente com barramentos CA, viabilizados por tecnologias como o SST, possibilita a criação de redes híbridas com conexões diretas. Além disso, a capacidade de conectar diretamente barramentos CC e CA dentro de uma rede híbrida, utilizando o SST como elemento de interconexão, abre grandes possibilidades para o desenvolvimento de microrredes, permitindo uma melhor gestão da energia gerada e consumida localmente.

Em suma, a implementação de redes híbridas com o auxílio de um conversor representa um avanço significativo para o futuro das redes de distribuição de energia. Nesse estudo foi possível observar a possibilidade de funcionamento de uma rede híbrida com auxílio de uma tecnologia similar. Para trabalhos futuros, sugere-se:

- Investigar métodos para otimizar a eficiência do SST em diferentes condições de carga e com cargas desbalanceadas;
- Realizar estudos complementares, variando os modelos de rede, de carga e de conversor de potência utilizados, além de suas características construtivas;
- Utilizar um modelo de SST bidirecional para que possa ser adicionada geração distribuída e/ou armazenamento de energia à rede, possibilitando a existência de uma microrrede.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. [S.l.]: Mc Graw Hill, 2013. v. 5.
- ANEEL. **Resolução Normativa n. 1059**. Brasília: [s.n.], 2023.
- AVDEEV, B. A.; VYNGRA, A. V. The Use Of Solid-State Transformers As Part Of Smart Grids, p. 1–10, 2021. DOI: 10.1109/RPA53216.2021.9628424.
- BARSALI, S. et al. **Benchmark systems for network integration of renewable and distributed energy resources**. [S.l.: s.n.], 2014.
- BASU, K.; RAHMAN, H. Feasibility Study of Conversion of Double Circuit ac Transmission Line for Simultaneous ac-dc Power Transmission. In: 2005 International Conference on Power Electronics and Drives Systems. [S.l.: s.n.], 2005. v. 2, p. 972–976. DOI: 10.1109/PEDS.2005.1619828.
- DAHANE, A. S.; SHARMA, R. B. Hybrid AC-DC microgrid coordinated control strategies: A systematic review and future prospect. **Renewable Energy Focus**, v. 49, p. 100553, 2024. ISSN 1755-0084. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100553>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755008424000176>>.
- EGHTEDARPOUR, N.; FARJAH, E. Power Control and Management in a Hybrid AC/DC Microgrid. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 5, n. 3, p. 1494–1505, 2014. DOI: 10.1109/TSG.2013.2294275.

- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Recursos Energéticos Distribuídos - Documento de Apoio ao PNE 2050**. [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/GT%20PNE%20-%20RED%20-%20Relat%C3%B3rio%20Final.pdf>>.
- EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2034**. [S.l.: s.n.], 2024. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topico-709/Caderno_MMGD_Baterias_PDE2034_\(20240702\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topico-709/Caderno_MMGD_Baterias_PDE2034_(20240702).pdf)>.
- FALCONES, S.; MAO, X.; AYYANAR, R. Topology comparison for Solid State Transformer implementation, p. 1–8, 2010. DOI: 10.1109/PES.2010.5590086.
- GOPI, C.; KISHOR, M. Power Upgrading of Transmission Line by Injecting DC Power into AC line with the help of ZIG-ZAG Transformer. **International Journal of Engineering Research and Applications**, v. 2, p. 1042–1047, 2016.
- GRANATA, S. et al. Power Electronics Converters for the Internet of Energy: A Review. **Energies**, v. 15, p. 2604, abr. 2022. DOI: 10.3390/en15072604.
- HAMMERSTROM, D. J. AC Versus DC Distribution Systems Did We Get it Right? In: 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. [S.l.: s.n.], 2007. P. 1–5. DOI: 10.1109/PES.2007.386130.
- HART, D. W. **Power electronics**. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 2011. v. 166.
- HASSAN, S. J. U. et al. Towards medium voltage hybrid AC/DC distribution Systems: Architectural Topologies, planning and operation. **International Journal of Electrical Power Energy Systems**, v. 159, p. 110003, 2024. ISSN 0142-0615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.110003>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061524002242>>.
- JAYAWARDENA, S.; BINDUHEWA, P.; EKANAYAKE, J. Hybrid AC and DC power distribution. **Ceylon Journal of Science**, v. 46, p. 69, jun. 2017. DOI: 10.4038/cjs.v46i2.7431.
- KUMAR, D.; ZARE, F.; GHOSH, A. DC Microgrid Technology: System Architectures, AC Grid Interfaces, Grounding Schemes, Power Quality, Communication Networks, Applications, and Standardizations Aspects. **IEEE Access**, v. 5, p. 12230–12256, 2017. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2705914.
- LEMOS, F. A. B. **Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica: Seleção de Condutores - Ampacidade**. [S.l.: s.n.], mar. 2022. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Sistemas Elétricos de Automação e Energia, 68 slides.
- MATLAB. **version 24.1 (R2024a)**. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2023. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>>.
- MCMURRAY, W. Power converter circuits having a high-frequency link. **U.S Patent 3517300**, jun. 1970.
- MENDES, M.; SILVA, R.; JÁCOME, P. et al. Consequências e soluções para transformadores de distribuição operando com pequenas cargas. **Cadernos UniFOA**, v. 5, 1esp, p. 53–53, 2010.
- MOHAN, N.; RAJU, S. **Power Electronics, a First Course: Simulations and Laboratory Implementations**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2022.

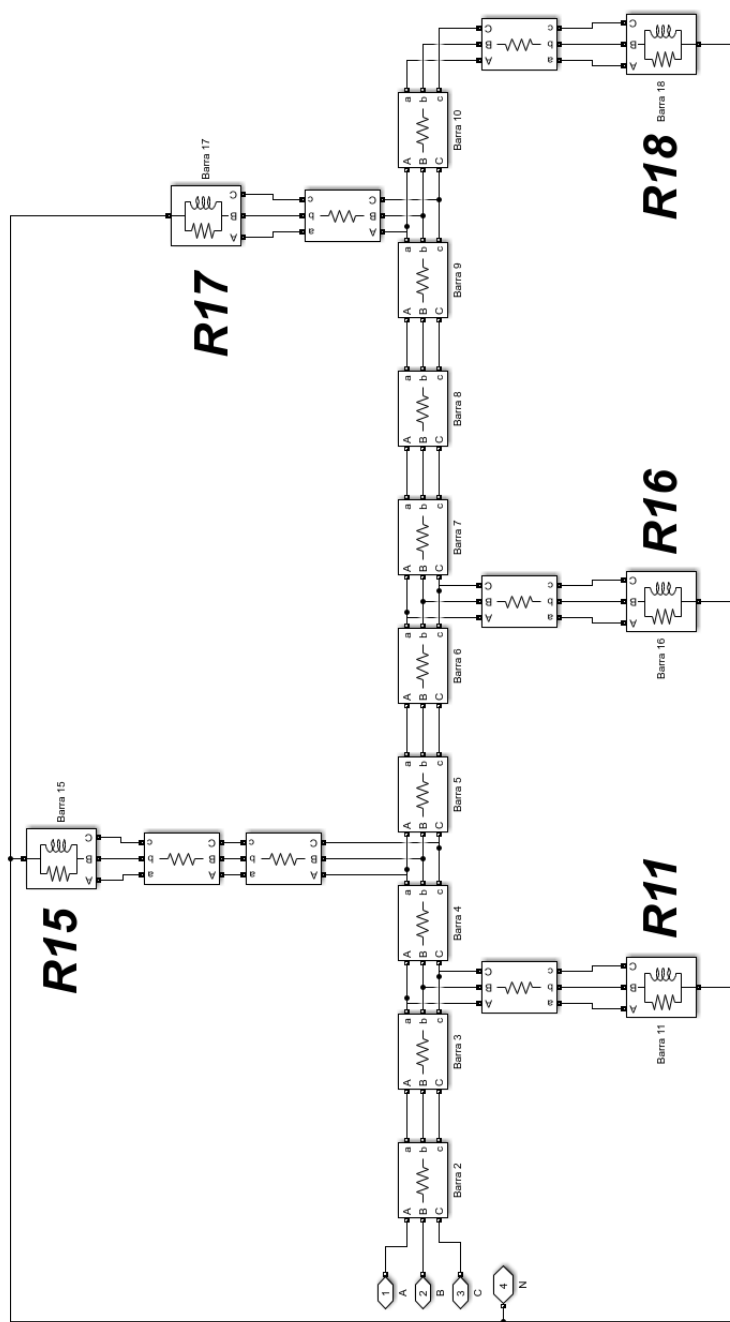
- NITOLA MARTINEZ, S. A.; VEGA VASQUEZ, S. A. **Simulación de un Transformador Trifásico de Estado Sólido de Flujo Unidireccional de Tres Etapas de 13.2 [kV] a 220 [kV]**. 2018. Diss. (Mestrado) – Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander. Disponível em: <<https://github.com/sergiovega95/SOLID-STATE-TRANSFORMER>>.
- OLIVEIRA, H. A. et al. Rede híbrida de distribuição de energia em CC e CA como solução alternativa para microrredes isoladas. Universidade Federal do Maranhão, 2017.
- ONS. **SIN em números**. [S.l.: s.n.], 2024. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>.
- PASONEN, R. **AC/DC hybrid distribution system concept**. Finland: VTT Technical Research Centre of Finland, 2014. (VTT Research Report). Project code: 85060.
- PATEL, M. R.; RATHOD, N. A.; MEHTA, B. Electrical Power Distribution Design Voltage Profile Improvement for Metro Railway Station. In: 2020 Fourth World Conference on Smart Trends in Systems, Security and Sustainability (WorldS4). [S.l.: s.n.], 2020. P. 473–477. DOI: 10.1109/WorldS450073.2020.9210395.
- RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência: Dispositivos, circuitos e aplicações**. [S.l.]: Pearson Education, 2017. v. 4.
- REHMAN, A. et al. Comprehensive Review of Solid State Transformers in the Distribution System: From High Voltage Power Components to the Field Application. **Symmetry**, v. 14, n. 10, 2022. ISSN 2073-8994. DOI: 10.3390/sym14102027. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-8994/14/10/2027>>.
- SHE, X. et al. On Integration of Solid-State Transformer With Zonal DC Microgrid. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 3, n. 2, p. 975–985, 2012. DOI: 10.1109/TSG.2012.2187317.
- SILVA, L. N. da et al. Low-Voltage ac and Low-Voltage dc Distribution Systems: An Assessment of Losses and Power Capacity considering the Penetration of Renewable Energy Sources. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 30, n. 2, p. 51–62, 2024. DOI: 10.1109/MIAS.2023.3325033.
- SIMULATION; DESIGN, M.-B. **version 24.1 (R2024a)**. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2023. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/simulink.html>>.
- SINGH, R.; GAWRE, S. K.; DYANAMINA, G. Review and Analysis of DC-DC Power Converter Performance for Fast Charging of EVs. In: 2021 IEEE 2nd International Conference On Electrical Power and Energy Systems (ICEPES). [S.l.: s.n.], 2021. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICEPES52894.2021.9699502.
- UZUM, B. et al. Rooftop solar pv penetration impacts on distribution network and further growth factors—a comprehensive review. **Electronics**, MDPI, v. 10, n. 1, p. 55, 2020.
- VARGAS, T. et al. Estudo da Controlabilidade do Conversor Dual-Active Bridge em Estruturas de Conversores em Cascata. **Eletrônica de Potência**, v. 24, n. 1, p. 18–26, mar. 2019. DOI: 10.18618/REP.2019.1.0012. Disponível em: <<https://journal.sobraep.org.br/index.php/rep/article/view/31>>.
- WIRE, P. K.; TBK, C. **Datasheet: NA2XY SNI IEC**. Rev. 0.0. 2014. Disponível em: <https://kabel.co.id/wp-content/uploads/2017/09/NA2XY_SNI_IEC.pdf>.

- YU, X. et al. Power Management for DC Microgrid Enabled by Solid-State Transformer. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 5, n. 2, p. 954–965, 2014. DOI: 10.1109/TSG.2013.2277977.
- ZAFAR, R. et al. Prosumer based energy management and sharing in smart grid. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 82, p. 1675–1684, 2018.
- ZHANG, W. et al. Review of DC technology in future smart distribution grid. In: **IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies**. [S.l.: s.n.], 2012. P. 1–4. DOI: 10.1109/ISGT-Asia.2012.6303248.

APÊNDICE

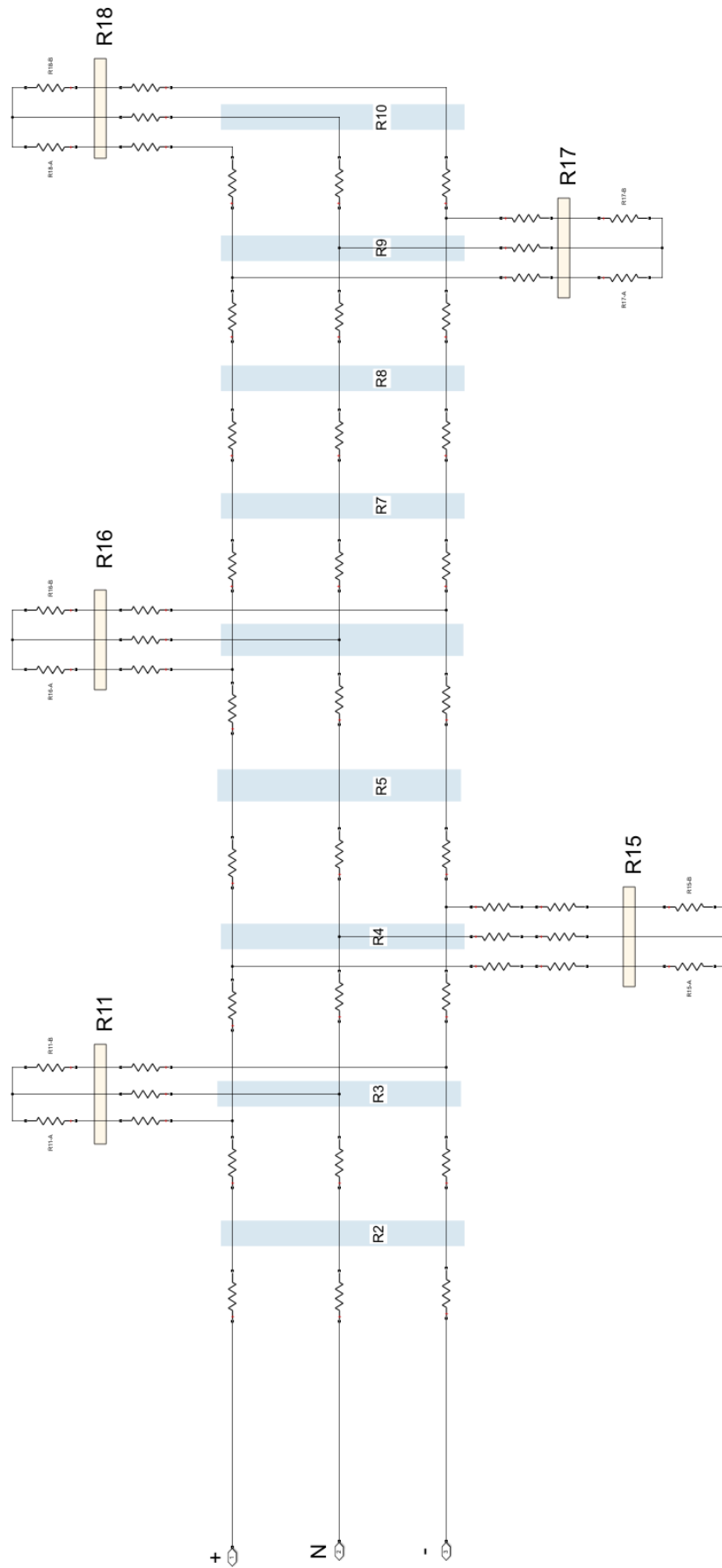
As Figuras A.1 e A.2 apresentam as redes CA e CC respectivamente, modeladas na interface do *software* Simulink[®].

Figura A.1 – Modelagem da rede CA



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura A.2 – Modelagem da rede CC



Fonte: Elaborada pelo autor.