

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALISSON EITI ONAKA

201700070174

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE CORRENTE CONTÍNUA EM INSTALAÇÕES
RESIDENCIAIS E COMERCIAIS EM BAIXA TENSÃO**

CURITIBA

2022

ALISSON EITI ONAKA

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE CORRENTE CONTÍNUA EM INSTALAÇÕES
RESIDENCIAIS E COMERCIAIS EM BAIXA TENSÃO**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista, Curso de Especialização em Eficiência Energética e Geração Distribuída, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Mateus Duarte Teixeira

CURITIBA

2022



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

SETOR DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA -
40001016317E1

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Monografia de Especialização de ALISSON EITI ONAKA intitulada: ESTUDO DA APLICAÇÃO E VIABILIDADE ECONÔMICA DE REDES CC PARA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA EM BAIXA TENSÃO, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de especialista está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 4 de março de 2022.


Mateus Duarte Teixeira
Presidente da Banca Examinadora
Prof. Dr. MATEUS DUARTE TEIXEIRA
Docente do Departamento de Eng. Elétrica
Matrícula UFPR 203334


James Alexandre Baraniuk
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)
Prof. Dr. JAMES ALEXANDRE BARANIUK
Docente do Depto. de Eng. Elétrica
Matrícula UFPR 202140

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Professor Mateus por toda a paciência e orientação.

A minha família e amigos por entender minhas ausências e por todo incentivo.

Aos professores por todo conhecimento transmitido e juntamente aos demais colegas por todas as discussões durante as aulas.

RESUMO

A rede convencional de distribuição de energia em corrente alternada (CA) está entrando novamente em conflito com as redes em corrente contínua (CC), uma vez que muitas fontes geradoras são CC, como a solar fotovoltaica. Já existem redes completamente CC como data centers, universidade e até navios. Dessa forma pode existir uma redução na utilização de fontes conversoras e aumentar a eficiência do sistema. Neste trabalho, foi realizado uma avaliação tecnológica e econômica sobre a aplicação de sistemas CC para alimentação de cargas residenciais, para tanto foram propostos requisitos para um circuito de distribuição de baixa tensão em CC residencial e foi desenvolvido um estudo estimativo do consumo energético das redes CC e CA. Tal estudo resultou uma estimativa de consumo de aproximadamente 9% com a troca de conversores, o que representa uma economia próxima de R\$480 mensais.

Palavras-chave: Microrredes CC; Eficiência Energética

ABSTRACT

The conventional alternating current (AC) power distribution network is again coming into conflict with direct current (DC) networks, since many generating sources are DC, such as solar photovoltaic. There are already fully CC networks such as data centers, universities and even ships. In this way, there can be a reduction in the use of converting sources and increase the efficiency of the system. In this work, a technological and economic evaluation was carried out on the application of DC systems to supply residential loads. DC and AC networks. This study resulted in an estimated consumption of approximately 9% with the exchange of converters, which represents a savings close to R\$480 per month.

Keywords: DC Microgrids; Energy Efficiency

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participações das fontes de energia: (a) na participação de cada fonte na geração distribuída e (b) na participação da energia solar comparada com as outras fontes.....	14
Figura 2 - Configuração típica das unidades GD com rede baixa tensão CA.....	18
Figura 3 - Configuração típica das unidades DG com rede baixa tensão CC.....	19
Figura 4 - Geração Distribuída para constituição de Microrredes.....	20
Figura 5 - Perdas encontradas CA 220 e CC (48, 220, 380 V)	22
Figura 6 - Linha de base para definir um valor ótimo considerando eficiência energética e econômica.....	23
Figura 7 - Fluxograma para determinação da corrente CC.....	34
Figura 8 - Sistema com estrutura radial.....	37
Figura 9 - Sistema com estrutura anel.....	38
Figura 10 - Esquemas de aterramento: (a) Esquema TN-S, (b) Esquema TN-C-S, (c) Esquema TN-C, (d) Esquema TT e (e) Esquema IT.....	43
Figura 11 – Taxa de eficiência de inversores fotovoltaicos CC.....	48
Figura 12 – Tarifa grupo B1 residencial, COPEL.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Eficiência dos conversores CA/CC, CC/CC, CC/CA para diferentes potências.....	25
Tabela 2 – Eficiência de conversão.....	25
Tabela 3 – Efeitos provocados pela passagem da corrente elétrica no corpo humano.....	45
Tabela 4 – Taxa de eficiência dos conversores.....	48
Tabela 5 – Comparação dos consumos CA e CC e economia gerada diariamente, mensalmente, anualmente e para estimativa de 6 anos (kWh).....	52
Tabela 6 – Comparação dos consumos CA e CC e economia gerada diariamente, mensalmente, anualmente e para estimativa de 6 anos em R\$.....	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparação da eficiência energética em um prédio comercial.....	23
Quadro 2 – Eixos de pesquisa e palavras-chave.....	27
Quadro 3 – Artigos Seleccionados para o Portfólio.....	28
Quadro 4 – Níveis de tensão CC encontrados na literatura científica.....	36
Quadro 5 – Nomenclatura para classificação dos esquemas de aterramento.....	42
Quadro 6 – Simbologia utilizada nos sistemas de aterramento.....	43
Quadro 7 – Potência dos equipamentos presentes na residência por cômodo.....	47
Quadro 8 – Consumo dos equipamentos em CA.....	49
Quadro 9 – Consumo dos equipamentos em CC.....	50
Quadro 10 – Comparação de consumo dos equipamentos em CA e CC.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético Nacional
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Contínua
CIGRE	Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos
CC	Corrente Alternada
COPEL	Companhia Paranaense de Energia Elétrica
GD	Geração Distribuída
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
MVDC	Medium voltage direct current
NBR	Norma Brasileira

SUMÁRIO

1	<u>INTRODUÇÃO</u>	13
1.1	<u>CONTEXTO</u>	13
1.2	<u>OBJETIVOS</u>	14
1.2.1	<u>Objetivo Geral</u>	14
1.2.2	<u>Objetivos Específicos</u>	15
1.3	<u>JUSTIFICATIVA DA PESQUISA</u>	15
1.4	<u>ESTRUTURA DO TRABALHO</u>	16
2	<u>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</u>	17
2.1	<u>REDE DE DISTRIBUIÇÃO E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA</u>	17
2.1.1	<u>GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM REDES CA</u>	18
2.1.2	<u>GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM REDES CC</u>	19
2.1.3	<u>MICRORREDES</u>	20
2.2	<u>EFICIÊNCIA ENERGÉTICA</u>	22
2.3	<u>PERDAS EM FONTES CA/CC</u>	24
2.4	<u>CONSIDERAÇÕES FINAIS</u>	26
3	<u>REVISÃO DA LITERATURA</u>	27
3.1	<u>PORTIFÓLIO BIBLIOGRÁFICO</u>	27
3.2	<u>ANÁLISE DA LITERATURA</u>	29
3.3	<u>CONSIDERAÇÕES FINAIS</u>	33
4	<u>ESTUDO E PROPOSTA DE PARAMETROS E CONFIGURAÇÃO DE REDE DE CORRENTE CONTÍNUA RESIDENCIAL</u>	34
4.1	<u>ESPECIFICAÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÃO CC</u>	34
4.1.1	<u>Visão Geral Global dos Níveis de Tensão CA</u>	35
4.1.2	<u>Restrições de Seleção de Nível de Tensão CC</u>	35
4.1.3	<u>Geração Fotovoltaica: Conexão CC</u>	35
4.1.4	<u>Resumo das Tensões</u>	36

<u>4.2</u>	<u>ESTRUTURA E CONFIGURAÇÃO</u>	37
<u>4.2.1</u>	<u>Estrutura Básica</u>	37
<u>4.2.2</u>	<u>Configuração para Polaridade de Tensão</u>	38
<u>4.3</u>	<u>PERDAS DE LINHA</u>	38
<u>4.4</u>	<u>CURTO-CIRCUITOS</u>	39
<u>4.4.1</u>	<u>Características de Falhas CC</u>	39
<u>4.5</u>	<u>DC BREAKER</u>	40
<u>4.6</u>	<u>CONFIGURAÇÃO DE PROTEÇÃO</u>	41
<u>4.6.1</u>	<u>Requisitos de Operação</u>	41
<u>4.6.2</u>	<u>Dispositivos de Proteção</u>	41
<u>4.7</u>	<u>SISTEMA DE ATERRAMENTO</u>	42
<u>4.8</u>	<u>PROBLEMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA ELETRICA</u>	44
<u>4.9</u>	<u>SEGURANÇA SISTEMAS CC</u>	44
<u>4.10</u>	<u>BARREIRAS À IMPLEMENTAÇÃO DE REDES E MICRORREDES CC DE DISTRIBUIÇÃO E INICIATIVAS PÚBLICAS</u>	45
<u>4.11</u>	<u>RESUMO E ESPECIFICAÇÃO FINAL DO SISTEMA</u>	46
<u>5</u>	<u>ESTIMATIVA DE REDUÇÃO DE CONSUMO PELA ADOÇÃO DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO CC</u>	47
<u>6</u>	<u>CONSIDERAÇÕES FINAIS</u>	54
<u>7</u>	<u>REFERÊNCIAS</u>	55

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

O conceito de sustentabilidade relaciona questões econômicas, sociais e ambientais visando a redução dos impactos causados pelo homem no mundo. A eficiência energética, que pode ser um desdobramento da sustentabilidade, consiste em gerar uma mesma quantidade (ou superior) de energia utilizando menos recursos naturais, ou obter um mesmo trabalho com uso de menos energia (EPE, 2021). Tal conceito de sustentabilidade passa pelo objetivo contemporâneo de criar edifícios “zeronet-energy” (Zeb), que são edifícios que geram energia suficiente no local para igualar a energia que eles usam, criando assim um equilíbrio.

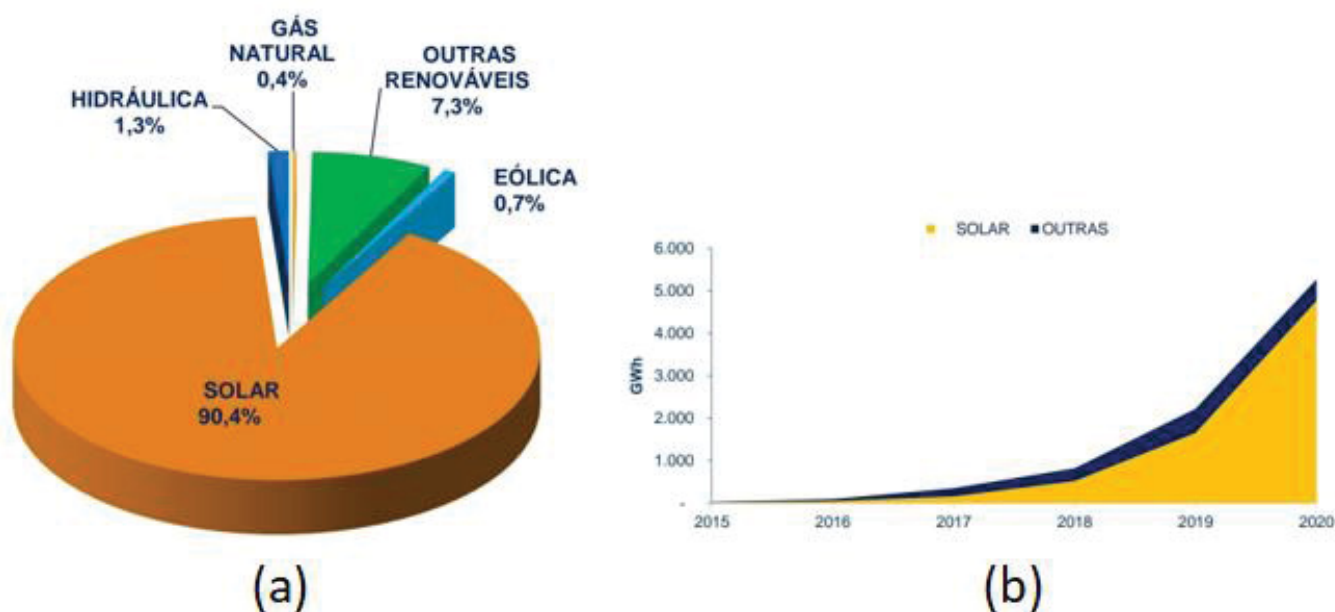
Por outro lado, a discussão referente ao uso de Corrente Contínua (CC) ou Corrente Alternada (CA) vem desde a famosa batalha das correntes protagonizada por Thomas Edison e George Westinghouse/Nicola Tesla, e em um primeiro momento houve a prevalência da CA, devido, principalmente, ao uso de transformadores de energia, em que foi possível reduzir as perdas elétricas na distribuição/transmissão com a elevação da tensão e consequente redução da corrente entre a fonte e a carga. (AlLee e Tschudi, 2012)

Entretanto, segundo PATTERSON (2012), com a diversificação do sistema convencional de geração de energia (termelétricas e hidrelétricas), como consequência do uso significativo de fontes renováveis (geração distribuída), tanto pelas concessionárias de energia quanto pelos consumidores (que estão visando a redução dos gastos com este insumo), principalmente pelo uso de energia fotovoltaica, tem-se verificado um maior interesse pela utilização de redes CC. Pode ser verificado um crescente interesse (PATTERSON, 2012) pelas microrredes CC que podem ajudar no melhor uso da energia gerada, armazenada e usada nas casas e edifício.

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) (2021), a geração solar atingiu 10,7 TWh em 2020, avanço de 61,5% em relação ao ano anterior. Em relação apenas a micro e minigeração distribuída em 2020 a geração total foi de 5.269 GWh enquanto em 2019 foi de 2.226 GWh, o que representa um aumento de 137% em comparação entre os anos. A Figura 1 apresenta um gráfico com a participação de cada fonte na geração distribuída em 2020. Destaque para a fonte solar fotovoltaica,

com 4.764GWh de geração, o que representa 90,4% da micro e minigeração distribuída. (BEN, 2021)

Figura 1 – Participações das fontes de energia: (a) na participação de cada fonte na geração distribuída e (b) na participação da energia solar comparada com as outras fontes.



Fonte: Adaptado de BEN, 2021.

Neste contexto, aproveitando o crescimento da energia fotovoltaica residencial no Brasil, o intuito desse trabalho de conclusão de curso de especialização é propor uma configuração mínima em baixa tensão em CC para uso residencial, bem como, realizar cálculos que permitam estimar o ganho ou perda em eficiência energética com a utilização deste tipo de rede.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal é realizar uma avaliação técnica/tecnológica e econômica sobre a aplicação de sistemas CC para alimentação de cargas residenciais e comerciais.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Realizar levantamento bibliográfico acerca do tema da distribuição CC em baixa tensão;
- b) Propor os principais requisitos para um circuito de distribuição de BT em Corrente Contínua residencial;
- c) Desenvolver um estudo econômico sobre os principais custos envolvidos na conversão de energia CC/CA, CA/CC e CC/CC e adaptação de cargas para microrredes CC;
- d) Desenvolver estudo estimativo do consumo energético de redes CC e CA de baixa tensão.

1.3 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Estudos e pesquisas relacionados ao uso de redes CC estão cada vez mais presentes na literatura científica. Já existe, por exemplo, data centers, universidades, navios, entre outros, que utilizam redes inteiramente CC. Segundo Allee e Tschudi (2012) a Universidade da Califórnia, San Diego, California, e segundo Reed et. al. (2012) existem grandes navios, nos quais a base da arquitetura elétrica consiste na utilização de rede CC.

Com a adoção da geração fotovoltaica, que gera energia em CC, abre-se uma grande possibilidade de estudo e aplicação de redes CC, onde não seja necessária a adoção de sistemas de conversão de energia elétrica CC/CA CA/CC. Todavia a viabilidade técnica e financeira ainda carece de maiores estudos.

Uma vez que, muitos equipamentos (cargas) fazem utilização da energia elétrica em CC utilizando uma fonte CA/CC para a conversão. Como convencionalmente são utilizados dois equipamentos um conversor CC/CA e posteriormente conversor CA/CC teria um gasto energético menor com apenas um equipamento para realizar a conversão, empregado para adequar o nível de tensão do circuito a ser alimentado.

Dessa forma, a redução do uso de fontes conversoras (fontes chaveadas, por exemplo) de energia pode trazer eficiência para o sistema reduzindo também os custos com equipamentos e espaço imobiliário.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado para atender a seguinte ordem de capítulos:

- Capítulo 1: Introdução.
- Capítulo 2: Fundamentação teórica
- Capítulo 3: Revisão da Literatura.
- Capítulo 4: Especificação da Rede CC Residencial
- Capítulo 5: Estimativa de Redução de Consumo pela Adoção de uma Rede de Distribuição CC.
- Capítulo 6: Considerações Finais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 REDE DE DISTRIBUIÇÃO E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A rede de distribuição de energia elétrica é a etapa final do sistema de transmissão de energia elétrica, a etapa que realiza a fornecimento da energia elétrica aos consumidores, tendo início numa subestação ou num posto de transformação, distribuição primária (em média) e secundária (em baixa), respectivamente.

A distribuição de energia elétrica é caracterizada como o setor elétrico dedicado à entrega de energia elétrica para um consumidor final (ANEEL, 2021). A distribuição, semelhante a rede de transmissão de energia, é o processo de conduzir a energia entre dois pontos, composta por condutores, transformadores e equipamentos de medição, controle e proteção das redes elétricas (ABRADEE, 2021).

As unidades de geração distribuída (GD) podem ser usadas como sistemas autônomos, onde as unidades GD são normalmente operadas por indivíduos para servir pequenos consumidores, bairro residencial, comunidade acadêmica ou pública, local industrial ou até região municipal. As concessionárias usam unidades GD para ajudar a melhorar a estabilidade e qualidade do sistema, otimizar o sistema de distribuição e reduzir os custos de transmissão e distribuição. Na maioria dos casos, as unidades GD produzem energia CA ou CC incompatível, a magnitude da tensão, a frequência e o ângulo de fase usuais da rede. (JUSTO, 2013)

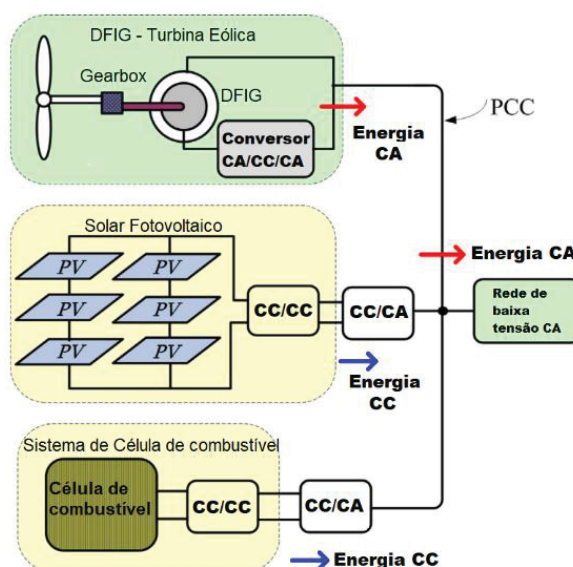
As unidades de GD baseadas em fontes de energia renováveis são geralmente mais sustentáveis. Energia proveniente de fontes fotovoltaicas solares, eólicas, pequenas centrais hidroelétricas (PCH), maremotriz, biomassa e biogás são exemplos de unidades de GD baseadas em fontes de energia renováveis. Essas unidades GD podem ser agregadas para fornecer tensão de entrada CC para o inversor CC / CA para conexão à rede ou estrategicamente conectadas aos sistemas de distribuição de baixa tensão, dependendo de sua saída de energia para formar estruturas de microrrede. Alternativamente, o conceito de microrrede permite uma alta penetração de várias unidades de GD e sistemas de armazenamento de energia sem a necessidade de reestruturação do próprio sistema de distribuição. (JUSTO, 2013)

2.1.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM REDES CA

A rede de distribuição CA é a etapa final no fornecimento de energia elétrica conforme já dito anteriormente, porém especificamente com corrente alternada. A partir da etapa de transmissão de energia, através de transformadores de energia da subestação que irá abastecer o consumidor final e outros distribuídos no sistema de distribuição, a energia é adequada ao nível de tensão contratado pelo consumidor.

Todas as unidades GD com saída de energia CA são diretamente conectadas a um barramento CA e, em seguida, ao sistema principal por meio de conversores de energia para seu acoplamento estável. Exemplos de unidades DG que produzem a potência de saída CA incluem turbinas eólicas, PCHs, biogás, turbinas de maremotrizes. Geralmente, eles são conectados diretamente ou podem precisar dos conversores de energia CA / CC / CA para permitir seu acoplamento estável com as redes CA. Nesse caso, a rede CA pode ser conectada com o sistema por meio de um transformador de energia. Por outro lado, as unidades DG que produzem saída de energia CC (por exemplo, fontes solares fotovoltaicas, células de combustível e dispositivos de armazenamento de energia) podem ser conectadas à linha de barramento da rede CA usando inversores CC/CA. A Figura 2, abaixo, indica a configuração típica das unidades GD com a saída de energia CA e com a saída de energia CC conectada à rede de baixa tensão CA.

Figura 2 - Configuração típica das unidades GD com rede baixa tensão CA.



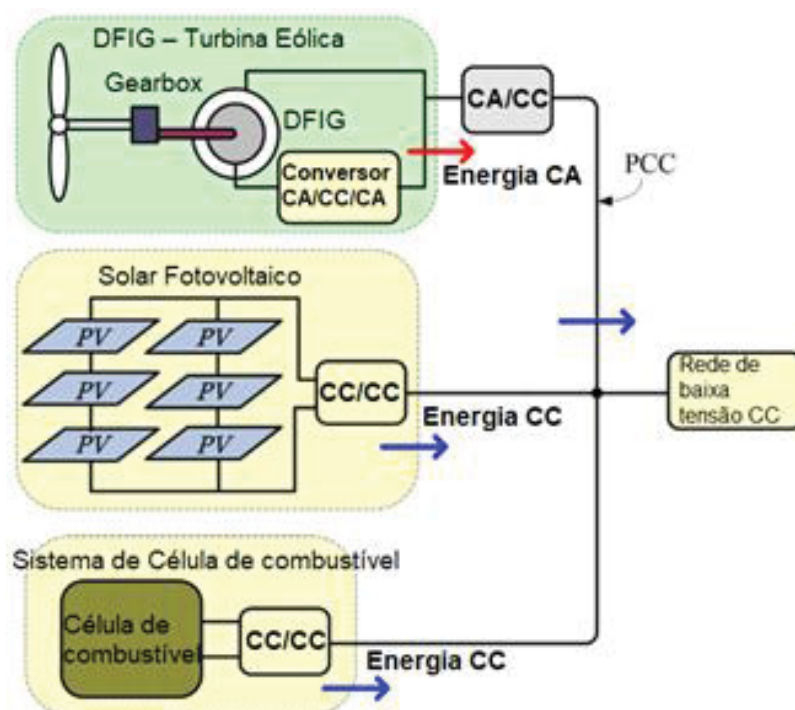
Fonte: Adaptado de JUSTO, 2013

2.1.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM REDES CC

A rede de distribuição CC é a etapa final no fornecimento de energia elétrica conforme já dito anteriormente, porém especificamente com corrente contínua. Para atender este requisito, a energia proveniente da rede de transmissão necessita de um conversor de energia CA/CC para sua conexão à rede CC de baixa tensão.

As unidades GD baseadas em CC e os dispositivos de armazenamento de energia produzem a energia CC que seria facilmente conectada a um barramento CC. Um dispositivo de armazenamento de energia também pode ser carregado/descarregado com a rede de baixa tensão CC e as cargas (cargas CA e CC) podem ser conectadas. Nesse caso, as unidades geradoras de energia CA precisam de um conversor de energia CA/CC para sua conexão à rede de baixa CC. A Figura 3 representa a rede de baixa CC com unidades GD conectadas a ela por meio do barramento comum na barra 'PCC'. Para este fim, a conexão das unidades GD baseadas em CA requer uso de inversores, enquanto as unidades GD baseadas em CC são conectadas diretamente, conforme indicado na Figura 3.

Figura 3 - Configuração típica das unidades DG com rede baixa tensão DC.



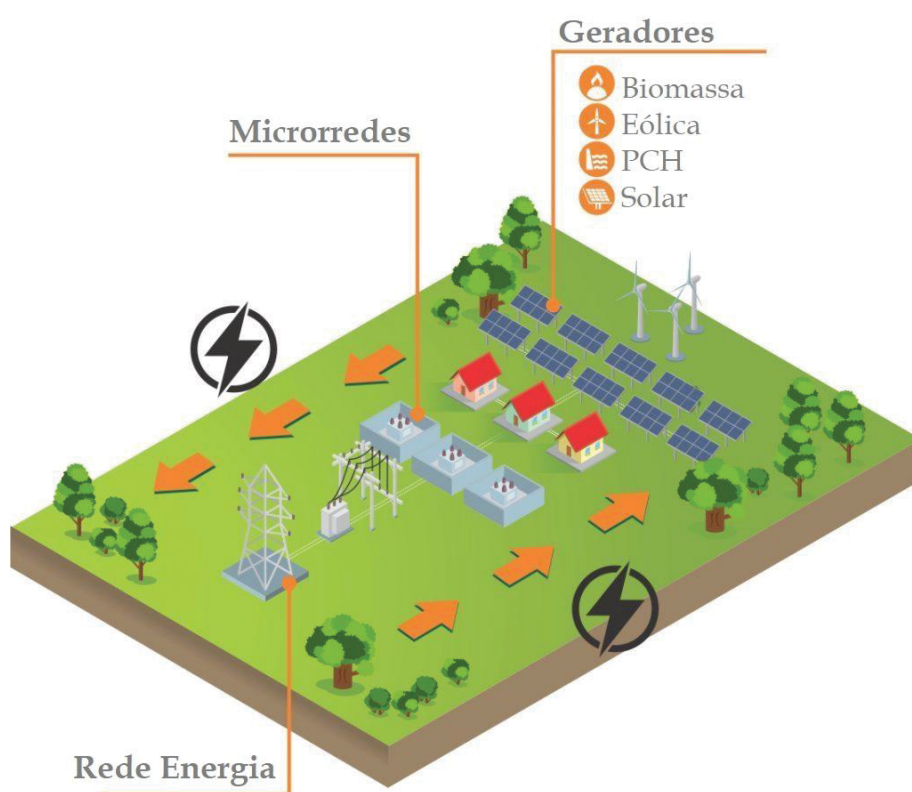
Fonte: Adaptado de JUSTO, 2013

2.1.3 MICRORREDES

As microrredes estão surgindo como um recurso integral dos sistemas de energia do futuro moldados pelas várias iniciativas de redes inteligentes. Uma microrrede é formada pela integração de cargas, geração distribuída e dispositivos de armazenamento de energia. As microrredes podem operar em paralelo com a rede, como uma ilha de energia autônoma ou em transição entre o modo conectado à rede e o modo de operação isolado.

Segundo a Companhia Paranaense de Energia Elétrica (COPEL, 2021) microrredes podem ser classificadas como sistemas elétricos independentes que se configuram como uma espécie de “ilha energética”, onde a geração, o armazenamento e o consumo podem trabalhar conectados à rede de distribuição, conforme a Figura 4.

Figura 4 - Geração Distribuída para constituição de Microrredes.



Fonte: Adaptado de COPEL (2021)

De uma maneira mais ampla, as microrredes são pequenos sistemas de energia que incorporam vários componentes, como cargas controladas e não

controladas, unidades de GD e dispositivos de armazenamento operando juntos de forma coordenada com dispositivos eletrônicos de energia controlada (controladores de fluxo de energia ativa e reativa, reguladores de frequência e tensão) que são integrados com dispositivos de proteção (IEEE PES, 2012).

As microrredes podem ser operadas de modo conectado à rede ou de modo ilhado. Quando ligados ao sistema da rede elétrica (ou seja, conectado à rede), é conhecido como “modo *on-grid*”. Neste modo, a microrrede é geralmente conectada à média tensão, por exemplo, 11-66 kV ou baixa tensão, por exemplo Redes de 110–690 V dependendo da localização e das capacidades totais das unidades GD instaladas. (ALABOUBY, 2012)

Na ocorrência da falha, ou desligamento para manutenção, a microrrede é desconectada da rede elétrica o mais rápido possível e pega suas cargas locais. Neste caso, a microrrede está no modo de ilhamento também conhecido como “modo *off-grid*” e opera de forma autônoma de forma semelhante às ilhas físicas quando desconectadas da rede principal. As cargas menos importantes podem ser eliminadas se a capacidade de energia da microrrede for insuficiente para suportar todas as suas cargas locais (NIKONOWICZ, 2012).

Uma microrrede pode ser uma opção atraente para aproveitar os benefícios oferecidos pela geração distribuída, eliminando as restrições de alta penetração. Assim, benefícios ambientais substanciais podem ser obtidos por meio da utilização de recursos de geração com eficiência energética e da integração de recursos de energia renovável. Além disso, as microrredes poderiam reduzir as perdas de rede, adiar os altos custos de investimento necessários para atualizações de rede e também reduzir os requisitos de reserva de geração central. Os GDs fornecem suporte de tensão local e a microrrede como um todo aumenta a confiabilidade geral do sistema

Os benefícios significativos associados às microrredes levaram a grandes esforços para expandir a penetração nos sistemas de energia elétrica. Embora sua implantação esteja crescendo rapidamente, ainda existem muitos desafios para projetar, controlar e operar microrredes de modo eficiente quando conectadas à rede e também de modo ilhado, onde atividades de pesquisa extensivas estão em andamento para resolver esses problemas.

2.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

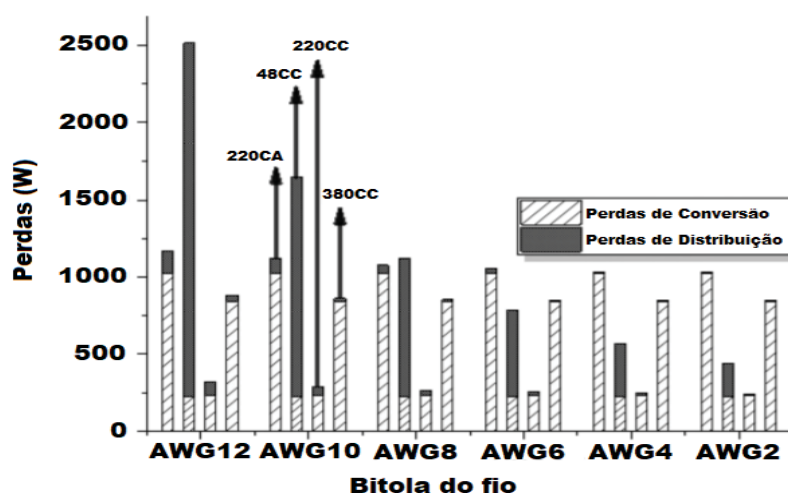
A eficiência energética pode ser entendida como gerar uma quantidade de energia com utilização de menos recursos naturais ou "realizar trabalho" com menos energia. Ao substituir uma lâmpada incandescente, por uma lâmpada de LED, por exemplo, promove-se uma ação de eficiência energética, pois as lâmpadas de LED consomem até 90% menos que as incandescentes. (EPE, 2021).

Para realizar um projeto de eficiência energética deve-se avaliar o sistema energético da unidade consumidora, definir ações, visando a redução de custos com consumo de insumos energéticos e apresentar sugestões de viabilidade técnico-econômica de implantação, incluindo troca de equipamentos e materiais energético como também as implantações de soluções propriamente ditas para atender os requisitos necessários para o projeto. (ABESCO, 2021)

A eficiência energética é a relação entre os serviços de energia e a entrada de energia. Constitui em aproveitar o máximo da energia que é "comprada". Substituição de equipamentos antigos são substituídos por equipamentos modernos mais eficientes. (HERRING, 2006)

Siraj et al (2020) analisa o impacto de várias tensões nas perdas do sistema residencial, incorporando tanto as perdas de distribuição quanto as perdas de conversão eletrônica de potência. A eficiência do sistema, para uma casa típica CC em 48 V, 220 V e 380 V e comparada com a convencional CA de 220 V, mostram que, para uma casa integrada solar de médio porte, o sistema tende a ser mais eficiente conforme aumenta o diâmetro dos cabos utilizados, conforme a Figura 5.

Figura 5 - Perdas encontradas CA 220 e CC (48, 220, 380 V)



Fonte: Adaptado de Siraj (2020).

Liu e Li (2014) pesquisaram a eficiência energética de sistemas de distribuição CC. Analisando a eficiências de CA/CC, CC/CC e CC/CA, comparando as eficiências energéticas de um sistema CA e dois sistemas CC, monopolar e bipolar. Por fim, foi mostrado que a eficiência energética é maior no sistema de distribuição CC do que no sistema de distribuição CA. No quadro abaixo pode-se observar a comparação de eficiência CA e CC.

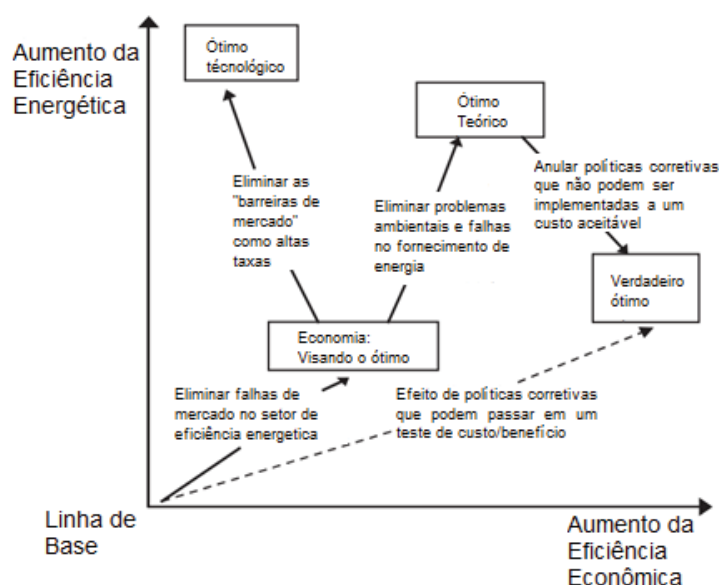
Quadro 1 - Comparação da eficiência energética em um prédio comercial

Cargas	Potência consumida (kWh/d)	Perdas CA (kwh/d)	Perdas CC (kwh/d)	Eficiência CA (%)	Eficiência CC (%)
Ar-condicionado	1800	589,27	255,39	75,34	87,57
Lâmp. Fluorescente	148,8	0	41,24	100	78,3
Lâmp. LED	171	84,03	19	67,05	90
Notebook	642	343,87	87,55	65,12	88
Dispositivos TI	366	259,18	109,44	58,54	76,98
Total	3127,8	1276,35	512,61	71,02	85,92

Fonte: Adaptado de Liu e Li (2014)

As questões de eficiência econômica e energética, estão diretamente ligados. Apesar de estarem ligadas essas questões devem ser tratadas separadamente. Pode-se ganhar mais economicamente, porém perder em questão energética. E vice-versa. Deve-se chegar em um valor ótimo levando em contas as duas questões, como pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 - Linha de base para definir um valor ótimo considerando eficiência energética e econômica.



Fonte: Adaptado de Jaffe, 2004

Por exemplo pode-se considerar dois ar-condicionado que são parecidos, exceto que um tem maior eficiência energética, onde, o que apresenta maior eficiência tem custo mais elevado pois a tecnologia empregada é mais moderna e tem melhor rendimento. (Jaffe,2004)

2.3 PERDAS EM FONTES CA/CC

As perdas elétricas em qualquer semicondutor são divididas em perdas por condução e perdas por comutação. As perdas de comutação são subdivididas em: perda de comutação durante a entrada em condução e perda de comutação durante o bloqueio (MORITZ, 2014).

As perdas por condução ocorrem em função da oposição à passagem de corrente, exercida pelo semicondutor. Essa força contrária é representada por uma força-eletromotriz V_{TO} , associada em série a uma resistência r_t . A potência dissipada no dispositivo é calculada através da equação (01), onde I_{med} e I_{ef} são a corrente média e a corrente eficaz que circulam pelo semicondutor, respectivamente. As variáveis de cada chave semicondutora devem ser obtidas dos catálogos do fabricante ou através de ensaios laboratoriais (MORITZ, 2012).

$$P_c = V_{TO} \cdot I_{med} + I_{ef}^2 \cdot r_t \quad (01)$$

Os semicondutores como diodos, MOSFET e IGBT, também apresentam perdas em função da comutação. Um interruptor não ideal leva certos períodos finitos para passar do estado de condução para o estado de bloqueio. O atraso nesta transição faz com que ocorram perdas. Existem várias equações desenvolvidas para o cálculo destas perdas, entretanto uma forma simplificada é calcular a energia dissipada na comutação para um dado nível de tensão de alimentação que considera as perdas no fechamento da chave e no bloqueio da mesma (MORITZ, 2014).

Ainda sobre as perdas nos semicondutores, especialmente no projeto de fontes chaveadas e lineares, um último aspecto importante está no dimensionamento do dissipador térmico. Neste aspecto, deve-se comentar que a corrente que circula no semicondutor gera calor, tanto no modo de condução como na sua comutação e esse calor deve ser dissipado para o ambiente. Caso isso não ocorra, a temperatura da junção se eleva acima dos limites permitidos e pode provocar danos e falhas nos componentes. A corrente máxima e, portanto, a potência máxima que um diodo, um

tiristor ou um transistor pode processar é limitada apenas pela temperatura de junção MORITZ, 2014).

Para dimensionar o dissipador o projetista deve considerar uma temperatura de junção um pouco menor que o valor máximo indicado no catálogo, pois podem ocorrer possíveis excessos de temperatura para certas situações não ideais, como por exemplo, aproximações no cálculo das energias, correntes de recuperação reversa, oscilações de corrente pela presença de indutâncias e capacitâncias parasitas, entre outras.

Segundo Liu e Li (2014) a eficiência dos conversores CA/CC, CC/CC e CC/CA variam dependendo da potência, para potências mais altas a eficiência é maior. Porém para potências menores os conversores CC/CC e CC/CA são mais eficientes e apresentam uma variação de eficiência menor que o conversor CA/CC, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Eficiência dos conversores CA/CC, CC/CC, CC/CA para diferentes potências.

Potência (W) \ Conversor	10	100	1000	10000	100000	1000000
CA/CC	69%	75%	81%	87%	93%	99%
CC/CC	86%	90%	92%	96%	97%	99%
CC/CA	90%	92%	92%	95%	95%	98%

Fonte: Adaptado de Liu e Li (2014)

Segundo Siraj et al (2020) as eficiências das conversões CC/CC e CC/CA ultrapassam 95%. Já a conversão CA/CC tem uma melhor eficiência com uma potência maior, conforme a Tabela 2 e como já observado anteriormente.

Tabela 2 – Eficiência de conversão.

Conversão	Eficiência	Perdas
CA/CC > 5kW	93,70%	6,30%
CA/CC 1kW - 5kW	87,60%	12,40%
CC/CC	98,30%	1,70%
CC/CA	96,90%	3,10%

Fonte: Adaptado de Siraj (2020).

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme visto ao longo desse capítulo de fundamentação teórica, há condições e justificativas para o desenvolvimento de redes de distribuição CC em baixa tensão, seja para facilitação da integração de geração distribuída como sistemas fotovoltaicos, seja pela necessidade de melhoria da eficiência energética de equipamentos eletroeletrônicos, pela eliminação de fontes CA/CC que podem gerar perdas de energia representativas durante seu uso.

Neste sentido, no próximo capítulo será apresentado algumas das referências bibliográficas mais atuais sobre o uso de redes CC de distribuição e seus impactos tecnológicos para as instalações.

3 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura é uma das etapas mais importantes de um projeto de pesquisa e deve apresentar as seguintes características: (i) metodologicamente analisar e sintetizar uma literatura de qualidade; (ii) fornece uma base sólida para um tema de pesquisa; (iii) fornece uma base sólida para a seleção de metodologia de pesquisa; (iv) demonstrar que a pesquisa proposta contribui com algo novo para o corpo geral do conhecimento ou avanços da base de conhecimento do campo de pesquisa (LEVY e ELLIS, 2006).

3.1 PORTIFÓLIO BIBLIOGRÁFICO

Para validar o tema de pesquisa foi realizada uma revisão sistemática da literatura utilizando o método do LabMCDA, Universidade Federal de Santa Catarina, baseado no modelo proposto por Ensslin et. al. (2010).

O desenvolvimento da revisão literatura é baseado em pesquisas do autor sobre assuntos com as palavras-chave citadas no Quadro 2, definidas sobre o problema a ser analisado e o método a ser aplicado, sendo estes o eixo de definição das palavras-chave.

Quadro 2 – Eixos de pesquisa e palavras-chave

Eixo de Pesquisa	Palavra-Chave
Distributed Generation	DC Microgrids
Energy Economy	Energy Efficiency

Fonte: O Autor (2022)

Para ampliar a revisão da literatura, o autor buscou artigos técnicos complementares em fontes como o Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos (CIGRE).

Aplicando o *publish or perish*, ativando uma busca para as palavras chaves e um filtro de artigos nos últimos 10 anos, obteve um banco bruto de 1000 artigos. Nessa busca foram considerados basicamente somente artigos de periódicos dos principais bancos de dados, como IEEE, Elsevier, foram excluídas publicações em conferências, livros etc.

Realizada uma análise através da leitura dos títulos, posteriormente leitura do resumo, introdução e conclusão. Chegando em um total de 13 artigos mais alinhados com o tema proposto neste trabalho, conforme o Quadro 3.

Quadro 3 - Artigos Selecionados para o Portfólio.

Autor (Ano)	Artigo	Periódico	Citações
Gerber, D. L., et al. (2017)	A Simulation Based Comparison of AC and DC Power Distribution Networks in Buildings	IEEE	13
Justo J.J., et al. (2013)	AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review	Renewable and Sustainable Energy Reviews	936
Lu, X., et al. (2014)	An Improved Droop Control Method for DC Microgrids Based on Low Bandwidth Communication With DC Bus Voltage Restoration and Enhanced Current Sharing Accuracy	IEEE Transactions on Power Electronics	814
Zubieta, L. E. (2016)	Are Microgrids the Future of Energy?: DC Microgrids from Concept to Demonstration to Deployment	IEEE Electrification Magazine	89
Patterson, B. T., (2012)	DC, Come Home: DC Microgrids and the Birth of the "Enernet"	IEEE Power and Energy Magazine	267
Elsayed, A. T., et al., (2015)	DC microgrids and distribution systems: An overview	Electric Power Systems Research	497
Noritake, M., et al., (2014)	Demonstrative research on DC microgrids for office buildings	IEEE	37
AlLee, G. and Tschudi, W., (2012)	Edison Redux: 380 Vdc Brings Reliability and Efficiency to Sustainable Data Centers	IEEE Power and Energy Magazine	157
Manandhar, U., et al., (2015)	Efficiency comparison of DC and AC microgrid	IEEE	46
Loschi, H. J., et al., (2015)	Energy Efficiency in Smart Grid: A Prospective Study on Energy Management Systems	Scientific Research Publishing: Smart Grid and Renewable Energy	17
Weiss, R., et al., (2015)	Energy Efficient Low-Voltage DC-Grids for Commercial Buildings	IEEE	84
Reed, G. F., et al., (2012)	Ship to Grid: Medium-Voltage DC Concepts in Theory and Practice	IEEE Power and Energy Magazine	89
Villanueva, D., et al., (2021)	Towards DC Energy Efficient Homes	Applied Sciences	2

Fonte: O Autor (2022)

3.2 ANÁLISE DA LITERATURA

A revisão da literatura se concentrou na busca pelas Palavras-chave da Tabela 2 na biblioteca do Google Acadêmico, atendendo aos artigos mais alinhados com a proposta de trabalho.

Justo, et al. (2013) em seu artigo apresenta uma revisão sistemática da literatura de sistemas de microrredes AC e DC em conexão com unidades de geração distribuída usando fontes de energia renováveis, sistemas de armazenamento de energia e cargas. O artigo também investiga a viabilidade, o controle e as estratégias de gerenciamento de energia dos dois sistemas de microrrede com base nos trabalhos de pesquisa mais relevantes disponíveis na época.

O artigo de Elsayed, et al. (2015) apresenta uma visão geral dos avanços mais recentes, para quando o artigo foi publicado, em sistemas de distribuição CC. Os pesquisadores estão investigando várias questões que precisam ser consideradas durante a transição de sistemas de energia convencionais atuais para as redes inteligentes modernas envolvendo microrredes CC. Elsayed, et al., (2015) categoriza, discute e analisa o caminho de mitigação do sistema de energia totalmente CA para um sistema de energia híbrido CA/CC.

O trabalho de Gerber, et. al. (2017), apresenta uma simulação baseada em Modelica para comparar a eficiência da distribuição de energia CC de um edifício com uma distribuição de corrente alternada (CA) equivalente. Através de algumas simulações paramétricas determinam como e quando a distribuição CC é vantajosa. O uso da distribuição CC pode ser consideravelmente mais eficiente do que o CA: um edifício de médio porte com distribuição CC tem uma linha de base esperada de 11% de economia, mas pode economizar até 17%. Os resultados apresentados dizem que o uso de CC, geralmente, é mais vantajoso em edifícios com grande capacidade solar, grande capacidade de bateria e distribuição de CC de alta tensão.

Visando melhorar o desempenho da operação de microrrede CC, Lu, et al. (2014) propõe um método de controle de *droop* baseado em comunicação de largura de banda baixa. O controlador de *droop* é empregado para atingir uma operação independente, e os controladores de tensão e corrente médios são usados em cada conversor para aprimorar simultaneamente a precisão de compartilhamento de corrente e restaurar a voltagem do barramento. O teste de simulação em MATLAB /

Simulink e a validação experimental baseada em um protótipo de 2×2,2 kW foram implementados para demonstrar a abordagem proposta.”

Noritake, et al. (2014) “Este artigo relata o estudo experimental de uma microrrede CC para um prédio de escritórios na cidade de Obihiro, Hokkaido, Japão. O objetivo do estudo é desenvolver um sistema autossustentável de energia distribuída combinando energias de distribuição, baterias e aparelhos com energia CC. O sistema de energia CC não somente realiza a redução da carga do meio ambiente e melhora a eficiência energética, como também forma um sistema de energia comunitário que pode se tornar independente das redes de serviços públicos e resistente a desastres naturais. Em comparação com a fonte de alimentação CA, o sistema CC aumenta a eficiência em 3,2% e diminui a energia comercial a ser comprada em 4,2%.”

Manandhar, et al. (2015) Este artigo apresenta uma comparação entre o LVAC existente com o sistema de distribuição LVDC prospectivo em termos de eficiência de conversão do conversor. Cargas AC e CC constantes, geralmente usadas em aplicações domésticas, são simuladas usando PSCAD / EMTDC para o sistema de distribuição LVAC e LVDC. A análise da eficácia do sistema LVDC sobre o sistema de distribuição LVAC foi apresentada.”

Loschi, et al. (2015) Neste artigo, é feito um estudo prospectivo sobre gerenciamento de energia, e explorando questões críticas da modelagem de sistemas de gerenciamento de energia em um contexto inteligente. A grade é apresentada junto com a base dos sistemas de gerenciamento de energia. Uma análise da condição de resposta à demanda também é apresentada. Por fim, são discutidas as vantagens e desvantagens da implantação de sistemas de gerenciamento de energia e uma comparação com o sistema elétrico brasileiro.”

Weiss, et al. (2015) “O consórcio europeu de projetos de P&D ENIAC DC Components and Grid (DCC + G) está desenvolvendo componentes e subsistemas adequados e altamente eficientes para a rede de 380 VCC para mostrar os benefícios do conceito de rede CC no local de teste em um ambiente de escritório. Os componentes da grade CC recentemente desenvolvidos e sua integração em um sistema genérico são apresentados neste artigo. A economia de eficiência geral almejada em comparação com a rede CA é de 5% e a conversão de energia fotovoltaica (fotovoltaica) é calculada para ser 7% mais econômica em comparação com as instalações fotovoltaicas tradicionais. Este artigo também mostra os

protótipos de rede CC realizados, fornecendo um prédio de escritórios do Instituto Fraunhofer em Erlangen, Alemanha, e descreve os benefícios gerais de um sistema de grade CC. O protótipo de rede CC consiste em um sistema de iluminação CC, uma fonte de alimentação CC baixa para infraestrutura de TI, carregador de veículo elétrico CC, uma unidade CC μ CHP, unidades MPPT fotovoltaicas CC, um retificador central e unidade controladora de rede, bem como uma alimentação CA / CC mista unidade de monitoramento. É mostrado que menos perdas de conversão e maior eficiência de distribuição podem ser alcançadas com uma rede de 380 VCC em comparação com redes convencionais de CA.”

Villanueva, et al. (2021) “O objetivo deste artigo é lançar luz sobre a questão de saber se a integração de uma bateria elétrica como parte de uma instalação doméstica pode aumentar sua eficiência energética em comparação com um caso convencional. Quando uma bateria é incluída em tal instalação, dois tipos de conversão elétrica devem ser considerados, ou seja, CA / CC e CC / CA e, portanto, as perdas correspondentes devido a esses conversores não devem ser esquecidas ao realizar a análise. A eficiência de todo o sistema pode ser aumentada se um dos conversores mencionados for evitado ou simplesmente quando seu dimensionamento for reduzido. As formas possíveis de atingir esse objetivo podem ser: usar veículos elétricos como fornecedores de CC, o uso de tantos dispositivos domésticos de CC quanto possível e iluminação LED ou dispositivos de carregamento baseados em energias renováveis. Com tudo isso em mente, vários cenários são propostos aqui para dar uma olhada em todas as possibilidades relacionadas à alimentação CA e CC. Com o objetivo de verificar estes cenários a partir de dados reais, analisa-se um estudo de caso operando com valores médios de consumo de eletricidade.”

Para Zubietta (2016) uma questão importante em microrredes CA são problemas de qualidade de energia, como quedas, aumentos, desequilíbrios e oscilação, entre outros, associados à alta penetração de recursos renováveis que apresentam saída de energia variável, mas são facilmente mitigados em sistemas CC com controle da tensão do barramento CC. Existem trabalhos em padrões focados em sistemas CC para ajudar a entender as diferenças entre os sistemas CC e CA e fornece ferramentas para identificar cuidados de segurança que devem ser adotados em sistemas CC.

Patterson (2012) apresenta análise da BT CC (380 Vcc), começando com as motivações, desenvolvimento de 380 Vcc, implementação e os benefícios resultantes. Assim resultou para a articulação do caso para BT CC, e também para desmascarar vários mitos comuns que não se aplicam mais. Foi apresentado alguns casos de sucesso de data centers 380-Vcc de todo o mundo.

O artigo proposto por AlLee and Tschudi (2012) aborda a energia CC e seu potencial para o mundo. A energia CC está “renascendo” com a ajuda da moderna tecnologia de eletrônica de potência. É abordado também o trabalho da EMerge Alliance (EA), uma associação sem fins lucrativos da indústria aberta (já conta com mais de 100 organizações da indústria, governo e academia) que está criando e promovendo novos padrões baseados no uso contemporâneo da tecnologia CC para geração, armazenamento, distribuição e uso de energia. A EA propõe um uso expandido de sistemas híbridos de energia CA-CC, chamada de “enernet”, que são mais parecidos com a Internet adaptativa e rica em informações de hoje do que com o sistema de telefone com fio como era antes.

Reed, et al. (2012) Centros de pesquisa corporativos, universidades, fornecedores de equipamentos de energia, consumidores finais e outros participantes do mercado em todo o mundo estão começando a explorar e considerar o uso de CC em futuras aplicações de sistemas de transmissão e distribuição. Infraestrutura de média tensão CC: preenchendo a lacuna entre os setores de transmissão e distribuição O conceito de média tensão CC (MVDC) é, em última instância uma plataforma de coleta projetada para ajudar a integrar energias renováveis, atender cargas emergentes baseadas em corrente contínua e de energia constante, interconectar armazenamento de energia e atender às necessidades futuras na área geral de conversão de energia elétrica, tudo de uma maneira mais otimizada. Para dar uma apreciação dos detalhes do modelo, módulos de 64 páginas (subcamadas dentro do modelo) foram usados para criar o modelo, sete máquinas estão sendo simulado de uma vez, e todas as características de comutação dos conversores de energia estão sendo capturadas em questão de minutos para cada simulação. O Departamento de Energia dos EUA (DOE), por meio do FOA-414, encontrou grande interesse em explorar a integração do potencial eólico offshore e fundou uma equipe de organizações para explorar os comportamentos da velocidade do vento no mar e determinar os locais ideais para colocação grandes turbinas eólicas em todo o perímetro dos Estados Unidos. Essa ideia inovadora de conectar

os dois grandes temas da política energética, geração eólica offshore e reservas de petróleo, tem potencial para abrir novos mercados de negócios voltados para grandes petroleiras, que participam das operações de perfuração, bem como aos participantes do setor tradicional de energia, incluindo utilitários.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de redes CC para a distribuição da energia está em grande crescimento, principalmente devido a utilização da geração distribuída (solar fotovoltaica). Com essa geração perto do consumidor, ou no próprio consumidor reduz-se o comprimento dos cabos utilizados reduzindo assim as perdas nos cabos. Por outro lado, ocorre um aumento no número de conversores utilizados. Estão sendo desenvolvidos muitas pesquisas neste campo, neste campo de comparação da eficiência energética com rede CC de baixa tensão é mais limitado os trabalhos que estão em desenvolvimento, porém é uma área de grande potencial para as pesquisas.

4 ESTUDO E PROPOSTA DE PARAMETROS E CONFIGURAÇÃO DE REDE DE CORRENTE CONTÍNUA RESIDENCIAL

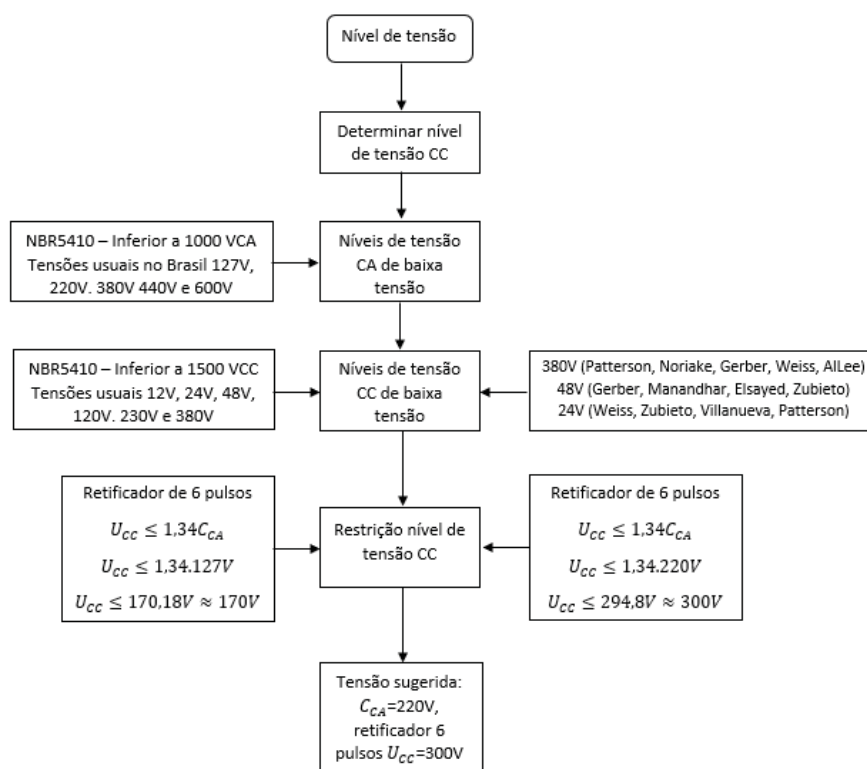
A base metodológica empregada para o estabelecimento dos parâmetros de rede elétrica será o documento “Active distribution systems and distributed energy resources - Medium voltage direct current (MVDC) grid feasibility study” do CIGRE (2020). Assim, serão propostos os principais requisitos técnicos e características das redes de distribuição de baixa tensão CC. Visto que o documento base contém informações de uma rede de corrente contínua de média tensão, será adequado e propostos alguns requisitos para uma rede de CC de BT.

4.1 ESPECIFICAÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÃO CC

Para redes de distribuição de CC de baixa tensão, o nível de tensão selecionado deve corresponder à capacidade da fonte de alimentação da rede de distribuição de CA correspondente, uma vez que se pretende conectar ambas através de um conversor CA/CC.

O fluxograma da Figura 7 apresenta a metodologia adotada para o estabelecimento dos níveis de tensão base para um circuito residencial CC

Figura 7 - Fluxograma para determinação da corrente CC



Fonte: o Autor (2022)

Para redes de distribuição de CC de baixa tensão, o nível de tensão selecionado deve corresponder à capacidade da fonte de alimentação da rede de distribuição de CA correspondente.

Segundo a Norma Brasileira ABNT NBR5410 a faixa de tensão considerada para baixa tensão considera os circuitos elétricos alimentados sob tensão nominal igual ou inferior a 1000 V em CA, ou inferiores a 1500 V em CC.

Na literatura científica os autores, na maioria dos casos, utilizam para corrente contínua a tensão de 380 VCC. Como Weiss que faz um paralelo entre a tensão de 380 VCC com 400/230 VCA. Patterson utiliza 380 VCC e 24 VCC para iluminação e pequenas cargas eletrônicas através de conversores. Manandhar adota para a baixa tensão CC vários níveis de tensão como 48V, 120V, 230V e 326V.

4.1.1 Visão Geral Global dos Níveis de Tensão CA

O status da sequência de tensão de distribuição de energia CA foi pesquisado, o que pode fornecer a ideia para a seleção da sequência de tensão de distribuição de energia CC.

As tensões mais comuns no Brasil conforme a ABNT NBR5410 são: 127V, 220V, 380V, 440V, 480V, 600V. As faixas de 440V, 480V e 600V níveis típicos de instalações industriais.

4.1.2 Restrições de Seleção de Nível de Tensão CC

A grande maioria das redes de distribuição é atualmente CA, portanto, a futura construção de redes de distribuição CC precisa considerar a questão da conexão com as redes CA existentes. Esta é uma das restrições na seleção dos níveis de tensão CC.

4.1.3 Geração Fotovoltaica: Conexão CC

Historicamente, os sistemas fotovoltaicos operam em níveis de baixa tensão. Operar em um nível de tensão mais alto permite que as perdas sejam reduzidas. A transição de sistemas fotovoltaicos para níveis de tensão CC mais altos permite que a planta seja operada com menores perdas, portanto, com maior eficiência, e isso oferece o potencial de redução do custo do sistema (por exemplo, usando menos

equipamentos e transformadores e cabos menores). Duas possíveis topologias de coleta MVDC são apresentadas na Figura 4.15 e suas vantagens são resumidas a seguir.

Algumas das vantagens do uso de conexão CC: (i) sem perdas de transformador em conversores CC/CC à noite; (ii) baixa frequência de comutação; (iii) melhor eficiência devido a vários MPPTs; (iv) eficiência até 2% melhor devido à ausência de conversão CC/CC; (v) adequado para conexão com um sistema de armazenamento de energia; (vi) custo do sistema reduzido devido a transformadores menores e menor custo de cabo;

Na literatura científica os níveis de tensão encontrados foram alguns protótipos de tensão entre 360V e 420V além das tensões 180V e 210V segundo Justo. Weiss utiliza níveis entre 360V e 1000V e Villanueva 36V.

4.1.4 Resumo das Tensões

O Quadro 4, abaixo, apresenta os níveis de tensões encontrados na literatura científica e na norma ABNT NBR5410, assim como as tensões na entrada dos inversores PV e para acionamento de motores.

Quadro 4 – Níveis de tensão CC encontrados na literatura científica

Norma NBR-5410	Referências	Tensão	Entrada inversores PV	Acionamento Motores
Inferior a 1500V	Gerber	380V (data centers) 48V (baixa tensão) 380V (alta tensão)	-	-
	Justo	5V - 20 V (eletrônicos) 200V – 380V (Carro elétrico) 220V - 400V (data centers)	180V-210V (360V-420V protótipos)	380V
	Lu	700 V		
	Zubietta	760V/380V 48V/24V (pequenas cargas)		
	Patterson	380V (data centers) 380V (bateria) 380V (distribuição) 24V (iluminação) 24V (cargas eletrônicas)		
	Elsaved	48V 120V		
	Manandhar	230V 326V		
	Noriake	360V - 400V		
	AlLee e Tschudi	380V/190V		
	Weiss	380V 24V (cargas eletrônicas)	260V-1000V	
	Reed	3,3kV (média tensão)		
	Villanueva	300V - 400V (bateria) 24V/12V (cargas/iluminação) 380V (distribuição)	36v	

Fonte: o autor

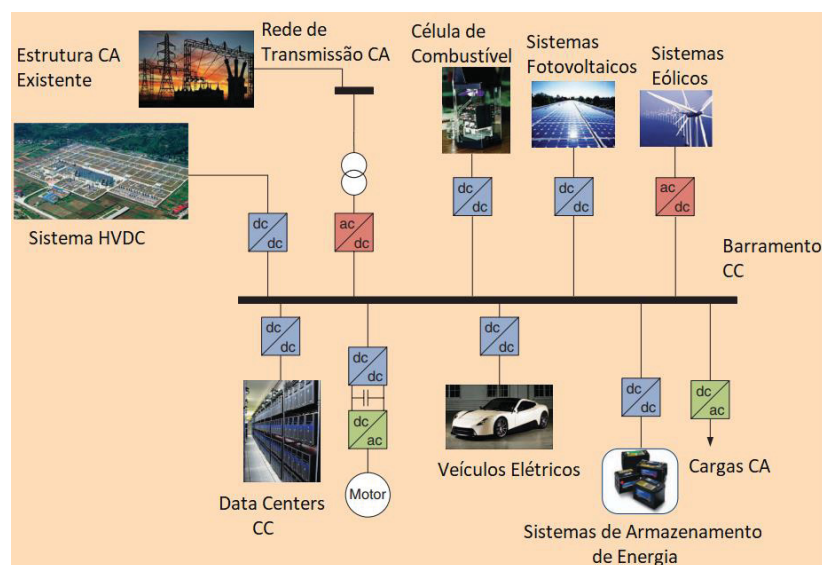
4.2 ESTRUTURA E CONFIGURAÇÃO

A estrutura multiterminal pode integrar facilmente cargas CC e fontes de energia renovável na rede. Podem ser conectados diretamente a redes, microrredes CA, fontes de energia renovável e sistemas de armazenamento de energia. As estruturas multiterminais são classificadas como estruturas radiais ou em anel.

4.2.1 Estrutura Básica

Estrutura radial é uma configuração na qual o barramento principal conecta à rede CA existente por meio de um único caminho. O sistema pode consistir em fontes de energia renováveis, sistemas de armazenamento de energia, cargas CA e cargas CC, como mostrado na Figura 8. O uso de cargas CA convencionais é possível de duas maneiras. Esta configuração é relativamente simples, minimizando as perdas na distribuição e facilitando a seleção e utilização dos níveis de tensão.

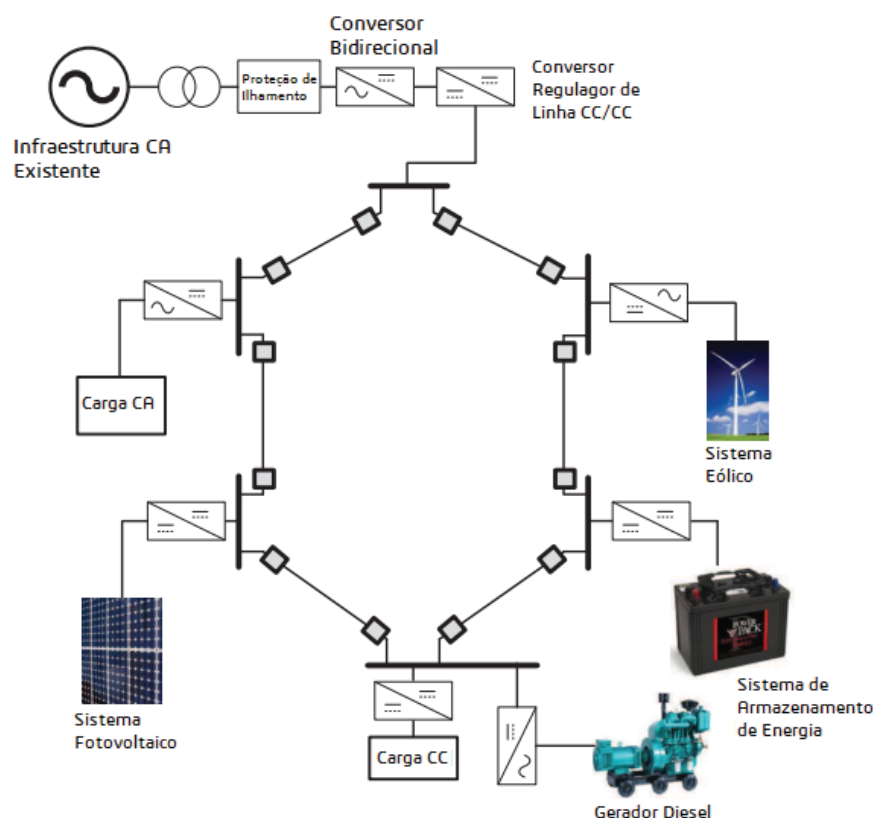
Figura 8 - Sistema com estrutura radial.



Fonte: Adaptado de Reed et al (2012)

A configuração em anel consiste em dois ou mais caminhos entre a rede CA e o sistema de distribuição CC, conforme apresentado na Figura 9. A configuração em anel é mais confiável em comparação com a configuração radial, porém devido sua complexidade acaba não sendo utilizada para alguns casos de sistema de baixa tensão.

Figura 9 - Sistema com estrutura anel.



Fonte: Adaptado de Mohanty (2016)

4.2.2 Configuração para Polaridade de Tensão

O bipolo com retorno metálico utiliza um condutor neutro isolado de baixa tensão. Em alguns casos, um condutor totalmente isolado é utilizado para a conexão dos pontos neutros, para permitir a operação em situações de emergência.

O bipolo com configuração de retorno à terra não possui corrente fluindo através do retorno à terra em condições normais. Porém, quando ocorre uma queda de um dos polos do conversor no sistema, é gerada uma corrente de retorno à terra que pode causar impactos ambientais. Esta configuração apresenta desgastes galvânicos dos eletrodos.

4.3 PERDAS DE LINHA

As características de perdas em linhas de energia e cabos operando em condições de média tensão CC são mais simples de modelar, calcular e medir quando comparados às condições CA. No entanto, uma consideração mais

aprofundada é necessária para dar uma indicação da pesquisa necessária e, posteriormente, a adaptação necessária de padrões para determinar perdas práticas.

4.4 CURTO-CIRCUITOS

Comparado ao sistema tradicional, o sistema de distribuição LVDC apresenta mais situações de falha diferentes. O uso de dispositivos eletrônicos de potência também apresenta desafios. Os dispositivos podem causar falhas no interruptor e também complicar a operação do dispositivo de proteção. O sistema LVDC pode causar altas tensões de terra em condições difíceis de aterramento que podem exigir o uso de um sistema de IT não aterrado. (SALONEN et al., 2009)

Possíveis situações de falha na rede CC são: (i) curto-circuito em um polo positivo; (ii) curto-circuito em um polo negativo; (iii) curto-circuito entre polo positivo e negativo sem conexão neutra; (iv) curto-circuito entre polo positivo e negativo com conexão neutra; (v) falha à terra no condutor positivo; (vi) falha à terra no condutor neutro; (vii) falha à terra no condutor negativo.

4.4.1 Características de Falhas CC

Normalmente, as falhas CC consistem em três componentes diferentes, ou seja, (i) capacitor do link CC, (ii) indutância do cabo e (iii) rede elétrica, com diferentes comportamentos, como segue:

Estágio 1: O capacitor do barramento CC é descarregado devido à queda de tensão do barramento CC em um estágio inicial de uma falha CC.

Estágio 2: A proteção interna do conversor bloqueia a operação das chaves IGBT e então o VSC atua como uma ponte retificadora de diodo. Nesse momento, as principais fontes de corrente de falha são a corrente de descarga da indutância do cabo e a corrente retificada do lado da rede por meio de diodos de giro livre.

Estágio 3: A corrente retificada é a única fonte da corrente de falha em um estado estacionário.

Uma grande corrente de descarga é gerada no circuito RLC, que consiste em baixa impedância de cabo, baixa impedância de falha e um capacitor de barramento CC. Além disso, um VSC pode ser danificado pela corrente de falha CC através de diodos de giro livre no Estágio 2, embora possa ser seguro sem contribuição de

corrente de falha do IGBT no Estágio 1. Assim, se possível, a falha deve ser removida antes que um VSC forneça a corrente de falha no sistema.

4.5 DC BREAKER

No sistema de energia CA, a corrente tem uma forma de onda senoidal com a frequência da energia, o que resulta em cruzamentos periódicos de zero da corrente. Esta é uma grande vantagem do ponto de vista da quebra de corrente. Portanto, a maioria dos disjuntores mecânicos usa esta propriedade para interromper a corrente de falha. Quando há falha de corrente, os eletrodos de um disjuntor mecânico se separam e a distância entre os eletrodos começa a aumentar. Se a distância entre os eletrodos for aumentada para obter rigidez dielétrica suficiente e a energia do arco for controlada sob um certo nível, a corrente será interrompida perto de um ponto zero de corrente no qual a energia do arco é mínima. No caso de disjuntores CA convencionais, leva aproximadamente 1-3 ciclos (20-60 ms) até que a corrente seja interrompida após receber o sinal de comando operacional de um controlador.

Nos sistemas de energia CC, a corrente de falha continua a aumentar até um certo nível sem nenhum ponto zero de corrente. Como resultado, para a interrupção da corrente CC, é necessário fazer os pontos zero atuais à força, em vez de esperar pelos pontos zero atuais. Esta é a diferença fundamental entre a interrupção de corrente CC e CA.

Sob vários kV, disjuntores mecânicos, como um disjuntor em caixa moldada ou um disjuntor a ar, que são quase os mesmos que disjuntores CA, podem ser usados para interrupção CC sem qualquer adicional componentes. No entanto, se a tensão do sistema aumentar até um determinado nível, é muito difícil para um disjuntor mecânico puro interromper a corrente CC sem o auxílio de componentes adicionais, como semicondutores de potência ou circuitos elétricos.

Geralmente, a velocidade de chaveamento de um semicondutor ou circuito elétrico é muito mais rápida do que a de uma chave mecânica. Se a corrente CC pode ser interrompida usando semicondutores de potência ou circuitos elétricos, a interrupção pode ser feita muito rapidamente.

4.6 CONFIGURAÇÃO DE PROTEÇÃO

O sistema de baixa tensão CC para atender aos seguintes requisitos: (i) tensão de terra máxima 240 VCC; (ii) tensões máximas de contato 50 VCA e 120 VCC; (iii) o monitoramento de isolamento precisa ser usado para, pelo menos, dar um alarme de diminuição de isolamento no sistema não aterrado; (iv) a falta à terra precisa ser eliminada dentro de 2 h no sistema não aterrado; (v) O curto-circuito da rede CC precisa ser eliminado em 5 s; (vi) o curto-circuito da rede CA do cliente precisa ser eliminado em 0,4 s no sistema aterrado e em 0,8 s no sistema não aterrado. (SALONEN et al., 2009)

4.6.1 Requisitos de Operação

Os requisitos de operação desejável do sistema são:

- zona de proteção para o sistema de baixa tensão CC para reduzir o impacto da falha e diminuir o número de falhas;
- seletividade na proteção de falta à terra entre redes de clientes separados ou entre rede de cliente e rede CC;
- seletividade na proteção contra curto-circuito entre operação de desarme de corrente do inversor e operação do dispositivo de proteção de rede do cliente;
- para operar nas primeiras situações de falha em falhas à terra da rede CC para diminuir o risco de situações de falha dupla;
- o polo saudável do sistema bipolar pode estar em operação enquanto o outro polo está com falha.

4.6.2 Dispositivos de Proteção

Na proteção do sistema de baixa tensão CC, os componentes tradicionais de proteção não podem ser usados diretamente. Os dispositivos precisam de funcionalidades adicionais para atender às características especiais do sistema. Sem funcionalidades adicionais, os dispositivos usados não funcionarão como desejado. A operação normal do sistema de baixa tensão CC também pode ser restringida devido ao uso direto do dispositivo de proteção devido às características especiais do sistema de baixa tensão CC.

4.7 SISTEMA DE ATERRAMENTO

O aterramento em sistemas CC é um aspecto extremamente importante porque é essencial para garantir a segurança humana e a proteção dos equipamentos elétricos. Deve-se selecionar um tipo apropriado de aterramento do sistema para obter um projeto confiável.

Os esquemas de aterramento existentes para sistemas CA, conforme a ABNT NBR5410, são: Esquema TN, TT e IT. Os esquemas de aterramento para sistemas CC são bem semelhantes com os utilizados nos sistemas CA, seja para média tensão quanto para baixa tensão. A Figura 10 apresenta esses esquemas, os quais foram adaptados em comparação tanto da ABNT NBR5410 quanto do documento do CIGRE para média tensão.

Primeiramente na classificação dos esquemas de aterramento é utilizada a seguinte simbologia, Quadro 5:

Quadro 5 – Nomenclatura para classificação dos esquemas de aterramento

Primeira Letra	Situação da alimentação em relação à terra:	
	T	um ponto diretamente aterrado
	I	isolação de todas as partes vivas em relação à terra ou aterramento de um ponto através de impedância
Segunda Letra	Situação das massas da instalação elétrica em relação à terra:	
	T	massas diretamente aterradas, independentemente do aterramento eventual de um ponto da alimentação
	N	massas ligadas ao ponto da alimentação aterrado (em corrente alternada, o ponto aterrado é normalmente o ponto neutro);
Outras Letras (eventuais)	Disposição do condutor neutro e do condutor de proteção	
	S	funções de neutro e de proteção asseguradas por condutores distintos
	C	funções de neutro e de proteção combinadas em um único condutor (condutor PEN)

Fonte: O autor (2022).

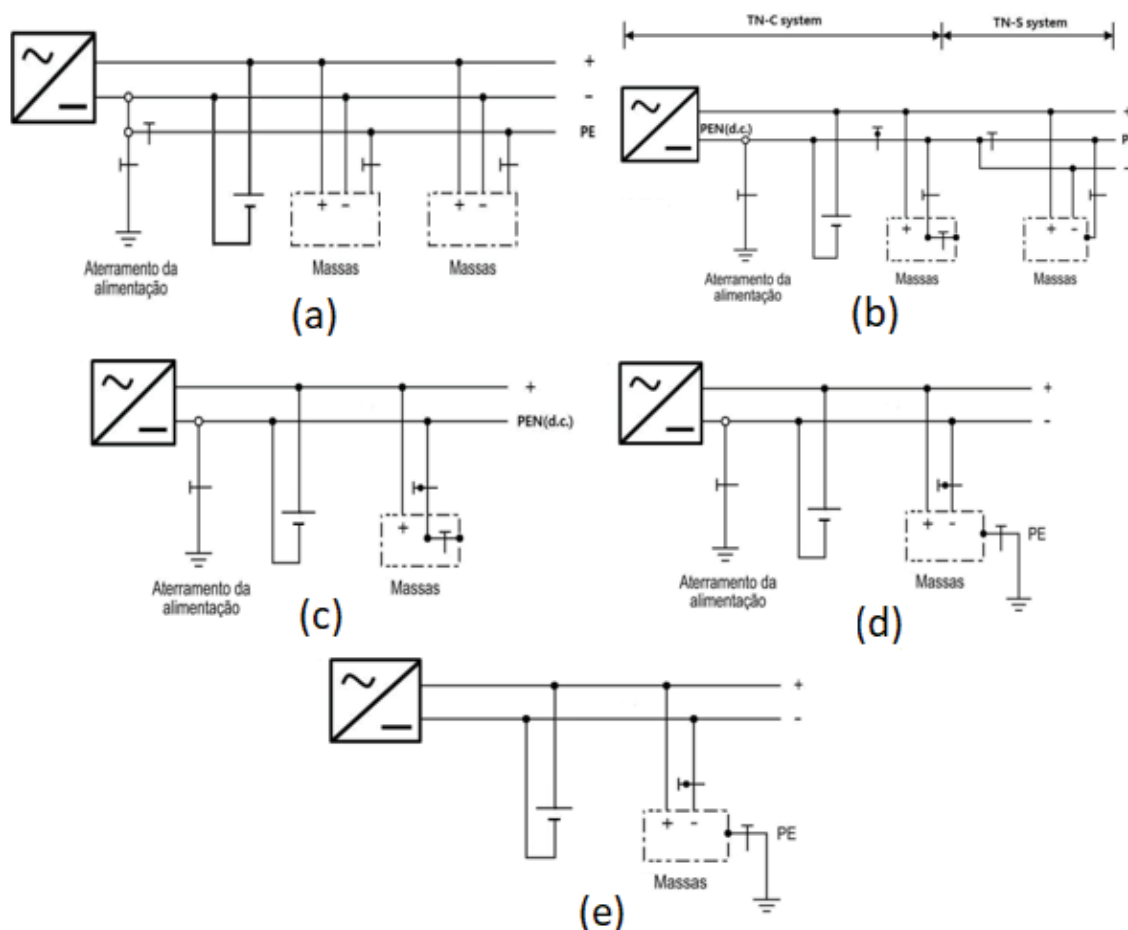
Os símbolos utilizados nos sistemas de aterramento estão descritos no quadro 6:

Quadro 6 – Simbologia utilizada nos sistemas de aterramento

Explicação dos símbolos de acordo com IEC 60617-11	
	Condutor Neutro (N)
	Condutor de Proteção (PE)
	Condutor combinando as funções de neutro e proteção (PEN)

Fonte: ABNT NBR5410

Figura 10 - Esquemas de aterramento: (a) Esquema TN-S, (b) Esquema TN-C-S, (c) Esquema TN-C, (d) Esquema TT e (e) Esquema IT.



Fonte: Adaptado de ABNT NBR5410.

O esquema TN possui um ponto diretamente aterrado, sendo as massas ligadas através de condutores de proteção. Três tipos de sistema TN CC são definidos conforme a polaridade aterrada e o condutor de proteção são separados ou não:

a) esquema TN-S, no qual em todo o sistema é utilizado um condutor de proteção separado (Figura 10a.); b) esquema TN-C-S, no qual as funções de neutro e proteção são combinadas em um único condutor em uma parte do sistema (Figura 10b.); c) no qual as funções de neutro e proteção são combinadas em um único condutor em todo o sistema (Figura 10c.).

O sistema TT possui um ponto diretamente aterrado; as partes condutoras expostas da instalação sendo conectadas a eletrodos de aterramento eletricamente independentes dos eletrodos de aterramento do sistema de energia. Se necessário, o ponto médio da alimentação pode ser conectado ao terra (Figura 10d.).

O sistema IT tem todas as partes vivas isoladas do terra ou um ponto conectado ao terra através de uma impedância, as partes condutoras expostas da instalação elétrica sendo conectadas de forma independente ou coletivamente diretamente ao terra (Figura 10e.).

4.8 PROBLEMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA ELETRICA

Alguns dos problemas de qualidade de energia existentes no sistema CA não afetem os sistemas CC, como os problemas de formas de ondas e desequilíbrio.

Basicamente os problemas que devem ser verificados são os de magnitude de tensão (sobretensão e subtensão) e problemas com a flutuação de energia.

4.9 SEGURANÇA SISTEMAS CC

Os sistemas CC semelhantemente aos sistemas CA devem apresentar cuidados com a questão de segurança. Os riscos de choque elétrico e até queimaduras estão presentes.

O choque elétrico é causado por uma corrente elétrica que passa através do corpo humano ou de um animal qualquer. O pior choque é aquele que se origina quando uma corrente elétrica entra pela mão da pessoa e sai pela outra. Nesse caso, atravessando o tórax, ela tem grande chance de afetar o coração e a respiração. Se fizerem parte do circuito elétrico o dedo polegar e o dedo indicador de uma mão, ou uma mão e um pé, o risco é menor. O valor mínimo de corrente que uma pessoa pode perceber é 1 mA. Com uma corrente de 10 mA, a pessoa perde o controle dos músculos, sendo difícil abrir as mãos para se livrar do contato. O valor mortal está compreendido entre 10 mA e 3 A.

A pele humana é um bom isolante e apresenta, quando seca, uma resistência à passagem da corrente elétrica de 100.000 Ohms. Quando molhada, porém, essa resistência cai para apenas 1.000 Ohms. Os exemplos abaixo representam casos onde eventuais toques com corpo seco ou molhado à baixa voltagem (300 V): a) Corpo seco: $300 \text{ V} / 100000 \text{ ohms} = 0,003 \text{ A} = 3 \text{ mA}$ (o indivíduo leva apenas um leve choque e começa a sentir um formigamento na região do toque); b) Corpo molhado: $300 \text{ V} / 1000 \text{ ohms} = 0,3 \text{ A} = 300 \text{ mA}$ (suficiente para provocar um ataque cardíaco).

A Tabela 3 apresenta efeitos causados pela passagem da corrente elétrica no corpo humano.

Tabela 3 – Efeitos provocados pela passagem da corrente elétrica no corpo humano.

Corrente	Efeitos
1 mA	Corrente é perceptível apenas
10 mA	Sensação de agarramento da mão
16 mA	Corrente máxima tolerável sem grandes riscos
20 mA	Corrente causa parada respiratória
100 mA	Corrente causa ataque cardíaco
2 A	Corrente causa parada cardíaca
3 A	Valor considerado mortal ao corpo humano

Fonte: o autor

Algumas das providencias que poderiam ser tomadas para evitar estes riscos de segurança são:

- Verificar os cabos condutores, considere uma troca se estes estiverem expostos;
- A manutenção deve ser realizada por pessoas qualificadas;
- Uso de equipamentos de segurança.

4.10 BARREIRAS À IMPLEMENTAÇÃO DE REDES E MICRORREDES CC DE DISTRIBUIÇÃO E INICIATIVAS PÚBLICAS

Existem alguns desafios importantes para o uso de energia elétrica CC. Segundo PATTERSON (2012), alguns destes são:

- 1) Falta de normas e padrões para equipamentos CC;
- 2) Falta de entendimento comum e conhecimento básico para aplicação e construção de sistemas de distribuição CC;
- 3) Diferenças significativa na aplicação de dispositivos de proteção e segurança;

- 4) Falta de um ecossistema robusto para apoiar o uso de CC;
- 5) Sistema de distribuição de energia totalmente centrado em ac e dificuldades para passar para esquemas de distribuição em CC.

Segundo PATTERSON (2012), parte da solução destes desafios podem ser resolvidos através de ações específicas que incluem:

- a) programas de informação e educação para a indústria da construção
- b) Atualização de normas e padrões;
- c) Aperfeiçoamento de leis e tributos;
- d) Programas federais de incentivo técnico e financeiro;
- e) Projeto e regulamentação de tarifas da energia CC

Embora a solução dos desafios signifique uma transformação significativa para o sistema elétrico de potência, especialmente para as distribuidoras de energia, os entusiastas ("*early adopters*") e pesquisadores podem colaborar muito no início deste processo, algo semelhante ao que aconteceu com a internet e a telefonia móvel.

Ao se projetar sistemas de energia elétrica de distribuição CC, pode-se, inclusive, focar as necessidades da própria rede e dos dispositivos digitais, uma vez que estes facilitam o controle e supervisão, possibilitando ganho em eficiência energética e em disponibilidade de energia ao se integrar com sistemas de armazenamento de energia.

4.11 RESUMO E ESPECIFICAÇÃO FINAL DO SISTEMA

Para determinar o sistema de baixa tensão CC que melhor atende os requisitos pesquisados deve-se levar em consideração diversos requisitos, sempre visando atender as normas e orientações já pré-estabelecidas.

O sistema proposto nesse documento considera os parâmetros já comentados anteriormente, assim para fins de comparação com a rede CA já existente adota-se a tensão de 300VCC, retificador de 6 pulsos, estrutura radial, bipolo, atendendo os sistemas de proteção e aterramento, reduzindo as perdas e tentar transpor as barreiras existentes.

5 ESTIMATIVA DE REDUÇÃO DE CONSUMO PELA ADOÇÃO DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO CC

Para realizar a validação das especificações da rede de CC residencial propõe-se uma residência contendo três quartos, três banheiros, sala, cozinha, área de serviço e corredor. Os cômodos contêm os equipamentos conforme o Quadro 7, as potências utilizadas foram extraídas de próprios equipamentos e alguns aparelhos foram identificadas as potências através do documento divulgado pela CEMIG (2020):

Quadro 7 – Potência dos equipamentos presentes na residência por cômodo

Cômodo	Equipamento	Potência
Quarto 1	Lâmpada LED	9 W
	Notebook	65 W
	Fontes (carregadores)	15 W
Quarto 2 (Suíte)	Lâmpada LED	9 W
	Televisão LED	50 W
	Fontes (carregadores)	15 W
Quarto 3 (escritório)	Lâmpada LED	9 W
	Computador	250 W
	Fontes (carregadores)	15 W
	Impressora	90 W
Banheiro 1 (lavabo)	Lâmpada LED	9 W
Banheiro 2 (Suíte)	Lâmpada LED	9 W
	Chuveiro elétrico	6000 W
	Secador de cabelo	1100 W
Banheiro 3	Lâmpada LED	9 W
	Chuveiro elétrico	6000 W
Sala	Lâmpada LED	12 W
	Televisão LED	50 W
	Ar-Condicionado	1450 W
	Caixa de som	100 W
Cozinha	Lâmpada LED	12 W
	Geladeira	300 W
	Fogão 4 bocas	1500 W
	Micro-ondas	750 W
Área de Serviço	Lâmpada LED	12 W
	Máquina de Lavar	1000 W
	Ferro Elétrico	1000 W
Corredor	Lâmpada LED	9 W

Fonte: o Autor.

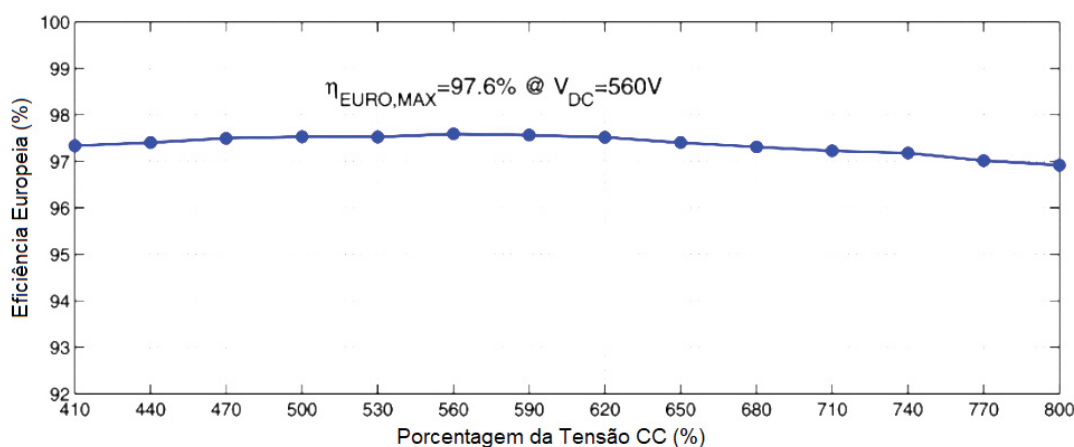
Está sendo proposto a troca de fontes CA/CC por CC/CC, essas fontes estavam utilizando a energia diretamente da rede de distribuição da concessionária de energia. Com a troca a tensão CC é obtida de um sistema fotovoltaico.

Eficiência do inversor fotovoltaico seguindo o modelo Europeu da eficiência do inversor fotovoltaico, onde essa eficiência é calculada através da equação (2):

$$\eta_{EURO} = 0,03.\eta_{5\%} + 0,06.\eta_{10\%} + 0,13.\eta_{20\%} + 0,01.\eta_{30\%} + 0,48.\eta_{50} + 0,2.\eta_{100} \quad [2]$$

A eficiência europeia em diferentes níveis de tensão CC é apresentada na Figura 11.

Figura 11 – Taxa de eficiência de inversores fotovoltaicos CC.



Fonte: Adaptado de VALENTINI, et al (2008).

As taxas de eficiência nos componentes do sistema de energia estão descritas, na Tabela 3. A tabela é proveniente de uma pesquisa realizada por Vossos et al.(2017) e os valores obtidos através da revisão da literatura proposta pelo autor.

Tabela 4 – Taxa de eficiência dos conversores

Componente	Eficiência (%) Média dos valores
Retificador central CA-CC	98% (25kW)
Inversor CC-CA	97%
Conversor CC-CC (380V para 24/48V)	91% (0-1kW) 98% (1-5kW)
MPPT e controle de carga	98%
Conversor CA-CC (alta potência)	94%
Conversor CA-CC (baixa potência)	88%

Fonte: Fonte: Adaptado de VOSSOS, et al (2017).

Levando em consideração os dados obtidos na eficiência de conversão de inversores fotovoltaicos e a eficiência dos conversores CA/CC e CC/CC. Foi possível estimar os valores do consumo em CC.

Os valores de consumo dos equipamentos operando em CA estão no Quadro 8 abaixo:

Quadro 8 – Consumo dos equipamentos em CA.

Equipamento	Quant.	Potência (W)	Tempo Ligado (h)	Consumo (kWh)
Lâmpada LED corredor	1	9	5	0,05
Lâmpada LED quarto 1	1	9	6	0,06
Lâmpada LED quarto 2	1	9	6	0,06
Lâmpada LED quarto 3	1	9	10	0,10
Lâmpada LED banheiro 1	1	9	4	0,04
Lâmpada LED banheiro 2	1	9	4	0,04
Lâmpada LED banheiro 3	1	9	4	0,04
Lâmpada LED sala	1	12	7	0,09
Lâmpada LED cozinha	1	12	7	0,09
Lâmpada LED área de serviço	1	12	2,5	0,03
Notebook	1	65	3,5	0,26
Televisão LED quarto	1	50	3	0,17
Computador	1	250	10	2,81
Impressora	1	90	10	1,01
Secador de cabelo	1	1100	0,5	0,62
Televisão LED sala	1	50	7	0,39
Ar-Condicionado	1	1450	4	6,52
Caixa de som	1	100	1	0,11
Geladeira	1	300	24	8,09
Micro-ondas	1	750	1	0,84
Máquina de Lavar	1	1000	2,5	2,81
Ferro Elétrico	1	1000	1,5	1,69
Fontes (carregadores)	5	15	5	6,69
Consumo total				32,63 kWh
Consumo total mensal				978,85 kWh

Fonte: o Autor.

Os equipamentos que apresentaram os maiores consumos foram a geladeira que fica ligada o dia inteiro, o ar-condicionado que fica 4 horas ligado, porém este não fica ligado todos os meses do ano, mas para efeitos de cálculos será

considerado ligado todos os meses. As fontes (carregadores) representam todas as pequenas fontes da residência estas apresentam um consumo considerável em CA.

Alguns dos equipamentos existentes como os chuveiros e fogão elétrico como são equipamentos resistivos possuem consumos iguais. O que pode ser sugerido é a troca do chuveiro elétrico por boiler com aquecimento solar, considerando que também será instalado o sistema fotovoltaico na residência.

Os valores de consumo dos equipamentos operando em CC estão no Quadro 9 abaixo:

Quadro 9 – Consumo dos equipamentos em CA.

Equipamento	Quant.	Potência (W)	Tempo Ligado (h)	Consumo (kWh)
Lâmpada LED corredor	1	9	5	0,05
Lâmpada LED quarto 1	1	9	6	0,05
Lâmpada LED quarto 2	1	9	6	0,05
Lâmpada LED quarto 3	1	9	10	0,09
Lâmpada LED banheiro 1	1	9	4	0,04
Lâmpada LED banheiro 2	1	9	4	0,04
Lâmpada LED banheiro 3	1	9	4	0,04
Lâmpada LED sala	1	12	7	0,09
Lâmpada LED cozinha	1	12	7	0,09
Lâmpada LED área de serviço	1	12	2,5	0,03
Notebook	1	65	3,5	0,23
Televisão LED quarto	1	50	3	0,15
Computador	1	250	10	2,54
Impressora	1	90	10	0,92
Secador de cabelo	1	1100	0,5	0,56
Televisão LED sala	1	50	7	0,36
Ar-Condicionado	1	1450	4	5,90
Caixa de som	1	100	1	0,10
Geladeira	1	300	24	7,32
Micro-ondas	1	750	1	0,76
Máquina de Lavar	1	1000	2,5	2,54
Ferro Elétrico	1	1000	1,5	1,53
Fontes (carregadores)	5	15	5	6,05
Consumo total				29,52 kWh
Consumo total mensal				885,67 kWh

Fonte: o Autor.

Assim como no sistema CA, os equipamentos que apresentaram os maiores consumos foram a geladeira, ar-condicionado e as fontes (carregadores).

O Quadro 10 apresenta a comparação dos valores dos gastos de energia dos equipamentos em redes CA e redes CC, Quadros 8 e 9 respectivamente.

Quadro 10 – Comparação de consumo dos equipamentos em CA e CC

Equipamento	kWh em CA	kWh em CC	kWh economizado
Lâmpadas LED 9W	0,39	0,36	0,03
Lâmpadas LED 12W	0,22	0,20	0,02
Notebook	0,26	0,23	0,03
Fontes CC	6,69	6,05	0,64
Televisores	0,56	0,51	0,05
Computador	2,81	2,54	0,27
Impressora	1,01	0,92	0,09
Secador de cabelo	0,62	0,56	0,06
Ar-condicionado	6,52	5,90	0,62
Caixa de som	0,11	0,10	0,01
Geladeira	8,09	7,32	0,77
Micro-ondas	0,84	0,76	0,08
Máquina de lavar	2,81	2,54	0,27
Ferro elétrico	1,69	1,53	0,16
Total Economizado			3,1 kWh
Economia Mensal			93 kWh

Fonte: o Autor.

Comparando os consumos dos sistemas CA e CC pode-se notar que os equipamentos que consomem mais energia acabam “puxando” a economia para eles, assim apresentando as maiores reduções de energia utilizada.

A economia energética encontrada, trocando a alimentação dos equipamentos de conversores CA/CC para CC/CC, foi de 93 kW, representa cerca de 9% do consumo mensal utilizando o sistema convencional de energia.

Para representar com valores mais plausíveis será considerado a tarifa convencional do grupo B1 residencial, da COPEL, presente na Figura 12, e realizando uma estimativa para 6 anos. Segundo a Resolução Normativa ANEEL Nº414 de 09/09/2010, o grupo B é composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV, caracterizado pela tarifa monômnia e subdividido nos seguintes subgrupos: a) B1 - residencial; b) B2 - rural; c) B3 - demais classes; e d) B4 - Iluminação Pública.

Figura 12 – Tarifa grupo B1 residencial, COPEL

Residencial			
Residencial			
		TE (R\$/kWh)	TUSD (R\$/kWh)
Convencional	Sem imposto	0,28890	0,00000
	Com imposto	0,42991	0,40165
Fora de Ponta			
Branca	Sem imposto	0,27536	0,19856
	Com imposto	0,40976	0,29548
	Intermediário		
	Sem imposto	0,27536	0,38018
	Com imposto	0,40976	0,56574
	Ponta		
	Sem imposto	0,43787	0,56180
	Com imposto	0,65159	0,83601

Fonte: COPEL (2022).

Realizando os cálculos para os consumos encontrados para estimar a economia resultante foi gerada a tabela abaixo:

Tabela 5 – Comparação dos consumos CA e CC e economia gerada diariamente, mensalmente, anualmente e para estimativa de 6 anos em kWh.

	Diário (kWh)	Mensal (kWh)	Anual (kWh)	6 Anos (kWh)
Consumo CA	32,63	978,9	11747	70481
Consumo CC	29,52	885,6	10627	63763
Economia	3,11	93,3	1119,6	6717,6

Fonte: o Autor.

Após a obtenção dos consumos e aplicando a tarifa convencional do grupo B1, com impostos TE=0,42991 (R\$/kWh), conforme a tabela abaixo:

Tabela 6 – Comparação dos consumos CA e CC e economia gerada diariamente, mensalmente, anualmente e para estimativa de 6 anos R\$

	Diário (R\$)	Mensal (R\$)	Anual (R\$)	6 Anos (R\$)
Consumo CA	R\$ 14,03	R\$ 420,84	R\$ 5.050,07	R\$ 30.300,40
Consumo CC	R\$ 12,69	R\$ 380,73	R\$ 4.568,74	R\$ 27.412,44
Economia	R\$ 1,34	R\$ 40,11	R\$ 481,33	R\$ 2.887,96

Fonte: o Autor

A economia resultante dessa estimativa representada pela redução de perdas de 9% foi R\$ 481,33 anualmente e para a estimativa de 6 anos R\$ 2887,96.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou uma análise de estimativa econômica do consumo residencial considerando as redes convencional CA e a rede proposta CC.

O levantamento dos principais trabalhos acadêmicos resultou em um banco de 13 artigos com maior alinhamento com o tema proposto. Foram utilizados também documentos relevantes ao tema como o documento do CIGRE e a NBR 5410. Através da revisão da literatura propôs-se detalhadamente os principais requisitos para um circuito de distribuição de BT em CC residencial.

Um estudo econômico foi desenvolvido propondo a eficiência da conversão de energia através da utilização dos conversores CC/CA, CA/CC e CC/CC. Por fim, estimou-se o consumo energético de uma residência considerando as perdas dos conversores em redes CC e CA de baixa tensão.

A estimativa proposta apresentou uma redução no consumo energético residencial de 9%, realizando a troca de conversores CA/CC por CC/CC, o valor que essa taxa representa seria anualmente R\$481,33 e numa estimativa de 6 anos R\$2887,96.

Como sugestões de trabalhos futuros propõe-se a validação do estudo proposto para sistemas reais, verificar os custos das trocas dos conversores, análise detalhada das questões de segurança (área de segurança do trabalho) e o tempo de *payback* da troca dos equipamentos através da economia gerada.

7 REFERÊNCIAS

- [1] EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/eficiencia-energetica>>. Acesso em: 22/04/2021.
- [2] G. AlLee and W. Tschudi, "Edison Redux: 380 Vdc Brings Reliability and Efficiency to Sustainable Data Centers," in IEEE Power and Energy Magazine, vol. 10, no. 6, pp. 50-59, Nov.-Dec. 2012, doi: 10.1109/MPE.2012.2212607.
- [3] B. T. Patterson, "DC, Come Home: DC Microgrids and the Birth of the "Enernet", " in IEEE Power and Energy Magazine, vol. 10, no. 6, pp. 60-69, Nov.-Dec. 2012, doi: 10.1109/MPE.2012.2212610.
- [3] BEN. Balanço Energético Nacional. Relatório Síntese. EPE. MME. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/BEN_S%C3%ADntese_2020_PT.pdf>. Acesso em 26/06/2021
- [4] G. F. Reed, B. M. Grainger, A. R. Sparacino and Z. Mao, "Ship to Grid: Medium-Voltage DC Concepts in Theory and Practice," in IEEE Power and Energy Magazine, vol. 10, no. 6, pp. 70-79, Nov.-Dec. 2012, doi: 10.1109/MPE.2012.2212613.
- [5] ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/regulacao-da-distribuicao/-/asset_publisher/nHNpDfkNeRpN/content/regulacao-dos-servicos-de-distribuicao/656827?inheritRedirect=false&redirect=https%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fregulacao-da-distribuicao%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_nHNpDfkNeRpN%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-2%26p_p_col_count%3D4. Acesso em: 15/07/2021.
- [6] ABRADÉE. Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica. Disponível em: < <https://www.abradee.org.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia/>>. Acesso em: 15/07/2021.
- [7] J.J. Justo, F. Mwasilu, J. Lee, J.W. Jung. AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: a review. Renew Sustain Energy Rev, 24 (2013), pp. 387-405.

- [8] COPEL – Companhia Paranaense de Energia Elétrica. Disponível em: <<https://www.copel.com/hpcweb/microrredes/>>. Acesso em: 22/07/2021.
- [9] IEEE Power and Energy Society - Smart Grid: reinventing the electric power system, 2012.
- [10] Alaboudy AHK, Zeineldin HH, Kirtley JL. Microgrid stability characterization subsequent to fault-triggered islanding incidents. IEEE Transactions on Power Delivery 2012;27(2):658–69.
- [11] Nikonowicz L, Milewski J. Virtual power plants—general review: structure, application and optimization. Journal of Power Technologies 2012;92(3): 135–149.
- [12] ABESCO. Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia. Disponível em: <<http://www.abesco.com.br/pt/o-que-e-eficiencia-energetica-ee/>>. Acesso em: 22/04/2021.
- [13] HERRING, Horace. Energy efficiency—a critical view. Energy, v. 31, n. 1, p. 10-20, 2006.
- [14] SIRAJ, Kiran; KHAN, Hassan Abbas. DC distribution for residential power networks—A framework to analyze the impact of voltage levels on energy efficiency. Energy Reports, v. 6, p. 944-951, 2020.
- [15] LIU, Zifa; LI, Mengyu. Research on energy efficiency of DC distribution system. AASRI procedia, v. 7, p. 68-74, 2014.
- [16] JAFFE, Adam B.; NEWELL, Richard G.; STAVINS, Robert N. Economics of energy efficiency. Encyclopedia of energy, v. 2, p. 79-90, 2004.
- [17] MORITZ, R. M. B. Estudo de Perdas por Comutação, condução e Cálculo Térmico de um Inversor Trifásico de Dois Níveis. Trabalho de Conclusão de Curso, UDESC, Joinville, 2014.
- [18] LEVY, Yair; ELLIS, Timothy J. A systems approach to conduct an effective literature review in support of information systems research. Informing Science, v. 9, 2006.

- [19] Enssilin, L.; Ensslin, S. R.; Lacerda, R. T. O.; Tasca, J. E. Processo de Seleção de Portfólio Bibliográfico. Processo técnico com patente de registro pendente junto ao INPI. Brasil, 2010.
- [20] D. L. Gerber, V. Vossos, W. Feng, A. Khandekar, C. Marnay and B. Nordman, "A simulation based comparison of AC and DC power distribution networks in buildings," 2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM), 2017, pp. 588-595, doi: 10.1109/ICDCM.2017.8001107.
- [21] X. Lu, J. M. Guerrero, K. Sun and J. C. Vasquez, "An Improved Droop Control Method for DC Microgrids Based on Low Bandwidth Communication With DC Bus Voltage Restoration and Enhanced Current Sharing Accuracy," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 4, pp. 1800-1812, April 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2266419.
- [22] L. E. Zubieta, "Are Microgrids the Future of Energy?: DC Microgrids from Concept to Demonstration to Deployment," in IEEE Electrification Magazine, vol. 4, no. 2, pp. 37-44, June 2016, doi: 10.1109/MELE.2016.2544238.
- [23] Ahmed T. Elsayed, Ahmed A. Mohamed, Osama A. Mohammed, DC microgrids and distribution systems: An overview, Electric Power Systems Research, Volume 119, 2015, Pages 407-417, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.10.017>.
- [24] M. Noritake, K. Yuasa, T. Takeda, H. Hoshi and K. Hirose, "Demonstrative research on DC microgrids for office buildings," 2014 IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/INTLEC.2014.6972180.
- [25] U. Manandhar, A. Ukil and T. K. Kiat Jonathan, "Efficiency comparison of DC and AC microgrid," 2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA), 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2015.7387051.
- [26] Loschi, H. , Leon, J. , Iano, Y. , Filho, E. , Conte, F. , Lustosa, T. and Freitas, P. (2015) Energy Efficiency in Smart Grid: A Prospective Study on Energy Management

Systems. Smart Grid and Renewable Energy, 6, 250-259. doi: 10.4236/sgre.2015.68021.

[27] R. Weiss, L. Ott and U. Boeke, "Energy efficient low-voltage DC-grids for commercial buildings," 2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM), 2015, pp. 154-158, doi: 10.1109/ICDCM.2015.7152030.

[28] VILLANUEVA, Daniel et al. Towards DC Energy Efficient Homes. Applied Sciences, v. 11, n. 13, p. 6005, 2021.

[29] CIGRE - Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos. Medium voltage direct current (MVDC) grid feasibility study. Reference: 793. Grupo C6 Active distribution systems and distributed energy resources, 2020.

[30] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR5410: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2004.

[31] MOHANTY, Rabindra; PRADHAN, Ashok Kumar. Protection of smart DC microgrid with ring configuration using parameter estimation approach. IEEE Transactions on Smart Grid, v. 9, n. 6, p. 6328-6337, 2017.

[32] SALONEN, Pasi et al. Protection scheme for an LVDC distribution system. In: CIRED 2009-20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution-Part 1. IET, 2009. p. 1-4.

[33] CEMIG, Potência Média de Aparelhos Residenciais e Comerciais, 2020. Disponível em: <<https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2020/10/POTENCIA-MEDIA-DE-APARELHOS-RESIDENCIAIS-E-COMERCIAIS.pdf>>. Acesso em: 18/02/2022.

[34] VALENTINI, Massimo et al. PV inverter test setup for European efficiency, static and dynamic MPPT efficiency evaluation. In: 2008 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. IEEE, 2008. p. 433-438.

[35] VOSSOS, Vagelis et al. Review of dc power distribution in buildings: A technology and market assessment. LBNL Report, Berkeley, 2017.

[36] COPEL– Companhia Paranaense de Energia Elétrica. Disponível em: <https://www.copel.com/site/copel-distribuicao/tarifas-de-energia-eletrica/#grupoB?utm_source=taxas-tarifas&utm_medium=grupoB&utm_campaign=menu-lateral>. Acesso em: 15/03/2022.