



Análise comparativa entre microrredes em corrente contínua e em corrente alternada

Leonardo Rohsner de Macêdo

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e de Gestão de Bragança para
obtenção do Grau de Mestre em Energias Renováveis e Eficiência Energética.

Trabalho orientado por:
Prof. Ângela Paula Ferreira
Prof. Paulo Leitão
Prof. João Amin Moor Neto

Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo Júri.

Bragança
2018-2019



Análise comparativa entre microrredes em corrente contínua e em corrente alternada

Leonardo Rohsner de Macêdo

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e de Gestão de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Energias Renováveis e Eficiência Energética.

Trabalho orientado por:

Prof. Ângela Paula Ferreira

Prof. Paulo Leitão

Prof. João Amin Moor Neto

Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo Júri.

Bragança

2018-2019

Dedicatória

Dedico esse trabalho à minha mãe, Regina Célia Rohsner, que me amparou desde a infância para que eu pudesse chegar onde estou.

Agradecimentos

Agradeço à professora Ângela Ferreira, pela oportunidade de estudar um tópico tão importante e pelo auxílio necessário para um jovem inexperiente. Agradeço também ao professor Paulo Leitão e ao pesquisador Adriano Ferreira, que me forneceram dados de consumo de uma microrrede, permitindo que fosse feito um estudo embasado em dados reais. Não posso deixar de agradecer ao meu co-orientador João Amin Moor Neto, que me auxiliou, tanto na elaboração dos modelos, quanto na revisão do texto.

Por fim, não posso deixar de agradecer aos meus amigos Paulo Eduardo e João Bitencourt que, embora não compreendessem o assunto, me auxiliaram com a sua revisão, e a minha namorada Carolina Miller, por seu suporte emocional e auxílio com a correção nesse período turbulento.

Resumo

As diferenças construtivas entre os conversores eletrônicos de potência faz com que esses equipamentos apresentem diferentes eficiências. Esse fato, em conjunto com o aumento no uso desses conversores, para conectar com cargas, geração e armazenamento baseados em outras tecnologias, como a corrente contínua ou sistemas em corrente alternada desacoplados, faz com que seja útil uma análise para reavaliar as redes de distribuição, buscando encontrar a melhor solução para o cenário atual.

O estudo compara as tecnologias em três vertentes. A avaliação das capacidades de transmissão das arquiteturas utiliza a queda de tensão e a corrente máxima dos condutores para comparar diversas arquiteturas em redes de distribuição, com isso é possível notar que, para certas tensões, redes em corrente contínua apresentam melhor capacidade de transmissão do que as redes convencionais em corrente alternada.

O estudo de perdas avaliou, com o auxílio de dados empíricos obtidos na literatura, as perdas de conversão causadas pela conexão da rede com as cargas, a geração e o armazenamento. Os resultados obtidos demonstraram que, com a exceção do transformador para conexão da rede com a subtransmissão, o uso de redes em corrente contínua resulta em menos perdas para o sistema.

Por último, utilizando as tarifas de energia de diversos países, foi feito um estudo econômico, permitindo avaliar o custo anual, com cada arquitetura, para o consumidor. O estudo apresentou uma economia com o uso de redes em corrente contínua, sendo essa ainda maior caso a rede possua geração e armazenamento.

Palavras-chave: Corrente Alternada; Corrente Contínua; Microrede; Eletrônica de Potência.

Abstract

The constructive differences between the power electronic converters means that these devices present different efficiencies. This fact, coupled with the increase in use of these converters, for connection to loads, generation and storage based on other technologies, such as direct current, or uncoupled alternating current systems, makes useful an analysis to reevaluate the distribution networks, seeking the best solution for the current scenario.

The study compares the technologies in three branches. The transmission capacity of the architectures uses the voltage drop and the maximum current of the conductors to compare several architectures for distribution networks, with it, it is possible to notice that, for certain voltages, direct current present a better transmission capacity than the conventional alternating current networks.

The loss study evaluated, with the aid of empirical data from the literature, the conversion losses, caused by the connection of the grid to the loads, the generation and the storage. The results obtained showed that, with the exception of the transformers used to connect the network to the subtransmission grid, the use of direct current results in fewer losses to the system.

Lastly, using the energy prices from several countries, an economical study was developed, allowing the evaluation of the annual cost, with each architecture, to the consumer. The study presented an economy with the use of direct current networks, this being even larger if the network contains generation and storage.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	2
1.2	Justificativa	3
1.3	Objetivos	3
1.4	Metodologia e Trabalho Realizado	3
1.5	Organização do Trabalho	4
2	Microrredes e suas características	5
2.1	Microrredes	5
2.1.1	Microrredes em Corrente Alternada	6
2.1.2	Microrredes em Corrente Contínua	8
2.1.3	Microrredes Híbridas	11
2.2	Eletrônica de Potência e suas Características	13
2.2.1	Interface Eletrônica	13
2.2.2	Eficiência	16
2.2.3	Consequências	17
3	Análise de Capacidade de Transmissão	21
3.1	Metodologia	22
3.2	Resultados	24
4	Análise de Perdas e Eficiência Energética	29

4.1	Modelos das Microrredes	29
4.2	Diagramas de Potência	33
4.2.1	Cargas	33
4.2.2	Geração	36
4.3	Metodologia	37
4.4	Resultados	43
4.4.1	Perdas nas Cargas	45
4.4.2	Perdas na Geração e no Armazenamento	47
4.4.3	Perdas na Distribuição e Conexão com a Rede	49
5	Análise Econômica	55
5.1	Metodologia	55
5.2	Resultados	57
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	67
6.1	Conclusões	67
6.2	Trabalhos Futuros	69
A	Figuras e Tabelas	A1

Lista de Tabelas

2.1	Perdas anuais por setor do sistema elétrico estadunidense (Fonte: [8])	18
2.2	Maiores cargas residenciais (Fonte: [8]) e suas eficiências em sistemas DC e AC (Fontes: [3], [29])	19
4.1	Característica das estações de carga de veículos elétricos	30
4.2	Configurações da rede	31
4.3	Perdas e eficiências gerais das arquiteturas	53
A.1	Características de condutores de cobre	A2

Lista de Figuras

2.1	Tipos de configuração de redes AC	7
2.2	Microrrede AC (Fonte: [16]) (DER: <i>Distributed Energy Resources</i>	8
2.3	Microrrede em DC (Fonte: [18])	10
2.4	Tipos de configuração de redes DC	11
2.5	Microrrede híbrida (Fonte: [19])	11
2.6	Inversor Trifásico (Fonte: [23])	14
2.7	Eficiência de conversores AC-DC, DC-DC e DC-AC (Fonte: [3])	16
2.8	Eficiência do retificador (Fonte: [5]) e do conversor DC-DC (Fonte:[9]) . . .	17
3.1	Capacidade de transmissão de potência para 25mm ²	24
3.2	Capacidade máxima de transmissão de potência para cada seção de condutor	26
3.3	Seção de condutor equivalente em transmissão de potência com 375V DC .	26
3.4	Distância de máxima potência para uma queda de tensão de 2%	27
3.5	Distância de máxima potência para uma queda de tensão de 5%	27
4.1	Microrrede com geração e armazenamento centralizados	32
4.2	Microrrede com geração e armazenamento distribuídos entre as casas . . .	32
4.3	Microrrede sem geração e armazenamento	33
4.4	Diagrama de carga fogão de indução	34
4.5	Diagrama de carga máquina de lavar louça	35
4.6	Diagrama de carga garagem	35
4.7	Diagrama de carga iluminação	35
4.8	Diagrama de carga fileiras fotovoltaicas	36

4.9	Diagrama de carga das estações de carregamento de veículos elétricos . . .	37
4.10	Capacidade de transmissão de potência do condutor selecionado de 70mm ²	37
4.11	Bloco de conexão com a rede por transformador convencional	38
4.12	Bloco de sistema de condutores de distribuição para redes AC (3Φ+N) . .	39
4.13	Bloco de fonte controlada de potência	39
4.14	Bloco de conversor DC-DC	40
4.15	Bloco de conversor AC-DC	41
4.16	Calculadora de eficiência por potência nominal	41
4.17	Calculadora de eficiência por relação de potência	42
4.18	Calculadora de eficiência por relação de tensão	42
4.19	Modelo Simulink de sistema AC com geração e armazenamento distribuídos e conexão com a rede por SST	43
4.20	Modelo Simulink de sistema DC com geração e armazenamento centraliza- dos e conexão com a rede por SST	44
4.21	Perdas no circuito LI	45
4.22	Perdas diárias nas cargas	46
4.23	Perdas anuais nas cargas	46
4.24	Eficiência das cargas	47
4.25	Perdas diárias na geração e no armazenamento	48
4.26	Perdas anuais na geração e no armazenamento	48
4.27	Eficiência da geração e do armazenamento	49
4.28	Perdas na conexão com a rede em um sistema centralizado	50
4.29	Perdas na distribuição em um sistema distribuído	51
4.30	Perdas na distribuição e na conexão com a rede	52
4.31	Eficiência da distribuição e da conexão com a rede	52
5.1	Modelo de cobrança em Portugal	56
5.2	Modelo de cobrança em outros países	56
5.3	Custo instantâneo da energia em Portugal com tarifa simples	58

5.4	Custo instantâneo da energia em Portugal com tarifa bi-horária	59
5.5	Custo instantâneo da energia em Portugal com tarifa tri-horária	60
5.6	Custo anual da energia em Portugal	61
5.7	Custo anual da energia em outros países	62
5.8	Economia anual média em Portugal	63
5.9	Economia anual média em outros países	64
5.10	Economia anual média em Portugal, considerando os custos fixos	65
A.1	Capacidade de transmissão de potência para 0.5mm^2	A1
A.2	Capacidade de transmissão de potência para 1.0mm^2	A2
A.3	Capacidade de transmissão de potência para 1.5mm^2	A3
A.4	Capacidade de transmissão de potência para 2.5mm^2	A3
A.5	Capacidade de transmissão de potência para 4mm^2	A4
A.6	Capacidade de transmissão de potência para 6mm^2	A4
A.7	Capacidade de transmissão de potência para 10mm^2	A5
A.8	Capacidade de transmissão de potência para 16mm^2	A5
A.9	Capacidade de transmissão de potência para 35mm^2	A6
A.10	Capacidade de transmissão de potência para 50mm^2	A6
A.11	Capacidade de transmissão de potência para 70mm^2	A7
A.12	Capacidade de transmissão de potência para 95mm^2	A7
A.13	Capacidade de transmissão de potência para 120mm^2	A8
A.14	Capacidade de transmissão de potência para 150mm^2	A8
A.15	Capacidade de transmissão de potência para 185mm^2	A9
A.16	Capacidade de transmissão de potência para 240mm^2	A9
A.17	Capacidade de transmissão de potência para 300mm^2	A10
A.18	Capacidade de transmissão de potência para 400mm^2	A10
A.19	Perdas no circuito CT	A11
A.20	Perdas no circuito DW	A11
A.21	Perdas no circuito GA	A12

A.22 Perdas na conexão com a rede em um sistema distribuído	A12
A.23 Perdas na distribuição em um sistema centralizado	A13

Siglas

AC Corrente Alternada, *Alternating Current*. xiii–xv, 1–10, 12, 13, 16–19, 21–25, 28–31, 39–41, 43, 47, 52, 53, 55, 65–68

BRL Real Brasileiro, *Brasilian Real*. 57

CT Fogão de indução, *Induction cooktop*. xvi, 33, 34, 45, 46, A11

DC Corrente Contínua, *Direct Current*. xiii–xv, 1–5, 7–14, 16–19, 21–26, 28–31, 34, 40, 41, 43, 44, 46, 47, 52, 53, 55, 58, 65–69

DW Máquina de lavar louça, *Dishwasher*. xvi, 34, 45, 46, A11

GA Garagem, *Garage*. xvi, 34, 45, 46, A12

LI Iluminação, *Lighting*. xv, 34, 45, 46

PV Fileira Fotovoltaica, *Photovoltaic String*. 36, 47, 49, 52

PWM Modulação por Largura de Pulsos, *Pulse Width Modulation*. 13

SST Transformador de Estado Sólido, *Solid State Transformer*. xv, 8, 9, 12, 18, 30, 31, 43, 44, 52, 53, 68, 69

ST Armazenamento, *Storage*. 36, 47, 49, 52

USD Dólar Estadunidense, *United States Dollar*. 57

V2G Veículo para Rede, *Vehicle to Grid*. 15, 29–31, 36, 58, 65, 68

Capítulo 1

Introdução

Após a criação da primeira patente para uma lâmpada incandescente em 1879, a busca por sistemas que permitissem o abastecimento e a distribuição de eletricidade tornou-se incessante. A principal disputa, que ocorreu entre Thomas Edison, com a *Edison Manufacturing Company* e George Westinghouse e sua empresa, a *Westinghouse Electric Corporation*, conhecida como a Guerra das Correntes [1], foi a busca por uma solução rentável e eficiente para sistemas de geração, transmissão e distribuição elétrica. A peça chave para a vitória, e atual abundância, de sistemas em Corrente Alternada, *Alternating Current* (AC) sobre os sistemas em Corrente Contínua, *Direct Current* (DC) foi a invenção dos transformadores elétricos, por Nikola Tesla. Esses equipamentos são capazes de transmitir potência elétrica entre redes com tensões diferentes, tanto elevando, quanto reduzindo, a tensão da saída em relação à entrada. Isso permitiu que a transmissão de energia fosse feita em altas tensões, garantindo uma redução drástica nas perdas, além de um aumento na capacidade de transmissão dos condutores.

O uso de diodos, tiristores e transistores expandiu as possibilidades para sistemas elétricos, criando os sistemas eletrônicos que viabilizaram a computação existente atualmente. O uso desses equipamentos para transmissão de potência, e controle de tensão, frequência e corrente, é conhecido por eletrônica de potência. As principais vantagens desses equipamentos são o fato de eles não conterem partes móveis, o que reduz a manutenção, além de serem, em geral, mais compactos e possuírem a capacidade de melhorar

a qualidade da potência [2]. Atualmente, o desenvolvimento nesse ramo gerou equipamentos mais compactos e mais eficientes, que suportam maiores tensões, enquanto ainda permitem a transferência de potência entre sistemas de tensões distintas, o que permitiu a transmissão de energia com sistemas em DC. Além disso, conversores de eletrônica de potência operam com maior eficiência em redes de DC, principalmente caso sejam de baixa potência [3]. Com os resultados competitivos desses equipamentos, os benefícios de sistemas em AC vêm se tornando menores e menos impactantes, gerando uma busca por alternativas mais eficientes.

Os benefícios, da tensão em AC para sistemas de transmissão em alta tensão e de distribuição em baixa tensão, vêm, portanto, sendo avaliados e comparados aos encontrados por redes DC, [3]–[7]. A eficiência de cargas que utilizam eletrônica de potência é maior com a alimentação em DC, sendo essas arquiteturas capazes de reduzir o consumo de cargas residenciais, comerciais e industriais, [8]. Os conversores associados à geração e ao armazenamento também são beneficiados por um sistema em DC, [4], [5], [9], tornando viável a opção de microrredes que utilizam essas tecnologias.

1.1 Motivação

Por benefícios econômicos, ambientais e sociais, o uso de fontes renováveis de energia vem aumentando com os anos [10]. Esse crescimento facilitou o uso de sistemas de geração distribuída, que são capazes de operar de forma desconectada com a rede de distribuição, podendo possuir, ainda, sistemas de armazenamento energético que garantam a sua estabilidade. Essas microrredes são vantajosas em regiões de difícil acesso da rede de distribuição, permitindo a alimentação elétrica de regiões que anteriormente não a possuíam [11], além de ser uma opção para consumidores que desejam aumentar a confiabilidade ou reduzir o custo com a energia, contribuindo para a difusão do uso de microrredes pelo mundo [4]. Como essas microrredes são sistemas que podem operar de forma isolada, é criada uma oportunidade para a implementação de sistemas DC, ou híbridos, onde em redes de distribuição convencional, as possibilidades para a implementação dessas redes é

mais restrita.

1.2 Justificativa

A falta de regulamentação, para sistemas DC em baixa tensão, retarda e reduz os investimentos em pesquisas na área de microrredes com essa tecnologia, além de reduzir o foco desses estudos. Níveis de tensão DC são sugeridos e comparados na literatura, [11]–[14], permitindo uma comparação mais específica entre sistemas das duas arquiteturas. Apesar disso, o baixo número de microrredes nesta arquitetura, [4], impede estudos mais concretos com avaliações empíricas.

1.3 Objetivos

O estudo busca comparar microrredes com alimentadores DC e AC, em aspectos de transmissão de potência, eficiência e economia. Comparando as arquiteturas em cenários distintos, de forma a compreender os pontos fortes e fracos de cada tecnologia, assim como avaliar as melhores opções para cada cenário.

1.4 Metodologia e Trabalho Realizado

A análise será iniciada por uma comparação, em capacidades de transmissão, das duas arquiteturas, permitindo compreender as dimensões, em termos de distância e potência, que beneficiariam uma arquitetura ou outra. Posteriormente, uma análise comparativa de perdas e eficiência permitirá compreender os equipamentos mais favorecidos por uma ou outra tecnologia, buscando os parâmetros, como potência de geração e armazenamento, tipo de conexão com a rede ou nível de tensão interna das cargas, que apresentem resultados favoráveis a sistemas DC ou aos AC. Por fim, uma análise econômica avaliará e comparará as arquiteturas em termos de custos anuais aos consumidores, também comparando cenários distintos.

1.5 Organização do Trabalho

A análise é iniciada por uma revisão bibliográfica, no Capítulo 2. O Capítulo 3 avalia a capacidade de transmissão das redes AC e DC, de forma comparativa. O Capítulo 4 simula microrredes com diversas arquiteturas, buscando compreender os efeitos dessas arquiteturas nas perdas provenientes da conversão de energia e do seu transporte. Já os efeitos dessas perdas no consumo residencial, assim como nos custos anuais com energia elétrica, são avaliados no Capítulo 5, enquanto as consequências das três análises são avaliadas no Capítulo 6.

Capítulo 2

Microrredes e suas características

A crescente presença de fontes renováveis, para geração elétrica distribuída, proporcionou a criação de microrredes, sistemas capazes de operar desconectados da rede de distribuição. O uso de interfaces eletrônicas é comum nessas redes, principalmente nos conversores que conectam a rede às cargas, aos geradores e aos elementos de armazenamento. A avaliação da presença dessa tecnologia, assim como o estudo das suas consequências para microrredes em AC e em DC, auxilia na compreensão do futuro das redes de distribuição com geração distribuída, permitindo uma melhor adaptação a seus efeitos.

2.1 Microrredes

Fontes renováveis de energia vêm tomando o mercado de energia elétrica. *Renewables 2018 Global Status Report*, [10], calcula que 70% do aumento na capacidade energética global, em 2017, foi proveniente de instalações de fontes renováveis, onde essa presença, principalmente no contexto de geração distribuída, permitiu a criação de microrredes, sistemas que, devido à grande variedade de configurações, podem ser distinguidos quanto às suas arquiteturas. Planas *et al.*, [4], divide as microrredes em AC e DC, já, em [15], são avaliadas, também, algumas configurações microrredes híbridas.

2.1.1 Microrredes em Corrente Alternada

Essas microrredes possuem um sinal de tensão AC, sendo compostas de um ou mais alimentadores de baixa tensão, cada um com seus condutores independentes, de forma a criar sistemas isolados entre si. Na Europa, a tensão, entre fase e neutro, em sistemas de baixa tensão, utiliza um valor eficaz de 230V, onde a tensão entre fases é de 400V e a frequência é de 50Hz. Já nos Estados Unidos, e em grande parte do Brasil, é utilizada uma tensão de 120V, entre fase e neutro, com uma frequência nominal de 60Hz. No caso de múltiplos alimentadores, um deles costuma ser utilizado para cargas essenciais e armazenamento, e os outros para as não essenciais, o que permite garantir uma melhor confiabilidade do alimentador essencial. microrredes AC são geralmente trifásicas com neutro ($3\Phi+N$), onde os três condutores possuem senoides defasadas em 120° entre si, essa configuração permite alimentar cargas de menor potência com a tensão fase-neutro, aumentando a segurança para o usuário, enquanto cargas maiores são conectadas a duas ou até três fases, utilizado principalmente em máquinas rotatórias. Esses sistemas também podem ser monofásicos ($1\Phi+N$), usado para regiões de baixo consumo por reduzir os custos de implementação, ou trifásicos sem neutro (3Φ), que só permite a conexão entre as fases, sendo a escolha da melhor opção dependente das dimensões da microrrede, tanto físicas quanto elétricas e energéticas. O esquemático na Figura 2.1 resume os tipos de configuração de redes AC, sendo replicados para cada alimentador utilizado. As microrredes em AC possuem uma alta confiabilidade quando conectadas à rede, principalmente em casos onde a conexão é feita por meio de transformadores convencionais, isso ocorre em consequência da robustez da rede de distribuição, pelo seu grande porte, sendo essas redes mais capazes de suportar contingências que ocorram na microrrede. A microrrede, por outro lado, é severamente abalada por falhas na rede, sendo necessários mecanismos de proteção e ilhamento para aumentar a confiabilidade nesse caso.

A transição de uma rede de distribuição para uma microrrede é mais simples em sistemas AC. A maturidade da tecnologia também significa que equipamentos de controle e proteção são mais disponíveis e possuem menor custo em geral, quando comparado aos

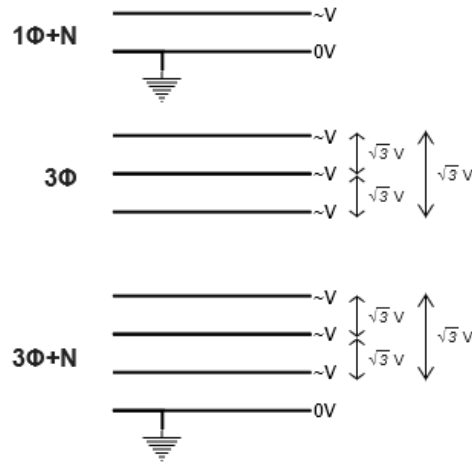


Figura 2.1: Tipos de configuração de redes AC

mesmos equipamentos para sistemas DC [4]. Esses fatores reduzem o custo de implementação de uma microrrede AC [15], sendo os custos de desenvolvimento de tecnologias para essa configuração também menores, devido à presença de mercado das mesmas [4]. Fontes renováveis de energia e equipamentos de armazenamento energético requerem uma interface eletrônica para conectar a uma microrrede AC. Módulos fotovoltaicos e bancos de baterias são equipamentos que geram uma tensão contínua, sendo necessária a conversão para AC, porém, como os módulos não são utilizados como carga ou armazenamento, não há utilidade em uma interface bidirecional ao conectá-los com a rede, sendo utilizado um conversor DC-AC, ou inversor, para a conexão. Baterias, por requererem carga e descarga, fazem uso de conversores AC-DC, ou retificadores, bidirecionais. Turbinas eólicas e volantes de inércia são equipamentos, de geração e armazenamento, respectivamente, que utilizam máquinas rotatórias, fornecendo, portanto, uma tensão alternada. Entretanto, por possuírem benefícios, provenientes da liberdade de variação da velocidade de rotação das máquinas e, por consequência, da frequência do sinal de tensão, torna-se mais eficiente, e portanto frequente, o uso de inversores, conversores AC-AC, para permitir a conexão desacoplada dos sistemas. Sistemas como pico-hídricas e termo-geradores utilizam, também, máquinas rotatórias, porém, possuem mecanismos de armazenamento energético, na forma de combustível e calor, no caso dos termo-geradores, e de volume e

altura de água em reservatórios, no caso das hídricas. Um exemplo de configuração para uma microrrede AC pode ser visto na Figura 2.2.

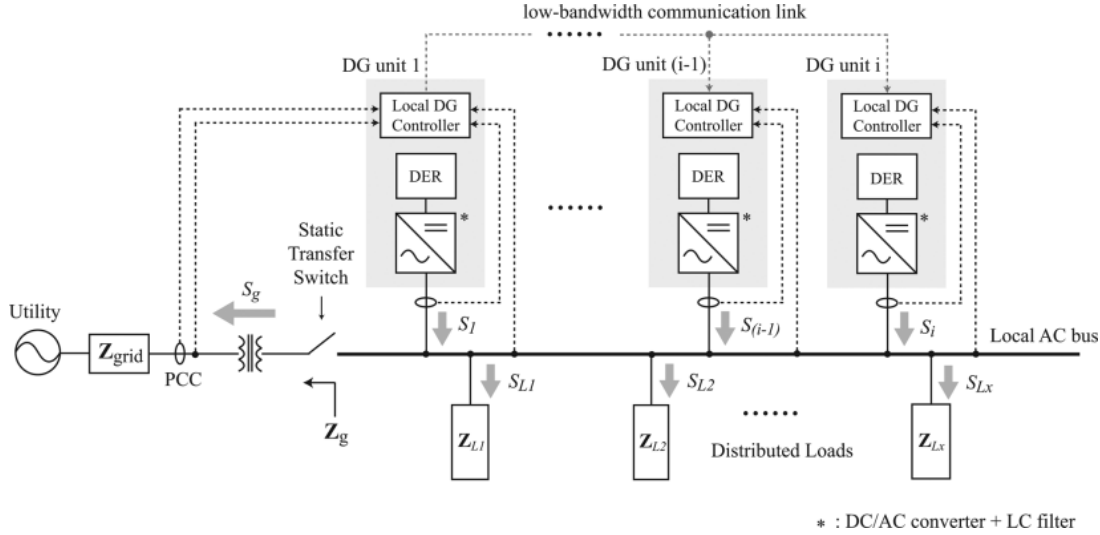


Figura 2.2: Microrrede AC (Fonte: [16]) (DER: *Distributed Energy Resources*)

Por este motivo, além de características operacionais desses equipamentos, estas fontes permitem uma conexão direta à microrrede AC, sendo, ainda, capazes de auxiliar na estabilidade da mesma. As características construtivas de equipamentos de uso doméstico são diversas, Savage *et al.*, [8], avalia, porém, que grande parte das cargas domiciliares operam, atualmente, internamente em DC, tornando necessário o uso de retificadores. Microrredes AC podem ser conectadas à rede de distribuição tanto por transformadores convencionais, quanto pelo uso do Transformador de Estado Sólido, *Solid State Transformer* (SST), um equipamento mais compacto, com menos aquecimento e que não utiliza óleo resfriador, reduzindo o risco de vazamento e despejo de poluentes, sendo, ainda, uma ótima ferramenta para o controle de potência reativa e a estabilidade da microrrede em caso de falha na rede de distribuição, [17].

2.1.2 Microrredes em Corrente Contínua

Propostas buscando reduzir o número de conversões entre as fontes energéticas e as cargas, essas redes estão presentes em sistemas isolados, como embarcações e veículos, assim

como redes de telecomunicações e subestações de energia, de forma a reduzir interferência indutiva no cabeamento de dados, além de aproveitar de sistemas de armazenamento com baterias, sem a necessidade de uma interface eletrônica, que reduziria a confiabilidade. As microrredes, nessa arquitetura, requerem o uso de um conversor AC-DC bidirecional para conectar com a rede de distribuição, podendo este ser um SST, conectado no seu barramento DC intermediário, ou um retificador bi-direcional. Esta conexão interfere tanto na confiabilidade, quanto na eficiência dessas redes, quando comparadas a uma microrrede AC com transformador convencional. Por outro lado, essas microrredes possuem uma operação mais simples, por não possuírem fluxo de potência reativa, nem necessitarem de controle de frequência ou fase [18]. Quanto à proteção dessas redes, devido à imaturidade da tecnologia e por não haver um instante natural com corrente zero, como é encontrado em sistemas AC, os equipamentos utilizados para sistemas DC são, atualmente, mais caros. Redes de baixa tensão conseguem, entretanto, operar utilizando equipamentos de proteção AC superdimensionados para suportar os valores de tensão e corrente encontrados [4], sendo uma alternativa economicamente favorável. Como o controle de tensão é feito, de forma desacoplada, pela interface com o sistema de distribuição, a qualidade da tensão dos alimentadores é pouco dependente da qualidade da rede principal, permitindo que algumas cargas sejam conectadas diretamente a esses alimentadores, sem a necessidade de um conversor de proteção [15]. Um exemplo de configuração para microrredes DC é apresentado na Figura

Fileiras fotovoltaicas e baterias são conectadas através de conversores DC-DC, principalmente, para reduzir o desgaste das baterias e aumentar a potência gerada nas fileiras fotovoltaicas, enquanto as fontes com tensão alternada requerem conversores AC-DC, bidirecionais no caso do armazenamento por volante de inércia. É sugerido em [12], [14] o uso de uma tensão DC reduzida ao alimentar cargas de baixa potência, de forma a aumentar a segurança dos equipamentos para o utilizador, portanto, sistemas de iluminação, assim como computadores e telefones celular, costumam requerer uma interface eletrônica, caso a tensão de entrada seja elevada. Cargas sensíveis são beneficiadas pelo uso de conversores DC-DC como proteção adicional, enquanto cargas de maior potência, como máquinas de

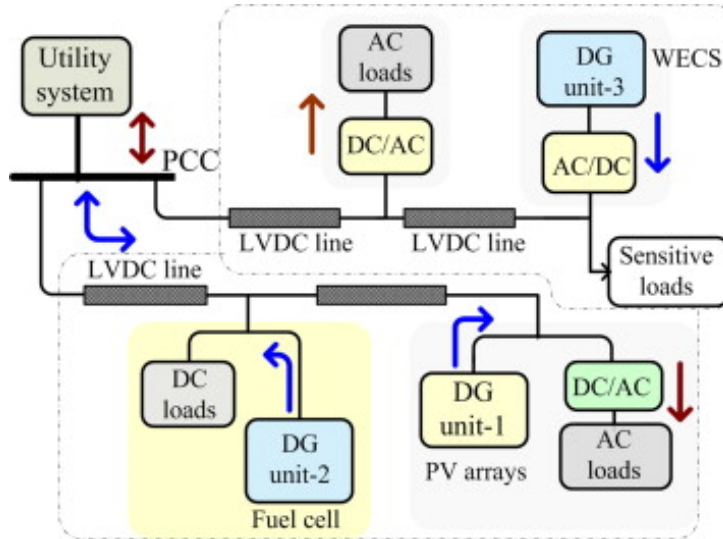


Figura 2.3: Microrrede em DC (Fonte: [18])

lavar roupa, geladeiras ou fornos de micro-ondas, podem ser conectados diretamente aos alimentadores, caso haja compatibilidade de tensão. As microrredes em DC podem ser estruturadas como monoplares, bipolares ou homoplares, podendo ainda possuir um ou mais alimentadores, assim como as AC. Uma configuração monopolar (**1P+N**) é mais simples, sendo composta por um condutor com uma tensão positiva e um condutor neutro. Essa configuração possui uma capacidade de transmissão de potência reduzida, quando comparada às configurações bipolar e homopolar. Sistemas bipolares (**2P**) são compostos de um condutor com tensão positiva e um com tensão negativa, dobrando a tensão efetiva nas cargas e permitindo uma maior capacidade de transmissão de potência. Um sistema homopolar (**2P+N**) é mais flexível, e é composto de um condutor positivo, um negativo e um neutro, fornecendo dois níveis de tensão, tendo como desvantagem o maior número de condutores utilizados, em relação às outras configurações. Um esquemático das três configurações é apresentado na Figura 2.4, um exemplo de uso dessa arquitetura é apresentado por Rodriguez *et al.*, [12], que ilustram um sistema com múltiplos alimentadores homoplares, permitindo diversos níveis de tensão, aumentando a capacidade de transmissão da rede, enquanto mantém a capacidade de alimentação de cargas de baixa potência.

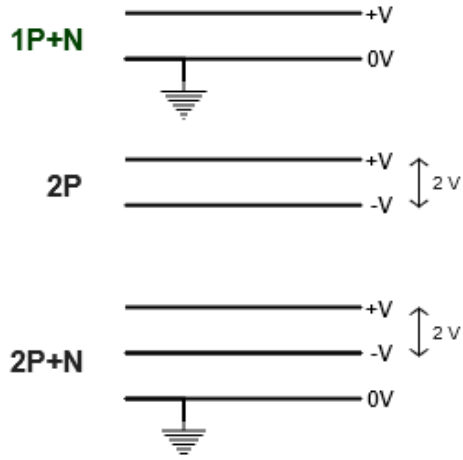


Figura 2.4: Tipos de configuração de redes DC

2.1.3 Microrredes Híbridas

Uma microrrede híbrida é usada para buscar o melhor relacionamento entre as vantagens de cada arquitetura. Um exemplo de microrrede híbrida pode ser visto na Figura 2.5.

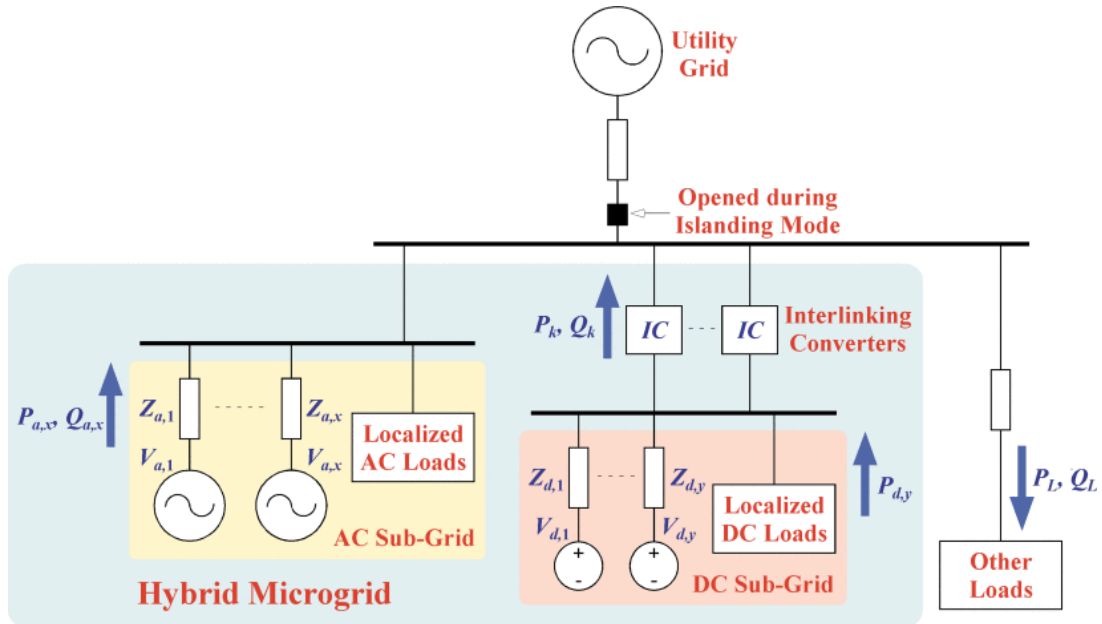


Figura 2.5: Microrrede híbrida (Fonte: [19])

Existem diversas maneiras de configurar uma microrrede híbrida, por isso, uma forma de caracterizá-las foi proposta em [15]. Estas foram divididas entre:

- **microrrede AC-DC:** São compostas por alimentadores AC e DC, permitindo que esses sejam conectadas às cargas e à geração mais adequada a cada alimentador. A maior desvantagem dessas redes é o alto custo de instalação devido à redundância, já que os alimentadores devem, em muitos casos, ser conectados aos mesmos locais para atender cargas e geradores diferentes, aumentando, também, os custos e a complexidade da manutenção.
- **microrrede AC com armazenamento DC:** Estas possuem um alimentador específico para os elementos de armazenamento energético, como baterias e volantes de inércia. Este alimentador pode ser representado como um sistema único de armazenamento, simplificando o controle e a operação da microrrede. A rede AC conectada à rede de distribuição torna o sistema mais robusto, enquanto, a alimentação das cargas, com a mesma tensão, permite que não haja alterações de sistemas residenciais tradicionais. O fato de tanto cargas, quanto geradores, ainda precisarem de uma interface eletrônica para conectar aos alimentadores AC, reduz a eficiência dessas redes.
- **Microrrede zonal DC:** microrredes compostas por um alimentador AC conectado a múltiplos alimentadores DC. A presença de múltiplos alimentadores permite o uso de tensões variadas, para estas serem melhor adaptadas às cargas e às fontes presentes naquela região. A complexidade dessas microrredes as torna menos desejáveis, por dificultar o controle e a operação das mesmas.
- **Microrredes baseadas em SST:** Um grande benefício dos SST é a presença de um barramento DC interno, o que permite que um só elemento seja capaz energizar tanto alimentadores DC, quanto AC. Isso reduz o número total de equipamentos necessários para criar uma microrrede híbrida, e é capaz de aumentar a eficiência e confiabilidade da mesma. O principal problema presente nestas redes é o próprio SST, que, por ser o elemento série conectado entre a microrrede e o sistema de distribuição, torna a confiabilidade da rede dependente da encontrada nesses equipamentos, porém, sistemas redundantes são capazes de reduzir esse impacto [2].

Esta caracterização, porém, não aborda todas as configurações para microrredes híbridas, outras configurações ainda apresentam benefícios e devem ser estudadas, como uma microrrede AC com alimentador de geração DC, apresentada em [20], que utiliza um conversor DC-AC de maior potência, aumentando a eficiência dos equipamentos de geração.

2.2 Eletrônica de Potência e suas Características

2.2.1 Interface Eletrônica

Devido ao desenvolvimento em tecnologias de eletrônica de potência, a quantidade de equipamentos utilizados para uma interface eletrônica, operando com tensões contínuas, tem crescido [8], demonstrando benefícios para a utilização de arquiteturas DC. Estudos em alta tensão já provaram que esses sistemas, principalmente para transmissões a longas distâncias, são mais eficientes [21], sendo também utilizados para o desacoplamento de redes. Estudos, no âmbito da distribuição, também demonstram benefícios no uso de arquiteturas DC, em termos de eficiência, simplicidade e confiabilidade [4], [22]. Os diodos, tiristores e transistores são os elementos formadores da eletrônica de potência, estes equipamentos atuam como interruptores, permitindo o fluxo de corrente a partir de um estímulo externo. Conversores DC-DC e DC-AC são construídos a partir de pontes de transistores, ou tiristores, cujo chaveamento permite variar a tensão de saída em relação à entrada, como exemplificado na Figura 2.6. Retificadores (conversores AC-DC) operam de maneira semelhante, podendo ser simplificados com o uso de diodos no lugar dos transistores. O estímulo para chaveamento do diodo é a partir do sentido da tensão entre os seus terminais, isso remove a necessidade de um gerador de pulsos ou equipamentos de Modulação por Largura de Pulsos, *Pulse Width Modulation* (PWM). Pela característica intermitente do sinal, consequência do chaveamento efetuado por esses equipamentos, a tensão de saída possui uma característica de degraus, esse efeito significa que, para sistemas em AC, há uma grande inserção de harmônicos na tensão, que deve ser corrigida

por um filtro. Os harmônicos em DC são, em geral, corrigíveis de forma mais simples, fazendo o uso de bancos de capacitores em paralelo para criar uma tensão mais estável [12].

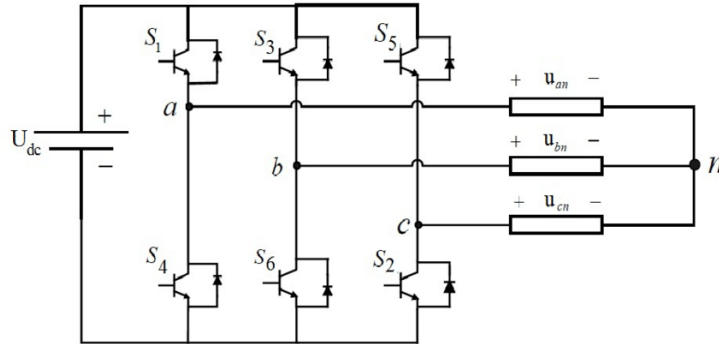


Figura 2.6: Inversor Trifásico (Fonte: [23])

A eletrônica de potência presente nos equipamentos de geração é unidirecional e, exceto em casos de ilhamento ou redes independentes, os conversores não são utilizados para produzir o sinal de tensão do sistema, agindo somente como uma fonte de potência. Esses conversores devem possuir, portanto, sensores que os permitam fornecer a tensão, frequência e fase necessárias para transmitir potência para o alimentador, sem que este sinal afete a estabilidade da rede. Para alimentar as cargas, são utilizados conversores geralmente mais simples, por estes serem unidirecionais e construírem o sinal de tensão no lado da carga, o que faz com que esses não requeiram, na maioria dos casos, ferramentas de controle baseado nos níveis de tensão e corrente da carga. Uma exceção é presente nos conversores de frequência, que utilizam variáveis como a frequência, a corrente, a tensão e a fase para controlar a velocidade, o torque, ou outros parâmetros das máquinas, sendo mais comumente encontrados em áreas industriais para permitir um controle mais simples e eficiente do processo fabril.

A conexão com a rede atua, nas microrredes, como uma geração de balanço, compensando a potência gerada ou consumida de forma a garantir a estabilidade da tensão e da frequência na rede. Com isso, a potência que flui nesse ponto de conexão varia, tanto com

a geração, quanto com a carga na microrrede. Em casos onde a venda da energia é benéfica para o consumidor, recomenda-se o uso de conversores bidirecionais, que permitem que a geração excedente alimente outras cargas da rede de distribuição. Os elementos de armazenamento possuem uma função semelhante, principalmente em momentos de ilha-mento da microrrede, onde eles operam como a única fonte de balanço. Entretanto, esses equipamentos encontram-se, na maioria dos casos, limitados pela capacidade de armazenamento e de carga/descarga, fornecendo, então, a sua potência máxima e dependendo da rede para fornecer a potência excedente. Conversores para esses equipamentos precisam ser bidirecionais, de forma a permitir que estes sejam carregados com energia excedente ou de menor custo, e usufruindo dessa energia armazenada em períodos de baixa geração ou maior preço da energia. Cada tecnologia de armazenamento possui particularidades que devem ser adequadas pelos conversores utilizados, como volantes de inércia, que requerem conversores de frequência para o seu controle, ou baterias, que utilizam, na maioria dos casos, um controlador de carga, evitando que cargas e descargas ocorram por períodos curtos, o que aumentaria o desgaste, reduzindo a vida útil das mesmas.

Veículos elétricos são capazes de trazer benefícios econômicos por dois caminhos. Estimativas mostram que, nos Estados Unidos, o preço por km do transporte por veículo elétrico, utilizando o valor da energia elétrica residencial, é menor do que o custo encontrado para os veículos a combustão interna [24]. Por outro lado, é possível coordenar o sistema de carregamento para utilizar parte da energia armazenada no veículo, de forma a reduzir o consumo, ou vender à rede de distribuição. Estas características do veículo elétrico, e do sistema de armazenamento, fazem com que esses possam substituir bancos de baterias, sendo ainda mais interessantes em microrredes, o que encorajou diversos estudos no âmbito da conexão de estações Veículo para Rede, *Vehicle to Grid* (V2G) em microrredes, como análises probabilísticas de potência disponível, [25], estudos da combinação de fontes renováveis com esse armazenamento, [26], além de análises de desgaste prematuro das baterias de veículos elétricos, pelo uso como um armazenamento para a rede, [27]. A substituição de sistemas de armazenamento convencionais por estações de carregamento de veículo elétrico, ou de baterias sobressalentes, implica em uma redução

dos custos de instalação da microrrede, enquanto produz resultados similares em termos de redução de consumo e uso eficiente dos recursos.

2.2.2 Eficiência

A eficiência dos equipamentos é dependente do sistema ao qual estão conectados, isso ocorre, de forma clara, com a resposta da interface de eletrônica de potência com sistemas DC, comparado a sistemas AC, o que afeta a eficiência dos conversores. Porém, outros fatores afetam essa eficiência, como a potência nominal do equipamento, a potência instantânea, relativa à nominal, ou a relação entre as tensões de entrada e saída do conversor. Uma pesquisa de mercado apresentada em [3] comparou as eficiências de conversores em relação às potências nominais dos mesmos. Os resultados, expostos na Figura 2.7, demonstram que, em baixas potências, a conversão AC-DC é muito menos eficiente do que as outras, corroborando os benefícios do uso de sistemas DC. O fato de, em altas potências, os conversores AC-DC possuírem uma eficiência próxima às dos outros, demonstra que mesmo que a transmissão e sub-transmissão de energia operem em AC, convém o uso de grandes conversores AC-DC e a alimentação das cargas em DC.

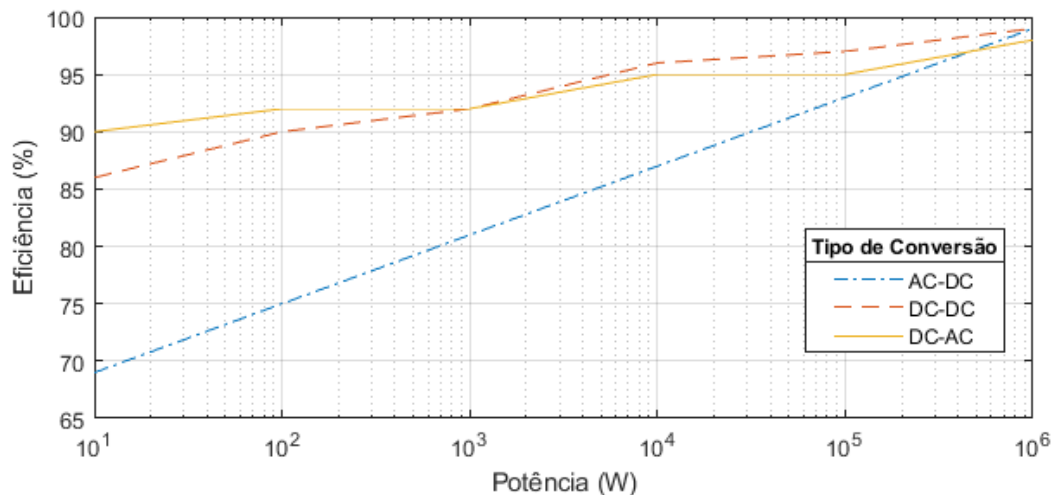


Figura 2.7: Eficiência de conversores AC-DC, DC-DC e DC-AC (Fonte: [3])

A relação de eficiência de conversores AC-DC e DC-DC é mais profundamente analisada em [5]. O estudo fornece as eficiências de conversores DC-DC e retificadores bidirecionais, com potência nominal de 5kW e tensão de 220V AC, em função da relação de potência, além de propor soluções, com o uso de múltiplos conversores com menor potência nominal, para melhorar o desempenho dos conversores DC-DC em baixa potência relativa. A eficiência de retificadores, extraída do estudo, é apresentada na Figura 2.8. Os conversores DC-DC, além de variarem sua eficiência com a potência transmitida, também sofrem influência da relação de tensão na sua eficiência, Agamy *et al.* avaliam esses fatores em [9], onde foi estudada a aplicação destes conversores para geração fotovoltaica, com potência nominal de 3,5kW, tensão de entrada entre 200V e 600V DC, e tensão de saída em 600V DC. A Figura 2.8 resume os resultados encontrados da influência da tensão e da potência na eficiência desses conversores.

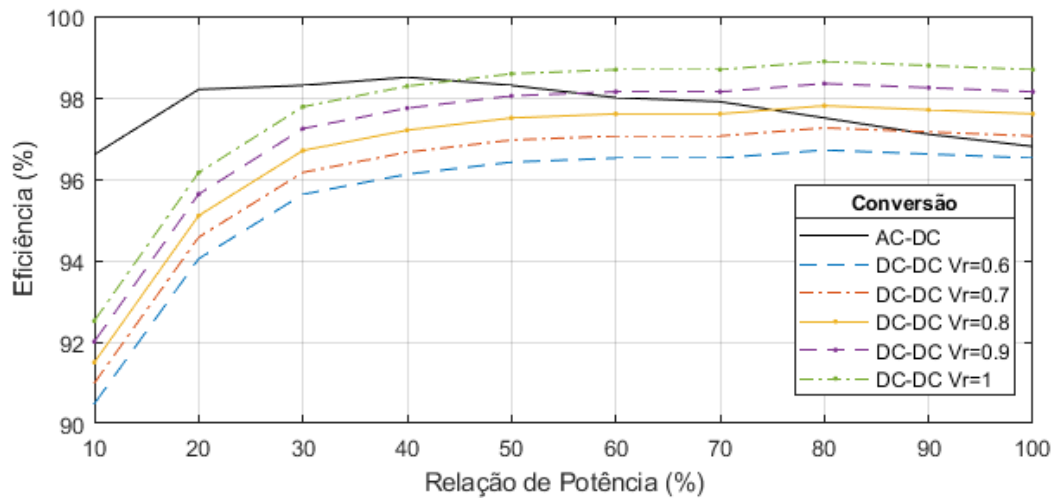


Figura 2.8: Eficiência do retificador (Fonte: [5]) e do conversor DC-DC (Fonte:[9])

2.2.3 Consequências

Os efeitos, que o uso de uma interface mais eficiente, como as apresentadas, devem também ser avaliados para contextualizar os benefícios de uma transição. De acordo com Savage *et al.*, [8], os eletrodomésticos atuais possuem uma eficiência média de 70 a 75%, enquanto,

ao usar um retificador de alta potência, é possível alcançar eficiências de até 90%. O estudo prossegue, utilizando os consumos anuais por tipo de carga nos Estados Unidos, e avaliando as perdas redutíveis com a utilização deste retificador. Os principais resultados são apresentados na Tabela 2.1, demonstrando que a utilização de sistemas DC, em escala nacional, teria efeitos drásticos na energia perdida durante as conversões.

Tabela 2.1: Perdas anuais por setor do sistema elétrico estadunidense (Fonte: [8])

Setor	Potencial redução de perdas (TWh)	Potencial redução de perdas (%)	Potencial redução no consumo nacional(%)
Residencial	121	25,32	2,98
Comercial	123	19,03	3,03
Manufatura	77	20,00	1,90
<i>Data Centers</i>	15	28,00	0,37
Total	337	21,50	8,28

Lotfi *et al.* concluem, por outro lado, em uma análise econômica, apresentada em [28], que um dos fatores mais importante para a viabilidade econômica de uma microrrede em DC, no lugar de uma AC, é a presença de cargas DC. O estudo demonstra que o ponto onde a arquitetura DC torna-se superior à convencional está entre 90 e 100% de cargas em DC, apesar de desconsiderar as diferenças em eficiência de conversores AC-DC e DC-DC, e inserir um retificador bidirecional de baixa tensão após o transformador para a rede DC. O uso de um SST, para a substituição do transformador, reduz o número de conversões necessárias em sistemas DC, enquanto as diferenças de eficiência na conversão, apresentadas na Figura 2.7, também influenciariam esta proporção de cargas DC. É apresentado em [8] uma lista de eletrodomésticos e seus consumos energéticos nos Estados Unidos, proveniente de uma pesquisa de 2001. Os cinco maiores consumidores da lista, que, em conjunto, representam 68% do consumo residencial, são apresentados na Tabela 2.2, junto com seus consumos anuais nos Estados Unidos e suas eficiências em sistemas DC e AC, demonstrando que já há uma alta proporção de cargas que operam com tecnologia DC atualmente, aumentando a viabilidade e estimulando o uso das microrredes com esse tipo de alimentador.

A literatura apresentou os fatores que beneficiam cada tecnologia, além dos efeitos dos

Tabela 2.2: Maiores cargas residenciais (Fonte: [8]) e suas eficiências em sistemas DC e AC (Fontes: [3], [29])

Eletrodoméstico	Consumo anual nos Estados Unidos (TWh)	Eficiência para sistemas AC (%)	Eficiência para sistemas DC (%)	Equipamento Envolvido
Refrigeradores	160	60	80	Compressor
		75	90	Condensador
Iluminação	103	100	78	Fluorescente
		67	90	LED
Exaustores	39	75	90	Ventilador
Televisores	33	81	92	Retificador ou Conversor DC-DC
Forno Micro-ondas	19	75	90	Ventilador
		75	90	Mesa giratória

avanços na área de eletrônica de potência. Diversos estudos comparam as arquiteturas, com resultados encorajadores para o uso de microrredes DC, embora a confiabilidade ainda seja comprometida pela incipiência da tecnologia, e os métodos de proteção ainda não tenham sido minuciosamente elaborados e avaliados, fazendo com que seja frequente uso de tecnologias AC para suprir essa deficiência.

Capítulo 3

Análise de Capacidade de Transmissão

A capacidade de transmissão de potência de uma rede de distribuição limita as dimensões da rede, de forma que é importante avaliar os impactos da arquitetura, utilizada para a microrrede, nessa capacidade de transmissão. O objetivo deste estudo é compreender as diferenças, em termos de capacidade de transmissão e quantidade de material necessário para a infraestrutura, entre as microrredes AC e DC. A arquitetura AC é composta de um alimentador trifásico, enquanto as DC são exploradas também com um só alimentador, sendo este homopolar. Devido à falta de regulamentação a respeito da tensão utilizada para distribuição de energia em DC, foram estudados três níveis de tensão para esta arquitetura, além do sistema AC de baixa tensão, resultando nas seguintes arquiteturas exploradas:

- **400V/230V AC 50Hz** - Padrão de distribuição europeu, usado como referência de microrrede, configurado com um fator de potência unitário.
- **120V DC** - Máximo de tensão extra baixa [30], permitindo uma maior segurança para os usuários, pelo menor risco e dano por choque elétrico.
- **190V DC** - Esta tensão é utilizada por sua compatibilidade com os sistemas de

distribuição AC, facilitando uma transição a partir das estruturas de rede tradicionais. Em sistemas bipolares e homopolares, como no caso estudado, esta tensão permite a alimentação em 380V, que é frequentemente utilizada nos Estados Unidos para *Data Centers* e telecomunicação [31].

- **375V DC** - Recomendado em [12], esta tensão permite, em redes com múltiplos alimentadores, uma configuração com a máxima tensão DC ainda definida como baixa tensão. Rodrigues *et al.* propõe, no estudo, que o sistema seja composto por um alimentador homopolar com $\pm 375V$ e outro com $\pm 750V$, com uma tensão máxima entre polos de 1500V. Além disso, a adaptação a partir de sistemas em 380V DC é mais fácil para essa tensão.

3.1 Metodologia

A queda de tensão em uma rede de distribuição é decorrente das impedâncias presentes nos condutores. A tensão reduzida é capaz de impedir a operação normal dos equipamentos, principalmente em caso de cargas sensíveis, como equipamentos hospitalares. Para reduzir esse efeito na distribuição, a queda de tensão é controlada para atingir um valor máximo de $\pm 8\%$, sendo restrita a $\pm 5\%$ em centros urbanos [32]. É interessante, para os fornecedores e distribuidores de energia, garantir que a energia seja transmissível pela maior distância possível, sem que haja a necessidade de uma correção da tensão. Essa capacidade de transmissão de um condutor depende da corrente suportada por esse condutor e da tensão do sistema. A resistência dos condutores é dependente, principalmente, da seção transversal útil do condutor e da resistividade do material. É importante mencionar que a área útil de um condutor, no entanto, é influenciada pela frequência do sinal de tensão, fenômeno conhecido como efeito pelicular, [33]. Apesar disso, esse fenômeno, que reduz a seção efetiva em sistemas de alta frequência, pouco afeta a área útil dos condutores a uma frequência de 50Hz, sendo, portanto, desprezável para este estudo. A Tabela A.1 apresenta os valores de corrente máxima, resistência e reatância indutiva, por seção, que foram utilizados nas análises, sendo estes para condutores de cobre.

A partir da corrente máxima suportável pelo condutor e da sua resistência e reatância, é possível avaliar a máxima potência ativa transmissível para cada seção, a partir da tensão nos condutores e do fator de potência das cargas. Essa potência é calculada em função do comprimento desse condutor e da queda de tensão máxima desejada. O cálculo da capacidade de transmissão de cada condutor foi elaborada recorrendo ao MatLab. O cálculo foi elaborado até que a potência transmissível alcançasse metade da potência máxima transmissível pelo condutor, por ser a região de mais interesse. A corrente máxima é calculada a partir da queda de tensão máxima considerada admissível, aqui denominada Vd , e das características do condutor, R e X , que são, respectivamente, a sua resistência e reatância. No caso de AC, o ângulo ϕ , entre o sinal da tensão e da corrente, e a reatância do condutor são necessários para calcular a corrente sua corrente total. A equação 3.1 formula o cálculo a realizar, onde I representa a corrente máxima transmissível à distância avaliada.

$$I = Vd / (R * \cos(\phi) + X * \sin(\phi)) \quad (3.1)$$

A corrente é posteriormente limitada à corrente máxima suportada pelo condutor. É possível, então, com essa corrente, calcular a potência ativa máxima transmissível, sendo essa, para redes AC, equacionada a partir da tensão fase-neutro V , do número de condutores utilizados, N e do ângulo de fase ϕ , conforme a equação 3.2 descreve.

$$P = I * N * V * \cos(\phi) \quad (3.2)$$

Os cálculos para arquiteturas DC são análogos, sendo porém simplificados, por não haver ângulo de fase entre a tensão e a corrente e nem fluxo de potência reativa, além da reatância indutiva ser zero devido à frequência nula da tensão. A equação 3.3 representa o cálculo da corrente máxima em DC.

$$I = Vd / R \quad (3.3)$$

Já que toda potência transmissível em uma rede DC é ativa, o cálculo fica também simplificado, sendo apresentado na equação 3.4.

$$P = I * N * V \quad (3.4)$$

A partir da formulação apresentada, o estudo avalia o desempenho das arquiteturas para uma queda de tensão máxima de 2% e uma de 5%.

3.2 Resultados

A capacidade de transmissão de potência é formada por uma região limitada pela corrente, seguida de uma na qual a queda de tensão limita a potência máxima, conforme apresentado na Figura 3.1, retratando a capacidade de transmissão em função do comprimento dos condutores, assumindo uma seção transversal fixa de 400mm². O estudo reflete o comportamento da potência para as três tensões da arquitetura DC e para a arquitetura AC.

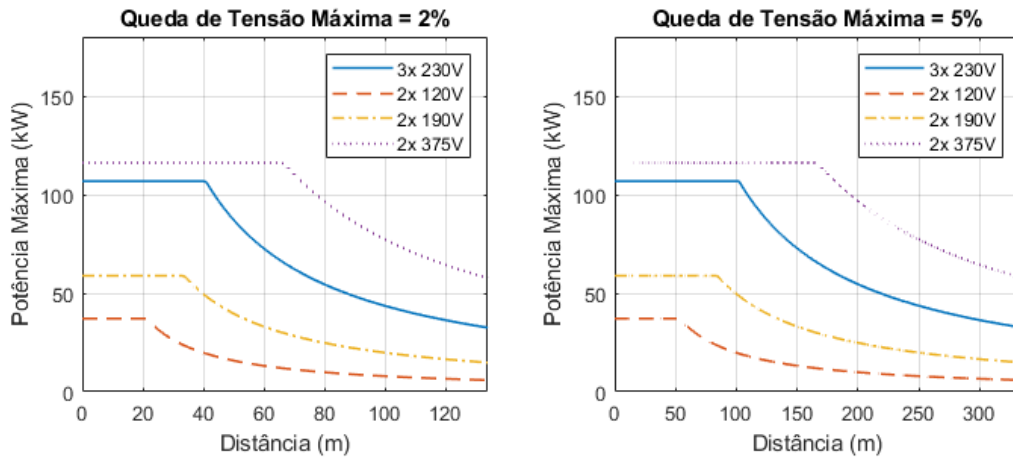


Figura 3.1: Capacidade de transmissão de potência para 25mm²

O número de condutores influencia a capacidade de transmissão, já que a potência é dividida entre eles. Um sistema trifásico possui três condutores carregados, e um sistema homopolar possui dois. Já os condutores de neutro são configurados, em ambos os casos,

para possuir um fluxo de potência mínimo. As Figuras A.1 a A.18, apresentadas no Anexo A, descrevem os resultados completos para as seções transversais avaliadas, por seu caráter complementar ao tema.

A potência máxima transmissível e a distância de transmissão dessa potência são fatores importantes, que facilitam uma avaliação preliminar do condutor adequado à rede. A Figura 3.2 sumariza a capacidade máxima de transmissão de potência, para ambas as arquiteturas, em função da seção do condutor, na qual torna-se claro que 375V DC possui uma maior capacidade de transmissão, pela maior tensão e por não possuir fluxo de potência reativa. Essa arquitetura é capaz de compensar, inclusive, o maior número de condutores carregados, presente no sistema trifásico. Por outro lado, 190V e 120V DC possuem capacidades de transmissão menores, não sendo competitivos, neste aspecto, com um sistema trifásico a 400V/230V AC ou redes homopolares a 375V DC. Como comparação, a potência máxima transmissível por um sistema AC a 400mm² equivale a um sistema a 375V DC com 300mm². Levando em consideração a relação das áreas e dos números de condutores, essa diferença em seção corresponde ao uso do dobro de material com os condutores carregados. A arquitetura DC, com uma tensão de 120V e condutores de 400mm², é capaz de transmitir uma potência próxima à de um sistema homopolar a 375V com um condutor de 50mm². Isso implica no uso de 8 vezes o material utilizado a 375V. Comparando a mesma tensão, de 120V, a uma rede a 400V/230V AC, o condutor mais próximo possui uma seção de 70mm², isso significa que a quantidade de material para condutores carregados usada em uma arquitetura a 120V corresponde a 3,8 vezes a quantidade utilizada na rede AC. A Figura 3.3 compara as arquiteturas em termos de capacidade de transmissão de potência, fornecendo, para cada arquitetura, a seção necessária para transmitir a mesma potência do que a rede homopolar a 375V DC.

Tanto para uma queda de tensão de 2% (Figura 3.4), quanto para 5% (Figura 3.5), a distância para transmissão de potência máxima a uma tensão de 190V DC é próxima à encontrada com uma arquitetura AC a 400V/230V, porém menor. A tensão de 120V DC mostra-se a pior alternativa, em termos de máxima distância de transmissão, sendo a melhor opção das avaliadas, o uso da tensão de 375V. Para uma queda de tensão máxima

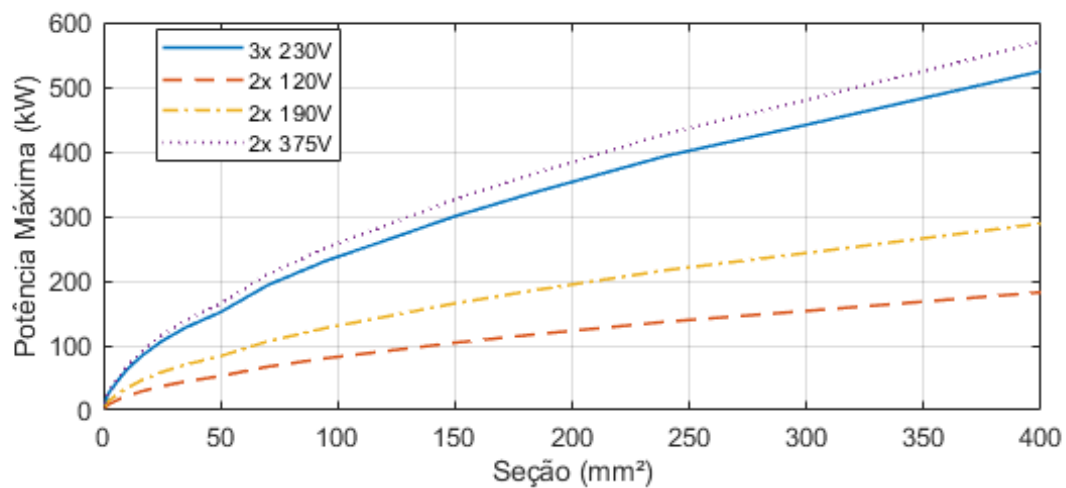


Figura 3.2: Capacidade máxima de transmissão de potência para cada seção de condutor

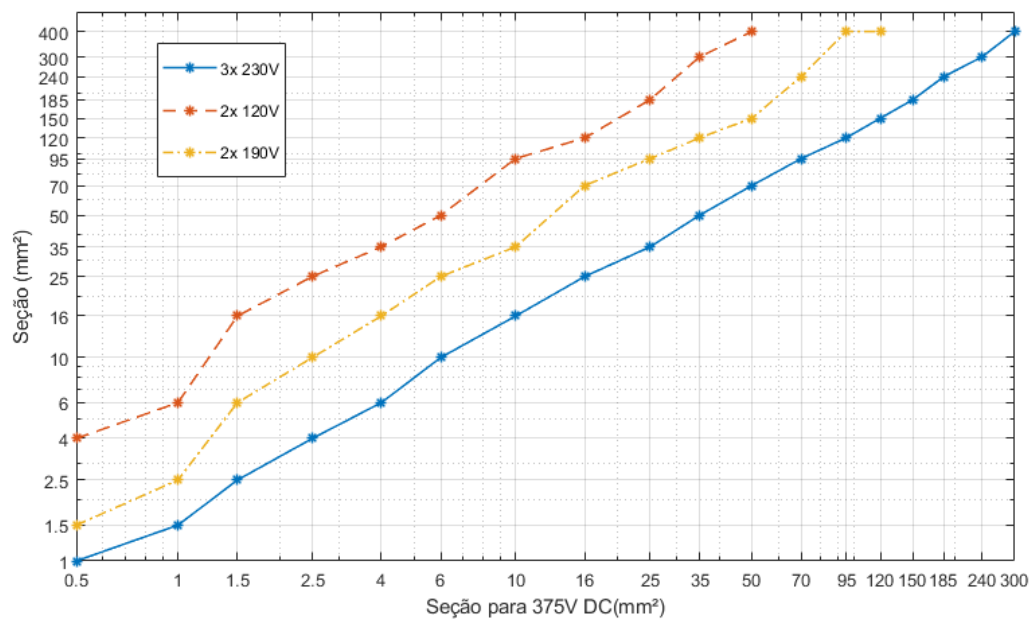


Figura 3.3: Seção de condutor equivalente em transmissão de potência com 375V DC

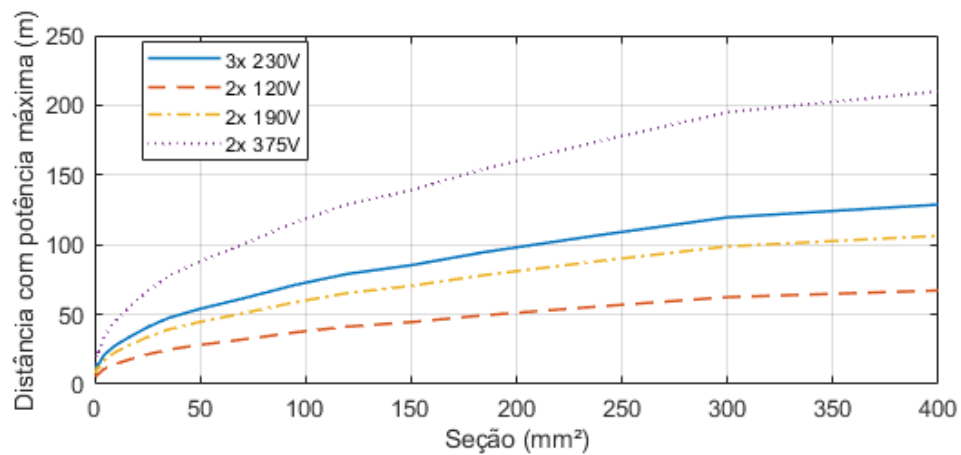


Figura 3.4: Distância de máxima potência para uma queda de tensão de 2%

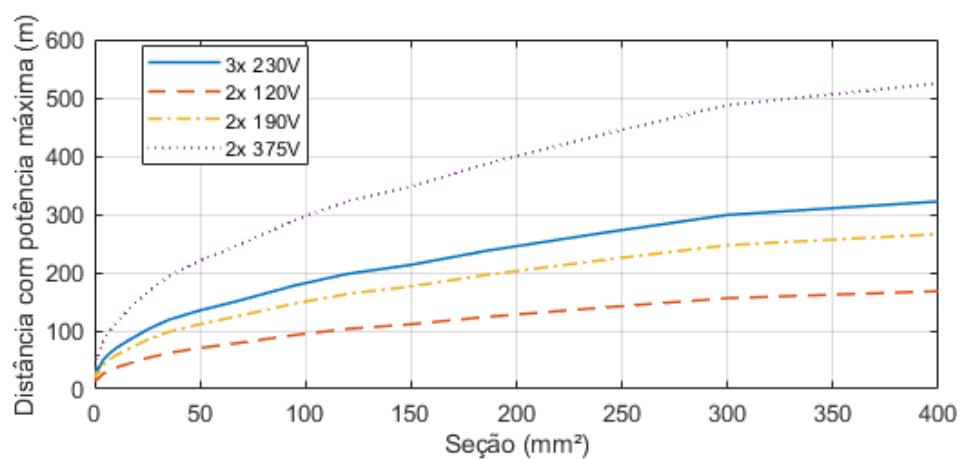


Figura 3.5: Distância de máxima potência para uma queda de tensão de 5%

de 5%, 230V AC apresenta uma distância de transmissão com 400mm^2 equivalente à encontrada por um condutor de 120mm^2 a 375V DC, já 190V DC, a 400mm^2 , equivale ao sistema AC com 240mm^2 , representando um aumento em material de 11%, por outro lado, comparado a um sistema a 375V, condutores de 95mm^2 seriam suficientes para transportar potência máxima pela mesma distância.

Os resultados permitem concluir que:

- As maiores potências e distâncias de transmissão são encontradas para 375V DC.
- Um sistema homopolar a 190V DC tem uma capacidade de transmissão inferior aos sistemas trifásicos a 230V AC, porém as distâncias máximas de transmissão dos dois sistemas são próximas.
- Os sistemas homopolares a 120V DC não apresentam resultados competitivos com os outros, em termos de potência transmissível ou distância, sendo mais apropriado para sistemas de baixa potência e menor dimensão.

Capítulo 4

Análise de Perdas e Eficiência Energética

A eficiência é um dos fatores mais importantes nos equipamentos, por trazer benefícios econômicos tanto diretos, como indiretos. Uma redução de perdas, além de atenuar consumos que não trazem benefícios, também contribui para a redução da intensidade de corrente nos condutores, permitindo uma maior transmissão de potência útil. Para calcular as perdas em cenários realistas, foram modeladas microrredes utilizando as ferramentas MatLab e Simulink.

4.1 Modelos das Microrredes

As microrredes simuladas são exploradas em anel aberto, conectadas a uma rede primária de distribuição a 25kV, enquanto as arquiteturas utilizam tensões de 120V, 190V e 375V para as microrredes DC, e a tensão de 400V/230V a 50Hz para a microrrede AC, onde as cargas apresentam um fator de potência unitário. As microrredes modeladas, sendo cada, compostas de seis casas idênticas, com potência instalada de 5,7kW, assim como fileiras fotovoltaicas com uma potência pico total de 19,5kW e um sistema de armazenamento baseado na tecnologia bidirecional V2G.

Como veículos elétricos estão tornando-se mais presentes no mercado, uma avaliação

da eficiência da interface eletrônica, dos pontos de carga destes veículos, auxilia na compreensão das diferenças entre as microrredes atuais e futuras. No caso, foi explorado um sistema V2G no qual seis veículos elétricos podem estar conectados. As baterias desses veículos, baseada nos veículos da marca Tesla presentes no mercado [34], possuem uma capacidade energética de 50kWh cada. Utilizando um sistema de carga semi-rápida, com o uso de uma estação de carga V2G, esses veículos são carregados a uma potência máxima de 10kW a 20kW, foi utilizado no modelo a potência máxima de 10kW. Os veículos suportariam essa mesma potência para descarga, porém, para reduzir o desgaste que ocorreria nas baterias, além de permitir que veículos sejam desconectados sem afetar a capacidade do sistema, foi modelada uma potência máxima total de descarga de 3kW. Em um caso ideal, com todos os veículos conectados às estações, suas capacidades são conforme a tabela 4.1.

Tabela 4.1: Característica das estações de carga de veículos elétricos

Característica	Por veículo	Total
Capacidade Energética (kWh)	50	300
Potência de Carga (kW)	10	60
Potência de Descarga (kW)	0,5	3

A microrrede é conectada à rede distribuição através de um transformador convencional, em uma das análises AC, e por um SST para a outra, assim como para os modelos DC. As casas são afastadas entre si e do ponto de conexão com a rede, possuindo um trecho de linha de distribuição para conectá-los, formado por segmentos de 20m. Na microrrede AC, as casas são monofásicas e distribuídas pelas fases da rede, de forma a balancear o sistema. As fileiras fotovoltaicas e as estações V2G são conectadas por inversores monofásicos.

De forma semelhante, as microrredes DC são homopolares, porém alimentam casas monopulares, tornando útil a distribuição das casas entre os polos, equilibrando o sistema. As fileiras fotovoltaicas e os sistemas de armazenamento V2G são conectados entre polos. Isso garante uma redução nos impactos da alta potência desses componentes na corrente dos condutores. Como a potência nominal dos conversores influencia na sua eficiência, [3], torna-se interessante, para ver os impactos dessa eficiência, a avaliação de três cenários

distintos:

- **Geração e armazenamento distribuídos** - Onde cada casa na microrrede possui uma garagem com ponto de carga para seu veículo elétrico, além de uma fileira fotovoltaica.
- **Geração e armazenamento centralizados** - Composto de um grande bloco de fileiras fotovoltaicas e um estacionamento com estação V2G.
- **Somente cargas** - Rede de distribuição convencional, não apresentando geração fotovoltaica ou estações de carregamento de veículos elétricos. Este cenário é utilizado para avaliar os impactos do uso de arquiteturas DC para as redes de distribuição tradicionais, mostrando possíveis benefícios no uso de sistemas em baixa tensão DC inclusive para a distribuição de energia. Também atua como base para avaliar o impacto do uso de microrredes, com relação a redes convencionais.

Além desses cenários, para avaliar as perdas na distribuição e conexão com a rede, é interessante comparar as perdas dos sistemas DC com as da rede AC, com SST e com um transformador convencional, já que o uso de SST para a conexão com a rede é amplamente estudado como uma possível substituição dos transformadores convencionais, inclusive para redes AC [35].

As Figuras ?? a ?? ilustram as configurações exploradas, enquanto a Tabela 4.2 sumaria as Figuras, quanto à configuração e conexão com a rede, facilitando a compreensão.

Tabela 4.2: Configurações da rede

	Conexão com a Rede	Transformador de Estado Sólido	Transformador Convencional	Microrrede DC
Configuração				
Centralizado		Figura 4.1(a)	Figura 4.1(b)	Figura 4.1(c)
Distribuído		Figura 4.2(a)	Figura 4.2(b)	Figura 4.2(c)
Somente Cargas		Figura 4.3(a)	Figura 4.3(b)	Figura 4.3(c)

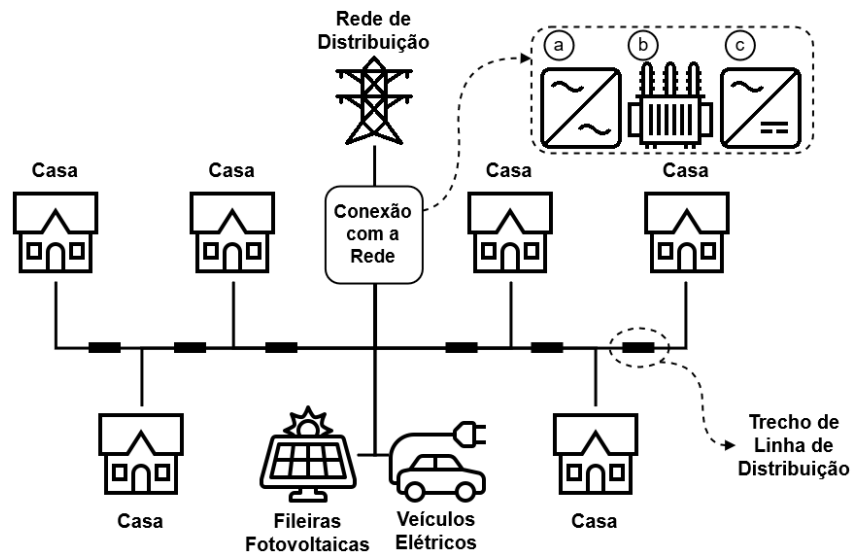


Figura 4.1: Microrrede com geração e armazenamento centralizados

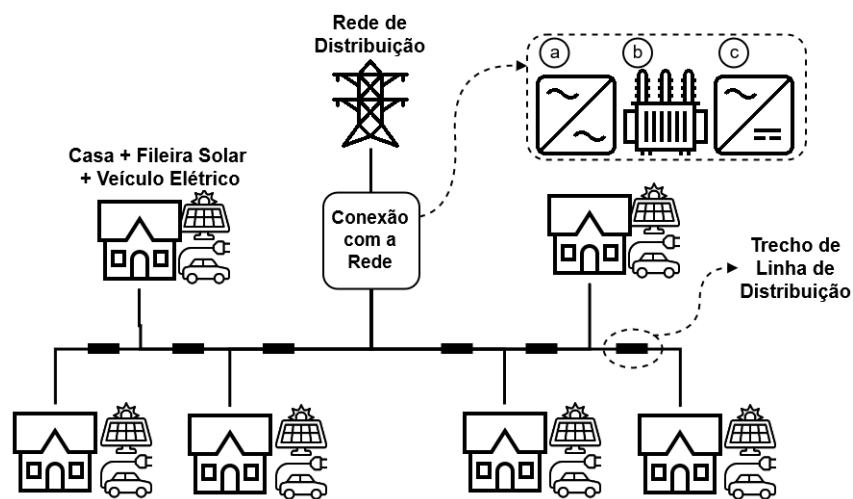


Figura 4.2: Microrrede com geração e armazenamento distribuídos entre as casas

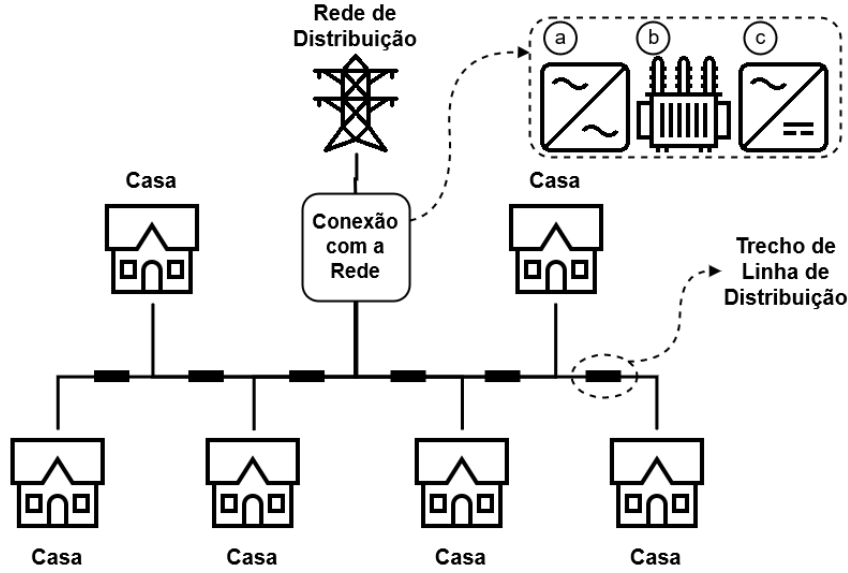


Figura 4.3: Microrrede sem geração e armazenamento

4.2 Diagramas de Potência

Como o objetivo é avaliar os efeitos das arquiteturas em cenários realistas, foram extraídos diagramas de potência de uma microrrede real. Quatro circuitos de cargas e um de geração fotovoltaica foram utilizados. Os diagramas de potência são necessários para construir os perfis de carga e geração da microrrede. A simulação explora dois dias típicos, um de inverno e um de verão, e os resultados são, então, extrapolados, buscando aproximar-se do consumo anual medido, considerando 201 dias de verão e 164 dias de inverno.

4.2.1 Cargas

As casas modeladas são compostas por quatro circuitos, um de iluminação, um de garagem, um fogão de indução e uma máquina de lavar louça. Os diagramas de carga, de cada circuito, foram mensurados em intervalos de 15 minutos.

- O diagrama de cargas do Fogão de indução, *Induction cooktop* (CT), na Figura 4.4, apresenta baixo consumo durante o verão, tendo um uso mais frequente no inverno.

- Já a Máquina de lavar louça, *Dishwasher* (DW), apresentada na Figura 4.5, demonstra um consumo semelhante no verão e no inverno, operando no período da noite em ambos os casos, com a maior diferença sendo o horário de funcionamento.
- O circuito da Garagem, *Garage* (GA) é utilizado majoritariamente no inverno, conforme descrito na Figura 4.6.
- O circuito de Iluminação, *Lighting* (LI) possui um consumo maior no inverno, além de ser acionado mais cedo no mesmo período, como pode ser observado na Figura 4.7.

Atualmente, os equipamentos de uso doméstico em DC são para sistemas embarcados, tipicamente a 48V, porém, os circuitos de maior potência, conforme avaliado por [12], são mais compatíveis a uma tensão superior. No caso de estudo, foi utilizado o valor de 400V DC como tensão interna, para os circuitos Fogão de indução, *Induction cooktop* (CT), Máquina de lavar louça, *Dishwasher* (DW) e Garagem, *Garage* (GA). Essa tensão é a maior permitida para sistemas de telecomunicações [12] e, por ser diferente de todas as tensões avaliadas, garante a necessidade de conversores, o que reduz o viés para uma arquitetura em específico. No caso específico do circuito de iluminação, por operar a uma potência reduzida, este requer uma menor tensão interna, operando a 48V DC na simulação, conforme recomendado também por [12].

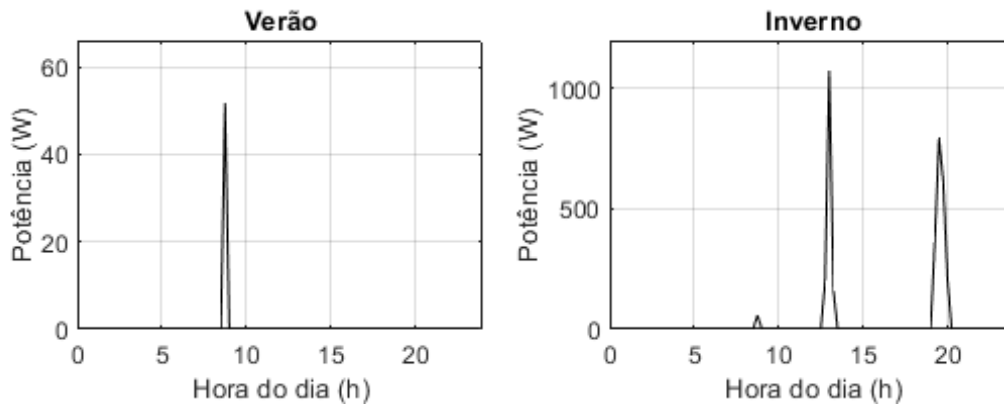


Figura 4.4: Diagrama de carga fogão de indução

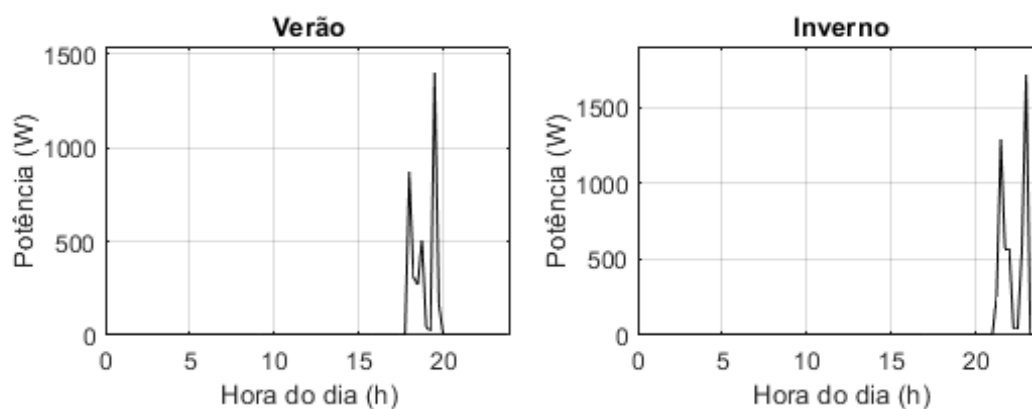


Figura 4.5: Diagrama de carga máquina de lavar louça

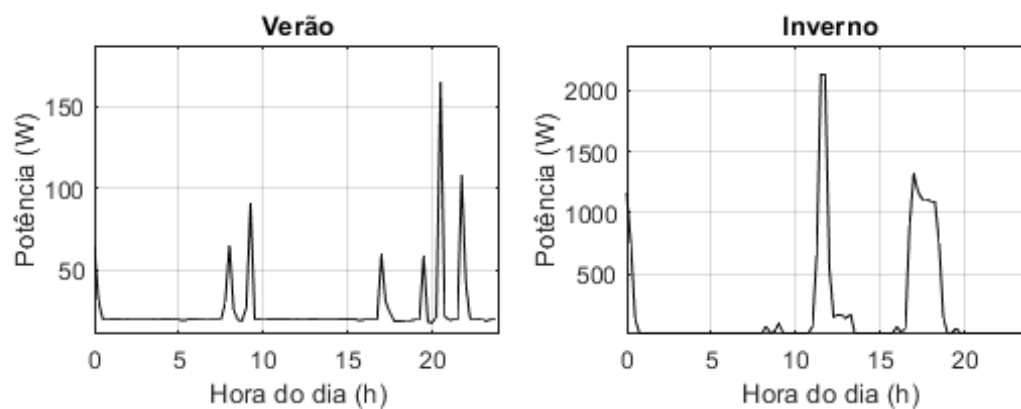


Figura 4.6: Diagrama de carga garagem

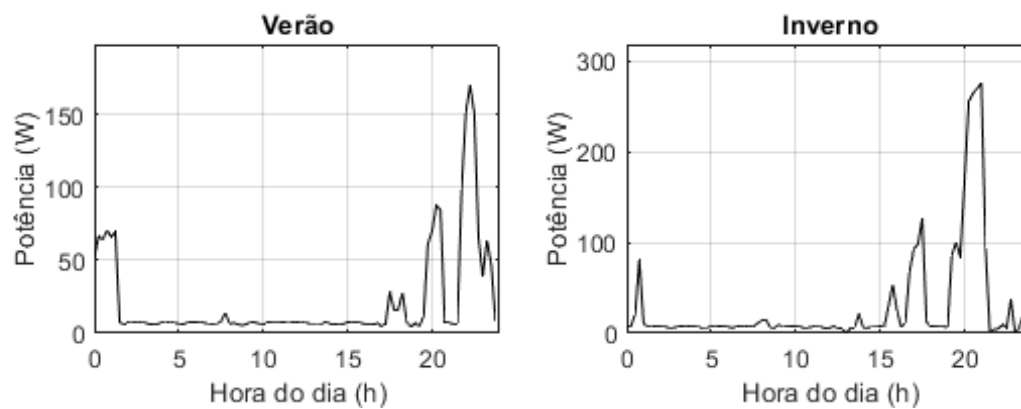


Figura 4.7: Diagrama de carga iluminação

4.2.2 Geração

Além dos diagramas de cargas dos circuitos residenciais utilizados, a geração, proveniente das fileiras fotovoltaicas, também possui variações no verão e no inverno, devido, principalmente, à variação da radiação solar. A geração total na Fileira Fotovoltaica, *Photovoltaic String* (PV) é apresentada na Figura 4.8. Na figura é possível observar a diferença, esperada, de geração entre o inverno e o verão. As fileiras fotovoltaicas operam a uma tensão de 500V, sendo desprezadas as variações de tensão naturais.

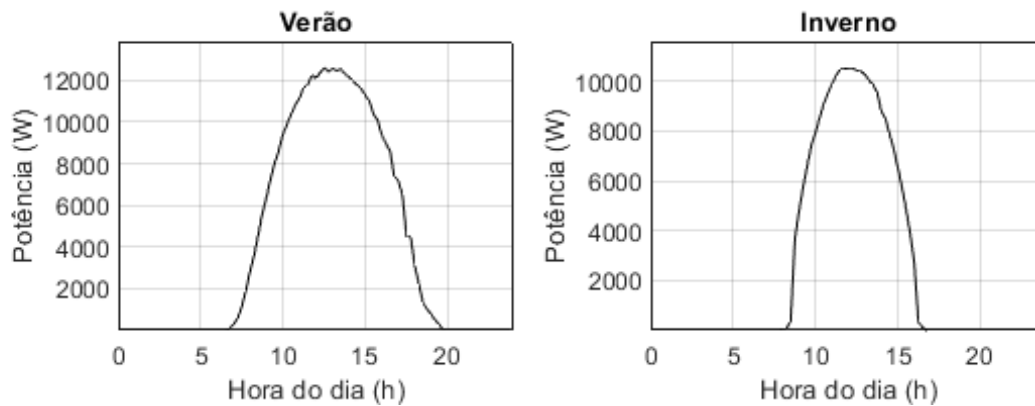


Figura 4.8: Diagrama de carga fileiras fotovoltaicas

Para a criação de um diagrama de potência do sistema V2G, tratado no estudo como Armazenamento, *Storage* (ST), foram utilizados os diagramas das cargas e da geração fotovoltaica. Conforme pode-se observar na Figura 4.9, o armazenamento, onde o carregamento das baterias é representado por uma potência negativa, é capaz de absorver toda a potência excedente da geração fotovoltaica. O sistema V2G utiliza parte desta carga para reduzir o consumo, que ocorre principalmente durante a noite. A tensão interna do sistema de armazenamento, de 375V, foi utilizada por ser comum em novos modelos Tesla [36].

O estudo de capacidade de transmissão, apresentado no capítulo 3, permitiu a escolha do condutor mais adequado às microrredes. Como o objetivo era comparar as arquiteturas sob as mesmas condições, foi optado por utilizar a mesma seção para todos os cenários. A seção que melhor se adaptava a isso foi a de 70mm². Já que essa suporta o fluxo de

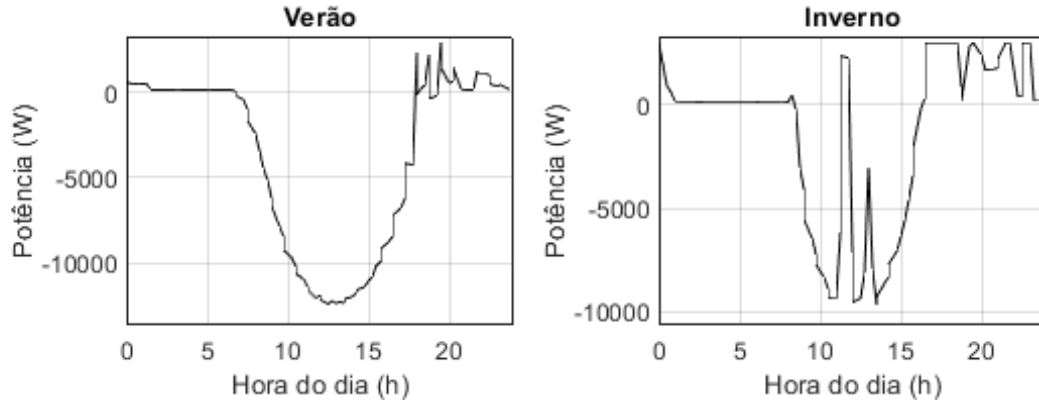


Figura 4.9: Diagrama de carga das estações de carregamento de veículos elétricos

potência máximo do sistema pelo comprimento explorado, de 120m, para todas as tensões.

A figura 4.10 apresenta a capacidade de transmissão de potência desse condutor.

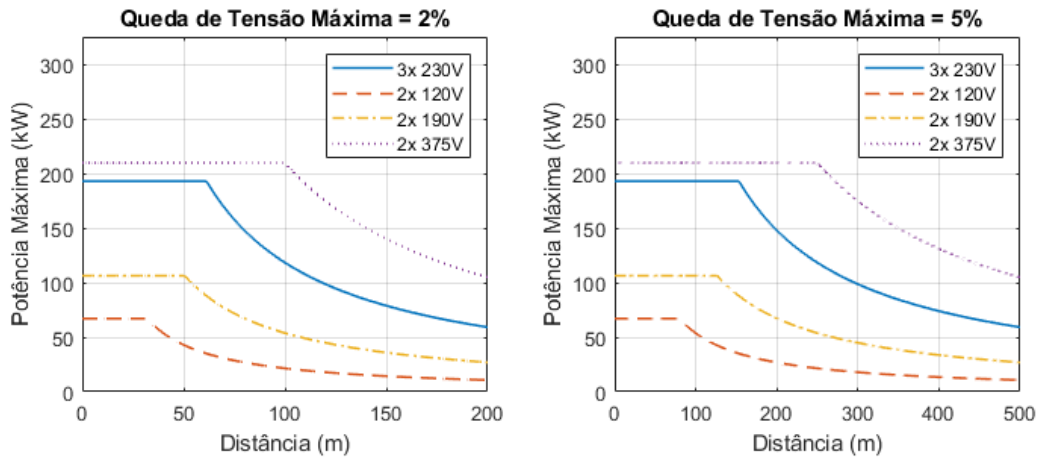
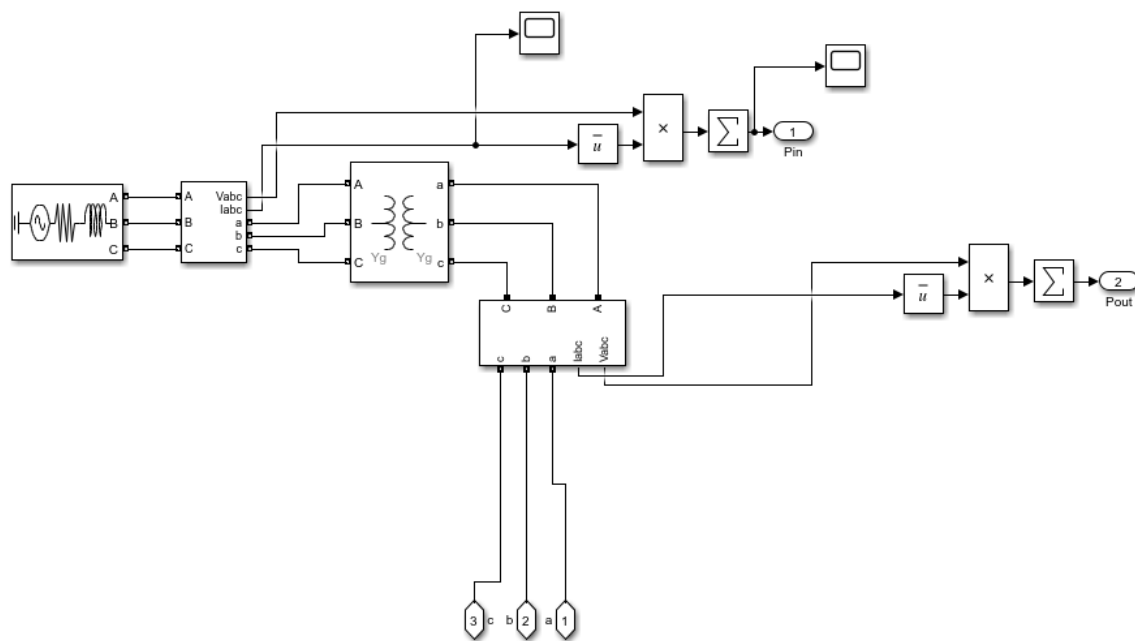


Figura 4.10: Capacidade de transmissão de potência do condutor selecionado de 70mm²

4.3 Metodologia

Para esta avaliação, foram utilizadas as ferramentas Matlab e Simulink, que permite a construção de circuitos e avaliação dos seus comportamentos, sendo, então, elaborados diversos modelos para permitir a avaliação das perdas.

Os modelos foram elaborados para calcular as perdas, por isso, os modelos que são baseados, principalmente, em elementos resistivos, capacitivos e indutivos, são utilizados para representar essas perdas. Os transformadores convencionais e os condutores da distribuição foram, portanto, modelados com esses equipamentos e com medidores que permitem a leitura das perdas instantâneas nos mesmos, conforme apresentado nas Figuras 4.11 e 4.12, para o transformador e o trecho de distribuição, respectivamente.



As cargas, a geração e o armazenamento foram modelados como fontes controladas de potência, nas quais os diagramas de potência atuam como o controle. Essas fontes são compostas de uma fonte controlada de corrente e de uma resistência muito elevada em paralelo, que impede conflitos entre fontes de correntes em série, O bloco apresentado na Figura 4.13 foi a solução utilizada.

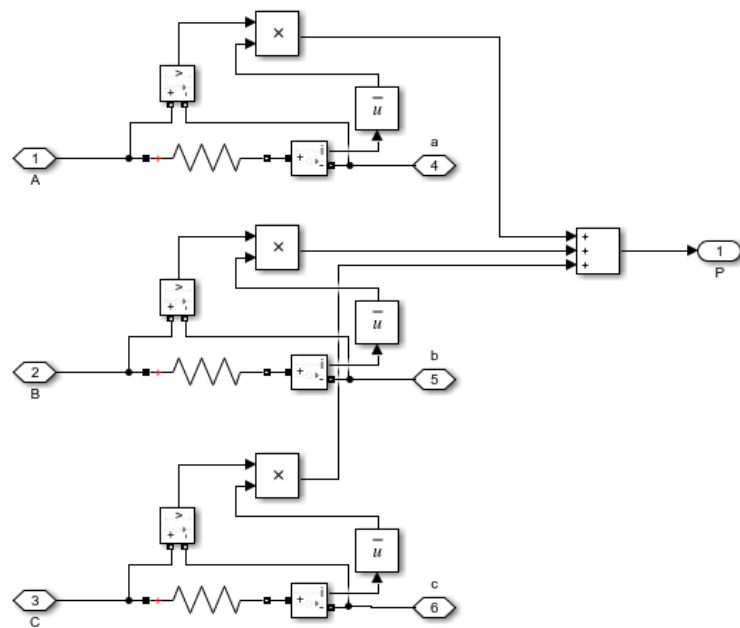


Figura 4.12: Bloco de sistema de condutores de distribuição para redes AC ($3\Phi+N$)

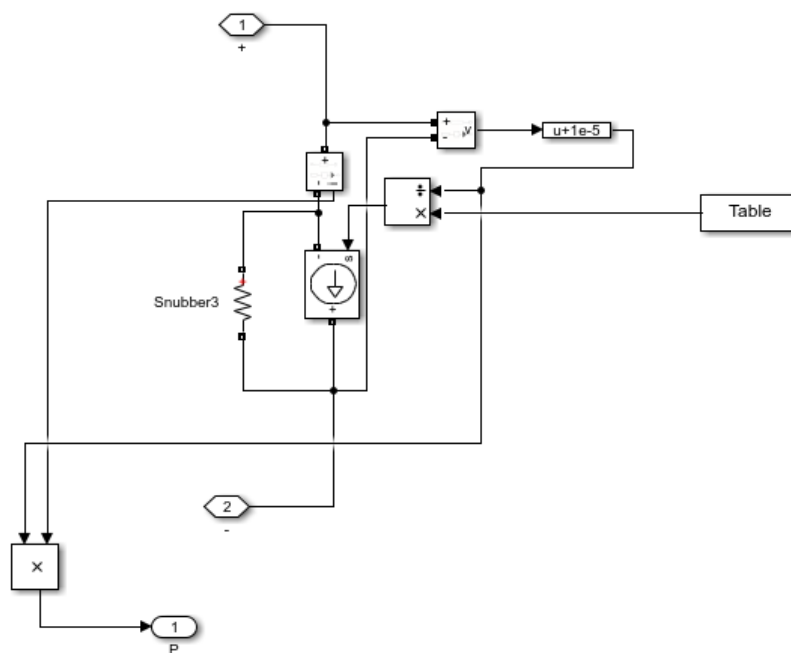


Figura 4.13: Bloco de fonte controlada de potência

de corrente. A saída P é o resultado da potência consumida pelo bloco, o que impede que disparidades entre o valor desejado e o valor medido influenciem na leitura das perdas.

A eletrônica de potência é baseada em chaveamentos, isso faz com que os elementos que a compõe não possuam um comportamento linear, como é o caso com resistores, indutores e capacitores. Esse efeito interfere no estudo, principalmente, pelo fato de ser extremamente demandante uma simulação longa, como é o caso do estudo atual. Por esse motivo, e buscando utilizar os valores empíricos de eficiência, encontrados na literatura e avaliados no Capítulo 2, foram modelados blocos que atuam como esses conversores. O conversor é composto por uma fonte de tensão e uma fonte controlada de corrente, formando um transformador ideal. A relação de transformação é porém variada, de forma a produzir um comportamento análogo ao encontrado empiricamente. Os conversores DC-DC são apresentados na Figura 4.14. Para os conversores AC-DC, representados na Figura 4.15, o valor de potência é, porém, apenas registrado para as outras análises, não havendo uma fonte de corrente neste caso. Uma outra diferença entre os blocos é o fato de o conversor AC-DC possuir duas fontes de tensão, essa configuração permite a conversão direta para sistemas homopolares DC, reduzindo a necessidade de criar blocos com funções semelhantes.

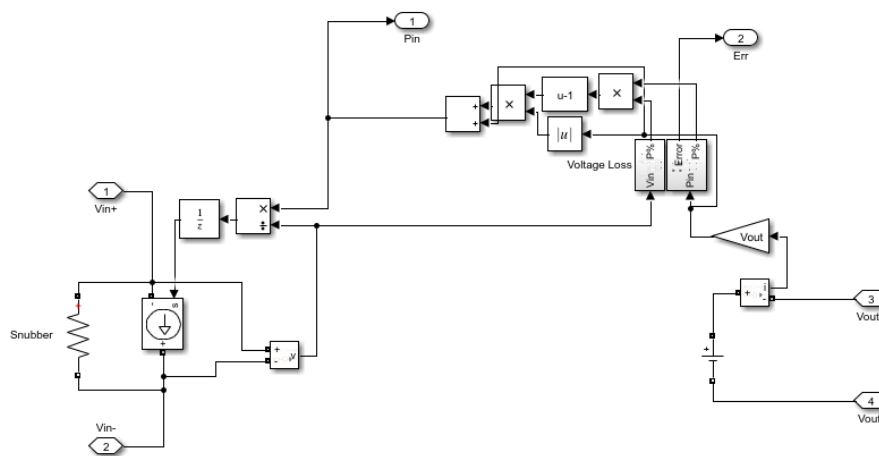
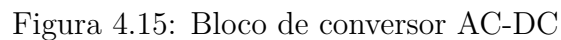


Figura 4.14: Bloco de conversor DC-DC

Em ambos os casos, para emular os resultados empíricos, foram utilizados três blocos,



```

graph LR
    Pnom[Pnom] --> Gain1[1e3]
    Gain1 --> Delay[1-D T(u)]
    Delay --> Gain2[-K]
    Gain2 --> Output(( ))
  
```

Figura 4.16: Calculadora de eficiência por potência nominal

Por outro lado, a potência relativa também interfere na eficiência, por isso o bloco,

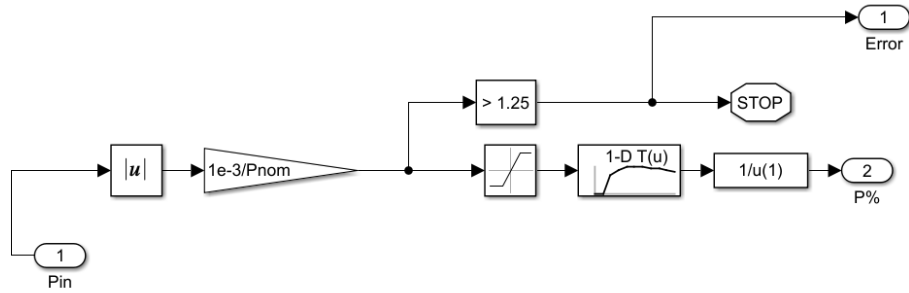


Figura 4.17: Calculadora de eficiência por relação de potência

encontrado na Figura 4.17, divide a potência atual, sendo transmitida pelo conversor, pela sua potência nominal. Com essa relação de potência, é possível extrair, da relação apresentada na Figura 2.8, a eficiência atual do equipamento. Há, para garantir que o modelo esteja operando corretamente, um limitador, que impede que esse valor exceda o limite do conversor.

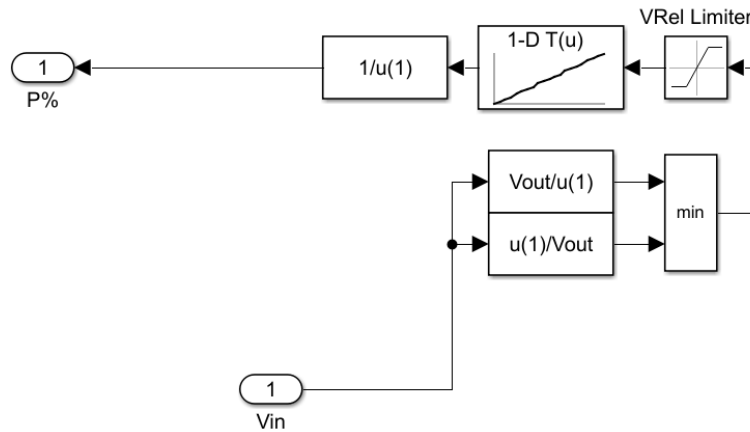


Figura 4.18: Calculadora de eficiência por relação de tensão

Uma última eficiência, influenciada pela relação de tensão, é extraída da mesma forma, a partir dos dados encontrados na Figura 2.8.

Todas as eficiências foram normalizadas, de forma que a combinação das três seja equivalente aos resultados empíricos, avaliados no Capítulo 2.

Como o interesse da simulação está na avaliação das perdas e dos consumos, sem a necessidade de avaliar a estabilidade de tensão ou de frequência do sistema, não foram

utilizadas as reatâncias indutivas da distribuição e as simulações foram feitas em modo fasorial para os modelos AC e em modo contínuo para os modelos DC, buscando reduzir o tempo e processamento necessário para a simulação. São simuladas 48h, onde as perdas são interpretadas como um consumo adicional dos equipamentos. Os modelos utilizados para a simulação das perdas na distribuição e conexão com a rede são baseados nas configurações, apresentadas nas Figuras ?? - ??. Dois exemplos desses modelos são apresentados nas Figuras 4.19 e 4.20. Os modelos utilizam o consumo de cada casa, registrado durante a simulação das cargas.

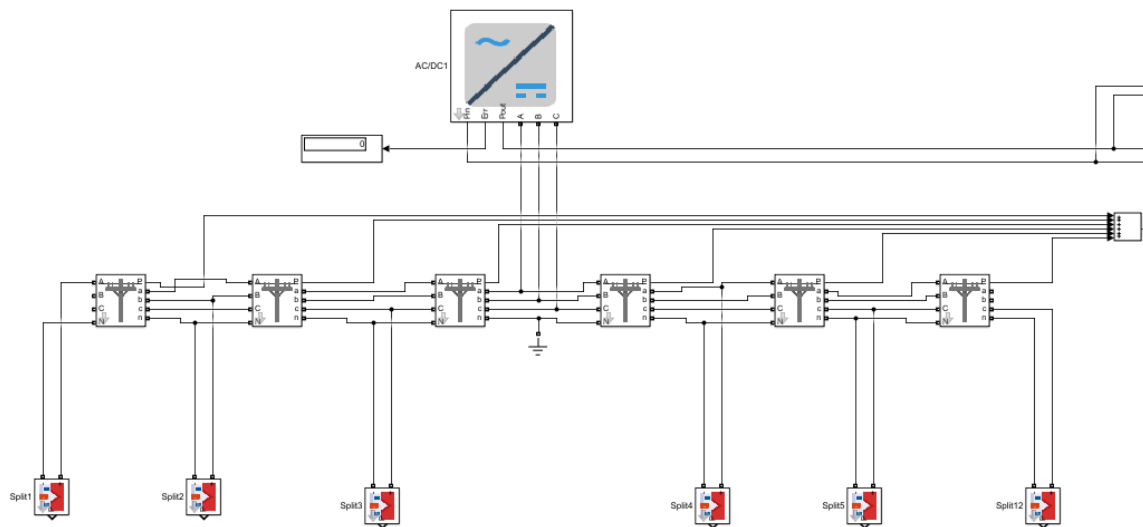


Figura 4.19: Modelo Simulink de sistema AC com geração e armazenamento distribuídos e conexão com a rede por SST

4.4 Resultados

As perdas foram separadas em três categorias, de forma a demonstrar as diferenças das arquiteturas em cada aspecto, além do fato de cada categoria possuir diferentes benefícios para os consumidores e para os fornecedores de energia.

- **Perdas nos sistemas de utilização de energia** - A principal função de uma rede elétrica é a energização de equipamentos que exercem as funções desejadas

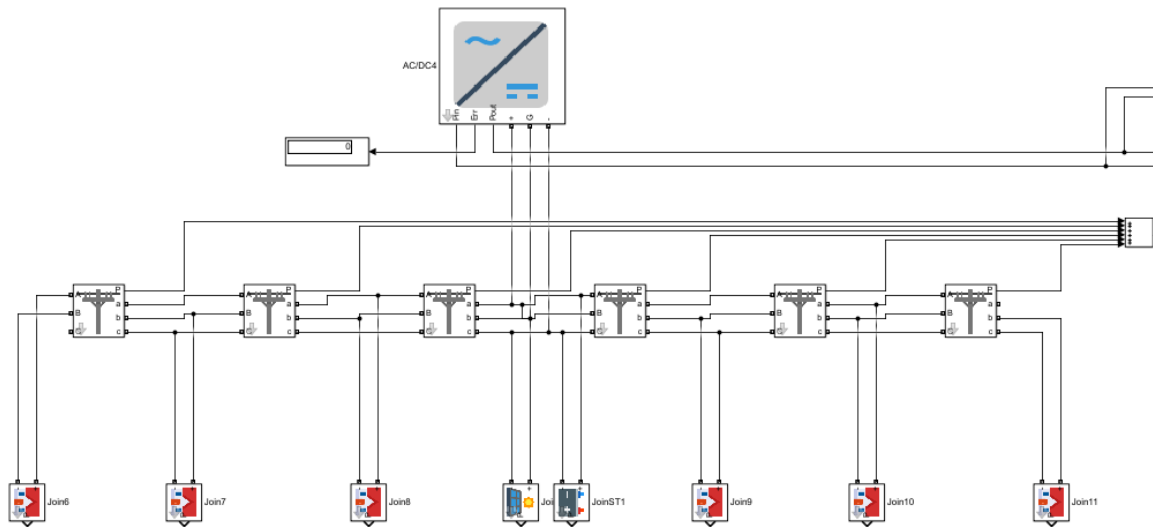


Figura 4.20: Modelo Simulink de sistema DC com geração e armazenamento centralizados e conexão com a rede por SST

pelo consumidor. Em geral, não é possível alterar os horários de operação das cargas, já que algumas funções, como iluminação ou aquecimento, não podem ser reprogramadas para atuar nos períodos de melhor custo da energia, e, sem o uso de automação residencial, outras requerem ativação por interface do usuário. As perdas na interface eletrônica que alimenta essas cargas representam custos desnecessários para o consumidor, havendo um custo ainda maior caso essas cargas consumam energia em períodos de alto custo.

- **Perdas nos sistemas de geração e de armazenamento** - Podendo pertencer ao consumidor ou ao fornecedor, perdas nesses sistemas resultam em um maior custo, para ambos os casos. No armazenamento, especialmente, uma conversão pouco eficiente possui um efeito dobrado, já que haverá perdas tanto no carregamento, quanto na descarga de energia. Essas perdas implicam diretamente em um maior consumo, exceto em casos onde haja geração excedente.
- **Perdas na distribuição e conexão com a rede** - As perdas presentes nos conversores da distribuição, assim como as decorrentes da resistividade dos condutores,

representam uma energia não faturável, sendo, portanto, um custo para os fornecedores de energia. Além desse fator, a potência referente às perdas ainda precisa ser transmitida, o que reduz a capacidade de transmissão útil de potência dos condutores.

4.4.1 Perdas nas Cargas

As cargas são eletrodomésticos e, por isso, não é possível variar o sistema interno que as compõe. As perdas nas cargas são dependentes, no estudo, somente da eficiência dos conversores conectados a elas. A Figura 4.21 exemplifica as perdas de cada arquitetura em relação ao consumo instantâneo, neste caso, sendo o do circuito de iluminação, enquanto a Figura 4.22 resume as perdas diárias por circuito no dia típico de verão e no de inverno. Os gráficos de perdas instantâneas para as cargas são encontrados nas Figuras A.19, A.20 e A.21, para CT, DW e GA, respectivamente.

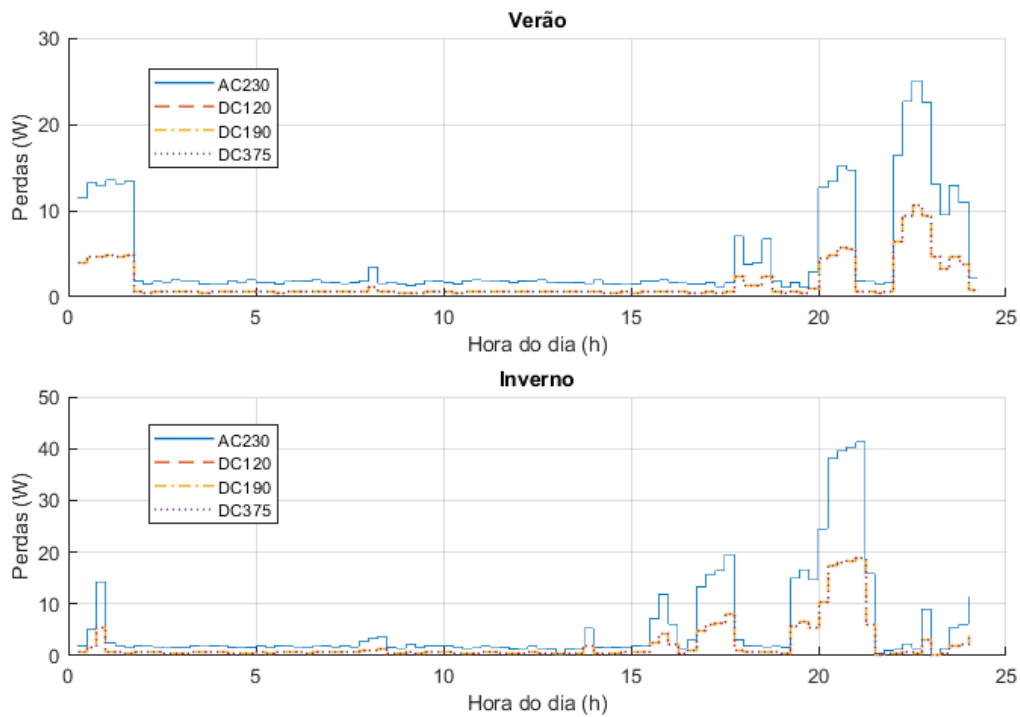


Figura 4.21: Perdas no circuito LI

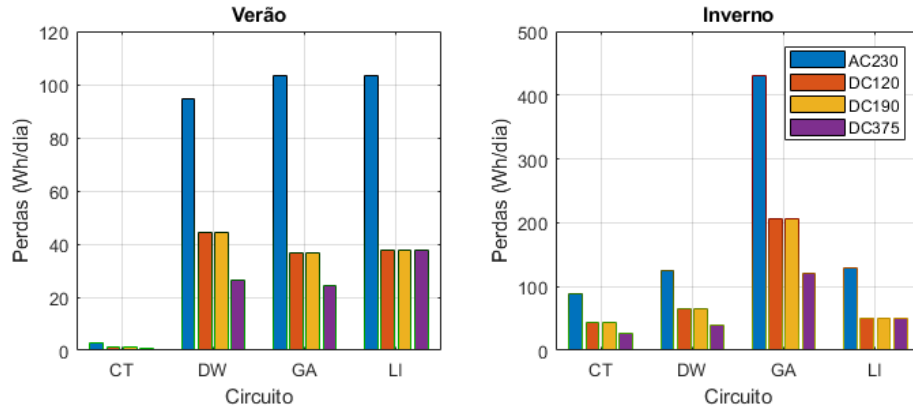


Figura 4.22: Perdas diárias nas cargas

Os resultados, apresentados na Figura 4.22, para perdas diárias, e na Figura 4.23 para perdas anuais, demonstram a melhor eficiência dos conversores DC, mostrando também que, com o uso de 375V DC como tensão dos alimentadores, uma tensão próxima à interna nos circuitos CT, DW e GA, há uma redução das perdas, distinta da encontrada no LI, que opera a 48V internamente. Os valores anuais de perdas tornam, também, mais clara a influência das perdas desses conversores no consumo da residência, por apresentar valores na escala de dezenas de kWh.

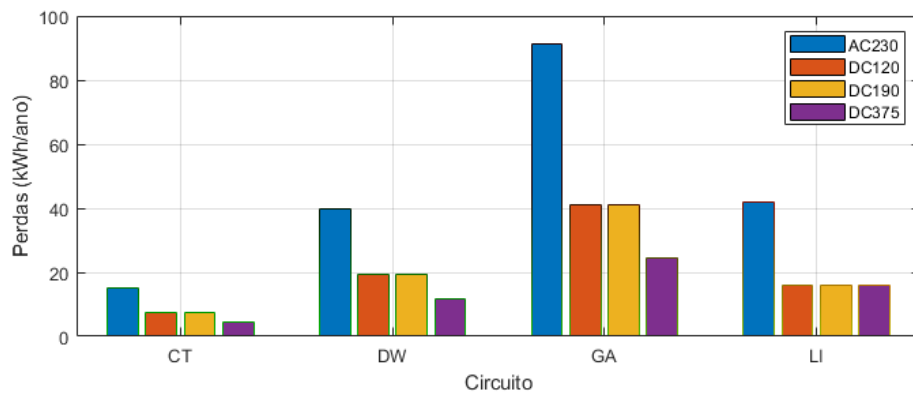


Figura 4.23: Perdas anuais nas cargas

A eficiência de conversão reforça os resultados observados nas Figuras 4.22 e 4.23, sendo melhor com sistemas DC. A eficiência mais elevada, para o sistema a 375V, demonstra os efeitos da menor relação de tensão entre a entrada e a saída, o que é comprovado

com o caso do circuito de iluminação, com tensão de 48V, no qual as eficiências das três arquiteturas DC são muito mais próximas.

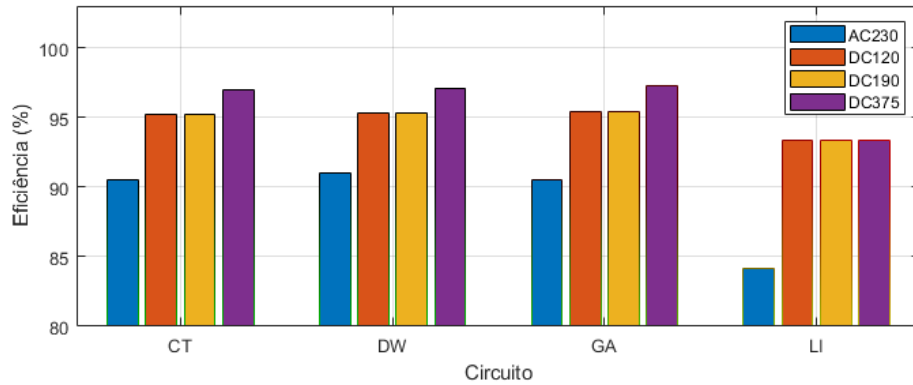


Figura 4.24: Eficiência das cargas

4.4.2 Perdas na Geração e no Armazenamento

As perdas de conversão que ocorrem na geração e no armazenamento representam uma potência que poderia ser fornecida às cargas, sendo, portanto, equivalentes a um consumo nas mesmas. A Figura 4.25 apresenta as perdas diárias nos conversores da geração PV e do ST. Ao concentrar esses equipamentos e utilizar conversores de maior potência nominal, as perdas reduzem de forma notável. O uso de conversores monofásicos, por outro lado, significa que esse efeito será reduzido para sistemas AC, já que a potência nominal desses conversores é menor do que a utilizada nos DC-DC. As Figuras 4.26 e 4.27 representam, respectivamente, as perdas anuais, e a eficiência média, nos conversores de geração e armazenamento. Os resultados demonstram que há maiores perdas em sistemas distribuídos, como esperado, assim como uma eficiência maior em arquiteturas DC com a tensão de 375V apresentando os melhores resultados, com 99% de eficiência para PV e ST, graças à relação de tensão dos conversores, e ao uso de conversores com potência nominal elevada.

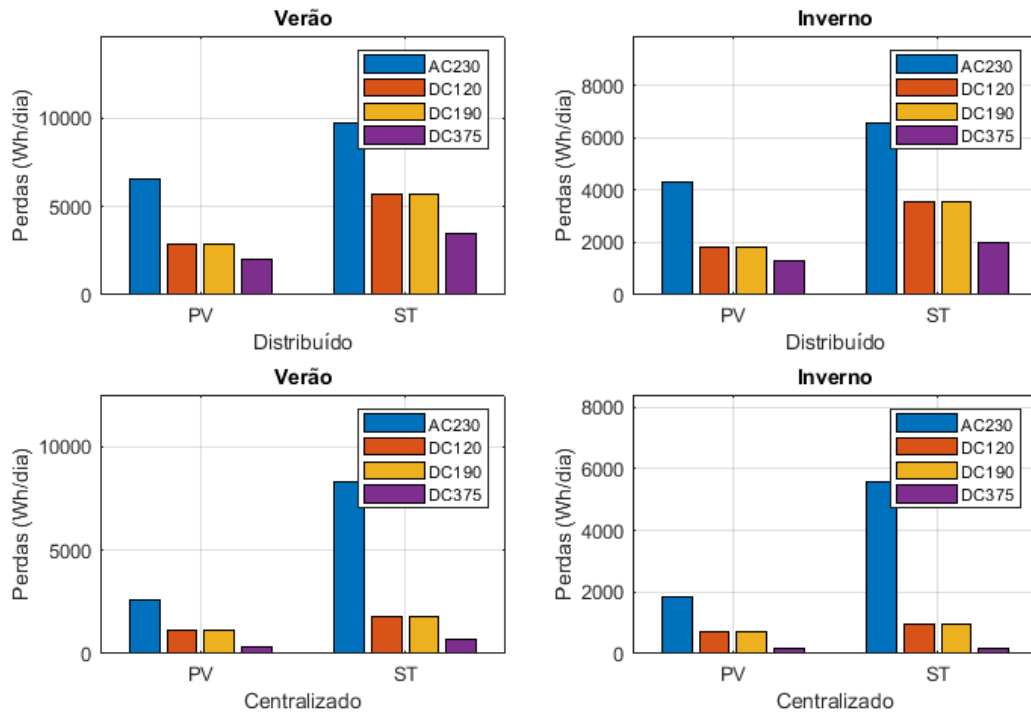


Figura 4.25: Perdas diárias na geração e no armazenamento

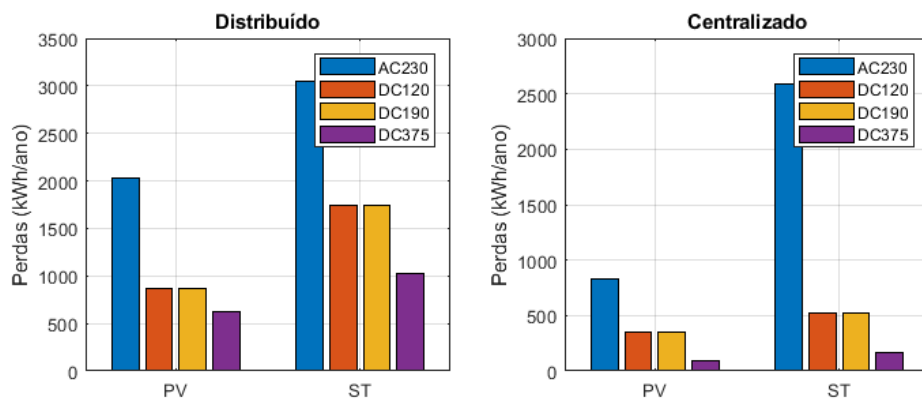


Figura 4.26: Perdas anuais na geração e no armazenamento

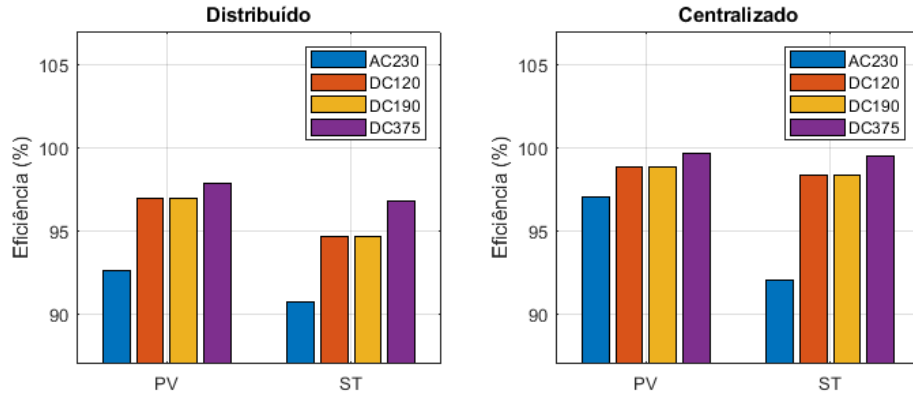


Figura 4.27: Eficiência da geração e do armazenamento

4.4.3 Perdas na Distribuição e Conexão com a Rede

Embora não incorram custos diretos para os consumidores, a redução das perdas, tanto nos condutores de distribuição, quanto nos conversores responsáveis pela conexão com a rede, também os beneficia, além de ser favorável para os fornecedores de energia, já que, ao reduzir as perdas, o fluxo de potência nos condutores é reduzido, permitindo menores seções, o que reduz custos de instalação, trazendo benefícios diretos à entidade responsável pela distribuição de energia, e indiretos aos consumidores. As perdas instantâneas da conexão com a rede, para sistemas com geração e armazenamento centralizados, encontram-se na Figura 4.28, enquanto as perdas na distribuição para sistemas com PV e ST distribuídos são apresentados na Figura 4.29. As Figuras A.23 e A.22 descrevem as perdas instantâneas, nos condutores, em sistemas centralizados, e na conexão com a rede, em sistemas distribuídos, respectivamente.

As perdas na conexão com a rede pouco dependem da distribuição da geração e do armazenamento, como a potência transmitida pelo conversor varia apenas com o aumento de perdas, decorrente da distribuição da geração. As perdas na distribuição, de forma oposta, reduzem notavelmente com a distribuição da geração e do armazenamento, já que são reduzidas as cargas transmitidas nos condutores, como pode ser observado na Figura 4.30. Essas perdas são, entretanto, baixas, quando comparas as perdas nas cargas, encontradas na Figura 4.23, na geração e armazenamento, na Figura 4.26, ou mesmo na

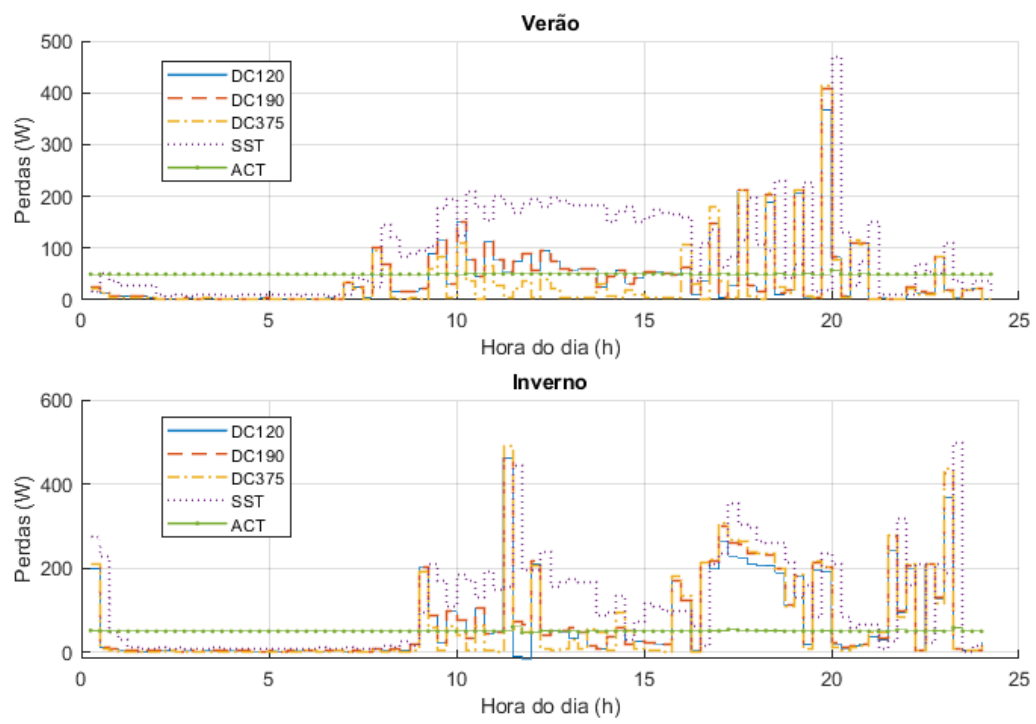


Figura 4.28: Perdas na conexão com a rede em um sistema centralizado

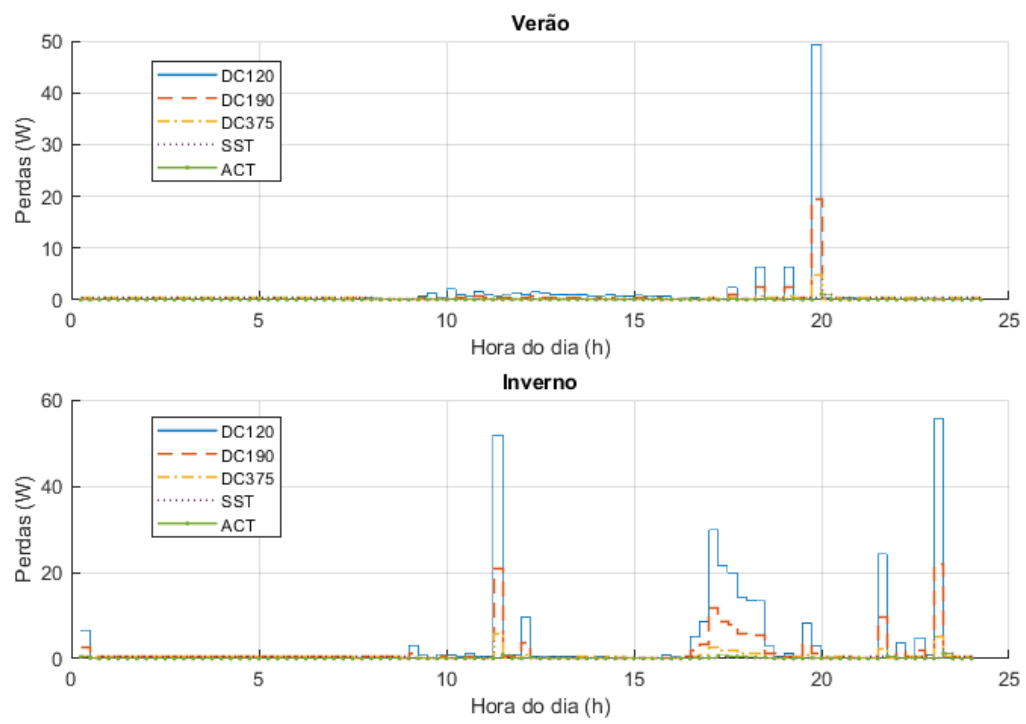


Figura 4.29: Perdas na distribuição em um sistema distribuído

conexão com a rede, da própria Figura 4.30, trazendo poucos benefícios para a distribuição de Fileira Fotovoltaica, *Photovoltaic String* (PV) e Armazenamento, *Storage* (ST).

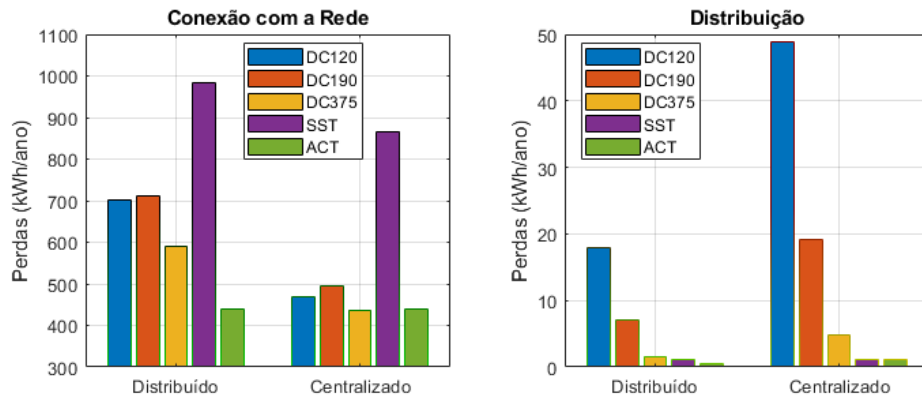


Figura 4.30: Perdas na distribuição e na conexão com a rede

A eficiência dos condutores de distribuição varia com a corrente, tornando, portanto, os sistemas de menor tensão menos eficientes. Já a eficiência da conexão com a rede, devido à alta potência nominal desses conversores, apresenta valores similares de eficiência dos SST, para redes DC e AC. A eficiência dos transformadores convencionais ainda é maior do que a dos de estado sólido, conforme exposto na Figura 4.31, sendo benéfico aos responsáveis pela distribuição.

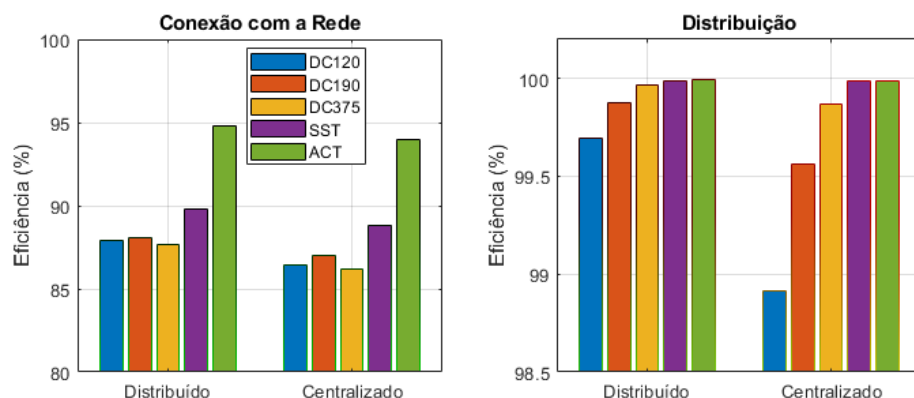


Figura 4.31: Eficiência da distribuição e da conexão com a rede

Um resumo das perdas totais é apresentado na Tabela 4.3, concluindo que, tanto em sistemas centralizados, quanto em distribuídos, a eficiência total, do ponto de conexão com

Tabela 4.3: Perdas e eficiências gerais das arquiteturas

Configuração	Medida	DC 120V	DC 190V	DC 375V	AC SST	AC Transformador Convencional
Distribuído	Perdas (MWh/ano)	3,87	3,86	2,59	6,55	5,99
	Eficiência Geral (%)	36,77	36,83	46,51	25,59	27,31
Centralizado	Perdas (MWh/ano)	1,94	1,91	0,69	4,94	4,51
	Eficiência Geral (%)	53,49	53,89	76,34	31,20	33,21

a rede até as cargas, é maior com o uso de microrredes DC homopolares a 375V do que as alternativas. Também pode ser observado que redes AC apresentam a maior quantidade de perdas totais, tendo um resultado pior do que o uso de microrredes a 120V, que foi a menos vantajosa dentre as tensões avaliadas para arquiteturas DC. Por outro lado, a centralização da geração e do armazenamento reduziu as perdas totais da microrrede em todos os casos avaliados, enquanto, entre as arquiteturas AC, o uso do transformador de estado sólido apresentou piores resultados gerais no estudo.

Capítulo 5

Análise Econômica

Buscando melhor compreender os efeitos de uma menor eficiência na interface eletrônica, é válido avaliar o consumo e, por consequência, os custos associados ao mesmo. Essa avaliação visa identificar os benefícios, para os consumidores, do uso de uma ou outra arquitetura para microrredes. Como as tecnologias associadas a microrredes AC e DC possuem maturidades distintas, o que influencia o custo de implementação delas, apenas os custos mensais, associados ao consumo de cada casa, foram comparados, com o intuito de reduzir a influência do preço atual das tecnologias nos resultados apresentados.

5.1 Metodologia

Existem diversos sistemas de distribuição pelo mundo, com métodos de faturação e cobrança variados, por esse motivo, buscou-se avaliar algumas modalidades.

Em Portugal, a EDP fornece três modalidades, [37], onde o preço por kWh varia com o período do dia, conforme Figura 5.1, além de um valor fixo anual, que, para a potência instalada das casas, enquadrada no grupo de 5,75 kW, é de 119,14, 121,22 e 113,66 euros, para simples, bi-horário e tri-horário, respectivamente.

No Brasil, de forma distinta, a Light, [38], no Rio de Janeiro, não trabalha com sistemas de preço da energia em função da hora do dia, como encontrado em Portugal. A empresa oferece, no entanto, uma cobrança baseada no consumo total de energia no mês,

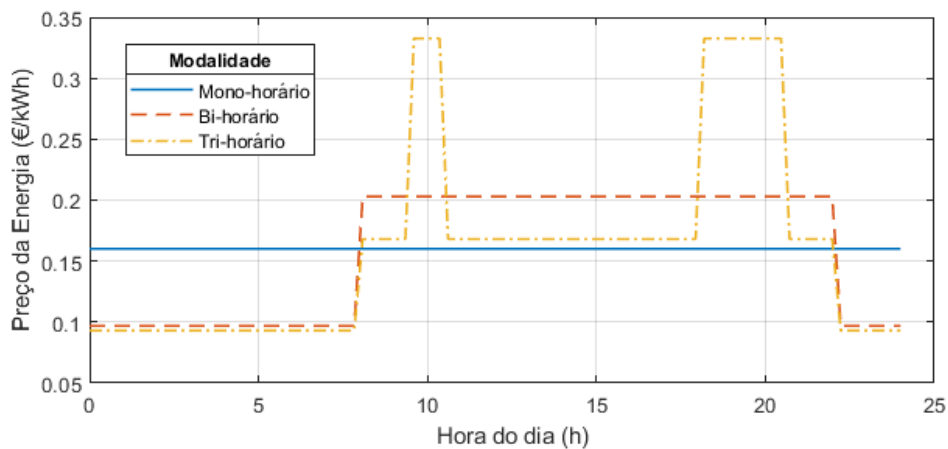


Figura 5.1: Modelo de cobrança em Portugal

onde o preço do kWh adicional depende do consumo anterior, havendo, assim patamares de custo de energia, como apresentado na Figura 5.2, sendo o consumo total faturado mensalmente.

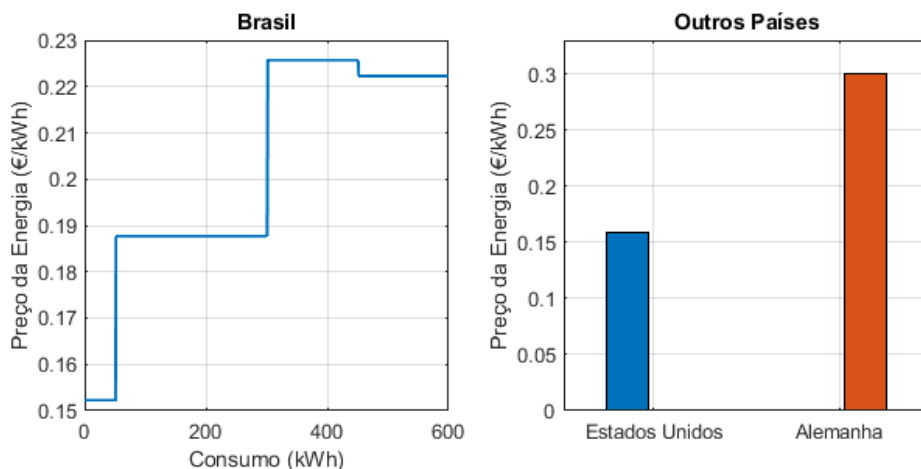


Figura 5.2: Modelo de cobrança em outros países

A Figura 5.2 também apresenta os preços médios da energia para os Estados Unidos e para a Alemanha. Nos Estados Unidos, e particularmente em Nova York, o sistema de faturação varia com o dia e com a empresa responsável pela distribuição, sendo os valores horários apresentados no dia anterior, como uma avaliação horária já é feita para Portugal, será utilizado o valor médio da energia para a cidade, encontrado em [39]. A

Alemanha possui ,atualmente, um dos maiores custos pela energia elétrica [40], por isso é interessante observar os seus efeitos para a análise econômica. Como ambos os países trabalham com faturasções horárias, assim como Portugal, mostrou-se interessante apenas a avaliação dos valores médios dessa energia, com uma faturação simples. Isso permite comparar os efeitos do uso de microrredes nas arquiteturas avaliadas para diferentes preços da energia.

A cotação do euro de 1,111 para o Dólar Estadunidense, *United States Dollar* (USD) e de 4,318 para o Real Brasileiro, *Brasilian Real* (BRL), [41], foi utilizada como conversão de moedas, permitindo obter valores em euros, que serão comparados entre si.

Nessa análise, são avaliados três casos: geração e armazenamento distribuídos, geração e armazenamento centralizados, e somente cargas. O caso em que só existem cargas é útil para avaliar os benefícios de cada arquitetura também em redes de distribuição convencionais. Com esse caso é possível, também, comparar os gastos com energia para redes convencionais e redes com fontes renováveis e armazenamento. Como a análise foca nos efeitos para os consumidores, as perdas na distribuição e na conexão com a rede não são consideradas.

Para os estudos horários, tanto os consumos do dia típico de verão, quanto os do de inverno foram multiplicados pelo preço da energia no instante do consumo. Para calcular o custo total anual, foi feita a soma dos custos diários, utilizando a relação de 201 dias de verão e 164 de inverno, apresentada no Capítulo 4. No caso dos Estados Unidos e da Alemanha, por ser utilizado um preço médio da energia, uma simples multiplicação do consumo total pelo preço permite calcular o custo anual. Para o Brasil, por haver uma faturação mensal, os dias de verão e de inverno foram divididos em meses, com 6 meses de verão, 5 de inverno e um, composto dos dias sobressalentes.

5.2 Resultados

Em Portugal, foi formulado uma representação do custo instantâneo da energia, com base no sistema de preços e nos consumos registrados. As Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 descrevem os

custos instantâneos para as modalidades simples, bi-horária e tri-horária, respectivamente.

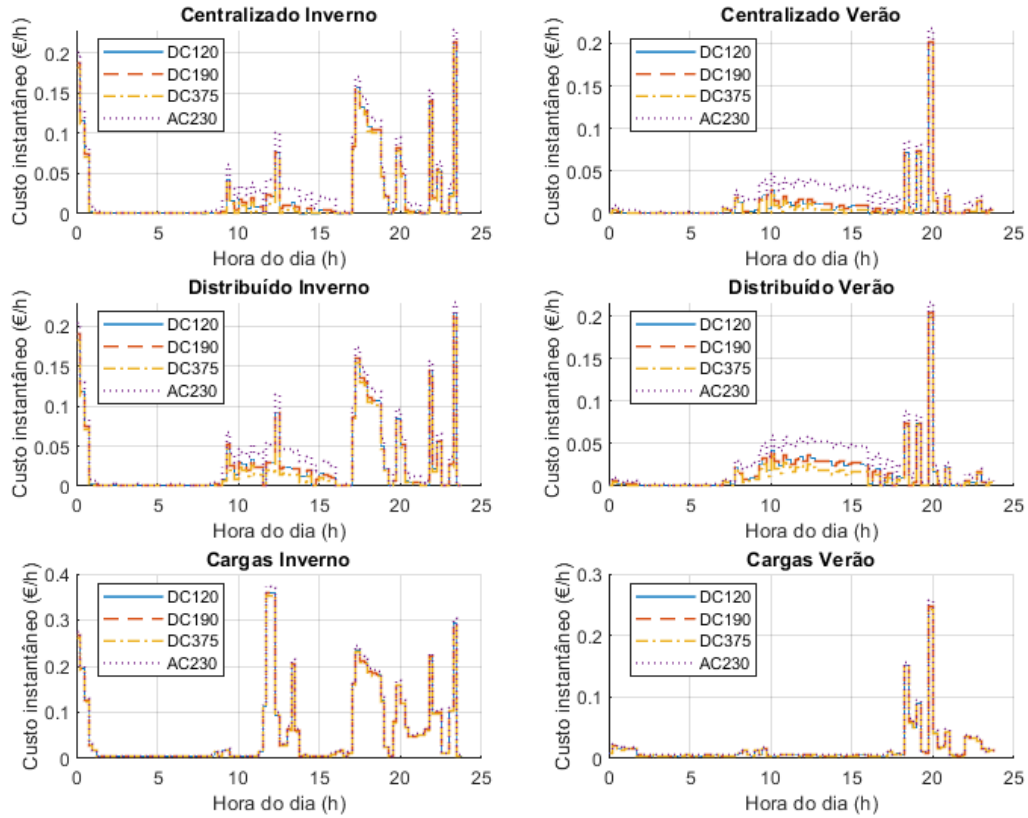


Figura 5.3: Custo instantâneo da energia em Portugal com tarifa simples

Os resultados anuais são apresentados na Figura 5.6. A figura demonstra a redução do custo anual com a instalação de um sistema de geração e armazenamento. Os sistemas DC apresentam resultados ainda melhores, podendo ser ressaltado, também, que a instalação desses sistemas de geração fotovoltaica e estações V2G, de forma centralizada, reduz ainda mais os custos.

Os resultados para os outros países, vistos na Figura 5.7, demonstram relações semelhantes, apresentando variações de escala, sendo o maior custo anual o encontrado na Alemanha, o que condiz com o preço médio da energia apresentado na Figura 5.2.

As Figuras 5.8 e 5.9 apresentam a economia das redes DC, nas três tensões avaliadas,

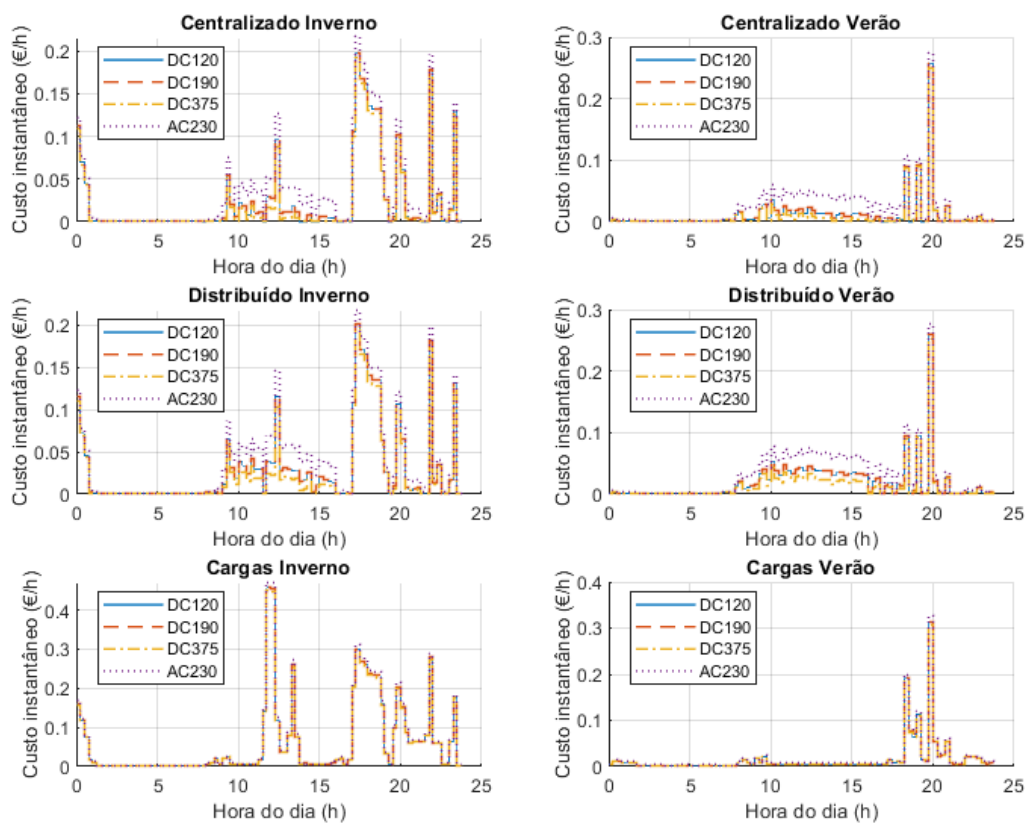


Figura 5.4: Custo instantâneo da energia em Portugal com tarifa bi-horária

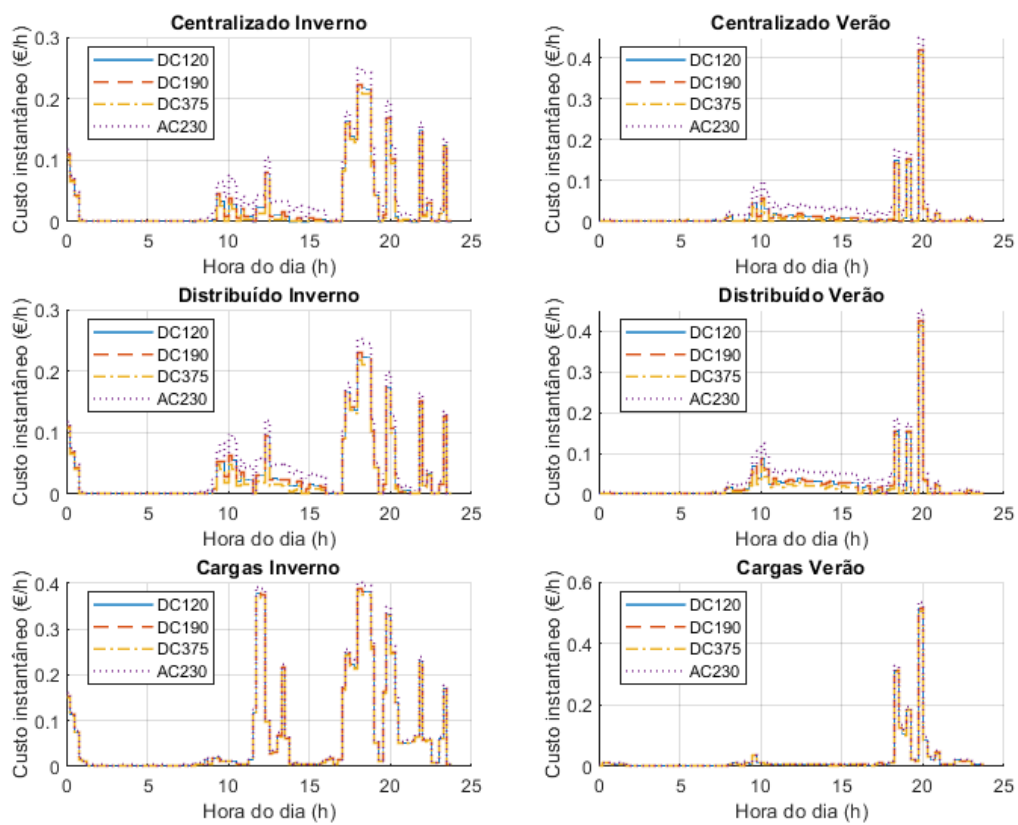


Figura 5.5: Custo instantâneo da energia em Portugal com tarifa tri-horária

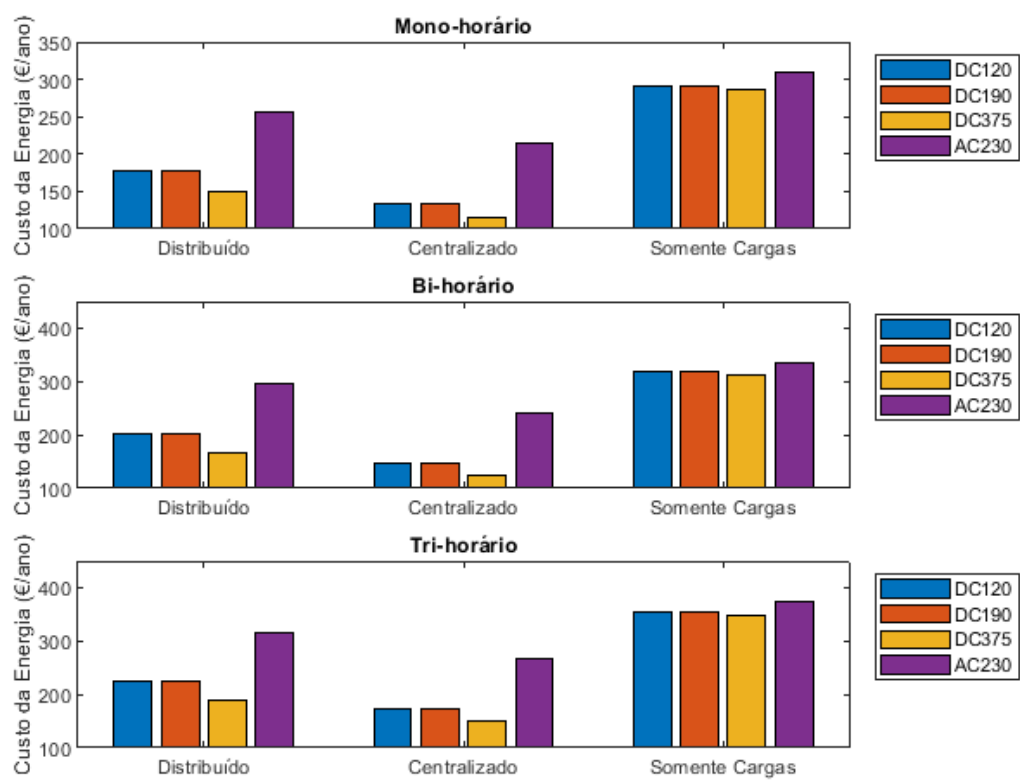


Figura 5.6: Custo anual da energia em Portugal

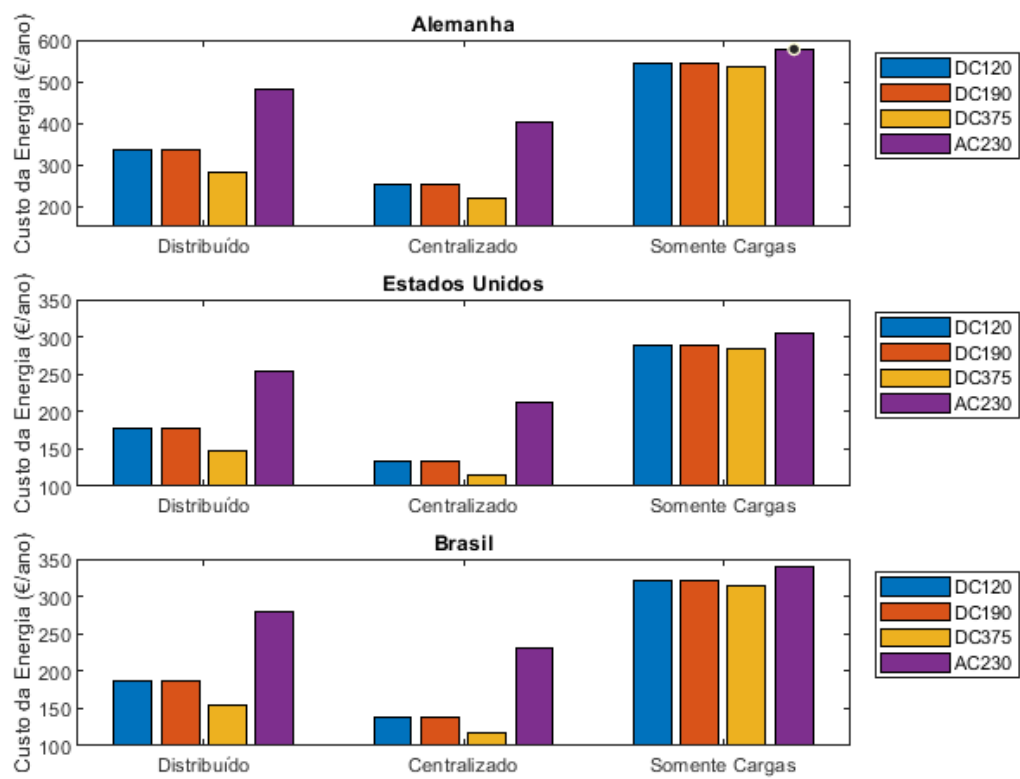


Figura 5.7: Custo anual da energia em outros países

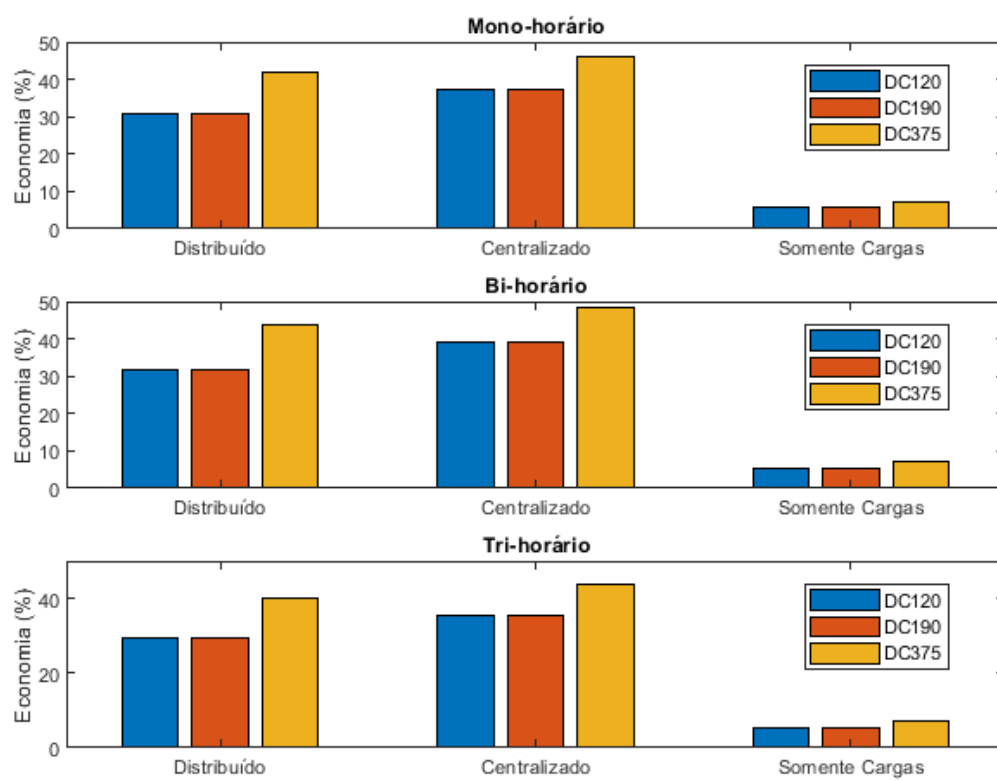


Figura 5.8: Economia anual média em Portugal

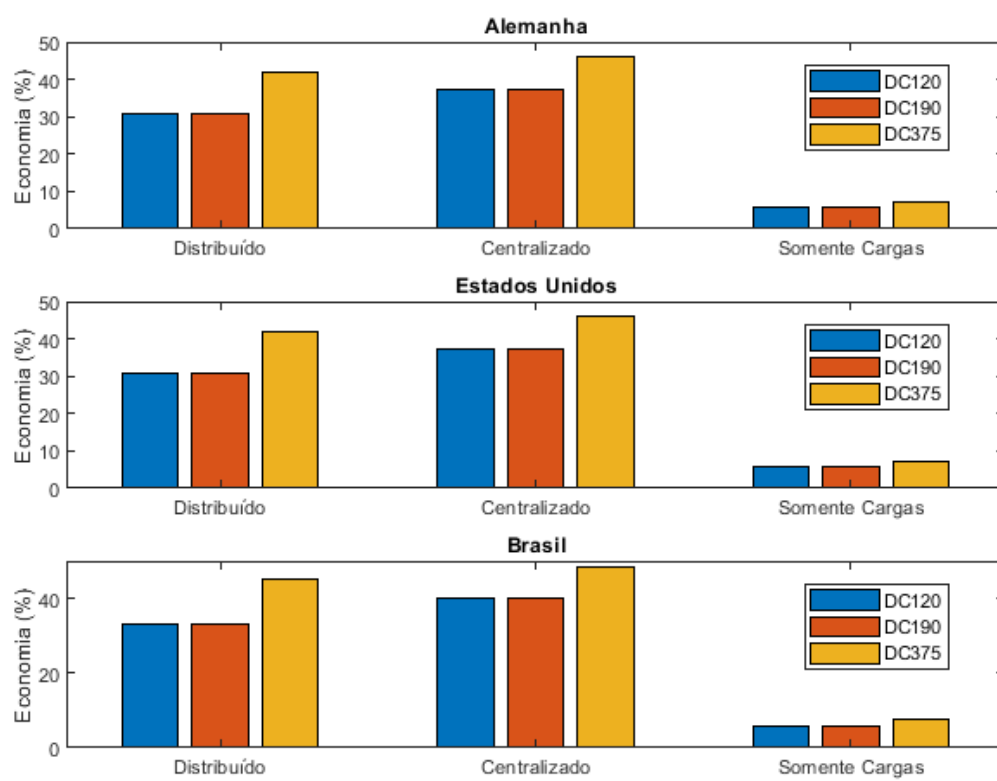


Figura 5.9: Economia anual média em outros países

quando comparadas à arquitetura AC, sendo a primeira para as três modalidades de tarifa portuguesa avaliadas, e a segunda para os outros países estudados. Essa avaliação permite observar mais diretamente os benefícios encontrados ao utilizar redes DC, sendo importante ressaltar que os custos fixos não são levados em consideração.

Para uma avaliação que considera os custos fixos anuais, referentes à potência instalada de 5,75kW, a Figura 5.10 apresenta a economia real de cada arquitetura DC, em Portugal.

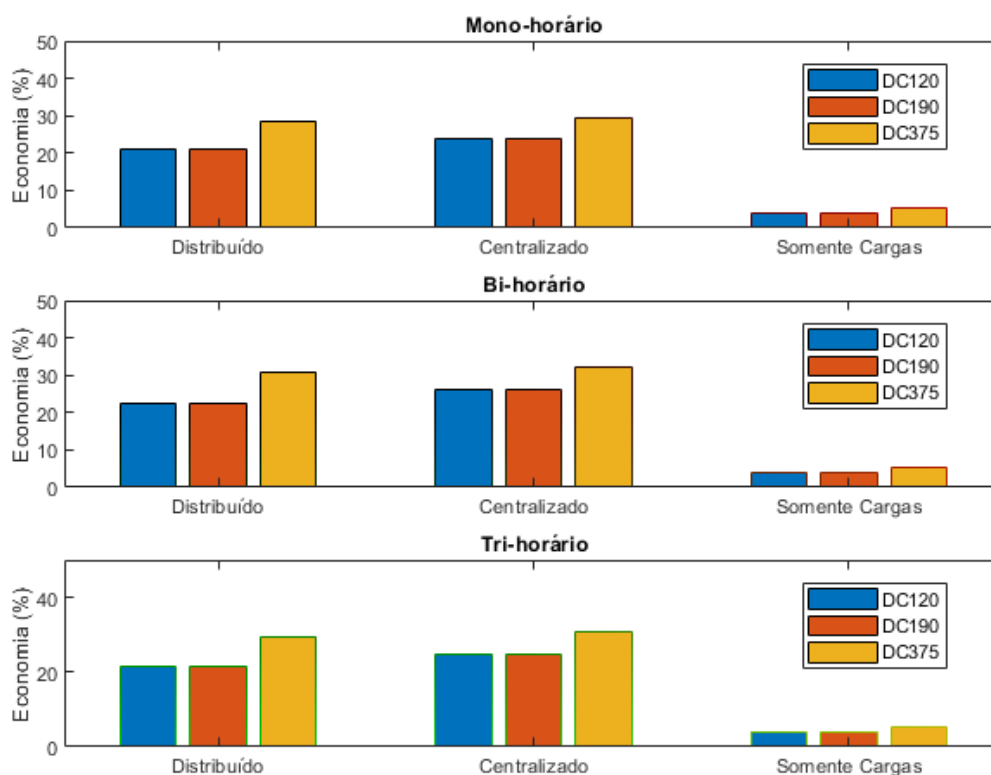


Figura 5.10: Economia anual média em Portugal, considerando os custos fixos

Os benefícios de um sistema composto somente de cargas são menores, embora as redes DC ainda apresentem uma economia em relação às AC. No Brasil, país com o menor custo da energia dentre os avaliados, há uma redução dos custos variáveis de 7,5% com o uso de 375V DC, em relação a 400V/230V AC para o caso sem geração ou armazenamento. Já havendo um sistema baseado em fontes fotovoltaicas e armazenamento por V2G, os

benefícios da microrrede DC tornam-se mais claros. Para um regime bi-horário português, o uso de uma arquitetura a 375V DC apresenta uma redução de 51% nos custos variáveis com relação à microrrede AC, no Brasil, este valor é ainda maior, com uma economia de 51,7%. Levando em consideração os custos fixos, para Portugal, é encontrada uma redução máxima de 5,35% dos custos anuais, para sistema composto somente de cargas a 375V DC para uma tarifa tri-horária. Em uma microrrede centralizada, para uma tarifa bi-horária, este valor é de 32,12%. Os resultados demonstram que a influência, das fontes e do armazenamento na economia é maior para arquiteturas DC, justificando o interesse atual nesses sistemas, principalmente para o uso em microrredes e redes com geração distribuída.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

O estudo buscava compreender os benefícios de cada arquitetura analisada, em diversos aspectos, sendo o foco dele uma análise de capacidade de transmissão, uma comparação das eficiências em cenários realistas, e uma avaliação dos custos, para os consumidores, do uso de uma ou outra arquitetura.

6.1 Conclusões

Estudos anteriores, apresentados no Capítulo 2, já demonstravam que sistemas de distribuição em DC são mais simples de operar e apresentam uma maior fiabilidade, proveniente da redução de elementos conectados em série. Apesar dos sistemas de proteção ainda não terem sido completamente desenvolvidos para essas arquiteturas, é frequente o uso de equipamentos de tecnologias AC superdimensionados como substituto.

Em termos de capacidade de transmissão de potência, o uso de níveis de tensão como 120V ou 190V DC, no lugar de 400V/230V AC, implica em uma redução, tanto na potência máxima transmissível, quanto na distância pela qual essa potência pode ser transmitida. Por outro lado, com o uso da tensão de 375V DC, recomendada em [12], os resultados de potência máxima e distância são melhores do que os encontrados para AC. Em termos de quantidade de material utilizado, tendo como referência a tensão de 375V DC, sistemas a 400V/230V AC utilizam, para a potência máxima avaliada, o dobro da quantidade de

material, enquanto, por uma microrrede homopolar a 120V DC, são utilizadas 8 vezes o material usado pelas redes a 375V.

Os melhores resultados, dentre os avaliados, em termos de perdas, foram encontrados, também, para o nível de tensão de 375V, onde foi calculada uma eficiência máxima de 97,1% na máquina de lavar louça, e de 99% para o grupo de fileiras fotovoltaicas, quando centralizadas. Com essa configuração, foi possível obter 76,3% de eficiência geral para a mesma arquitetura. A tensão de 400V/230V DC apresentou melhores resultados na distribuição e conexão com a rede, principalmente com o uso de transformadores convencionais. Porém, a tecnologia associada aos SST ainda está em desenvolvimento, e estudos buscando o aumento da eficiência desses equipamentos foram apresentados no Capítulo 2, sendo viável uma revisão futura desses resultados. Em termos gerais de eficiência, a arquitetura AC apresentou os piores resultados, com eficiências totais em 33,21% para sistemas centralizados e 27,31% quando a geração e o armazenamento são distribuídos.

A análise econômica permite concluir que, em redes de distribuição tradicionais, compostas somente de cargas, os benefícios do uso sistemas DC são reduzidos, com uma economia máxima dos custos variáveis em 7,5% e uma economia total máxima em 5,35%. Porém, com a adição de geração distribuída e de armazenamento, equipamentos que requerem uma interface eletrônica e que, no caso estudado, possuem uma alta potência nominal, quando comparada à das cargas, uma economia notável dos custos anuais é proporcionada. Esse resultado é acentuado com a configuração das microrredes com fileiras fotovoltaicas e estações V2G centralizados, trazendo mais benefícios para arquiteturas DC, em relação à AC.

Os sistemas homopolares a 375V DC foram a melhor alternativa analisada, sendo a única com capacidade de transmissão superior à dos sistemas trifásicos a 400V/230V AC. Por haver pouca diferença, em termos de eficiência, economia e capacidade de transmissão, entre redes a 120V e a 190V DC, os benefícios de segurança de um sistema em extra baixa tensão incentivam o uso da tensão de 120V DC como alternativa, principalmente para sistemas de baixa potência e curta distância, como nano-redes ou sistemas isolados.

6.2 Trabalhos Futuros

Com o crescimento do uso de fontes renováveis e sistemas de armazenamento, as avaliações comparativas, e a necessidade por uma regulamentação mais incisiva de sistemas de distribuição DC, aumentam, sendo essa o principal retardante do uso da tecnologia. São recomendados estudos dos SST, de forma a aumentar a eficiência dos mesmos e torná-los mais competitivos, assim como análises legislativas que afunilem as normas e criem padrões mais claros para o uso de microrredes DC. Testes práticos dessas arquiteturas também serão capazes de avaliar, de forma empírica, a confiabilidade desses equipamentos, viabilizando análises comparativas mais fundamentadas em resultados práticos.

Bibliografia

- [1] P. Fairley, “DC Versus AC: The Second War of Currents Has Already Begun [In My View]”, *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 10, n.º 6, pp. 104–103, nov. de 2012, ISSN: 1540-7977. DOI: 10.1109/MPE.2012.2212617.
- [2] Y. Song e B. Wang, “Survey on reliability of power electronic systems”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, n.º 1, pp. 591–604, 2012.
- [3] Z. Liu e M. Li, “Research on energy efficiency of Dc distribution system”, *AASRI procedia*, vol. 7, pp. 68–74, 2014.
- [4] E. Planas, J. Andreu, J. I. Gárate, I. M. de Alegría e E. Ibarra, “AC and DC technology in microgrids: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, pp. 726–749, 2015.
- [5] H.-S. Kim, M.-H. Ryu, J.-W. Baek e J.-H. Jung, “High-efficiency isolated bidirectional AC–DC converter for a DC distribution system”, *IEEE transactions on Power Electronics*, vol. 28, n.º 4, pp. 1642–1654, 2013.
- [6] Y. Zhong, N. Roscoe, D. Holliday, T. C. Lim e S. J. Finney, “High-efficiency MOSFET-based MMC design for LVDC distribution systems”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, n.º 1, pp. 321–334, 2018.
- [7] H.-j. Choi, S.-h. Jung e J.-h. Jung, “A Novel Switching Algorithm to improve Efficiency at light load conditions for Three-Phase DAB Converter in LVDC Application”, em *2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia)*, IEEE, 2018, pp. 383–387.

- [8] N. Savage e R. R. Nordhaus, “Jamieson “DC micro grids: Benefits and Barriers””, *Analyses written at the request of REIL*,
- [9] M. S. Agamy, M. Harfman-Todorovic, A. Elasser, R. L. Steigerwald, J. A. Sabate, S. Chi, A. J. McCann, L. Zhang e F. Mueller, “A high efficiency DC-DC converter topology suitable for distributed large commercial and utility scale PV systems”, em *2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/-PEMC)*, IEEE, 2012, LS2d–3.
- [10] “Renewables 2018 global status report”, *Paris: REN21 Secretariat*, 2018.
- [11] S. Moussa, M. J.-B. Ghorbal e I. Slama-Belkhodja, “Bus voltage level choice for standalone residential DC nanogrid”, *Sustainable Cities and Society*, p. 101431, 2019.
- [12] E. Rodriguez-Diaz, F. Chen, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, R. Burgos e D. Boroyevich, “Voltage-level selection of future two-level LVdc distribution grids: A compromise between grid compatibility, safety, and efficiency”, *IEEE Electrification Magazine*, vol. 4, n.º 2, pp. 20–28, 2016.
- [13] S. Moussa, M. J.-B. Ghorbal e I. Slama-Belkhodja, “DC voltage level choice in residential remote area”, em *2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC)*, IEEE, 2018, pp. 1–6.
- [14] A. Virdag, T. Hager e R. W. De Doncker, “Recommendations for standardization of voltage level in LVDC networks based on IEC 60479-1 guidelines”, *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 134, n.º 4-5, pp. 267–275, 2017.
- [15] I. Patrao, E. Figueres, G. Garcerá e R. González-Medina, “Microgrid architectures for low voltage distributed generation”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, pp. 415–424, 2015.
- [16] J. Kim, J. M. Guerrero, P. Rodriguez, R. Teodorescu e K. Nam, “Mode adaptive droop control with virtual output impedances for an inverter-based flexible AC

- microgrid”, *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 26, n.º 3, pp. 689–701, 2010.
- [17] M. Banaei e E. Salary, “Mitigation of voltage sag, swell and power factor correction using solid-state transformer based matrix converter in output stage”, *Alexandria Engineering Journal*, vol. 53, n.º 3, pp. 563–572, 2014.
 - [18] J. J. Justo, F. Mwasilu, J. Lee e J.-W. Jung, “AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review”, *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 24, pp. 387–405, 2013.
 - [19] P. C. Loh, D. Li, Y. K. Chai e F. Blaabjerg, “Autonomous operation of hybrid microgrid with AC and DC subgrids”, *IEEE transactions on power electronics*, vol. 28, n.º 5, pp. 2214–2223, 2012.
 - [20] A. Karabiber, C. Keles, A. Kaygusuz e B. B. Alagoz, “An approach for the integration of renewable distributed generation in hybrid DC/AC microgrids”, *Renewable Energy*, vol. 52, pp. 251–259, 2013.
 - [21] N. B. Negra, J. Todorovic e T. Ackermann, “Loss evaluation of HVAC and HVDC transmission solutions for large offshore wind farms”, *Electric power systems research*, vol. 76, n.º 11, pp. 916–927, 2006.
 - [22] U. Manandhar, A. Ukil e T. K. K. Jonathan, “Efficiency comparison of DC and AC microgrid”, em *2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT ASIA)*, IEEE, 2015, pp. 1–6.
 - [23] A. Zekry e A. Abdalrahman, “Digital Control Techniques for Grid-Connected Inverters”, tese de doutoramento, jan. de 2013.
 - [24] B. K. Sovacool e R. F. Hirsh, “Beyond batteries: An examination of the benefits and barriers to plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and a vehicle-to-grid (V2G) transition”, *Energy Policy*, vol. 37, n.º 3, pp. 1095–1103, 2009.

- [25] S. Han, S. Han e K. Sezaki, “Estimation of achievable power capacity from plug-in electric vehicles for V2G frequency regulation: Case studies for market participation”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, n.º 4, pp. 632–641, 2011.
- [26] H. Lund e W. Kempton, “Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G”, *Energy policy*, vol. 36, n.º 9, pp. 3578–3587, 2008.
- [27] C. Zhou, K. Qian, M. Allan e W. Zhou, “Modeling of the cost of EV battery wear due to V2G application in power systems”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, n.º 4, pp. 1041–1050, 2011.
- [28] H. Lotfi e A. Khodaei, “AC versus DC microgrid planning”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, n.º 1, pp. 296–304, 2015.
- [29] M. Kamran, M. Bilal e M. Mudassar, “DC Home Appliances for DC Distribution System”, *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 36, n.º 4, p. 10, 2017.
- [30] I. E. Committee et al., “Protection against electric shock-Common aspects for installation and equipment”, *IEC 61140*, 2001.
- [31] E. Alliance, “380 Vdc architectures for the modern data center”, *EMerge Alliance, San Ramon, CA, USA*, 2013.
- [32] I. R. d. S. de Redes, “de Distribuição de Energia Eléctrica em Baixa Tensão”, *Edição DGE*, 1990.
- [33] H. A. Wheeler, “Formulas for the Skin Effect”, *Proceedings of the IRE*, vol. 30, n.º 9, pp. 412–424, set. de 1942, ISSN: 0096-8390. DOI: 10.1109/JRPROC.1942.232015.
- [34] Tesla, *Tesla Model X*, https://www.tesla.com/pt_PT/modelx, acessado 2019-09-09, set. de 2019.
- [35] S. Bhattacharya, “Transforming the transformer”, *IEEE Spectrum*, vol. 54, n.º 7, pp. 38–43, 2017.
- [36] S. S. Music, *Tesla Car Battery Voltage*, <http://speakerspeakermusic.com/tesla-car-battery-voltage/>, acessado 2019-09-09, set. de 2019.

- [37] Lojaluz, *Tarifas Eléctricas*, <https://lojaluz.com/faq/tarifas-eletricas>, acessado 2019-07-30, ago. de 2019.
- [38] Light, *Composição da Tarifa*, <http://www.light.com.br/para-residencias/Sua-Conta/composicao-da-tarifa.aspx>, acessado 2019-07-30, ago. de 2019.
- [39] N. Y. S. E. Research e D. Authority, *Monthly Average Electricity Residential*, <https://www.nyserda.ny.gov/Researchers-and-Policymakers/Energy-Prices/Electricity/Monthly-Avg-Electricity-Residential>, acessado 2019-07-30, ago. de 2019.
- [40] Eurostat, *Electricity Prices*, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics, acessado 2019-07-30, ago. de 2019.
- [41] X. corporation, <https://www.xe.com/pt/currencyconverter/convert/?Amount=1&From=EUR&To=USD>, acessado 2019-07-30, ago. de 2019.

Apêndice A

Figuras e Tabelas

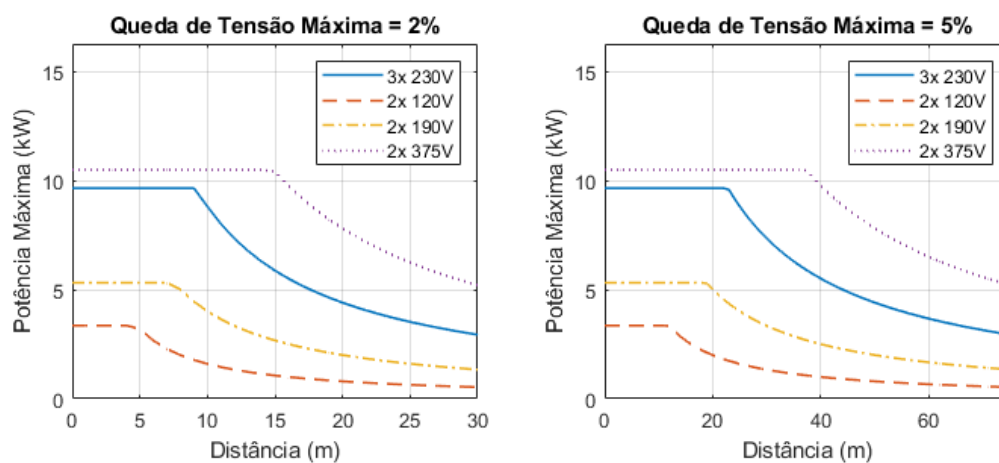


Figura A.1: Capacidade de transmissão de potência para 0.5mm^2

Tabela A.1: Características de condutores de cobre

Seção (mm ²)	Corrente Máxima (A)	Resistência (Ω)	Reatância Indutiva (Ω)
0,5	14	36	0,16
1	17	18,1	0,15
1,5	30	12,1	0,14
2,5	40	7,41	0,13
4	50	4,61	0,13
6	65	3,08	0,12
10	90	1,83	0,12
16	120	1,15	0,11
25	155	0,727	0,11
35	185	0,524	0,10
50	220	0,387	0,10
70	280	0,268	0,10
95	335	0,193	0,10
120	380	0,153	0,099
150	435	0,124	0,098
185	490	0,524	0,097
240	570	0,524	0,096
300	640	0,524	0,095
400	760	0,524	0,093

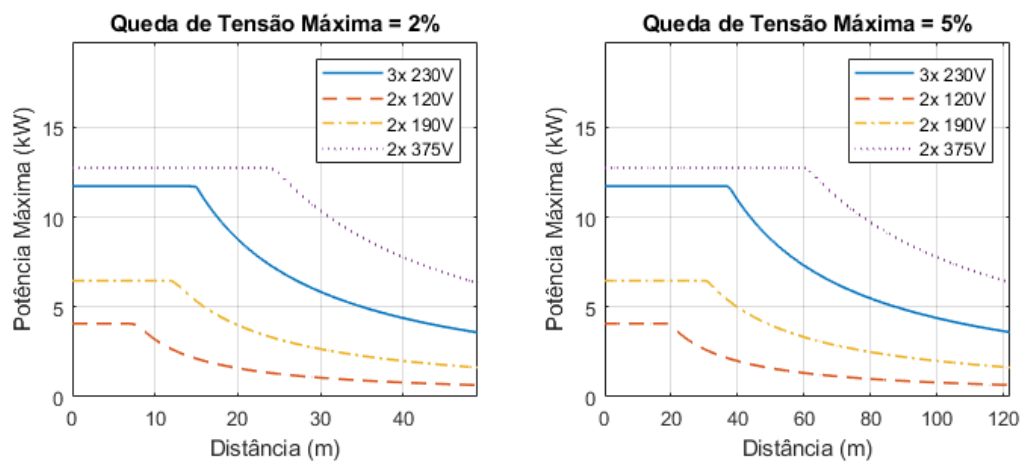


Figura A.2: Capacidade de transmissão de potência para 1.0mm²

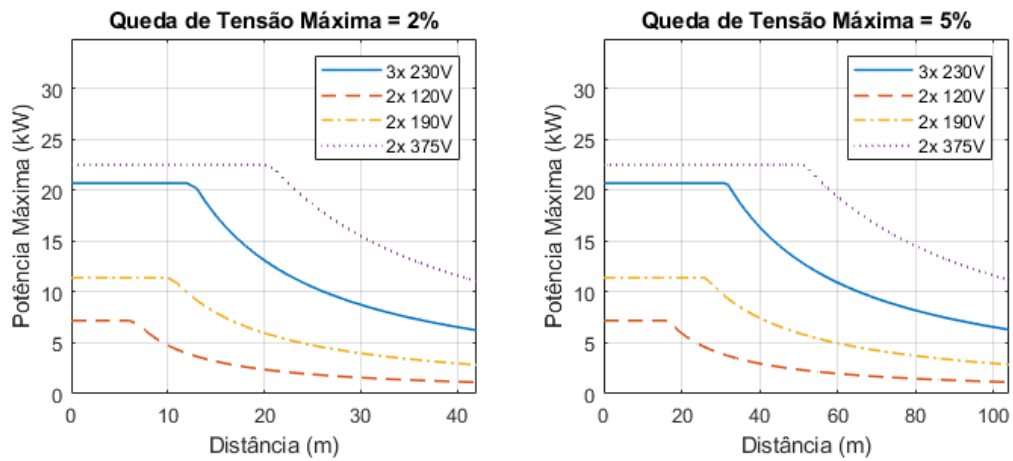


Figura A.3: Capacidade de transmissão de potência para 1.5mm²

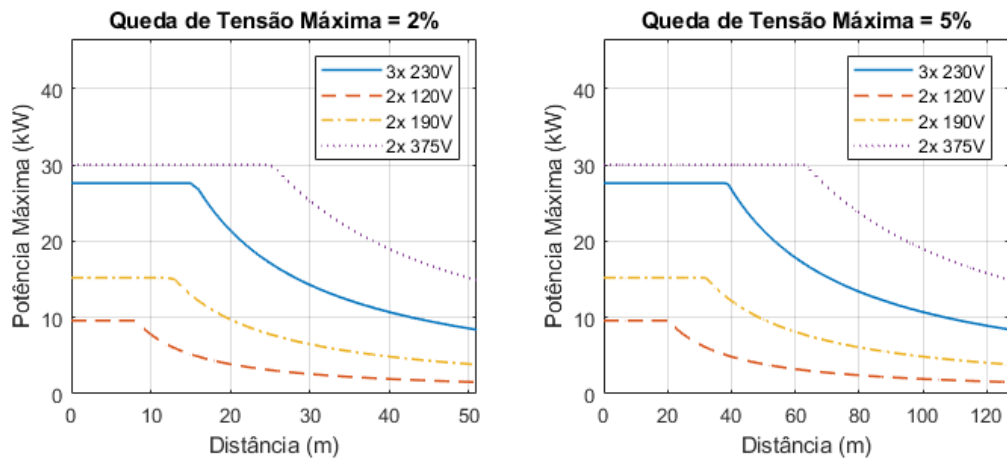


Figura A.4: Capacidade de transmissão de potência para 2.5mm²

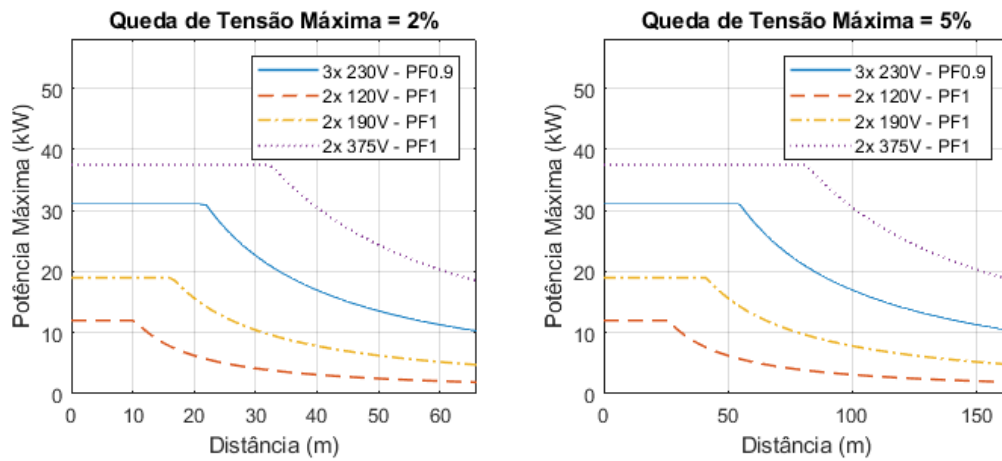


Figura A.5: Capacidade de transmissão de potência para 4mm²

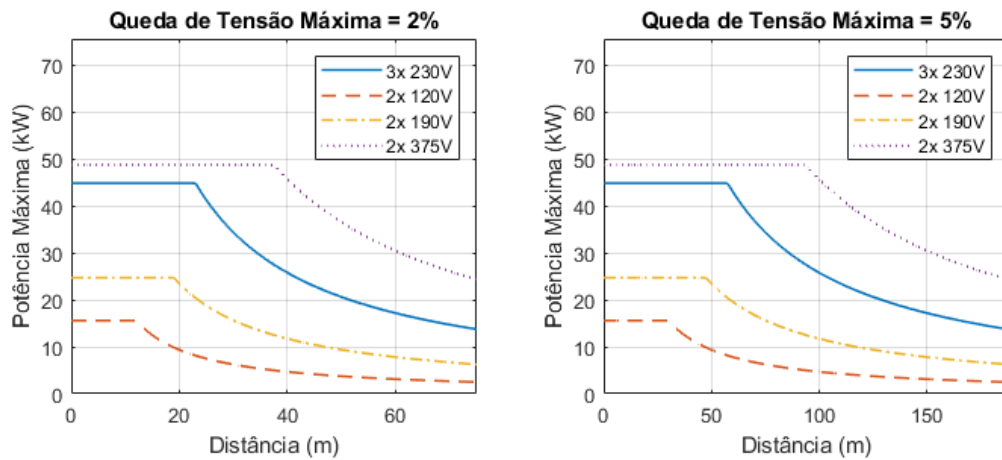


Figura A.6: Capacidade de transmissão de potência para 6mm²

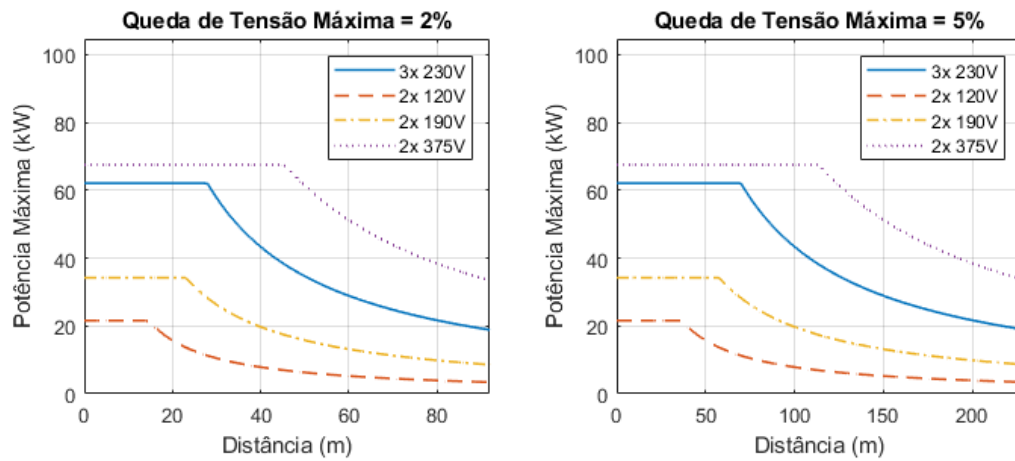


Figura A.7: Capacidade de transmissão de potência para 10mm²

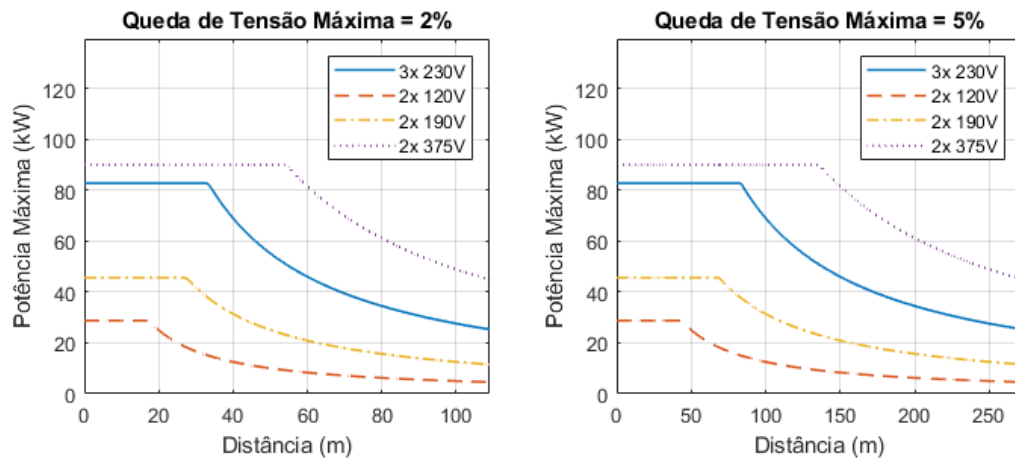


Figura A.8: Capacidade de transmissão de potência para 16mm²

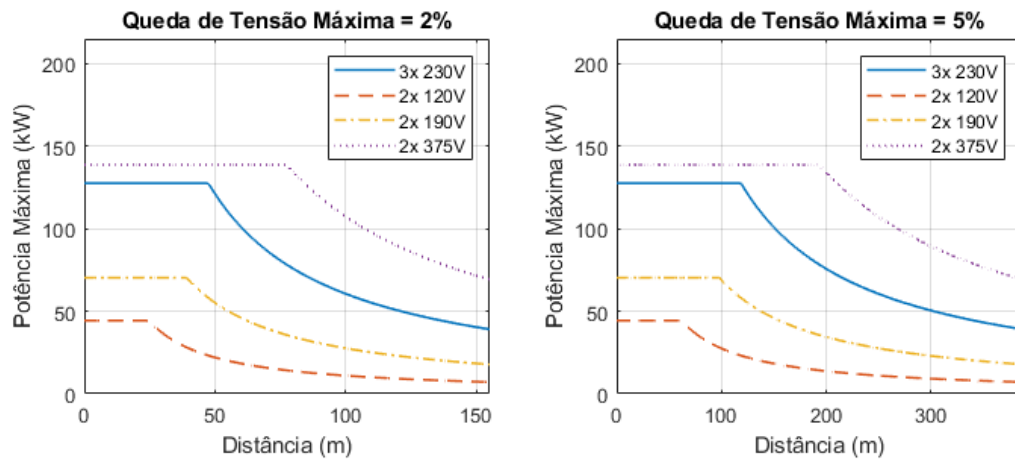


Figura A.9: Capacidade de transmissão de potência para 35mm²

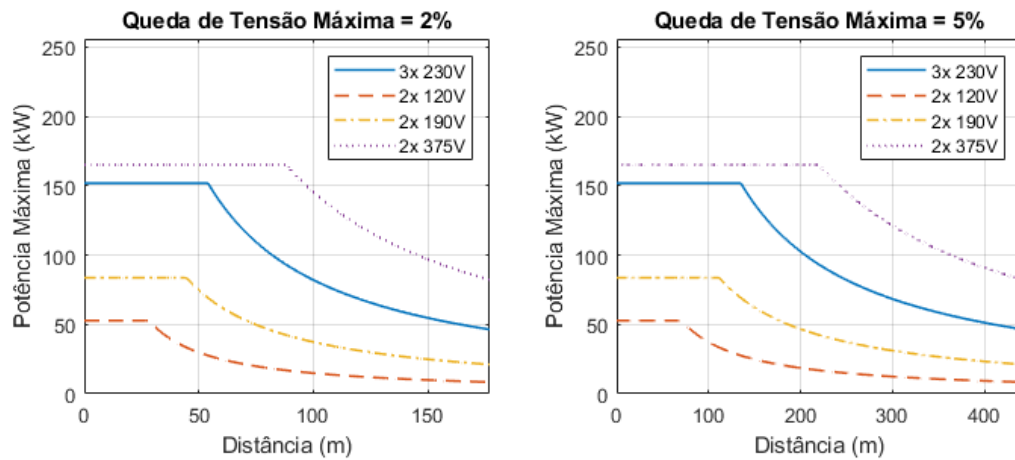


Figura A.10: Capacidade de transmissão de potência para 50mm²

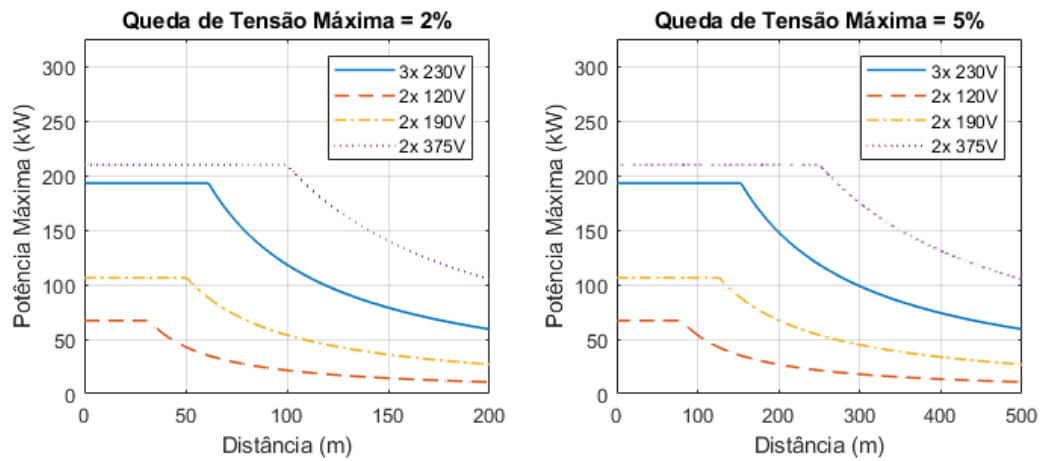


Figura A.11: Capacidade de transmissão de potência para 70mm²

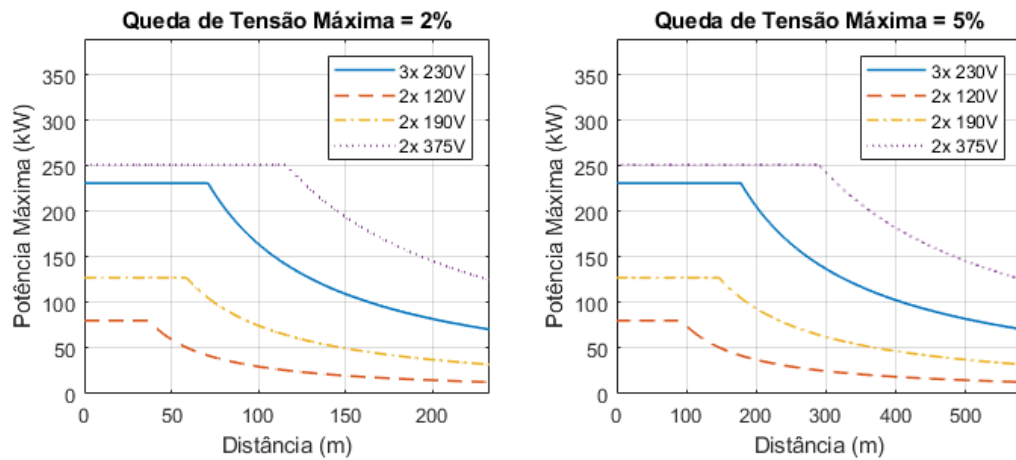


Figura A.12: Capacidade de transmissão de potência para 95mm²

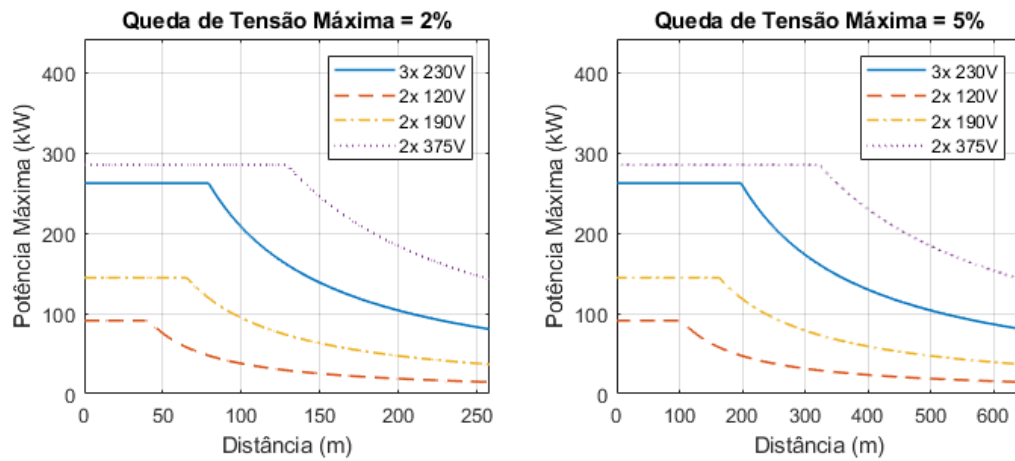


Figura A.13: Capacidade de transmissão de potência para 120mm²

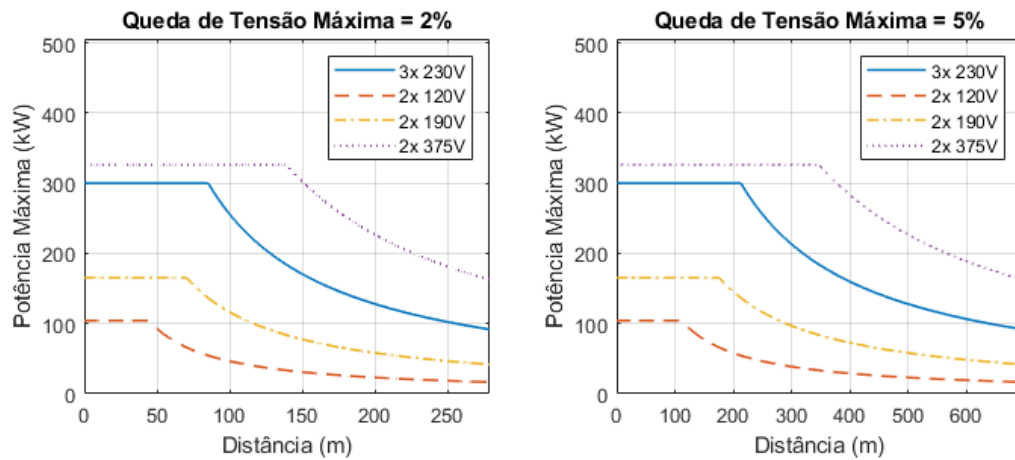


Figura A.14: Capacidade de transmissão de potência para 150mm²

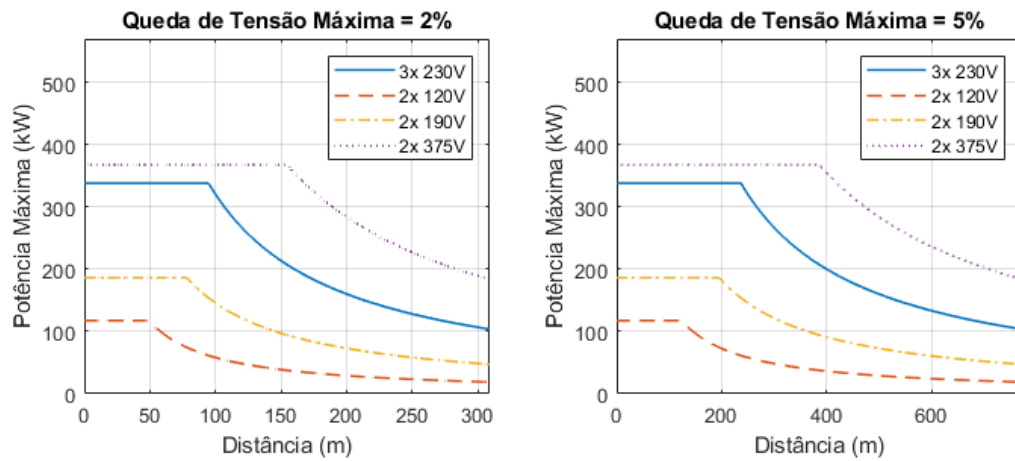


Figura A.15: Capacidade de transmissão de potência para 185mm²

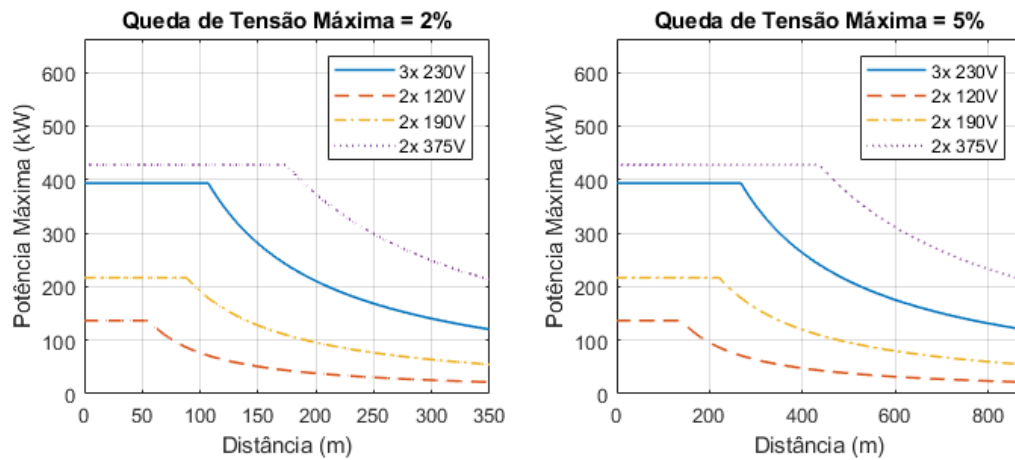


Figura A.16: Capacidade de transmissão de potência para 240mm²

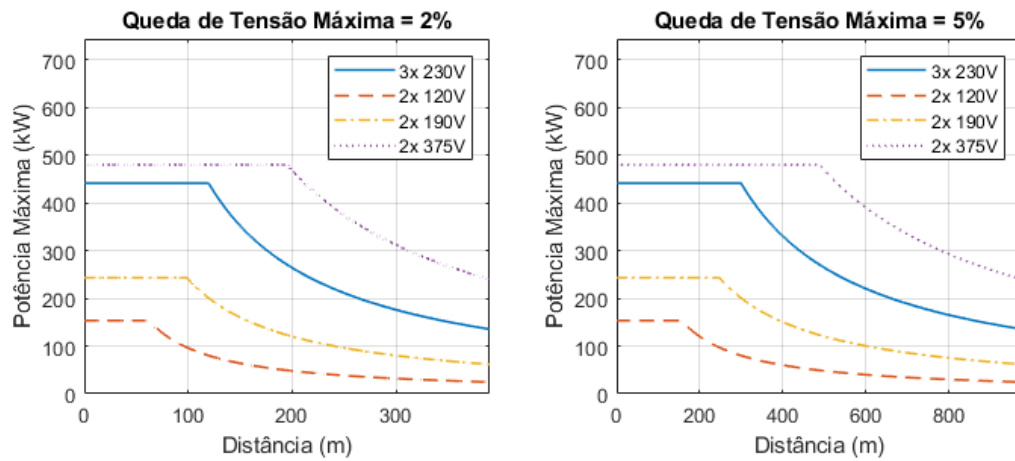


Figura A.17: Capacidade de transmissão de potência para 300mm²

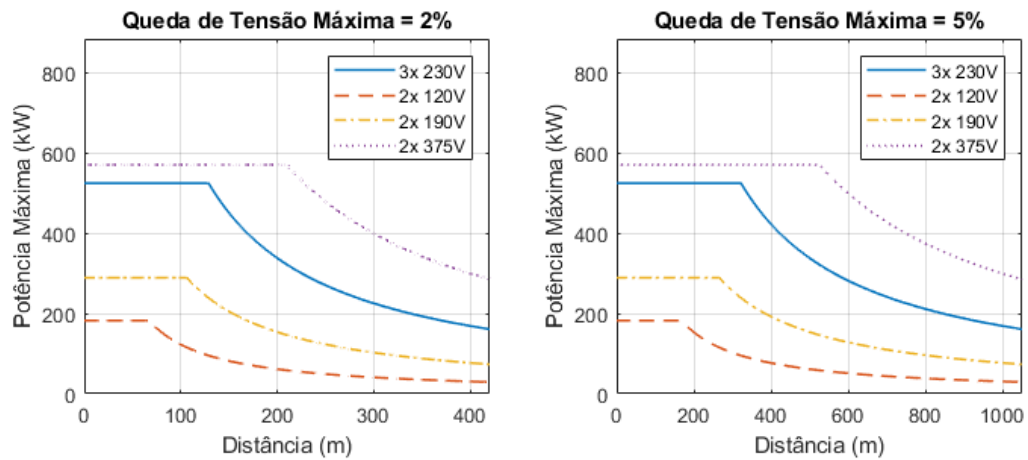


Figura A.18: Capacidade de transmissão de potência para 400mm²

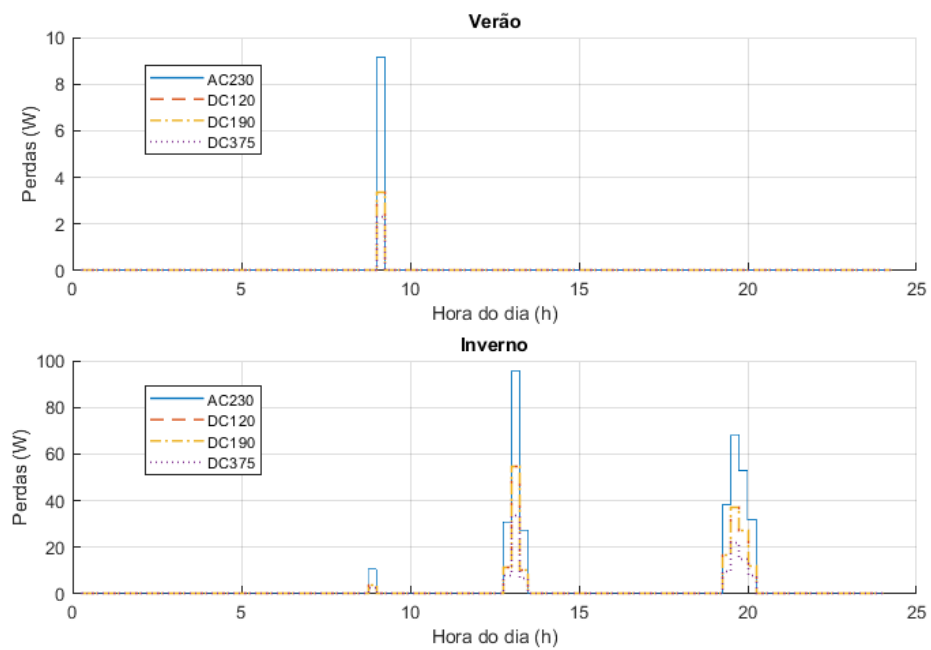


Figura A.19: Perdas no circuito CT

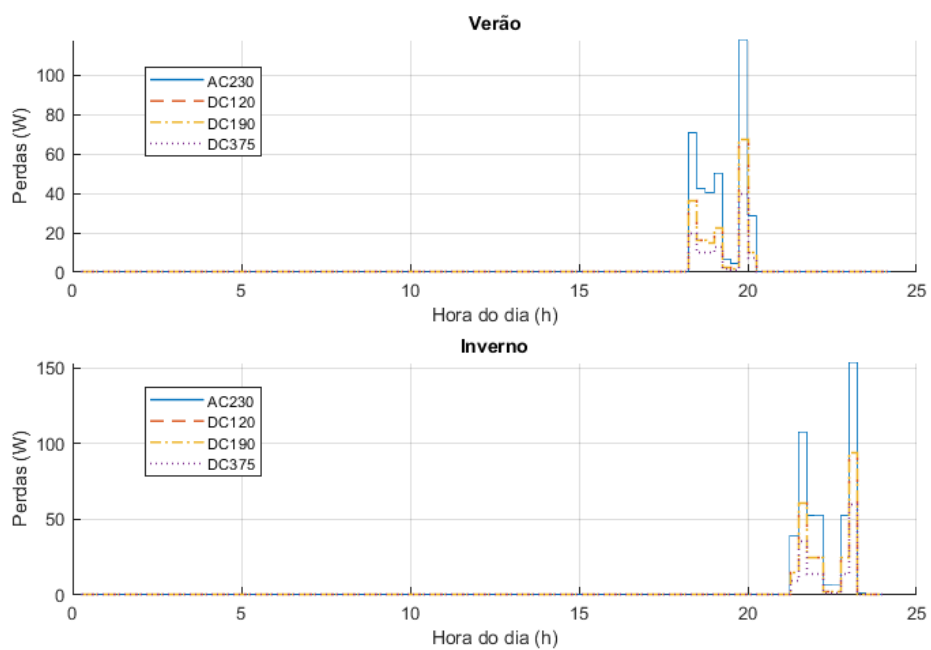


Figura A.20: Perdas no circuito DW

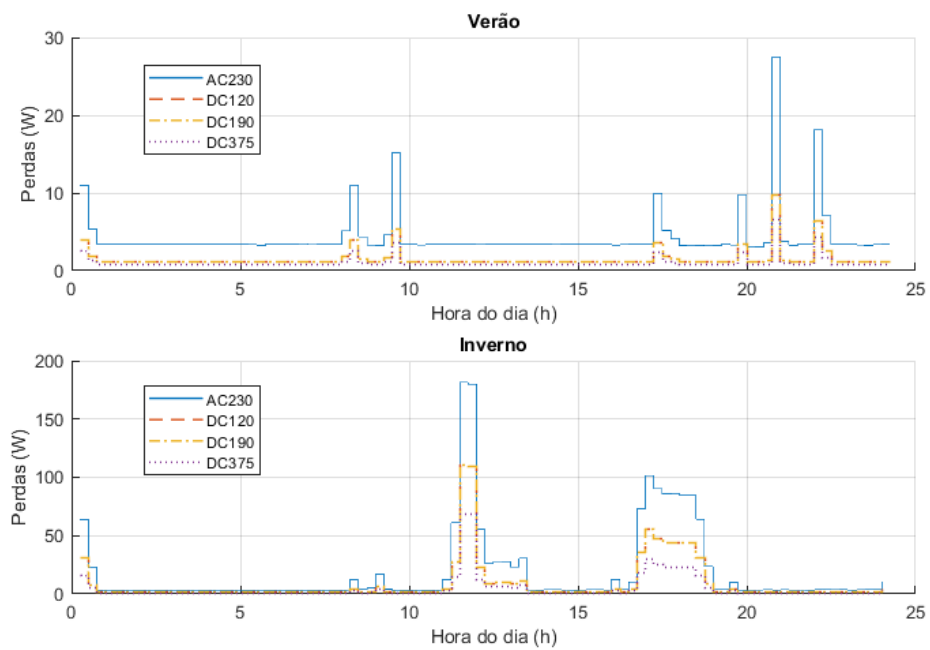


Figura A.21: Perdas no circuito GA

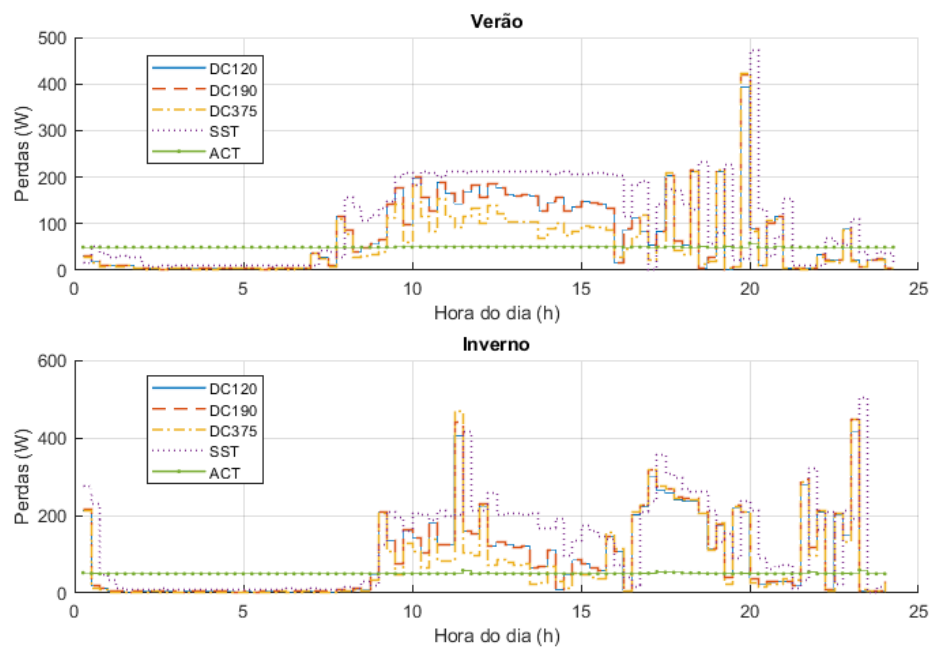


Figura A.22: Perdas na conexão com a rede em um sistema distribuído

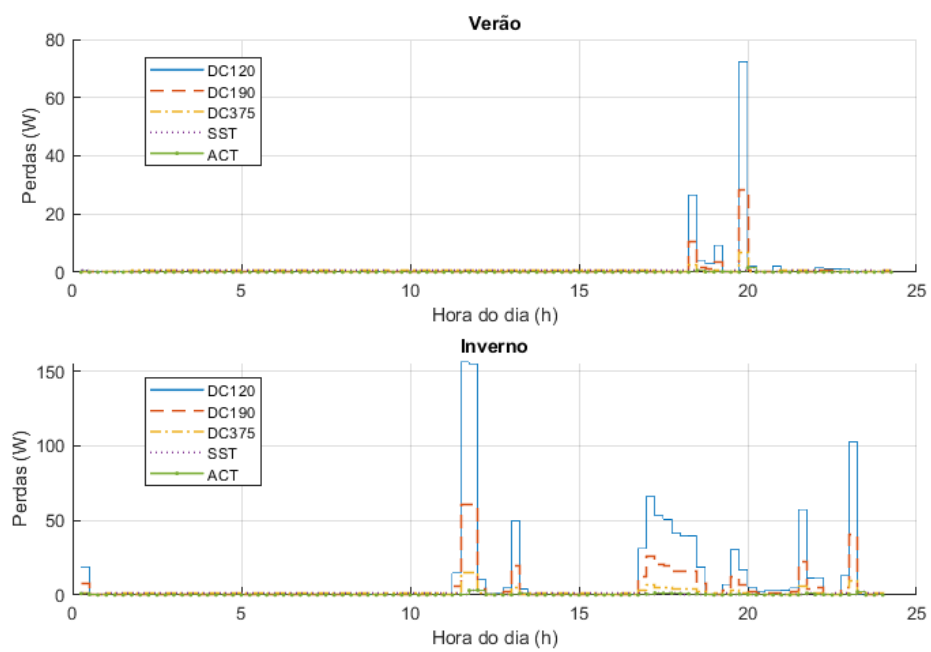


Figura A.23: Perdas na distribuição em um sistema centralizado