

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CURITIBA
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

LUCAS PAULATTI KASSAR

**CONCEPÇÃO DE MODELO DE MICRORREDE EM CORRENTE
CONTÍNUA COM FONTES RENOVÁVEIS ALTERNATIVAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2018

LUCAS PAULATTI KASSAR

**CONCEPÇÃO DE MODELO DE MICRORREDE EM CORRENTE
CONTÍNUA COM FONTES RENOVÁVEIS ALTERNATIVAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de TCC 2, do Departamento de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Eloi Rufato Junior.

CURITIBA

2018

Lucas Paulatti Kassar

Concepção de Modelo de Microrrede em Corrente Contínua com Fontes Renováveis Alternativas

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro de Controle e Automação, do curso de Engenharia de Controle e Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 13 de junho de 2018.

Prof. Paulo Sérgio Walenia, Esp.
Coordenador de Curso
Engenharia de Controle e Automação

Profa. Annemarien Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia de Controle e Automação do DAELT

ORIENTAÇÃO

Prof. Eloi Rufato Junior, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Eloi Rufato Junior, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Profa. Nastasha Salame da Silva, Dra.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Paulo Cícero Fritzen, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

AGRADECIMENTOS

Meus maiores agradecimentos aos meus pais, Rubens e Ivana, e ao meu irmão Daniel, que tiveram toda a paciência, apoio e consideração durante o desenvolvimento deste trabalho e por toda a minha vida.

Agradeço ao professor Eloi Rufato Junior, pelas suas orientações e por acreditar na minha pesquisa e competências.

Por fim, ao governo brasileiro e ao sistema público de educação gratuito e de qualidade, que proporciona o acesso e permanência de tantos estudantes independente de sua renda, classe e cor. Assim como ao programa Ciência sem Fronteiras (governo Dilma Roussef), que me possibilitou conhecer outras culturas e ter o primeiro contato com o tema deste estudo.

RESUMO

KASSAR, Lucas Paulatti. Concepção de Modelo de Microrrede em Corrente Contínua com Fontes Renováveis Alternativas. 2018. 85f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação), Departamento de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

Este trabalho de conclusão de curso propõe um modelo de microrrede em corrente contínua (CC), direcionado à classe residencial, como alternativa à esgotada estrutura convencional centralizada presente no setor elétrico. O conceito de microrrede consiste em uma rede de distribuição de baixa tensão apta a operar de forma autônoma (isolada ou conectada à rede convencional), integrando unidades de geração distribuída, sistemas de armazenamento e cargas, por intermédio de métodos de supervisão, controle e proteção eficientes. A partir do levantamento bibliográfico, foi realizada uma análise comparativa sob os aspectos históricos e técnicos entre modelos de geração e transmissão de energia elétrica em corrente alternada e contínua. Devido ao crescente desenvolvimento e acessibilidade em torno dos materiais e tecnologias envolvidos principalmente na área de eletrônica de potência, a operação em CC apresenta promissoras vantagens em termos do rendimento referente principalmente aos meios de geração, conversão e transferência de energia elétrica. A partir da apresentação das características e configurações do sistema proposto e seus componentes, é realizado o estudo perante os diferentes cenários de operação e análise de fluxo de potência.

Palavras-chave: Microrrede CC, Fontes Renováveis Alternativas, Sistemas de Armazenamento, Métodos de Controle Inteligente, Análise de Fluxo de Potência.

ABSTRACT

KASSAR, Lucas Paulatti. Conception of a Direct Current Microgrid Model with Alternative Renewable Sources. 2018. 85f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação), Departamento de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

This bachelor graduation thesis purposes a direct current (DC) microgrid model guided to the residential sector, as an alternative to the exhausted centralized current electric system structure. The microgrid concept consists on a low-voltage distribution grid able to operate autonomously (isolated or connected to the conventional grid), integrating distributed generation unities, storage systems and loads through efficient methods of supervision, control and protection. From the bibliographic research this paper job was conducted as a comparative analysis under the historical and technical aspects between generation and transmission electric power models in alternating and direct current. Due to the increasing development and accessibility of materials and technologies involved essentially in the power electronics field, a grid operation in DC presents promising advantages in terms of the performance related mainly with generation, storage, conversion, transmission and usage of electrical energy. From the presentation of the characteristics and configurations of the prosed system and its components, the study is performed towards the different scenarios of operation and power flow analysis.

Keywords: DC Microgrid, Alternative Renewable Sources, Storage Systems, Smart Control Methods, Power Flow Analysis.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PROJEÇÃO DA PARTICIPAÇÃO DO SETOR RESIDENCIAL NO CONSUMO DE ENERGIA.	14
FIGURA 2 - PROJEÇÃO DE INVESTIMENTOS EM FONTES RENOVÁVEIS AO REDOR DO MUNDO (U\$ BILHÕES).	15
FIGURA 3 - INTEGRAÇÃO DE GD NO SISTEMA ELÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO.....	16
FIGURA 4 - NÚMERO DE CITAÇÕES ENCONTRADAS NOS SERVIDORES DA IEEE ENTRE 2000 E 2012 PARA OS ASSUNTOS: GERAÇÃO DISTRIBUÍDA, MICRORREDE E <i>SMART GRID</i>	19
FIGURA 5 - VISÃO GERAL DA HIDRELÉTRICA DE <i>NIAGARA FALLS</i> NOS ESTADOS UNIDOS (1904).....	26
FIGURA 6 - FORMAS DE ONDA DA TENSÃO E CORRENTE EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA CA (A) E CC (B).	28
FIGURA 7 - RELAÇÃO VETORIAL ENTRE Q, P, S E θ	36
FIGURA 8 - COMPARAÇÃO ENTRE CCAT E CAAT.....	39
FIGURA 9 - ESTAÇÃO ARARAQUARA - CCAT RIO MADEIRA (2012).	40
FIGURA 10 - ESQUEMÁTICO DE CIRCUITO CC EM CARRO ELÉTRICO HÍBRIDO.....	42
FIGURA 11 - PROPOSTA DE SISTEMA HÍBRIDO.	45
FIGURA 12 - MICRORREDE CC DA UNIVERSIDADE DE SEVILHA.	46
FIGURA 13 - TOPOLOGIA UNIPOLAR COM RETORNO POR CONDUTOR UNIFICADO.....	48
FIGURA 14 - CONFIGURAÇÃO BIPOLAR COM RETORNO POR TERRA.....	49
FIGURA 15 - PADRÃO QUADRUPLIX SOB SISTEMA CC BIPOLAR PARA MÁXIMA CAPACIDADE DE POTÊNCIA.....	51
FIGURA 16 – GRÁFICO COMPRIMENTO X MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA PARA MODELOS CC E CA.	52
FIGURA 17 - HIERARQUIA DE COMANDO DE SISTEMAS DE CONTROLE EM MR'S.	61
FIGURA 18 - RELAÇÃO $V \times I$ EM UM ARCO ELÉTRICO.	64
FIGURA 19 - CARACTERÍSTICAS DE UM ARCO ELÉTRICO.	65
FIGURA 20 - INTERRUPTOR DE SISTEMAS SIMILARES EM CC E CA, COM MCCB - 1000A.	66
FIGURA 21 - MODELO DE MR CC PROPOSTO.....	68
FIGURA 22 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO FLUXO DE POTÊNCIA NA MR CC PROPOSTA.	73
FIGURA 23 – CASOS DE OPERAÇÃO DO CENÁRIO 1 DA MR CC.	75
FIGURA 24 – CASO DE OPERAÇÃO DO CENÁRIO 2 DA MR CC.	75
FIGURA 25 - CASOS DE OPERAÇÃO DO CENÁRIO 3 DA MR CC	76

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - DEMANDA MÁXIMA MÉDIA DOS SISTEMAS ISOLADOS NO BRASIL.....	44
TABELA 2 - CAPACIDADE TOTAL DE POTÊNCIA EM CABOS QUADRUPLIX SOB CC E CA.	50
TABELA 3 – PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE MICROGERAÇÃO.....	58
TABELA 4 - PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE SA.	59

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AIEE	<i>American Institute of Electrical Engineers</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BT	Baixa tensão
CA	Corrente Alternada
CAAT	Corrente Alternada em Alta Tensão
CAES	<i>Compressed Air Energy Storage</i>
CANBUS	<i>Controller Area Network Bus</i>
CB	<i>Circuit Breaker</i>
CC	Corrente Contínua
CCAT	Corrente Contínua em Alta Tensão
c.c.	Curto-circuito
CCH	Controlador de Corrente por Histerese
CDT	Controlador por <i>Droop</i> de Tensão
CL	Controle Local
CLP	Controlador Lógico Programável
DC	<i>Direct Current</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
DNO	<i>Distributed Network Operator</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETSI	<i>European Telecommunications Standard Institute</i>
FP	Fator de Potência
GC	Geração Concentrada
GD	Geração Distribuída
GSIP	Gerador síncrono de imã permanente
HVAC	<i>High Voltage Alternate Current</i>
HVDC	<i>High Voltage Direct Current</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IGBT	<i>Isolated Gate Bipolar Transistor</i>

LED	<i>light-emitting diode</i>
MCCB	<i>Molded Case Circuit Breaker</i>
MO	<i>Market Operator</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor</i>
MG	Microgeração
MGCC	<i>Microgrid Central Controller</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracker</i>
MR	Microrrede
NTT	<i>Nippon Telegraph and Telephone</i>
PEMFC	<i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i>
PHS	<i>Pumped Hydro Storage</i>
PFV	Painel Fotovoltaico
PVC	Cloreto de polivinila
RFB	<i>Redux Flow Battery</i>
SA	Sistema de Armazenamento
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
SMES	<i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i>
SoC	<i>State of Charge</i>
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TES	<i>Thermal Energy Storage</i>
VE	Veículos elétricos
XLPE	<i>Cross-linked Polyethylene</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	ampère (unidade de corrente elétrica)
Ah	ampère-hora (unidade de capacidade energética)
€	Euro (moeda da União Europeia)
Hz	hertz (unidade de frequência)
k	kilo
m	mili
M	mega
m/s	metros por segundo (velocidade)
P_{BAT}	potência fornecida ou armazenada pela/na bateria
P_{CA}	potência fornecida ou drenada pela rede CA
P_{CI}	potência consumida pela carga CC I
P_{CII}	potência consumida pela carga CC II
P_{FC}	potência fornecida pela PEMFC
P_{GSIP}	potência fornecida pelo GSIP, acoplado ao aerogerador
P_{PFVI}	potência fornecida pelo arranjo fotovoltaico I
P_{PFVII}	potência fornecida pelo arranjo fotovoltaico II
s	segundos
V	volt (unidade de tensão elétrica)
VA	volt-ampère (unidade de potência aparente)
Vca	Tensão em corrente alternada
Vcc	Tensão em corrente contínua
V/A/m	volt por ampère por metro
t	tempo (segundos)
T	período (segundos)
W	watt (unidade de potência real)
Wh	watt hora (unidade de energia elétrica consumida)
Wh/kg	watt hora por quilograma (unidade de densidade energética)
Wp	watt pico (unidade de máxima potência elétrica gerada)
α	alpha (ângulo)
π	π (razão entre comprimento e diâmetro de uma circunferência)

ω	<i>ômega</i> (velocidade angular)
Ω	ohm (unidade de resistência elétrica)
θ	<i>theta</i> (ângulo de deslocamento de fase do sinal elétrico)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Tema.....	17
1.1.1	Delimitação do Tema	18
1.2	Problemas e Premissas.....	19
1.3	Objetivos	20
1.3.1	Objetivo Geral	20
1.3.2	Objetivos Específicos.....	20
1.4	Justificativa	21
1.5	Procedimentos Metodológicos	22
1.6	Estrutura do Trabalho	23
2	CORRENTE CONTÍNUA <i>VERSUS</i> CORRENTE ALTERNADA	24
2.1	Histórico	24
2.2	Conceitos Elementares.....	27
2.3	Transferência de Energia	30
2.4	Fator de Potência	33
2.5	Conclusões do Capítulo	37
3	SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA EM CORRENTE CONTÍNUA	38
3.1	Modelos Existentes	38
3.1.1	Corrente Contínua em Alta Tensão (HVDC – <i>High Voltage Direct Current</i>).....	38
3.1.2	Telecomunicações.....	40
3.1.3	Veículos e Embarcações.....	41
3.1.4	Sistemas Isolados	42
3.2	Linhas de Transmissão.....	47
3.3	Níveis de Tensão.....	54
3.4	Conversores	56
3.5	Geração de Energia e Sistemas de Armazenamento (SA)	57
3.6	Controle.....	60

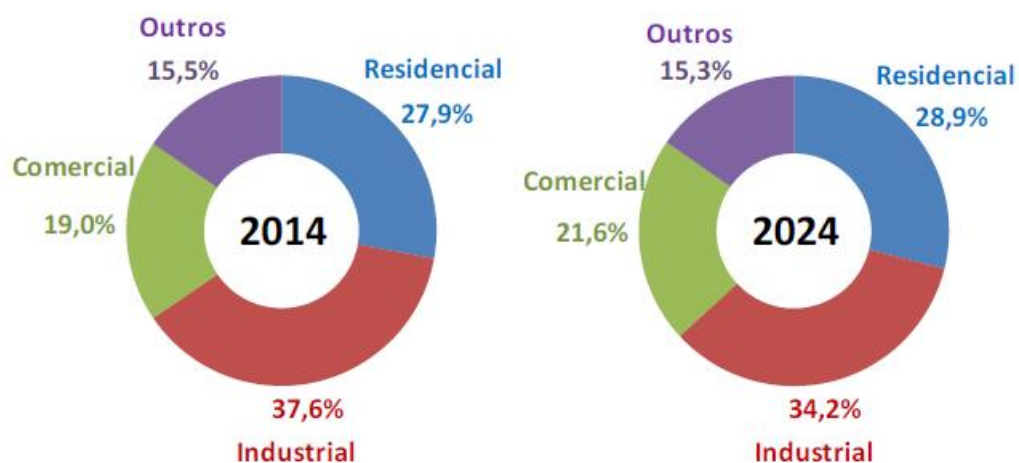
3.7	Proteção.....	63
3.8	Conclusões do Capítulo	67
4	APRESENTAÇÃO DO MODELO DE MICRORREDE CC.....	68
4.1	Descrição do Sistema.....	68
4.1.1	Célula a Combustível.....	69
4.1.2	Bateria	70
4.1.3	Arranjo Fotovoltaico	70
4.1.4	Aerogerador.....	71
4.1.5	Interface com a Rede CA.....	72
4.1.6	Cargas.....	72
4.2	Análise do Fluxo de Potência.....	72
4.3	Conclusões do Capítulo	77
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
	REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

Relatórios como o "Nosso Futuro Comum" (UN, 1987), apontam para uma urgente necessidade de se estruturar modelos de desenvolvimento sustentável baseados em matrizes energéticas renováveis. Até o ano de 2000, a matriz energética mundial dependia em quase 80% de combustíveis fósseis, cujo consumo contribui para uma irreversível degradação do meio ambiente e significativa redução na qualidade de vida das pessoas, principalmente, nos centros urbanos (REIS; SILVEIRA, 2000, p. 26). Em dados publicados pela Agência Internacional de Energia, o maior consumo registrado no ano de 2015 na matriz energética mundial foi do petróleo, com aproximadamente 31,7%, seguido do carvão (28,1%) e gás natural, com 21,6% (IEA, 2017, p. 6).

Em paralelo a este cenário, observa-se que ao longo do tempo, o aumento populacional tem induzido a um contínuo crescimento na demanda por energia elétrica. Para suprir estas necessidades, as concessionárias de energia precisam estar aptas a oferecer uma estrutura de geração, transmissão e proteção, cada vez maior. A partir da Figura 1, pode-se verificar que a classe residencial, por exemplo, representa atualmente cerca de 28% do consumo de energia elétrica no Brasil. É previsto para este setor nos próximos dez anos, um aumento anual de 4,3% na demanda, podendo chegar no ano de 2024 ao valor de 200.642 GWh (EPE, 2015).

Figura 1 - Projeção da participação do setor residencial no consumo de energia.

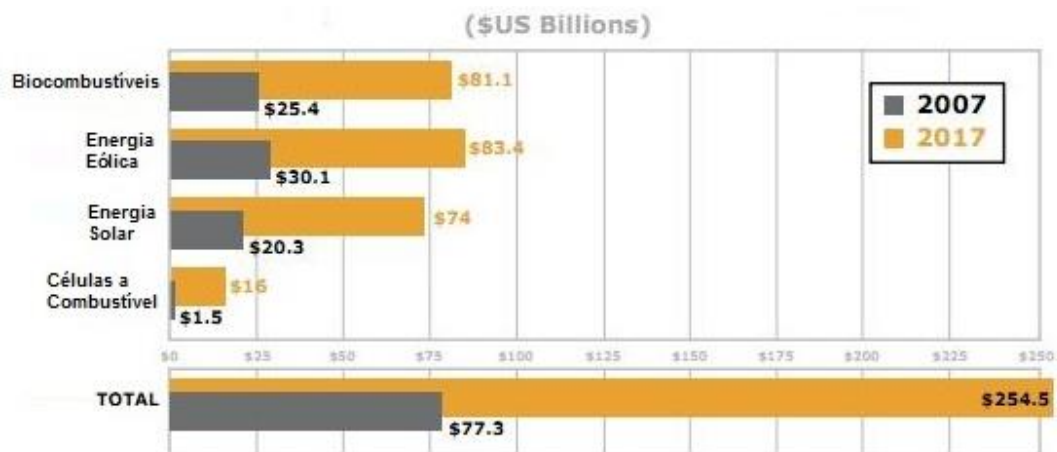


Fonte: Adaptado de EPE (2015 p. 53).

Dentro desse contexto nacional e internacional, é cada vez mais notável a busca por formas alternativas, eficientes e sustentáveis de se gerar, distribuir e consumir a energia elétrica. Para o alcance destas metas, deve-se considerar, principalmente em países em desenvolvimento, a redefinição de políticas energéticas "de forma a favorecer a formação de mercados para tecnologias ambientalmente benéficas e cobrar custos ambientais de alternativas não sustentáveis" (REIS; SILVEIRA, 2000, p.37).

A partir destas premissas e do incentivo à pesquisa, resultando no desenvolvimento de produtos mais acessíveis e eficientes, principalmente nas áreas de engenharia de materiais e eletrônica de potência, investimentos em sistemas baseados na geração distribuída (GD) e em fontes renováveis alternativas, como biocombustíveis, vento, luz solar e células a combustível, conforme apontado na Figura 2, ganham destaque e relevância como alternativa ou complemento à geração centralizada convencional.

Figura 2 - Projeção de investimentos em fontes renováveis ao redor do mundo (US\$ bilhões).

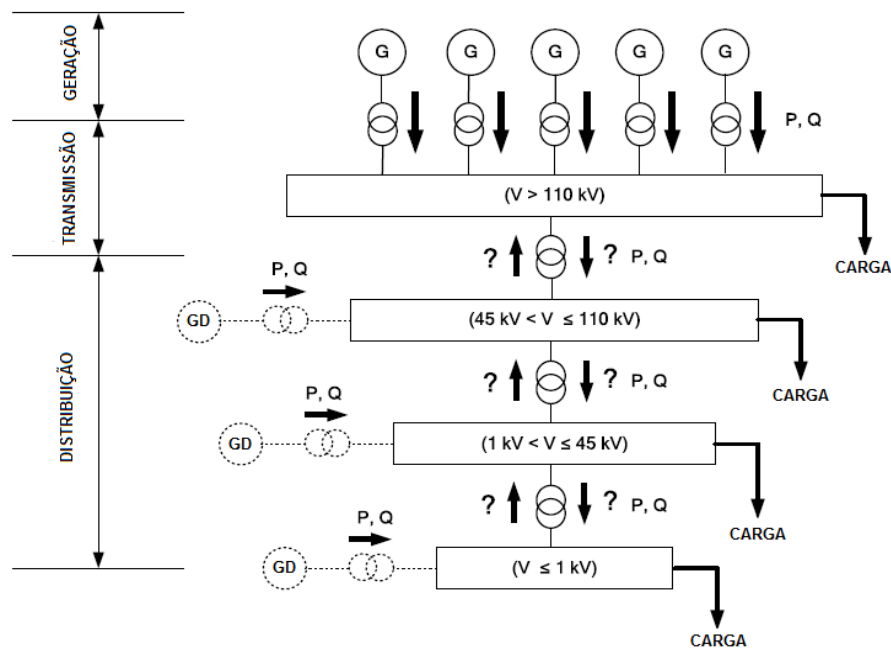


Fonte: Adaptado de Makower, J; Pernick, R; Wilder, C. (2008, p. 2).

Genericamente, define-se geração distribuída como qualquer sistema de geração de energia elétrica que contribua para aumentar a distribuição geográfica das fontes energéticas de uma determinada região (SEVERINO, CAMARGO, OLIVEIRA, 2008). Em um sentido mais particular, enquadram-se nesta denominação modelos de GD em que as fontes estejam conectadas diretamente à rede de distribuição, ou mesmo ao lado do consumidor, ou que supram a demanda de uma

instalação eletricamente isolada (desconectada da rede de distribuição). A Figura 3 representa uma estrutura típica de GD, em que o fluxo de potência analisado parte das unidades geradoras (topo da figura) e se transmite por meio de barramentos em corrente alternada, associando outras fontes de GD às cargas em diferentes níveis de tensão desejados (alta, média e baixa tensão).

Figura 3 - Integração de GD no sistema elétrico de distribuição.



Fonte: Moreira (2008, p. 43).

Desta forma, a geração distribuída, ou descentralizada, contribui na aproximação das células consumidoras e produtoras de uma determinada rede, reduzindo as perdas em nível de transmissão, e conseqüentemente, aumentando o rendimento do sistema.

Apesar das vantagens da geração distribuída e dos incentivos ao aumento gradativo da participação de fontes renováveis alternativas, a inclusão de elementos ativos na rede de distribuição de energia elétrica (no Brasil conhecida como sistema interligado nacional – SIN) representa uma relevante modificação de paradigma no modo como as concessionárias planejam e operam a estrutura do setor elétrico. A inserção destes elementos de GD transforma um sistema primeiramente radial e centralizado, em um sistema em anel (LUIZ, 2012). As contribuições agregadas das faltas de muitas unidades geradoras pequenas, ou poucas unidades grandes,

podem alterar consideravelmente os níveis de curto-circuito (c.c.), de modo a causar um desbalanceamento generalizado na rede elétrica. A fim de garantir segurança e confiabilidade ao sistema, verifica-se a realização contínua de diversos estudos orientados ao desenvolvimento de métodos e equipamentos mais eficientes na identificação de faltas (RUFATO, 2015).

1.1 Tema

A microgeração distribuída (MG), classificação para centrais geradoras com fornecimento de potência de até 75 kW (ANEEL, 2016), tem apresentado papel fundamental na transição para modelos mais sustentáveis, descentralizados e eficientes de geração e distribuição de energia elétrica. Além de dividir localmente os esforços de demanda com as concessionárias de energia, incentivando o consumidor na produção da própria energia de consumo, a microgeração, quando associada a fontes renováveis alternativas, como o exemplo de painéis fotovoltaicos, microturbinas eólicas e células a combustível, colabora na redução dos impactos ambientais relacionados à matriz energética convencional, representada por hidrelétricas, usinas nucleares, termelétricas, plataformas petrolíferas, dentre outros.

A fim de auxiliar no gerenciamento de novas unidades de MG, integrando estas a cargas e dispositivos de armazenamento de forma coordenada e controlável, concebeu-se o conceito de microrrede (MR). Este consiste em uma rede de distribuição de baixa tensão (BT) – até 1 kV - que por meio de sistemas de controle inteligente, é capaz de operar de forma autônoma ou conectada à rede, no caso de produção excedente ou faltante de energia elétrica. O modelo de MR representa um importante progresso no processo de descentralização do setor elétrico, incluindo ativamente o consumidor no mercado energético (MOREIRA, 2008).

Mesmo que o planejamento energético, em função de motivos econômicos e tecnológicos, tenha se desenvolvido ao longo das décadas, baseado majoritariamente na geração concentrada (GC) e no modelo de transmissão em corrente alternada (CA), a atual condição do setor favorece a uma transição efetiva a sistemas em GD com transmissão em corrente contínua (CC). Segundo Coelho (2013), a análise das vantagens associadas aos modelos de redes em CC retoma os preceitos estabelecidos no século XIX, pelo seu desenvolvedor Thomas Edison, que

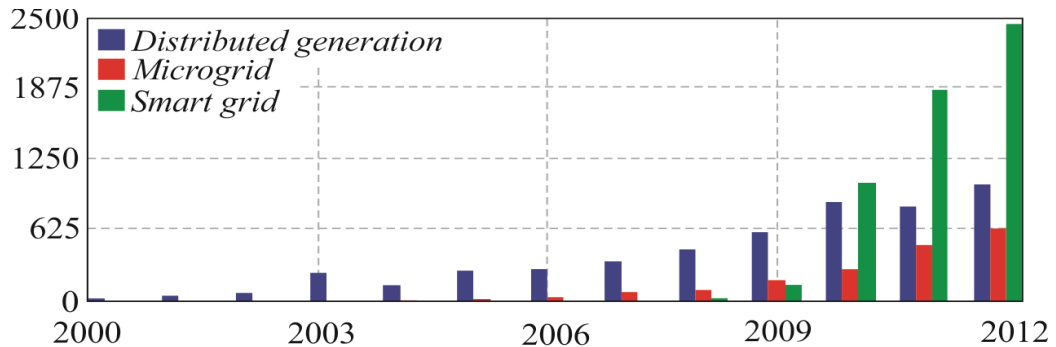
defendia o emprego de microgeradores operando próximos aos centros de consumo.

Em se tratando de ganhos em eficiência e redução de custos, a microrrede em CC dispensa a necessidade massiva de conversores bidirecionais CC/CA, já que aplicações como, microgeradores solares, células a combustível e baterias, além de determinadas cargas (dispositivos eletrônicos, iluminação LED, carros e bicicletas elétricas, entre outras), operam naturalmente em corrente contínua. Por sua vez, as redes de GD em CA, apresentam expressivas desvantagens, já que a inserção de unidades geradoras na rede, como já mencionado, acarreta em possível desbalanceamento entre fases e conseqüente perda de energia. Com o avanço da tecnologia que envolve os semicondutores (transistores), microprocessadores e métodos de controle e supervisão inteligente (*smartgrid*), melhorando a eficiência na conversão de tensão em CC e garantindo maior confiabilidade ao sistema, as redes em corrente contínua têm se apresentado promissoras alternativas desde a geração, transporte, armazenamento e consumo da energia elétrica.

1.1.1 Delimitação do Tema

Diante do cenário energético atual e atendendo o incentivo ao desenvolvimento de novos meios de geração, distribuição e consumo de energia, modelos baseados em microrredes CC representam uma alternativa importante e crescente na busca por um sistema elétrico mais descentralizado, seguro e sustentável, que propicie maior autonomia aos consumidores, dividindo esforços com as concessionárias, e favorecendo a inclusão de fontes renováveis alternativas na matriz energética mundial. A Figura 4, indica o gradativo aumento de pesquisas publicadas nos servidores da IEEE em torno destes assuntos nos últimos anos.

Figura 4 - Número de citações encontradas nos servidores da IEEE entre 2000 e 2012 para os assuntos: geração distribuída, microrrede e *smart grid*.



Fonte: Coelho (2013, p. 45).

Países como Holanda, Alemanha e Suécia, avançam como pioneiros no desenvolvimento e expansão de modelos de microrredes inteligentes. A cidade de Mannheim, Alemanha, por exemplo, já apresenta um projeto piloto de microrrede para o setor residencial, operando com uma capacidade de aproximadamente 40 kWp (kilo watt pico), mediante microgeradores solares e módulos de armazenamento (MICROGRIDS.EU, 2006).

Com os avanços tecnológicos e medidas governamentais, por intermédio de incentivos fiscais e regulamentações, avaliadas nacionalmente pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a transição para uma rede predominantemente descentralizada, distribuída e em CC pode se tornar uma realidade. Sendo assim, o presente estudo propõe um modelo de GD em corrente contínua dentro do contexto energético brasileiro.

1.2 Problemas e Premissas

Em função do contínuo crescimento da demanda por energia elétrica, em conjunto de indicativos que apontam para um futuro esgotamento de fontes não renováveis, além dos irreversíveis efeitos ambientais causados pela geração concentrada convencional, principalmente por fontes poluentes, se faz necessária a estruturação de novos modelos descentralizados de geração e distribuição de energia, baseados em matrizes renováveis alternativas, que apresentem maiores ganhos em eficiência e segurança.

Para o alcance destas metas, o desenvolvimento de projetos de microrredes inteligentes representa uma promissora solução. Sabendo que cada região, apresenta suas particularidades geográficas, políticas e sociais, é importante a realização de estudos que analisem o atual cenário energético brasileiro e proponham, considerando as tecnologias disponíveis e a viabilidade, uma estrutura aplicável.

Durante o projeto, pretende-se desenvolver e apresentar um modelo de MR em barramento CC, para fins residenciais, apta a operar de forma isolada ou conectada à rede - via conversor CA/CC, no caso de produção excedente ou faltante – por meio de dispositivos de controle de fluxo energético, que integrem fontes renováveis alternativas, módulos de armazenamento e conversores, de forma segura, supervisionada e eficiente.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Conceber modelo de microrrede em corrente contínua dentro do contexto energético atual. O modelo integrará microgeração por fontes renováveis alternativas e sistemas de armazenamento de energia, podendo operar de forma autônoma ou conectada à rede de distribuição.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar e comparar os principais modelos de sistemas de geração distribuída de energia, baseados em corrente alternada e corrente contínua;
- Investigar o estado da arte e da prática no que diz respeito aos modelos de microrredes em corrente contínua, com microgeração por fontes renováveis alternativas e sistemas de armazenamento;
- Desenvolver e caracterizar o modelo proposto de forma técnica;
- Analisar as condições de operação e de fluxo de potência;

- Avaliar possíveis ambientes regionais de implementação para o modelo projetado;

1.4 Justificativa

A busca por uma transição eficiente, segura e rentável para modos mais sustentáveis de distribuição de energia, tem aumentado expressivamente ao longo dos anos e se tornou hoje, tema principal de debates e pesquisas em todo o planeta. Não há governo que, ao se deparar com a atual situação econômica e ambiental, não concentre esforços e meios para lidar com o desafio exposto pelo setor energético.

Com a descentralização da informação e maior acessibilidade financeira a tecnologias capazes de lidar com problemas cada vez mais complexos, é uma questão de tempo para que as soluções sejam apresentadas e efetivamente aplicadas.

Além das questões tecnológicas envolvidas, é preciso considerar também, uma profunda análise econômica e social sobre o tema. Em se tratando do caso de modelos que tornam consumidores elementos ativos na própria geração de energia, podendo estruturar assim, redes autônomas e independentes das redes convencionais, é necessário, por parte dos órgãos responsáveis e de toda a população, uma reflexão que mude os paradigmas sobre as formas de como se produz, consome, compre e venda a energia elétrica.

No contexto brasileiro, poucos estudos sobre microrredes em CC foram realizados e ainda há muito que se discutir e desenvolver, a fim de chegar a modelos viáveis. Estudos recentes na Universidade Federal de Santa Catarina, apontam para a análise e implementação de uma microrrede em barramento CC, caracterizada por um arranjo fotovoltaico, uma microturbina eólica e uma célula a combustível, alimentando um banco de capacitores e fornecendo energia suficiente à carga mesmo sem nenhuma fonte ativa, e um conversor monofásico bidirecional CC/CA para a interface com a rede CA, no caso de produção excessiva ou faltante. O trabalho relata um estudo detalhado sobre possíveis condições de funcionamento da rede e analisa o fluxo de potência a ser controlado em cada uma dessas condições (COELHO, 2013). Mesmo que realizado em condição individual, o arranjo

citado se apresenta modular e flexível. Abre oportunidades para melhorias e concepção de um modelo mais abrangente, incluindo no mesmo barramento CC, mais de um módulo de geração, armazenamento e consumo que, separados em pequenas distâncias, formam uma rede essencialmente autônoma e colaborativa. Algumas aplicações já são consideradas, como novos condomínios residenciais e cooperativas. Idealiza-se um sistema em que cada MR CC esteja conectada entre si, por intermédio de métodos algorítmicos eficientes e seguros, propiciando um sistema ainda mais descentralizado e independente.

1.5 Procedimentos Metodológicos

Para a efetivação desta proposta, a metodologia de pesquisa aplicada fundamentar-se-á nos itens relacionados a seguir:

- Análise crítica a partir de resgate histórico e contrapontos entre os modelos de geração distribuída em corrente contínua e alternada;
- Com base na relação bibliográfica, compreender o funcionamento das microrredes e de seus elementos integrantes: topologias, estruturas de transmissão, unidades microgeradoras (como sistemas fotovoltaicos, microturbinas eólicas e células a combustível), unidades de armazenamento, conversores de energia, métodos de controle de fluxo de potência e de proteção;
- Propor modelo dentro do contexto atual do setor energético e com base no estado da arte e da prática do que concerne microrredes em corrente contínua com fontes renováveis alternativas;
- Analisar o funcionamento e fluxo de potência da MR CC em condições adversas;
- Considerar em meio à realidade atual do setor elétrico brasileiro, possíveis ambientes de implementação do modelo.

1.6 Estrutura do Trabalho

O trabalho desenvolvido é dividido em capítulos da seguinte forma:

- **INTRODUÇÃO:** no primeiro capítulo são apresentados os objetivos, tema e justificativa deste trabalho de forma a contextualizar o leitor do assunto tratado e permitir uma resumida compreensão sobre os temas envolvidos;
- **CORRENTE CONTÍNUA *VERSUS* CORRENTE ALTERNADA:** com base na literatura levantada, é desenvolvido neste capítulo o aprofundamento teórico sobre os aspectos históricos e conceituais relacionados aos sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica em corrente contínua e alternada;
- **SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA EM CORRENTE CONTÍNUA:** o terceiro capítulo apresenta alguns dos modelos em execução e investiga o modo de funcionamento das redes, explorando as topologias e configurações técnicas empregadas, além de discutir a evolução dos conversores de energia, tecnologias de geração e armazenamento de energia elétrica, e métodos de controle e proteção em CC;
- **APRESENTAÇÃO DO MODELO DE MICRORREDE CC:** o penúltimo capítulo trata da apresentação do modelo proposto, ilustrando e descrevendo tecnicamente sua configuração e itens constituintes. Ainda, é realizada a análise perante os diferentes cenários de transferência de potência da microrrede, apta a conectar-se à rede CA quando necessário;
- **CONSIDERAÇÕES FINAIS:** o último capítulo deste trabalho se propõe a resumir sucintamente os objetivos alcançados, expondo uma análise ampla de caráter técnico, social e econômico.

2 CORRENTE CONTÍNUA *VERSUS* CORRENTE ALTERNADA

De forma a seguir a metodologia proposta, este capítulo apresenta a fundamentação teórica relativa ao tema estudado, com o intuito de realizar um resgate histórico e comparar os sistemas de energia em corrente alternada e contínua, abordando tecnicamente os modelos de GD atuais e propiciando argumento necessário para a formulação de um modelo aplicável de microrrede em corrente contínua, apto a operar de forma isolada ou, de forma secundária, conectado à rede convencional.

2.1 Histórico

A utilização da corrente alternada em detrimento à corrente contínua como padrão principal adotado em sistemas elétricos ao redor do mundo representa o prevalecimento de um modelo em meio a um contexto tecnológico e econômico retratado há mais de um século.

Historicamente, temos registrado as descobertas dos fenômenos elétricos presentes na natureza. Com o avanço técnico das civilizações, o ser humano vem desenvolvendo métodos que tornam estes fenômenos controláveis e aplicáveis para suas próprias necessidades. No fim do século XVIII, por exemplo, se apropriando da qualidade de boa condutividade elétrica dos elementos metais, Alessandro Volta cria a primeira pilha elétrica, composta de placas metálicas laminadas, separadas entre si com feltro banhado por uma solução ácido-salina que, como produto, gerava uma descarga elétrica em corrente contínua. Já em meados de 1820, Hans Oersted observa a reação de deflexão de um material ferromagnético (ímã), devido à passagem de corrente elétrica através de um condutor situado próximo ao material. Da mesma forma constatou o efeito reverso, identificando a existência de corrente elétrica através de um condutor, causado pela aproximação de um ímã.

A ocorrência destes fenômenos e experimentos deu origem à ciência do eletromagnetismo. Mais tarde, outros grandes cientistas como Michael Faraday, James Maxwell e Heinrich Hertz, contribuíram significativamente para os avanços nesta área e em uma melhor compreensão sobre campos elétricos e magnéticos e seus efeitos (OKA, 2000). Posteriormente muito se desenvolveu e quando as pequenas unidades geradoras de energia elétrica começaram a ser projetadas e

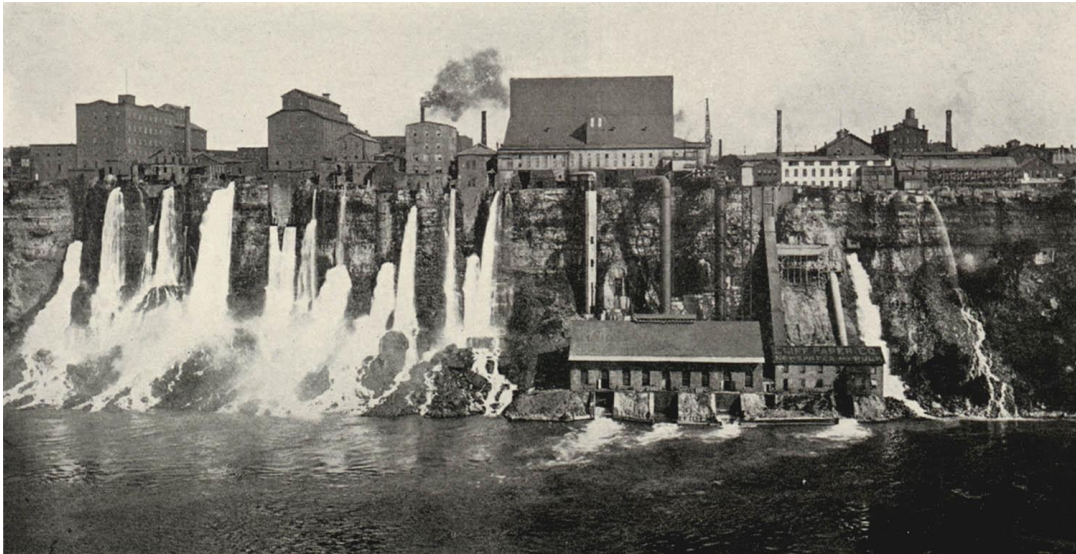
construídas em maior escala, deu-se início à configuração dos primeiros sistemas de distribuição de energia, ao final do século XIX.

Neste período, os sistemas elétricos eram concebidos predominantemente em corrente contínua, modelo fortemente incentivado e financiado por Thomas Edison. A energia gerada em CC provinha de dínamos e era utilizada nas redes públicas de iluminação, estações de trem e fábricas. Em 1882, é demonstrado em Londres, Inglaterra, o primeiro sistema de iluminação incandescente com um gerador central de energia elétrica em corrente contínua (NILSSON, 2005). No fim deste mesmo ano, inaugura-se outro esquema similar, em Nova Iorque, expandindo com o tempo a outras cidades do continente norte americano e confirmando o prevalecimento momentâneo da corrente contínua sobre a alternada.

Os modelos projetados por Edison operavam em baixa tensão, 100-110 V, resultando em aplicações apenas para pequenas redes isoladas, de modo a limitar as perdas por quedas de tensão nos cabos.

Mesmo que nesta conjuntura houvesse a predominância dos padrões em CC, precedentemente em 1881, o primeiro sistema de energia em CA é apresentado, igualmente na cidade de Londres, financiado por George Westinghouse – empresário e engenheiro estadunidense. A disputa política e econômica entre CC e CA ficou conhecida como a "guerra das correntes" e impulsionou forte avanço na área de geração e distribuição de energia elétrica. Alguns anos mais tarde, devido ao advento dos transformadores propostos por Lucien Gaulard e John Gibbs, e as contribuições de Nikola Tesla no campo de motores elétricos polifásicos, transmissão de potência e geradores, os modelos em CA ganharam grande destaque, possibilitando a conversão dos níveis de tensão aplicados e, desta forma, permitindo que a energia elétrica pudesse percorrer longas distâncias entre barramentos de alta tensão e consumidores finais. Em frente a estas vantagens, em 1895 é construída a usina de *Niagara Falls*, grande empreendimento operado em corrente alternada, ilustrada na Figura 5.

Figura 5 - Visão geral da Hidrelétrica de *Niagara Falls* nos Estados Unidos (1904).



Fonte: AIEE (1904, p. 36).

As limitações tecnológicas evidenciadas na época pelos modelos em CC, os quais apresentavam variações indesejadas nos níveis de tensão, motores menos eficientes e muitas perdas, se comparados com os modelos concorrentes, determinaram a expansão definitiva dos sistemas baseados em CA ao redor do mundo.

Acompanhando o gradativo aumento na demanda por energia elétrica, as redes de distribuição se expandiram, adaptando-se ao longo dos anos às adversidades apresentadas por cada região e chegando em 1930 a alimentar grande parte dos centros industriais. As redes baseavam-se no modelo de geração concentrada de larga escala, cujo perfil compreendia-se por turbina geradoras, redes monopolizadas, órgãos regulamentadores, geração em corrente alternada e linhas de transmissão e distribuição.

A discussão levantada em torno da forma de como se gera, transmite e consome a energia elétrica, em corrente contínua ou alternada, acarreta em uma análise intrínseca sobre qual o modelo adotado para os sistemas elétricos, desde suas primeiras concepções até os dias de hoje. Observa-se que a escolha por um sistema baseado em CA, remete estreitamente ao conceito de geração concentrada (GC), enquanto que a escolha por CC tem grande relação com a geração distribuída (GD).

Apesar de se manter como pilar do setor elétrico em grande parte do mundo, a geração concentrada tem apresentado nas últimas décadas, suas limitações estruturais e de recursos, referente ao aumento contínuo na demanda por energia e a dificuldade na obtenção de financiamento para construção de novas centrais de geração convencionais (hidrelétricas, termelétricas, etc.), como já mencionados no primeiro capítulo deste trabalho. Ademais, o progresso em torno de materiais semicondutores, principalmente na década de 60, quando os pesquisadores Dawon Kahng e Martin Atalla fabricam o primeiro MOSFET - construído a base de óxido de silício - impulsionaram o campo da eletrônica de potência e a disseminação de fontes renováveis alternativas. Isto contribuiu para reposicionar o conceito de geração distribuída como modelo alternativo para o setor elétrico.

Independente de sua recorrência atual, a geração distribuída aborda os preceitos estabelecidos previamente por Edison, desde o princípio do desenvolvimento dos sistemas elétricos de larga escala, em que se defendia o emprego de usinas geradoras operando próximas aos centros consumidores e em corrente contínua. Mesmo que na época a evolução da GD tenha sofrido com os entraves tecnológicos, muito se modificou e, hoje, é apresentada como possível solução para o setor energético no que diz respeito a aspectos econômicos, sociais e ambientais. Resumindo, nos encontramos em um novo momento de discussão e transição, em que se busca a independência e autossuficiência energética, com melhores níveis de eficiência e em respeito às condições ambientais encontradas.

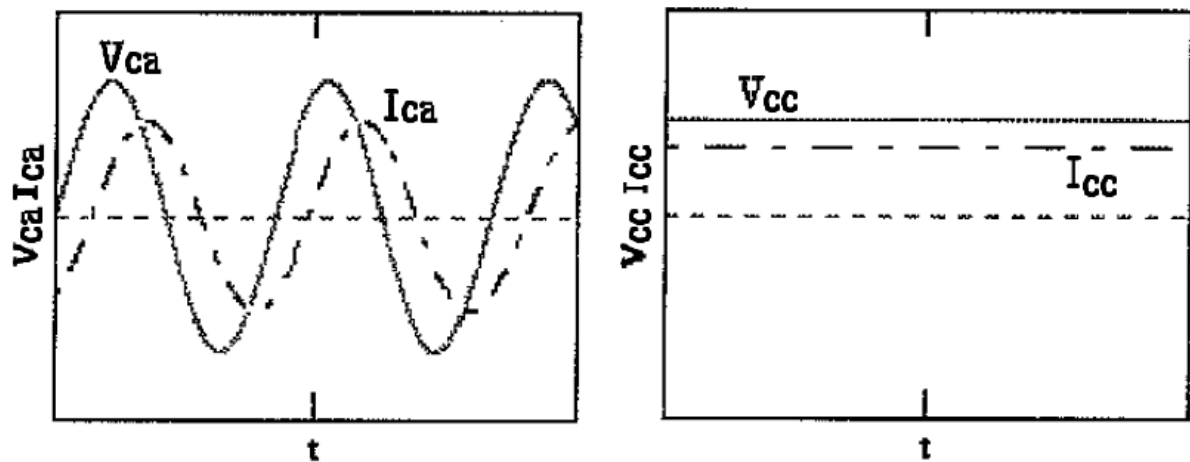
2.2 Conceitos Elementares

A presente análise investiga as divergências técnicas e teóricas entre sistemas em corrente contínua e alternada, considerando os conceitos envolvidos e a viabilidade de se implementar um modelo de microrrede em CC, conforme a tecnologia disponível e frente à predominância das redes de geração concentrada em CA.

As diferenças essenciais entre CC e CA podem ser observadas na distinta natureza de cada sinal elétrico estudado, conforme Figura 6. Basicamente, quando se trata de geração de energia elétrica em CC, a forma de onda do sinal de tensão e corrente não tem sua polaridade alterada ao longo do tempo. Ou seja, o fluxo de

corrente é unidirecional, mesmo que a amplitude do sinal venha a se alterar, o que torna a análise física e matemática das formas de onda em corrente contínua muito mais simplificada. Já para a geração em corrente alternada, a polaridade da onda de tensão e corrente elétrica varia, à medida que o valor de sua amplitude passa com determinada frequência pelo zero referencial, repetindo-se continuamente após certo intervalo de tempo.

Figura 6 - Formas de onda da tensão e corrente em função do tempo para CA (a) e CC (b).



Fonte: Adaptado de Pellis (1997, p. 27).

Devido a esta mudança periódica de polaridade, os campos elétricos e magnéticos gerados nos sistemas em CA, relacionados à força exercida por uma diferença de potencial sobre uma carga e à força exercida por uma corrente elétrica (carga em movimento) sobre cargas em movimento, respectivamente, sofrem constantes alterações de magnitude. O efeito destas alterações resulta em uma defasagem no tempo entre os sinais de corrente e tensão, mesmo que estes tenham mesma frequência – denominada como deslocamento de fase (PELLIS, 1997). Este fenômeno, dependente do tipo de carga conectada à fonte geradora, é presente apenas em circuitos CA, pois neste âmbito, as formas de onda em CC são independentes do tipo de carga associada. Para uma carga puramente resistiva, as formas de onda interceptam o eixo horizontal no mesmo ponto, portanto o deslocamento de fase (θ) será nulo, enquanto que para uma carga indutiva ou capacitiva, a corrente está atrasada em relação à tensão ou a tensão atrasada em relação à corrente, nesta ordem.

Mesmo que, na Figura 1, o formato do sinal ilustrado seja senoidal, existem outros tipos de formas de onda que podem constituir um sistema em CA, como as ondas triangulares e quadradas. Por facilitarem na interpretação matemática dos fenômenos físicos em circuitos elétricos, os termos tensão CA e corrente CA, serão associados, neste trabalho, às formas de onda senoidais. Além disso, "a senóide é a única forma de onda cuja forma não se altera ao ser aplicada a um circuito contendo resistores, indutores e capacitores" (BOYLESTAD, 2004, p. 375). Isto é, se o sinal de corrente ou tensão aplicado sobre um resistor, indutor ou capacitor, for senoidal, o sinal resultante de tensão ou corrente, respectivamente, terá sobre cada um destes elementos, características senoidais. O que não ocorre com ondas quadradas, por exemplo.

A partir do aprofundamento matemático sobre formas de ondas senoidais, no qual, são analogamente obtidas por meio de projeções de um vetor girante com movimento circular uniforme em torno de um ponto fixo, determinou-se que a expressão algébrica genérica deste tipo de sinal é representada por (1):

$$A_p \text{sen } \alpha \quad (1)$$

Sendo A_p , o valor de pico da onda analisada (tensão ou corrente) e α , o ângulo obtido no eixo das abscissas, em graus ou radianos. A velocidade com que este vetor gira, denominada velocidade angular (ω), é uma variável em função do ângulo (α) e do tempo percorrido (t), em segundos (2).

$$\omega = \frac{\alpha}{t} \quad (2)$$

O tempo para que este vetor complete um ciclo completo, é indicado pelo valor da variável período (T) do sinal senoidal, também em segundos. O intervalo angular coberto em um ciclo completo, é correspondido em radianos por 2π . Substituindo em (2), tem-se (3),

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (3)$$

Agora, se considerarmos que o período da forma de onda é inversamente proporcional à frequência da mesma, associada à letra f , tem-se a expressão (3) reconfigurada como (4):

$$\omega = 2\pi f \quad (4)$$

Sendo assim, quanto maior a velocidade angular do vetor, maior será a frequência do sinal da onda senoidal. Reescrevendo a equação geral de um sinal senoidal e atribuindo-o às formas de onda da tensão e corrente, em função do tempo, em (5), infere-se que:

$$i(t) = I_p \text{sen } 2\pi f t \quad (5)$$

$$v(t) = V_p \text{sen } 2\pi f t \quad (6)$$

onde os símbolos $i(t)$ e $v(t)$, retratam as funções instantâneas da corrente e tensão, em um instante t qualquer. Estas deduções serão de grande importância durante a exploração comparativa entre a eficiência e as perdas de cada tipo de sistema elétrico abordado.

2.3 Transferência de Energia

Para compreender, e assim poder calcular, a capacidade de transferir energia elétrica nos modelos em CC e em CA, é necessária a introdução do conceito de potência (P). Esta grandeza mede quanto um determinado sistema realiza trabalho, convertendo energia de uma forma à outra, em certo período de tempo. Para as estruturas elétricas, a potência gerada ou consumida é uma função dependente dos níveis de tensão e corrente aplicados e seu valor é medido na unidade Watt (W) – alusão ao engenheiro alemão James Watt. Basicamente, é expressa por:

$$P = VI \quad (7)$$

Assumindo a definição da lei de Ohm, em que a corrente elétrica é relacionada como efeito da aplicação de uma diferença de potencial sobre um material de particular resistência, descrita em (8):

$$V = RI \quad (8)$$

em que R , em Ohm (Ω), equivale a resistência do material ao fluxo de cargas elétricas presente no circuito, (7) pode ser recomposta como (9) e (10):

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (9)$$

$$P = I^2 R \quad (10)$$

Conforme Boylestad (2004, p. 78), o que determina se a potência está sendo gerada ou consumida por um componente, é a polaridade da tensão elétrica sobre o mesmo e o sentido da corrente no circuito em que se encontra. Lembrando que as fontes geradoras de corrente alternada, quando estão em funcionamento, têm sua polaridade invertida naturalmente, somente os geradores de corrente contínua exigem devida atenção quanto ao fator acima mencionado, para que não operem indevidamente.

Dando sequência ao estudo que averigua o quanto de potência, energia gerada ou consumida em certo tempo, os sistemas em CA e CC são capazes de transmitir, se faz pertinente a colocação dos termos: valor médio e valor eficaz.

Para circuitos em corrente alternada, os valores de tensão e corrente sobre qualquer tipo de carga - resistiva, indutiva ou capacitiva - variam com o tempo de forma senoidal. Sendo assim, o valor médio destas formas de onda é idêntico para cada semiciclo (positivo e negativo) e, ao longo de um ciclo completo este valor, então, é nulo. Para ficar mais claro, ainda em referência ao autor acima citado, "o valor médio de uma forma de onda periódica é o valor CC equivalente". O método que se utiliza para calcular precisamente o valor médio de uma função senoidal é chamado de integração e, graficamente, corresponde à área sob a função descrita em seu intervalo periódico.

Como o interesse deste estudo é voltado à potência transmitida e efetivamente consumida e dissipada pelos componentes presentes em uma malha

elétrica, considerados então, simplesmente, como resistências ao fluxo de corrente, independente do sentido desta ou da polaridade da tensão aplicada, no caso de circuitos em CA, estas resistências estarão dissipando potência a todo instante. Isto é, durante o semiciclo positivo e negativo, mesmo que a energia entregue varie conforme a intensidade da corrente aplicada ao longo do tempo, a carga estará recebendo potência, denominada, potência efetiva.

Associando as equações (10) e (5), em que agora $i(t)$ está em função de ωt , a potência instantânea em CA é dada pela equação (11):

$$P_{CA} = i_{CA}^2(t)R = (I_p \text{sen}(\omega t))^2 R = I_p^2 \text{sen}^2(\omega t) R \quad (11)$$

mas, utilizando da identidade trigonométrica (12):

$$\text{sen}^2(\omega t) = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\omega t) \quad (12)$$

conclui-se que:

$$P_{CA} = I_p^2 \left[\frac{1}{2}(1 - \cos(2\omega t)) \right] R = \frac{I_p^2 R}{2} - \frac{I_p^2 R}{2} \cos(2\omega t) \quad (13)$$

Posto que o valor médio de uma função cosseno é nulo, a potência média fornecida pela fonte CA corresponde apenas ao primeiro termo da expressão acima (13). Comparando a potência média fornecida pela fonte CA à potência fornecida pela fonte CC, cuja energia entregue é considerada invariante no tempo,

$$P_{CA(\text{médio})} = P_{CC}$$

$$\frac{I_p^2 R}{2} = I_{CC}^2 R$$

$$I_p = \sqrt{2} I_{CC}$$

então, se obtém a equivalência (14):

$$I_{CC} = I_{ef} = 0,707 I_p \quad (14)$$

Isto significa que o valor equivalente CC de uma corrente ou tensão senoidal, valor utilizado para obter a potência efetivamente absorvida pela carga – denominado valor eficaz - vale 0,707 do seu valor de pico ou máximo. Numericamente, por exemplo, seria necessária uma corrente CA de pico de $\sqrt{2} * (10) = 14,4$ [A] para fornecer à uma carga a mesma potência que uma corrente CC de 10 [A].

Esta dedução estabelece uma das principais vantagens em se adotar sistemas baseados em corrente contínua, sendo um parâmetro determinante para o dimensionamento das linhas de transmissão (cabos) a serem empregues. Para se projetar cabos em CA, é utilizado o valor de pico da corrente elétrica aplicada. Considerando que o mesmo cabo fosse utilizado em um sistema CC, e que o isolamento elétrico deste cabo suporte o novo campo elétrico gerado e consequente passagem de uma corrente de maior magnitude, o ganho de transferência de potência, devido ao melhor aproveitamento da capacidade do cabo, será em torno de 40% - relativo à $(\sqrt{2} - 1) * 100$ (TZIMAS; ANTONIOU; ROWLAND, 2012).

2.4 Fator de Potência

O deslocamento de fase entre sinais de tensão e corrente, resultado dos tipos de cargas associadas aos sistemas CA senoidais, é outro fator que interfere na quantidade de potência efetivamente consumida pelas cargas nestes sistemas.

Retomando as equações (5) e (6), agora em função da velocidade angular, do tempo e do ângulo de defasagem do sinal aplicado, reescrevemos a equação de potência elétrica (7), da seguinte forma (15):

$$\begin{aligned}
 P &= v(t)i(t) = V_p \text{sen}(\omega t + \theta_v) I_p \text{sen}(\omega t + \theta_i) \\
 P &= V_p I_p \text{sen}(\omega t + \theta_v) \text{sen}(\omega t + \theta_i)
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

em que θ_v e θ_i designam o valor angular de defasagem do sinal de tensão e corrente sobre o componente avaliado. Se apropriando da identidade trigonométrica descrita em (16):

$$\text{sen}A \text{sen}B = \frac{\cos(A-B) - \cos(A+B)}{2}
 \tag{16}$$

Então, tem-se em (17):

$$P = \frac{V_p I_p}{2} \cos(\theta_v - \theta_i) - \frac{V_p I_p}{2} \cos(2\omega t + \theta_v + \theta_i) \quad (17)$$

Observa-se que o segundo termo desta função é uma cossenóide que varia em razão do tempo, ou seja, seu valor médio é nulo. Por outro lado, o primeiro termo, constante no tempo, representa o que é realmente transferido de energia à carga, compondo a potência média, ou também classificada como potência real ou ativa, ilustrada na equação (18) (BOYLESTAD, p.417, 2004).

$$P = \frac{V_p I_p}{2} \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (18)$$

Reduzindo a diferença $\theta_v - \theta_i$ à variável θ e considerando que o valor do cosseno de um ângulo negativo qualquer é idêntico ao valor do cosseno deste mesmo ângulo, mas de polaridade contrária, a potência média é descrita em (19), como:

$$P = \frac{V_p I_p}{2} \cos \theta \quad (19)$$

ou, assumindo os valores eficazes da tensão e corrente, pode ser escrita por (20), em que

$$P = V_{ef} I_{ef} \cos \theta \quad (20)$$

Se detendo agora ao termo $\cos \theta$, fator que depende exclusivamente do ângulo de defasagem entre corrente e tensão, percebe-se que, quando seu valor é máximo, igual a um, a potência é nula, enquanto que para seu valor mínimo, igual a zero, a potência é máxima. Sendo assim, denomina-se fator de potência (FP),

$$FP = \cos \theta \quad (21)$$

Admite-se que para cargas puramente resistivas a diferença de fase é 0° , então, a potência realmente dissipada é máxima, $FP = \cos 0^\circ = 1$. Em se tratando de cargas puramente indutivas ou capacitivas, a diferença de fase é 90° ou -90° , respectivamente, o que implica em uma potência nula, $FP = \cos 90^\circ = \cos -90^\circ = 0$.

Visto que os fatores capacitivos e indutivos se encontram fortemente presentes em circuitos de corrente alternada, conseqüentemente, a potência gerada nestes sistemas, não corresponde à potência de fato dissipada - consumida pela carga. Assim sendo, complementarmente ao conceito de fator de potência, determinou-se potência aparente (S), descrita em (22), como a potência total fornecida em VA (volt-ampère), e potência reativa (Q), equivalente à potência absorvida ou devolvida ao circuito pelo indutor ou capacitor, na unidade VAR (volt-ampère reativo).

$$S = VI \quad (22)$$

Portanto, é possível reescrever a expressão de potência real (média) para circuitos CA, agora em função da potência aparente e de FP, conforme a equação (23):

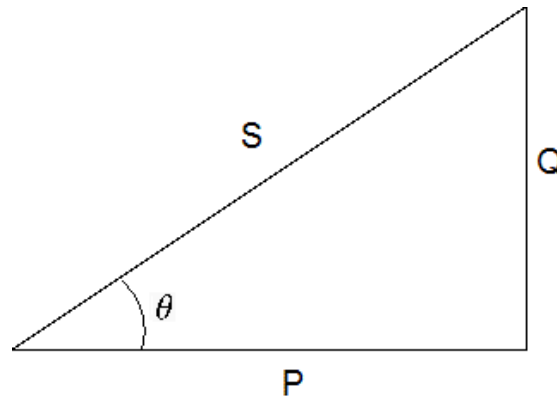
$$P = S \cos \theta \quad (23)$$

Isolando $\cos \theta$, infere-se que o fator de potência nada mais é que a representação matemática e conceitual da razão entre o quanto de energia é consumida efetivamente pelo sistema (potência real ou ativa) e o quanto é totalmente entregue ao mesmo (potência aparente).

No domínio vetorial é possível observar a relação entre as grandezas S, P, Q e θ , como mostrado na Figura 7, e deste modo, baseando-se no teorema de Pitágoras, determinar a igualdade (24):

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (24)$$

Figura 7 - Relação vetorial entre Q, P, S e θ .



Fonte: Autoria própria (2017).

Por interpretar todos os componentes de uma malha elétrica como cargas puramente resistivas, já que não há deslocamento de fase entre as formas de onda, os sistemas em CC apresentam fator de potência unitário. Em circuitos CA, entretanto, o fator de potência na prática é sempre menor que um, o que implica em menores níveis de potência ativa e assim, menor rendimento.

Uma das técnicas para melhorar o fator de potência em malhas de corrente alternada, é mediante a inserção de compensadores capacitivos, reduzindo o deslocamento de fase entre os sinais de tensão e corrente elétrica sobre a carga. No entanto, este método proporciona maiores perdas de energia, já que os capacitores consomem potência reativa. Na região nordeste da rede de distribuição do Reino Unido, por exemplo, em uma análise estatística realizada pela agência governamental Ofgem, entre os anos 2000 e 2010, foi registrada uma perda de 5,8% da energia gerada em um ano na forma de potência reativa - equivalente a 18.777 GWh (Ofgem, 2010).

É importante salientar, que as condições até então apresentadas referem-se ao estudo de sistemas CA monofásicos. Para uma avaliação em que o sistema é composto por mais fases, os resultados dos cálculos de perdas, conseqüentemente, são multiplicados pelo número de fases presentes.

A circulação de correntes elétricas indesejadas é outra desvantagem presente em estruturas que operam em CA. Diferentemente de circuitos CC, em que a resistência existente nos condutores elétricos é uma grandeza constante e que depende somente da temperatura, das características e dimensões físicas do condutor, conhecida como resistência ôhmica, a resistência presente em circuitos

CA, ou resistência efetiva, é influenciada também pelas variações de corrente e tensão, derivando em efeitos indesejados (BOYLESTD, 2010, p. 594).

As perdas de energia por radiação, por exemplo, são evidenciadas na forma de ondas eletromagnéticas que, durante a transferência de energia, não são aproveitadas pela carga. No caso, quanto mais alta a frequência de operação, maiores as perdas. Ainda consoante ao aspecto eletromagnético, segundo artigo publicado por Hammerstrom (2007), existem estudos que comprovam problemas de saúde em pessoas e animais, relacionados à exposição extensiva e crescente a campos eletromagnéticos gerados nas mais variadas faixas de frequências.

Ademais, há ainda as perdas por efeito pelicular, histerese e correntes parasitas, frutos da indução de uma tensão com direção vetorial contrária, e nos dois últimos casos, devido à presença de materiais ferromagnéticos em campos magnéticos variáveis.

2.5 Conclusões do Capítulo

Este capítulo se deteve na contextualização histórica e conceitual sobre as diferenças entre sistemas elétricos de potência em corrente alternada e contínua. Descreve cronologicamente quais foram os principais fatores que determinaram o prevailecimento dos modelos em CA em detrimento à CC ao longo do último século. Foram apresentadas também algumas vantagens relativas essencialmente à eficiência no processo de transferência de energia em corrente contínua, perante análise matemática e física sob os distintos sinais elétricos avaliados.

3 SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA EM CORRENTE CONTÍNUA

Independente da predominância dos modelos em corrente alternada ao longo das décadas, após o surgimento das primeiras redes de geração e distribuição de energia elétrica, os sistemas em CC também se desenvolveram e continuaram, em menor escala, a ser utilizados. Dando sequência ao aprofundamento teórico do último capítulo, os próximos itens irão retratar alguns exemplos de modelos implementados e, principalmente, fundamentar os parâmetros necessários para se modelar uma microrrede em corrente contínua, ampliando a discussão relativa às vantagens e desvantagens entre CC e CA, GD e GC.

3.1 Modelos Existentes

Os sistemas CC se encontram atualmente em aplicações específicas. A análise exploratória sobre o funcionamento de algumas destas estruturas e qual o tipo de ambiente onde estão instaladas é pertinente para a proposta de um modelo de microrrede de distribuição CC em baixa tensão.

3.1.1 Corrente Contínua em Alta Tensão (HVDC – *High Voltage Direct Current*)

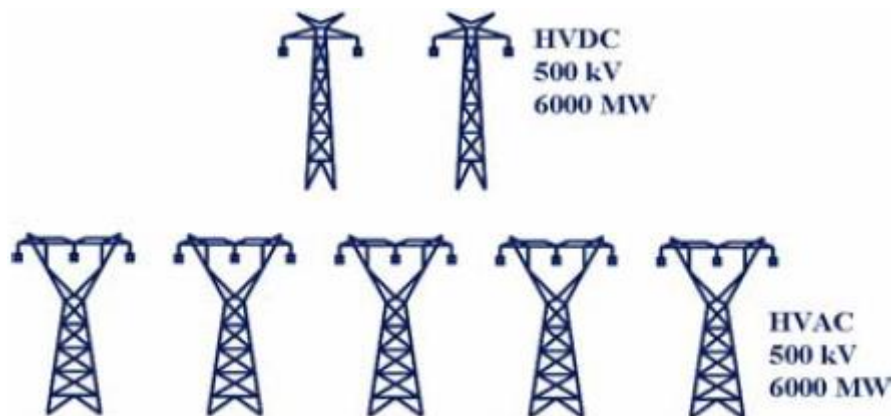
Os modelos de transmissão de corrente contínua em alta tensão (CCAT), tornam possível enviar energia por longas distâncias através de vias aéreas, subterrâneas ou mesmo submarinas. A ausência de potência reativa nas linhas diminui significativamente as perdas de energia, se comparadas às redes de alta tensão trifásicas CA. São capazes de uma transferência maior de potência, por distâncias mais longas, menor quantidade de linhas e menor custo (BAHRMAN, 2006).

Normalmente designadas para a conexão entre usinas geradoras em CA remotas e subestações de distribuição para consumidores, as redes CCAT tornam dispensável a necessidade de sincronismo entre os sistemas interligados, mesmo que estes possuam diferentes frequências de operação. As conexões são realizadas por intermédio de retificadores e inversores, baseados no chaveamento em alta

potência de materiais semicondutores, como tiristores e IGBT's (*Isolated Gate Bipolar Transistor*), e permitem fluxo bidirecional de corrente.

Os ganhos atribuídos ao modelo CCAT em relação ao CAAT (Corrente Alternada Alta Tensão) podem ser observados na comparação entre a estrutura necessária para se transferir a mesma potência por longas distâncias, como mostra a Figura 8. Neste caso foi exemplificado o projeto da linha CCAT de 1.225 quilômetros entre Guizhou e Guanddong (China), com capacidade de 3.000 MW por barramento CC (BAHRMAN, 2006). Para operação em CA, seria necessária uma estrutura maior, com capacidade de 1.200 MW por barramento. O termo HVAC na imagem, do inglês *High Voltage Alternate Current*, equivale em português ao termo CAAT.

Figura 8 - Comparação entre CCAT e CAAT.

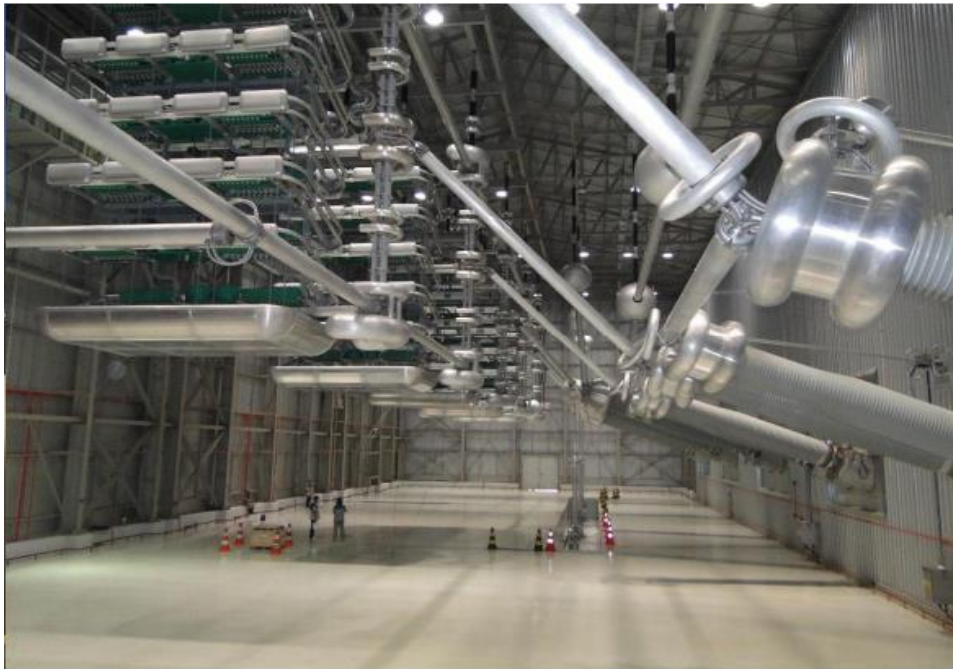


Fonte: Bahrman (2006).

O Brasil tem desempenhado um papel fundamental na disseminação de modelos CCAT, apresentando hoje, notórios empreendimentos neste ramo do setor elétrico. A linha CCAT de Itaipu, por exemplo, que liga Brasil e Paraguai, oferece uma potência total de 13.200 MW por meio de dois barramentos bipolares CC de 600 kV, com extensão de 800 quilômetros cada. Já a rede que percorre o Rio Madeira, avaliada como a mais comprida do mundo, com extensão de 2.375 quilômetros, tem a capacidade de fornecer 6.300 MW, operando na faixa de tensão de 600 kV (NOBRE, 2015). A Figura 9 ilustra a estação inversora de Araraquara, intermediária da linha CCAT Rio Madeira.

É previsto ainda para o país, a construção da primeira linha de ultra alta tensão em corrente contínua, que irá escoar a energia gerada pela usina hidrelétrica de Belo Monte (Pará) até Minas Gerais, por meio de barramentos de 2.087 quilômetros em 800 kV, com capacidade de 11.233 MW.

Figura 9 - Estação Araraquara - CCAT Rio Madeira (2012).



Fonte: Nobre (2015).

3.1.2 Telecomunicações

Os sistemas CC aplicados na área de telecomunicações utilizam níveis de baixa tensão, frequentemente de valor nominal em torno de -48 V, com o polo positivo conectado ao plano terra (NILSSON, 2005). O suprimento de energia provém da rede CA comum, convertida por meio de retificadores de tensão, e outras formas alternativas de geração independente, como baterias ou geradores, para os casos de distúrbios e falhas no fornecedor principal. No princípio do desenvolvimento, as linhas de telecomunicações eram compostas por cabos de cobre, porém atualmente, estes cabos estão sendo gradativamente substituídos pela tecnologia de fibra óptica.

As cargas presentes nas estações, torres e terminais de comunicação, servidores de dados e iluminação, constituídas majoritariamente por componentes

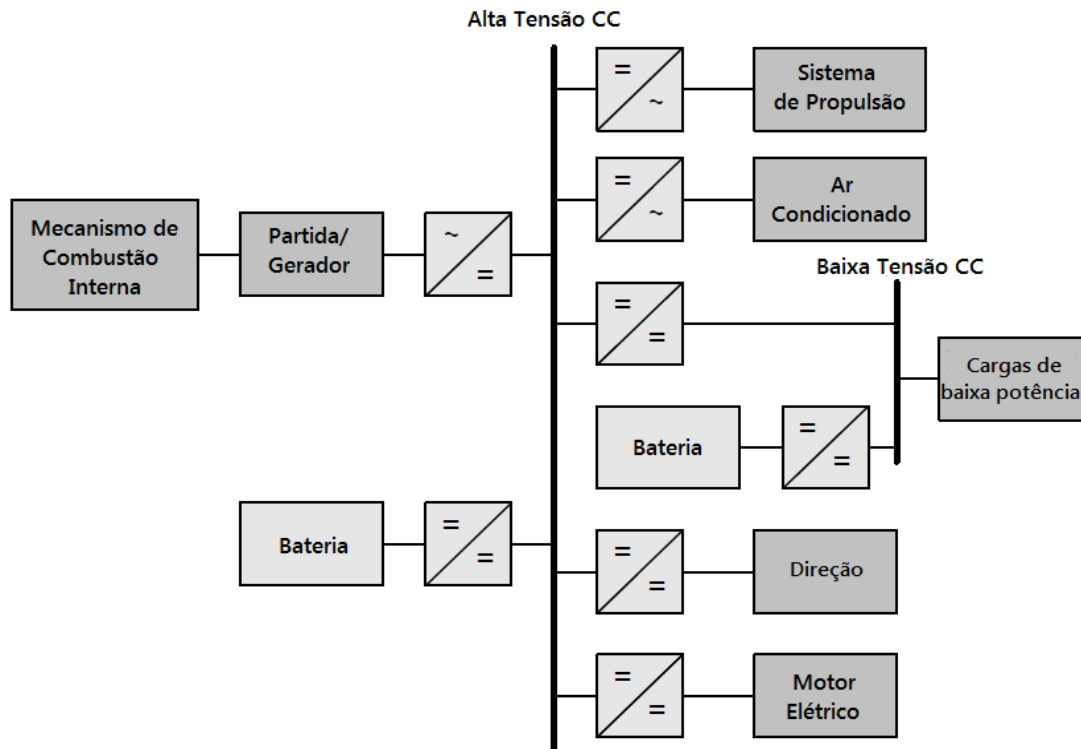
eletrônicos, demandam um alto consumo de potência. Para suprir esta necessidade, os cabos são dimensionados de modo que suportem o fluxo de alta intensidade de corrente.

3.1.3 Veículos e Embarcações

Estruturas CC têm sido aplicadas também em veículos automotivos e barcos com sistemas de propulsão elétrica. Segundo Nilsson (2005), a ideia básica por trás de veículos elétricos híbridos, por exemplo, é baseada no acionamento elétrico do motor interno à combustão, de modo a desempenhar menor variação da energia consumida, e assim, melhor eficiência, quando comparado ao acionamento hidráulico convencional. Ademais, quando o carro acelera, a potência é fornecida para as rodas pelo motor elétrico, e quando desacelera, a energia mecânica gerada nos freios é convertida em energia elétrica e armazenada em baterias.

Para lidar com a alta demanda de energia das cargas elétricas e eletrônicas emprega-se um barramento CC com tensão aproximada de 300 V. A Figura 10 apresenta um esquemático padrão de circuitos CC nestes veículos, em que é possível identificar a utilização de conversores CC/CC e CC/CA, assim como os barramentos de baixa e alta tensão e as variáveis consumidoras e armazenadoras.

Figura 10 - Esquemático de circuito CC em carro elétrico híbrido.



Autor: Nilsson (2005).

Em se tratando de navios que utilizam sistemas de propulsão elétrica, a energia elétrica é gerada por motores a diesel, suprindo as cargas elétricas e os motores utilizados durante a propulsão da embarcação. Existem inclusive aplicações em sistemas de navegação submersos, alimentados inteiramente por energia em corrente contínua, como o projeto *Neptune*, instalado na costa do pacífico entre Canadá e Estados Unidos (HAMMERSTROM, 2007). Estes circuitos em CC encontram-se também em subsistemas elétricos de navios de guerra, estações espaciais e satélites.

3.1.4 Sistemas Isolados

Os sistemas que operam de forma isolada são definidos, conforme EPE (2014), por "sistemas elétricos de serviço público de distribuição de energia elétrica que, em sua configuração normal, não estejam eletricamente conectados ao Sistema Interligado Nacional – SIN, por razões técnicas ou econômicas".

A integração de fontes renováveis alternativas de geração distribuída frente aos indícios do esgotamento energético convencional, com forte impacto em 1973,

abriu espaço para estudos e métodos que viessem a contornar os problemas evidenciados nos sistemas elétricos ao redor do mundo. As redes capazes de operar isoladamente, por isso o termo de designação em inglês, *stand-alone*, foram as primeiras a utilizar deste tipo de geração (eólica, solar, entre outros), ganhando destaque principalmente a partir de 1980 em empresas do ramo de telecomunicações (COELHO, 2013).

Além de gerar a própria energia a ser consumida, normalmente mediante microgeradores, as redes isoladas, ou então, microrredes, propõem a utilização de sistemas de armazenamento com a finalidade de promover maior autonomia e segurança. Relativamente às questões técnicas de operação de uma rede autônoma, o estado isolado pode ser compreendido como um modo de emergência, no qual a rede em questão, diante de perturbações ou falhas na rede convencional centralizada, necessita proceder a intervenções devidamente controladas.

O sistema de controle tem função fundamental para a exequibilidade da rede autônoma, deve ser apto a rápidas respostas de desconexão, assegurando o contínuo e seguro fornecimento de energia para os consumidores locais. Num cenário de operação em que ocorra certa falha, interna ou externamente à rede, e a estrutura de controle tenha capacidade de comunicação com todas as unidades de GD, de armazenamento e consumo, tal como se propõe a ser uma MR, as unidades geradoras subsequentes, ligadas à jusante do defeito, poderão continuar a atuar, abastecendo as cargas locais e talvez até sendo utilizadas na resolução do problema (RIBEIRO, 2010).

Muitos projetos foram e estão sendo desenvolvidos no Brasil. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética, foram contabilizados até o ano de 2014 cerca de 200 sistemas isolados na região amazônica – Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Rondônia e Pará – além do Sistema Isolado de Fernando de Noronha. Não há previsão de conexão ao SIN até o ano de 2023, sendo que apresentam composição e dimensões bem variadas entre si. A Tabela 1 demonstra a expectativa de demanda máxima média de energia para os próximos 8 anos.

Tabela 1 - Demanda Máxima Média dos Sistemas Isolados no Brasil.

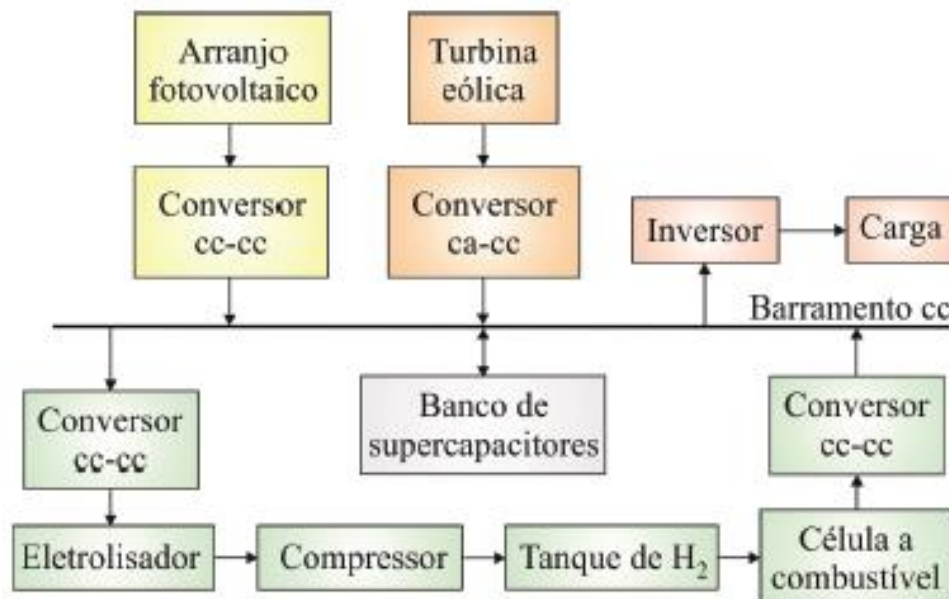
Grupo	Demanda máxima média 2014 [kW]	Demanda máxima média 2023 [kW]
Até 100 kW	30	28
De 100 kW a 1 MW	345	370
Acima de 1MW	4580	8230

Fonte: EPE (2014).

Estes sistemas têm sido atendidos pelas concessionárias de energia da região ou por produtores independentes, mediante geradores a óleo diesel, um recurso limitado e caro. Contrariamente ao decreto nº 7.246/2010 (BRASIL, 2010), recomendando que o fornecimento de energia nos sistemas isolados deve suprimir os impactos ambientais, buscando eficiência energética e econômica de forma sustentável, o estudo realizado pela EPE ressalta que mesmo os projetos apresentados para o atendimento futuro das redes isoladas têm como fonte energética principal o diesel. Neste contexto, ainda segundo o estudo mencionado, os projetos alternativos indicam uma grande oportunidade de se expor modelos baseados em fontes renováveis, utilizando os recursos locais de forma a proporcionar maior autonomia, reduzindo custos e impactos ambientais.

Em menção à Coelho (2013, p.54), trabalhos atuais adotam células a combustível e eletrolisadores, com alta densidade de potência, em substituição aos geradores a diesel. Destaca-se também o uso de supercapacitores, diminuindo a necessidade de bancos de baterias convencionais, poluentes e não renováveis. A Figura 11 exemplifica o diagrama de uma rede apta a operar isoladamente ou conectada à rede.

Figura 11 - Proposta de sistema híbrido.



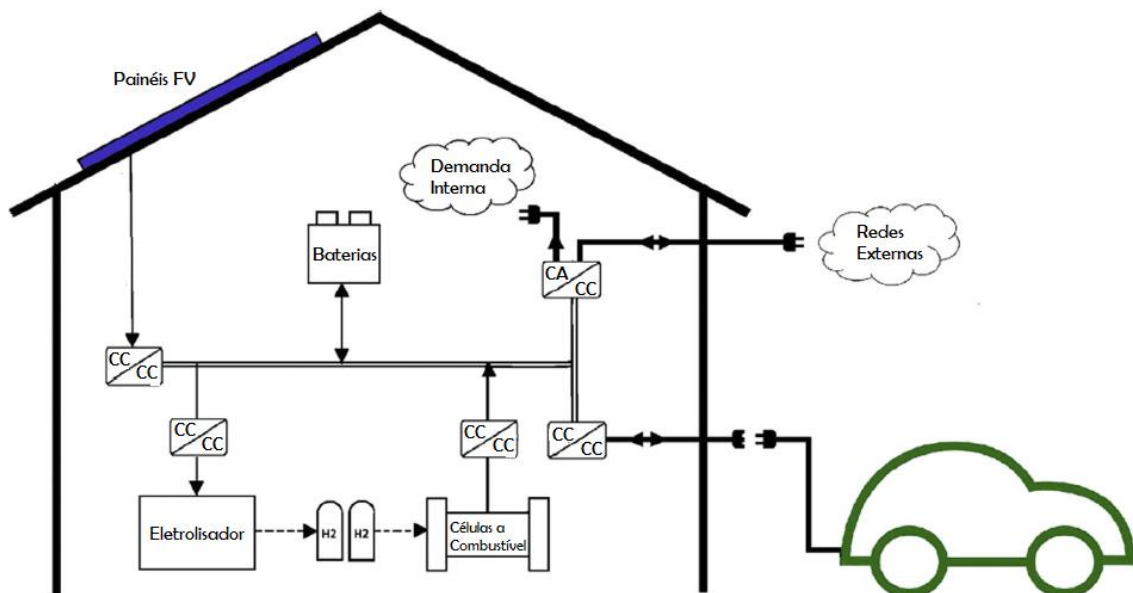
Autor: Coelho (2013, p. 55).

Atualmente, a maioria dos sistemas isolados opera em CA, entretanto, com o desenvolvimento e barateamento de sistemas de geração, armazenamento e controle em CC, além do aumento expressivo na utilização de cargas baseadas em componentes eletrônicos, as microrredes CC vêm ganhando destaque no setor elétrico. São poucos casos em execução, como o projeto teste da Universidade do Texas em Arlington (UTA), com três microrredes híbridas independentes, operando cada uma com um barramento em 24 Vcc e outro em 120 Vca - 60 Hz. O sistema de armazenamento primário é composto por duas baterias ácido-chumbo de 12Vcc, carregadas por painéis solares e aerogeradores ou por células a combustível. As cargas controladas estão conectadas no barramento CA e o sistema de controle é feito pelo equipamento Compact RIO, da National Instruments. O barramento CC é utilizado para dispor energia para as cargas estáticas, normalmente residenciais.

Outro exemplo é o da Universidade de Sevilha, Espanha, em atividade desde 2012, com capacidade total de potência de 0,01 MW. A energia é gerada principalmente por um conjunto de painéis fotovoltaicos (PFV) conectados a eletrolisadores, de modo a mitigar os problemas de confiabilidade relacionados à intermitência do recurso solar. Durante excessiva produção de energia, a eletricidade é fornecida ao eletrolisador e transformada em hidrogênio, e posteriormente, quando necessário, o hidrogênio é introduzido na célula a

combustível para gerar eletricidade. Um banco de baterias ácido-chumbo é integrado à rede de distribuição para manter o nível de tensão da linha fixo, simplificando o dimensionamento dos conversores, como mostra a Figura 12. A planta de controle principal é formada por um sistema de supervisão SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) em conjunto com um CLP (Controlador Lógico Programável) M-340. O controle é realizado requisitando-se os dados das cargas programadas, unidades de MG, sensores instalados e conversores e enviando-os ao CLP por protocolo de comunicação CANBUS (*Controller Area Network Bus*). O ponto de destaque é que a MR pode ser conectada a outras MR's vizinhas para troca de energia conforme oferta e demanda. (HOSSAIN *et al.*, 2014).

Figura 12 - Microrrede CC da Universidade de Sevilla.



Fonte: Adaptado de Hossain *et al.* (2014, p. 142).

Este tipo de modelo de sistema CC é o que melhor se aproxima do proposto nesta pesquisa, tendo grande utilidade para o desenvolvimento de uma estrutura viável, operacional e autônoma.

Baseando-se na literatura, as próximas seções discorrem sobre os parâmetros e características específicas de funcionalidade em microrredes CC, comparando-os tecnicamente.

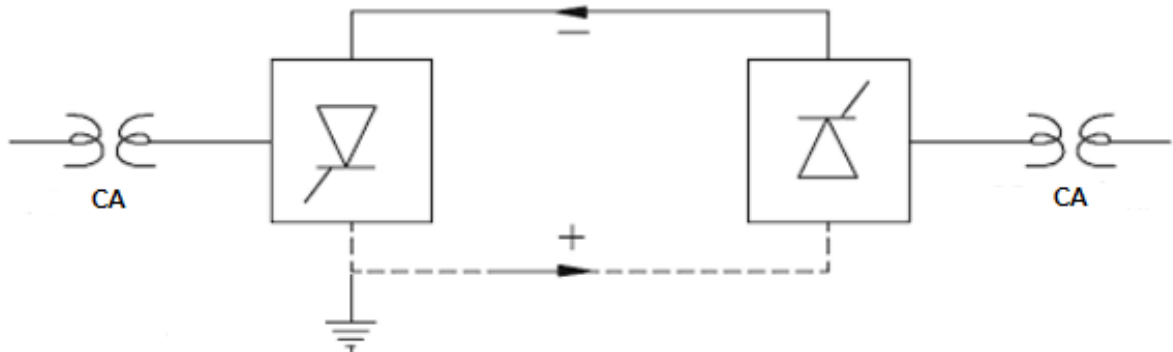
3.2 Linhas de Transmissão

O padrão de cabeamento, assim como as topologias empregadas, extensão da rede, dimensionamento das cargas, níveis de tensão e corrente aplicados, variam consideravelmente nas distintas regiões do Brasil e do planeta. Estas divergências aumentam a complexidade de compreensão dos benefícios atribuídos à migração para um sistema que opere predominantemente em corrente contínua, habilitando poucas margens para otimizações generalizadas. Posto isto, cabe a análise prévia dos mecanismos de funcionamento presentes em microrredes CC, complementarmente às possibilidades de MG, armazenamento e métodos de controle e proteção.

Existem várias configurações efetuadas em redes de distribuição CC, principalmente em CCAT, devido à atual notabilidade e expansão destas estruturas. Basicamente, podem ser classificadas como:

- **Monopolar (ou Unipolar)** – nesta configuração, um condutor metálico polarizado positiva ou negativamente, conduz a corrente elétrica em direção à carga ou até o próximo elemento do circuito, enquanto que a corrente de retorno é dispersa por meio de eletrodos conectados ao plano terra em cada lado do circuito, ou via condutor metálico único. Dimitris, Tzimas e Rowland (2015) apontam para o aumento de custos no caso da utilização de condutor metálico único aterrado, ademais da possibilidade de corrosão eletroquímica do cabo. Se comparada com as outras topologias, a monopolar é a mais simples e a menos dispendiosa. A direção da corrente é fixa e controlada pela diferença entre as tensões de controle desejadas. É comumente empregada em linhas de baixa tensão em que a corrente de retorno é dissipada por eletrodos situados em terminais de cabos submarinos e também em estações retificadoras e inversoras CCAT. A Figura 13 representa os dois métodos discutidos referentes ao fluxo da corrente de retorno, utilizados em algumas aplicações, como os barramentos CCAT. Em áreas congestionadas, com solo de alta resistividade ou onde existe água corrente, prejudiciais para o aterramento do condutor de corrente de retorno, é empregado em substituição, um condutor neutro de baixa tensão, interligando o circuito CC (BAHRMAN, 2006);

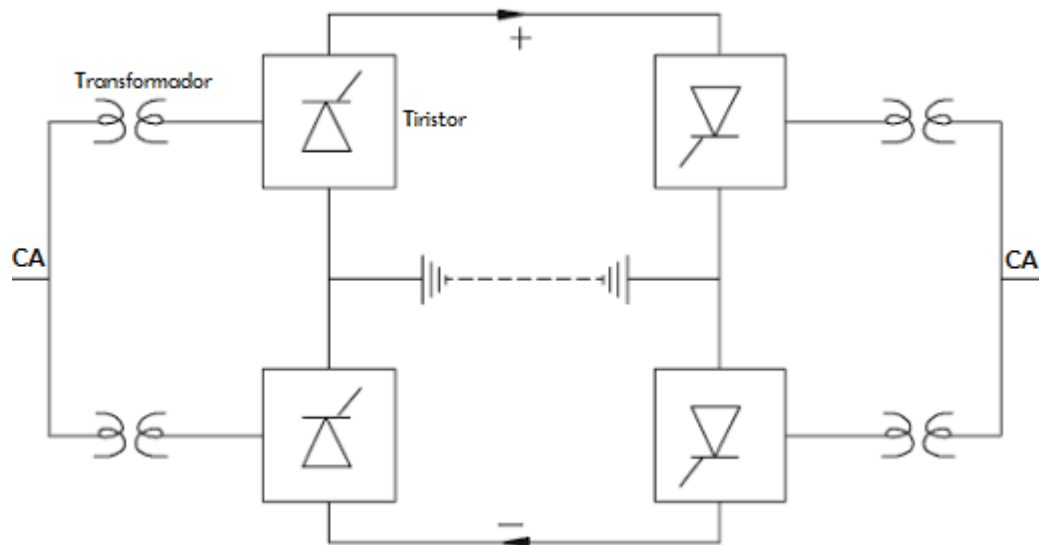
Figura 13 - Topologia Unipolar com retorno por condutor unificado.



Fonte: Adaptado de Jagannathan (2011, p. 324).

- Bipolar** – apresenta dois condutores para a transferência de corrente elétrica, sendo um de polaridade positiva e outro negativa, em relação a outro condutor de potencial neutro, normalmente conectado ao plano terra em cada extremidade do circuito. A configuração bipolar é a mais comum em sistemas de distribuição CC e segundo Barhman (2006, p.20), é a mais utilizada em linhas CCAT modernas, como ilustrado na Figura 14. O método de retorno aterrado possibilita maior disponibilidade de energia, já que no evento de falha ou manutenção na transmissão de potência de um dos polos, o sistema pode continuar em operação mesmo com metade da capacidade. No caso de falta nos tiristores, uma possível solução é desconectá-los mediante chaves, utilizando a linha de transmissão do polo contrário ao que está em funcionamento, como caminho para a corrente de retorno. Ainda conforme o pesquisador, para estados de operação normal e balanceada, não há corrente de retorno ao plano terra.

Figura 14 - Configuração Bipolar com retorno por terra.



Fonte: Adaptado de Jagannathan (2011, p. 324).

Há também configurações menos usuais, como a homopolar, que consiste em dois ou mais condutores de mesma polaridade – geralmente negativa – e o aterramento é efetuado por condutor suplementar (JAGANNATHAN, 2011). Segundo Dimitris *et al.* (2015), outro caso constatado, porém sem aplicação até o momento, é o tripolar. Esta configuração pretende utilizar da totalidade dos condutores de linhas de transmissão CA trifásicas, mediante método de modulação de corrente para dissipar o aquecimento nos cabos, devido ao fluxo maior de corrente. Os autores concluem que esta configuração será provavelmente útil em sistemas CCAT, mas a implementação em baixa tensão CC é dificultada devido aos altos custos dos sistemas de controle e componentes eletrônicos necessários.

Mesmo não sendo do intento preliminar desta pesquisa propor a reposição da atual estrutura de BT em CA, por outra em CC, o que envolveria aprofundamentos fora do escopo previsto, é de fundamental importância a análise das propriedades eletromecânicas das linhas em CA para assim apontar e comparar vantagens e desvantagens referentes aos aspectos práticos das estruturas de transmissão dos dois modelos de distribuição de energia elétrica.

As redes CA executadas em BT se enquadram principalmente em três categorias: monofásica, trifásica sem condutor neutro e trifásica com condutor neutro. Os cabos utilizados são multiplexados e classificados segundo o número de fases (núcleos) presentes, incluindo o neutro, respectivamente por duplex, tríplex e

quadruplex (COPEL, 2015). Cada classificação segue padrões de dimensão, capacidade, material, entre outros fatores definidos por normas regulamentadoras emitidas pelas diferentes companhias de distribuição de energia no Brasil e no mundo.

No estudo realizado por Dimitris *et al.* (2015), são observadas as linhas constituídas por cabos tríplex e quadruplex presentes na rede de distribuição do Reino Unido. Foi escolhido o padrão de cabeamento que suporta uma faixa de corrente de 265 A por condutor/fase, dimensionados para níveis de tensão de até 849 V_{pico} (600 V_{rms}) entre fase e neutro, e 1.414 V_{pico} (1.000 V_{rms}) entre duas fases. Na prática, os cabos operam em 230 V_{rms} com capacidade total de potência de 183 kW, assumindo fator de potência unitário – o que em realidade não ocorre, como já foi discutido. A partir destes valores, os autores supõem a utilização dos mesmos cabos, agora sob operação em CC com topologia unipolar e bipolar.

Tabela 2 - Capacidade total de potência em cabos quadruplex sob CC e CA.

	Núcleos				Potência Total [kW]
	1	2	3	4	
CA	230	230	230	0	183
	600	600	600	0	477
CC Unipolar	230	0	230	0	122
	325	0	325	0	172
	344	0	344	0	183
	600	0	600	0	318
	849	0	849	0	450
CC Bipolar	230	-230	230	-230	244
	325	-325	325	-325	345
	600	-600	600	-600	636
	707	-707	707	-707	749

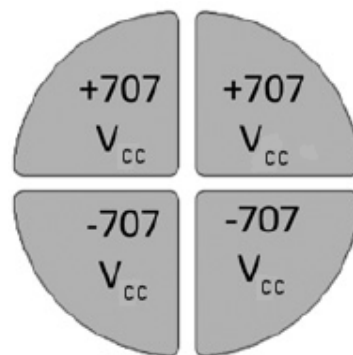
Fonte: Adaptado de Dimitris *et al.* (2015, p. 6).

A Tabela 2 demonstra os resultados obtidos, expandindo a apreciação para diferentes níveis de tensão por fase. Os autores concluem que a operação dos cabos quadruplex sob operação CC bipolar de ± 707 V renderia um aumento maior de 300% de fluxo de energia, otimizando a capacidade de transferência dos condutores, em comparação com o modelo CA trifásico de 230 V_{rms}. A Figura 15 ilustra a linha padrão quadruplex sob a configuração bipolar proposta.

Igualmente, ressaltam que o benefício é válido para outros dispositivos das redes de distribuição CA em BT, tais como pontos de ligação. Igualmente aos cabos, são projetados para valores de pico de tensão. Outras vantagens apontadas para esta configuração CC:

- Devido ao fluxo bidirecional de corrente e ausência de potência reativa, mantendo os níveis de tensão mais estáveis e com baixo índice de desbalanceamento entre os polos, possibilita maior penetração de unidades de GD, sistemas de armazenamento (SA) e cargas controladas, como veículos elétricos (VE);
- A conversão para CC não requer reposição de cabos na maioria dos casos de linhas de BT em CA, pois permite a utilização da infraestrutura já existente;
- Com um sistema trifásico de GC em CA, todos os usuários dentro de uma mesma subrede estão conectados ao neutro. Quando as fases estão balanceadas, as correntes de retorno se cancelam no condutor neutro, resultando em uma corrente nula. Como nem sempre isto ocorre, a corrente que flui pelo condutor de retorno é diferente de zero, gerando perdas por aquecimento nos cabos e diminuindo o rendimento do sistema.

Figura 15 - Padrão quadruplex sob sistema CC bipolar para máxima capacidade de potência.



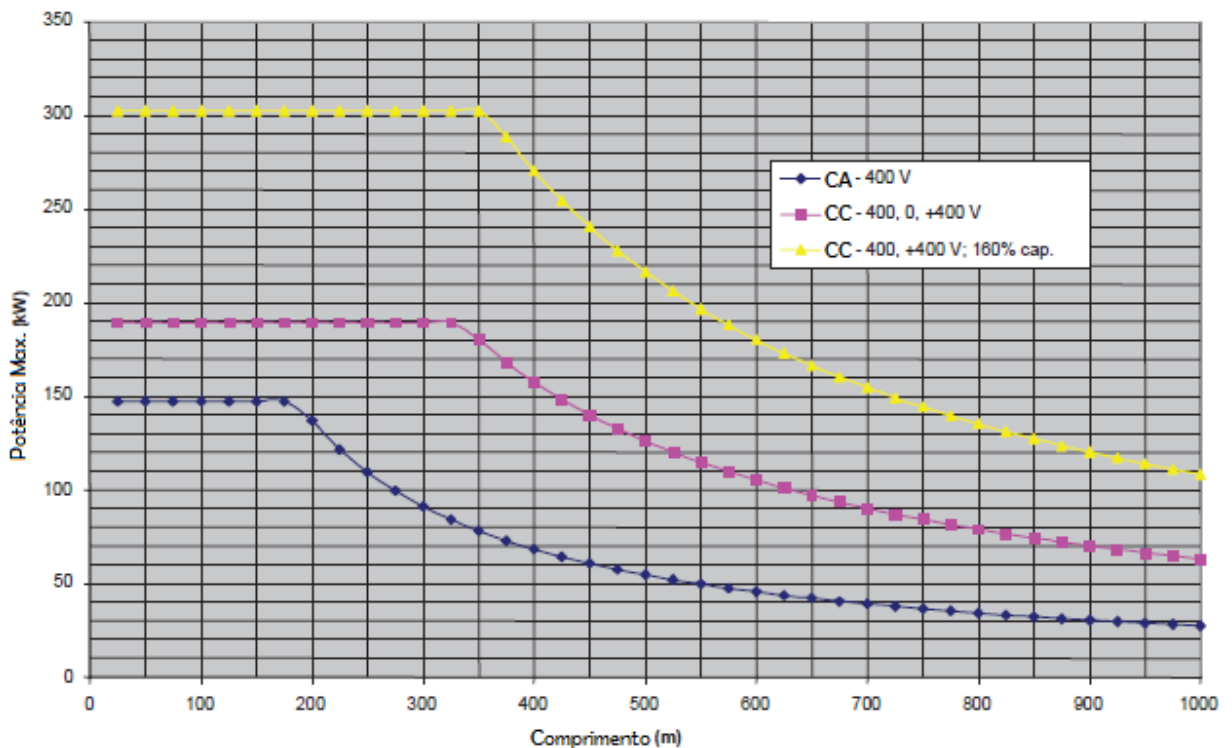
Fonte: Adaptado de Dimitris *et al.* (2015, p. 6).

Em outra análise consoante ao padrão de cabeamento quadruplex, pesquisadores italianos relacionam a capacidade máxima de transferência de potência em função do comprimento dos cabos - em metros.

Os modelos comparados são: sistema CA trifásico com tensão nominal de 400 V e dois sistemas CC bipolar de ± 400 V – um com apenas três dos quatro

condutores, um para cada polo e o terceiro para o neutro, e o outro sistema utiliza os quatro condutores, dois para cada polo. O cabo avaliado, frequentemente aplicado na rede italiana, é composto por condutores de diâmetro igual a 95 mm². Em exceção ao sistema bipolar com quatro condutores, o material consta com mais 50 mm² de isolamento (AGUSTONI *et al.*, 2005). A seguir, o gráfico da Figura 16 demonstra os resultados alcançados pelos pesquisadores.

Figura 16 – Gráfico Comprimento X Máxima Transferência de Potência para modelos CC e CA.



Fonte: Adaptado de Agustoni *et al.* (2005, p. 3).

Para as condições estruturais apresentadas admite-se então, que referente à mesma extensão, os cabos sob operação CC suportam maior carga, e reciprocamente, para operações com carga constante, os cabos em CC podem cumprir maiores extensões que em CA.

Ocorre também a inspeção comparativa perante cabos tríplex. Considerando aqueles majoritariamente exibidos nas linhas de distribuição do Reino Unido, confeccionados com cobre ou alumínio, tecnologia de isolamento XLPE (*Cross-linked Polyethylene*) ou PVC (cloreto de polivinila) e diâmetro total de 300 mm², Tzimas *et al.* (2012) analisam o comportamento térmico dos condutores em razão dos diferentes níveis de tensão simulados em CC e CA. Em referência às estruturas

CA operando com tensão entre fases de 415 Vrms, os testes foram realizados observando os mesmos cabos à medida que se alterava os níveis de tensão e de carga, porém em CC. Vale destacar, que para situação real (operação em CA) em que as fases não estão balanceadas, foi assumido que apenas 40% da capacidade dos cabos é de fato utilizada. Já em CC, logo em nível de 72 V, o sistema alcança marginalmente a potência de pico requisitada pela carga, utilizando da máxima capacidade dos cabos. Acima desta faixa de tensão, os cabos estarão operando abaixo de sua capacidade máxima, reduzindo assim as perdas por calor, devido ao menor fluxo de corrente.

Além dos ganhos em capacidade de transmissão, foi inferido que as quedas de tensão através dos cabos em sistemas CC devem ser menores, já que diferentemente dos modelos em CA, não dependem da impedância do cabo (princípios capacitivos e indutivos), e sim da resistência. Exemplificando, para um cabo com diâmetro de 300 mm² transmitindo apenas uma fase com tensão de 240 Vrms (fase-neutro), a queda de tensão em CC é de 0,17 mV/A/m (lê-se mili volts por ampère por metro), enquanto que em CA o valor sobe para 0,25 mV/A/m. De maneira geral, quanto maior a distância, maior o impacto deste fator para o rendimento do sistema. O nível de tensão aplicado no barramento CC é um agente crucial para a estimação da queda de tensão nos cabos e será melhor detalhado na seção 3.3.

Apesar dos benefícios até então indicados, existe um termo relevante às linhas de transmissão em CC, que desfavorece o sistema frente ao modelo já executado em CA. Ainda em alusão a Tzimas *et. al* (2012), os autores afirmam que, em operação CC, devido a maior condutividade elétrica do material isolante, implicando em um maior índice de umidade (*moisture*), é iminente o envelhecimento precoce dos cabos em utilização. A dispersão do campo elétrico nos materiais dielétricos sob funcionamento em CC é determinada pela condutividade elétrica, função dependente da temperatura. Com a elevação da dispersão destes campos, a geração de calor mediante circulação de corrente através do isolamento dos cabos é significativa e resulta na corrosão antecipada da camada protetora.

3.3 Níveis de Tensão

Até o momento foram apresentados diferentes modelos de distribuição em corrente contínua. Um dos principais aspectos na caracterização e desempenho destes modelos é o nível de tensão praticado.

Seguindo o crescente destaque de projetos que buscam instalar microrredes CC em ambientes residenciais e comerciais, organizações e instituições tentam padronizar os níveis de tensão adequadamente aos seus interesses e realidades estruturais. A associação de indústrias *Emergence Alliance*, por exemplo, publicou recentemente a adoção do padrão de tensão CC de 24 V. Já a IEC (*International Electrotechnical Commission*) tem sugerido o padrão internacional de 380 V, o mesmo utilizado no Japão pela NTT (*Nippon Telegraph and Telephone*), enquanto que a ETSI (*European Telecommunications Standard Institute*) estabelece o nível de 400 V (Tzimas *et al.*, 2012). As diretrizes emitidas visam atender também a tendência de aumento no fluxo de energia elétrica nos centros urbanos, decorrente do investimento em carros elétricos, postos de carregamento CC e painéis FV, exigindo métodos de controle e monitoramento aptos a lidar com a injeção de altos níveis de corrente contínua em pouco tempo.

Diversas pesquisas que analisam a viabilidade de microrredes CC apuram suas investigações quanto ao nível ótimo de tensão a ser aplicado com base nos diferentes níveis já praticados em redes CA, ou até mesmo em CC. Por conseguinte, Sannino *et al.* (2003), em respeito à estrutura elétrica presente na Suécia – com faixas de tensão de 230 Vrms (entre fase e terra) e 400 Vrms entre fases – testaram experimentalmente diferentes classes de tensão em barramentos CC. Separando a apreciação dos pesquisadores, temos os seguintes resultados:

- 326 Vcc: muitas aplicações eletrônicas, tais como fontes controladas, dispõem atualmente de retificadores (conversores CA/CC) na entrada de tensão CA 230 Vrms – cujo valor de pico é 326 V. Se o suprimento fosse diretamente realizado com este valor em CC, poucas alterações seriam necessárias;
- 230 Vcc: certos eletrodomésticos e cargas resistivas como aquecedores poderiam ser alimentados sem nenhuma alteração, já que o valor adotado é

equivalente à tensão eficaz presente entre fase e terra em sistemas CA (230 Vrms);

- 120 Vcc: abaixo deste nível de tensão, os ganhos são relativos à proteção. Segundo normas europeias, nesta condição, não há requisição de proteção contra contato indireto por seres humanos, como no caso de contato com partes expostas de condutores - energizados após alguma falha no sistema elétrico. Isto torna a estrutura mais simples, já que dispensa condutor de aterramento;
- 48 Vcc: não requer método algum de proteção mesmo contra contato direto - em condutores de polo positivo ou negativo. Esta faixa de tensão já é utilizada em equipamentos de telecomunicações existentes no mercado, projetados para -48 Vcc.

A partir da observação do comportamento destas quatro classes, vinculadas aos índices totais de queda de tensão nos cabos e perdas energéticas do sistema sob diferentes demandas de cargas – usualmente encontradas em ambientes residenciais e comerciais – os autores concluem que o modelo CC pode demonstrar grandes vantagens se um correto nível de tensão for praticado. Perante ambas as perspectivas técnica e econômica, o padrão escolhido mais adequado é de 326 Vcc, podendo ser empregado em condutores operando atualmente em CA.

Outros estudos foram realizados adotando níveis de extra baixa tensão (inferior a 50 V), entretanto comprovou-se desvantagens referentes ao alto fluxo de corrente e conseqüente necessidade de estrutura que suportasse esta mudança. Em BRE (2002, pg. 31), atenta-se para a necessidade de se modelar cabos que suportem um fluxo de 400 A, caso se opte por um nível de tensão de 18 V e potência de 7,2 kW – valor suportado pela estrutura típica em CA com tensão de 240 Vrms (fase-terra). Adicionalmente, devido às perdas, constatou-se que não é possível satisfazer a demanda de potência em domicílios comuns utilizando-se de barramento em extra BT (PELLIS, 1997).

Existem ainda trabalhos que sugerem modelos de microrredes compostas por mais de um barramento CC, com diferentes níveis de tensão. O intuito é aproveitar dos variados tipos de cargas existentes, eximindo o emprego de muitos conversores CC/CC.

Relacionada aos conversores de energia, a próxima seção avalia a evolução e eficiência destes componentes, de substancial importância para a continuidade da análise comparativa entre modelos de GC em CA e GD em CC.

3.4 Conversores

O tema que envolve conversores de energia é fundamental para a compreensão do funcionamento de microrredes. A maioria dos autores da bibliografia levantada afirma que é o motivo principal pelo qual, nos dias de hoje, os sistemas de distribuição em CC sejam viáveis e mais vantajosos que em CA.

Primeiramente, com o aumento no interesse por fontes renováveis com GD, mesmo aquelas que fornecem energia em CA requerem uma interface com componentes eletrônicos para o controle do fluxo de potência gerado e inserido na rede. Ademais, veículos elétricos, baterias, supercapacitores, servidores de dados e tantos outros equipamentos operam fundamentalmente em CC. Para a inserção destas unidades nas redes CA atuais, é indispensável o emprego de conversores CC/CA. O emprego destes elementos em uma rede predominantemente CC representaria, além de maior facilidade nas conexões, um ganho de 2,5 a 10% da energia despendida nos conversores (HAMMERSTROM, 2007).

Aprofundando neste sentido, Fairley (2012) declara que, em comparação com transformadores CA, conversores eletrônicos devem ser 5% mais eficientes, já que não consomem potência reativa. Esta suposição considera a rápida evolução da tecnologia em materiais semicondutores, como os transistores de carboneto de silício, capazes de lidar com operações em alta potência. Espera-se que estes materiais tenham eficiência próxima a 97%, suportando temperaturas maiores ou iguais a 200° C, em contraste com os IGBT's presentes em CCAT's atuais, com eficiência de até 94% e capazes de tolerar temperaturas limitadas a 110° C.

Mesmo assumindo que ao longo dos anos a eficiência dos transformadores foi amplamente melhorada, especialmente para operações como elevador de tensão, registrando casos com cerca de 98% de eficiência, as operações retificadoras, entretanto, apresentam apenas 90% de eficiência. As conversões CC/CC, por outro lado, se beneficiam do grande espaço para otimizações e barateamento da tecnologia envolvida. No estudo realizado por Starke *et al.* (2008),

comparou-se casos com três diferentes taxas de eficiência para conversores CC/CC: 95%, 97% e 99,5%. Atribuiu-se que a conversão CC-CA tenha eficiência de 97%. Em seguida, relacionaram estes sistemas com outro equivalente existente em CA. Se os sistemas elétricos atuais fossem integralmente em CA (geração, distribuição e carga), as perdas seriam menores do que os mesmos sistemas em CC. Porém, a análise considerou também a quantidade de perdas para sistemas 50% em CC e 50% em CA, mais fiel ao que se encontra na atualidade. Os resultados obtidos demonstram preliminarmente que sob a infraestrutura presente, fontes CC precisam de dois estágios de conversão para suprir cargas CC, resultando em grandes perdas de energia e maior circulação de correntes em frequências harmônicas. Os autores sugerem a oferta de dois tipos de fonte na entrada de cada carga, uma em CC e outra em CA.

Devido às diversas alternativas de equipamentos elétricos de geração, armazenamento e carga, com características operacionais específicas, existe uma ampla área de desenvolvimento para os conversores. Independente do tipo de corrente em atuação (CA ou CC), para que estes dispositivos sejam integrados a qualquer circuito elétrico de maneira confiável e segura, é inevitável que a energia seja regulada corretamente aos parâmetros de funcionamento definidos. Em suma, as pesquisas apontam para o papel fundamental do desenvolvimento de conversores CC/CC com melhores níveis de eficiência e acessibilidade, até então mais caros e complexos, para garantir os benefícios atribuídos aos modelos de rede CC.

3.5 Geração de Energia e Sistemas de Armazenamento (SA)

Atualmente, existem diversas alternativas de geração de energia elétrica. Como o foco deste trabalho não é especificamente no tipo de geração, são relatadas aqui apenas algumas das possíveis unidades de microgeração distribuída, capazes de compor uma MR em CC, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Principais tecnologias de microgeração.

Nome Técnico	Recurso	Tipo de saída	Potência gerada [kW]	Eficiência média (%)	Características
Célula a combustível	Hidrogênio (mais comum), Etanol, Propano	CC	1-20000	~80-90	Silenciosa; útil para cogeração (elétrica e térmica); extração do hidrogênio é cara
Célula Fotovoltaica	Sol	CC	0,02-1000	~40-45	Recurso intermitente; Flexível a várias aplicações; Investimento inicial alto, com retorno a longo prazo; Necessita de SA
Aerogerador	Vento	CA	0,2-3000	~50-80	Pode gerar durante o dia inteiro; a tecnologia está sendo fortemente desenvolvida hoje em dia; investimento inicial e manutenção ainda são caros; Necessita de SA
Gerador à biomassa	Biomassa	CA	100-20000	60-75	Alta disponibilidade de recurso; incentiva reciclagem de matéria orgânica, álcool e outros combustíveis são produzidos com biomassa; tecnologia envolvida cara
Energia Maremotriz	Ondas do mar	CA	10-1000	~50-75	Alta densidade de potência; recurso de fácil previsão; falta de projetos com interesse comercial;

Fonte: Adaptado de Planas *et al.* (2015, p. 729).

É possível verificar na Tabela 3, que os sistemas de armazenamento são indispensáveis para certas modalidades de geração além de habilitarem a operação autônoma das microrredes, melhorando os níveis de qualidade, confiabilidade e proteção no suprimento de energia.

A Tabela 4, resume algumas das tecnologias disponíveis em SA. As siglas TES, PHS, CAES, RFB e SMES referem-se respectivamente em português ao tipo de armazenamento por energia térmica, bombeamento hídrico, ar comprimido, bateria de redução-oxidação e energia magnética supercondutora.

Tabela 4 - Principais tecnologias de SA.

Tecnologia	Eficiência (%)	Densidade energética (Wh/kg)	Custo (€/kW)	Duração (anos)	Maturidade e impacto ambiental
TES	30-60	80-250	140-220	5-40	Bem desenvolvida e baixo impacto
PHS	75-85	0,5-1,5	400-1500	40-60	Madura e sem impacto
CAES	50-89	30-60	250-1500	20-60	Bem desenvolvida e sem impacto
Bateria Níquel-Cádmio	60-65	0,05-5	25	~5	Bem desenvolvida e sem impacto
Bateria Ácido-Chumbo	70-90	30-50	200	5-15	Madura, sem impacto
Bateria Sódio-Sulfuro	80-90	150-240	700-2100	10-15	Em demonstração e sem impacto
Bateria Íon-Lítio	85-90	75-200	3000	5-15	Em demonstração e sem impacto
Eletrolisador	20-50	800-10k	350-1100	5-15	Em desenvolvimento e baixo impacto
Flywheel	93-95	10-30	250	~15	Em demonstração e quase sem impacto
RFB	75-85	10-50	400-1100	5-15	Em desenvolvimento e sem impacto
Capacitor	60-65	0,02-5	250	~5	Bem desenvolvido e baixo impacto
Super-capacitor	90-95	2,5-15	200	>20	Bem desenvolvido e baixo impacto
SMES	95-98	0,5-5	200	>20	Em demonstração e grande impacto

Fonte: Adaptado de Planas *et al.* (2015, p. 730).

Para que haja uma integração eficiente e segura entre às unidades de GD e SA e outros elementos que compõem as microrredes em CC, é imprescindível o emprego de sistemas de controle e proteção correspondentes. A próxima seção descreve algumas das metodologias referentes ao tema.

3.6 Controle

São encontrados na literatura diferentes métodos de supervisão e controle para microrredes CC. O objetivo principal destes métodos é manter o nível de tensão constante no barramento CC, controlando o fluxo de potência no barramento em função da demanda de carga, da disponibilidade de geração local - provenientes das unidades de GD - e da capacidade do SA (AGUSTONI *et al.*, 2005).

Segundo Ferreira (2012), dentre os diversos métodos para a regulação do nível de tensão no barramento CC, dois deles são os mais investigados: o de modelo mestre-escravo e o por decaimento de tensão – ou *droop* de tensão.

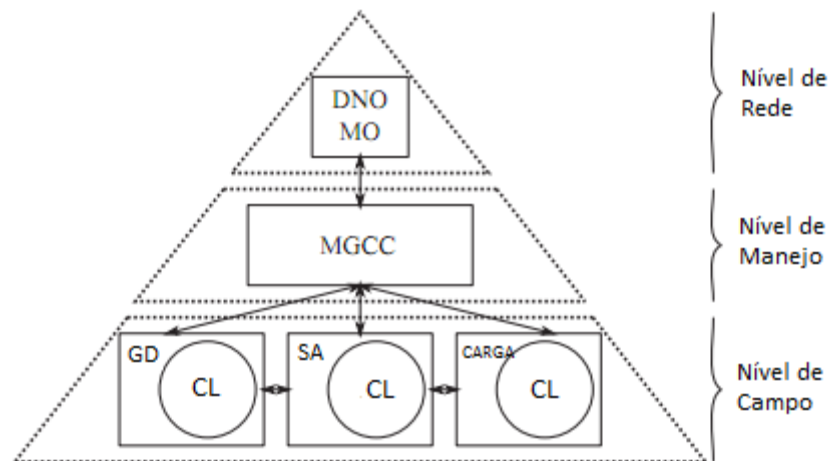
O primeiro modelo refere-se a um sistema de controle centralizado, em que o dispositivo mestre, geralmente um processador digital de sinais (DSP), é capaz de supervisionar e comandar todos os conversores (escravos) aos quais está conectado, nas diferentes situações de operação. A estratégia de controle baseia-se na configuração de valores de referência (*thresholds*) dos níveis de tensão de cada conversor, e das condições de operação desejadas, de modo que os escravos atuem como fontes de corrente, injetando ou absorvendo potência à rede.

Apesar da capacidade de divisão de carga ser totalmente controlável, este método depende de um canal de comunicação rápido e robusto entre o DSP e os conversores. Fazem-se necessários o monitoramento ininterrupto e atuação eficiente, pois caso o sistema se torne inoperante, devido a falhas na comunicação ou defeitos nos componentes, por exemplo, pode ocorrer o descontrole e conseqüente desligamento total da rede.

. Se for necessária a conexão com a rede pública, devido à sobra ou falta de energia elétrica na MR, o conversor empregado na interface CC/CA - conversor de fluxo bidirecional de corrente - é o responsável por regular o nível de tensão do barramento. Para conversores deste gênero, normalmente IGBT's com chaveamento em alta frequência, é recomendado o uso de um controlador de corrente por histerese (CCH) (FERREIRA, 2012).

Os sistemas de controle centralizado podem ser divididos em três níveis, seguindo uma hierarquia de comando, conforme ilustrado na Figura 17 (PLANAS *et al.*, 2015). No nível superior, encontram-se o operador da rede de distribuição regional – ou DNO (*distributed network operator*) – e o operador de mercado – ou MO (*market operator*) - compondo o patamar de controle em nível de rede. O MO tem a função de avaliar a participação da microrrede em possível mercado de livre comércio de energia, mediante diferentes e específicas políticas locais de compra e venda de ativo. No nível intermediário, de manejo local, encontra-se o sistema de controle central da MR – *microgrid central controller* (MGCC).

Figura 17 - Hierarquia de comando de sistemas de controle em MR's.



Fonte: Adaptado de Planas *et al.* (2015, p. 735).

Os conversores das unidades de GD, do SA e carga, compõem o nível de campo, e cada um apresenta uma estratégia específica de controle, denominada de controle local (CL). Neste contexto, o segundo método citado, por *droop* de tensão, apresenta-se promissor.

Para tipos de GD em que a fonte primária de energia é controlada, como é o caso de turbinas a gás e microgeradores a diesel, o controlador de cada módulo emula o comportamento de uma impedância. Caso ocorra um aumento na corrente fornecida pelo conversor, há uma redução (*droop*) na tensão de saída do mesmo. O CL, realizado pelo controlador por *droop* de tensão (CDT), fornece a corrente de referência para cada conversor CC/CC, em função dos níveis de tensão de referência do barramento CC e da saída da fonte. Esta técnica permite a divisão de corrente entre os conversores paralelamente conectados sem a necessidade de um

controle centralizado. Sendo assim, independe de comunicação entre as unidades de GD e proporciona maior confiabilidade ao sistema (FERREIRA, 2012) e (PLANAS *et al.*, 2015).

Já para unidades de GD de natureza intermitente, como microturbinas eólicas e PFV's, podem ser utilizados mecanismos de controle não linear por *droop* de tensão, associados às técnicas de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) (PLANAS *et al.*, 2015, p. 736). Embora os projetos de controladores sejam mais complexos, os métodos de controle não linear apresentam resultados favoráveis em comparação aos lineares, principalmente pela rápida resposta e menor sensibilidade às variações nos parâmetros envolvidos com dispositivos de controle em conversores estáticos (FERREIRA, 2012).

No que tange o CL para o SA, são necessárias estratégias diferenciadas para lidar com as ações de carga e descarga da energia elétrica. Neste sentido, a técnica de controle de tensão por *droop* adaptativo se faz efetiva, limitando a potência máxima fornecida em função do estado de carga dos módulos de armazenamento. Adicionalmente, para ter um desempenho ótimo na rede, cada módulo pode apresentar uma rotina de controle particular, baseada nas diversas tecnologias de fabricação envolvidas, como as baterias Níquel-Cádmio, supercapacitores e SMES, por exemplo.

Existindo a presença de um controle hierárquico, as cargas inseridas no circuito CC também podem apresentar mecanismos de controle, ordenados por fontes chaveadas, a fim de alcançar maior eficiência no consumo de energia.

A partir da integração das diferentes técnicas de controle examinadas, aplicadas pelo MGCC e por cada tipo de CL, é possível desenvolver sistemas de controle e supervisão suficientemente confiáveis, robustos e eficientes.

É importante ressaltar que devido a não existência de potência reativa em circuitos CC, a regulação de tensão no barramento da MR é realizada basicamente por meio do controle do fluxo de potência ativa, simplificando sua implementação - em contraposição aos métodos para circuitos CA. Entretanto, como em qualquer sistema elétrico de potência, é indispensável e intrínseca à análise sobre os pontos de vista da estabilidade e, complementarmente, da proteção.

3.7 Proteção

Diferentemente dos sistemas elétricos com GC em CA, cuja estrutura de proteção é mais madura e composta majoritariamente por dispositivos eletromecânicos, em sistemas CC, especialmente microrredes, os métodos de proteção ainda estão pouco consolidados.

Levando em consideração que uma MR pode ser composta por unidades variadas de GD, SA e cargas, e que devido às suas características elétricas singulares exigem conversores próprios para realizar a interface com a rede, a análise de estabilidade neste tipo de sistema se torna fundamental. Além da alta densidade de componentes eletrônicos, o chaveamento em alta frequência dos conversores estáticos pode interferir nos sinais de controle de outros conversores e instrumentos adotados, como sensores e DSP's (FERREIRA, 2012). Por se tratar de circuitos eletrônicos de controle, os sinais são pequenos (baixa magnitude) e conduzidos normalmente por trilhas finas, longas e com isolamento limitado, o que aumenta a susceptibilidade à interferência de ruídos externos.

Para garantir que estes sistemas no caso de instabilidade, não causem danos a pessoas e equipamentos, é essencial a implementação de esquemas robustos de segurança. Mesmo não sendo tão difundidos como em redes CA, existem estudos sobre o tema para redes CC, mas direcionados, sobretudo, à HVDC (SALOMONSSON *et al.*, 2009).

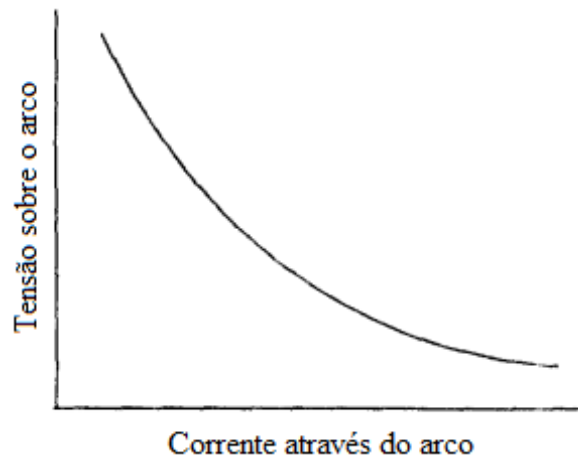
Em eventuais condições de sobretensão ou sobrecorrente no decorrer de operação da microrrede, uma das principais questões a ser solucionada é referente à circulação de correntes de curto-circuito. Em circuitos CA, o nível de corrente de c.c. é limitado aos níveis das tensões auto induzidas. Por conterem muitos elementos indutivos, como transformadores, estes valores de tensão são relativamente altos, causando uma efetiva limitação da magnitude da corrente de c.c. (PELLIS, 1997).

Assim sendo, faz-se necessário o emprego de dispositivos que interrompam a passagem da corrente através do circuito elétrico – como os disjuntores, ou do inglês, *circuit breakers* (CB). Para ambos os casos, CC e CA, quando esta interrupção ocorre, a energia armazenada no circuito é expressa na forma de um arco elétrico. A ocorrência deste fenômeno pode causar explosões e, dependendo de sua magnitude, gerar acidentes envolvendo pessoas e outros materiais. Cabe

aos dispositivos de proteção, cada qual com seu mecanismo específico, controlar e eliminar o arco elétrico, interrompendo o circuito elétrico.

A relação entre corrente e tensão sobre este fenômeno é ilustrada na forma de uma curva de resistência diferencial negativa, conforme se verifica na Figura 18.

Figura 18 - Relação V x I em um arco elétrico.

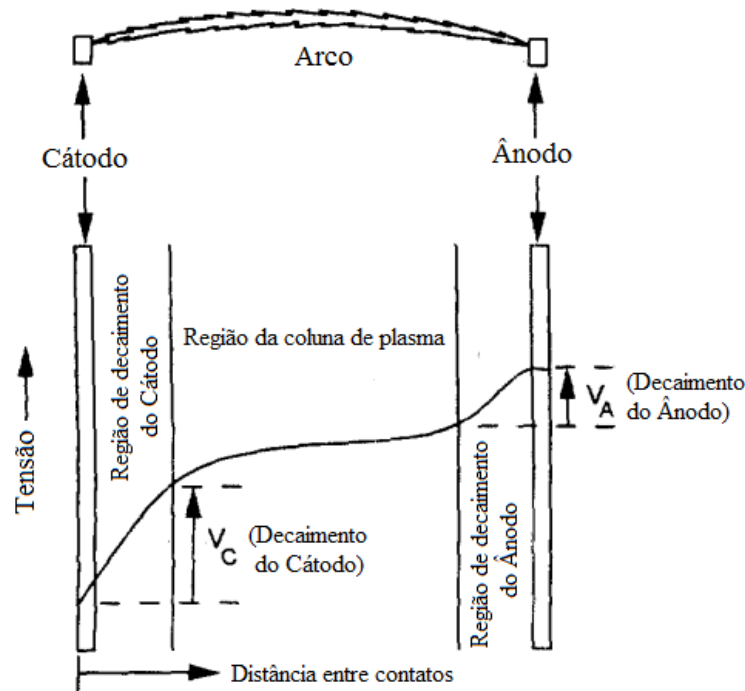


Fonte: Adaptado de Gregory (1995, p. 653).

De maneira geral, para eliminar o arco elétrico, segundo Gregory (1995), é necessário elevar o nível de tensão sobre o ponto de abertura do interruptor e reduzir a temperatura da região de plasma (ilustrado na Figura 19), diminuindo assim sua taxa de condutividade ao ponto em que se torne instável e não conduza mais eletricidade.

A utilização de placas de aço empilhadas ainda é a técnica mais encontrada em equipamentos de interrupção de circuitos em baixa tensão (GREGORY, 1995). Em pesquisas mais atuais, como Postiglione (2001), Nilsson (2005), Salomonsson *et al.* (2009), entre outras, também é mencionado o método que consiste em forçar o arco para dentro das pilhas de placas metálicas (*metal plate arc stack*). Isso pode ocorrer de diferentes formas: a) pela força magnética de Lorentz presente na interação entre a corrente elétrica do arco e as placas de aço; b) pela força magnética de Lorentz entre parcelas da corrente elétrica que circula no próprio CB e a corrente do arco; ou c) pela pressão decorrente do aquecimento dos materiais presentes na câmara onde é formado o arco elétrico.

Figura 19 - Características de um arco elétrico.



Fonte: Adaptado de Gregory (1995, p. 653).

Resumidamente, a pilha de placas metálicas serve para separar e aprisionar o arco em arcos menores, dispondo-os em série. A tensão resultante sobre os arcos em série aumenta, enquanto que as superfícies metálicas absorvem o calor gerado pelo arco, reduzindo a temperatura e o grau de ionização do mesmo. Sob condições apropriadas de separação e esfriamento, o arco elétrico se torna instável e é eliminado. Ainda em concordância com Gregory (1995), enquanto a separação entre as placas for dielectricamente suficiente e a temperatura for baixa o necessário para deionizar a câmara, o arco não irá ser novamente gerado e a interrupção do circuito é alcançada por completo.

Os equipamentos de proteção mais comuns voltados às redes CC em BT são: fusíveis, interruptores de circuito de caixa moldada (MCCB – *Molded Case Circuit Breaker*), interruptores de circuito de potência para baixa tensão e interruptores de circuito de caixa isolada. Os MCCB's são os que melhor se adequam em aplicações residenciais, já que são aptos a operar em faixas entre 10 – 2.500 A e até 600 Vcc (valores nominais para sistemas em corrente contínua) (GREGORY, 1995).

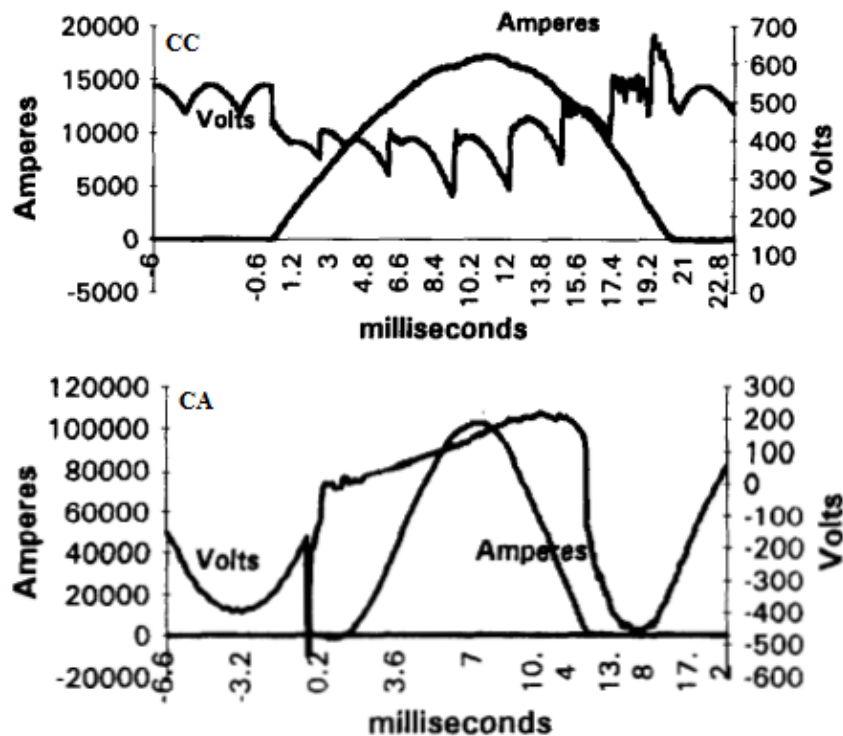
Há também alternativas com métodos eletrônicos de interrupção, como o caso dos tiristores, com maior capacidade e velocidade de interrupção - apesar de maiores perdas energéticas - e dos relés de proteção, que se utilizam dos dados de

sensoriamento da tensão e corrente elétrica da rede e da comunicação com outras unidades de proteção e controle (SALOMONSSON *et al.*, 2009).

Postiglione (2001) e Salomonsson *et al.* (2009), autores já relacionados na bibliografia levantada sobre este tema, consideram que muitos dos equipamentos de proteção dimensionados para sistemas em CA – amplamente ofertados no mercado - poderiam ser adotados em sistemas CC, tomadas as devidas precauções com as faixas de operação - em CC, os valores nominais de tensão e corrente são $\sqrt{2}$ vezes maiores que em CA.

O tempo de resposta é outro fator crítico nesta análise. Quanto mais tempo durar a falta, mais energia é transmitida para o ponto de interrupção e maior a temperatura na região de plasma do arco, o que torna o processo de resfriamento mais difícil e longo. Sob condições semelhantes, aparelhos de proteção em CA tem capacidade de reagir aos níveis de corrente no circuito elétrico, separar os contatos e extinguir o arco com mais rapidez que em CC. É possível verificar na Figura 20 o caso em que, para características elétricas semelhantes, um circuito CC e outro CA são submetidos à passagem de uma corrente c.c.

Figura 20 - Interrupção de sistemas similares em CC e CA, com MCCB - 1000A.



Fonte: Adaptado de Gregory (1995, p. 654 - 655).

Dispondo de MCCB com mesma faixa de operação, o tempo para efetuar a interrupção no circuito CC durou cerca de 21 ms (milissegundos) contra apenas 8 ms de seu equivalente em CA. Em Gregory (1995), isto sucede devido a dois motivos principais: a) as constantes de tempo envolvidas em circuitos CC são normalmente maiores, com elevado tempo de subida da corrente de falha; e b) o fato de que sinais senoidais cruzam o nível de zero naturalmente infere que neste momento, o grau de ionização e temperatura na câmara onde ocorre o arco elétrico seja mínimo, facilitando assim sua extinção.

3.8 Conclusões do Capítulo

A análise realizada neste capítulo revela o estado da arte no qual se encontram a tecnologia e os conceitos envolvidos especialmente em microrredes CC. Ademais, dando continuidade à avaliação comparativa entre sistemas elétricos de potência em CC e CA, foi possível constatar segundo a bibliografia levantada, outras vantagens e desvantagens referentes à adoção de modelos operando em corrente contínua.

Em se tratando de eficiência de transmissão, meios de geração, armazenamento e conversão de energia elétrica, as tecnologias em CC têm se apresentado tecnicamente atrativas. Ainda que as redes CA, principalmente com GC, proporcionem maior robustez e segurança no que diz respeito aos serviços de controle e proteção - parâmetros de fundamental importância - a expressiva evolução de pesquisa e desenvolvimento em torno das microrredes, proponentes de um sistema autônomo e distribuído (descentralizado), aponta para uma potencial alteração estrutural no setor elétrico.

Os sucessivos capítulos referem-se à apresentação gráfica e descritiva do modelo proposto, resultado desta pesquisa, seguida de análise do fluxo de potência previsto para diferentes cenários de operação da MR CC.

4 APRESENTAÇÃO DO MODELO DE MICRORREDE CC

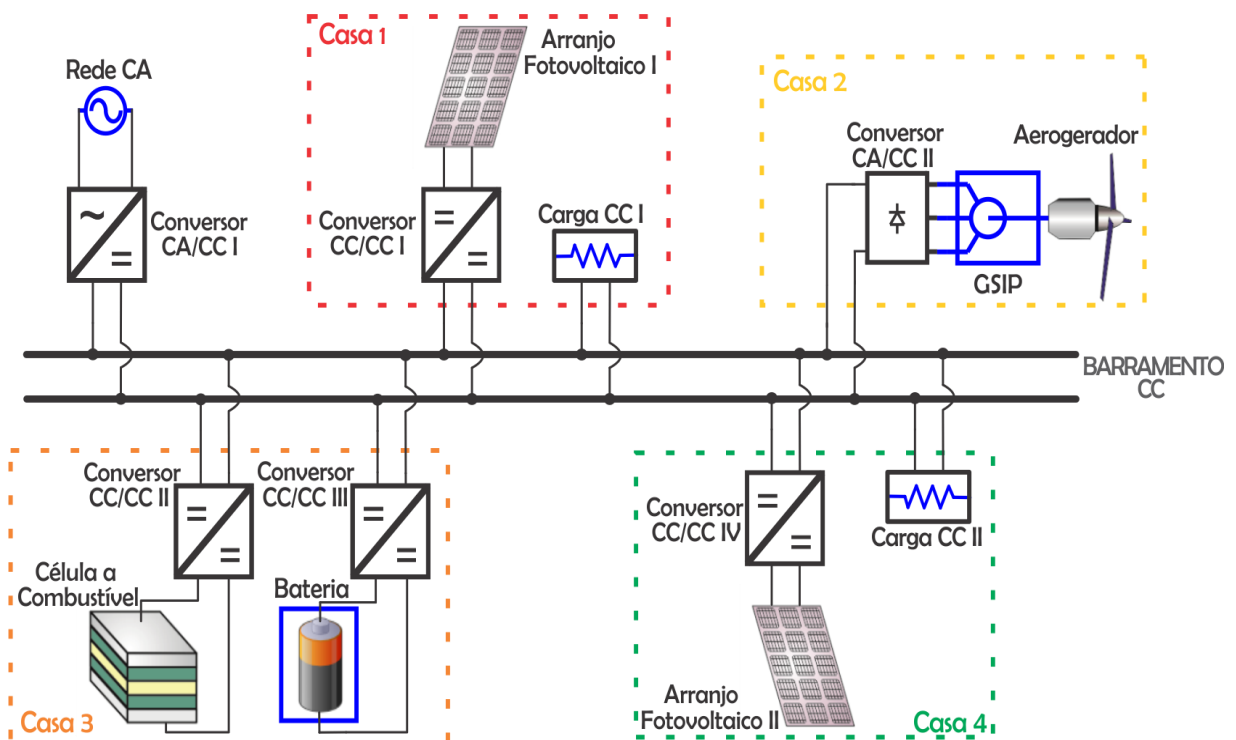
A partir do cenário energético atual e dos principais tipos de tecnologia de microgeração e SA disponíveis, propõe-se um modelo de microrrede CC, apto a operar em modo isolado ou conectado à rede convencional, via conversor CA/CC de fluxo bidirecional.

Previamente ao estudo perante o fluxo de potência na MR, é apresentada uma breve descrição da configuração do modelo proposto e de seus elementos constituintes.

4.1 Descrição do Sistema

Como se ilustra na Figura 21, quatro residências compõem a microrrede operando em corrente contínua, cada qual com sua especificidade de geração, armazenamento e carga. Esta composição tem o objetivo de fornecer energia ininterruptamente às cargas CC, presentes nas casas 1 e 4.

Figura 21 - Modelo de MR CC proposto.



Fonte: Autoria própria (2018).

A casa 1 consiste de um arranjo fotovoltaico conectado à rede por intermédio de um conversor CC/CC *boost* (elevador) e uma carga com resistência linear (carga CC I). O conversor controla a tensão de saída do gerador segundo método de rastreamento de máxima potência (MPPT). A casa 4 apresenta composição equivalente.

Já a casa 2 é formada por uma microturbina eólica acoplada diretamente a um gerador síncrono de imã permanente (GSIP) - Figura 21. A energia produzida é transmitida através do conversor CA/CC II, composto por dois estágios. O primeiro, um retificador não controlado, garante a retificação do sinal trifásico senoidal gerado, e o segundo, um conversor CC/CC *boost*, ajusta o nível de tensão e corrente injetada no barramento, conforme método de MPPT.

A energia produzida na casa 3 provém de uma célula a combustível com membrana para troca de prótons (PEMFC) intermediada pelo conversor CC/CC II (*boost*). Para suprir ou absorver a potência durante os regimes transitórios e proporcionar maior autonomia da MR, foi incluída uma bateria de íon-lítio, conectada à rede mediante o conversor CC/CC III, com fluxo bidirecional de corrente.

4.1.1 Célula a Combustível

De maneira geral, as células a combustível produzem energia elétrica em CC mediante a associação por processo catalítico entre dois reagentes primários - hidrogênio e oxigênio. Dentre as tecnologias disponíveis, a célula a combustível com membrana para troca de prótons (PEMFC), selecionada para compor este trabalho, tem sido empregada em sistemas de baixa potência, como no setor automotivo, dispositivos portáteis e residências com consumo abaixo de 10 kW (LORA; HADDAD, 2006, p. 52-53). Sharma e Mishra (2017, p.526), ainda mencionam a alta confiabilidade da tecnologia no fornecimento de potência durante regime estacionário. Correspondente aos processos internos (eletroquímico e termodinâmico), a PEMFC apresenta, entretanto, lenta resposta durante transientes - condição frequente em sistemas com geração intermitente - podendo afetar o desempenho da microrrede.

Para compor o sistema da casa 3 (Figura 21), optou-se por uma PEMFC modelo Gensure E-1000X, fabricado pela PLUG POWER INC. com capacidade nominal de 1000 W e tensão de saída em 48V.

4.1.2 Bateria

Elemento chave para a expansão dos sistemas distribuídos de geração e transmissão de energia elétrica, as baterias ainda requerem muita pesquisa e desenvolvimento para se tornarem praticáveis e amplamente comercializadas.

Os parâmetros de destaque deste tipo de SA, essenciais para a definição das estratégias de controle, são: capacidade de fornecer energia, em Ah (*ampères-hora*); estado de carga (*State of Charge – SoC*), referente a capacidade disponível em relação à nominal e; taxa de descarga, que relaciona a corrente de descarga de uma bateria e a sua capacidade nominal, por determinado período de tempo. Segundo Dizqah *et. al* (2015, p. 2279), a conexão das baterias em uma rede CC via conversores CC/CC pode facilitar a implementação de regimes controlados de carga e descarga, apesar de maiores perdas.

A despeito do elevado custo atual de mercado, estima-se que as baterias de íon-lítio, com alto grau de eficiência e densidade energética e amplamente presentes em dispositivos eletrônicos de pequeno porte, tornar-se-ão financeiramente atrativas para aplicações residenciais e comerciais envolvendo MG e MR's (FERREIRA, 2012).

Vale apontar, que em situações envolvendo microrredes isoladas, localizadas muitas vezes em áreas de difícil ou nenhum acesso ao SIN, o correto dimensionamento do SA é crucial para que se mantenha a confiabilidade de operação da rede sem recorrer a fontes não renováveis (*e.g.* gerador a diesel).

4.1.3 Arranjo Fotovoltaico

Com grande destaque no setor de fontes renováveis alternativas devido aos incentivos governamentais, baixo impacto ambiental e fácil instalação, as células fotovoltaicas, ou arranjos/painéis fotovoltaicos (PFV), como são comercializadas, sinalizam uma participação significativa na matriz energética global, principalmente no Brasil. Correlato às microrredes CC existe um interesse especial, já que necessitam de estágio único de conversão para serem conectadas.

Em se tratando de uma fonte intermitente de energia, influenciada por fatores externos como incidência solar e temperatura, o emprego de mecanismos de controle confiáveis e robustos é de essencial importância, seja para a transmissão

em redes CA - como ocorre na maioria das aplicações atuais - ou seja esta em redes CC – qual é o caso deste estudo.

Os arranjos fotovoltaicos I e II, identificados respectivamente nas casas 1 e 4 (Figura 21), são semelhantes e constituídos cada qual por 2 módulos CS6K 285-P em série. O modelo é fabricado com tecnologia PERC (*passivated emitter rear cell*) policristalina, pela empresa CANADIAN SOLAR INC. Cada módulo dispõe de potência máxima nominal de 210 W e tensão para máxima potência de 28,9 V.

4.1.4 Aerogerador

Similar à geração solar, a geração eólica tem um forte destaque atualmente como fonte renovável alternativa principalmente no Brasil, em regiões de grande potencial eólico, e.g. nordeste (LORA; HADDAD, 2006).

Além dos parâmetros de operação inerentes, os sistemas com geração eólica sofrem influência de fatores externos como a intensidade dos ventos, tornando-os fontes intermitentes de potência. Em razão disso, haja vista os sistemas de controle em PFV's, requerem a implementação de estágios adequados de processamento da energia gerada. Em Dizqah *et. al* (2015, p. 2279), a operação de uma microturbina eólica com velocidade variável aumenta a flexibilidade e qualidade no seu gerenciamento de energia, como em métodos de controle MPPT. Os autores ainda assumem que o acoplamento da microturbina diretamente ao gerador é mais eficiente e confiável, além de que o GSIP, padrão dominante no mercado, proporciona ainda maior eficiência na transformação da energia cinética dos ventos em eletricidade.

No que concerne os sistemas de microgeração, se enquadram aerogeradores classificados como de pequeno porte. Estes se caracterizam normalmente por gerar potência de até 10 kW e conterem um rotor com três pás, eixo horizontal e diâmetro entre um e dez metros (COELHO, 2013, p. 114).

Neste estudo, optou-se pelo aerogerador Airdolphin GTO, modelo Z-1000-250, fabricado pela ZEPHYR CORPORATION. O equipamento, com rotor de três pás e eixo horizontal, é construído para gerar uma potência contínua de 1,1 kW quando a velocidade do vento é de 12,5 m/s (metros por segundo), e 742 W para vento com 11 m/s.

4.1.5 Interface com a Rede CA

Para regular a corrente de saída e a tensão no barramento CC quando a MR esteja conectada com a rede CA monofásica de 127 Vca, é utilizado o conversor CA/CC I (Figura 21). Como a proposta do sistema é a de suprir ininterruptamente as cargas, recorrendo às unidades de MG locais ou mesmo à rede CA, o conversor deve ter controle de fluxo bidirecional, permitindo também o despacho de excedente gerado pela MR. Frequentemente adota-se neste tipo de aplicação um conversor CA/CC em ponte completa com modulação por largura de pulso (PWM – *Pulse Width Modulation*) (COELHO, 2013, p. 176).

4.1.6 Cargas

Um dos argumentos pertinentes para a manutenção da predominância de sistemas CA no setor elétrico é o de que hoje, a maior parte dos equipamentos fabricados no mercado é alimentada em CA. Entretanto, em menção a Ferreira (2012, p. 63), cargas resistivas projetadas inicialmente para operação em CA podem ser conectadas a um barramento CC diretamente, se este possuir nível de tensão condizente com a tensão eficaz nominal das cargas, ou via estágios de processamento de energia, como os conversores.

Para facilitar a análise sobre os possíveis modos de operação da MR proposta, as cargas aqui projetadas, por simplificação, são consideradas resistências lineares simples, podendo ser conectadas diretamente ao barramento de 380 Vcc. A carga CC I apresenta consumo de 1 kW, enquanto que a carga CC II consome 1,5 kW.

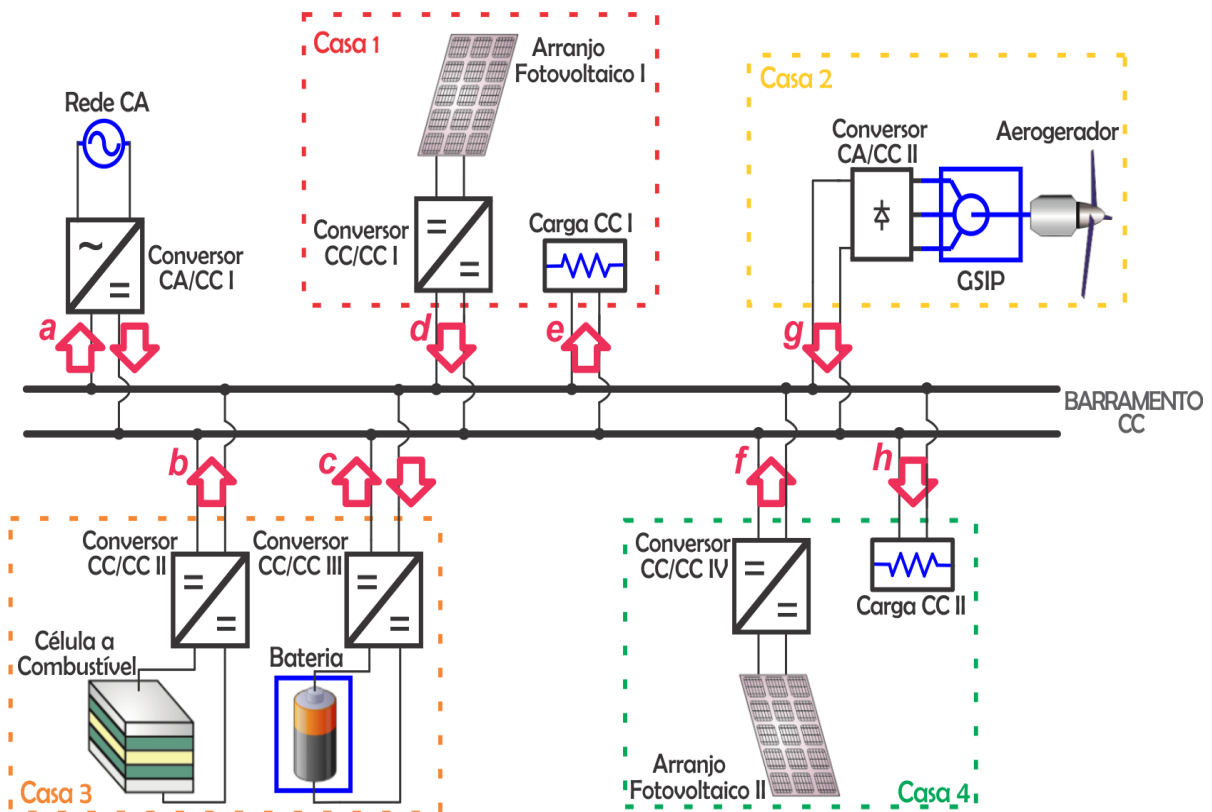
Postas as especificações básicas do modelo proposto, segue o estudo perante as condições de operação da MR, em função da energia gerada pelas unidades de GD, capacidade do SA e consumo das cargas.

4.2 Análise do Fluxo de Potência

Esta seção discute os possíveis cenários de transferência de potência entre os elementos da MR CC. O fluxo de potência previsto para cada elemento da rede é registrado na Figura 22. Como mencionado no subcapítulo anterior, os conversores

CA/CC I e CC/CC III operam com fluxo bidirecional, representados respectivamente pelos itens *a* e *c*. As letras *b*, *d*, *f* e *g* referem-se ao fluxo através dos conversores responsáveis por injetar potência na rede, associados nesta ordem à PEMFC, ao PFV I e II e ao aerogerador. Por fim, capazes apenas de drenar energia da rede, estão as cargas CC I e II, com seu fluxo de potência ilustrado pelas letras *e* e *h*.

Figura 22 – Diagrama de blocos do fluxo de potência na MR CC proposta.



Fonte: Autoria própria (2018).

Parte-se das premissas de que as cargas, enquanto ativas no barramento, são ininterruptamente alimentadas e, no caso de geração excedente, a energia é despachada via rede CA.

Visto que está além do escopo deste trabalho levantar as estratégias de controle dos conversores mencionados, para fins teóricos, os mesmos possuem rendimento unitário. Sendo assim, de modo a garantir a estabilidade estática do sistema, considera-se que a potência gerada na MR é sempre equivalente à consumida acrescentada das perdas. Logo, assume-se a equação (25),

$$\pm P_{CA} + P_{FC} \pm P_{BAT} + P_{PFVI} - P_{CI} + P_{PFVII} + P_{GSIP} - P_{CII} = 0 \quad (25)$$

em que,

- P_{CA} – potência fornecida ou absorvida pela rede CA convencional;
- P_{FC} – potência fornecida pela PEMFC;
- P_{BAT} – potência fornecida ou armazenada pela/na bateria;
- P_{PFVI} – potência fornecida pelo arranjo fotovoltaico I;
- P_{CI} – potência consumida pela carga CC I;
- P_{PFVII} – potência fornecida pelo arranjo fotovoltaico II;
- P_{GSIP} – potência fornecida pelo GSIP, acoplado ao aerogerador;
- P_{CII} – potência consumida pela carga CC II.

A partir do exposto, entende-se que as condições de fluxo de potência na MR são baseadas algebricamente nas diferentes formas de escrever a equação (25).

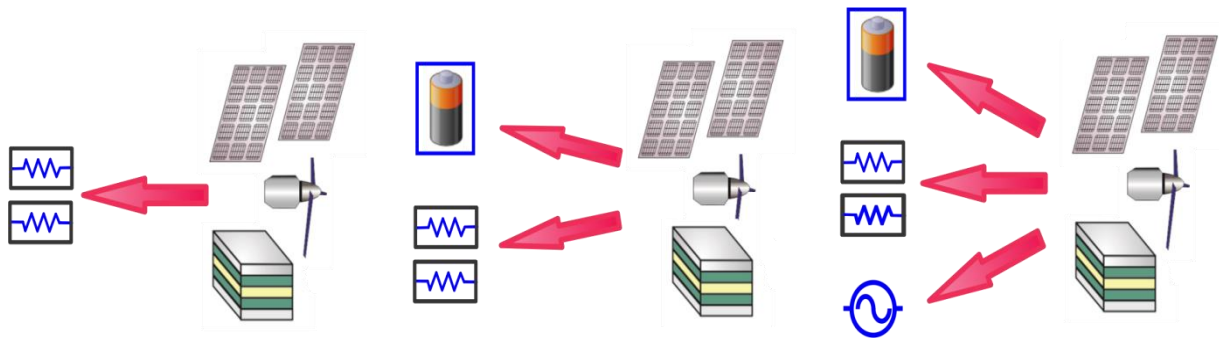
Basicamente, o circuito se encontrará em três cenários distintos. É certa a existência de diversos casos específicos, haja vista a intermitência na disponibilidade da energia gerada, o estado de carga do SA e o consumo das cargas CC, sendo então discutidos apenas alguns deles.

Em um primeiro cenário, os arranjos fotovoltaicos I e II, o aerogerador e a PEMFC geram energia suficiente para suprir a necessidade das cargas, na sequência, carregar a bateria e ainda transmitir quantidade excedente ao barramento CA. É possível verificar na equivalência (26) que o balanço de potência segue satisfeito.

$$P_{FC} + P_{PFVI} + P_{PFVII} + P_{GSIP} = P_{CI} + P_{CII} + P_{CA} + P_{BAT} \quad (26)$$

A Figura 23 apresenta os três casos mencionados para este cenário otimista de geração na MR. Outros possíveis casos podem assumir, por exemplo, o desligamento momentâneo de uma das cargas CC ou também a desconexão da bateria devido ao seu completo carregamento. É importante destacar que a utilização da bateria, se carregada, é necessária apenas para os casos em que a geração renovável é insuficiente, como discutido a seguir.

Figura 23 – Casos de operação do cenário 1 da MR CC.



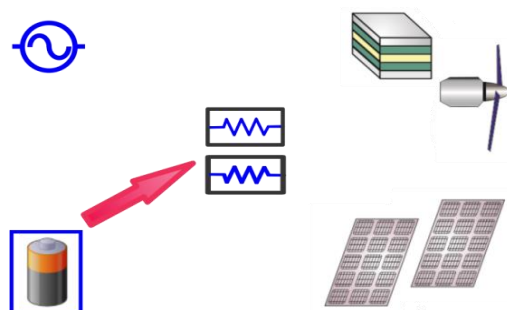
Fonte: Autoria própria (2018).

O segundo cenário imputa que a geração proveniente das unidades de MG é nula ou insuficiente para as cargas, sendo estas supridas pelo SA, tão somente enquanto seu nível de carregamento estiver dentro dos limites aceitos – definidos na estratégia de controle do conversor CC/CC III. Tem-se a equação (27) para expressar algebricamente o balanceamento da potência no circuito elétrico, seguida da Figura 24 ilustrando o cenário, aqui apresentado com caso único.

$$P_{BAT} = P_{CI} + P_{CII} \quad (27)$$

Naturalmente, em qualquer microrrede, este cenário pode se perdurar por um período determinado de tempo, cabendo aos projetistas o correto dimensionamento do SA, de modo a obter a melhor previsão de duração deste tipo de caso, conciliando custos e demanda.

Figura 24 – Caso de operação do cenário 2 da MR CC.



Fonte: Autoria própria (2018).

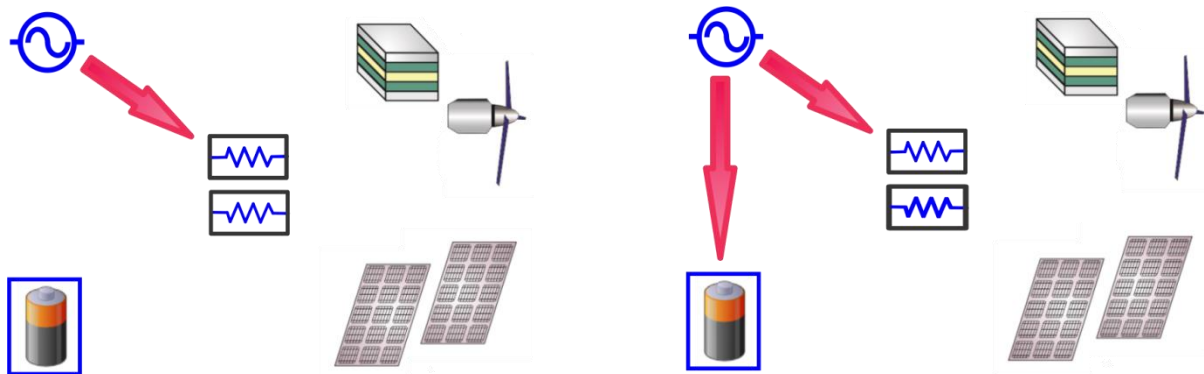
Por fim, o terceiro e último cenário em discussão refere-se à situação em que a MR não tenha capacidade de fornecer potência às cargas por seus próprios meios

(MG e SA), sendo necessária a conexão com a rede CA e implicando ao conversor CA/CC I o controle da tensão no barramento. Considera-se o caso no qual apenas as cargas estão sendo alimentadas e outro em que é realizado também o carregamento da bateria - até que esta possa assumir a regulação da tensão no barramento e injetar a potência demandada (Cenário 2). Em (28) constata-se que o balanceamento de potência previsto segue satisfeito.

$$P_{CA} = P_{CI} + P_{CII} + P_{BAT} \quad (28)$$

De mesma forma, a Figura 25 ilustra os casos abordados.

Figura 25 - Casos de operação do cenário 3 da MR CC



Fonte: Autoria própria (2018).

Para este último cenário, a conexão com a rede CA é mantida somente durante o tempo em que as unidades de MG ou SA não possam fornecer a energia requisitada pelas cargas. Assim como no primeiro cenário descrito, ainda que de grande importância para a estabilidade da MR, a conexão com a rede CA é realizada somente em última instância, permitindo uma maior autonomia à rede.

4.3 Conclusões do Capítulo

O quarto capítulo teve por objetivo ilustrar e identificar os elementos componentes da microrrede CC proposta, descrevendo brevemente seus contextos de aplicação e funcionalidades. Na sequência, foi apresentada análise sob a perspectiva dos possíveis cenários e casos de operação da MR, com base no fluxo de potência previsto para alimentar ininterruptamente as cargas.

Logo, percebe-se uma grande gama de possibilidades para a concepção de modelos como este, com diferentes tecnologias de GD e SA, proporções de consumo, topologias, estratégias de controle (local e/ou centralizada), níveis de tensão, sistemas de proteção, *etc.*

É certo que o modelo exposto não trata de fatores econômicos tampouco discute o estado de regulamentação vigente do setor elétrico. Entretanto, é possível prever uma mudança de paradigma substancial dentro do setor, já que se trata de um diferente conceito de mercado livre de energia, em que distintos prosumidores (termo para consumidores que produzam a própria energia) sejam capazes de formar a própria microrrede, reduzindo ou até anulando a participação das concessionárias na tarifação da energia elétrica gerada, distribuída e consumida.

O próximo e último capítulo discorre sobre essas e outras questões expostas até então, formando as considerações finais da pesquisa realizada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Etapa inicial do estudo relativo às microrredes CC, esta pesquisa proporcionou uma compreensão fundamental e técnica, ainda que teórica, sobre os principais elementos que compõem estes tipos de sistemas elétricos de potência, postos aqui, como promissoras alternativas para o setor elétrico. Foram apresentadas análises comparativas buscando elucidar as vantagens e desvantagens entre modelos baseados em CC e CA. Além dos aspectos históricos, significativamente influenciados por fatores econômicos e tecnológicos, se expuseram reflexões de perspectiva física matemática da natureza dos sinais elétricos, estritamente relacionada à capacidade de transferir potência em cada um dos sistemas avaliados.

Conforme o expressivo desenvolvimento tecnológico das últimas décadas, principalmente na área de eletrônica de potência, é conferido aos modelos CC vantagens desde a eficiência na transmissão e conversão de energia elétrica, assim como na variedade e acessibilidade aos meios de geração distribuída com fontes renováveis alternativas e uso de sistemas de armazenamento. No entanto, em se tratando especialmente das MR's CC, os sistemas de controle desenvolvidos até o momento exigem melhores níveis de confiabilidade e robustez, se comparados aos modelos em operação CA - mais maduros e baseados em dispositivos eletromecânicos. Outras desvantagens quanto às redes CC se devem aos sistemas de proteção, de resposta mais lenta, e a menor durabilidade da estrutura de cabeamento, resultado do envelhecimento precoce dos cabos, discutido no capítulo 2.

Como resultado principal deste trabalho, foi concebido um modelo de microrrede CC, apto a conectar-se à rede CA em caso de geração excedente ou faltante. Complementar à ilustração gráfica da rede, foram descritos tecnicamente a configuração do modelo proposto e seus elementos constituintes - unidades de MG, SA e cargas. Ademais, foi realizado estudo perante o fluxo de potência previsto para os diferentes cenários de operação da MR, com o intuito de fornecer ininterruptamente potência às cargas.

A princípio, um dos objetivos específicos expostos no primeiro capítulo visava simular o circuito elétrico proposto em ambiente computacional. Apesar dos esforços em pesquisa, decidiu-se por não contemplar este item, devido à

complexidade enfrentada e falta de conhecimento no assunto, principalmente no que tange a modelagem matemática de sistemas de potência e estratégias de controle de conversores. Posto isto, vislumbra-se para trabalhos futuros um maior aprofundamento no tema, permitindo aproximação da realidade de simulação e posterior implementação de circuitos elétricos como estes.

Tendo em vista o grande potencial de ocorrer no setor elétrico uma transição efetiva para modelos de rede locais em CC, como o apresentado neste trabalho, com GD, SA e gradativo aumento de consumidores que gerem a própria energia, entende-se a necessidade de se especificar como serão as configurações elétricas dos subsistemas de consumo - residencial, comercial, etc. É possível presumir que durante esta transição gradual, haverá em uma residência, por exemplo, dois barramentos independentes para suprir o consumo energético. Sendo um para operação CA, alimentando as cargas CA via a rede CA convencional, e até mesmo por fontes de GD em CA (e.g. Aerogerador, gerador à biomassa/gás, entre outros) e o outro, fornecendo a energia proveniente do SA e das unidades de GD em CC às cargas CC.

Por fim, avalia-se que este modelo de rede pode ser implementado em condomínios residenciais, assim como conjuntos de vizinhos de uma mesma quadra habitacional, cooperativas e vilas remotas, com difícil acesso ao SIN. Seguindo uma perspectiva econômica em meio a esse contexto, pode-se atribuir às concessionárias a função de gerir, monitorar e fiscalizar as microrredes, oferecendo também serviços de suporte aos usuários. Vale ressaltar a importância do desenvolvimento destes tipos de sistemas descentralizados, locais e que se destinam a uma maior autonomia e autossuficiência em respeito a fatores sociais e ambientais.

REFERÊNCIAS

American Institute of Electrical Engineers (AIEE). General View of Power Development by the Niagara Falls Hydraulic Power and Manufacturing Company. The Niagara Falls Electrical Handbook: Being a Guide for Visitors. pág. 36. International Electrical Congress. Saint Louis, Estados Unidos. 1904.

ANEEL. **Cadernos Temáticos ANEEL: Micro e Minigeração Distribuída: Sistemas de Compensação de Energia Elétrica. 2ª Edição.** Brasília, 2016.

AGUSTONI, A; BORIOLO, E; BRENNAN, M; SIMIOLI, G; TIRONI, E; UBEZIO, G. LV DC Distribution Network With Distributed Energy Resources: Analysis Of Possible Structures. **18ª Conferência Internacional de Distribuição Elétrica.** Turin, Itália. p. 1-5. Junho, 2005.

BAHRMAN, Michael P. Overview of HVDC Transmission. **IEEE Power Systems Conference and Exposition.** Atlanta, USA. Fevereiro, 2006.

BOYLESTAD, Robert L. **Introdução à análise de circuitos.** 10ª Edição. Tradução José Lucimar do Nascimento; revisão técnica Antônio Pertence Júnior. São Paulo: Prentice Hall, 2004.

BRASIL. Decreto nº 7.246/2010, de 28 de julho de 2010. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil.** Casa Civil, Brasil, 2010.

Building Research Establishment (BRE). The Use Of Direct Current Output From PV Systems In Buildings. **ETSU S/P2/00373/REP.** Department Of Trade And Industry, Londres, 2002.

COELHO, Roberto Francisco. **Concepção, análise e implementação de uma microrrede interligada à rede elétrica para alimentação ininterrupta de cargas CC a partir de fontes renováveis.** 2013. 330 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

COPEL. **Norma Técnica Copel (NTC): Materiais de Distribuição – Especificação: Cabos de Cobre Multiplexados Autosustentados.** Janeiro, 2015.

DIMITRIS, A; TZIMAS, A; ROWLAND, M. Simon. Transition from AC to DC low voltage distribution networks. **IET Generation, Transmission & Distribution.** Manchester, UK. Vol. 9, n.12, p. 1391-1401, 2015.

DIZQAH, Arash M.; MAHERI, Alireza; BUSAWON, Krishna; KAMJOO, Azadeh. A Multivariable Optimal Energy Management Strategy for Standalone DC Microgrids. **IEEE Transactions On Power Systems.** Vol. 30, n. 5, p. 2278-2287, 2015.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **DEA 03/15: Projeção de demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2015-2024).** Rio de Janeiro, 2015.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **SISTEMAS ISOLADOS: Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados.** Rio de Janeiro, 2014.

FAIRLEY, P. dc versus ac: the second war of current has already begun. **IEEE Power and Energy Magazine.** Vol. 10, n. 6, p. 103-104, 2012.

FERREIRA, Rodrigo Arruda Felício. **Controle de microrredes CC baseado em droop adaptativo de tensão – simulação em tempo real com control-hardware-in-loop.** 2015. 264f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2012.

GREGORY, George D. Applying Low-Voltage Circuit Breakers in Direct Current Systems. **IEEE Transactions On Industry Applications.** Vol. 31, n. 4, p. 620-657, 1995.

HAMMERSTROM, D. J. AC Versus DC Distribution Systems: Did we get it right? **IEEE Power Engineering General Meeting.** Tampa, USA. pg. 1-5, 2007.

HOSSAIN, E; KABALCI, E; BAYINDIR, R; PEREZ, R. Microgrid testbeds around the world: State of art. **Journal Energy: Conversion and Management** **86**. p. 132-153, 2014.

*International Energy Agency (IEA). **Key World Energy Statistics 2017**. Paris, 2017.*

JAGANNATHAN, V. **Power Electronics: Devices and Circuits**. 2ª Edição. Prentice Hall of India Learning. Pvt. Limiteded, 2011.

LORA, Electo Eduardo Silva; HADDAD, Jamil. **Geração distribuída: aspectos tecnológicos, ambientais e institucionais**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2006.

LUIZ, Cicéli Martins. **Avaliação dos impactos da geração distribuída para proteção do sistema elétrico**. 2012. 151f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

MAKOWER, J; PERNICK, R; WILDER, C. **Clean Energy Trends 2008**. Clean Edge, 2008.

MICROGRIDS.EU. **Pilot Installation: Residential Area "Mannheim-Wallstadt", Germany, 2006**. Disponível em
<http://www.microgrids.eu/documents/061117_MMG_WPF_Mannheim.pdf>.

MOREIRA, Carlos Coelho Leal. **Identification and Development of MicroGrids: Emergency Control Procedures**. 2008. 279f. Tese (Doutorado em Engenharia e Filosofia), Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2008.

NILSSON, Daniel. **DC Distribution Systems**. 2005. 133f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Engenharia), Divisão de Engenharia de Eletrônica de Potência, Departamento de Energia e Meio Ambiente, Universidade de Tecnologia de Chalmers, 2005.

NOBRE, Felipe. **POWER SYSTEM: Experiencia en el Proyecto Rio Madeira (Brasi), HVDC +- 600 kV**. ABB Inc. Outubro, 2015. Disponível em <[http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/f4d3c43d5286db54c1257ee400711515/\\$file/ABB+Brasil+HVDC+Felipe+Nobre.pdf](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/f4d3c43d5286db54c1257ee400711515/$file/ABB+Brasil+HVDC+Felipe+Nobre.pdf)>.

Ofgem. **Factsheet: Electricity Distribution Loss Percentage by Distribution Network Operator (DNO) Area**. 2010. Disponível em <<https://www.ofgem.gov.uk/publications-and-updates/electricity-distribution-units-and-loss-percentages-summary>>.

OKA, Maurício Massazumi. **História da eletricidade**. 2000. Universidade de São Paulo, 2000.

PELLIS, J. **The DC Low-Voltage House**. 1997. 79f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica de Potência), Universidade Tecnológica de Eindhoven e Fundação Holandesa de Pesquisa em Energia (ECN), 1997.

PLANAS, E; ANDREU, J; GÁRATE, J; ALEGRÍA, I; IBARRA, E; AC and DC technology in microgrids: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 43. p. 726-749, 2015.

POSTIGLIONE, Giovanna. **DC Distribution System for Home and Office**. 2001. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Departamento de Engenharia Elétrica de Potência, Universidade de Chalmers, 2001.

REIS, Lineu Belico dos; SILVEIRA, Semida. **Energia Elétrica Para O Desenvolvimento Sustentável**. São Paulo: Editora USP, 2000.

RIBEIRO, Márcio Lunardelli. **Estratégia de Reposição de Serviço Utilizando Micro-Redes**. 2010. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores Major Energia), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.

RUFATO Júnior, Eloi. **Aplicação de Sistema Especialista para Localização de Defeitos em Redes de Distribuição**. 2015. 104f. Tese (Doutorado em Sistemas de Potência), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2015.

SALOMONSSON, Daniel; SÖDER, Lennart; SANNINO, Ambra. Protection of Low-Voltage DC Microgrids. **IEEE Transactions on Power Delivery**. Vol. 24, n. 3, p. 1045-1053, 2009.

SANNINO, A; POSTIGLIONE, G; BOLLEN, M. Feasibility of a DC Network for Commercial Facilities. **IEEE Transactions On Industry Applications**. Vol. 39, n. 5, p. 1499-1507, 2003.

SEVERINO, Mauro Moura; CAMARGO, Ivan Marques de Toledo; OLIVEIRA, Marco Aurélio Gonçalves de. Geração distribuída: discussão conceitual e nova definição. **Revista Brasileira de Energia**, Vol. 14, n. 1, p. 47-69, 2008.

SHARMA, Rishi Kant; MISHRA, Sukumar. Dynamic Power Management and Control of a PV PEM Fuel-Cell-Based Standalone ac/dc Microgrid Using Hybrid Energy Storage. **IEEE Transactions on Industry Applications**. Vol. 54, n. 1, p. 526-538, 2017.

STARKE, M; TOLBERT, L; OZPINECI, B. AC vs. DC Distribution: A Loss Comparison. **IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition**. Chicago, USA. p. 1-7, 2008.

TZIMAS, A; ANTONIOU, D; ROWLAND, M. Simon. Low voltage DC cable insulation challenges and opportunities. **IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena**. Manchester, UK. p. 696-699, 2012.

United Nations (UN). **Brundtland Report: "Our Common Future"**. Oslo, 1987.