

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

Poliana Silva

**ESTUDO DE COMPARTILHAMENTO DE CARGA ENTRE MÚLTIPLAS
FONTES RENOVÁVEIS COMPONDO UMA MICRORREDE CC**

Maracanaú, Ceará

2018

Poliana Silva

ESTUDO DE COMPARTILHAMENTO DE CARGA ENTRE MÚLTIPLAS FONTES
RENOVÁVEIS COMPONDO UMA MICRORREDE CC

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em energias renováveis. Área de concentração: Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Marques de Sá Medeiros

Maracanaú, Ceará

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário
Gláucio Barreto de Lima - CRB-3/995

S586 Silva, Poliana.

Estudo de compartilhamento de carga entre
múltiplas fontes renováveis compondo uma
microrrede CC / Poliana Silva -- 2018.
109 f.

Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) -
- Instituto Federal de Educação Ciência e
Tecnologia do Ceará, *Campus* Maracanaú, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Marques de Sá
Medeiros.

1. ENERGIA SOLAR. 2. ENERGIA EÓLICA.
3. CORRENTE CONTÍNUA. I. Título.

333.79

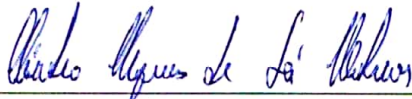
POLIANA SILVA

COMPARTILHAMENTO DE CARGA ENTRE MÚLTIPLAS FONTES RENOVÁVEIS
COMPONDO UMA MICRORREDE CC

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Energias Renováveis, área de concentração Energias Renováveis.

Aprovada em 27 / 09 / 2018.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Cláudio Marques de Sá Medeiros (Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE



Prof. Dr. René Pastor Torrico Bascopé
Universidade Federal do Ceará - UFC



Prof. Dr. José Renato de Brito Sousa
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

Dedico...

À minha família, meu bem mais precioso.

Ao meu pai João (in memoriam).

Agradecimentos

A Deus, autor da minha vida, por tornar tudo possível.

Aos meus pais João Francisco da Silva (*in memoriam*) e Maria de Nazareth Silva, pelo amor, cuidado, dedicação e empenho em me proporcionar não somente uma boa formação profissional, mas também humana. Agradeço a vocês pelo que sou e por cada pequena ou grande conquista na minha vida.

Aos meus irmãos Paula Maria da Silva e João Francisco da Silva Filho, exemplos nos quais sempre me espelhei, pelo apoio, compreensão, incentivo e afeto no decorrer dessa longa caminhada. Ao meu cunhado José Ivan Couto da Silva, pela amizade e pelo apoio de sempre.

A Maurilio de Lima Pereira, meu esposo, pelo amor que me dedica, pelo cuidado, carinho e por ter sido meu porto seguro nesse desafio que abraçamos juntos. Obrigada por sonhar meus sonhos e partilhar os seus comigo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER) pela oportunidade de realizar esse mestrado e ao Laboratório de Processamento de Energia (LPE) pelo suporte fornecido.

Ao professor Cláudio Marques de Sá Medeiros, pela disponibilidade em me acompanhar nessa jornada através de uma competente orientação, tornando possível a conclusão deste trabalho. Quero expressar o meu profundo reconhecimento e a minha admiração.

Aos professores José Renato de Brito Sousa e René Pastor Torrico Bascopé pela disponibilidade em participar da banca examinadora e pelas valiosas contribuições para este projeto.

Ao IF Sertão Pernambucano, por me permitir realizar essa qualificação. Aos amigos e colegas de trabalho, Francisco Jônatas Siqueira Coelho, Manuel Rangel Borges Neto, Marcos Antonio Andrade Silva e Rita de Cássia Barbosa da Silva, pelo apoio técnico e pessoal oferecidos.

Aos meus amigos do Laboratório de Processamento de Energia (LPE), em especial a Amanda Freitas, Andeferson Queiroz, Cláudio Pontes, Igor de Sousa, João Luiz, José Luis, Navar de Medeiros, Paulo Ernesto, Rogério Segundo e Victor Teixeira, pela ajuda técnica, pelas experiências compartilhadas e pela agradável convivência.

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos
não é senão uma gota de água no oceano. Mas,
o oceano seria menor se lhe faltasse uma gota
de água”*

(Madre Teresa de Calcutá)

Resumo

O presente trabalho apresenta o projeto e a implementação de uma microrrede em corrente contínua (CC) instalada no Laboratório de Processamento de Energia (LPE), no bloco de Eletrotécnica do IFCE - Campus Fortaleza. A citada microrrede é alimentada pelas fontes renováveis de energia solar fotovoltaica e eólica, que são conectadas ao barramento comum de carga, por meio de conversores *Boost* de alto ganho de tensão baseado na célula de comutação de três estados. A fonte solar fotovoltaica foi representada por dois painéis conectados em série, oferecendo uma tensão de saída de aproximadamente 60 V e potência nominal máxima de 540 W, para uma irradiância de 1000 W/m^2 . A fonte eólica, por sua vez, possui tensão de saída em torno de 52 V e potência máxima de 700 W. Ambas as tensões são elevadas através dos conversores *Boost*, de potência 1 kW, para 311 V. Essa tensão é aplicada a um banco de resistores com resistência de valores 320 Ω e 880 Ω . O controle por inclinação é proposto para realizar o compartilhamento proporcional de corrente de carga. Como não há quaisquer elementos de armazenamento, um algoritmo é utilizado para calcular as potências disponíveis em cada fonte através dos seus parâmetros de entrada, bem como a proporção de compartilhamento e gerar as referências de corrente, que são comparadas com as correntes reais de saída de cada conversor. Através do cálculo da resistência virtual, as tensões instantâneas de referência para cada conversor são ajustadas e a corrente de saída desejada é obtida. Uma estratégia mestre-escravo é adicionada ao controle por inclinação, que permite desativar o conversor definido como escravo, quando o mestre é capaz de suprir a potência demandada pela carga e reativá-lo quando a carga exigir maior potência. Entretanto, se houver falha na unidade mestre, o escravo é capaz de assumir a alimentação da microrrede. Os resultados experimentais comprovaram que a técnica proposta compartilha as correntes de carga proporcionalmente às potências das fontes de alimentação, apresentando um erro máximo de 3,99 %, além de realizar a desconexão das fontes em caso de sobrecorrente ou quando o conversor mestre é capaz de manter a carga totalmente.

Palavras-chaves: Compartilhamento de Carga; Conversores *Boost*; Corrente Contínua; Microrredes.

Abstract

The present work presents the design and the implementation of a direct current (DC) microrrede, installed in the Laboratory of Energy Processing (LPE), in the Electrotechnical block of the IFCE - Fortaleza Campus. The aforementioned microgrid is powered by the renewable sources solar photovoltaic and wind power, which are connected to the common load bus, through high voltage gain Boost converter based on three-state switching cell. The solar photovoltaic source was represented by two panels connected in series, offering an output voltage of approximately 60 V and a maximum nominal power of 540 W, at an irradiance of 1000 W / m². The wind source, in turn, has an output voltage of about 52 V and a maximum power of 700 W. Both voltages are raised through the Boost converters, from power 1 kW, to 311 V. This voltage is applied to a resistor bank with resistances values of 320 Ω and 880 Ω . The droop control is proposed to perform proportional load current sharing. As there are no storage elements, an algorithm is used to calculate the available powers at each source through its input parameters, as well as the sharing ratio and to generate the current references, which are compared with the actual output currents of each converter. Through calculation the virtual resistance, the instantaneous reference voltages for each converter are adjusted and the desired output current is obtained. A master-slave strategy is added to the droop control, which allows the slave converter to be deactivated when the master can supply the power demanded by the load and reactivate it when the load demands more power. However, if the master unit fails, the slave can take over the microgrid. The experimental results proved that the proposed technique shares load currents proportionally to the potency power supply, with a maximum error of 3,99 %, in addition to disconnecting the sources in case of overcurrent or when the master converter can support the load entirely.

Key-words: Boost Converters; Direct Current; Microgrids; Sharing Load.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Sistema elétrico de potência.	18
Figura 2 – Configuração atual do sistema elétrico brasileiro.	19
Figura 3 – Exemplo da estrutura de uma microrrede.	19
Figura 4 – Curva de carga e inclinação das tensões de saída para dois conversores em paralelo com resistências de linha diferentes.	25
Figura 5 – Conversor <i>Boost</i>	25
Figura 6 – Principais topologias de conversores <i>Boost</i>	27
Figura 7 – Topologia do conversor <i>Boost</i> de alto ganho de tensão baseado na célula de comutação de três estados.	29
Figura 8 – Esquema de conversores CC - CC em paralelo.	30
Figura 9 – Diagrama de blocos da microrrede CC proposta.	38
Figura 10 – Curvas I - V do painel fotovoltaico Canadian Solar 270P.	39
Figura 11 – Curvas P - I_{lin} e $V_{lin} - I_{lin}$	40
Figura 12 – Comportamento da tensão de saída e razão cíclica do conversor <i>Boost</i> com controle de tensão.	41
Figura 13 – Geradores em paralelo com $V1 = V2$ e $R1 = R2$	47
Figura 14 – Geradores em paralelo com $V1 \neq V2$ e $R1 = R2$	48
Figura 15 – Geradores em paralelo com $V1 = V2$ e $R1 \neq R2$	49
Figura 16 – Geradores em paralelo com $V1 \neq V2$ e $R1 \neq R2$, sendo $V1 < V2$ e $R1 > R2$	50
Figura 17 – Geradores em paralelo com $V1 \neq V2$ e $R1 \neq R2$, sendo $V1 < V2$ e $R1 < R2$	51
Figura 18 – Geradores em paralelo com $V1 \neq V2$ e $R_{linha_I} \neq R_{linha_II}$, sendo $V1 < V2$ e $R_{linha_I} < R_{linha_II}$	52
Figura 19 – Tensões de carga e de saída dos conversores.	53
Figura 20 – Compartilhamento de potência com uso de diodos.	54
Figura 21 – Compartilhamento de corrente de carga com uso de diodos.	55
Figura 22 – Compartilhamento de potência para $P1 = P2$	55
Figura 23 – Compartilhamento de corrente de carga para $P1 = P2$	56
Figura 24 – Compartilhamento de potência para $P1 \neq P2$	56
Figura 25 – Compartilhamento de corrente de carga para $P1 \neq P2$	57
Figura 26 – Compartilhamento de potência para $P1 > P_{carga}$	57
Figura 27 – Compartilhamento de corrente de carga para $P1 > P_{carga}$	58
Figura 28 – Fluxograma para ajuste das correntes compartilhadas.	60
Figura 29 – Ilustração dos componentes utilizados para aquisição de dados.	62
Figura 30 – Compartilhamento de corrente de carga, sendo $P-Solar = P-Eólica$	63

Figura 31 – Compartilhamento de corrente de carga proporcional para P-Solar $\neq$ P-Eólica.	64
Figura 32 – Perfil de vento.	65
Figura 33 – Compartilhamento com variação de potência.	66
Figura 34 – Compartilhamento de corrente para: P-Solar = 500 W e P-Eólica = 680 W.	66
Figura 35 – Compartilhamento de corrente para: P-Solar = 500 W e P-Eólica = 620 W.	67
Figura 36 – Compartilhamento de corrente para: P-Solar = 500 W e P-Eólica = 700 W.	68
Figura 37 – Compartilhamento de corrente para P-Solar = 500 W e P-Eólica = 680 W (quarto período de tempo).	69
Figura 38 – Saída da fonte eólica.	70
Figura 39 – Atuação da proteção contra sobrecorrente.	71

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	14
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivos Específicos	15
1.3	Artigo Publicado	15
1.4	Organização do Texto	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Microrredes	18
2.1.1	Microrredes CC	21
2.2	Conexões das Fontes de Energia às Microrredes	23
2.2.1	Conversores em Paralelo	24
2.3	Conversores da Família <i>Boost</i>	25
2.3.1	Topologias de Conversores <i>Boost</i>	26
2.3.2	Conversor <i>Boost</i> Baseado na Célula de Comutação de Três Estados . . .	28
2.4	Métodos de Compartilhamento de Carga	29
2.4.1	Controle por Inclinação (<i>Droop Control</i>)	30
2.4.2	Controle Mestre-Escravo	34
2.4.3	Controle Híbrido	36
2.5	Considerações Finais	37
3	MICRORREDE CC PROPOSTA	38
3.1	Fontes de Geração	38
3.2	Conversores <i>Boost</i>	40
3.3	Técnica de Compartilhamento Proposta	41
3.3.1	Compartilhamento Proporcional	42
3.3.2	Ajuste do Ganho de Inclinação	43
3.3.3	Conexão e Desconexão de Fonte	45
3.3.4	Proteções	45
3.4	Simulações Computacionais	46
3.4.1	Identificação do Comportamento Não Controlado	47
3.4.2	Simulações com a Técnica de Compartilhamento Proposta	54
3.5	Considerações Finais	58
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	59

4.1	Bancada Experimental	59
4.2	Aquisição de Dados	61
4.3	Compartilhamento Proporcional de Corrente de Carga	62
4.4	Compartilhamento Proporcional de Corrente de Carga com Variações na Potência da Fonte	64
4.5	Desconexão da Fonte Eólica	69
4.6	Atuação da Proteção contra Sobrecorrente	70
4.7	Considerações Finais	71
5	CONCLUSÕES	72
5.1	Trabalhos futuros	73
	REFERÊNCIAS	74
	APÊNDICE A – FOTOS	80
A.1	Conjunto representando a fonte eólica	80
A.2	Arranjo fotovoltaico.	80
A.3	Conversor <i>Boost</i> com controlador digital de tensão.	81
A.4	Microrrede CC desenvolvida.	81
A.5	Aba da interface remota.	82
	APÊNDICE B – CIRCUITO E PARÂMETROS UTILIZADOS	83
B.1	Esquema do circuito com dois conversores em paralelo	83
B.2	Parâmetros utilizados na simulação do conversor <i>Boost</i> de alto ganho de tensão	84
	APÊNDICE C – ROTINA DE PROGRAMAÇÃO	85
C.1	Rotina de programação para modelar o comportamento do mó- dulo fotovoltaico	85
C.2	Rotina de programação para realizar o compartilhamento de corrente de carga - Arduino 1	91
C.3	Rotina de programação para realizar o compartilhamento de corrente de carga - Arduino 2	100

1 Introdução

As discussões sobre corrente alternada versus corrente contínua normalmente relembram a guerra das correntes, um fato ocorrido no final do século XIX na cidade de Nova York, que influenciou fortemente a indústria da eletricidade e acabou por definir toda a infraestrutura elétrica mundial existente hoje. Thomas Edison defendia a adoção de corrente contínua (CC) e planejava que a eletricidade urbana funcionaria por um sistema de uma usina a cada poucos quarteirões. Por outro lado, Nikola Tesla e George Westinghouse eram defensores da corrente alternada (CA) e acreditavam em grandes usinas longe das cidades, transmitindo por muitos quilômetros uma alta tensão, que seria reduzida para uso residencial utilizando transformadores (MORTON, 2016).

A rede elétrica da época operava em CC, sistema padrão proposto por Thomas Edison. Contudo, a queda de tensão sobre os condutores era tão alta que as plantas geradoras podiam operar somente a 1 ou 2 km da carga. Além disso, não existia tecnologia confiável de baixo custo capaz de elevar o nível de tensão junto à fonte geradora, transmitir em tensão alta e reduzi-la para o nível de consumo na carga (TAHIM et al., 2015). Assim, o advento da corrente alternada resultou principalmente da necessidade de transportar grandes quantidades de energia, a partir de usinas geradoras centrais cada vez maiores, para centros de carga distantes (COLLIER, 2013). Associado a esse, outro ponto favorável para a corrente alternada é o fato de que as ondas de corrente e tensão passam por zero duas vezes a cada ciclo, tornando mais fácil a interrupção de correntes durante faltas.

Portanto, a facilidade de transmissão, transformação e interrupção da corrente alternada levaram Edison a ser derrotado pela superioridade tecnológica da transmissão de energia em CA (STRAMOSK et al., 2014) e desde então ela tem sido dominante. Entretanto, do século XIX para os dias atuais, o sistema elétrico, as cargas e o perfil dos consumidores finais mudaram.

O sistema elétrico atual traz à tona temas como geração distribuída, microrredes e fontes renováveis, mostrando a preocupação não apenas em suprir a demanda de energia elétrica, mas em buscar a maior eficiência possível e evitar impactos ambientais que comprometam as gerações futuras. Há hoje uma maior participação de fontes que geram energia em corrente contínua. Além disso, com o desenvolvimento da eletrônica de potência surgiram novas tecnologias, que vão desde conversores CC-CC com altos níveis de eficiência e confiabilidade, até equipamentos eletroeletrônicos dos mais diversos, cada vez mais utilizados pelos consumidores finais. Assim, as justificativas do século XIX não se mostram suficientemente fortes para manter a preferência pelas redes CA e é possível que a energia CC seja incorporada com maior participação no sistema elétrico atual. Entretanto, para

que essas redes possam se consolidar é necessária a superação dos desafios regulamentares, bem como o desenvolvimento de um mercado de energia elétrica que favoreça o seu desenvolvimento.

Diante do exposto, é proposta neste trabalho uma microrrede em CC alimentada pelas fontes renováveis de energia solar fotovoltaica e eólica, que serão conectadas ao barramento CC por meio de conversores da família *Boost*. O sistema não conta com dispositivos armazenadores de energia elétrica. Será usada uma técnica de controle de compartilhamento de carga que possui características dos dois métodos mais populares encontrados na literatura: Controle por inclinação e Controle mestre-escravo.

1.1 Justificativa

Os sistemas de energia elétrica em todo o mundo possuem a corrente alternada como base, no entanto as novas tecnologias e novos perfis de consumidores tem favorecido a adoção dos sistemas em corrente contínua. De acordo com Mackay et al. (2015), a presença e o consumo de cargas CC vem aumentando constantemente por causa dos números crescentes de dispositivos eletrônicos em prédios e casas. Segundo a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica - ABINEE (2018), a expectativa é que o consumo de eletrônicos continue crescendo. No Relatório Anual 2017, a previsão feita para o ano de 2018 é um crescimento de 7 % no faturamento e na produção de eletroeletrônicos em relação a 2017. Esse crescimento se deve especialmente às áreas de telecomunicações e informática, onde se destacam as vendas de *smartphones* (cerca de 48 milhões de unidades) e dos *notebooks* (3,5 milhões de unidades), no ano de 2017. Além desse aumento no consumo e produção de eletroeletrônicos, atualmente há uma necessidade de geração de energia limpa, dentro do regime de diversificação da matriz energética, o que levou à inclusão de fontes de energia próximo aos centros de consumo. A energia solar fotovoltaica é a que mais tem atraído a atenção dos investidores privados e consumidores e gera energia em CC. Essa fonte de energia tem crescido nos últimos anos e se mantém com boas perspectivas de crescimento. A projeção de mercado realizada através da Nota Técnica 0056/2017-SRD (“NT0056”), indica para o início de 2024 um total de 886.700 unidades consumidoras com geração distribuída solar fotovoltaica (ANEEL, 2017).

Nas circunstâncias onde o consumo de energia continua a crescer, ao mesmo tempo em que o sistema de energia elétrica tende a se tornar mais sustentável através da maior participação de fontes de energia renováveis, em especial a fonte solar fotovoltaica, a microgeração em conjunto com um sistema de microrrede CC se mostra como uma tendência para as futuras instalações residenciais, comerciais e industriais. Essa não é uma ideia nova, a corrente contínua é utilizada em sistemas como *data centers*, nos setores aeroespacial e de telecomunicações, além disso, também é usada na transmissão *high*

voltage direct current (HVDC). No Brasil temos, por exemplo, a Usina Hidrelétrica de Belo Monte, no Pará, o Elo CC da Itaipu, com uma extensão que segue de Foz do Iguaçu (PR) até Ibiuna (SP), e a Usina Hidrelétrica Jirau, em Rondônia, que utilizam a transmissão em CC. Contudo, ainda existem dificuldades relacionadas à regulamentação, normalização e desenvolvimento de dispositivos específicos, que impedem a ampliação da utilização da energia CC tanto na rede de distribuição atual, quanto no interior das instalações residenciais, comerciais e industriais. É necessária uma reavaliação dos padrões atuais do nosso sistema elétrico, contemplando aspectos técnicos, financeiros e ambientais, buscando desenvolver tecnologias para um melhor aproveitamento da energia em CC.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma microrrede em corrente contínua, alimentada pelas fontes eólica e solar fotovoltaica, que realize a distribuição das cargas proporcionalmente entre as fontes que alimentam o barramento comum, efetue a conexão ou desconexão delas à microrrede de acordo com a necessidade de carga, além de garantir o nível de tensão de saída especificado.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Definir as características da microrrede CC;
- Analisar questões associadas à conexão dos conversores eletrônicos à microrrede CC, para definir o método de compartilhamento de corrente de carga a ser aplicado;
- Desenvolver o algoritmo para gerenciamento da microrrede CC;
- Definir cenários de operação para avaliar a microrrede;
- Construir a microrrede CC;
- Avaliar o desempenho do sistema construído.

1.3 Artigo Publicado

- Publicação do artigo “A Promising Future To DC Power System: A Review” na Revista do IEEE América Latina (SILVA; MEDEIROS, 2017).

O artigo traz aspectos relacionados às redes de corrente contínua, procurando expor como o seu uso pode ser vantajoso. Com base na literatura recente, mostra que hoje, novas tecnologias e condições favorecem o uso desses sistemas, entretanto, que há

muitos desafios a serem superados para que a energia CC possa ser aproveitada ao máximo.

1.4 Organização do Texto

Este documento é estruturado em cinco capítulos. No Capítulo 2 são apresentados conceitos de microrredes, especialmente microrredes CC, mostrando algumas de suas aplicações, bem como as vantagens e desvantagens do fornecimento de energia elétrica em CC. Na sequência discorre-se sobre os conversores CC-CC, que são elementos essenciais para interligar os componentes das microrredes CC. O conversor *Boost* baseado na célula de comutação de três estados é apresentado com detalhes. Adicionalmente, apresenta-se uma revisão sobre os métodos populares de compartilhamento de corrente de carga para os conversores conectados em paralelo. No Capítulo 3 faz-se um detalhamento da microrrede proposta e das simulações que mostram a funcionalidade da técnica de compartilhamento de carga desenvolvida. No Capítulo 4 encontram-se informações referentes à bancada de testes, aquisição dos dados, além de serem apresentados e discutidos os resultados obtidos. Finalmente, no Capítulo 5, encontra-se a conclusão do projeto e as sugestões para trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

O crescente consumo de energia elétrica, as questões econômicas e ambientais relacionadas ao esgotamento dos recursos naturais e o constante desenvolvimento de novas tecnologias contribuíram para iniciar um processo de diversificação da matriz energética brasileira. Segundo o Boletim Mensal de Energia de Novembro de 2017, as fontes renováveis devem manter a participação acima de 80 % na Oferta Interna de Energia Elétrica deste ano, estimando que a energia hidráulica continue sendo a mais importante na matriz elétrica, respondendo por 65,1 % (BRASIL, 2017). Embora os números explicitem a predominância hídrica, a matriz vem apresentando um aumento expressivo de outras fontes renováveis, como a eólica e a solar fotovoltaica (FV).

De acordo com dados do Global Wind Energy Council (GWEC, 2018), entre janeiro e dezembro de 2017 o Brasil atingiu a 6ª posição no ranking mundial de expansão da capacidade instalada de geração eólica, com um crescimento de 2.022 MW. Em termos de capacidade acumulada de geração eólica, o país mantém sua posição de liderança na América Latina e ocupa a 8ª posição em relação ao mundo, com 12.763 MW acumulados. Quanto à geração de energia solar FV, segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2017), a capacidade de geração nos anos de 2015 e 2016 cresceu mais de 70 %.

As perspectivas a longo prazo para as fontes renováveis também são bastante positivas. O Plano Decenal de Expansão de Energia 2024 prevê a continuidade da forte presença das fontes renováveis na matriz energética brasileira, atingindo um percentual de 45,2 %. Para energia elétrica, as renováveis deverão representar aproximadamente 86 % na matriz de geração em 2024 (EPE, 2015).

A expansão das energias renováveis é uma das metas do Ministério de Minas e Energia. Em 2015, o Brasil assinou o compromisso internacional na 21ª Conferência das Partes (COP - Órgão supremo da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima) de aumentar a parcela de energias renováveis (além da energia hídrica) no fornecimento de energia elétrica para ao menos 23 % até 2030, inclusive pelo aumento da participação de eólica, biomassa e solar FV (CMMC, 2015). A expectativa é que os projetos de energia solar FV possam chegar a 25 gigawatts (GW) em potência instalada até 2030 (ABSOLAR, 2017), ao passo que a energia eólica deverá atingir o valor de 8 % em 2024, devido à expansão de 20 GW no período (EPE, 2015).

O destaque das fontes renováveis tem direcionado os sistemas elétricos de potência à geração próxima ao usuário final, abrindo espaço para o desenvolvimento das microrredes. Zhao e Dörfler (2015) afirmam que devido à sua compatibilidade com geração renovável

e distribuída, as microrredes são uma arquitetura operacional promissora para futuros sistemas de energia.

2.1 Microrredes

O sistema elétrico objetiva a geração, a transmissão e a distribuição da eletricidade até os consumidores finais. Ele é caracteristicamente composto por grandes usinas geradoras, que estão localizadas longe dos centros urbanos, e a energia gerada é transportada por meio de linhas de transmissão até os sistemas de distribuição, alimentando os consumidores finais. A estrutura convencional do sistema elétrico de potência pode ser vista na Figura 1.

Figura 1 – Sistema elétrico de potência.



Fonte: Lopes, Fernandes e Muchaluat-Saade (2015).

Atualmente, essa forma centralizada de produção de energia tem gerado discussões relacionados à mitigação dos impactos ambientais, limitação dos recursos naturais e baixa eficiência energética. Questões que levam à procura de um novo modelo de geração e distribuição de energia, despertando interesse por temas como geração distribuída, fontes renováveis e diversificação da matriz energética.

O conceito de geração distribuída é dado pela ANEEL (2016) como centrais geradoras de energia elétrica, de qualquer potência, com instalações conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas – ou não – pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Essa geração local próxima às cargas vem se consolidando sob o desafio de continuar suprimindo a crescente demanda de eletricidade sem comprometer confiabilidade e meio ambiente. Na Figura 2 é possível observar a configuração atual do sistema elétrico brasileiro, onde estão presentes a geração distribuída e as fontes de energia renováveis.

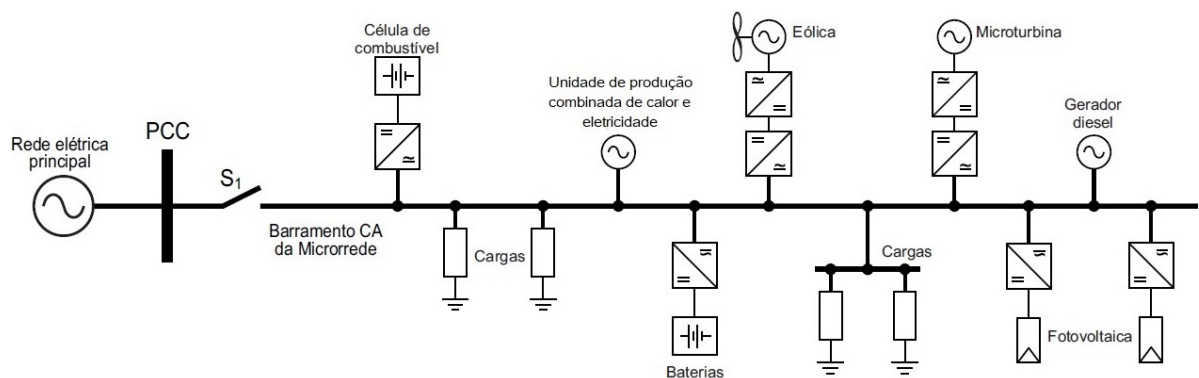
Figura 2 – Configuração atual do sistema elétrico brasileiro.



Fonte: ANEEL (2008), adaptado por Montezano (2013).

Dentro dessa ideia, outro conceito que tem ganhado força é o de microrrede, definida pela ANEEL (2016) como rede de distribuição de energia elétrica que pode operar isoladamente do sistema de distribuição, atendida diretamente por uma unidade de geração distribuída. Segundo Yang et al. (2016), as microrredes podem fornecer energia confiável, limpa e eficiente aos usuários locais. Ela evita o transporte de energia por longas distâncias, obtendo maior eficiência. Na Figura 3 é possível visualizar um exemplo de estrutura de uma microrrede.

Figura 3 – Exemplo da estrutura de uma microrrede.



Fonte: Azevedo (2011).

De acordo com Tahim et al. (2015) uma microrrede pode ter a extensão de um

município ou uma única casa, entretanto, independente da dimensão, compartilham da mesma filosofia e basicamente dos mesmos elementos, que são: geração distribuída, cargas, conversores estáticos, dispositivos de armazenamento de energia, controladores e ponto de acoplamento comum.

Quanto às fontes ou micro-fontes geradoras empregadas em uma microrrede, são normalmente recursos de energia distribuídos renováveis/não-convencionais integrados para gerar energia na tensão de distribuição (STRAMOSK et al., 2014). Alguns exemplos desses recursos de energia são os sistemas de geração eólica, as células FVs, as pequenas centrais hidrelétricas e os mecanismos de armazenamento. Contudo, entre as energias renováveis, a eólica e solar FV são as que mais se destacam, devido à abundância, facilidade de acesso e capacidade de conversão para outras formas de energia (SHAHINZADEH et al., 2016) e podem ser descritas como segue:

Energia Solar Fotovoltaica: O sistema fotovoltaico tem a capacidade de captar diretamente a luz solar e produzir corrente elétrica. Essa corrente é coletada e processada por dispositivos controladores e conversores, podendo ser armazenada em baterias ou utilizada diretamente em sistemas conectados à rede elétrica (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Pesquisas vem sendo realizadas (GNOATTO et al., 2004; LI; LEHMAN, 2004; CHINE et al., 2015; PINTO et al., 2015; COSTA, 2014) no intuito de avaliar a eficiência de painéis fotovoltaicos, diagnosticar falhas em matrizes de painéis, analisar a integração desta tecnologia com as microrredes, verificar a viabilidade técnica e econômica da microgeração a partir da utilização da fonte de energia solar, entre outras questões. No Brasil, a tecnologia solar FV vem sendo utilizada na eletrificação de povoados isolados, no bombeamento de água, nos serviços públicos, como iluminação e nas estações de telecomunicações (PINHO; GALDINO, 2014).

Energia Eólica: Denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento). Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego dos aerogeradores, para a geração de eletricidade, ou cataventos (e moinhos) para trabalhos mecânicos como bombeamento d'água (ANEEL, 2002). Nos últimos anos, a taxa de crescimento da energia eólica tem ascendido mais rapidamente que qualquer forma de geração de eletricidade no mundo, com o seu desenvolvimento estimulado pelas preocupações sobre as alterações climáticas, a diversidade energética e a segurança do abastecimento (SUMATHI; KUMAR; SUREKHA, 2015).

Um dos pontos em comum encontrados entre as fontes eólica e solar é o fato de serem intermitentes. Cavados (2015) explica que a energia eólica somente está disponível quando o vento sopra em determinados níveis de velocidade e sua produção é diretamente proporcional à velocidade instantânea do ar naquele momento. Já a energia solar varia com o nível de radiação do Sol, que muda a cada dia, mês e ano devido ao movimento

do planeta e a cada instante, devido a passagem de nuvens. Em razão disso, é necessário buscar soluções para lidar com essas incertezas. Nessas situações um conversor estático pode ser utilizado. Segundo Bezerra (2015), os conversores eletrônicos de potência têm um papel fundamental na forma como a energia elétrica é processada em diversas aplicações e atuam como dispositivo intermediário entre a fonte de energia e a carga conectada, controlando o fluxo de potência e permitindo a operação adequada do conjunto.

De acordo com Lotfi e Khodaei (2017), a prática atual em implantações de microrredes centra-se principalmente em CA, similar ao sistema de energia tradicional que é padronizado para CA. No entanto, após o advento de várias cargas CC (tais como centros de dados e comunicação, lâmpadas LED e computadores) e fontes de geração CC (tais como painéis solares, células de combustível e baterias), as microrredes CC tornam-se também desejáveis. Além disso, pode-se buscar a combinação dos benefícios da CA e CC, gerando as microrredes híbridas. Obtendo, segundo (MALIK et al., 2017), maior eficiência e menor custo, uma vez que a conversão entre CA e CC é reduzida.

2.1.1 Microrredes CC

A implementação em CC está ganhando atenção devido às numerosas vantagens que fornecem, como, por exemplo, o uso racional da energia elétrica, pois excluem-se as perdas relativas às conversões CC para CA, feitas com o intuito de se injetar energia na rede elétrica e depois a conversão inversa, CA para CC, a fim de alimentar dispositivos eletrônicos (DIAS, 2013). Além da redução das perdas por conversões, pode-se reduzir perdas da transmissão de energia. Segundo Collier (2013), as linhas CC não estão sujeitas a reatância indutiva e reatância capacitiva, que se traduz em uma maior capacidade de transferência de energia para uma determinada potência. Além disso, a energia CC não está sujeita a variação de frequência e não induz correntes em condutores vizinhos, ou seja, não causa interferência com telecomunicações e dispositivos eletrônicos sensíveis (COLLIER, 2013). Oferece também flexibilidade quanto a expansão, pois novas cargas e fontes poderão ser conectadas sem alterar as unidades já existentes e, por fim, oferece menores riscos para os seres humanos, no que se refere à tolerância de circulação de corrente no corpo (HELDWEIN, 2010).

Do ponto de vista da geração, as microrredes CC se mostram interessantes, devido aos recursos de energia distribuídos CC, tais como painéis solares fotovoltaicos, célula de combustível e componentes de armazenamento. Do ponto de vista do consumo, porque as cargas comuns, por exemplo, cargas eletrônicas, acionamentos variáveis em aparelhos de ar condicionado, refrigeradores e máquinas de lavar roupa requerem alimentação CC (YANG et al., 2016).

Diante da viabilidade do uso mais extensivo de microrredes CC, diversas pesquisas têm sido realizadas. Cetin et al. (2011) descrevem em seu trabalho um sistema de microrrede

CC desenvolvido em Pamukkale University, Denizli-Turquia, que foi criado para investigar as células de combustível para distribuição de energia em CC. No sistema, o hidrogênio é transformado em energia elétrica CC, que é distribuída através de dois conversores CC/CC monitorados por equipamentos de aquisição de dados. As cargas alimentadas pelo sistema são lâmpadas, congelador/frigorífico, ventiladores, televisão, aspirador de pó e bomba de circulação.

Farhadi e Mohammed (2015) propõem um novo esquema de controle de energia para microrrede híbrida CC para reduzir o impacto adverso de cargas de potência pulsada. O controle de energia proposto é um esquema de controle adaptativo de corrente-tensão. Ao contrário dos métodos convencionais de controle de energia, a abordagem proposta tem a vantagem de controlar tanto a tensão como a corrente do sistema, enquanto mantém a corrente de saída do conversor com um valor relativamente constante. Este sistema inclui estações geradoras e cargas programáveis em escala laboratorial de até 35 kW.

Tahim et al. (2015) mostram o desenvolvimento de estratégias de controle para microrredes CC baseando-se em modelos simplificados. Eles afirmam que embora existam sistemas de transmissão e distribuição CC bem estabelecidos, não existem técnicas bem consolidadas para o controle das microrredes CC. São apresentados métodos de análise de estabilidade do sistema CC do ponto de vista dinâmico e a proposta de controladores não lineares baseados em controle por modos deslizantes, cujo objetivo é regular a tensão do barramento CC sob variações de carga.

Sechilariu, Locment e Wang (2015) realizam o estudo de uma microrrede CC isolada, com o objetivo de gerenciar a energia local e realizar um controle que otimize o fluxo de energia para melhorar a eficiência de pequenas centrais FVs descentralizadas para edifícios. A otimização leva em conta a previsão de produção de energia e a demanda de potência da carga, enquanto satisfaz as restrições, como capacidade de armazenamento e modos de funcionamento das fontes.

No trabalho de Mackay et al. (2015) são descritas duas implementações de microrredes em CC. A primeira é de baixa tensão, que foi construído na Holanda para o fornecimento de luz em via pública. O sistema contém lâmpadas inteligentes, comandadas individualmente a partir de uma central de controle. A segunda implementação é um teste de campo de uma rede de distribuição em CC, realizado na Finlândia, usando ± 750 VCC. Como resultado, observou-se que a distribuição CC, em baixa tensão, torna-se economicamente atraente para as zonas rurais da Finlândia quando a distância é maior que 1 km.

Segundo Rodriguez-Diaz, Vasquez e Guerrero (2016), o Japão é um dos países líderes em matéria de distribuição de corrente contínua em sistemas para aplicações residenciais. Em Tohoku Fukusi University em Sendai City, uma microrrede foi implementada e está em funcionamento desde 2008. Ela possui várias fontes locais de geração, motores a gás e

sistemas fotovoltaicos.

Na Universidade de Aalborg, na Dinamarca (RODRIGUEZ-DIAZ; VASQUEZ; GUERRERO, 2016), uma casa inteligente utilizando rede de distribuição em CC está sendo implementada. A instalação se destina a servir como teste para aplicação de conversores CC-CC na alimentação de eletrodomésticos, algoritmos de gerenciamento e sistemas de comunicação, bem como para investigar o potencial de redução de perdas, benefícios e as barreiras para a utilização de eletricidade diretamente na forma CC gerada localmente.

Priya, Parimi e Rao (2016) apresentam o desenvolvimento de um controlador híbrido para sistemas fotovoltaicos que utilizam conversores CC-CC em aplicações conectadas a uma rede CC. O controlador híbrido consiste de controlador MPPT (Maximum Power Point Tracking), que usa o método de busca aleatória para rastrear o ponto de potência máxima global, e um regulador de tensão, que usa um controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) para manter a saída de CC estável independentemente das flutuações da rede. Em outro trabalho, Haripriya, Parimi e Rao (2016) desenvolvem o controlador híbrido, que inclui controlador MPPT e controlador baseado em lógica fuzzy.

Através das pesquisas pode-se compreender que as microrredes CC apresentam-se como uma alternativa promissora às redes de corrente alternada, entretanto existem diversos obstáculos técnicos e regulamentares para agregá-las ao sistema elétrico atual. Segundo (RODRIGUEZ-DIAZ; VASQUEZ; GUERRERO, 2016), a falta de regulamentação e normalização e a necessidade do desenvolvimento dos equipamentos de proteção são, provavelmente, os principais desafios que os sistemas CC precisam superar.

2.2 Conexões das Fontes de Energia às Microrredes

Stramosk et al. (2014) afirma que para se fazer bom uso das vantagens propiciadas por uma microrrede, há a necessidade de um uso extensivo de conversores estáticos de potência para interligar diversos tipos de fontes geradoras, cargas e elementos de armazenamento, devido aos seus diferentes tipos de comportamentos dinâmicos. Independentemente das funções, objetivos e estruturas de controle, todas as ações de controle são realizadas por meio de conversores estáticos (BICZEL, 2007) e pode-se dizer que apenas devido ao avanço da eletrônica de potência é possível projetar e operar efetivamente as microrredes CC (STRAMOSK et al., 2014).

Os conversores estáticos podem ser distribuídos nas categorias CC-CC, CC-CA, CA-CC e CA-CA. Barbi e Martins (2000) conceituam os conversores CC-CC como um sistema formado por semicondutores de potência, operando como interruptores, e por elementos passivos, normalmente indutores e capacitores, que tem por função controlar o fluxo de potência elétrica da fonte de entrada (alimentação) para a fonte de saída (carga). Esses conversores CC-CC podem ser classificados de acordo com a sua topologia e ganho

estático, contudo alguns deles são mais populares, como os conversores *Buck* (abaixador de tensão), *Buck-Boost* (abaixador-elevador) e *Boost* (elevador de tensão).

2.2.1 Conversores em Paralelo

Thomas, Kumaravel e Ashok (2016) explicam que em uma microrrede CC as fontes geradoras, os equipamentos de armazenamento de energia e as cargas são conectados a um barramento CC comum através dos conversores estáticos. Esses elementos compõem uma estrutura distribuída dentro de uma área predefinida, operando em um sistema único, que pode estar conectado ou não à rede elétrica principal. Tendo em vista este tipo de estrutura, observa-se a necessidade de conectar várias fontes de tensão em paralelo (AZEVEDO, 2011).

Autores como Tahim et al. (2015), Oberto et al. (2014) e Siri, Lee e Wu (1992) explicam que a conexão em paralelo, para integração de várias fontes de energia em uma microrrede, é utilizada para finalidades como:

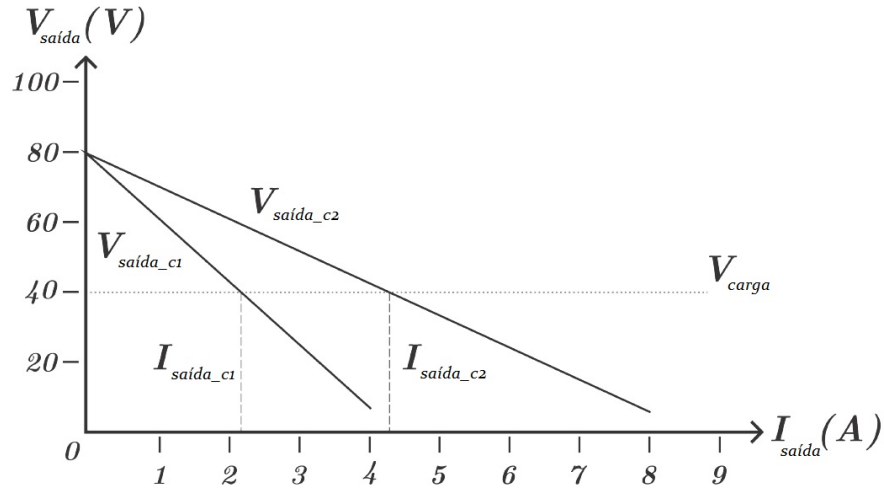
- Expandir a capacidade de potência da microrrede integrando diversas fontes de energia;
- Criar sistema redundante paralelo para melhorar a confiabilidade da operação do sistema;
- Facilitar reparações e manutenções do sistema;
- Permitir a expansão da capacidade da rede de maneira modular.

O principal problema para a associação em paralelo dos conversores é o compartilhamento de carga entre eles. Quando conversores são conectados em paralelo é necessário que a demanda de carga seja compartilhada proporcionalmente às suas potências (THOMAS; KUMARAVEL; ASHOK, 2016). Essa condição de compartilhamento, onde as fontes dividem igualmente a corrente e potência fornecida para carga, seria possível quando a tensão gerada pelas fontes e a resistência de saída dos conversores fossem exatamente iguais. Entretanto, os conversores sempre possuem diferenças na sua construção interna, mesmo se forem de um mesmo fabricante. Além disso, a própria resistência dos condutores que conectam o sistema causam valores de resistência diferentes. Isso resulta em um compartilhamento desigual de corrente e potência.

Esse problema encontra-se ilustrado na Figura 4. Nela, dois conversores com tensão de saída a vazio iguais (80 V) e resistências de linha diferentes estão conectados em paralelo. A tensão na carga é 40 V e as retas $V_{saída_c1}$ e $V_{saída_c2}$ representam a característica de carga e dependem do valor da resistência de linha de cada conversor. Para a tensão de carga, nota-se que os conversores possuem correntes de saída muito diferentes entre si e

aquele que possui menor resistência de saída, neste caso o conversor c2, fornece maior corrente à carga.

Figura 4 – Curva de carga e inclinação das tensões de saída para dois conversores em paralelo com resistências de linha diferentes.

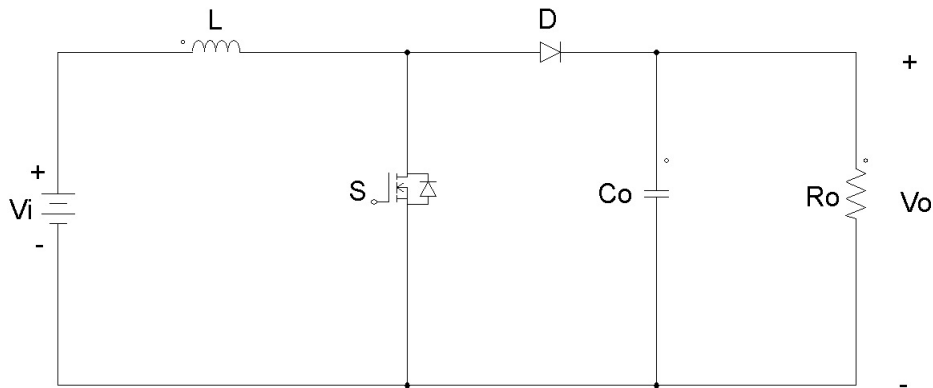


Fonte: Adaptado de Oberto et al. (2013).

2.3 Conversores da Família *Boost*

Segundo Chaoui et al. (2016), um conversor *Boost* pode ser usado para elevar e manter a tensão do barramento CC de uma microrrede, bem como para extrair o máximo de energia das fontes renováveis. Sua estrutura básica pode ser vista na Figura 5, onde a fonte de alimentação está representada por V_i , o indutor por L , o semicondutor de potência, que opera como chave, por S , o diodo por D , o capacitor por C_o e a carga, que apresenta uma tensão de V_o , é representada por R_o .

Figura 5 – Conversor *Boost*.



Fonte: Adaptado de Petry (2001).

As principais aplicações do conversor *Boost* são em fontes de alimentação, retificadores com elevado fator de potência e no acionamento de motor de corrente contínua com

frenagem regenerativa (BARBI; MARTINS, 2000).

Segundo Petry (2001), o intervalo de comutação é definido como:

$$T_s = \frac{1}{f_s} \quad (2.1)$$

Onde f_s é a frequência de comutação.

A razão entre o intervalo de condução do interruptor S (T_{on}) e o período de comutação (T_s) é a razão cíclica, dada por:

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} \quad (2.2)$$

A relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada é o ganho estático do conversor, dado por:

$$G = \frac{V_o}{V_i} \quad (2.3)$$

De acordo com Alcazar (2010), teoricamente, o conversor *Boost* convencional atinge alto ganho de tensão com elevados valores de razão cíclica. Entretanto, isso é limitado pelas perdas na resistência do enrolamento do indutor, o que implica sérias limitações práticas. Para vencer as limitações do *Boost*, vários conversores CC-CC não isolados de alto ganho de tensão foram propostos, onde cada um apresenta suas particularidades (ARAUJO et al., 2008).

2.3.1 Topologias de Conversores *Boost*

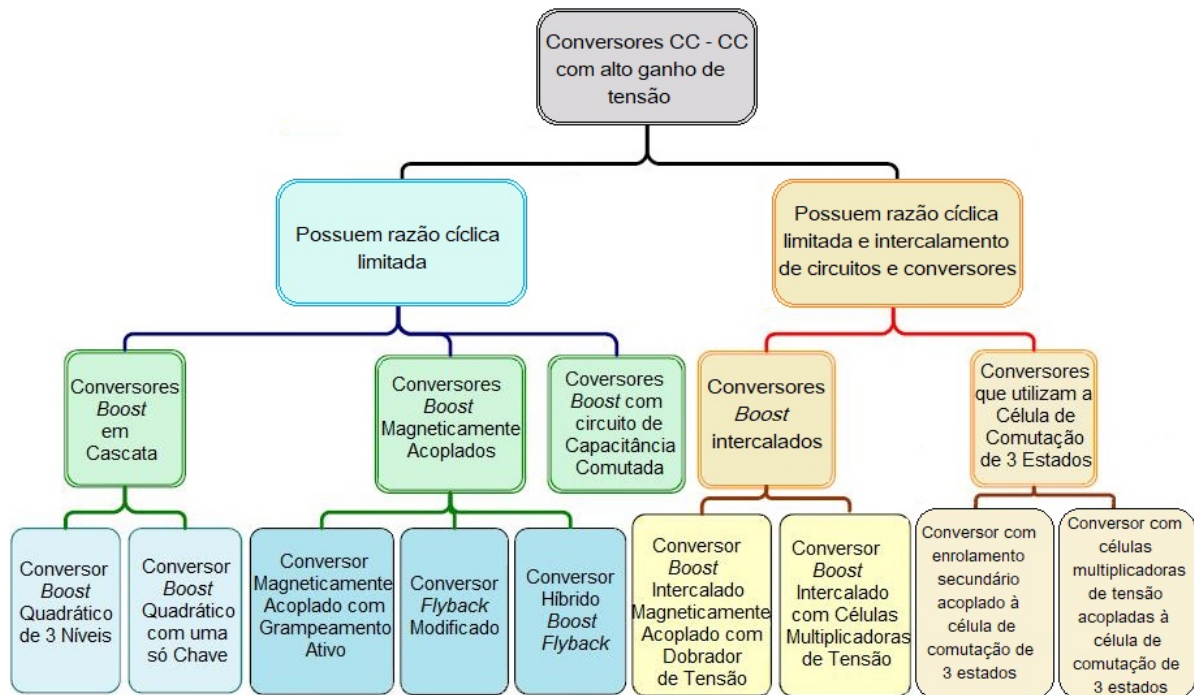
Novas configurações de conversores *Boost* têm sido propostas visando melhorar seu rendimento. Na Figura 6 é possível visualizar um quadro com a classificação das principais topologias propostas na literatura.

Alcazar (2010) afirma que as configurações com modificações baseadas na topologia dos conversores *Boost* em cascata são o *Boost* quadrático com um interruptor e o *Boost* quadrático de três níveis. Em Barreto et al. (2005) e Novaes, Rufer e Barbi (2007) pode-se ler mais sobre cada uma dessas configurações. Silveira (2011), destaca, dentre as vantagens do conversor *Boost* quadrático com apenas uma chave, a possibilidade de ganho de tensão maior que o ganho do conversor *Boost* convencional, alta eficiência e comutação suave por meio de uma única rede ressonante. Como desvantagem, cita os esforços elevados de tensão e corrente sobre a chave principal. No trabalho de Novaes, Rufer e Barbi (2007) fica demonstrado que a eficiência total do conversor *Boost* quadrático de três níveis é próxima de 90 % e mais alta que o conversor anteriormente comentado.

Os conversores magneticamente acoplados podem atingir um alto ganho de tensão, mas sua eficiência é degradada pelas perdas associadas à indutância de dispersão (ZHAO; LEE, 2003). A técnica com grampeamento ativo pode reciclar a energia de dispersão, mas o

custo aumenta pela complexidade da topologia (ZHAO et al., 2001). Em Zhao e Lee (2003), o conversor proposto é um *flyback* modificado, que usa diodos e enrolamentos acoplados em vez de interruptores ativos para realizar funções semelhantes à do grampeamento ativo, apresentando melhor desempenho do que esta técnica.

Figura 6 – Principais topologias de conversores *Boost*.



Fonte: Adaptado de Alcazar (2010).

Quanto aos conversores *Boost* com capacitores comutados, Alcazar (2010) lista como vantagens, a flexibilidade para obter alto ganho de tensão simplesmente aumentando o número de capacitores e o fato de operar com uma razão cíclica relativamente baixa. Como desvantagem é citada a utilização de um grande número de interruptores e com valores de tensão diferentes.

Em geral, o conversor *Boost* intercalado é empregado para reduzir a ondulação da corrente de entrada e desta maneira reduzir o tamanho do filtro de entrada. Para isso, é inevitável trabalhar no limite entre os modos de condução contínua e descontínua (ALCAZAR, 2010). Em Gules, Pfitscher e Franco (2003) e Henn et al. (2010), pode-se ler mais sobre essa topologia.

Em Tomaszuk e Krupa (2011) encontra-se uma revisão focada em conversores *Boost* de alta eficiência com alto ganho de tensão. Os autores comparam e discutem sobre as diversas topologias existentes.

Através da análise das formas de onda de cada um dos conversores, Alcazar (2010) constatou que o conversor com células multiplicadoras de tensão e com célula de comutação de 3 estados apresenta baixas perdas em relação às demais topologias devido à comutação

suave dos interruptores *Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor* - MOSFET. Alguns detalhes sobre esta topologia podem ser vistos a seguir.

2.3.2 Conversor *Boost* Baseado na Célula de Comutação de Três Estados

No trabalho de Torrico-Bascopé et al. (2006) é proposto um conversor *Boost* com alto ganho de tensão baseado na célula de comutação de três estados. Cita-se como vantagens:

- A corrente de entrada é não pulsada com baixa ondulação;
- O indutor de entrada funciona com o dobro da frequência de comutação permitindo a redução de peso e volume;
- A tensão através das chaves é inferior a metade da tensão de saída e naturalmente bloqueada por um capacitor de filtro de saída;
- Para uma determinada razão cíclica, a tensão de saída pode ser elevada, aumentando a relação das espiras do transformador sem comprometer a tensão através das chaves;
- A menor tensão através dos comutadores, permite a utilização de MOSFETs de baixa resistência, melhorando assim a eficiência.

Como desvantagem, o conversor não funciona apropriadamente para razões cíclicas menores que 0,5, devido à dificuldade de indução magnética no enrolamento secundário.

O ganho estático é dado pela equação 2.4:

$$G = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} \cdot \left(1 + \sum_{j=1}^n .a \right) \quad (2.4)$$

Sendo:

V_o - Tensão de saída,

V_i - Tensão de entrada,

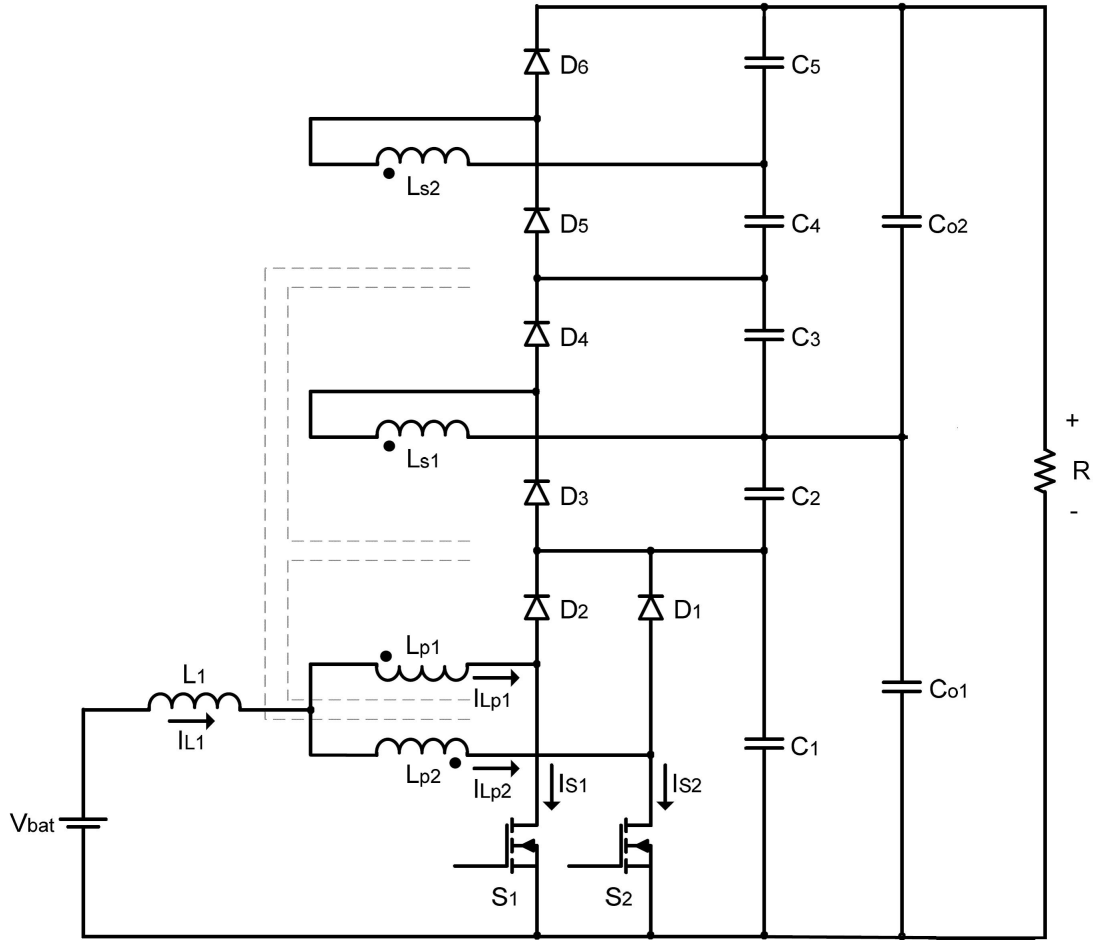
D - Razão cíclica,

n - Número de secundários,

a - Relação de transformação.

Na Figura 7 encontra-se ilustrada a estrutura do conversor *Boost* baseado na célula de comutação de três estados, onde são utilizados dois enrolamentos secundários no conversor.

Figura 7 – Topologia do conversor *Boost* de alto ganho de tensão baseado na célula de comutação de três estados.



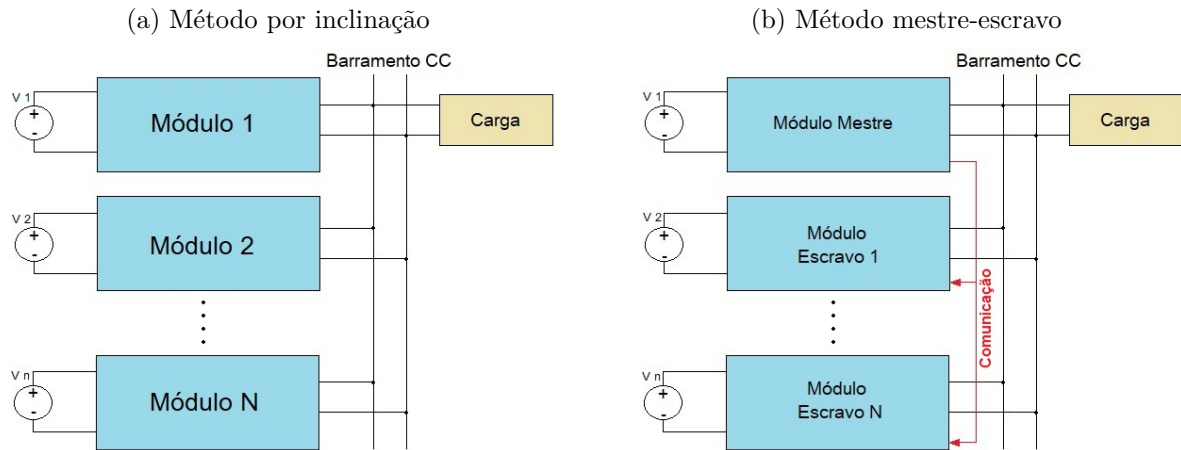
Fonte: Adaptado de Silveira et al. (2014).

2.4 Métodos de Compartilhamento de Carga

As técnicas de compartilhamento de corrente para conversores conectados em paralelo podem ser classificadas como paralelismo sem comunicação e paralelismo com comunicação. De acordo com Oberto et al. (2013), o primeiro tipo utiliza variáveis medidas localmente para garantir o cumprimento de requisitos globais, enquanto o segundo requer um elemento, geralmente um controlador comum aos módulos presentes no sistema.

O controle por inclinação representa a categoria de paralelismo sem comunicação e seu esquema pode ser visto na Figura 8(a). No paralelismo com comunicação destacam-se as topologias de controle central, controle circular, controle distribuído e controle mestre-escravo (RIBEIRO, 2012), sendo este último o método mais comum. Na Figura 8(b), encontra-se ilustrado um esquema mestre dedicado, onde há comunicação entre os conversores em paralelo e todos os módulos escravos seguem a corrente de referência do mestre.

Figura 8 – Esquema de conversores CC - CC em paralelo.



Fonte: Adaptado de Mazumder, Tahir e Acharya (2008).

2.4.1 Controle por Inclinação (*Droop Control*)

O controle por inclinação é um método descentralizado, amplamente aceito na comunidade científica devido a ausência de conexão entre os módulos em paralelo (TAYAB et al., 2017). Nele, os conversores estão conectados entre si e cada um controla sua corrente de saída através do uso de informações locais, ou seja, o sistema não possui uma malha global de controle por realimentação capaz de efetuar o ajuste de corrente em cada unidade constituinte (OBERTO et al., 2013). Seu mecanismo de operação baseia-se na programação da impedância de saída para compartilhar corrente entre conversores.

A razão pela qual as fontes de energia convencionais não compartilham a corrente é que elas são projetadas para serem boas fontes de tensão com baixa resistência de saída (LUO et al., 1999). Assim, quando o controle convencional por inclinação é usado em microrredes CC, existe uma relação entre o compartilhamento de corrente das fontes geradoras e a estabilidade da tensão do barramento CC. À medida que o compartilhamento de corrente melhora, a regulação de tensão no barramento piora (VU et al., 2017), o que é uma desvantagem do método. Por outro lado, o fato de cada conversor funcionar sozinho aumenta a confiabilidade do sistema em relação aos métodos de compartilhamento ativo de corrente (como o mestre-escravo), que usa um circuito extra para realizar o compartilhamento e exige comunicação entre os conversores (IBANEZ; ECHEVERRIA; FONTAN, 2017).

Embora o controle por inclinação para microrredes CA seja um tema amplamente pesquisado, para sistemas CC não recebeu muita atenção (THOMAS; KUMARAVEL; ASHOK, 2016).

A seguir são descritos cinco esquemas possíveis para o método *droop*, que podem ser usados para conversores em paralelo (LUO et al., 1999):

- Conversores com característica *droop* inerente: Possuem a característica intrínseca de *droop*, variando a tensão de saída de acordo com a carga. Conversores operando em modo de condução descontínua e ressonantes (TAHIM et al., 2015);
- *Droop* de tensão devido à resistência em série: Associar um resistor externo na saída de cada conversor para melhorar o compartilhamento de carga. Essa solução é apenas utilizada em conversores de baixa potência devido às perdas por dissipação (TAHIM et al., 2015);
- *Droop* de tensão via realimentação da corrente de saída: A tensão é detectada através de uma resistência em série e usada para produzir uma queda na tensão de saída que é proporcional à corrente de saída (LUO et al., 1999);
- Modo Corrente com baixo ganho CC: O ganho CC do amplificador de erro é reduzido, produzindo uma queda na tensão de saída (LUO et al., 1999);
- Controle programado via ganho não-linear: É adequado para implementação digital, por exemplo usando controladores do tipo Fuzzy (LUO et al., 1999).

Aplicações do método de controle por inclinação podem ser encontradas em diversos trabalhos. Batarseh, Siri e Lee (1994) mostram inicialmente duas abordagens para fornecer as características de inclinação de tensão de saída: Limitar o ganho CC do compensador de tensão ou usar a corrente de saída para programar a tensão de referência. Após as simulações, os autores concluíram que ambas as abordagens fornecem um compartilhamento de corrente aceitável a plena carga, mas a distribuição de corrente piora à medida que a carga diminui. Assim, propõem uma técnica para controle de compartilhamento de corrente que assegure a distribuição uniforme ao longo do intervalo de carga especificado. A técnica proposta não requer sensoramento remoto nem mudanças nos circuitos de controle dentro dos conversores de origem. A abordagem selecionada para alcançar a distribuição uniforme é chamada Controle de Limite Central. Para minimizar a perda causada pelo controle de distribuição, a fonte que tem menor tensão pode ser conectada diretamente à carga compartilhada através de uma chave que é controlada para obter o mínimo de perdas. Enquanto a distribuição de corrente uniforme é realizada controlando a resistência efetiva do outro interruptor conectado à fonte de alta tensão. O interruptor comandado dedicado ao controle de partilha de corrente pode ser operado tanto no modo linear como no modo de comutação. Através das simulações percebeu-se a partilha da corrente de saída uniforme e o valor da tensão de carga muito próximo da tensão da fonte.

Thomas, Kumaravel e Ashok (2016) descrevem o controle por inclinação usando o método de impedância virtual de saída, como uma estratégia eficaz de controle primário para conversores *Buck* conectados em paralelo em uma microrrede CC. O esquema de controle proposto consiste em duas malhas internas de controle de corrente e tensão e uma

malha externa para a impedância virtual de saída. Foram utilizados para a simulação dois conversores *Buck* idênticos, conectados em paralelo com diferentes valores de resistência de saída. Os resultados mostraram que o método é eficaz para assegurar o compartilhamento de carga entre os conversores. A tensão de saída de cada conversor é ajustada medindo a corrente de saída. A própria tensão do terminal fornece informações sobre a potência entregue. Entretanto, verificou-se que com um valor maior de impedância virtual de saída a partilha de carga melhora, mas o desvio de tensão é maior neste caso e para um valor menor de impedância, o desvio de tensão é menor e o erro de compartilhamento de corrente é maior. Assim, o desvio de tensão causado devido ao controle primário precisa ser ajustado por um nível de controle secundário. Também é necessário um controle terciário para ajustar o fluxo de energia da microrrede CC para a rede elétrica.

A necessidade de um controle secundário e terciário apontada no trabalho anteriormente citado já havia sido realizada no trabalho de Guerrero et al. (2011). Os autores apresentam o controle hierárquico para proporcionar flexibilidade às microrredes. O controle hierárquico proposto consta de três níveis: Primário, secundário e terciário. O controle primário é baseado no método por inclinação, incluindo uma malha de impedância virtual de saída. Quando há alguma diferença de tensão entre as fontes conectadas em paralelo, uma corrente circula entre elas, então o controle primário ajusta a referência de tensão, fornecida às malhas internas de controle de corrente e tensão, e fornece a impedância de saída aos conversores para compensar as diferenças entre as referências de tensão. Esse nível de controle permite a operação paralela dos conversores, mas o desvio de tensão dependerá da carga conectada. Para solucionar esse problema, o controle secundário é acrescentado. Nele, o nível de tensão da microrrede é detectado e comparado com a referência de tensão. O erro processado através de um compensador é enviado para todas as unidades para restaurar a tensão de saída. Por fim, o controle terciário gerencia o fluxo de energia entre a microrrede e o sistema externo de distribuição elétrica. Os resultados das simulações mostram que com a utilização da abordagem proposta o sistema torna-se mais flexível e expansível, permitindo um agrupamento de microrredes sem alterar o sistema de controle hierárquico local associado a cada uma. No trabalho de Augustine, Lakshminarasamma e Mishra (2016) pode-se encontrar a descrição de um método de controle que também baseia-se na resistência virtual.

Lu et al. (2014) desenvolveram um trabalho com o objetivo de resolver os problemas impostos pelas duas limitações do método convencional de controle por inclinação (Imprecisão do compartilhamento da corrente de saída e má regulação da tensão do barramento CC). Na proposta, o método de controle convencional é usado para alcançar o compartilhamento de carga proporcional. Em seguida, as tensões e correntes de saída são transferidas entre os conversores usando a rede de comunicação de baixa largura de banda. O controle dessas duas grandezas é feito através de controladores proporcional-integral (PI). Segundo os autores, os resultados demonstraram um compartilhamento de corrente preciso e a tensão

de saída é garantida dentro de um intervalo aceitável. Em contraste com a abordagem por inclinação convencional, o sistema de controle não requer um controlador secundário centralizado. Em vez disso, ele usa controladores locais e a rede de comunicação de baixa largura de banda para trocar informações entre as unidades conversoras. Outro trabalho que desenvolve um método que garante simultaneamente o igual compartilhamento de corrente e a regulação de tensão foi desenvolvido por Anand e Fernandes (2012).

Oberto et al. (2014) apresentam uma estratégia melhorada de controle por inclinação. Cada conversor é modelado como uma fonte de tensão dependente e conectado a um barramento de tensão de saída comum através da resistência de linha individual. A tensão de saída local é regulada através da malha de realimentação juntamente com o sensor de tensão individual. Para o compartilhamento de corrente, uma malha de realimentação extra é adicionado à estratégia convencional de controle por inclinação. Além disso, um sensor de corrente é adicionado à carga, fornecendo um erro entre a corrente de carga medida e a corrente de carga de referência. Este erro alimenta um controlador de corrente, que fornece uma saída projetada para ajustar a tensão de referência na malha de controle principal. Os resultados da simulação mostraram que a ausência de um controle de compartilhamento de corrente em um sistema de energia distribuído composto por conversores de saída conectados em paralelo pode causar graves desequilíbrios de corrente entre cada unidade, o que leva ao estresse térmico e à menor confiabilidade para as unidades. Entretanto, com o controle proposto, verificou-se uma melhoria de desempenho (regulação de corrente de carga), tanto para operação em estado estacionário quanto em vários tipos de distúrbios. O modelo de saída escolhido e a estrutura de controle desenvolvida para cada conversor proporcionaram ainda, modularidade ao sistema, padronizando sua configuração e a operação do conversor. Em comparação com a estratégia de controle convencional, o controle aprimorado proposto neste trabalho requer apenas uma malha de realimentação extra em cada conversor e um único sensor de corrente localizado na carga, que deve transmitir a corrente de carga medida para todos os conversores presentes para uma regulação de corrente adequada.

Quando o controle por inclinação convencional é usado em uma microrrede CC, à medida que o compartilhamento de corrente se aproxima do ponto de ajuste, o desvio de tensão no barramento aumenta. Assim, no trabalho de Vu et al. (2017) é proposto um controle adaptativo robusto para ajustar as características do controle por inclinação, visando atender tanto aos critérios de compartilhamento de carga, quanto à necessidade de estabilidade de tensão do barramento CC. Para projetar o esquema adaptativo, os autores investigaram o controle por modelo de referência em malha fechada (CRM). A técnica de normalização emparelhada com o algoritmo de projeção é aplicada a esse controle. Existem três camadas na arquitetura proposta. A primeira camada é o controle primário, onde o controle por inclinação e o controle interno de tensão e corrente de um conversor de energia são realizados. A segunda camada é o controle secundário, onde o controle

adaptativo é conduzido para o compartilhamento de corrente e estabilidade da tensão do barramento. A terceira camada é a camada de comunicação para trocar a informação de controle, incluindo a tensão de barramento e as informações de compartilhamento de corrente. Os resultados mostraram que o método adaptativo atendeu às exigências, ou seja, realizou o compartilhamento preciso da corrente e manteve a tensão nominal do barramento CC.

Em Tayab et al. (2017) pode-se encontrar uma revisão abrangente de estudos recentes sobre a técnica de controle por inclinação.

2.4.2 Controle Mestre-Escravo

O método mestre-escravo é um método de compartilhamento ativo de corrente e geralmente é implementado com circuitos adicionais de compartilhamento de carga com base na detecção de corrente de saída em cada conversor e comunicação rápida entre eles. Isso, por sua vez, aumenta a complexidade da configuração e diminui a confiabilidade do sistema (IBANEZ; ECHEVERRIA; FONTAN, 2017). Consiste em um único módulo conversor mestre e um conjunto de módulos conversores escravos. Os módulos conversores escravos são controlados de tal forma que suas correntes de saída rastreiem a corrente de saída do mestre (SIRI; LEE; WU, 1992).

Da estratégia mestre-escravo surgem três categorias (LUO et al., 1999):

- Mestre dedicado: Um dos conversores é designado como mestre e sua corrente de saída é a referência para os conversores escravos. O compartilhamento de corrente e regulação de carga são alcançados, entretanto se houver uma falha na unidade mestre o sistema será desabilitado (OBERTO et al., 2013).
- Mestre rotatório: Cada conversor pode ser mestre através de uma lógica de controle, garantindo maior redundância ao sistema. Nesse esquema, a condição de não redundância é solucionada através da rotatividade dos mestres. Em contrapartida, esta troca constante pode causar flutuações na tensão de carga (OBERTO et al., 2013).
- Mestre democrático: O mestre será o conversor com a maior corrente de saída. O mestre democrático é uma evolução dos esquemas anteriores e é amplamente utilizado em aplicações práticas. Como vantagens pode-se citar a ligação simples do barramento de partilha, uma boa tolerância a falhas e a facilidade de expansão e modificação do sistema em paralelo. Por outro lado, como desvantagens tem-se o pobre desempenho em transitórios, a possibilidade de falha no controle de partilha e a sensibilidade a ruído (LUO et al., 1999).

Os métodos de compartilhamento ativo de corrente tem como vantagens oferecer uma corrente de saída compartilhada adequadamente e uma tensão de saída bem regulada.

Entretanto, somente podem ser executados se as informações de compartilhamento de carga forem conhecidas pelos controladores. Consequentemente, são necessários cabos de conexão entre módulos conversores e seus controladores para comunicar essas informações (LAI; TAN; TSANG, 2009). No entanto, os fios de interconexão não só restringem a localização das unidades, como também podem causar ruído e falhas no sistema. Um sistema que requer fios de interconexão, não é verdadeiramente distribuído e redundante. Dessa forma, muitos autores tem proposto técnicas de controle para compartilhar a carga sem que hajam interconexões (TULADHAR; JIN, 1998). Assim, são encontrados diversos trabalhos que descrevem o método de compartilhamento mestre-escravo tanto para aproveitar suas vantagens, como para superar suas desvantagens.

Mazumder, Tahir e Kamisetty (2005) propõem um controle mestre-escravo, para compartilhamento de carga entre conversores *Buck* conectados em paralelo, utilizando comunicação sem fio, baseado em radiofrequência (RF). O módulo mestre é o responsável por regular a tensão de saída usando um esquema de controle em modo de tensão; isto é, comparando uma tensão de referência com a tensão de saída de retorno e em seguida, um sinal PWM apropriado era gerado, modulando o MOSFET do conversor *Buck*. O sinal PWM gerado pelo módulo mestre é transmitido através da comunicação sem fio para o módulo escravo, assegurando assim o compartilhamento igual da corrente de carga entre os dois módulos paralelos. No entanto, os autores concluíram que a largura de banda foi limitada devido à falta de circuitos de compartilhamento de corrente. Assim, Mazumder, Tahir e Acharya (2008) usam a comunicação sem fio analógica para demonstrar um controle de compartilhamento de carga mestre-escravo dedicado, aplicado a um sistema com conversores *Buck* em paralelo. Segundo os autores, esse novo esquema de compartilhamento ativo de corrente produz uma melhor resposta dinâmica e mitiga a possibilidade de erro de estado estacionário que se apresentava devido às não-linearidades do transmissor de RF. Esse esquema, assim como o anterior, elimina a necessidade de conexão física para distribuir o sinal de controle entre os módulos conversores. O controlador para o módulo mestre possui duas malhas de controle (tensão e corrente). A saída da malha de tensão atua como referência para a malha de corrente. Todos os módulos escravos têm a mesma estrutura e recebem a referência de corrente do módulo mestre, através da transmissão de RF, que garante o compartilhamento uniforme da corrente de carga. Os resultados comprovam a eficácia do controle de compartilhamento de corrente em condições transitórias e estacionárias.

Lai, Tan e Tsang (2009) propõem um meio alternativo de comunicação das informações de compartilhamento de carga em conversores paralelos, incorporando a comunicação sem fio. Entretanto, o esquema proposto não exige nenhuma modificação adicional na topologia dos conversores existentes e, portanto, é viável em qualquer metodologia de controle. O protótipo possui dois conversores *Buck* e o controlador de compartilhamento de corrente mestre-escravo é construído com o circuito integrado de controle de carga

UC3907¹. As informações de compartilhamento de carga são codificadas e distribuídas em baixas frequências em um formato digital através de comunicação sem fio. O controlador sem fio proposto consiste em duas partes: o módulo transmissor e o módulo receptor. No transmissor, as informações de compartilhamento de corrente de carga são amostradas e produzem a representação binária do sinal. Um bloco de mensagem é formado e transmitido para o receptor. Nele a informação de corrente é decodificada e reconstruída para formar uma réplica do sinal original. Os resultados experimentais mostram que o controlador oferece desempenho razoavelmente bom e que o compartilhamento de carga pode ser melhorado se um controlador mais avançado e com uma melhor imunidade ao ruído for usado, ao invés do UC3907.

No trabalho de Qu, Zhang e Bao (2017) é proposto um esquema de controle de corrente diferencial de saída que possui uma estrutura mestre-escravo, aplicado em um sistema de conexão de entrada-série-saída-paralelo, que permite o compartilhamento preciso da tensão de entrada e da corrente de saída. O esquema de controle consiste em uma malha reguladora da tensão de saída e malhas individuais de compartilhamento de corrente de carga. Para melhorar a confiabilidade e alcançar a redundância do sistema, evitando a situação em que se o módulo mestre falhar, todo o sistema falhará também, desenvolveu-se um esquema de controle de fluxo de saída mestre-escravo automático tolerante a falhas. Cada módulo conversor é idêntico na medida em que tem suas próprias duas malhas de controle e todas as saídas do compensador das malhas de regulação de tensão de saída estão conectadas através de diodos. A maior tensão de compensação é a tensão de compensação comum. As referências de corrente de todas as malhas de compartilhamento de corrente de saída também estão conectadas através de diodos e o módulo com a corrente mais alta é a referência de corrente comum. Se o atual módulo mestre da malha de regulação de tensão de saída for removido, o novo módulo mestre será eleito através de diodos. A estrutura do esquema de controle facilita a realização de *hot-plug* (conexões a quente), em que o módulo de falha pode ser curto-circuitado sem mudanças adicionais no circuito de controle.

Outras aplicações do método mestre-escravo podem ser vistas em (LUO et al., 1999), (LI; LEHMAN, 2004) e (LONG et al., 2015).

2.4.3 Controle Híbrido

Alguns trabalhos encontrados na literatura fazem um controle que associa o método de compartilhamento de corrente por inclinação e o método mestre-escravo, nomeado como controle híbrido neste documento para facilitar a organização do texto. O trabalho de Ibanez, Echeverria e Fontan (2017), por exemplo, propõe uma estratégia de controle mestre-escravo no controle por inclinação. O objetivo é maximizar a eficiência do processo de conversão sem adicionar a malha extra que é usual em métodos de compartilhamento ativo

¹ Fabricante *Texas Instruments*, anteriormente *Unitrode* - www.ti.com

de corrente ou permitir comunicações críticas entre módulos. O controle por inclinação proposto, baseia-se no controle hierárquico, que obtém uma melhor regulação da tensão de saída do que o controle de inclinação tradicional. São dois níveis de hierarquia. O controle primário é o próprio controle por inclinação, que reduz a tensão de saída do conversor à medida que a corrente de saída aumenta. O controle secundário compensa a variação de tensão devido ao controle primário através de comunicação de baixa velocidade. O resultado é que a tensão de saída permanece constante. A grande vantagem desse controle por inclinação é que cada conversor funciona sozinho e apenas a comunicação de baixa velocidade compensa as variações de tensão. Desta forma, o controle proposto melhora a confiabilidade do sistema sem aumentar o seu custo.

2.5 Considerações Finais

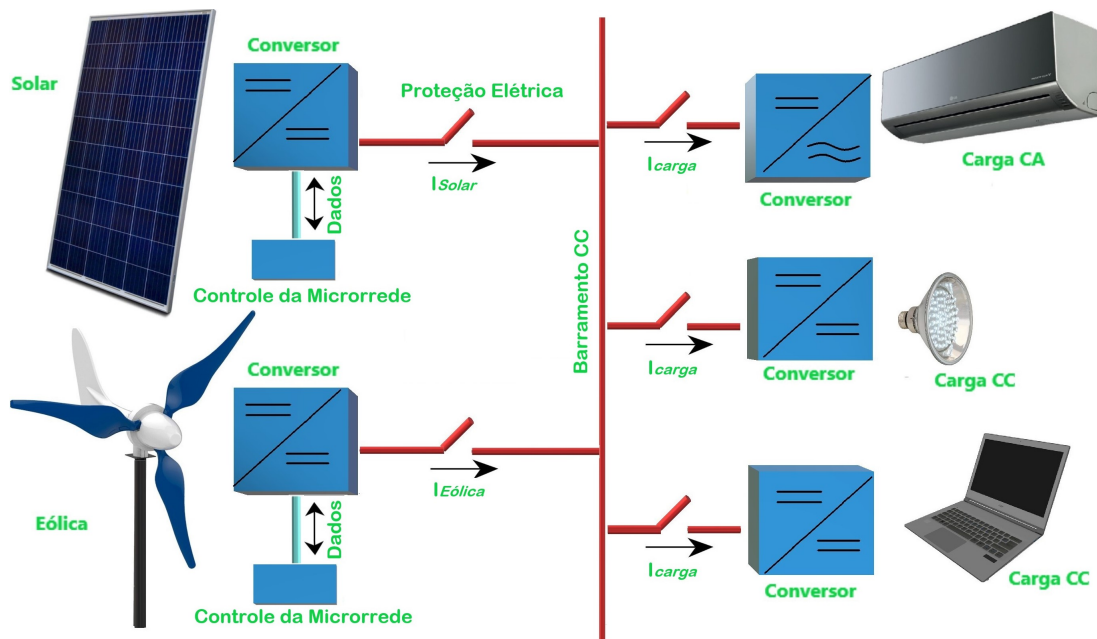
Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre microrredes, topologias para conversores *Boost*, conversores em paralelo e técnicas de compartilhamento de corrente. Através da pesquisa optou-se pelo desenvolvimento de uma microrrede CC, conectada às fontes geradoras através de conversores, sendo escolhido o conversor *Boost* de alto ganho de tensão baseado na célula de comutação de três estados. Para realizar o compartilhamento de corrente foi escolhido o método por inclinação associado ao método mestre-escravo, pois ambos possuem características e vantagens que podem ser aproveitadas para realizar o controle proposto neste projeto.

No capítulo seguinte encontram-se maiores detalhes sobre a microrrede CC e a técnica de compartilhamento desenvolvida. Além disso, são expostos e comentados os resultados das simulações realizadas.

3 Microrrede CC Proposta

A microrrede CC proposta é alimentada pelas fontes renováveis de energia solar fotovoltaica e eólica. As tensões de entrada são elevadas através dos conversores *Boost* para o valor de 311 V e ambos são conectados a um barramento comum de carga. Encontra-se ilustrado na Figura 9 o diagrama de blocos proposto.

Figura 9 – Diagrama de blocos da microrrede CC proposta.



Fonte: Autoria própria.

3.1 Fontes de Geração

As fontes geradoras de energia elétrica empregadas são painéis fotovoltaicos associados de maneira a fornecer uma tensão específica e um aerogerador equipado com gerador síncrono de ímã permanente. O arranjo fotovoltaico utilizado é composto por 2 painéis CS6K-270P (do fabricante Canadian Solar), sendo os mesmos ligados em série. A tensão e a corrente de operação de cada painel são, respectivamente, 30,8 V e 8,75 A, para uma irradiância de 1000 W/m^2 . Eles encontram-se instalados na cobertura do bloco de Eletrotécnica do IFCE - Campus Fortaleza. Neste bloco situa-se o Laboratório de Processamento de Energia (LPE), cuja infra-estrutura permite a realização dos ensaios e montagens em bancadas.

Na Tabela 1 são apresentados os dados elétricos fornecidos pelo fabricante dos painéis fotovoltaicos, considerando como condição padrão de teste os valores de irradiância de 1000 W/m^2 e de temperatura do painel de 25°C .

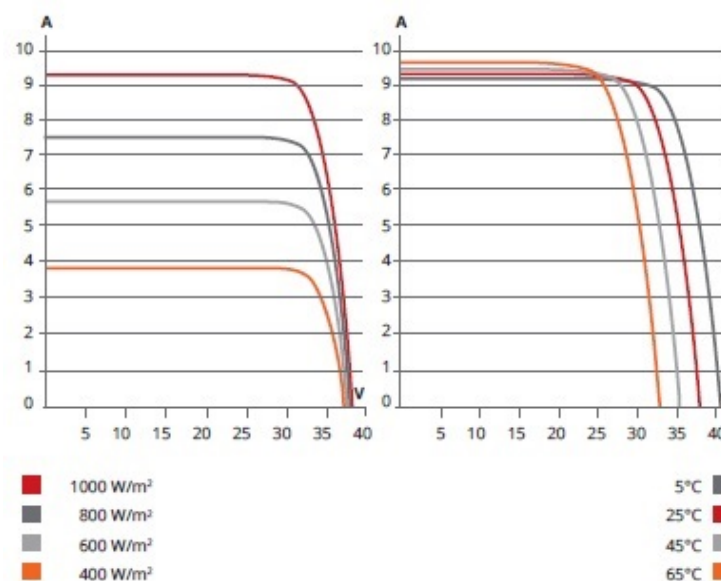
Tabela 1 – Parâmetros do painel fotovoltaico Canadian Solar 270P.

Parâmetros	Valores
Potência Nominal Máxima	270,00 W
Tensão de Operação	30,80 V
Corrente de Operação	8,75 A
Tensão de Circuito Aberto	37,90 V
Corrente de Curto - Circuito	9,32 A
Eficiência do Módulo	16,50 %

Fonte: Folha de dados Canadian Solar CS6K 260|265|270|275P.

Além dos dados citados, o fabricante disponibiliza as curvas de corrente *versus* tensão, para determinados valores de irradiância e para diferentes temperaturas de operação, conforme mostrado na Figura 10. É possível notar que quanto maior o nível de irradiância sobre o painel fotovoltaico, maior o nível de corrente elétrica gerada e que quanto maior a temperatura, menor a tensão de saída.

Figura 10 – Curvas I - V do painel fotovoltaico Canadian Solar 270P.

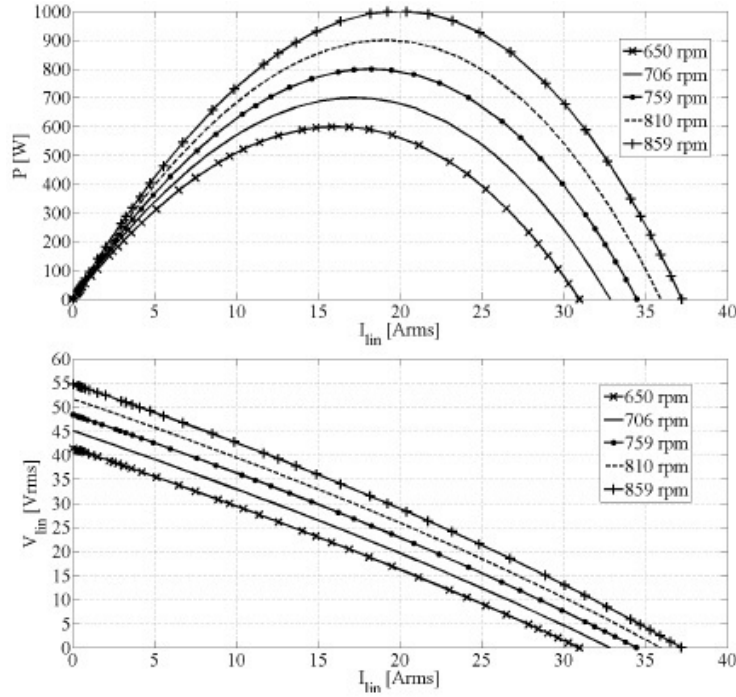


Fonte: Folha de dados Canadian Solar CS6K 260|265|270|275P.

O gerador síncrono de ímã permanente do aerogerador, foi retirado da turbina eólica Sunnily X-600. Seus parâmetros foram obtidos através de ensaios, que estão descritos

em SCHMIDLIN JR et al. (2017). No referido trabalho podem ser encontradas as curvas de potência ativa de saída (P) e de tensão eficaz de linha (V_{lin}) nos terminais da máquina síncrona de ímã permanente em função da corrente eficaz de linha (I_{lin}) e da velocidade de rotação. Percebe-se que as rotações mínimas e máximas necessárias para extrair a potência nominal (600 W) e máxima (700 W) são, respectivamente, 650 rpm e 706 rpm, como pode-se observar na Figura 11.

Figura 11 – Curvas $P - I_{lin}$ e $V_{lin} - I_{lin}$.



Fonte: (SCHMIDLIN JR et al., 2017).

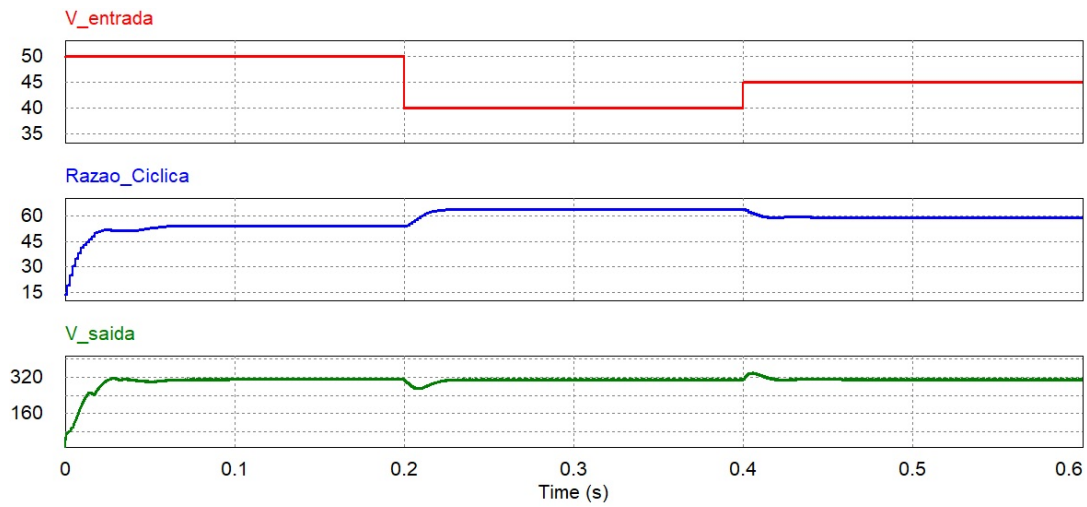
3.2 Conversores *Boost*

Para conexão das fontes de energias solar e eólica, comentadas acima, foram utilizados dois conversores *Boost* de alto ganho de tensão baseados na célula de comutação de três estados e com controlador digital de tensão de saída. Ferreira Filho (2017) afirma que esse conversor possui rendimento na ordem de 92,52 %. Além disso, segundo o autor, o controlador digital de tensão de saída do conversor propicia como vantagens a partida suave do conversor *Boost*, proteção contra sobretensão e subtensão, ajuste rápido dos parâmetros via interface de programação e regulação de tensão de saída diante de perturbações na tensão de entrada.

O comportamento da tensão de saída e da razão cíclica do conversor *Boost* com controle de tensão, frente às variações na tensão de entrada, pode ser visto na Figura 12. A imagem é resultado de uma simulação realizada no *software* PSIM¹.

¹ *software* de simulação desenvolvido pela empresa Powersim

Figura 12 – Comportamento da tensão de saída e razão cíclica do conversor *Boost* com controle de tensão.



Fonte: Autoria própria.

O conversor alimenta uma carga resistiva de $200\ \Omega$ e a tensão de saída é regulada em 311 V. A tensão de entrada sofre variações, entretanto o controlador digital mantém o valor de saída dentro do nível de tensão desejado.

3.3 Técnica de Compartilhamento Proposta

Dentre as técnicas de compartilhamento de corrente de carga duas se destacam: controle por inclinação e controle mestre-escravo. O primeiro tem como vantagem a fácil implementação e como desvantagem o fato de que quanto melhor o compartilhamento de corrente, pior a regulação da tensão de saída. Por sua vez, o mestre-escravo apresenta regulação de tensão precisa, entretanto caso não seja do tipo mestre automático, oferece um ou mais pontos possíveis de falha, comprometendo sua confiabilidade. Para este trabalho, foi construído um algoritmo que utiliza o controle por inclinação, através do método de impedância de saída virtual e acrescenta o controle mestre-escravo para gerenciar a entrada e saída das fontes em paralelo.

Os valores de potência que cada uma das fontes pode fornecer não é fixo, devido à característica de intermitência das mesmas, dessa forma, as potências disponíveis podem possuir valores similares ou não. Portanto, o controle por inclinação é proposto para realizar o compartilhamento proporcional de corrente de carga, ou seja, cada fonte alimenta a carga de maneira proporcional à sua capacidade de potência. Como não há quaisquer elementos de armazenamento, as potências disponíveis em cada fonte são calculadas, através dos seus parâmetros de entrada (irradiância e tensão), bem como a proporção de compartilhamento. A partir daí são geradas as referências de corrente, que são comparadas com as correntes reais de saída de cada conversor. Através do cálculo da resistência virtual instantânea, as

tensões de referência para cada conversor são ajustadas e a corrente de saída desejada é obtida.

A estratégia mestre-escravo é adicionada para permitir desativar o conversor definido como escravo, quando o mestre é capaz de suprir a potência demandada pela carga e reativá-lo quando a carga exigir maior potência. Para este trabalho, definiu-se como conversor mestre, aquele conectado à fonte de energia solar fotovoltaica. Assim, quando a energia gerada por essa é suficiente para manter a carga, a fonte eólica permanece desativada, entrando em funcionamento apenas, quando a potência demandada aumentar. Para garantir a confiabilidade da técnica de controle, o algoritmo permite que, no caso de uma falha na unidade mestre, o escravo assuma a alimentação da microrrede. O algoritmo mencionado encontra-se no Apêndice C.

3.3.1 Compartilhamento Proporcional

Os elementos armazenadores de energia são acrescentadas a um sistema por razões como manutenção da alimentação em casos de falta no fornecimento de energia, garantia de estabilidade da tensão ou a redução do consumo de energia durante o horário de pico. Entretanto, embora elas estejam se tornando cada vez mais acessíveis, o principal entrave atualmente para o uso extenso das baterias associadas a sistemas de energia renovável é o custo. Por exemplo, para um sistema em que se deseje maior autonomia, aumenta-se a quantidade de baterias. Além disso, é necessário adicionar um gerenciador de carga para as mesmas. Ressaltando que a bateria normalmente deve ser trocada a cada dois anos aproximadamente. Todos esses fatores impactam diretamente no custo do sistema tornando-o mais caro.

Os trabalhos acadêmicos utilizados como fonte de pesquisa para este projeto consideram a tensão de entrada e saída estáveis, entretanto optou-se aqui pelo não uso de componentes armazenadores de energia para estabilização das tensões. Além disso, as fontes utilizadas para alimentação do sistema tem como uma característica comum a intermitência. Esses fatores implicam em variações tanto da tensão de saída das fontes para os conversores, quanto da saída dos próprios conversores para o barramento. As variações estão dentro de limites que não prejudicam o funcionamento dos conversores nem das cargas acopladas ao barramento, no entanto são suficientes para causar desequilíbrio no compartilhamento das correntes de carga. Importante informar, que apesar deste projeto não definir uma microrrede que conte com armazenadores de energia, os mesmos podem ser acrescentados sem que isso interfira na sua funcionalidade.

Com base nas informação acima, decidiu-se adicionar à programação uma rotina capaz de calcular, a partir dos parâmetros de entrada das fontes geradoras de energia, a potência instantânea prevista. A previsão de potência instantânea fornecida pelos painéis fotovoltaicos é encontrada a partir da modelagem dos mesmos, realizada a partir da

metodologia descrita no trabalho de (BELLIA; YUCEF; FATIMA, 2014) e através do uso da linguagem de programação *Python*. A rotina de programação encontra-se no Apêndice C.1, através dessa rotina é gerado um arquivo na extensão .txt, que é transformado em uma matriz e inserido ao código do programa que realiza o compartilhamento das correntes de carga.

A potência instantânea prevista do aerogerador é encontrada através da geração de uma matriz, contendo valores obtidos em simulações realizadas no *software* PSIM, que relaciona as rotações do mesmo com a potência gerada. A matriz citada também é acrescentada à rotina do programa que realiza o compartilhamento de carga.

Obtidas as informações de potência de cada uma das fontes, a potência total prevista (P_t) é dada por:

$$P_t = P_1 + P_2 \quad (3.1)$$

Sendo:

P_1 - Potência prevista instantânea da fonte solar fotovoltaica;

P_2 - Potência prevista instantânea da fonte eólica.

P_t é tomada como 1 p.u. e as potências correspondentes a serem fornecidas por cada fonte são calculadas de maneira proporcional às suas capacidades, através da razão P_1/P_t e P_2/P_t .

As referências de corrente de saída para as fontes 1 e 2 (I_{ref1} e I_{ref2}) são calculadas a partir de:

$$I_{ref1} = P_{p1} * IL \quad (3.2)$$

$$I_{ref2} = P_{p2} * IL \quad (3.3)$$

Sendo:

P_{p1} - Proporção de potência da fonte solar, em p.u.;

P_{p2} - Proporção de potência da fonte eólica, em p.u.;

IL - Corrente da carga.

As correntes de saída podem então ser controladas ajustando as tensões de saída dos conversores com base nos valores acima calculados. Isso é melhor esclarecido no tópico seguinte.

3.3.2 Ajuste do Ganho de Inclinação

O controle por inclinação convencional reduz a tensão de saída à medida que a corrente de saída aumenta. Para isso, é usual utilizar a medição da corrente de saída do conversor, multiplicá-la por um ganho, que simula uma resistência virtual, definindo assim um desvio na referência de tensão.

O primeiro parâmetro a ser calculado é o valor máximo de desvio na tensão de referência para cada conversor. Esse valor deve ser o mais baixo possível para não reduzir muito a tensão de saída a ponto de prejudicar a alimentação da carga. A tensão de referência de saída (V_{ref}) definida nesse projeto é 315 V e o desvio máximo escolhido é de 5 V, que equivale a um percentual de 1,58 % da tensão de referência. A resistência de inclinação é calculada diretamente com base nesse valor, a partir da equação:

$$Rd = \frac{\Delta Vd}{i_{omax}} \quad (3.4)$$

Sendo:

Rd - Resistência de inclinação (*droop*);

ΔVd - Desvio de tensão de referência (V_{droop});

i_{omax} - Corrente máxima de um único conversor.

A tensão de referência de cada conversor, por sua vez, é definida como:

$$Vd = V_{ref} - (Rd * i_{med}) \quad (3.5)$$

Sendo:

Vd - Tensão *droop* de cada conversor;

i_{med} - Corrente de saída medida em cada conversor.

A partir dessa equação, percebe-se que controlando o valor de Rd é possível controlar a tensão de referência de cada conversor e, conseqüentemente, a corrente de saída dos mesmos, realizando assim o compartilhamento desejado.

Considerando que a proporção de compartilhamento varia de acordo com o fornecimento de potência instantâneo das fontes, os valores Rd devem ser calculados e ajustados a cada instante para controlar as tensões de saída dos conversores e permitir o compartilhamento de carga adequado. Os novos valores de Rd podem ser calculados como:

Para $i_{ref1} > i_{med1}$ e $i_{ref2} < i_{med2}$:

$$rd1 = rd1 - (k1 * i_{med1}) \quad (3.6)$$

$$rd2 = rd2 + (k2 * i_{med2}) \quad (3.7)$$

Para $i_{ref1} < i_{med1}$ e $i_{ref2} > i_{med2}$:

$$rd1 = rd1 + (k1 * i_{med1}) \quad (3.8)$$

$$rd2 = rd2 - (k2 * i_{med2}) \quad (3.9)$$

Augustine, Lakshminarasamma e Mishra (2016) explicam que as constantes $K1$ e $K2$ são os fatores de correção para o cálculo dos novos valores de resistência de inclinação.

Os autores acrescentam ainda, que o valor de $K1$ deve ser maior que $K2$ para manter a tensão de carga dentro dos limites. Caso contrário o decréscimo correspondente será grande e a mudança na tensão de saída do conversor será maior. Os valores de $K1$ e $K2$ foram respectivamente, 0,1 e 0,01. Após cada ajuste, os novos ganhos são utilizados para recalcular a tensão de referência para cada conversor ($Vd1$ e $Vd2$), até que a corrente desejada seja alcançada.

Em resumo, com base nas potências individuais calculam-se as proporções individuais ($Pp1$ e $Pp2$) e as correntes de referência para cada conversor ($Iref1$ e $Iref2$), que são comparadas às correntes de saída medidas ($imed1$ e $imed2$) e o ajuste dos valores de Rd é realizado até que se alcance os valores desejados de corrente de saída.

3.3.3 Conexão e Desconexão de Fonte

Para este projeto, a conexão ou desconexão de fonte é realizada levando em conta uma prioridade definida a partir das características das fontes de geração utilizadas. O aerogerador possui partes móveis que sofrem maior desgaste à medida que são mais utilizadas, o que gera maior custo de manutenção. O painel solar fotovoltaico, por outro lado, possui uma manutenção mais simples, que envolve normalmente inspeção e limpeza. Assim, optou-se pela fonte 1 (solar fotovoltaica), conectada ao conversor 1, como prioritária para alimentação da microrrede CC. A partir do momento em que a citada fonte passa a fornecer acima de 90% de sua capacidade de potência, a fonte 2 (eólica), interligada ao conversor 2, é conectada para assumir parte da alimentação da carga.

Essa prioridade pode ser alterada de acordo com outras situações desejadas, como prioridade por períodos do dia (durante o dia a preferência é pela fonte solar fotovoltaica e à noite pela fonte eólica) ou através do comportamento climático onde a microrrede está inserida. Essas opções exigem uma rotina de programação adicional que envolva dados relacionados a período de tempo e clima.

3.3.4 Proteções

A rotina de programação abrange também proteções contra sobretensão, subtensão e sobrecorrente. Os valores de tensão limite são 330 e 300 V, que equivalem a aproximadamente $\pm 5\%$ da variação da tensão padrão do barramento CC. Para corrente máxima o valor definido é 3 A, que corresponde a corrente de trabalho aproximada do conversor *Boost* de 1 kW trabalhando com a tensão de saída de 315 V.

No momento em que ocorre alguma das situações acima, o programa envia um comando para desconectar, por meio de relés, o conversor. A partir disso, a cada 10 segundos é enviado um novo comando na tentativa de reconectá-lo, caso o problema tenha sido solucionado, o mesmo volta a fornecer alimentação para o barramento, caso contrário,

permanece tentando até que o problema seja resolvido. Vale à pena ressaltar que os relés foram utilizados para realizar as proteções apenas a título de teste dessa funcionalidade, pois a abertura dos mesmos em corrente contínua gera arcos, assim eles serão em futuros trabalhos substituídos por chaves semicondutoras.

3.4 Simulações Computacionais

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações dos conversores *Boost* em paralelo, realizadas no *software* PSIM, para analisar o comportamento do sistema proposto, verificar o valor da tensão CC de saída fornecida pela microrrede, se há circulação de corrente entre os conversores e o compartilhamento de corrente de carga e potência. O esquema do circuito e os parâmetros das simulações encontram-se no Apêndice B.

Para possibilitar a análise, foram definidos três principais cenários de operação:

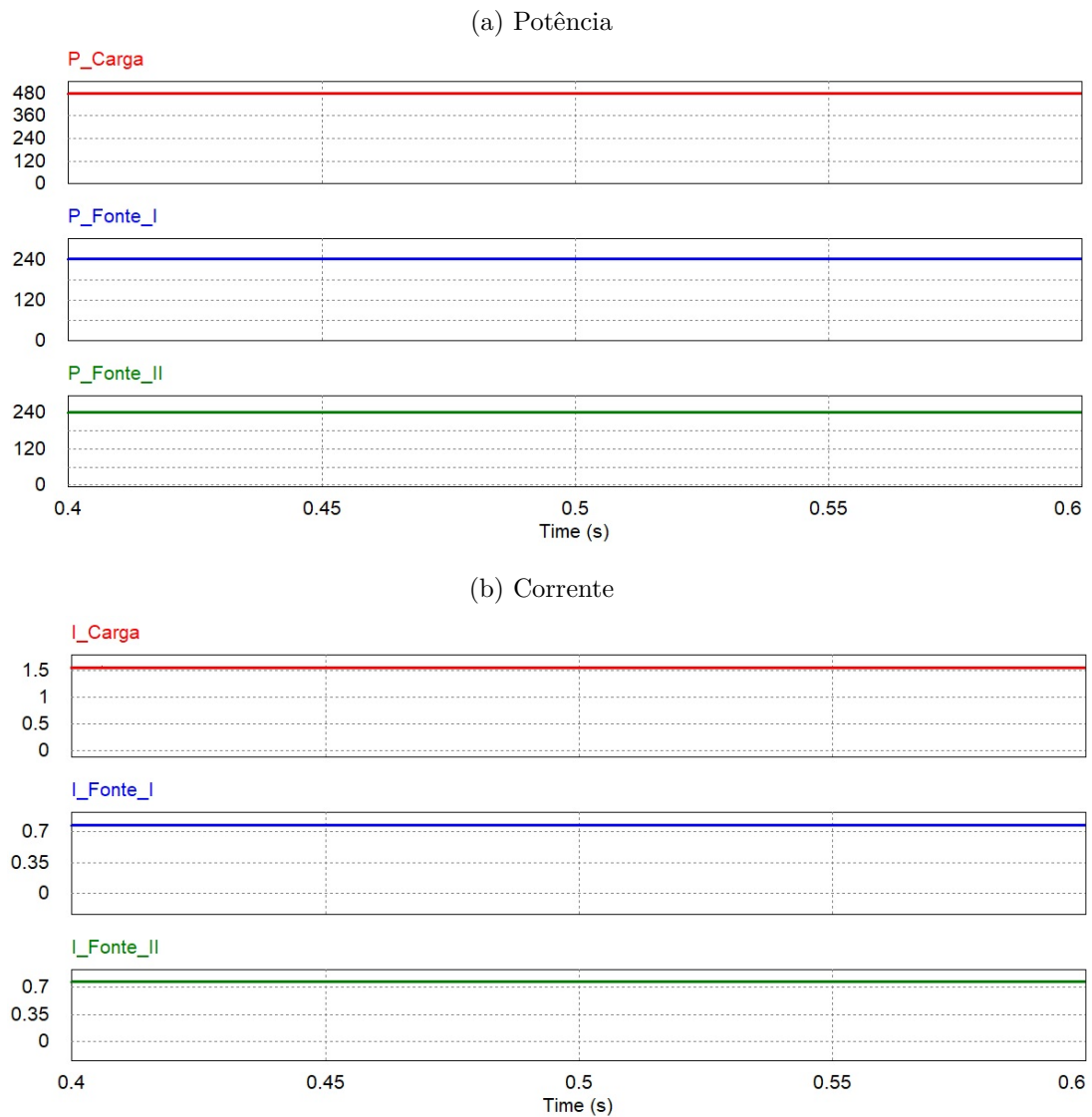
- Conversores associados em paralelo, cada um deles sendo alimentado por uma fonte de geração e há uma carga acoplada ao barramento CC. Dentro desse cenário são feitas as seguintes variações:
 - Valores de tensão das fontes geradoras e resistência de saída idênticas (a resistência de saída refere-se à resistência interna dos conversores aos quais as fontes estão acopladas e à resistência dos próprios condutores que realizam as conexões);
 - Valores de tensão das fontes geradoras diferentes e resistência de saída idênticas;
 - Valores de tensão das fontes geradoras idênticos e características internas diferentes (randomização dos valores da resistência dos componentes do conversor dentro de uma faixa de 20 %);
 - Valores de tensão das fontes geradoras diferentes e características internas diferentes.
- Conversores conectados em paralelo com adição de um diodo a saída de cada um.
- Utilização da técnica de compartilhamento de corrente de carga proposta, para conversores conectados em paralelo e alimentados por fontes de geração renovável. Cada conversor possui características internas e tensões de entrada diferentes. Há presença de uma carga acoplada ao barramento CC. Essa condição é desdobrada em:
 - Fontes geradoras com valores iguais de potências previstas;
 - Fontes geradoras com valores diferentes de potências previstas;
 - Fonte escolhida como prioritária com valor de potência disponível superior ao valor de potência da carga.

3.4.1 Identificação do Comportamento Não Controlado

O primeiro cenário de operação, definido acima, refere-se a um sistema onde os conversores estão conectados em paralelo sem que haja nenhuma técnica de controle de compartilhamento de carga. O objetivo é analisar o comportamento das potências e correntes fornecidas à carga conectada ao barramento CC comum, que por sua vez é alimentado por duas fontes de geração distintas. Considere para todos os casos a referência de tensão de saída para os conversores $Boost = 311 \text{ V}$ e $R_{carga} = 200 \Omega$. O primeiro cenário de operação é apresentado nas quatro situações:

1. Fontes gerando mesmo valor de tensão e apresentando resistências de saída idênticas. Sendo $V_1 = V_2 = 36 \text{ V}$. As curvas podem ser vistas na Figura 13:

Figura 13 – Geradores em paralelo com $V_1 = V_2$ e $R_1 = R_2$.



Fonte: Autoria própria.

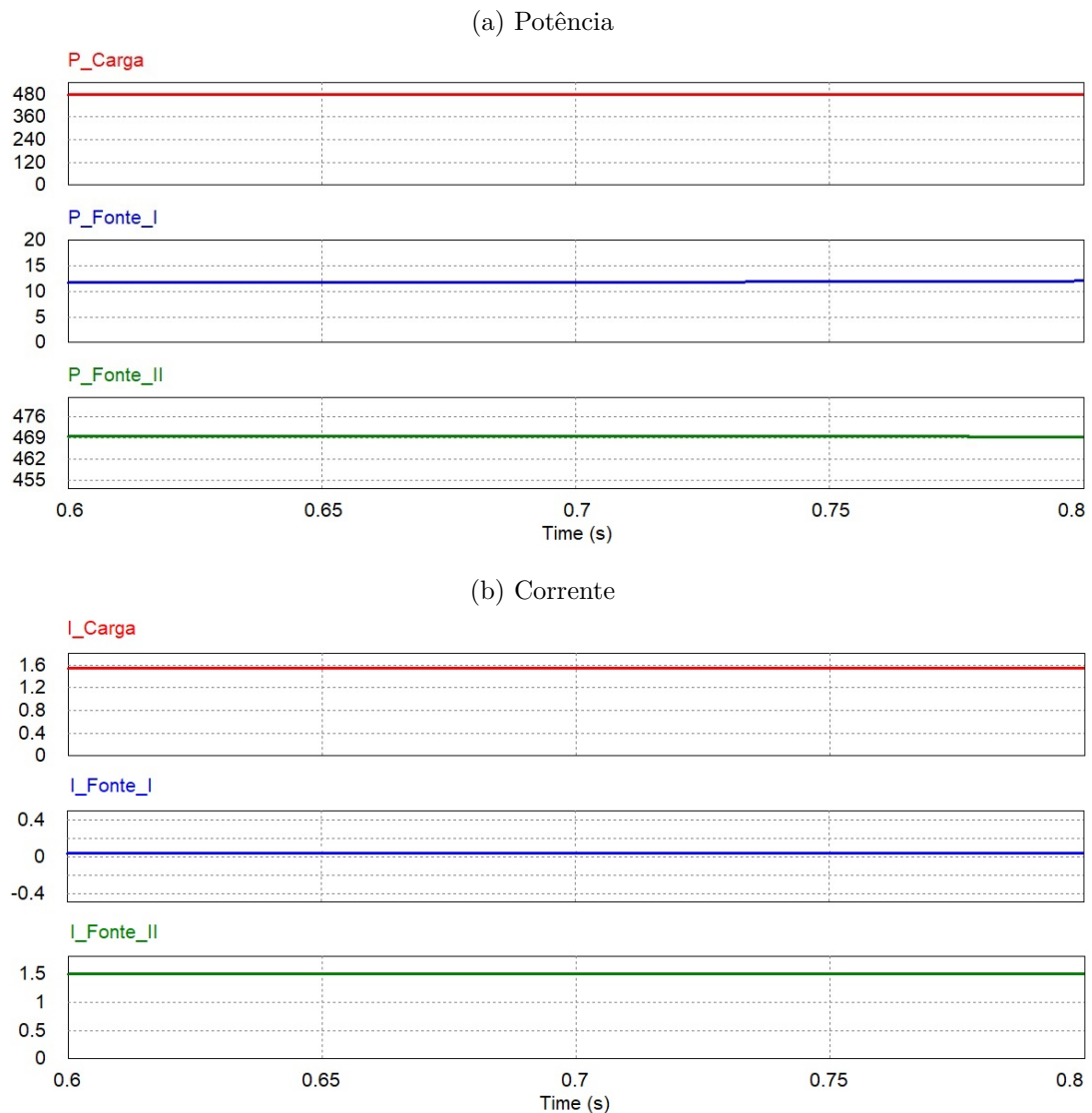
Neste caso as fontes dividem igualmente a corrente e potência fornecida para carga. Os valores médios das correntes e potências obtidos são:

- $I_{\text{Fonte-I}} = I_{\text{Fonte-II}} = 0,77 \text{ A}$ e $I_{\text{Carga}} = 1,55 \text{ A}$;
- $P_{\text{Pot-I}} = P_{\text{Pot-II}} = 240,50 \text{ W}$ e $P_{\text{Carga}} = 481 \text{ W}$.

Essa condição de compartilhamento equivalente seria possível quando a tensão gerada pelas fontes, a resistência de saída dos conversores e a resistência da linha que conecta os mesmos ao barramento fossem exatamente iguais. Situação raramente obtida na prática.

2. Fontes gerando valores de tensão diferentes ($V1 = 41 \text{ V}$ e $V2 = 48 \text{ V}$) e apresentando resistências de saída idênticas. As curvas de corrente e potência encontram-se ilustradas na Figura 14:

Figura 14 – Geradores em paralelo com $V1 \neq V2$ e $R1 = R2$.



Fonte: Autoria própria.

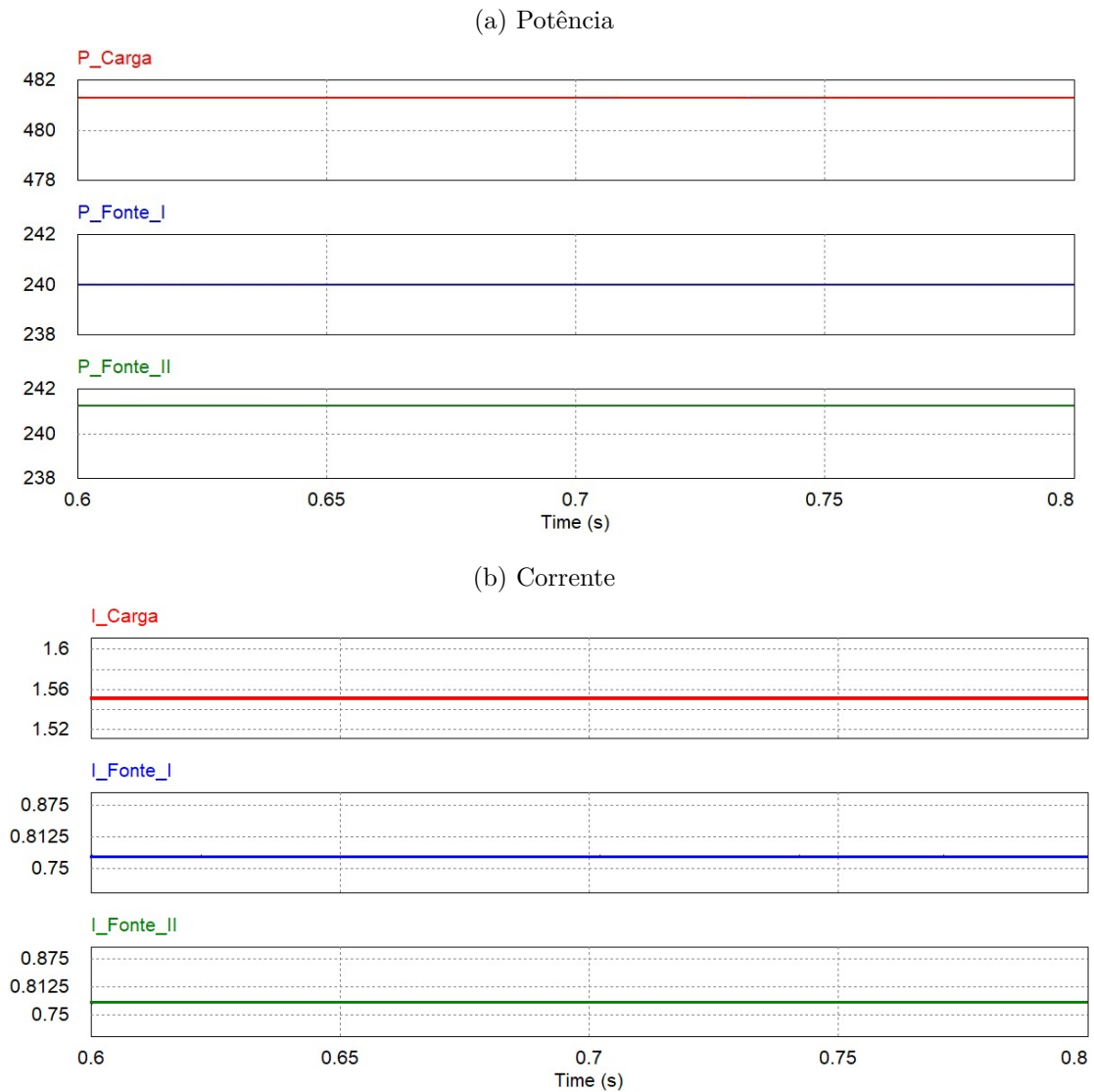
Neste caso a fonte de maior tensão de entrada (valor 17 % maior), fonte 2, fornece 97,50 % da potência demandada pela carga:

- $I_{\text{Fonte-I}} = 0,04 \text{ A}$, $I_{\text{Fonte-II}} = 1,51 \text{ A}$ e $I_{\text{Carga}} = 1,55 \text{ A}$;
- $P_{\text{Pot-I}} = 12,04 \text{ W}$, $P_{\text{Pot-II}} = 469,27 \text{ W}$ e $P_{\text{Carga}} = 481,31 \text{ W}$.

Além disso há o surgimento de uma corrente circulante. Isso significa que a fonte 2 além de assumir a carga, injeta potência na fonte 1.

- Fontes gerando valores de tensão iguais e apresentando resistências de saída diferentes. As curvas de corrente e potência podem ser vistas na Figura 15:

Figura 15 – Geradores em paralelo com $V_1 = V_2$ e $R_1 \neq R_2$.



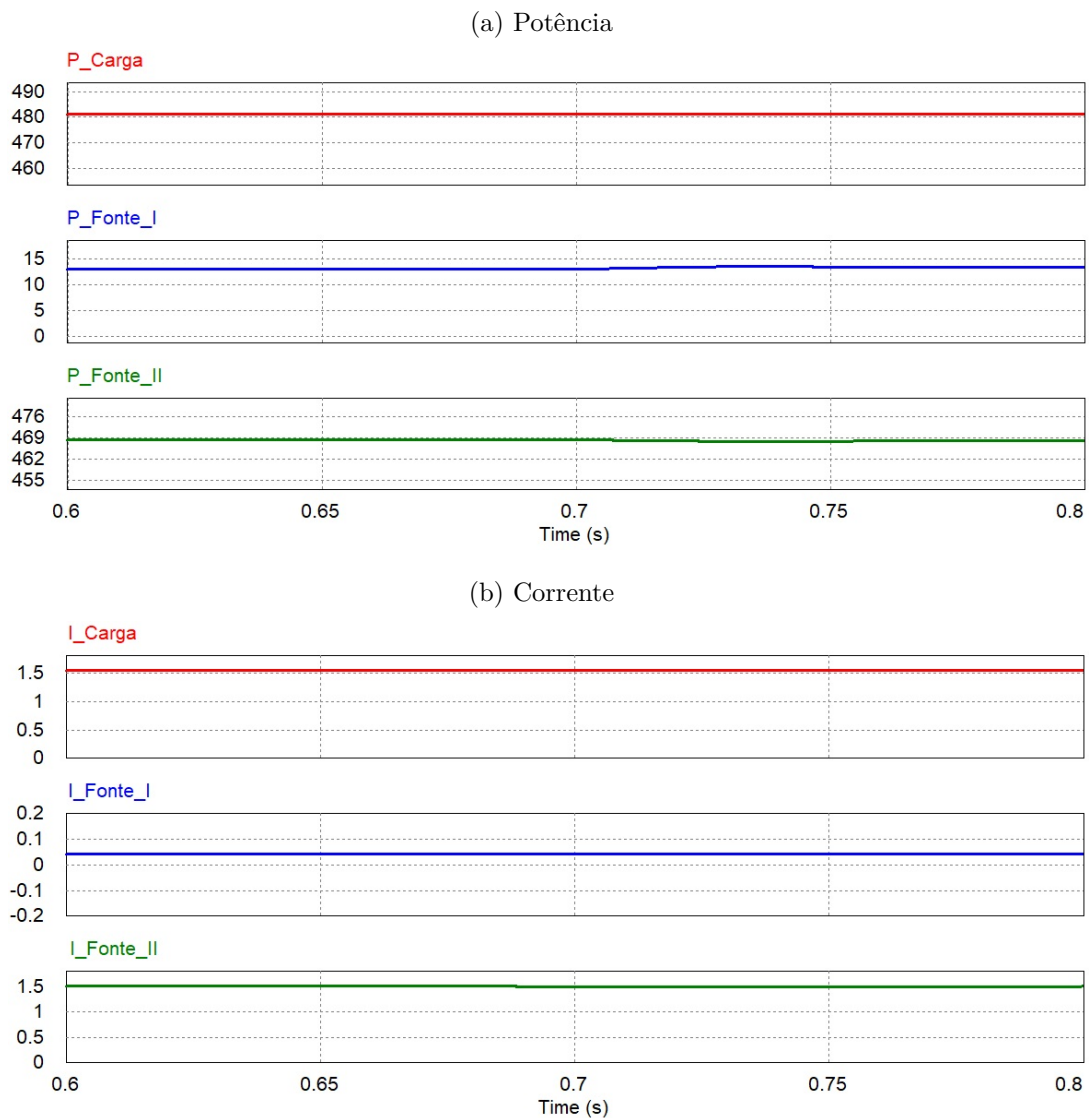
Fonte: Autoria própria.

Na realidade prática, mesmo que sejam de um mesmo fabricante, os conversores apresentam diferenças em sua resistência interna devido ao processo de fabricação e

da tolerância dos seus componentes construtivos. Para representar essas diferenças, nesta simulação, todos os componentes do conversor 1 (conectado à fonte 1) recebem um aumento de 20 % em seus valores nominais de resistência. Assim, como a fonte 1 apresenta resistência de saída maior, a fonte 2 fornece à carga um valor de potência um pouco maior. Esse valor crescerá à medida que a diferença entre as resistências das fontes aumentarem.

- $I_{\text{Fonte-I}} = 0,773 \text{ A}$, $I_{\text{Fonte-II}} = 0,777 \text{ A}$ e $I_{\text{Carga}} = 1,550 \text{ A}$;
 - $P_{\text{Pot-I}} = 240,01 \text{ W}$, $P_{\text{Pot-II}} = 241,26 \text{ W}$ e $P_{\text{Carga}} = 481,27 \text{ W}$.
4. Fontes gerando valores de tensão diferentes ($V_1 = 41 \text{ V}$ e $V_2 = 48 \text{ V}$) e apresentando resistências de saída diferentes (aumento de 20 % para o conversor conectado à fonte 1). As curvas encontram-se na Figura 16:

Figura 16 – Geradores em paralelo com $V_1 \neq V_2$ e $R_1 \neq R_2$, sendo $V_1 < V_2$ e $R_1 > R_2$.



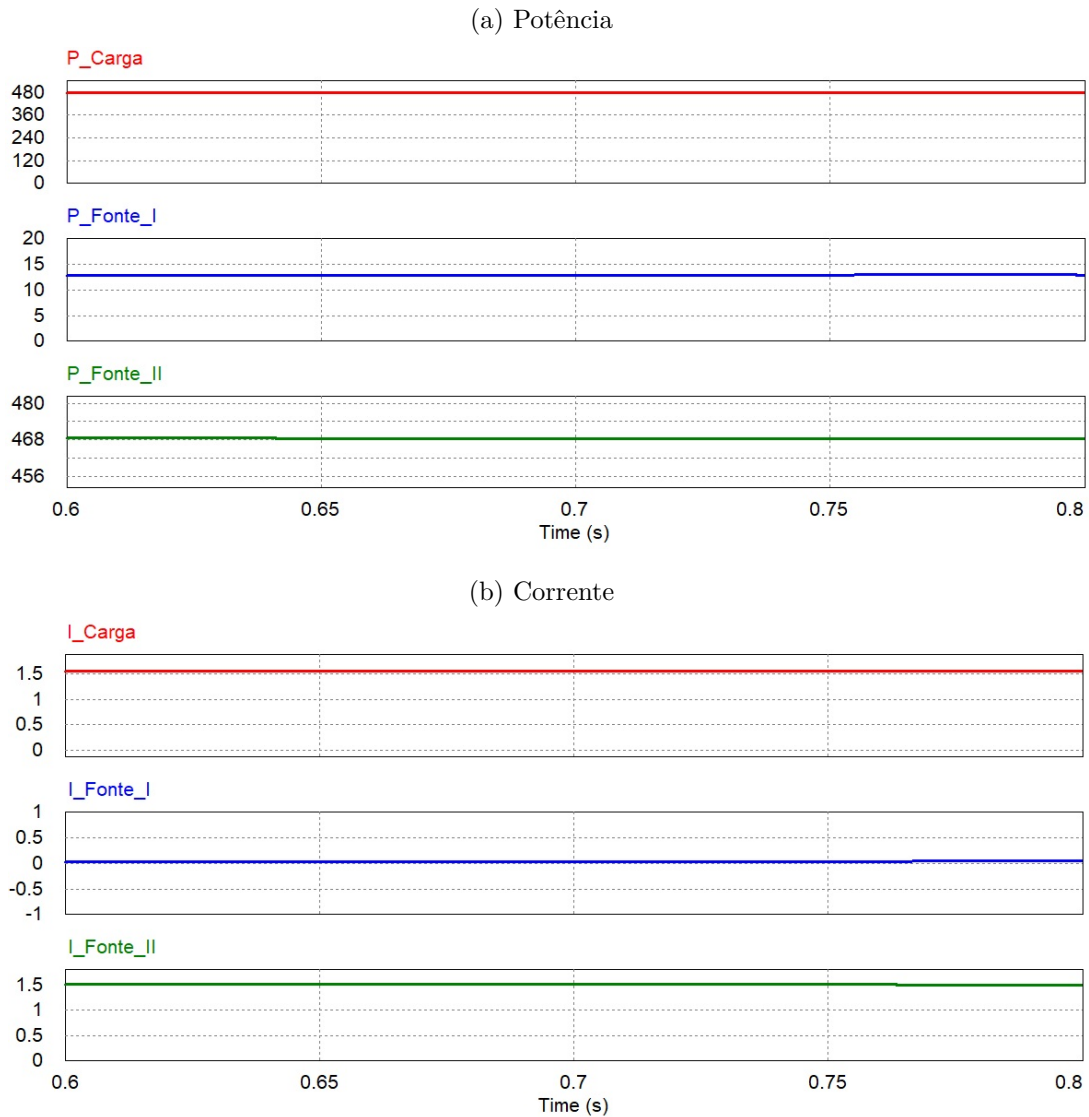
Fonte: Autoria própria.

Essa será a situação com maior ocorrência na realização das práticas. Neste caso a fonte 2, que possui maior tensão e menor resistência, fornece toda potência demandada pela carga e há o surgimento de uma corrente circulante. Isso significa que a fonte 2 além de assumir a carga, injeta potência na fonte 1. Os valores de corrente e potência são:

- $I_{\text{Fonte-I}} = 0,04 \text{ A}$, $I_{\text{Fonte-II}} = 1,51 \text{ A}$ e $I_{\text{Carga}} = 1,55 \text{ A}$;
- $P_{\text{Fonte-I}} = 12,86 \text{ W}$, $P_{\text{Fonte-II}} = 468,42 \text{ W}$ e $P_{\text{Carga}} = 481,28 \text{ W}$.

Dentro deste cenário, pode-se ainda visualizar, na Figura 17, o resultado para o caso em que a fonte de maior tensão de entrada é também a fonte de maior resistência de saída (aumento de 20 % de resistência para o conversor conectado à fonte 2):

Figura 17 – Geradores em paralelo com $V_1 \neq V_2$ e $R_1 \neq R_2$, sendo $V_1 < V_2$ e $R_1 < R_2$.



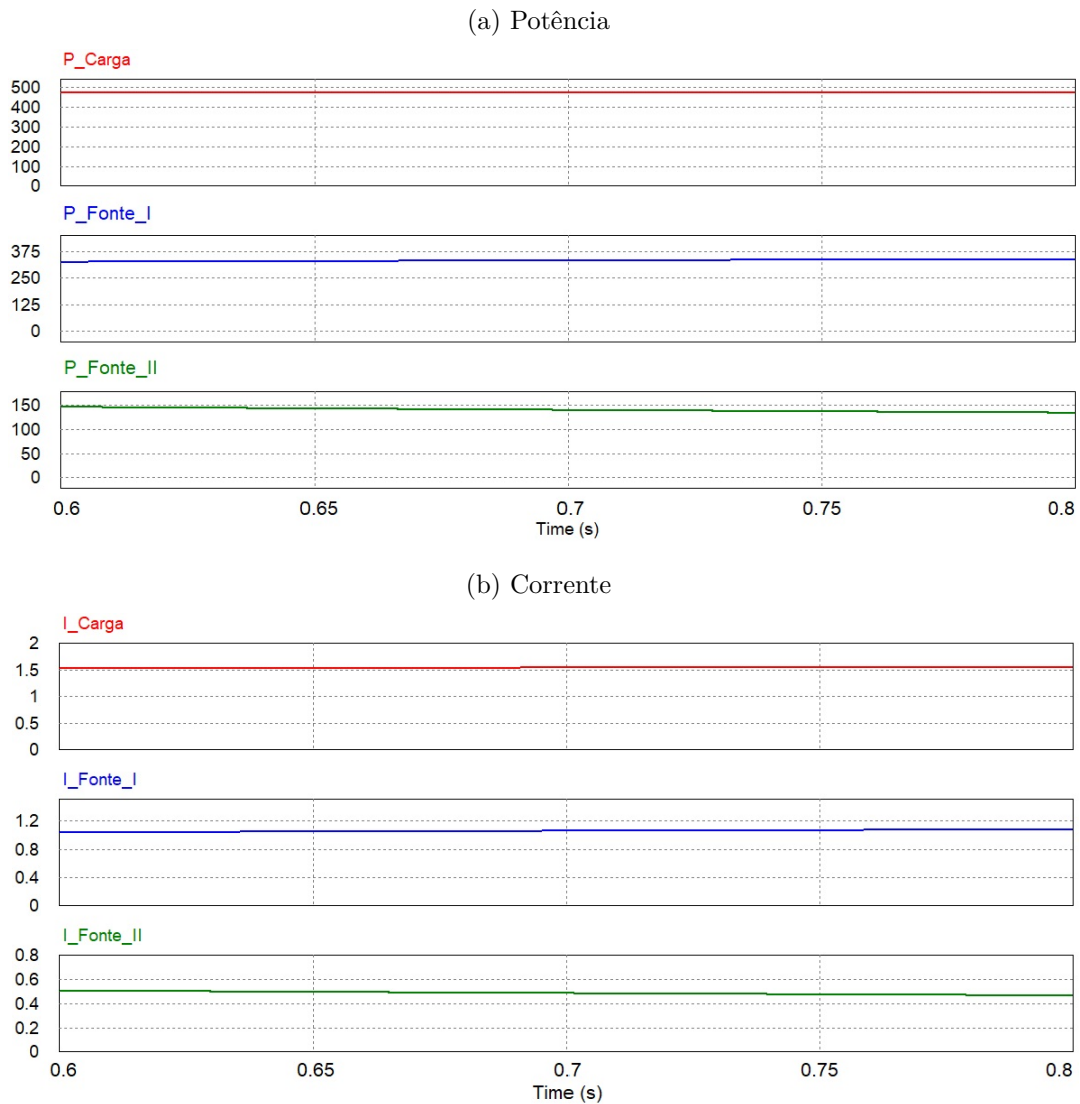
Fonte: Autoria própria.

Os valores de corrente e potência são:

- $I_{\text{Fonte-I}} = 0,04 \text{ A}$, $I_{\text{Fonte-II}} = 1,51 \text{ A}$ e $I_{\text{Carga}} = 1,55 \text{ A}$;
- $P_{\text{Pot-I}} = 13,19 \text{ W}$, $P_{\text{Pot-II}} = 468,14 \text{ W}$ e $P_{\text{Carga}} = 481,33 \text{ W}$.

A resistência de linha que conecta o conversor ao barramento de carga também contribui para o desequilíbrio no compartilhamento das correntes. Na Figura 18 é visto o comportamento das correntes e potências após a inserção de uma resistência de $0,5 \Omega$ à linha que conecta o conversor 2 ao barramento comum.

Figura 18 – Geradores em paralelo com $V1 \neq V2$ e $R_{\text{linha_I}} \neq R_{\text{linha_II}}$, sendo $V1 < V2$ e $R_{\text{linha_I}} < R_{\text{linha_II}}$.



Fonte: Autoria própria.

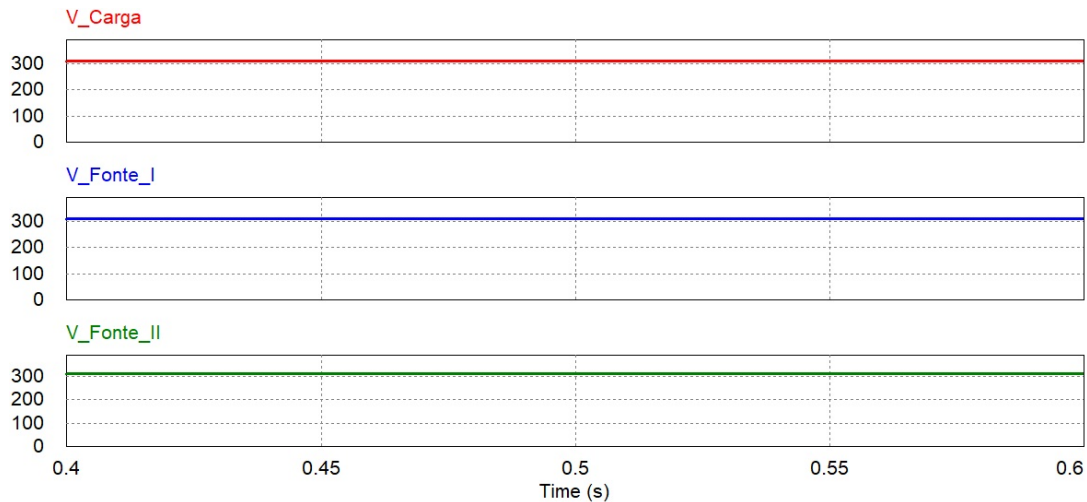
Os valores de corrente e potência são:

- $I_{\text{Fonte-I}} = 1,05 \text{ A}$, $I_{\text{Fonte-II}} = 0,49 \text{ A}$ e $I_{\text{Carga}} = 1,54 \text{ A}$;
- $P_{\text{Pot-I}} = 328,73 \text{ W}$, $P_{\text{Pot-II}} = 143,34 \text{ W}$ e $P_{\text{Carga}} = 472,07 \text{ W}$.

Aqui percebe-se que a fonte 1 passa a assumir a maior parte do fornecimento de potência, diferentemente dos valores vistos nas Figuras 16 e 17. Isso ocorre porque o fato de $R_{\text{linha_II}}$ e R_2 serem de maior valor que $R_{\text{linha_I}}$ e R_1 , acaba compensando a disparidade do compartilhamento por conta da tensão V_2 ser maior que V_1 . Essa compensação varia conforme o valor da resistência. Ressaltando que na prática não é adequado a adição de uma resistência física para corrigir o compartilhamento de carga em uma microrrede, devido às perdas por dissipação de potência. A simulação com essa condição é apenas ilustrativa.

Para todos os cenários mostrados acima, as tensões de carga e saída dos conversores conectados a cada fonte apresentaram valores iguais entre si, conforme visualiza-se na Figura 19, e se mantiveram entre 309 e 311 V:

Figura 19 – Tensões de carga e de saída dos conversores.



Fonte: Autoria própria.

Através dos resultados das simulações, percebe-se que para ligação de conversores em paralelo sem que se faça uso de qualquer técnica de compartilhamento, as diferenças de tensões ou resistências causam compartilhamento desigual de carga. Nota-se também que a diferença de tensão das fontes causa mais desigualdades que a de resistência. Entretanto, que esta última pode compensar a desigualdade de compartilhamento causada pelas tensões de entrada diferentes.

Identificado o comportamento de fontes operando em paralelo, faz-se necessário utilizar métodos de compartilhamento de corrente de carga. Azevedo (2011) explica que a conexão de várias fontes de tensão em paralelo requer técnicas de controle bem elaboradas para evitar circulação de corrente entre as fontes e compartilhar adequadamente as demandas de carga. O problema do compartilhamento desigual de carga vai desde o estresse de alguns conversores até a atuação da proteção devido a correntes circulantes, no sentido inverso ao desejado (TAHIM et al., 2015).

A seguir encontram-se os resultados de simulações utilizando a técnica de compartilhamento de corrente de carga proposta.

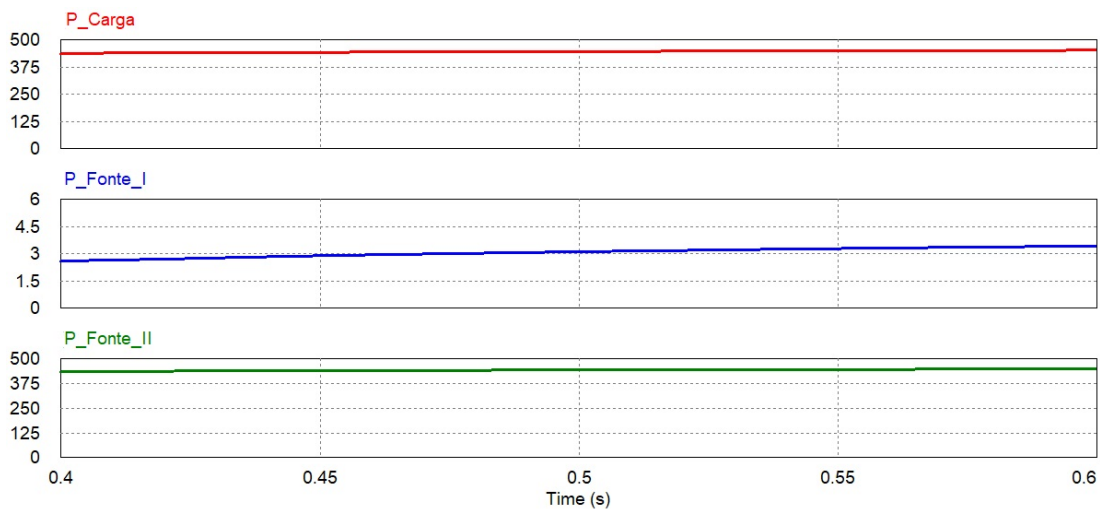
3.4.2 Simulações com a Técnica de Compartilhamento Proposta

Nas simulações a seguir foi feito uso dos blocos DLL do *software* PSIM para escrever a rotina de programação responsável pela execução da técnica de compartilhamento de carga. Os blocos citados permitem que um código em linguagem C seja escrito, compilado em arquivo DLL e vinculado ao PSIM.

Ao conectarmos fontes em paralelo, normalmente elas possuem tensões diferentes e resistência interna e de linha diferentes. Assim, as simulações foram feitas para este caso. Considerou-se a como fonte 1 a solar fotovoltaica e fonte 2, a eólica. A fonte 1 fornece uma tensão de 42 V, que é elevada pelo conversor *Boost* até 311 V, que são aplicados ao barramento comum de carga. A fonte 2, por sua vez, fornece uma tensão de 50 V, elevada para 311 V e aplicada ao barramento comum. Para gerar diferença entre as resistências internas dos conversores *Boost* acoplados a cada fonte, foi adicionado o valor de 10 % na resistência interna de cada componente construtivo para fonte de menor tensão de entrada, no caso, a fonte eólica. O valor da carga é 200 Ω .

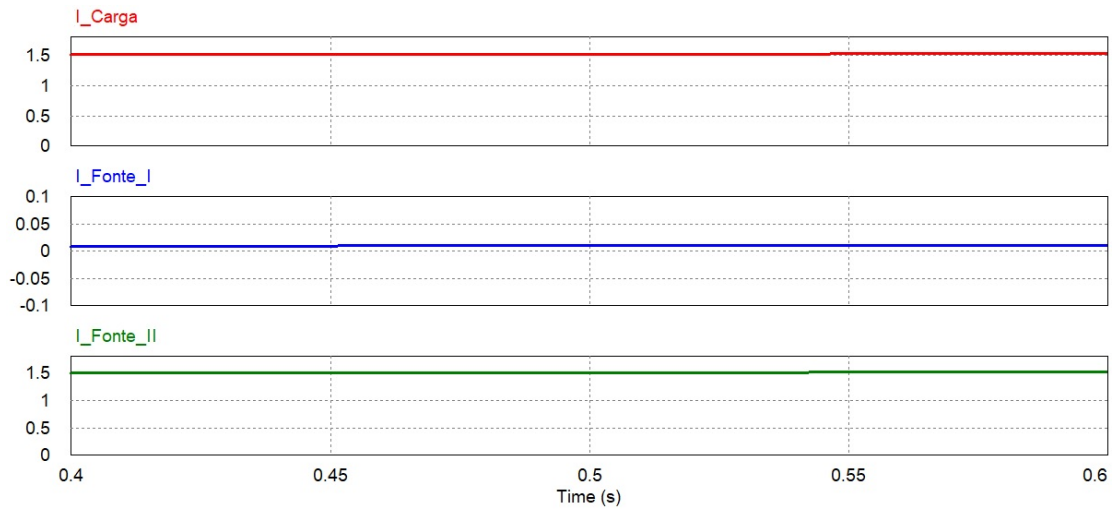
Inicialmente é simulada a situação referente ao segundo cenário listado na seção 3.4, onde são acrescentados diodos nas saídas de cada conversor, no intuito de evitar a circulação de corrente na fonte de menor tensão ou resistência. O resultado pode ser visto nas Figuras 20 e 21.

Figura 20 – Compartilhamento de potência com uso de diodos.



Fonte: Autoria própria.

Figura 21 – Compartilhamento de corrente de carga com uso de diodos.

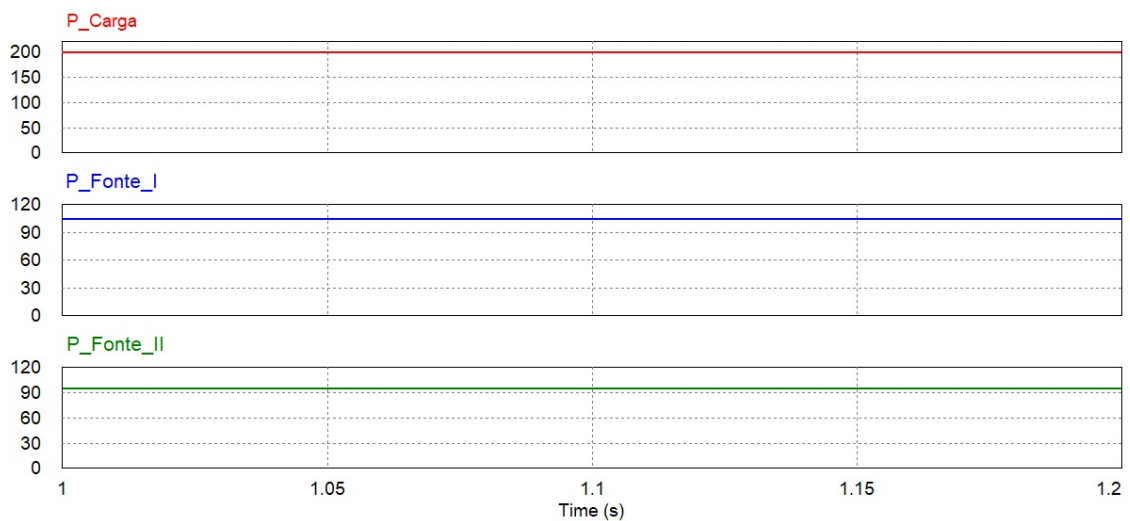


Fonte: Autoria própria.

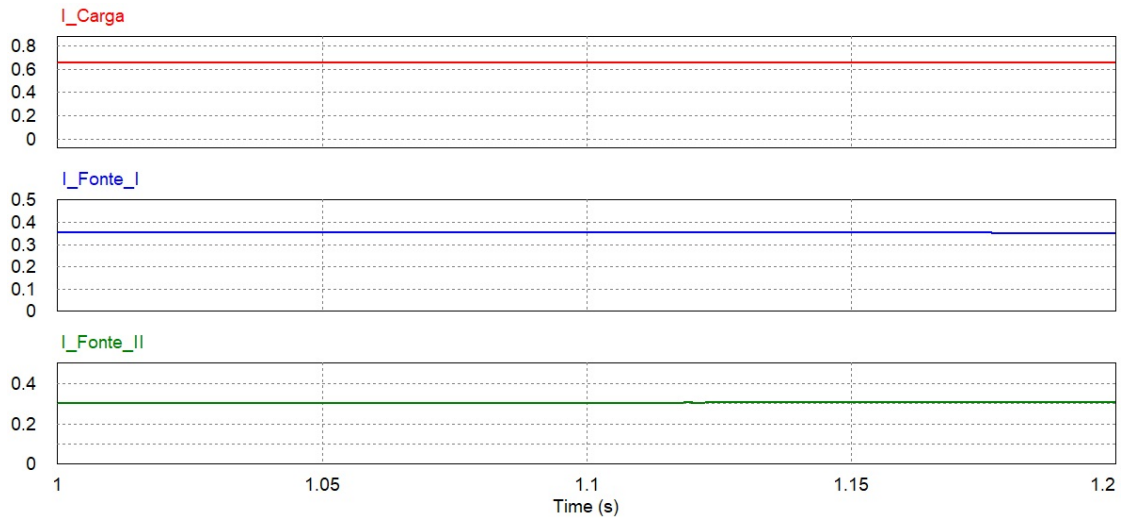
Nesse cenário não ocorre a circulação de corrente na fonte de menor tensão (fonte 1), entretanto não há compartilhamento justo entre elas. A fonte de maior tensão (fonte 2), assume o fornecimento quase total de potência. Para que seja possível o real compartilhamento, é aplicada a técnica proposta neste trabalho, anteriormente descrita.

Na sequência, podem ser vistas as simulações referentes ao terceiro cenário listado na seção 3.4, onde há diferença entre as tensões de alimentação e resistências internas.

Nas Figuras 22 e 23, pode-se observar o comportamento das correntes e potência da carga e das fontes, para o caso em que as fontes têm disponibilidade de potência iguais (Considere $P_1 = P_2 = 150 \text{ W}$ e carga = 470Ω .)

Figura 22 – Compartilhamento de potência para $P_1 = P_2$.

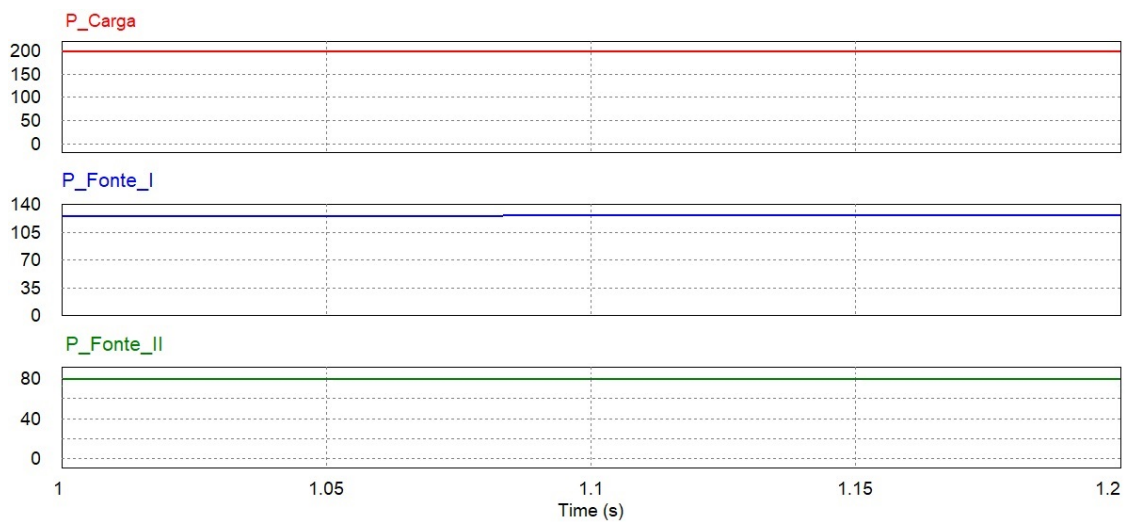
Fonte: Autoria própria.

Figura 23 – Compartilhamento de corrente de carga para $P1 = P2$.

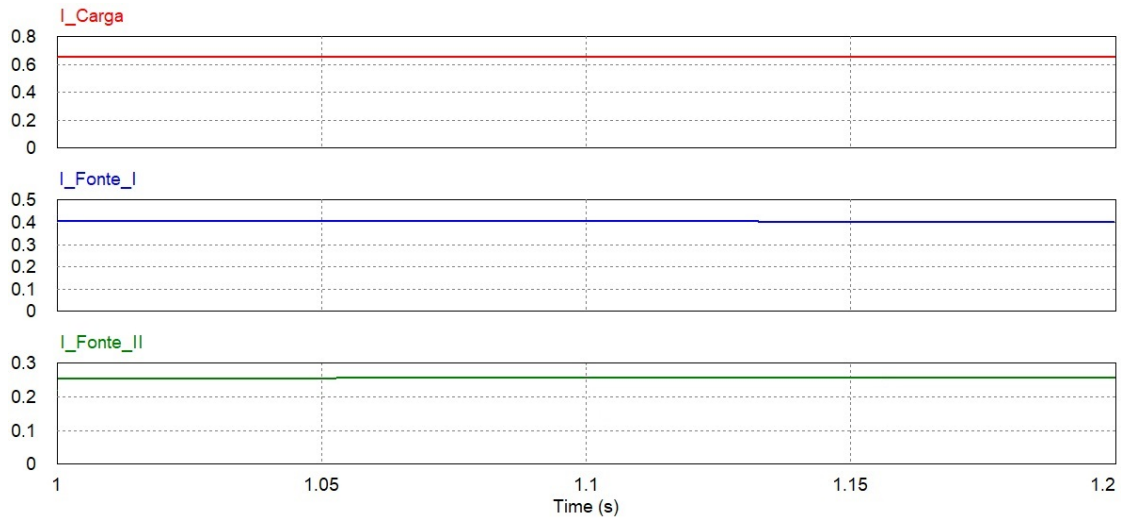
Fonte: Autoria própria.

Neste caso, o resultado esperado é o compartilhamento igual de correntes e potência, ou seja, cada uma das fontes deve assumir 50 % da alimentação da carga. As correntes médias obtidas na simulação foram: $I1 = 0,35$ A; $I2 = 0,31$ A e $Ic = 0,66$ A; o que equivale a 53,03 % e 46,96 %, respectivamente. Enquanto as potências fornecidas pelas fontes foram: $P1 = 109,10$ W e $P2 = 94,90$ W; ou seja, 53,48 % e 46,51 %. A potência consumida pela carga é $Pc = 204$ W. O erro de compartilhamento é de 3,04 % para as correntes e 3,49 % para as potências.

Para o caso de potências disponíveis diferentes ($P1 = 170$ W e $P2 = 120$ W), o resultado pode ser visto nas Figuras 24 e 25.

Figura 24 – Compartilhamento de potência para $P1 \neq P2$.

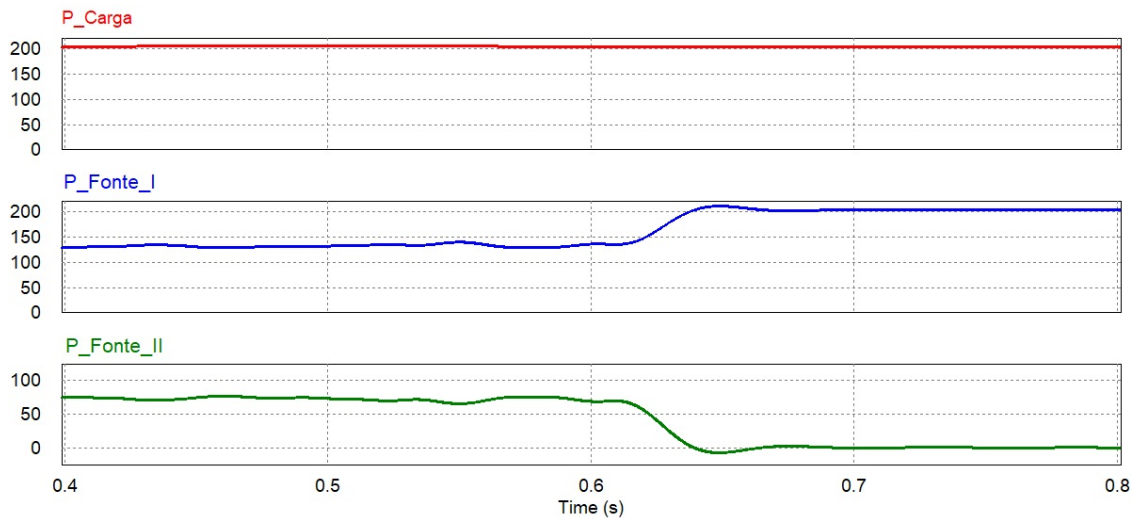
Fonte: Autoria própria.

Figura 25 – Compartilhamento de corrente de carga para $P1 \neq P2$.

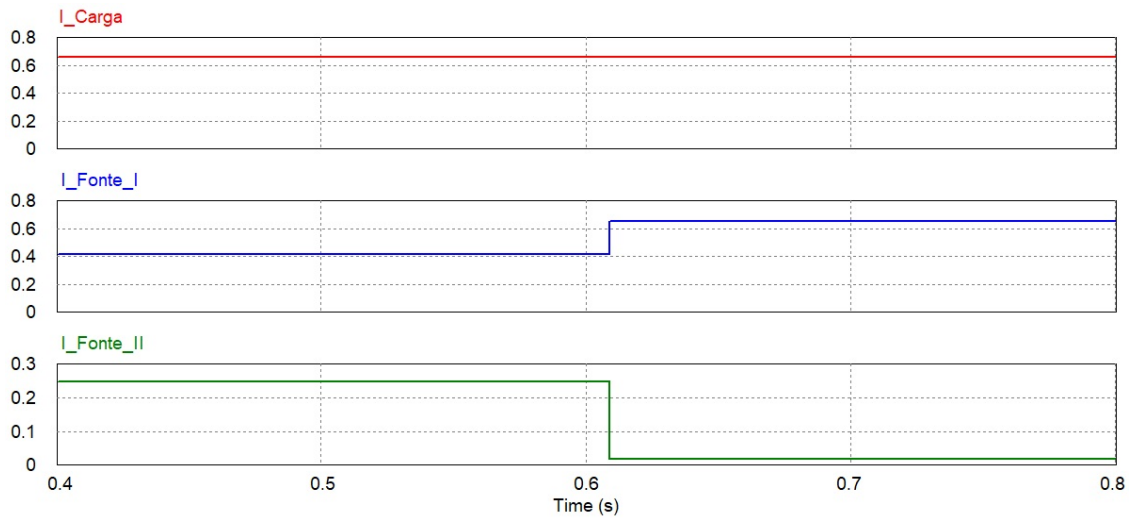
Fonte: Autoria própria.

O resultado esperado seria que a fonte 1 assumisse 58,62 % da potência fornecida para carga. Os valores obtidos na simulação são: $I1 = 0,40$ A; $I2 = 0,26$ A e $Ic = 0,66$ A; o que equivale a 60,60 % e 39,39 %, respectivamente. Enquanto as potências fornecidas pelas fontes foram: $P1 = 124,70$ W e $P2 = 80,10$ W; equivalendo a 60,88 % e 39,11 %. A potência consumida pela carga é $Pc = 204,80$ W. O erro de compartilhamento é de 1,99 % para as correntes e 2,27 % para as potências.

Uma funcionalidade da técnica proposta é a retirada da fonte eólica quando a fonte de energia solar for capaz de alimentar a carga. A fonte solar foi escolhida como prioritária, pois a microrrede está instalada em um local de bons recursos solares, o sistema não apresenta barulho, possui uma maior longevidade e manutenção mais barata. O resultado pode ser visto nas Figuras 26 e 27.

Figura 26 – Compartilhamento de potência para $P1 > Pcarga$.

Fonte: Autoria própria.

Figura 27 – Compartilhamento de corrente de carga para $P_1 > P_{\text{carga}}$.

Fonte: Autoria própria.

No instante inicial da simulação, as fontes 1 e 2 possuem potências respectivas de 170 e 120 W. Elas estão compartilhando a alimentação da carga conforme visto nas Figuras 24 e 25. A partir do instante 0,6 segundos, a potência da fonte 1 passa a ser 240 W, tornando-se maior que a potência da carga, assim, a fonte 2 é desligada do sistema. Caso a irradiância solar reduza e a potência dessa fonte não consiga suprir a carga, a fonte 2 será novamente introduzida ao sistema.

3.5 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados e discutidos os resultados de simulações para conversores *Boost* conectados em paralelo. Inicialmente, foi realizada a simulação para um cenário ideal, onde os conversores eram idênticos, apresentando consequentemente corrente e potência de saída equilibradas. Entretanto na prática, os conversores mostram diferenças na sua resistência interna, na resistência dos condutores que os interligam, nas tensões e potências fornecidas. Assim, foram simulados diversos cenários visando apresentar o impacto da variação de cada um desses parâmetros isoladamente, como também um cenário que se aproxima da realidade, onde todos os parâmetros de ambos os conversores apresentam valores diferentes. Para este último, foi possível testar as técnicas de compartilhamento de corrente de carga antes da implementação prática. Este foi um procedimento importante, pois permitiu evitar possíveis erros na construção da microrrede proposta, que poderiam por em risco a integridade dos componentes utilizados. Os resultados mostraram que o método realiza o compartilhamento de corrente de carga proporcional à disponibilidade de potência de cada fonte, apresentando um erro máximo aproximado de 3,49 %.

4 Resultados Experimentais

4.1 Bancada Experimental

A microrrede CC foi implementada no Laboratório de Processamento de Energia (LPE), do Instituto Federal do Ceará - IFCE - Campus Fortaleza. A sua estrutura pode ser vista no Apêndice A. Algumas informações importantes sobre as partes constituintes dessa microrrede são vistas logo abaixo.

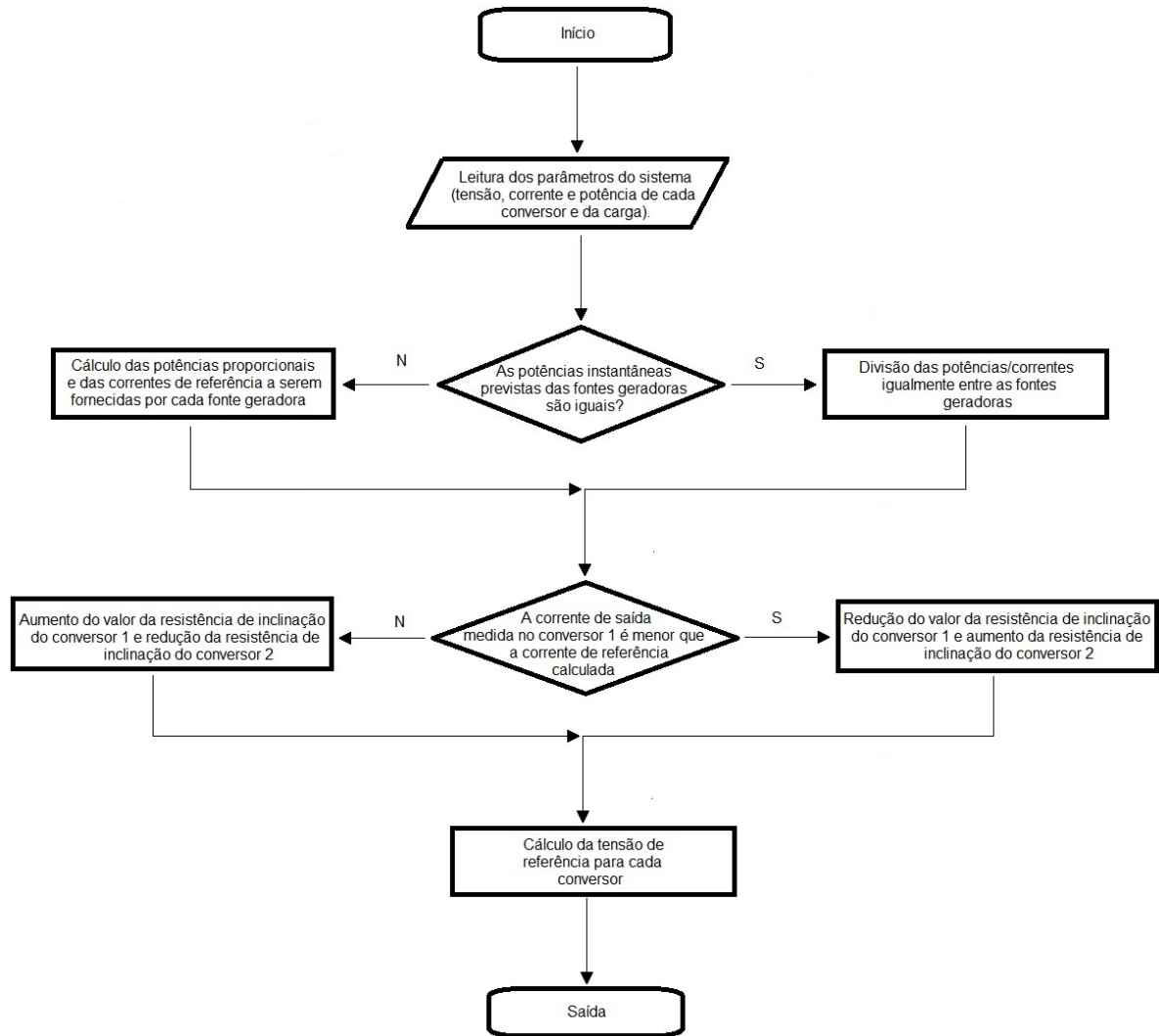
O gerador síncrono de ímã permanente do aerogerador (Apêndice A) possui eixo diretamente acoplado ao eixo de um motor de indução trifásico (MIT), do fabricante WEG, com potência para baixa rotação de 3,0 cv e IV polos. O acionamento do MIT é realizado através de um conversor de frequência, também da marca WEG, modelo CFW-08, com entrada monofásica 220 Vef e saída trifásica de 220 Vef. Esse conversor permite a variação de rotação do eixo do motor, que representa diferentes valores de velocidade média do vento. Quanto à fonte solar fotovoltaica, dois painéis são ligados em série e a previsão de potência que pode ser fornecida se dá através da comparação dos dados referentes à tensão gerada e aos níveis de irradiância que incidem no local com a matriz gerada pela modelagem dos painéis (Apêndice C.1).

A tensão trifásica do gerador de ímã permanente é retificada e entregue à entrada de um dos conversores *Boost*, com valor de aproximadamente 52 V. A tensão gerada pelos painéis solares é entregue diretamente à entrada de um dos conversores *Boost*, com valor aproximado de 60 V. As tensões de saída dos dois conversores *Boost*, por sua vez, são ligadas ao barramento CC comum, onde a carga está também conectada.

O controle de compartilhamento de corrente de carga foi gravado em um componente adicional, pois optou-se, em um primeiro momento, por não alterar a construção física dos conversores *Boost* utilizados. Entretanto, em futuros trabalhos, uma nova placa será desenvolvida e todo o processamento será gravado em um mesmo microcontrolador. O componente escolhido foi o Arduino, sendo que cada conversor possui um associado a si. Nele é feita a previsão das potências que a fonte pode fornecer, o cálculo da proporção de compartilhamento, além das correntes de referência e do incremento ou decremento do ganho necessário para obtê-las. A partir daí gera-se um sinal, através das suas saídas digitais, para os pinos de I/O RB3 e RB4 do dsPIC30F4013 presente na placa de controle de tensão de cada um dos conversores *Boost*, que incrementa ou decrementa o valor de *setpoint*. O controlador digital de tensão atua seguindo constantemente a referência dada, assim a tensão na saída aumenta ou diminui, variando, por consequência, as correntes de saída. Na Figura 28 é possível visualizar um fluxograma para melhor esclarecer o ajuste

do ganho de inclinação.

Figura 28 – Fluxograma para ajuste das correntes compartilhadas.



Fonte: Autoria própria.

Entre os dois Arduinos (um de cada *Boost*) há comunicação sem fio, onde cada um compartilha suas informações de corrente e potência. A comunicação se dá através do uso do *Ethernet Shield W5100*, baseado no chip *ethernet* da *WIZnet ethernet W5100* que fornece acesso à rede através de um protocolo de comunicação, que será melhor explicado na seção seguinte.

As proteções contra subtensão, sobretensão e sobrecorrente são feitas através de relés, que recebem comandos enviados pelo Arduino para desconectar ou reconectar o conversor desejado. A carga escolhida para os testes foi um banco de resistores com resistências de valores 320 Ω , 470 Ω e 880 Ω .

4.2 Aquisição de Dados

Para realizar o compartilhamento de corrente de carga faz-se necessário medir as grandezas do sistema. Assim, foram adicionados sensores de corrente nas saídas de cada um dos conversores *Boost* e na carga, além de sensores de tensão na saída das fontes de geração e no barramento comum de carga. Para medição de corrente são usados três sensores ACS712, de 5 A. Além de sensores de tensão por divisor resistivo.

As informações medidas por todos os sensores citados são enviadas à rotina de programação para realização da técnica de compartilhamento que, por sua vez, encontra-se gravada em uma placa microcontroladora, Arduino Uno, baseada no ATmega328P. A mesma possui 14 pinos de entrada/saída digital, 6 entradas analógicas, um cristal de quartzo de 16 MHz, uma conexão USB, um conector de energia, um conector ICSP (In Circuit Serial Programming) e um botão de *reset*.

Para adquirir os valores de irradiância, utilizou-se um circuito eletrônico que tem por base a placa de prototipagem NodeMCU ESP-12E, onde há um circuito configurado para funcionar como piranômetro. A placa *open source* NodeMCU ESP-12E é uma plataforma para utilização em IoT e possui Wi-Fi integrado e um microcontrolador ESP8266EX SoC (*System on a Chip*), de 32 bits e arquitetura RISC produzido pela empresa Espressif System.

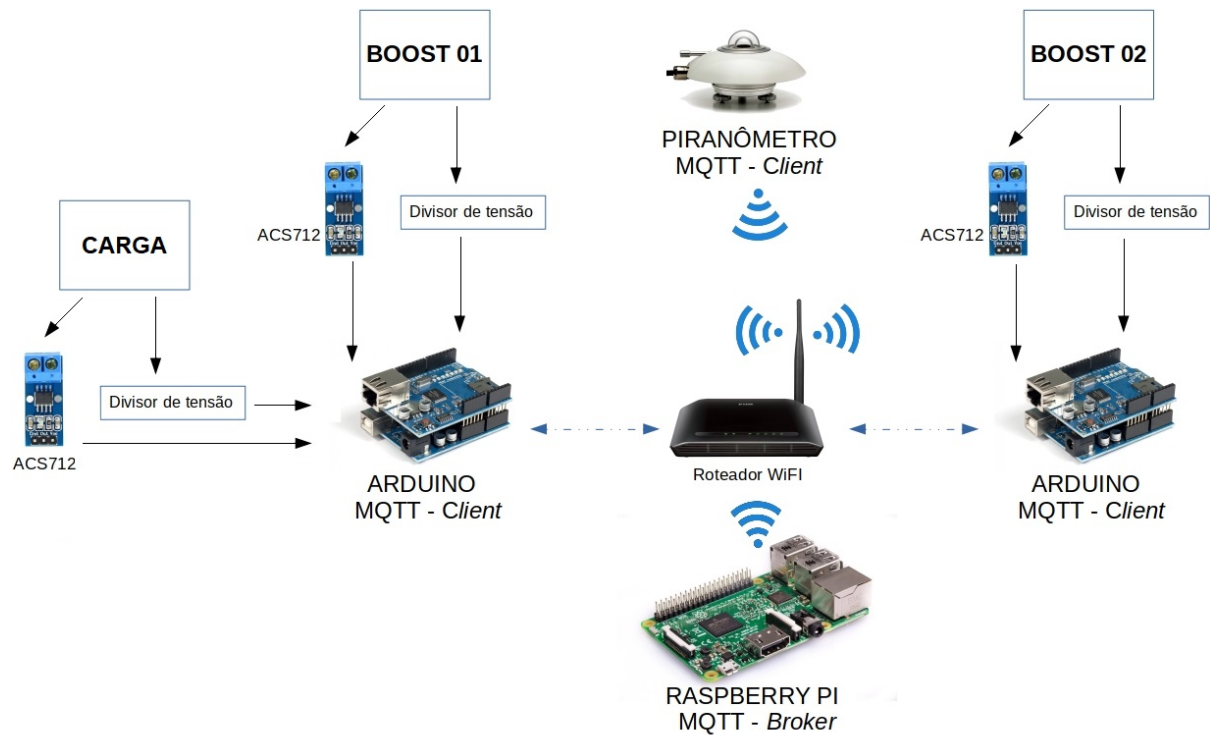
Ainda no que diz respeito à previsão de potência da fonte solar fotovoltaica, é importante deixar claro que o procedimento relatado acima faz referência a um trabalho de mestrado que encontra-se em andamento, no Programa de Pós- Graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, intitulado "Desenvolvimento de Um Sistema de Monitoramento e Detecção de Falhas para Microgeração Fotovoltaica". Em tal trabalho foi desenvolvido um piranômetro próprio e as informações de tensão lidas são coletados e transmitidas através do protocolo de comunicação *Message Queuing Telemetry Transfer* (MQTT), para publicação no MQTT - *broker* instalado em um Raspberry Pi 3 (RPi). Este é um mini computador que executa o sistema operacional Linux *RASPBIAN STRETCH kernel* 4.14. Nesse projeto ele converte os dados coletados em valores de irradiância (W/m²) e salva em um sistema supervisor como um arquivo de texto a uma taxa de uma linha de dados por segundo. Enquanto o *broker* é um padrão publicador/subscritor, responsável por gerir as publicações e as subscrições do protocolo MQTT.

As medições de corrente e tensão processadas pelo Arduino também são publicadas e armazenadas no MQTT - *broker* e podem ser visualizadas através de uma interface remota, bastando para isso, que o usuário se conecte através de dispositivos eletrônicos, como *notebooks* ou *tablets*, na rede Wi-Fi em que o RPi está conectado e acesse, via navegador web, o endereço IP do servidor, definido como 192.168.0.33:8080. Uma das abas

encontradas na interface, foi cedida para permitir essa visualização durante os ensaios (Apêndice A).

Na Figura 29 encontram-se ilustrados os principais componentes utilizados no processo de aquisição de dados. É possível visualizar os sensores de tensão, corrente e o piranômetro. As setas pontilhadas em azul indicam o sentido do fluxo de dados entre os componentes. Os MQTT - *clients* (Arduinos conectados aos conversores) publicam as informações coletadas no MQTT - *broker*, instalado no Raspberry Pi, através da rede utilizada neste projeto.

Figura 29 – Ilustração dos componentes utilizados para aquisição de dados.



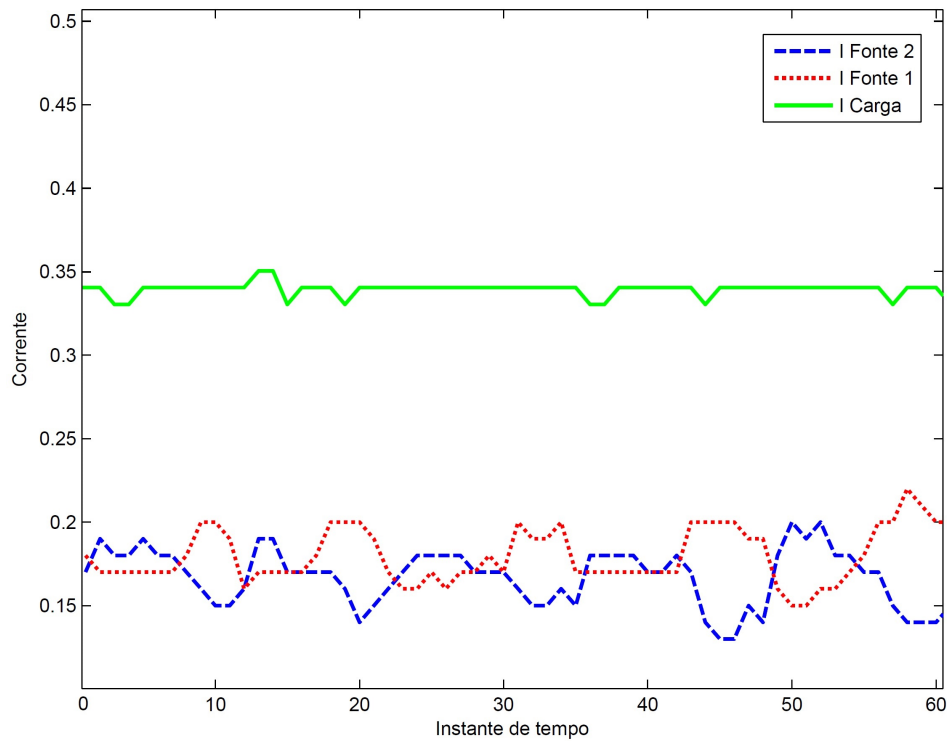
Fonte: Autoria própria.

O conjunto de dados armazenado durante os ensaios foi utilizado pelo *software* MATLAB², visando analisar de forma gráfica as respostas obtidos nos testes de bancada. O período de amostragem utilizado foi de 1 segundo. A seguir, são vistos os resultados experimentais da microrrede CC.

4.3 Compartilhamento Proporcional de Corrente de Carga

O primeiro ensaio foi feito para uma situação onde as fontes possuem o mesmo valor de potência disponível. Na Figura 30 é ilustrado o comportamento das correntes, para os valores de potência: P-Solar = 150 W; P-Eólica = 150 W e P-Carga = 108 W.

² *software* de simulação desenvolvido pela empresa MathWorks

Figura 30 – Compartilhamento de corrente de carga, sendo $P_{\text{Solar}} = P_{\text{Eólica}}$.

Fonte: Autoria própria.

Esperava-se que cada fonte assumisse 50 % da corrente fornecida para carga, entretanto os valores médios de corrente obtidos e os percentuais correspondentes foram:

- I-Fonte-I (Fonte solar fotovoltaica) = 0,18 A (52,94 %),
- I-Fonte-II (Fonte eólica) = 0,16 A (47,05 %),
- I-Carga = 0,34 A.

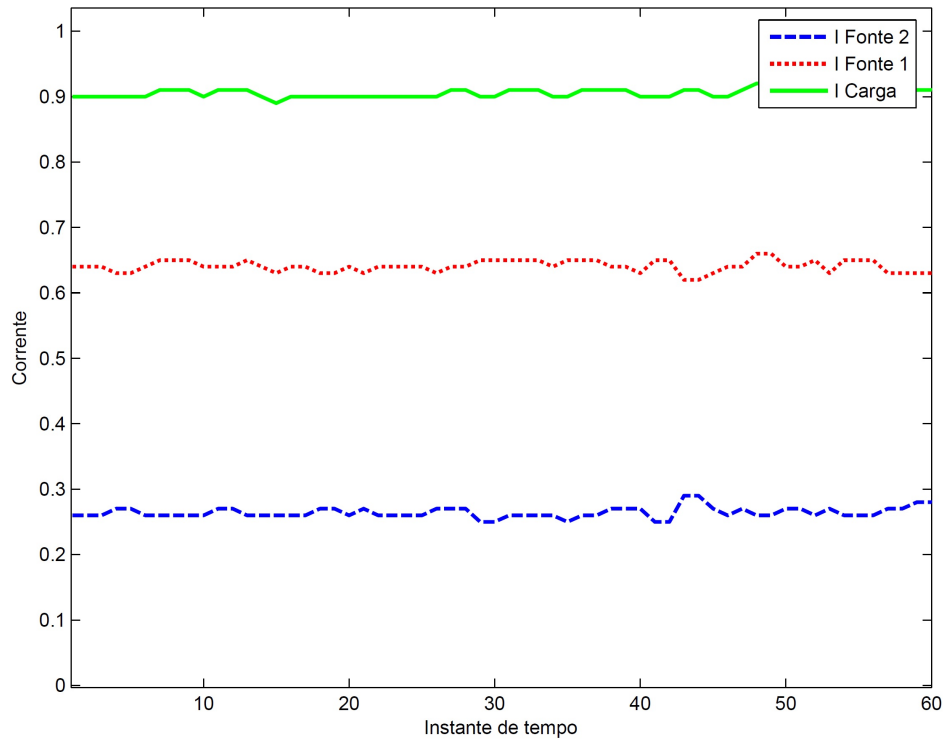
O erro de compartilhamento é de 2,94 % e -2,95 % para as fontes solar fotovoltaica e eólica, respectivamente.

O segundo ensaio foi realizado para uma situação onde as fontes possuíam valores de potência disponível diferentes, sendo $P_{\text{Solar}} = 300 \text{ W}$; $P_{\text{Eólica}} = 100 \text{ W}$ e $P_{\text{Carga}} = 280 \text{ W}$. Esperava-se que a fonte solar fotovoltaica assumisse 75 % da corrente fornecida para carga e, obviamente, a fonte eólica forneceria 25 %. Os valores médios de corrente obtidos e os percentuais correspondentes foram:

- I-Fonte-I (Fonte solar fotovoltaica) = 0,64 A (71,11 %),
- I-Fonte-II (Fonte eólica) = 0,26 A (28,88 %),
- I-Carga = 0,90 A.

Na Figura 31 é ilustrado o comportamento das correntes para esse ensaio.

Figura 31 – Compartilhamento de corrente de carga proporcional para $P\text{-Solar} \neq P\text{-Eólica}$.



Fonte: Autoria própria.

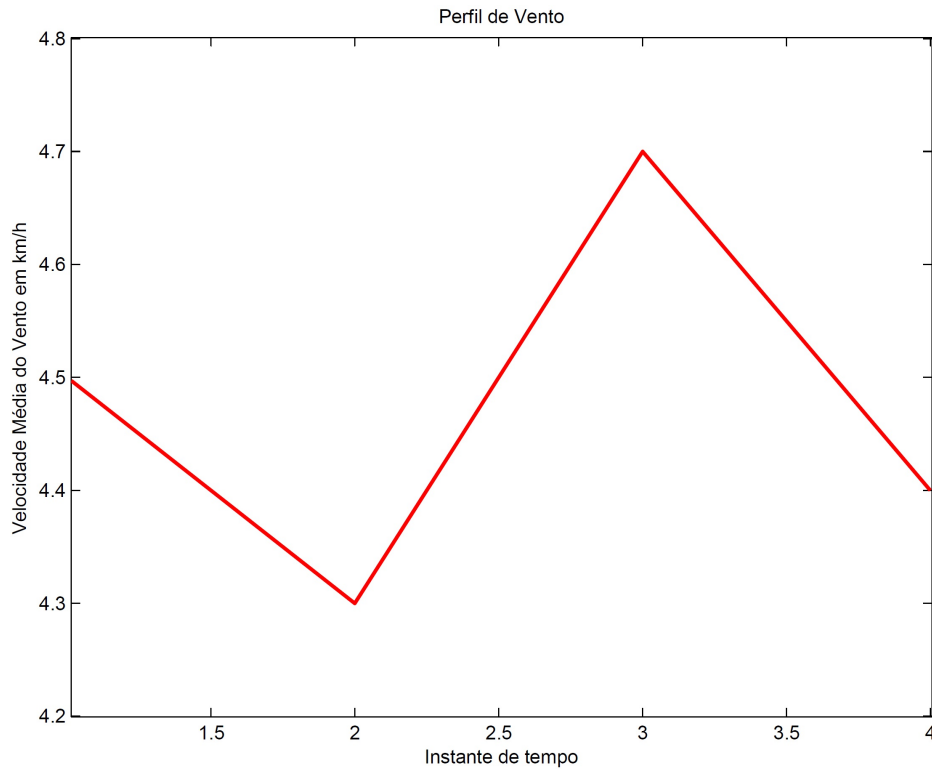
O erro de compartilhamento é de -3,89 % e 3,88 % para as fontes solar fotovoltaica e eólica, respectivamente.

4.4 Compartilhamento Proporcional de Corrente de Carga com Variações na Potência da Fonte

A microrrede CC proposta deve ser capaz de compartilhar a corrente de acordo com a variação de potência que as fontes podem oferecer. Procurou-se representar essa variação em um ensaio. Decidiu-se variar a potência da fonte eólica, visto que era possível controlar a velocidade do eixo do motor acoplado ao gerador de ímã permanente, simbolizando a variação do vento. Para que essa representação não fosse arbitrária, foram retirados 4 valores de uma série real de perfil do vento de um parque denominado aqui como "Parque Juazeiro". Fez-se então uma relação com a frequência que o conversor envia ao motor de indução trifásico, sendo o valor máximo de velocidade do vento correspondente ao valor de rotação necessárias para garantir a extração da potência máxima do gerador e a velocidade mínima corresponde à velocidade para extrair a potência nominal. Os valores de velocidade média do vento são referentes ao dia 01/01/2010, especificamente entre os horários de 09:20 h às 09:50 h, cada informação foi coletada em intervalos de tempo de 10

minutos. Neste trabalho, a variação foi feita aproximadamente a cada 50 segundos. As variações de frequência do conversor estão na faixa de 24,04 Hz até 26,13 Hz. Na Figura 32 encontra-se a curva de variação do vento, para o período citado acima.

Figura 32 – Perfil de vento.

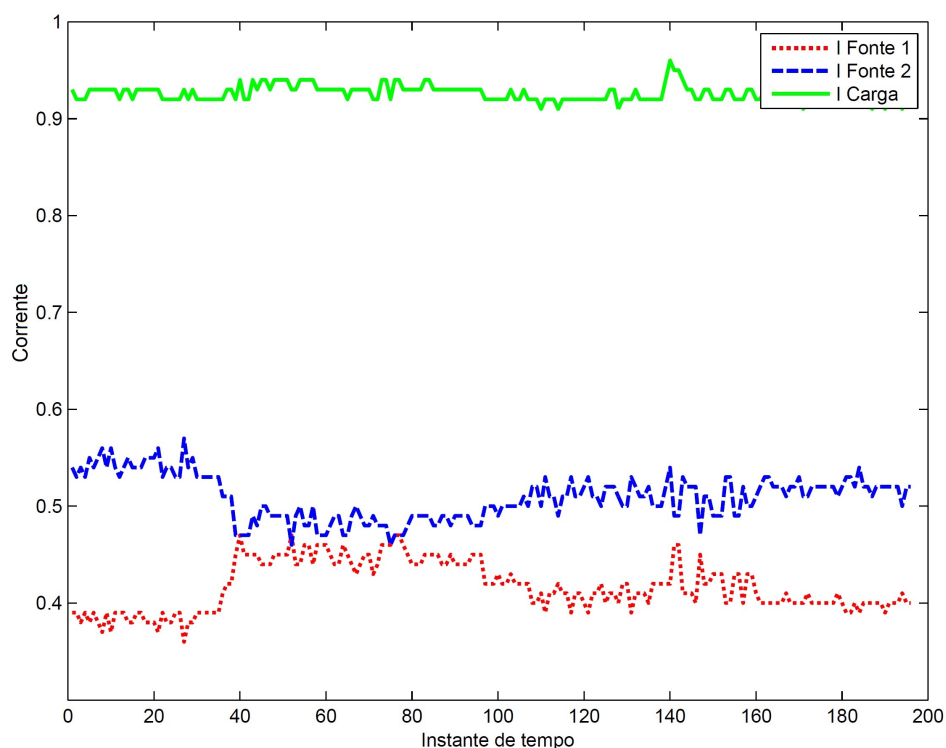


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 33 é ilustrado o comportamento das correntes, diante da condição em que os valores de potência P-Eólica variam, P- Solar mantém-se em 500 W e P-Carga = 290 W. As variações de potência e os percentuais de compartilhamento esperados são as seguintes:

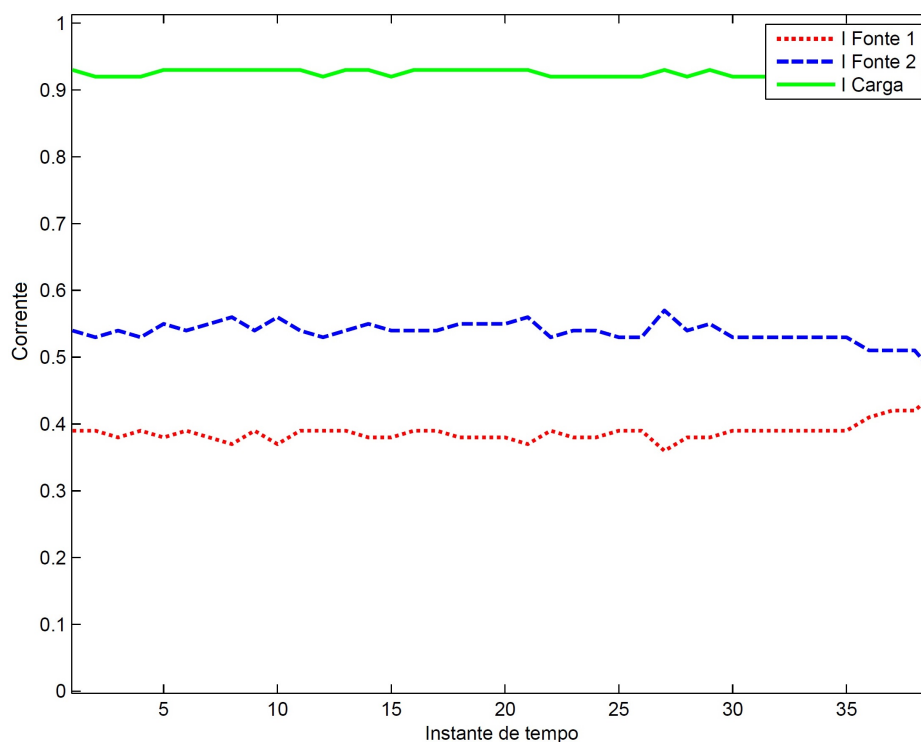
- No período entre 0 e 40 segundos, P-Eólica = 680 W. Espera-se que a mesma forneça 57,62 %;
- No período entre 40 e 95 segundos, P-Eólica = 620 W. Espera-se que a mesma forneça 55,35 %;
- No período entre 95 e 140 segundos, P-Eólica = 700 W. Espera-se que a mesma forneça 58,33 %;
- No período entre 140 e 190 segundos, P-Eólica = 680 W. Espera-se que a mesma forneça 57,62 %.

Figura 33 – Compartilhamento com variação de potência.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 34 é possível observar o comportamento das correntes obtidas durante o primeiro período de tempo:

Figura 34 – Compartilhamento de corrente para: $P\text{-Solar} = 500\text{ W}$ e $P\text{-Eólica} = 680\text{ W}$.

Fonte: Autoria própria.

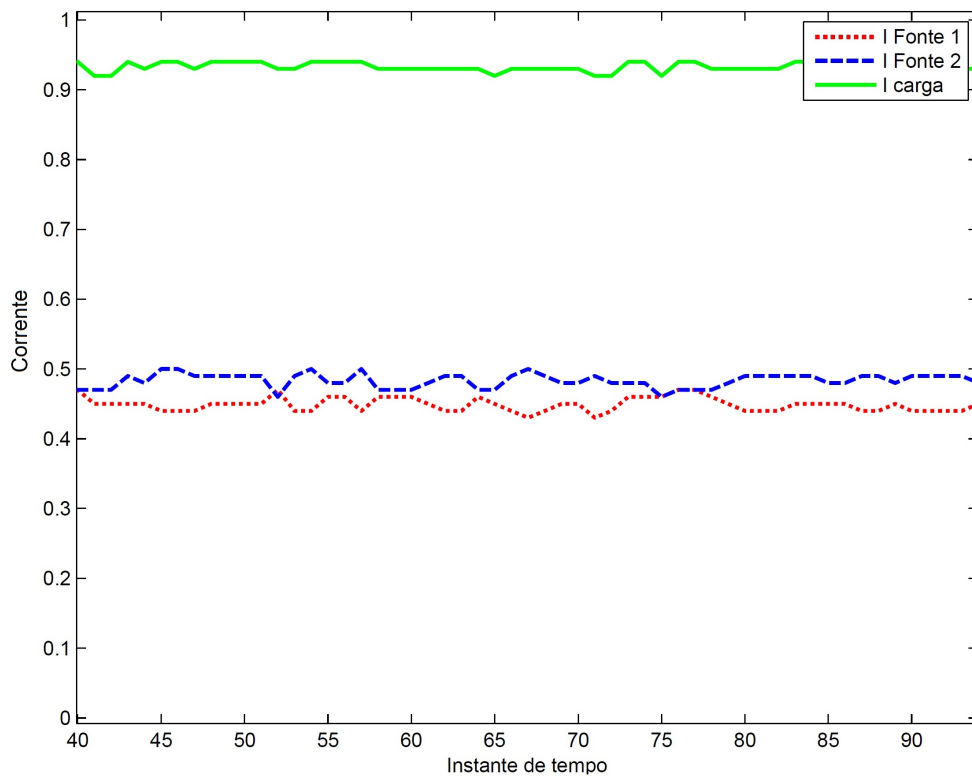
Os valores médios de corrente e os percentuais obtidos nesse período de tempo foram:

- I-Fonte-I (Fonte solar fotovoltaica) = 0,39 A (41,93 %),
- I-Fonte-II (Fonte Eólica) = 0,54 A (58,06 %),
- I-Carga = 0,93 A.

O erro de compartilhamento é de -0,44 % e 0,44 % para as fontes solar fotovoltaica e eólica, respectivamente.

Na Figura 35 pode ser visto o comportamento das correntes obtidas no decorrer do segundo período de tempo:

Figura 35 – Compartilhamento de corrente para: P-Solar = 500 W e P-Eólica = 620 W.



Fonte: Autoria própria.

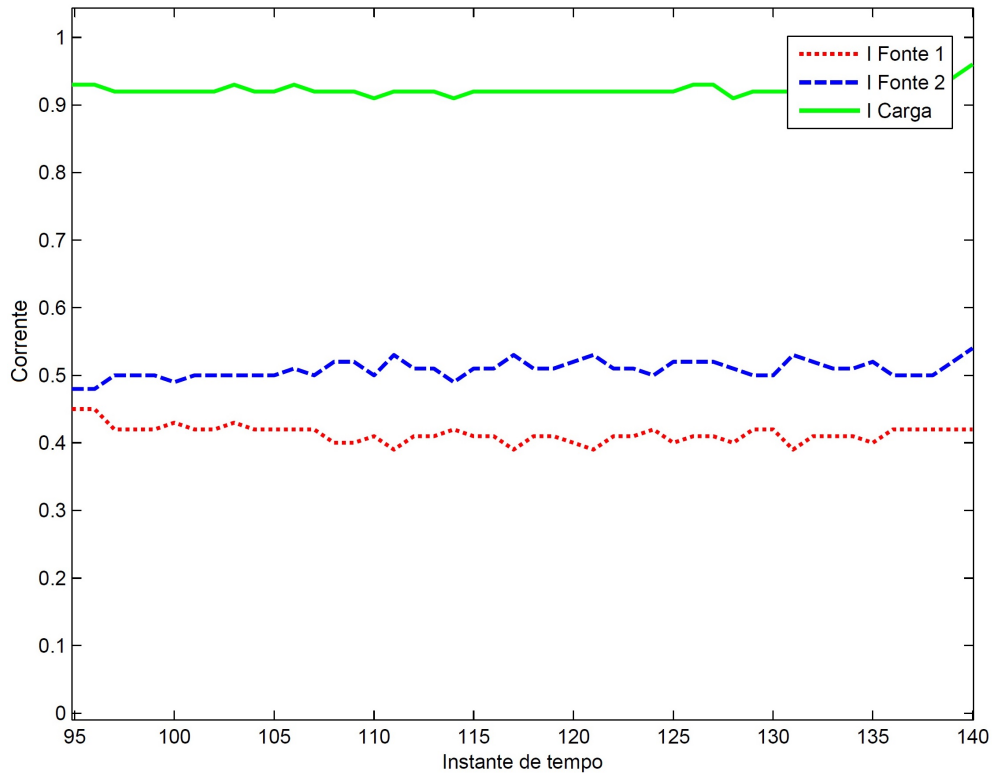
Os valores médios das correntes e os percentuais correspondentes são:

- I-Fonte-I (Fonte solar fotovoltaica) = 0,45 A (48,38 %),
- I-Fonte-II (Fonte Eólica) = 0,48 A (51,61 %),
- I-Carga = 0,93 A.

O erro de compartilhamento é de 3,74 % e -3,74 % para as fontes solar fotovoltaica e eólica, respectivamente.

Na Figura 36 pode ser observado o comportamento das correntes obtidas durante o terceiro período de tempo:

Figura 36 – Compartilhamento de corrente para: P-Solar = 500 W e P-Eólica = 700 W.



Fonte: Autoria própria.

Os valores médios das correntes e os percentuais obtidos durante esse período de ensaio foram:

- I-Fonte-I (Fonte solar fotovoltaica) = 0,42 A (45,65 %),
- I-Fonte-II (Fonte eólica) = 0,50 A (54,34 %),
- I-Carga = 0,92 A.

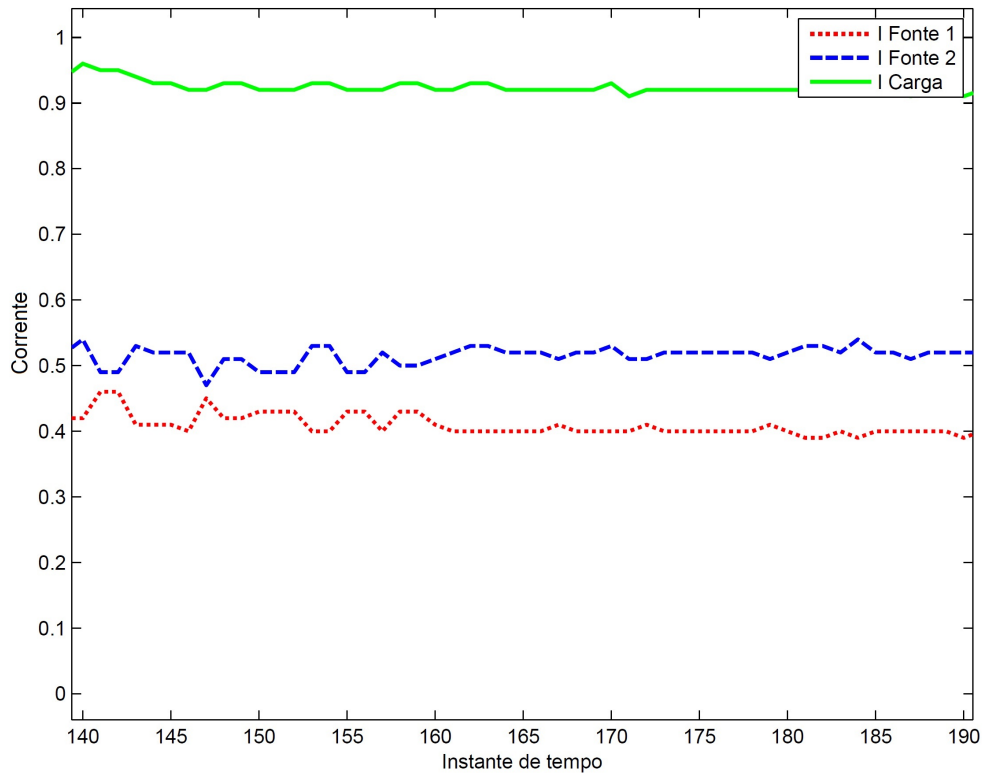
O erro de compartilhamento é de 3,99 % e -3,99 % para as fontes solar fotovoltaica e eólica, respectivamente.

O comportamento das correntes obtidas durante o quarto período de tempo do ensaio encontra-se ilustrado na Figura 37. Os valores médios de corrente e os percentuais correspondentes são os que se seguem:

- I-Fonte-I (Fonte solar fotovoltaica) = 0,40 A (43,47 %),
- I-Fonte-II (Fonte eólica) = 0,52 A (56,52 %),
- I-Carga = 0,92 A.

O erro de compartilhamento é de 1,10 % e -1,10 % para as fontes solar fotovoltaica e eólica, respectivamente.

Figura 37 – Compartilhamento de corrente para P-Solar = 500 W e P-Eólica = 680 W (quarto período de tempo).



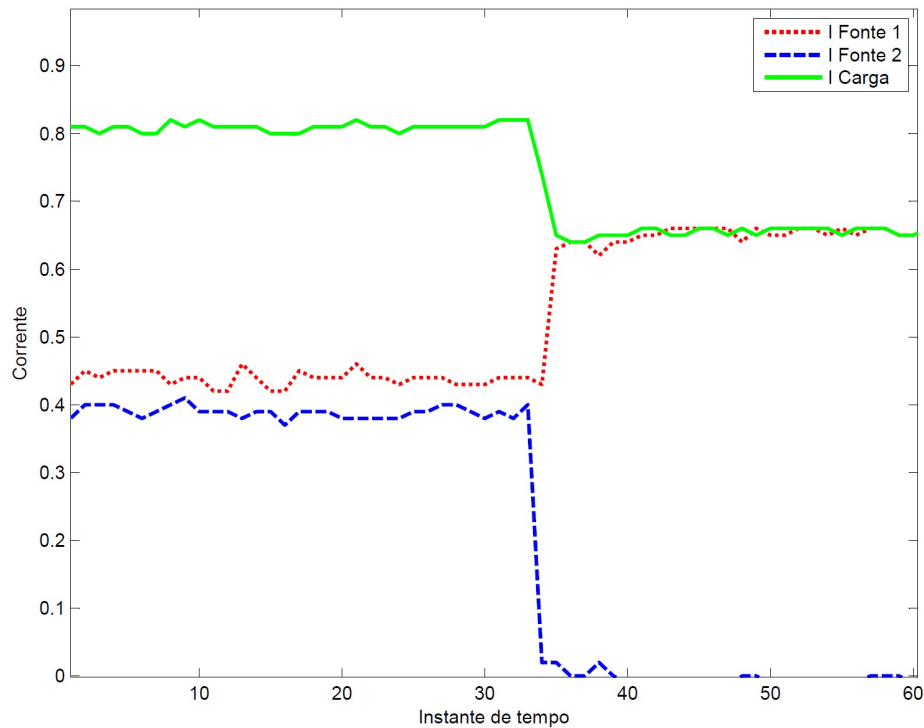
Fonte: Autoria própria.

4.5 Desconexão da Fonte Eólica

Para esse projeto a fonte solar fotovoltaica foi definida como prioritária para a alimentação da microrrede CC. No momento em que ela possuir valor de potência acima do que a potência exigida pela carga, um comando é enviado pelo Arduino para os relés, que desconectam a fonte eólica do sistema.

Na Figura 38 é possível visualizar o momento (precisamente aos 34 segundos) em que a fonte solar fotovoltaica passa a alimentar a carga sozinha e a fonte eólica é desconectada do sistema.

Figura 38 – Saída da fonte eólica.



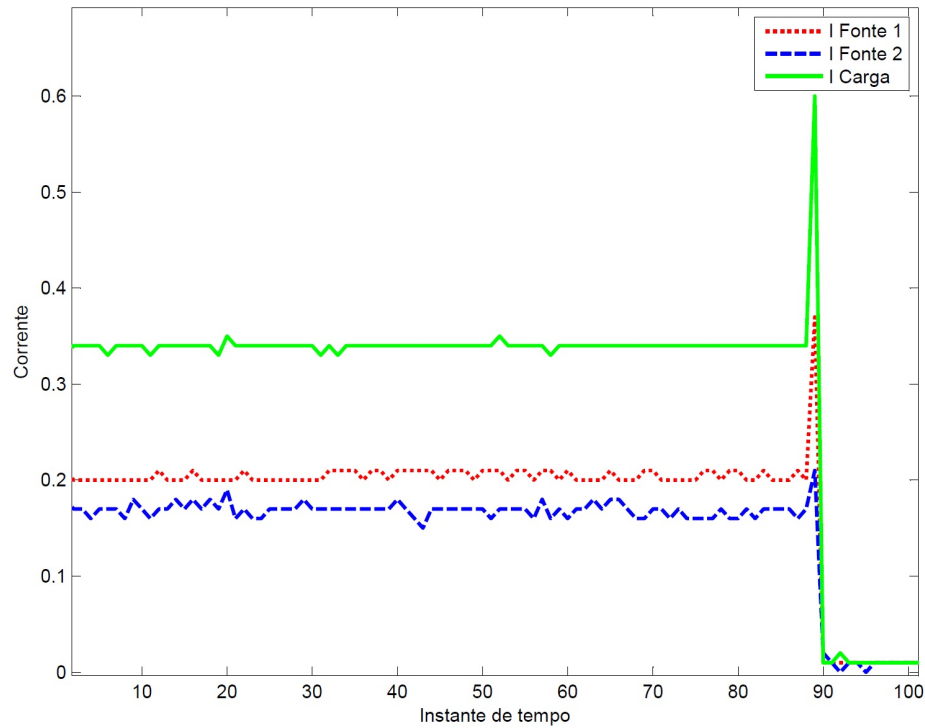
Fonte: Autoria própria.

4.6 Atuação da Proteção contra Sobrecorrente

No momento em que ocorre alguma situação que possa danificar os componentes do sistema ou causar riscos aos usuários, as proteções desligam as fontes. Para realizar o ensaio, a corrente foi limitada a um valor de 0,6 A e no instante de tempo de 90 segundos, retirou-se uma parte da carga, isso provocou elevação de corrente acima do nível definido. O Arduino recebe esses valores de corrente e envia um comando para que os relés abram seus contatos desligando a alimentação da microrrede.

Na Figura 39 é possível observar o momento (precisamente aos 90 segundos) em que a proteção contra sobrecorrente atua, desconectando as fontes.

Figura 39 – Atuação da proteção contra sobrecorrente.



Fonte: Autoria própria.

4.7 Considerações Finais

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais da microrrede desenvolvida, baseada nas especificações descritos nos capítulos anteriores. Os resultados experimentais confirmam a funcionalidade da proposta. Para os testes em bancada, foi possível compartilhar as correntes de carga proporcionalmente às potências disponibilizadas pelas fontes. O valor de erro máximo obtido nos ensaios foi de 3,99 %, similar ao erro máximo encontrado nas simulações realizadas anteriormente, de 3,49 %. Para os ensaios de desconexão de fonte, seja por questão de prioridade ou por sobrecorrente, verificou-se que a microrrede reagiu conforme o esperado.

5 Conclusões

Neste trabalho foi desenvolvida uma microrrede em corrente contínua, alimentada pelas fontes eólica e solar fotovoltaica, que apresenta equilíbrio de corrente e potência de saída entre as fontes geradoras e garante o nível de tensão de saída especificado. Inicialmente foram apresentados os aspectos gerais da microgeração, em especial das microrredes CC. Observou-se que essas últimas se mostram como uma tendência para as futuras instalações residenciais, comerciais e industriais. Entretanto, ainda precisam superar desafios, como: a definição de um padrão de tensão, a normalização e o desenvolvimento de um mercado energético que favoreça o seu desenvolvimento.

Foi necessário fazer um estudo sobre as principais técnicas para realizar o paralelismo de conversores. Através das pesquisas percebeu-se que o controle por inclinação e o mestre-escravo são as estratégias mais populares e cada uma tem seus próprios méritos e limitações, não sendo nenhuma delas consolidada como a melhor técnica. Assim, para selecionar qual o método de controle mais adequado, é necessária a análise da aplicação e das especificações do sistema que se deseja controlar. Para esse projeto escolheu-se utilizar a ideia de ajustar as correntes de saída através de um ganho de inclinação, juntamente com a possibilidade dos conversores trocarem informações entre si e tomarem decisões, sem que com isso percam a capacidade de trabalharem sozinhos quando necessário.

Os resultados obtidos em simulação foram satisfatórios, visto que o algoritmo desenvolvido permitiu a correta distribuição de carga entre as fontes que alimentam o barramento (erro máximo de 3,49 %), além da conexão ou desconexão de uma das fontes, de acordo com o nível de potência exigido. Ressaltando que o nível de tensão de saída manteve-se dentro da tolerância definida.

A microrrede CC proposta foi implementada no Laboratório de Processamento de Energia (LPE) e a partir dela foi possível comprovar os resultados das simulações, onde a correntes de carga foi distribuída proporcionalmente às potências disponibilizadas pelas fontes, apresentando um valor de erro máximo de 3,99 %. Os resultados também foram satisfatórios para os ensaios de desconexão de fonte, seja por questão de prioridade ou por sobrecorrente. Como contribuições da microrrede, pode se destacar a técnica descentralizada de compartilhamento de carga sem uso de componentes armazenadores de energia e o fato de que a microrrede CC implementada oferece condições de pesquisa futura, permitindo o estudo e aprofundamento de diversos temas relacionados, como: proteções, gerenciamento de cargas, eficiência energética e qualidade de energia.

5.1 Trabalhos futuros

Como sugestões para desdobramentos deste projeto:

- Confecção de uma nova placa de controle, onde a programação do compartilhamento de carga possa ser inserida juntamente com o controle de tensão existente em um mesmo componente microcontrolador;
- Substituição dos relés, utilizados para o sistema de proteção, por chaves semicondutoras;
- Utilização de sensores de corrente que ofereçam maior precisão, em especial para baixas correntes;
- Testar outras possibilidades de comunicação entre os microcontroladores, visando maior rapidez na comunicação;
- Testar outros métodos de compartilhamento de corrente de carga;
- Acrescentar à microrrede CC o gerenciamento das cargas a serem acopladas ao barramento comum.

Referências

ABINEE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA. **Relatório Anual 2017**, 2018.

ABSOLAR. **Energia solar cresceu 70% em dois anos**. 2017. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/energia-solar-cresceu-70-em-dois-anos.html>>

ALCAZAR, Y. J. A. **Estudo do conversor boost CC-CC de alto ganho de tensão baseado na célula de comutação de três estados e nas células multiplicadoras de tensão (MC)**. Dissertação (Mestrado), 2010.

ANAND, S.; FERNANDES, B. Modified droop controller for paralleling of DC–DC converters in standalone dc system. **IET Power Electronics**, IET, v. 5, n. 6, p. 782–789, 2012.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Atlas de energia elétrica do Brasil. 2002.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Por dentro da conta de luz: Informação de utilidade pública**, 2008.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional–PRODIST: Módulo 1- Introdução. Revisão 9, 2016.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Nota Técnica n 0056/2017-SRD**, 2017.

ARAÚJO, S. et al. Step-up converter with high voltage gain employing three-state switching cell and voltage multiplier. In: IEEE. **Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE**. [S.l.], 2008. p. 2271–2277.

AUGUSTINE, S.; LAKSHMINARASAMMA, N.; MISHRA, M. K. Control of photovoltaic-based low-voltage dc microgrid system for power sharing with modified droop algorithm. **IET Power Electronics**, IET, v. 9, n. 6, p. 1132–1143, 2016.

AZEVEDO, G. M. **Controle e operação de conversores em microrredes**. Tese (Doutorado), 2011.

BARBI, I.; MARTINS, D. C. Conversores CC-CC básicos não isolados. **Edição dos autores**. Florianópolis, 2000.

BARRETO, L. H. S. C. et al. A quasi-resonant quadratic boost converter using a single resonant network. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 52, n. 2, p. 552–557, 2005.

BATARSEH, I.; SIRI, K.; LEE, H. Investigation of the output droop characteristics of parallel-connected DC-DC converters. In: IEEE. **Power Electronics Specialists Conference, PESC'94 Record., 25th Annual IEEE**. [S.l.], 1994. v. 2, p. 1342–1351.

- BELLIA, H.; YOUCEF, R.; FATIMA, M. A detailed modeling of photovoltaic module using matlab. **NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics**, Elsevier, v. 3, n. 1, p. 53–61, 2014.
- BEZERRA, G. R. **Modelagem e controle do conversor CC-CC Buck-Boost usando técnicas paramétricas de identificação**. Tese (Doutorado), 2015.
- BICZEL, P. Power electronic converters in dc microgrid. In: IEEE. **Compatibility in Power Electronics, 2007. CPE'07**. [S.l.], 2007. p. 1–6.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Boletim mensal de Energia, mês base Outubro de 2017**, 2017.
- CAVADOS, G. de A. **Análise do Impacto da Introdução das Fontes Intermitentes no Setor Elétrico Brasileiro: Estudo de Caso da Região Nordeste**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.
- CETIN, E. et al. Construction of a fuel cell system with dc power distribution for residential applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 36, n. 17, p. 11474–11479, 2011.
- CHAOUI, H. et al. Adaptive control of DC-DC boost converters with parametric uncertainties and guaranteed stability. In: IEEE. **Industrial Electronics (ISIE), 2016 IEEE 25th International Symposium on**. [S.l.], 2016. p. 431–435.
- CHINE, W. et al. Fault diagnosis in photovoltaic arrays. In: IEEE. **Clean Electrical Power (ICCEP), 2015 International Conference on**. [S.l.], 2015. p. 67–72.
- CMMC. COMISSÃO MISTA DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. Conferência das Partes – COP 21. Relatório, 2015.
- COLLIER, S. E. Edison's revenge: Could DC carve out a place in our ac grids? IEEE, 2013.
- COSTA, R. R. M. da. **Microgeração em Meio Urbano: Um Estudo de Caso na Cidade de Curitiba**. Dissertação (Mestrado), 2014.
- DIAS, A. d. F. Implementação de microrredes residenciais em corrente contínua através da microgeração. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2013.
- EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano decenal de expansão de energia-2024. 2015.
- FARHADI, M.; MOHAMMED, O. A. Performance enhancement of actively controlled hybrid dc microgrid incorporating pulsed load. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IEEE, v. 51, n. 5, p. 3570–3578, 2015.
- Ferreira Filho, J. R. M. **Controlador Digital de tensão de Conversor Boost de Alto Ganho Aplicado a Sistema Fotovoltaico Bombeamento de Água**. Dissertação (Mestrado), 2017.
- GNOATTO, E. et al. Desempenho de painel fotovoltaico de um sistema isolado. **Procedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural**, SciELO Brasil, 2004.

- GUERRERO, J. M. et al. Hierarchical control of droop-controlled ac and dc microgrids—a general approach toward standardization. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 58, n. 1, p. 158–172, 2011.
- GULES, R.; PFITSCHER, L. L.; FRANCO, L. C. An interleaved boost DC-DC converter with large conversion ratio. In: IEEE. **Industrial Electronics, 2003. ISIE'03. 2003 IEEE International Symposium on**. [S.l.], 2003. v. 1, p. 411–416.
- GWEC. GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. Global wind statistics 2017. 2018.
- HARIPRIYA, T.; PARIMI, A. M.; RAO, U. Performance evaluation of dc grid connected solar pv system for hybrid control of dc-dc boost converter. In: IEEE. **Intelligent Systems and Control (ISCO), 2016 10th International Conference on**. [S.l.], 2016. p. 1–6.
- HELDWEIN, M. L. Microredes em corrente contínua: qualidade de fornecimento eficiência em futuras redes de distribuição. **Universidade Federal de Santa Catarina**, 2010.
- HENN, G. A. et al. Interleaved-boost converter with high voltage gain. **IEEE transactions on power electronics**, IEEE, v. 25, n. 11, p. 2753–2761, 2010.
- IBANEZ, F.; ECHEVERRIA, J.; FONTAN, L. Master-slave DC droop control for paralleling auxiliary DC/DC converters in electric bus applications. **IET Power Electronics**, IET, 2017.
- LAI, Y.; TAN, S.-C.; TSANG, Y. Wireless control of load current sharing information for parallel-connected DC/DC power converters. **IET power electronics**, IET, v. 2, n. 1, p. 14–21, 2009.
- LI, P.; LEHMAN, B. A design method for paralleling current mode controlled DC-DC converters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 19, n. 3, p. 748–756, 2004.
- LONG, R. et al. Current sharing in parallel fuel cell generation system based on model predictive control. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 40, n. 35, p. 11587–11594, 2015.
- LOPES, Y.; FERNANDES, N. C.; MUCHALUAT-SAADE, D. C. Geração distribuída de energia: Desafios e perspectivas em redes de comunicação. **Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos**, v. 33, 2015.
- LOTFI, H.; KHODAEI, A. Hybrid AC/DC microgrid planning. **Energy**, Elsevier, v. 118, p. 37–46, 2017.
- LU, X. et al. An improved droop control method for DC microgrids based on low bandwidth communication with DC bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 29, n. 4, p. 1800–1812, 2014.
- LUO, S. et al. A classification and evaluation of paralleling methods for power supply modules. In: IEEE. **Power Electronics Specialists Conference, 1999. PESC 99. 30th Annual IEEE**. [S.l.], 1999. v. 2, p. 901–908.

- MACKAY, L. et al. Power & energy society general meeting, 2015 IEEE. In: IEEE. **From DC nano-and microgrids towards the universal DC distribution system-a plea to think further into the future.** [S.l.], 2015. p. 1–5.
- MALIK, S. M. et al. Voltage and frequency control strategies of hybrid ac/dc microgrid: a review. **IET Generation, Transmission & Distribution**, IET, v. 11, n. 2, p. 303–313, 2017.
- MAZUMDER, S. K.; TAHIR, M.; ACHARYA, K. Master–slave current-sharing control of a parallel DC–DC converter system over an rf communication interface. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 55, n. 1, p. 59–66, 2008.
- MAZUMDER, S. K.; TAHIR, M.; KAMISSETTY, S. L. Wireless pwm control of a parallel DC-DC buck converter. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 20, n. 6, p. 1280–1286, 2005.
- MONTEZANO, B. E. M. As energias solar e eólica no brasil. **Centro de Pesquisa de Energia Elétrica, CEPEL. Rio de Janeiro.**, 2013.
- MORTON, F. Tesla vs edison: A guerra das correntes. In: **Aventuras na História**. 15. ed. [S.l.: s.n.], 2016. p. 29–39.
- NOVAES, Y. D.; RUFER, A.; BARBI, I. A new quadratic, three-level, dc/dc converter suitable for fuel cell applications. In: IEEE. **Power Conversion Conference-Nagoya, 2007. PCC'07.** [S.l.], 2007. p. 601–607.
- OBERTO, V. et al. An improved droop control strategy for load current sharing in output parallel-connected DC-DC converters. In: IEEE. **Industry Applications (INDUSCON), 2014 11th IEEE/IAS International Conference on.** [S.l.], 2014. p. 1–7.
- OBERTO, V. P. et al. **Contribuição às estratégias de controle para sistemas distribuídos de potência.** Dissertação (Mestrado), 2013.
- PETRY, C. A. Introdução aos conversores CC-CC. 2001.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. **Rio de Janeiro: CEPEL**, 2014.
- PINTO, R. et al. Micro-generation with solar energy: power quality and impact on a rural low-voltage grid. In: IEEE. **Compatibility and Power Electronics (CPE), 2015 9th International Conference on.** [S.l.], 2015. p. 87–92.
- PRIYA, T. H.; PARIMI, A. M.; RAO, U. Development of hybrid controller for photovoltaic based DC-DC boost converter in DC grid connected applications. In: IEEE. **Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), 2016 International Conference on.** [S.l.], 2016. p. 1–6.
- QU, L.; ZHANG, D.; BAO, Z. Output current-differential control scheme for input-series–output-parallel-connected modular DC–DC converters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 32, n. 7, p. 5699–5711, 2017.
- RIBEIRO, P. E. M. J. **Controle do paralelismo de inversores em sistemas de micro-redes para variados pontos de operação.** Dissertação (Mestrado), 2012.

- RODRIGUEZ-DIAZ, E.; VASQUEZ, J. C.; GUERRERO, J. M. Intelligent dc homes in future sustainable energy systems: When efficiency and intelligence work together. **IEEE Consumer Electronics Magazine**, IEEE, v. 5, n. 1, p. 74–80, 2016.
- SCHMIDLIN JR, C. R. et al. Estimação de parâmetros de regime permanente da máquina síncrona de ímãs permanentes. In: IEEE. **INDUSCON**. [S.l.], 2017.
- SECHILARIU, M.; LOCMET, F.; WANG, B. Photovoltaic electricity for sustainable building. efficiency and energy cost reduction for isolated DC microgrid. **Energies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 8, n. 8, p. 7945–7967, 2015.
- SHAHINZADEH, H. et al. Optimal design and management of isolated hybrid renewable energy system (wt/pv/ores). In: IEEE. **Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC), 2016 21st Conference on**. [S.l.], 2016. p. 208–215.
- SILVA, P.; MEDEIROS, C. M. de S. A promising future to DC power system: A review. **IEEE Latin America Transactions**, IEEE, v. 15, n. 9, p. 1639–1642, 2017.
- SILVEIRA, G. **Conversor CC-CC boost baseado na célula de comutação de três estados para alimentação de inversores com divisor capacitivo**. Dissertação (Mestrado), 2011.
- SILVEIRA, G. C. et al. A nonisolated dc-dc boost converter with high voltage gain and balanced output voltage. **IEEE Trans. Industrial Electronics**, v. 61, n. 12, p. 6739–6746, 2014.
- SIRI, K.; LEE, C.; WU, T.-E. Current distribution control for parallel connected converters. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, IEEE, v. 28, n. 3, p. 829–840, 1992.
- STRAMOSK, V. et al. **Controle não-linear de conversores de eletrônica de potência interconectados em microrredes de corrente contínua**. Dissertação (Mestrado), 2014.
- SUMATHI, S.; KUMAR, L. A.; SUREKHA, P. **Solar PV and Wind Energy Conversion Systems: An Introduction to Theory, Modeling with MATLAB/SIMULINK, and the Role of Soft Computing Techniques**. [S.l.]: Springer, 2015.
- TAHIM, A. P. N. et al. **Controle de microrredes de distribuição de energia elétrica em corrente contínua**. Tese (Doutorado), 2015.
- TAYAB, U. B. et al. A review of droop control techniques for microgrid. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 76, p. 717–727, 2017.
- THOMAS, V.; KUMARAVEL, S.; ASHOK, S. Control of parallel DC-DC converters in a dc microgrid using virtual output impedance method. In: IEEE. **Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB), 2016 2nd International Conference on**. [S.l.], 2016. p. 587–591.
- TOMASZUK, A.; KRUPA, A. High efficiency high step-up DC/DC converters-a review. **Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences**, Versita, v. 59, n. 4, p. 475–483, 2011.

- TORRICO-BASCOPE, G. V. et al. A generalized high voltage gain boost converter based on three-state switching cell. In: IEEE. **IEEE Industrial Electronics, IECON 2006-32nd Annual Conference on**. [S.l.], 2006. p. 1927–1932.
- TULADHAR, A.; JIN, H. A novel control technique to operate DC/DC converters in parallel with no control interconnections. In: IEEE. **Power Electronics Specialists Conference, 1998. PESC 98 Record. 29th Annual IEEE**. [S.l.], 1998. v. 1, p. 892–898.
- VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. **São Paulo: Érica**, 2012.
- VU, T. V. et al. Robust adaptive droop control for dc microgrids. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 146, p. 95–106, 2017.
- YANG, N. et al. Modeling and stability analysis of multi-time scale dc microgrid. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 140, p. 906–916, 2016.
- ZHAO, J.; DÖRFLER, F. Distributed control and optimization in dc microgrids. **Automatica**, Elsevier, v. 61, p. 18–26, 2015.
- ZHAO, Q.; LEE, F. C. High-efficiency, high step-up dc-dc converters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 18, n. 1, p. 65–73, 2003.
- ZHAO, Q. et al. Active-clamp dc/dc converters using magnetic switches. In: IEEE. **Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE**. [S.l.], 2001. v. 2, p. 946–952.

APÊNDICE A – Fotos

A.1 Conjunto representando a fonte eólica



Fonte: Autoria própria.

O conjunto é composto por um gerador síncrono de ímã permanente acoplado ao eixo de um motor de indução trifásico, que por sua vez é acionado por um conversor de frequência.

A.2 Arranjo fotovoltaico.



Fonte: Autoria própria.

Arranjo fotovoltaico instalado no IFCE - Campus Fortaleza. Para este trabalho foram utilizados apenas dois dos painéis, conectados em série.

A.3 Conversor *Boost* com controlador digital de tensão.



Fonte: Autoria própria.

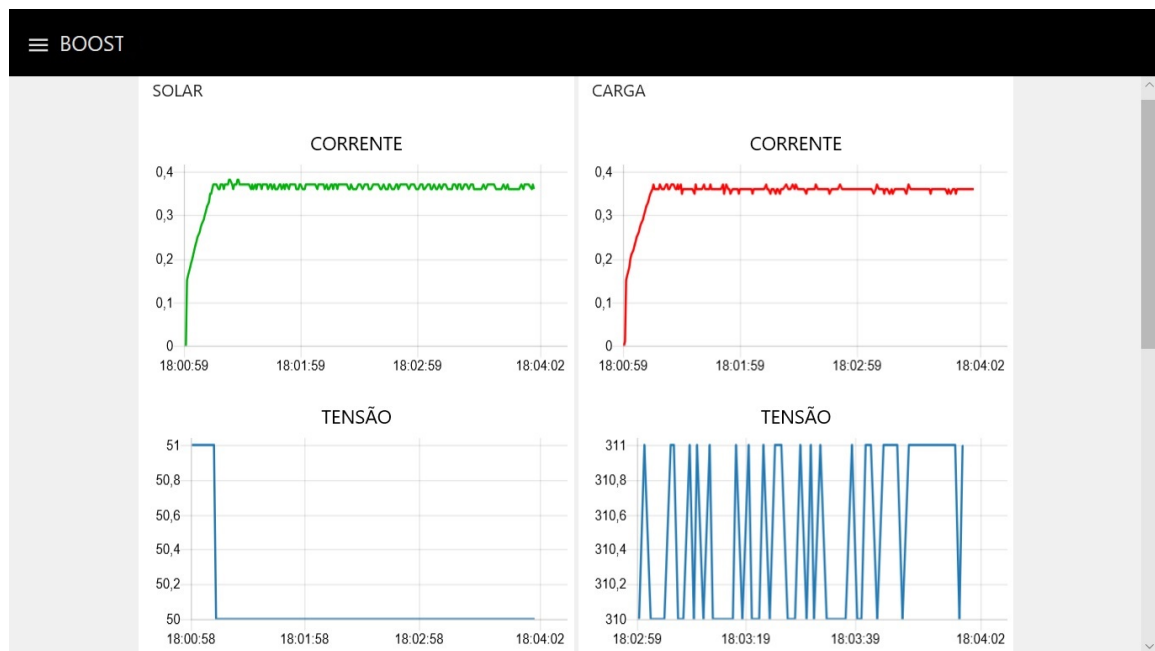
A.4 Microrrede CC desenvolvida.



Fonte: Autoria própria.

Microrrede alimentada pelas fontes solar e eólica, sendo cada uma conectada a um conversor *Boost* e suas saídas alimentam o barramento CC comum. Cada conversor possui um Arduino conectado, onde está gravado o algoritmo para realizar o compartilhamento de corrente de carga.

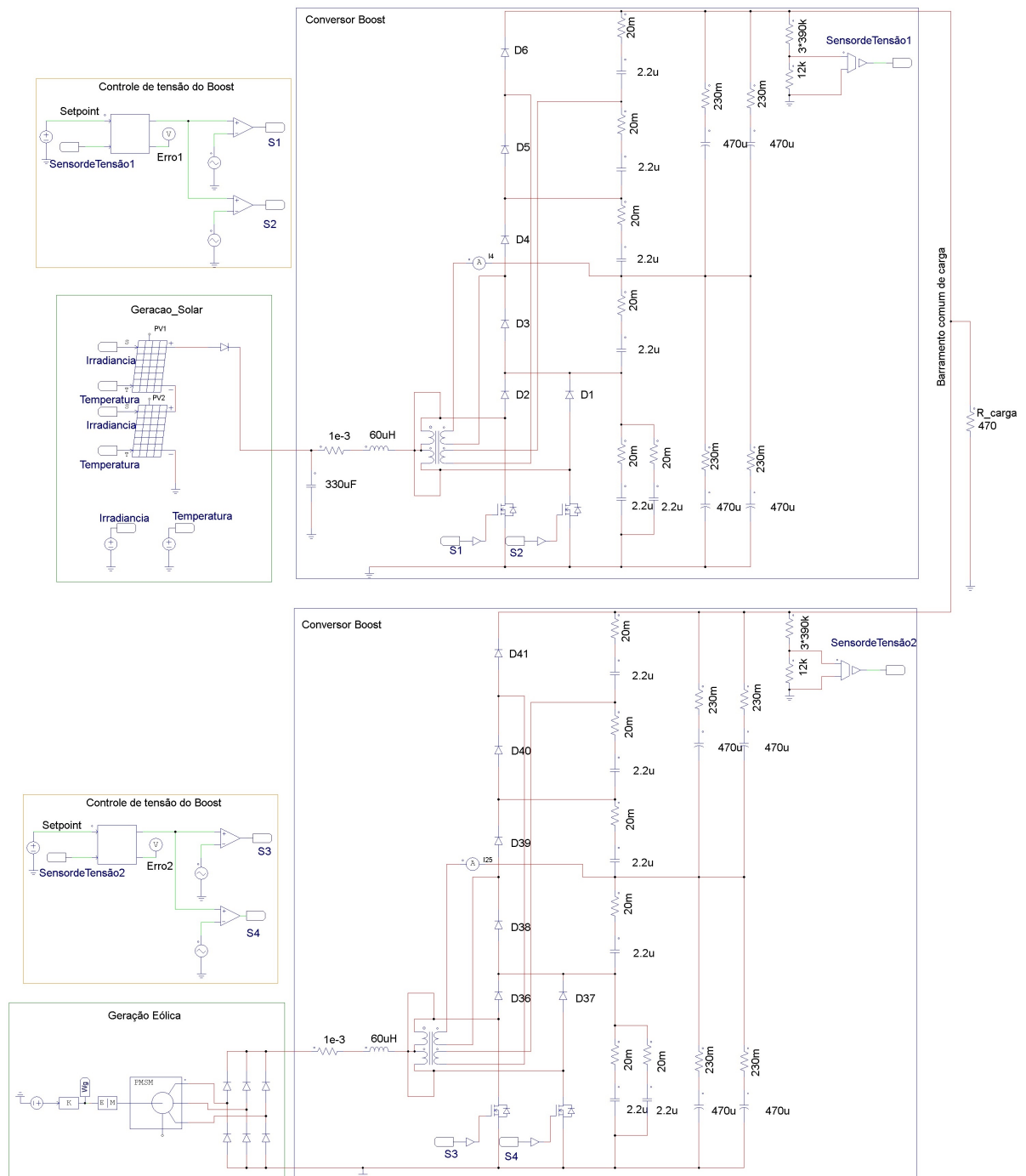
A.5 Aba da interface remota.



Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE B – Circuito e Parâmetros Utilizados

B.1 Esquema do circuito com dois conversores em paralelo



Fonte: Autoria própria.

B.2 Parâmetros utilizados na simulação do conversor *Boost* de alto ganho de tensão

Componentes	Especificações
Diodos D_1 a D_6	HFA15PB60
Chaves S_1 e S_2	MOSFET IRFP4227PBF
Capacitor C_1	Polipropileno metalizado $C = 2,2 \mu F / 250 \text{ V}$
Capacitor C_2 a C_5	Polipropileno metalizado $C = 2,2 \mu F / 250 \text{ V}$
Capacitor de Filtragem C_{o1} a C_{o2}	Eletrolítico $C = 470 \mu F / 250 \text{ V}$
Indutor L	$L = 60 \mu H /$ Número de espiras: 13
Resistência do indutor	$RL = 1 \text{ m}\Omega$

APÊNDICE C – Rotina de Programação

C.1 Rotina de programação para modelar o comportamento do módulo fotovoltaico

#Rotina de programação para modelar o comportamento de um módulo fotovoltaico com base no modelo de um diodo.

import math # Importa o módulo math

import numpy # Importa o módulo numpy do scipy

import matplotlib.pyplot as plt # Importa o módulo matplotlib.pyplot

Dados do painel

p_max = 270 # Potência máxima em W

i_mp = 8.75 # Corrente na máxima potência, em A

v_mp = 30.8 # Tensão na máxima potência, em V

i_sc = 9.32 # Corrente máxima do módulo, em A

v_oc = 37.9 # Tensão de circuito aberto

g_ref = 1000 # Irradiância de referência (W/m²)

tk_ref = 25 + 273 # Temperatura de referência, em Kelvin

u_voc = -0.31/100 # Coeficiente de temperatura (Voc)

u_sc = 0.053/100 # Coeficiente de temperatura (Isc)

n_c = 60 # Número de células do módulo

n_diodos = 3 # Número de diodos de bypass

Constantes utilizadas

a_fi = 1.3 # Fator de idealidade (A) - Silício policristalino 1.3

k = 1.381 * (1 / (10 ** 23)) # k = Constante de Boltzmann 1.381x10⁻²³ J/K

q = 1.602 * (1 / (10 ** 19)) # carga elétrica (1.602x10⁻¹⁹ C).

eg = 1.12 # gap de energia do material (eV), (1.12 eV for Si)

```

# Variáveis manipuláveis
g = 1000 # Irradiância (W/m²)
t = 25 # temperatura do painel, em °C
tk = t + 273 # Temperatura de operação, em Kelvin
dt = tk - tk_ref # Delta temperatura(temp. de operação - temp. referência)

# Fotocorrente
# Fig 1
i_phref = i_sc # Fotocorrente (A) em STC
i_ph = (g / g_ref) * (i_sc + (u_sc * dt)) # Fotocorrente gerada em condições
ambiente

# I0 (Saturação reversa ou corrente de fuga)
# Fig 2
a_ref = (n_c * k * a_fi * tk_ref) / q # a para STC (Tensão térmica (V))
a = (n_c * a_fi * k * tk) / q # a para condições ambiente (Tensão térmica (V))
i0_ref = i_sc * math.exp(-v_oc / a_ref) # Corrente de saturação reversa

# I0 para Condições ambiente
i0 = i0_ref * ((tk / tk_ref) ** 3) * math.exp(((q * eg) / (a_fi * k)) * ((1 / tk_ref)
- (1 / tk)))

# Cálculo da resistência série (Rs) e da resistência paralela (Rp)
rs_t = numpy.arange(0, 1, 0.001, dtype=numpy.float) # cria vetor com valores de
Rs de teste
rp_t = [] # cria vetor nulo para usar como rp_t de teste
i_mp_teste = [] # cria vetor nulo para usar como rp_t de teste
esc=1000
for n in range(0,esc):

# Calcula Rpt com base em Rst escolhido
aux = (v_mp + (i_mp * rs_t[n])) / (i_sc - i_sc * (math.exp((v_mp + rs_t[n] *

```

```

i_mp - v_oc) / a_ref)) + i_sc * (math.exp(-v_oc / a_ref)) - (p_max / v_mp))
rp_t.append(aux)

# Calcula Imp_teste com base em Rs e Rp escolhidos
aux2 = i_phref - i0_ref * (math.exp((v_mp + i_mp * rs_t[n]) / a_ref) - 1) -
((v_mp + rs_t[n] * i_mp) / -rp_t[n])
i_mp_teste.append(aux2)

# Se Imp_teste(n) for menor ou igual a Imp fazer:
z = rp_t[n]
w = rp_t[n-1]
if z <= w:
    rp = rp_t[n-1] # Rp igual a Rpt(n)
    rs = rs_t[n-1] # Rs igual a Rst(n)
    escolhido = n-1 # guarda posição escolhida
    n = 1001

# Mostra os valores das resistências Rs e Rp calculadas
print("Rs = ", rs)
print("Rp = ", rp)

yy= i_phref - i0_ref * (math.exp((v_mp + i_mp * rs) / a_ref) - 1) - ((v_mp +
rs * i_mp) / -rp)
print("corrente gerada com os valores Rs e Rp calculados: ",yy)

# Plota valores calculados
plt.xlabel('Rs = valor/1000')
plt.ylabel('Rp')
plt.title("Buscando Rp em relação à Rs")
plt.plot( rp_t, label="Rp")
plt.legend(bbox_to_anchor=(1.01, 1), loc=2, borderaxespad=0.)
plt.show()

```

```

# Traça curvas de V x I para STC

tk_vet = numpy.arange(1, 86, 1, dtype=numpy.int64) # cria vetor com valores de
Rs de teste

g_vet = numpy.arange(0, 1250, 50, dtype=numpy.int64) # cria vetor com valores
de Rs de teste

v_vet = numpy.arange(0, 46, 1, dtype=numpy.int64) # cria vetor com valores de
Rs de teste

i = [0] # cria vetor com valores de Rs de teste

i_bd = numpy.zeros((26,45,86))

#0 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 600 650 700 750 800 850 900 950
1000 1050 1100 1150 1200

for l in range(0,25,1):

    for m in range(1,85,1):

        i_pht = (g_vet[l] / g_ref) * (i_sc + i_sc*(u_sc * (tk_vet[m]-25))) # Fotocorrente
        gerada em condições ambiente

        v_oc_db=v_oc*(1+(u_voc*(tk_vet[m]-25)))

        a = (n_c * a_fi * k * (tk_vet[m]+273)) / q

        i0_ref = i_sc * math.exp(-v_oc_db / a) # Corrente de saturação reversa

    for n in range(0,45,1):

        aux3 = i_pht - i0_ref * (math.exp((v_vet[n] + i[n] * rs) / a) - 1) - ((v_vet[n] +
        rs * i[n]) / (rp))

        i.append(aux3)

        i_bd[l,n,m]=(aux3)

#Plota curvas I-V para o painel - Irradiância

plt.xlabel('TENSÃO - V')

plt.ylabel('CORRENTE - I')

plt.title("CS6k-270P / I-V curvas")

```

```
plt.plot( i_bd[0,:,26], label="0 W/m2")
plt.plot( i_bd[1,:,26], label="50 W/m2")
plt.plot( i_bd[2,:,26], label="100 W/m2")
plt.plot( i_bd[3,:,26], label="150 W/m2")
plt.plot( i_bd[4,:,26], label="200 W/m2")
plt.plot( i_bd[5,:,26], label="250 W/m2")
plt.plot( i_bd[6,:,26], label="300 W/m2")
plt.plot( i_bd[7,:,26], label="350 W/m2")
plt.plot( i_bd[8,:,26], label="400 W/m2")
plt.plot( i_bd[9,:,26], label="450 W/m2")
plt.plot( i_bd[10,:,26], label="500 W/m2")
plt.plot( i_bd[11,:,26], label="550 W/m2")
plt.plot( i_bd[12,:,26], label="600 W/m2")
plt.plot( i_bd[13,:,26], label="650 W/m2")
plt.plot( i_bd[14,:,26], label="700 W/m2")
plt.plot( i_bd[15,:,26], label="750 W/m2")
plt.plot( i_bd[16,:,26], label="800 W/m2")
plt.plot( i_bd[17,:,26], label="850 W/m2")
plt.plot( i_bd[18,:,26], label="900 W/m2")
plt.plot( i_bd[19,:,26], label="950 W/m2")
plt.plot( i_bd[20,:,26], label="1000 W/m2")
plt.plot( i_bd[21,:,26], label="1050 W/m2")
plt.plot( i_bd[22,:,26], label="1100 W/m2")
plt.plot( i_bd[23,:,26], label="1150 W/m2")
plt.plot( i_bd[24,:,26], label="1200 W/m2")

plt.legend(bbox_to_anchor=(1.01, 1), loc=2, borderaxespad=0.)

plt.show()

#Plota curvas I-V para o painel nas temperaturas de 5 °C, 25 °C, 45 °C e 65 °C.
plt.xlabel('TENSÃO - V')
```

```
plt.ylabel('CORRENTE - I')
plt.title("CS6k-270P / I-V curvas")
plt.plot( i_bd[20,:,5], label="5 °C")
plt.plot( i_bd[20,:,25], label="25 °C")
plt.plot( i_bd[20,:,45], label="45 °C")
plt.plot( i_bd[20,:,65], label="65 °C")
plt.legend(bbox_to_anchor=(1.01, 1), loc=2, borderaxespad=0.)
plt.title("CS6k-270P / I-V curvas")
plt.show()

# Salva os dados calculados em arquivo de texto
for p in range(0,25,1):
    arquivo = open("/home/modelagem.txt", 'r')
    conteudo = arquivo.readlines()
    conteudo.append(str(p)) # insira seu conteúdo

arquivo = open("/home/modelagem.txt", 'w') # Abre novamente o arquivo (escrita)
arquivo.writelines(conteudo) # escreva o conteúdo criado anteriormente nele.
arquivo.writelines('\n') # escreva o conteúdo criado anteriormente nele.

arquivo.close()

for pp in range(1,45,1):
    gg=i_bd[p,pp,45]

    arquivo = open("/home/modelagem.txt", 'r')
    conteudo = arquivo.readlines()
    conteudo.append(str(gg)) # insira seu conteúdo

    arquivo = open("/home/modelagem.txt", 'w') # Abre novamente o arquivo (escrita)
    arquivo.writelines(conteudo) # escreva o conteúdo criado anteriormente nele.
    arquivo.writelines('\n') # escreva o conteúdo criado anteriormente nele.
```

```
arquivo.close()
```

C.2 Rotina de programação para realizar o compartilhamento de corrente de carga - Arduino 1

```
//Bibliotecas
#include <Ethernet.h>
#include "PubSubClient.h"
#include <stdio.h>
#include <string.h>

//Definições
#define CLIENT_ID "BOOST_SOLAR"// ID do Cliente MQTT
#define PUBLISH_DELAY 10 // Intervalo de envio para o broker - 10 ms
#define AMOSTRAS 100 // Quantidade de leituras feitas na porta lida

//Definições de IP, máscara de rede e gateway
byte mac[ ] = {0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xEE};
IPAddress ip(192,168,0,200); // Define o endereço IP
IPAddress gateway(192,168,0,1); // Define o gateway
IPAddress subnet(255, 255, 255, 0); // Define a máscara de rede
bool startsend = HIGH;

//Constantes
float K_Solar=23.5;
float K_Carga=92.2;
int O_SC=508; // Constante offset do sensor de corrente
int C_SC=100; // Constante para calibração do sensor de corrente - 100 mV = 1A

//Variáveis
float I_Saida=0; // Corrente fornecida pelo Boost solar
float I_Carga = 0; // Corrente consumida pela carga
```

```
float V_Solar; // Tensão aplicada na entrada do Boost solar
float V_Carga; // Tensão na carga

//Variáveis coletadas do broker
float I_Aero; // Corrente fornecida pelo Boost aero
float V_Aero; // Tensão aplicada ao Boost aero
float piranometro;
long previousMillis; // Variáveis utilizada para armazenar o momento que a
informação foi publicada no broker

//Variáveis utilizadas para o setpoint
float p1=200; // Potência do Boost solar
float p2=200; // Potência do Boost aero
float pn1; // Proporção de compartilhamento da fonte-01
float pn2; // Proporção de compartilhamento da fonte-02
float IT; // Corrente total
float iref1; // Corrente de referência do conversor-01
float iref2; // Corrente de referência do conversor-02
float k1=0.1; // Incremento para ajuste do ganho de inclinação k1
float k2=0.01; // Incremento para ajuste do ganho de inclinação k2

//Variável utilizada para registrar que o Boost entrou em operação
int x=0;
EthernetClient ethClient;
PubSubClient mqttClient;

//Configurações
void setup()
{

//Define pinos como entradas analógicas
pinMode(A0, INPUT); // Entrada utilizada para medir a corrente de saída do
```

Boost

```
pinMode(A1, INPUT); // Entrada utilizada para medir a corrente da carga
```

```
pinMode(A2, INPUT); // Entrada utilizada para medir a tensão de entrada do
```

Boost

```
pinMode(A3, INPUT); // Entrada utilizada para medir a tensão aplicada a carga
```

```
//Define pinos utilizados como saída
```

```
pinMode(6, OUTPUT); // Saída utilizada para decrementar o setpoint
```

```
pinMode(7, OUTPUT); // Saída utilizada para incrementar o setpoint
```

```
pinMode(8, OUTPUT); // Saída utilizada para acionar o relé - placa de controle
```

```
pinMode(9, OUTPUT); // Saída utilizada para acionar o relé - placa de potência
```

```
//Configura a comunicação serial
```

```
Serial.begin(9600);
```

```
while (!Serial) { };
```

```
//Descreve qual é o Arduino
```

```
Serial.println(F("MQTT - Arduino do Boost Solar"));
```

```
Serial.println( );
```

```
//Inicializa a interface de rede
```

```
Ethernet.begin(mac, ip, gateway, subnet);
```

```
Serial.println(F("MAC, IP, GATEWAY e SUBNET foram definidos manualmente"));
```

```
Serial.print("IP address: ");
```

```
Serial.println(Ethernet.localIP());
```

```
Serial.println();
```

```
//Configura o cliente mqtt
```

```
mqttClient.setClient(ethClient);
```

```
mqttClient.setServer( "192.168.0.33", 1883); // Broker local
```

```
Serial.println(F("MQTT client configurado"));
```

```
mqttClient.setCallback(callback);
```

```
previousMillis = millis();
mqttClient.publish("SOLAR/IP", ip);
Serial.println(ip);
}

void loop( )
{

//Medição de grandezas
medir_correntes(); // Medição das correntes de saída e corrente da carga
medir_tensoes(); // Medição das tensões de entrada e da carga

//Altera o setpoint
compar();
muda_setpoint();

//Função utilizada para proteger o Boost e a carga
desliga();
delay(100); // Delay de 0.1 s

//É hora de enviar novos dados?
if (millis() - previousMillis > PUBLISH_DELAY)
{
sendData();
previousMillis = millis();
}
mqttClient.loop();
}

//Funções auxiliares
//Função utilizada para publicar no broker MQTT
void sendData()
{
```

```
char msgBuffer[20];

if (mqttClient.connect(CLIENT_ID))
{

    //Publica nesses tópicos
    mqttClient.publish("SOLAR/I_SAIDA", dtostrf(I_Saida, 6, 2, msgBuffer));
    mqttClient.publish("SOLAR/I_CARGA", dtostrf(I_Carga, 6, 2, msgBuffer));
    mqttClient.publish("SOLAR/V_SOLAR", dtostrf(V_Solar, 6, 0, msgBuffer));
    mqttClient.publish("SOLAR/V_CARGA", dtostrf(V_Carga, 6, 0, msgBuffer));
    mqttClient.publish("SOLAR/P1", dtostrf(p1, 6, 0, msgBuffer));

    //Inscreve-se nesses tópicos
    mqttClient.subscribe("AERO/I_SAIDA");
    mqttClient.subscribe("AERO/V_AERO");
    if (startsend)
    {
        mqttClient.publish("SOLAR/IP", ip);
        startsend = LOW;
    }
}

//Função utilizada para extrair informações do broker
void callback(char* topic, byte* payload, unsigned int length)
{
    char msgBuffer[20];
    payload[length]=0; // Termina a string com 0
    String strPayload = String((char*)payload); // Converte para string
    float f = strPayload.toFloat(); // Converte para float
    Serial.print("Message arrived [");
    Serial.print(topic);
```

```
Serial.print("] "); // MQTT_broker

for (int i = 0; i < length; i++)

delay(400); // Delay de 0.4 s

if (strcmp(topic,"AERO/I_SAIDA")==0)

{

I_Aero=f;

}

if (strcmp(topic,"AERO/V_AERO")==0)

{

V_Aero=f;

}

if (strcmp(topic,"PIRANOMETRO")==0)

{

piranometro=f;

}

}

//Função utilizada para medir correntes

void medir_correntes()

{

I_Saida((((lePorta(A0)-O_SC)/lePorta(A5))*5000)/C_SC);

I_Carga((((lePorta(A1)-O_SC)/lePorta(A5))*5000)/C_SC);

}

//Função utilizada para medir tensões

void medir_tensoes()

{

float tensao_A2=((lePorta(A2))/1024)*5000;

float tensao_A3=((lePorta(A3))/1024)*5000;

V_Solar= tensao_A2= (tensao_A2*K_Solar)/1000;

V_Carga= tensao_A3= (tensao_A3*K_Carga)/1000;
```

```
}

//Leitura de porta
float lePorta(uint8_t portaAnalogica)
{
    float total=0;
    for (int i=0; i<AMOSTRAS; i++)
    {
        total += 1.0 * analogRead(portaAnalogica);
        delay(1);
    }
    return total / (float)AMOSTRAS;
}

//Função utilizada para alterar o setpoint
void muda_setpoint()
{
    float PT=p1+p2;

    //Calcula a proporção do compartilhamento
    if (p1==p2)
    {
        pn1=0.5;
        pn2=0.5;
    }
    else
    {
        pn1=p1/PT;
        pn2=p2/PT;
    }
}
```

```
//Calcula as correntes de referência
IT=I_Saida+I_Aero;
iref1=pn1*I_Carga;
iref2=pn2*I_Carga;
if(iref1<I_Saida)
{
decrementa();
}
if(iref1>I_Saida)
{
incrementa();
}
}

//Função incrementa setpoint
void incrementa()
{
digitalWrite(7, HIGH); // Desliga relé 2
delay(1);
digitalWrite(7, LOW); // Liga relé 1
delay(1);
}

//Função decrementa setpoint
void decrementa()
{
digitalWrite(6, HIGH); // Desliga relé 2
delay(1);
digitalWrite(6, LOW); // Liga relé 1
delay(1);
}
```

```
//Função utilizada para proteção do boost
void desliga()
{

//Verifica se o boost entrou em operação
if (V_Carga>310)
{
x=1;
}

//Verifica se ocorreu subtensão
if ((V_Carga<300)&&(x==1))
{

//Aciona relés
digitalWrite(8, HIGH);
digitalWrite(9, HIGH);

//Aguarda 10 s
delay(10000);

//Desliga relés
//x=0;
digitalWrite(8, LOW);
digitalWrite(9, LOW);
}

//limita correntes de saída, de carga e tensão de carga
if ((I_Saida>(3))||(I_Carga>(3))||(V_Carga>330))
{

//Aciona relés
digitalWrite(8, HIGH);
```

```
digitalWrite(9, HIGH);

//Aguarda 10 s
delay(10000);

//x=0;

//Desliga relés
digitalWrite(8, LOW);
digitalWrite(9, LOW);
}
}
```

C.3 Rotina de programação para realizar o compartilhamento de corrente de carga - Arduino 2

```
//Bibliotecas
#include <Ethernet.h>
#include "PubSubClient.h"
#include <stdio.h>
#include <string.h>

//Definições
#define CLIENT_ID "BOOST_AERO"// ID do Cliente MQTT
#define PUBLISH_DELAY 10 // Intervalo de envio para o broker - 10 ms
#define AMOSTRAS 100 // Quantidade de leituras feitas na porta lida

//Definições de IP, máscara de rede e gateway
byte mac[ ] = {0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xEF};
IPAddress ip(192,168,0,201); // Define o endereço IP
IPAddress gateway(192,168,0,1); // Define o gateway
IPAddress subnet(255, 255, 255, 0); // Define a máscara de rede
bool startsend = HIGH;
```

```
//Constantes
float K_Aero=23.8;
int O_SC=508; // Constante offset do sensor de corrente
int C_SC=100; // Constante para calibração do sensor de corrente - 100 mV = 1A

//Variáveis
float I_Saida=0; // Corrente fornecida pelo Boost aero
float V_Aero; // Tensão aplicada na entrada do Boost aero
float ARef=5000; // Tensão de referência do Arduino
long previousMillis; // Variáveis utilizada para armazenar o momento que a
informação foi publicada no broker

//Variáveis recebida pelo MQTT
float I_Solar;
float V_Solar;
float I_Carga;
float V_Carga;

//Variáveis utilizadas para o setpoint
float p1=200; // Potência do Boost solar
float p2=200; // Potência do Boost aero
float PT=0.0001; // Potência total
float pn1; // Proporção de compartilhamento da fonte-01
float pn2; // Proporção de compartilhamento da fonte-02
float IT; // Corrente total
float iref1; // Corrente de referência do conversor-01
float iref2; // Corrente de referência do conversor-01
float k1=0.1; // Incremento para ajuste do ganho de inclinação k1
float k2=0.01; // Incremento para ajuste do ganho de inclinação k2

//Variável utilizada para registrar que Boost entrou em operação
```

```
int x=0;

EthernetClient ethClient;
PubSubClient mqttClient;

//Configurações
void setup()
{

//Define pinos como entradas analógicas
pinMode(A0, INPUT); // Entrada utilizada para medir a corrente de saída do
Boost
pinMode(A1, INPUT); // Entrada utilizada para medir a tensão de entrada do
Boost

//Define pinos utilizados como saída
pinMode(6, OUTPUT); // Saída utilizada para decrementar o setpoint
pinMode(7, OUTPUT); // Saída utilizada para incrementar o setpoint
pinMode(8, OUTPUT); // Saída utilizada para acionar o relé - placa de controle
pinMode(9, OUTPUT); // Saída utilizada para acionar o relé - placa de potência

//Configura a comunicação serial
Serial.begin(9600);
while (!Serial) ;

//Descreve qual é o Arduino
Serial.println(F("MQTT - Arduino do Boost Aero"));
Serial.println();

//Inicializa a interface de rede
Ethernet.begin(mac, ip, gateway, subnet);
Serial.println(F("MAC, IP, GATEWAY e SUBNET foram definidos manualmente"));
Serial.print("IP address: ");
```

```
Serial.println(Ethernet.localIP());
Serial.println();

//Configura o cliente mqtt
mqttClient.setClient(ethClient);
mqttClient.setServer( "192.168.0.33", 1883); // Broker local
Serial.println(F("MQTT client configurado"));
mqttClient.setCallback(callback);
previousMillis = millis();
mqttClient.publish("AERO/IP", ip);
Serial.println(ip);
}

void loop()
{

// Medição de grandezas
medir_correntes(); // Medição da corrente de saída
medir_tensoes(); // Medição da tensão de entrada

//Altera o setpoint
muda_setpoint();

//Função utilizada para proteger o Boost e carga
desliga();

delay(100); // Delay de 0.1 s

//É hora de enviar novos dados?
if (millis() - previousMillis > PUBLISH_DELAY)
{
sendData();
previousMillis = millis();
}
```

```
mqttClient.loop();  
  
}  
  
//Funções auxiliares  
//Função utilizada para publicar no broker MQTT  
void sendData()  
{  
    char msgBuffer[20];  
    if (mqttClient.connect(CLIENT_ID))  
    {  
  
        //Publica nesses tópicos  
        mqttClient.publish("AERO/I_SAIDA", dtostrf(I_Saida, 6, 2, msgBuffer));  
        mqttClient.publish("AERO/V_AERO", dtostrf(V_Aero, 6, 0, msgBuffer));  
  
        //Inscreve-se nesses tópicos  
        mqttClient.subscribe("SOLAR/I_SAIDA");  
        mqttClient.subscribe("SOLAR/I_CARGA");  
        mqttClient.subscribe("SOLAR/V_SOLAR");  
        mqttClient.subscribe("SOLAR/V_CARGA");  
        mqttClient.subscribe("SOLAR/P1");  
        if (startsend)  
        {  
            mqttClient.publish("AERO/IP", ip);  
            startsend = LOW;  
        }  
    }  
}  
  
//Função utilizada para extrair informações do broker  
void callback(char* topic, byte* payload, unsigned int length)
```

```
{
char msgBuffer[20];
payload[length]='\0'; // Termina a string com 0
String strPayload = String((char*)payload); // Converte para string
float f = strPayload.toFloat(); // Converte para float
Serial.print("Message arrived [");
Serial.print(topic);
Serial.print("] "); // MQTT_broker
for (int i = 0; i < length; i++)
delay(400); // Delay de 0.4 s
if (strcmp(topic,"SOLAR/I_SAIDA")==0)
{
I_Solar=f; }
if (strcmp(topic,"SOLAR/V_SOLAR")==0)
{
V_Solar=f;
}
if (strcmp(topic,"SOLAR/I_CARGA")==0)
{
I_Carga=f;
}
if (strcmp(topic,"SOLAR/V_CARGA")==0)
{
V_Carga=f;
}
if (strcmp(topic,"SOLAR/P1")==0)
{
p1=f;
}
}
```

```
//Função utilizada para medir correntes  
void medir_correntes()  
{  
float Voltagem = (lePorta(A0) / lePorta(A5)) * 5000;  
I_Saida = (Voltagem/130)-19.07;  
}
```

```
//Função utilizada para medir tensões  
void medir_tensoes()  
{  
float tensao_A1=((lePorta(A1))/lePorta(A5))*AREf;  
V_Aero= tensao_A1= (tensao_A1*K_Aero)/1000;  
}
```

```
//Leitura de porta  
float lePorta(uint8_t portaAnalogica)  
{  
float total=0;  
for (int i=0; i<AMOSTRAS; i++)  
{  
total += 1.0 * analogRead(portaAnalogica);  
delay(1);  
}  
return total / (float)AMOSTRAS;  
}
```

```
//Função utilizada para alterar o setpoint  
void muda_setpoint()  
{  
float PT=p1+p2;
```

```
//Calcula a proporção do compartilhamento
if (p1==p2)
{
pn1=0.5;
pn2=0.5;
}
else
{
pn1=p1/PT;
pn2=p2/PT;
}

//Calcula as correntes de referência
IT=I_Saida+I_Solar;
iref1=pn1*I_Carga;
iref2=pn2*I_Carga;
if(iref2<I_Saida)
{
decrementa();
}
if(iref2>I_Saida)
{
incrementa();
}
}

//Função incrementa setpoint
void incrementa()
{
digitalWrite(7, HIGH); //Desliga rele 2
delay(1);
```

```
digitalWrite(7, LOW); //Liga rele 1
delay(1);
}

//Função decrementa setpoint
void decrementa()
{
digitalWrite(6, HIGH); // Desliga relé 2
delay(1);
digitalWrite(6, LOW); // Liga relé 1
delay(1);
}

//Função utilizada para proteção do Boost
void desliga()
{
//Verifica se o boost entrou em operação
if (V_Carga>310)
{
x=1;
}

//Verifica se ocorreu subtensão
if ((V_Carga<300)&&(x==1))
{

//Aciona relés
digitalWrite(8, HIGH);
digitalWrite(9, HIGH);

//Aguarda 10 s
delay(10000);
```

```
//x=0;

//Desliga relés
digitalWrite(8, LOW);
digitalWrite(9, LOW);
}

//limita correntes de saída, de carga e tensão de carga
if ((I_Saida>(0.28))||(I_Carga>(0.5))||(V_Carga>330))
{

//Acionar relés
digitalWrite(8, HIGH);
digitalWrite(9, HIGH);

//Aguarda 10 s
delay(10000);
//x=0;

//Desligar relés
digitalWrite(8, LOW);
digitalWrite(9, LOW);
}
}
```