

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUIZA GASPARI DIAS

**CONTROLE DA TENSÃO ELÉTRICA DO BARRAMENTO CC DE
UMA MICRORREDE**

CURITIBA
2019

LUISA GASPARI DIAS

**CONTROLE DA TENSÃO ELÉTRICA DO BARRAMENTO CC DE
UMA MICRORREDE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em engenharia elétrica da Universidade Federal do Paraná como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheira Eletricista

Orientador: Prof. Dr. João Américo Vilela Junior

Coorientador: Eng. Thiago Crozeta de Araujo

CURITIBA
2019

"Seu futuro ainda não está escrito, o de ninguém está. Seu futuro será o que você quiser, então faça dele algo bom".

Dr. Emmett Brown - *filme De Volta para o Futuro*

AGRADECIMENTOS

Agradeço o meu professor orientador Prof. Dr. João Américo Vilela Junior pela oportunidade de realizar este trabalho, pelo compromisso e comprometimento em sua orientação ao longo desse semestre.

Agradeço ao coorientador Thiago C. Araujo pelo suporte, paciência e ajuda ao me orientar nesse trabalho.

Agradeço em especial aos meus pais, Josiane de Fátima Gaspari Dias e Sergio Luis Dias, por todo amor, carinho, confiança e incentivo ao longo de toda a minha vida. Agradeço por todo o sacrifício e trabalho duro para me proporcionar sempre o melhor. Obrigada por serem meu porto-seguro e meus heróis.

Agradeço ao meu namorado, Matheus Picussa, por sempre me apoiar e por sempre estar disposto a ajudar. Ainda, agradeço pela paciência e pelas dicas de organização e simulação do trabalho.

Agradeço aos meus amigos, por sempre estarem ao meu lado ao longo desta jornada. São eles que me fizeram rir durante os momentos difíceis, que me ajudaram durante as intermináveis e difíceis provas e que, também, me proporcionaram uma das melhores épocas da minha vida. Em especial aos meus amigos Bruna Hoffmann, Pablo Lopes, Alan Tabata, Pedro Brasil, Marco Antônio Rios, Mariana Mullinari e Cristian Rocco pela força e amizade que cruza fronteiras e mares.

Aos meus amigos Morgana Klemz, Marcelle Zatoni, Matheus Proença, Andressa Jasinski, Juliana Apfelgrun, Mayada Reis, Lucas Schueda e Thais Lage, obrigada por estarem presentes e me acompanharem logo após o meu retorno de intercâmbio. Vocês foram peças primordiais para a minha reta final na universidade.

Agradeço a Volvo do Brasil pela enorme contribuição na minha carreira profissional e pela confiança no meu trabalho. Agradeço por todos os meus colegas de trabalho que sempre estão dispostos a ajudar e ensinar.

RESUMO

DIAS, Luisa. CONTROLE DA TENSÃO ELÉTRICA DO BARRAMENTO CC DE UMA MICRORREDE. 2019. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso – , Universidade Federal do Paraná. CURITIBA, 2019.

O presente trabalho avaliou por meio de simulações no MATLAB/SIMULINK a operação de um barramento CC de 725V da microrrede que esta em fase de implementação no prédio do Departamento de Engenharia Elétrica (DELT) na Universidade Federal do Paraná (UFPR). Este barramento CC é composto por um conversor CC/CC de 30kW e, conectado a este, uma bateria de níquel-sódio com capacidade de 45kWh. Para efeito de simulação, acrescentou à microrrede CC, painéis fotovoltaicos de 10,171kWp, um inversor com uma fonte de tensão para simular uma fonte CA e cargas ativas para representar os equipamentos conectados ao barramento CC. O controle dessa microrrede CC se dá pelo controle Droop que, a partir de uma tensão de referência, um K e a tensão CC do barramento CC, regula a corrente de referência utilizada pelo compensador de corrente dos conversores estáticos (conversor CC/CC e o inversor CC/CA) para ajustar a tensão da microrrede CC. As simulações realizadas visaram analisar o comportamento da microrrede CC diante de diferentes situações de operação. Com isso, validou a utilização do controle droop para controlar o barramento CC e conseguiu constatar certos comportamentos dessa microrrede quanto a geração e distribuição de carga.

Palavras-chave: Microrrede CC, Barramento CC, Conversores estáticos, Geração Distribuída, Controle Droop

ABSTRACT

DIAS, Luisa. ELECTRIC VOLTAGE CONTROL OF A DC BUS IN A DC MICROGRID. 2019. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso – , Universidade Federal do Paraná. CURITIBA, 2019.

The aim of this work is to evaluate through simulation in MATLAB/SIMULINK the operation of a 725V DC bus in a microgrid, that it is being implemented in Departamento de Engenharia Elétrica (DELT) at Universidade Federal do Paraná (UFPR). The DC grid will have a 30kW DC/DC converter and a Sodium-Nickel battery with 45kWh capacity connect with this bus. For the simulations, added in the DC bus a 10,171kWp Photovoltaic panels, an inverter with a voltage source in order to simulate a CA source, and an active charge to represent the connected equipment in the DC bus. The control of this DC microgrid is given by the Droop control which, from a reference voltage, a constant K and the DC voltage of the DC bus, regulates the reference current used by the current compensator of the static converters (DC/DC Converter and DC/AC Inverter) to adjust the DC microgrid's voltage. The carried out simulations were aimed in analyzing the behavior of the DC microgrid in different operating situations. With this, it was validated the use of the droop control to control the DC bus and it was able to verify certain behaviors of this microgrid in generation and distribution of a load.

Keywords: DC Microgrid, DC Bus, Statics Converters, Distributed Generation, Droop control

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração do sistema CC conectado à uma rede, com um conversor CC/CC	2
Figura 2 – Diagrama simplificado dos modos de Controle	6
Figura 3 – Representação de um controle Centralizado para uma microrrede CC	6
Figura 4 – Circuito equivalente do controle Droop	8
Figura 5 – Implementação do controle Droop em uma fonte CC	9
Figura 6 – Representação da curva de descarga para uma corrente constante para uma tensão V_{bat}	10
Figura 7 – Ilustração do BMS e SSC das baterias	12
Figura 8 – Exemplo do uso do <i>software Publish or Perish 6</i> - Gerenciamento bibliográfico e limite de 1000 resultados	14
Figura 9 – Exemplo do uso do <i>software Publish or Perish 6</i> - Busca Finalizada	15
Figura 10 – microrrede que será desenvolvida no DELT	19
Figura 11 – Barramento CC da microrrede DELT que será o foco deste trabalho de conclusão de curso	20
Figura 12 – Representação do barramento CC da microrrede que será simulado no MATLAB/SIMULINK	21
Figura 13 – Circuito no MATLAB/SIMULINK que representa o microrrede CC	23
Figura 14 – Representação do Conversor CC/CC no MATLAB/SIMULINK	24
Figura 15 – Representação do Inversor no MATLAB/SIMULINK	24
Figura 16 – Controlador do Inversor no MATLAB/SIMULINK	25
Figura 17 – Curva de Irradiância no dia 06/11/2018 no campus universitário	25
Figura 18 – Representação do painel FV no MATLAB/SIMULINK	26
Figura 19 – Diagrama do controle Droop implementado no MATLAB/SIMULINK	26
Figura 20 – Gráfico dos limites propostos para o controle Droop	27
Figura 21 – Gráfico gerado através do MATLAB/SIMULINK da curva corrente nominal de descarga	28
Figura 22 – Gráfico gerado através do MATLAB/SIMULINK da curva corrente nominal de descarga	28
Figura 23 – Circuito de chaveamento das cargas ativas	29
Figura 24 – Comportamento do chaveamento das três cargas ao longo da simulação	30
Figura 25 – Sentido das potências do circuito para $K_{inversor} = K_{conversor}$	31
Figura 26 – Potência do Inversor e do Conversor para $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual à 725V	32
Figura 27 – Potência gerada pelo painel FV para $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual à 725V	33

Figura 28 – Corrente do Inversor e do Conversor para $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual à 725V	34
Figura 29 – Corrente do painel FV $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual à 725V	34
Figura 30 – Tensão no barramento CC para $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual à 725V	35
Figura 31 – Potência do Inversor e Conversor para $K_{inversor} \neq K_{conversor}$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual à 725V e potência do FV	37
Figura 32 – Caso 1: Tensão no barramento CC para $K_{inversor} = 0,9$ e $K_{conversor} = 0,8$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual à 725V	38
Figura 33 – Caso 2: Tensão no barramento CC para $K_{inversor} = 0,9$ e $K_{conversor} = 0,2$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual à 725V	38
Figura 34 – Sentido das Potências para as simulações com $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$, V_{ref} do inversor igual a 700V e V_{ref} do conversor igual 725V	40
Figura 35 – Potência do Conversor e do Inversor para $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$, V_{ref} do inversor igual a 700V e V_{ref} do conversor igual 725V	40
Figura 36 – Tensão no barramento CC para $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$, V_{ref} do inversor igual a 700V e V_{ref} do conversor igual 725V	41
Figura 37 – Sentido das Potências para as simulações com $K_{inversor} = 0,2$ e $K_{conversor} = 0,8$, V_{ref} do inversor igual a 725V e V_{ref} do conversor igual 685V	43
Figura 38 – Potência do Conversor e do Inversor para $K_{inversor} = 0,2$ e $K_{conversor} = 0,8$, V_{ref} do inversor igual a 725V e V_{ref} do conversor igual 685V	43
Figura 39 – Sentido das potências para uma MR CC com um FV conectado, onde $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e diferentes V_{ref} no inversor e conversor	44
Figura 40 – Potência no inversor e no conversor para uma MR CC com um FV conectado, onde $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e diferentes V_{ref} no inversor e conversor	45
Figura 41 – Sentido das potência para uma MR CC com um FV conectado, onde $K_{inversor} \neq K_{conversor}$ e diferentes V_{ref} no inversor e conversor	46
Figura 42 – Potência no inversor e no conversor para uma MR CC com um FV conectado, onde $K_{inversor} = 0,2$ e $K_{conversor} = 0,9$ e diferentes V_{ref} no inversor e conversor	46
Figura 43 – Sentido das Potência para uma MR CC com carga conectada quando $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e V_{ref} do inversor e conversor é 725V	47
Figura 44 – Potência no Conversor para uma microrrede CC com carga conectada	48
Figura 45 – Tensão no barramento CC para a microrrede CC com carga conectada	49
Figura 46 – Potência no Conversor para MR CC quando $K_{inversor} = 0,2$ e $K_{conversor} = 0,7$ e V_{ref} do inversor e conversor é 725V	50
Figura 47 – Potência no Inversor para MR CC quando $K_{inversor} = 0,2$ e $K_{conversor} = 0,7$ e V_{ref} do inversor e conversor é 725V	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modos de operação das microrredes DC conforme o estado da bateria	11
Tabela 2 – Palavras-Chaves (PCs) para o levantamento bibliográfico	14
Tabela 3 – Nova filtragem das PCs	15
Tabela 4 – Resultado do cruzamento das PCs presentes na Tabela 2	15
Tabela 5 – Resultado após filtragem do título dos artigos	16
Tabela 6 – Resultado após filtragem do material científico	16
Tabela 7 – Artigos escolhidos como referência	17
Tabela 8 – Dados de simulação para $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual a 725V	31
Tabela 9 – Dados de simulação para $K_{inversor} \neq K_{conversor}$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual à 725V	36
Tabela 10 – Dados de projeto para uma MR CC com carga conectada quando $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e V_{ref} do inversor e conversor é 725V	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DELT	Departamento de Engenharia Elétrica
UFPR	Universidade Federal do Paraná
PV	Painéis Fotovoltáicos
MV	Microrredes
CA	Corrente Contínua
CC	Corrente Alternada
SIN	Sistema Interligado Nacional
PCs	Palavras-Chave
SOH	State Of Health
SOC	State Of Charge
BMS	Battery Management System
SSC	System Supervisory Control

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTO	1
1.2 OBJETIVO	2
1.2.1 Objetivo Geral	2
1.2.2 Objetivo Específico	3
1.3 JUSTIFICATIVA	3
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1 MICRORREDES	4
2.1.1 Microrredes híbridas	4
2.2 CONTROLE DAS MICRORREDES	4
2.2.1 Controle Hierarquico	5
2.2.2 Modos de Controle - Centralizado e Descentralizado	5
2.2.3 Modo Descentralizado para controle de uma Microrrede CC	7
2.2.3.1 Controle Droop	7
2.3 BATERIAS	9
2.3.1 Curva de Carga e Descarga das baterias	9
2.3.2 Controle do carga e descarga de baterias	10
2.3.3 Battery Management System - BMS	11
3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
3.1 SELEÇÃO DO PORTIFÓLIO BIBLIOGRÁFICO	13
3.2 REVISÃO DA LITERATURA	17
4 – MATERIAIS E MÉTODOS	19
4.1 MATERIAIS	20
4.1.1 MATLAB	20
4.1.2 SIMULINK	21
4.2 MÉTODO	21
4.2.1 Resultados Fundamentais a serem atingidos	22
5 – TESTE E ANÁLISE DOS RESULTADOS	23
5.1 MODELAGEM NO MATLAB/SIMULINK DOS COMPONENTES UTILIZADOS NO BARRAMENTO CC DA MICRORREDE CC DO DELT	23
5.1.1 Conversor CC/CC	24
5.1.2 Inversor CC/CA	24

5.1.3	Painel Fotovoltáico	25
5.1.4	Controle Droop	26
5.1.5	Bateria de Níquel-Sódio	27
5.1.6	Cargas Ativas	28
5.2	SIMULAÇÃO	30
5.2.1	SEM CARGA CONECTADA AO BARRAMENTO CC DA MICRORREDE CC	30
5.2.1.1	Para $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual à 725V	31
5.2.1.2	Para $K_{inversor} \neq K_{conversor}$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual à 725V	35
5.2.2	DIFERENTES TENSÕES DE REFERÊNCIA PARA O CONVERSOR E O INVERSOR	39
5.2.2.1	Potência no inversor e no conversor para $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$, V_{ref} do inversor igual a 700V e V_{ref} do conversor igual 725V	39
5.2.2.2	Potência no inversor e no conversor para $K_{inversor} = 0,2$ e $K_{conversor} = 0,8$, V_{ref} do inversor igual a 725V e V_{ref} do conversor igual 685V	42
5.2.2.3	Potência no inversor e no conversor para uma MR CC com um FV conectado, onde $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e diferentes V_{ref} no inversor e conversor	44
5.2.2.4	Potência no inversor e no conversor para uma MR CC com um FV conectado, onde $K_{inversor} = 0,2$ e $K_{conversor} = 0,9$ e diferentes V_{ref} no inversor e conversor	45
5.2.3	CARGA ATIVA CONECTADA AO BARRAMENTO CC	47
5.2.3.1	Comportamento da MR CC quando $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e V_{ref} do inversor e conversor é 725V	47
5.2.3.2	Comportamento da MR CC quando $K_{inversor} = 0,2$ e $K_{conversor} = 0,7$ e V_{ref} do inversor e conversor é 725V	50
6	– CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	52
	Referências	54
	Anexos	56
	ANEXO A–DATASHEET BATERIA NÍQUEL-SÓDIO ST523	57

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

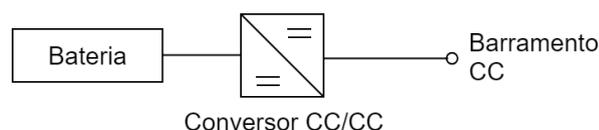
A geração distribuída (GD) tornou-se, através dos anos, expressiva segundo a Agência Nacional de Engenharia Elétrica (ANEEL, 2018b). Juntamente, com a dissiminação da GD, cresceu o percentual de geração das fontes fotovoltaicas (FV). A utilização dessa fonte por consumidores-geradores é de 25%, em seguida vêm as fontes termelétrica a biomassa ou biogás, que constam com 76 instalações (um total de 0,1%) (ANEEL, 2018a). Ao utilizar as GDs reduz-se os impactos ambientais e as perdas que ocorrem na transmissão. Na grande parte dos casos, os geradores de energia renováveis, produzem eletricidade em corrente contínua ou em frequência variável, para integrar parte desta energia à rede de distribuição; logo, a presença de um inversor de tensão é indispensável (EGHTEDARPOUR; FARJAH, 2014).

Quando na rede de distribuição de energia é atendida diretamente por pelo menos uma unidade geração distribuição ela pode ser classificada como uma microrrede (MR). As microrredes podem operar em corrente contínua (CC), em corrente alternada (CA) e com a combinação de corrente contínua e alternada. Ao operar desta maneira, as MR são chamadas de híbridas (UNAMUNO; BARRENA, 2015). As MRs possuem dois modos de operação, ilhada ou conectada. O modo ilhado é quando a MR consegue operar isolado ao Sistema Interligado Nacional (SIN). As unidades armazenadoras recebem a potência ativa gerada na MR e são balanceadas conforme à demanda da carga. Em contra partida, o modo conectado é quando há interação com o SIN e qualquer excesso de potência ou falta de energia, a rede consegue compensar (OLIVARES et al., 2014).

Ao operar em modo ilhado o gerenciamento da MR é mais complexo, pois essa passa operar com recursos finitos e o balanço de potência deve ser sempre satisfeito. Ou seja, a potência gerada deve ser igual à potência consumida e, caso não exista como armazenar essa parcela extra de energia, a tensão do barramento subirá até que se atinja o equilíbrio do sistema. Na situação oposta, onde a variação de tensão é mínima em torno de um valor nominal do barramento, não há problemas quanto ao funcionamento da MR (CESAR, 2017).

O sistema de armazenamento de energia simplificado de uma microrrede esta na Figura 1. Este circuito é composto por uma unidade armazenadora (neste caso uma bateria), um conversor estático e a microrrede CC. A bateria é composta por um sistema CC e o BMS, que monitora esse sistema CC recebendo informações de temperatura, tensão e corrente da bateria.

Figura 1 – Ilustração do sistema CC conectado à uma rede, com um conversor CC/CC



FONTE: A Autora (2019)

Os conversores estáticos são os inversores de tensão, que operam tanto como fontes de tensão e, neste trabalho, como fonte de corrente, e os conversores CC/CC, que operam como fontes de corrente. A conversão deve ser bidirecional para ocorrer a carga e descarga da bateria. A interconexão entre a rede CA com a rede CC ocorre através de um inversor de tensão também bidirecional.

O controle desses conversores estáticos pode ser de diferentes formas. Contudo, a eficácia do controle desses equipamentos está diretamente relacionada como é construído os níveis de controle (níveis do zero ao três) e qual é o tipo de controle escolhido (descentralizado e centralizado).

Um dos tipos de controle é o descentralizado. Ele é chamado desta maneira, pois não há um canal de comunicação entre os equipamentos, como por exemplo o controle Droop. Enquanto o controle centralizado opera através do princípio mestre-escravo, onde um conversor (conversor mestre) opera como uma fonte de tensão e as demais fontes operam como uma fonte de corrente. (DRAGICEVIC et al., 2016).

Neste trabalho é analisado através de simulação o comportamento da microrrede CC que está em fase de implementação no prédio do Departamento de Engenharia Elétrica - DELT/UFPR. O foco do estudo está no comportamento da MR CC em frente às variações de cargas do sistema e a alteração dos parâmetros de controle. Propõe a utilização do controle droop é para manter a tensão da microrrede CC.

O controle Droop é aplicada a cada fonte de corrente dessa MR CC. Este controle seta uma tensão na saída do seu bloco através da multiplicação de uma corrente da fonte CC com uma constante K (inclinação da reta tensão por corrente) e subtrai este valor de uma tensão de referência estabelecida (CESAR, 2017). Essa tensão de saída do droop será a tensão utilizada dentro dos conversores estáticos para estabilizar o barramento CC.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é criar um modelo em MATLAB/SIMULINK de um barramento CC da microrrede CC, que será futuramente implementada no Departamento de Engenharia Elétrica (DELT), composto por baterias, conversores, painéis solares e uma carga ativa.

1.2.2 Objetivo Específico

Os objetivos específicos esperados na realização deste trabalho são:

- Desenvolver um modelo de um barramento CC de uma microrrede CC no MATLAB/SIMULINK;
- Simular no MATLAB/SIMULINK o comportamento dessa microrrede em diferentes situações de operação:
 - Carga da bateria
 - Descarga da bateria
 - Diferentes faixas de variação de tensão
 - Controle da potência para a rede de distribuição
 - Oscilações na geração fotovoltaica
- Implementar a malha de controle Droop.
- Implementar uma malha de controle capaz de:
 - Operar com variação de carga
 - Configuração do K do controle Droop

1.3 JUSTIFICATIVA

Tendo-se em vista a microrrede que será desenvolvida futuramente no Departamento de Engenharia Elétrica (DELT), este trabalho de conclusão de curso busca desenvolver e simular um sistema de controle do barramento CC desta microrrede CC utilizando o software MATLAB/SIMULINK.

Portanto, a diferenciação do projeto reside na simulação de variações dos parâmetros de controle (K , V_{ref}) na MR CC e no gerenciamento da tensão em situações extremas de carga, descarga e temperatura. Desta maneira, ao fazer a implementação física deste barramento CC na microrrede do DELT, saberá como o sistema irá se comportar.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 6 capítulos. O capítulo 1, Introdução, apresenta o contexto, os objetivos gerais e específicos a serem alcançados e a justificativa para a realização do trabalho. O capítulo 2, Fundamentação Teórica, discorre sobre as microrredes e os sistemas de controle desta (controle Droop), o BMS (Battery Management System) das baterias e o controle de carga e descarga dessas. O capítulo 3, Estado da Arte, contempla a realização da busca por material científico referente ao tema. O capítulo 4, Materiais e Métodos, descreve as ferramentas computacionais utilizadas, os materiais em estudo, como MATLAB e SIMULINK, e a abordagem utilizada para realizar o trabalho proposto. O capítulo 5, Teste e Análise dos Resultados, abrange as simulações realizadas no software MATLAB/SIMULINK. Por fim, o capítulo 6, Conclusão e Trabalhos Futuros, exhibe as principais conclusões obtidas ao longo da realização do trabalho, assim como a perspectiva de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MICRORREDES

De acordo com Hatziargyriou (2013) microrredes são sistemas de distribuição de baixa tensão com fontes distribuidoras de energia (painéis solares, células combustíveis, motores) junto com dispositivos armazenadores (capacitores de energia e baterias) e cargas flexíveis.

Assim, as microrredes podem ser definidas como a combinação de unidades armazenadoras de energia, uma demanda de carga e geração nas redes locais. Essas estão localizadas em níveis de baixa tensão (abaixo dos Mega Watts) e devem ser capazes de operar tanto em modo normal (conectado à rede) ou em estado de ilhado (isolado) (HATZIARGYRIOU, 2013).

Em modo normal, o déficit de potência é suprido pela rede de distribuição da concessionária e qualquer excesso de potência que haja na microrrede, é distribuído ao longo desse sistema. No modo isolado, a potência ativa gerada pela microrrede é transferida para unidades armazenadoras e devem ser balanceadas conforme as demandas de carga (OLIVARES et al., 2014). Há o caso, também, que as unidades geradores alimentam as cargas da microrrede, sem a necessidade de armazenar energia. Esse modo é mais aplicável em setores automobilísticos, marítimos e em áreas rurais (GUERRERO et al., 2013).

2.1.1 Microrredes híbridas

Microrredes híbridas são compostas por dispositivos de corrente alternada e corrente contínua. As vantagens suas vantagens são a integração dos dispositivos CA e CC- o número de elementos conectados a rede é mínimo, ou seja, reduz-se os estágios de conversão e perda de energia-, a sincronização de geração e armazenamento das unidades, fácil modificação dos níveis de tensão por meio de transformadores e conversores CC/CC, a viabilidade econômica quando há um alto número de dispositivos na rede (UNAMUNO; BARRENA, 2015).

Unamuno; Barrena (2015) citam desvantagens quanto às microrredes híbridas, como a proteção dos dispositivos DC, a confiabilidade da rede híbrida se comparada à uma rede CA e a alta complexidade do controle do sistema devido a rede operar tanto em CA quanto em CC.

2.2 CONTROLE DAS MICRORREDES

O controle das microrredes se dá de diferentes formas. No controle centralizado, existe uma central de controle responsável pela tomada de decisão sobre a microrrede. Esse tipo de controle exige uma intensa comunicação e eficiente entre a unidade controladora e a unidade controlada. Em contrapartida, o controle descentralizado, as unidades são controladas por um controle local, o qual independe das demais unidades controladas (DRAGICEVIC et al., 2016).

Existe uma grande dificuldade de coordenar a operação no controle descentralizado,

pois não há interação entre as unidades controladas. Enquanto isso, o controle centralizado exige esforço computacional e de comunicação para gerenciar as unidades controladoras. Assim, o controle hierárquico se mostra mais viável, sendo este o meio termo entre as formas de controle, tornando-o confiável e as operações possíveis (OLIVARES et al., 2014).

2.2.1 Controle Hierarquico

O controle hierárquico é dividido em quatro níveis segundo Palizban *et al.* (2014), esses são:

- Nível Zero: o nível mais baixo da hierarquia e é o que apresenta a resposta mais rápida. Este nível é chamado de controle de loop interno;
- Nível Primário: Baseia-se exclusivamente nas medidas locais e não depende de comunicação com os níveis mais altos da hierarquia para tomar decisões;
- Nível Secundário: Controlador central da microrrede e é responsável pela coordenação dos controladores locais, assim como pela confiabilidade e otimização econômica da microrrede, tanto no modo conectado como também no modo ilhado;
- Nível Terciário: nível mais alta da hierarquia e é responsável pela comunicação entre microrredes com a rede de distribuição e possivelmente com outras microrredes, indicando os desafios de operação. Sua atuação é a mais lenta entre os níveis de controle.

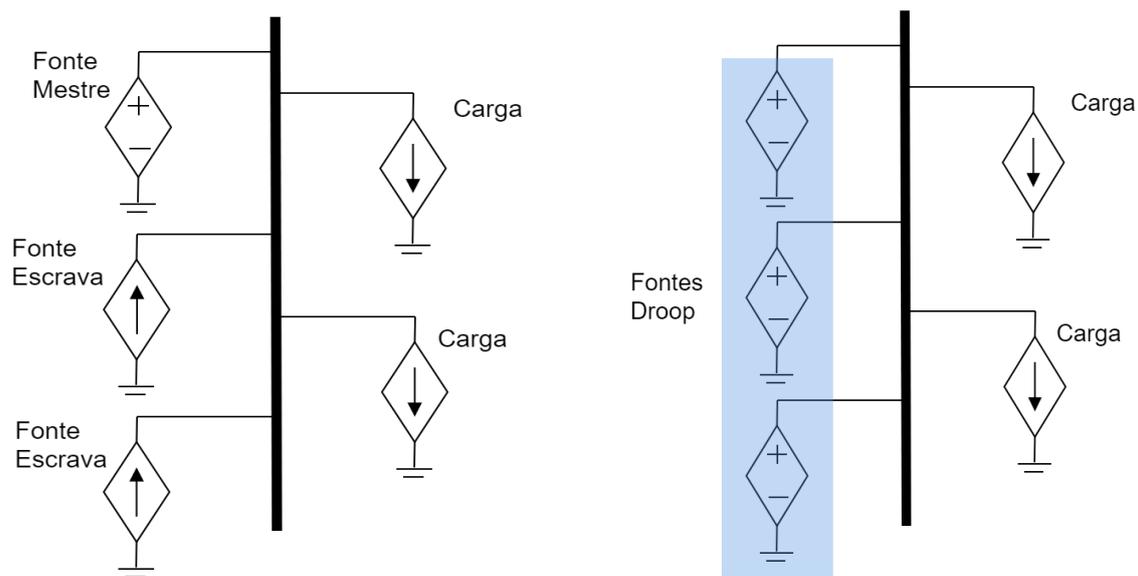
2.2.2 Modos de Controle - Centralizado e Descentralizado

Pode-se controlar a tensão em um barramento CC de uma microrrede CC de diversas formas. Entre elas esta o modo centralizado, dado pelo link de comunicação mestre-escravo, onde o controlador principal (mestre) controla os inúmeros outros dispositivos secundários (escravos). Assim, o mestre comanda os demais conversores presentes na rede. De maneira simplificada, o modo centralizado baseia-se na coleta das informações da rede de distribuição, sendo que esta informação é processada e reenviada novamente para o sistema.

O modo de controle descentralizado não possui comunicação digital via link e há apenas um canal de comunicação entre os equipamentos. Este modo utiliza o controle por droop, onde todas as fontes operam como fontes em paralelo, sendo que cada fonte opera como se possuísse um resistor em série. (DRAGICEVIC et al., 2016).

A [Figura 2](#) mostra os dois modos de controle de tensão no barramento CC. Observa-se que o modo centralizado é mais fácil de controlar, pois há apenas um conversor que estabiliza a tensão variando a potência de forma a manter a tensão constante. Contudo, se o controlador mestre não operar devidamente, um controlador escravo terá que ser elevado à nível de mestre.

Figura 2 – Diagrama simplificado dos modos de Controle

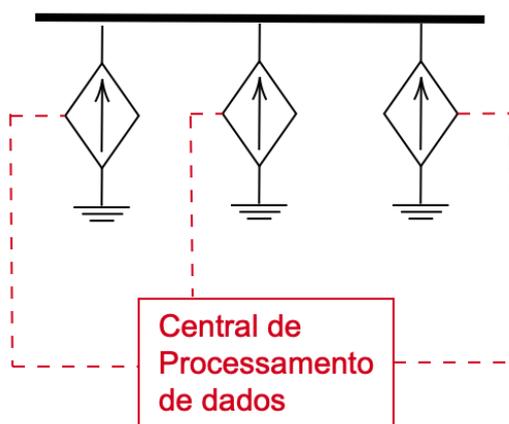


(a) Modo Centralizado - A fonte mestre de tensão controla a tensão no barramento (b) Modo Descentralizado - conversores emulando fontes de tensão com um resistor em série

FONTE: Adaptado de CESAR (2017)

Na [Figura 2a](#) a fonte de tensão precisa ter potência suficiente para manter a tensão constante e desta forma operar com o mesmo papel da rede de distribuição da concessionária mantendo a tensão praticamente constante (valor RMS na rede CA). Denominou-se esse controle como centralizado, pois o autor Cesar *et al.* (2017) possui uma fonte de elevada potência responsável por estabilizar a tensão. De outra maneira, o controle centralizado é quando uma central de processamento dos dados controla todos os conversores da microrrede de forma a manter a tensão relativamente constante, conforme a [Figura 3](#).

Figura 3 – Representação de um controle Centralizado para uma microrrede CC



FONTE: A autora (2019)

Em contra partida, se uma fonte de tensão tenha algum problema e necessite ser desconectada da rede no modo descentralizado, as demais fontes operam normalmente. Isto ocorre pois o sistema oferece simplicidade no gerenciamento de tensão (CESAR, 2017).

2.2.3 Modo Descentralizado para controle de uma Microrrede CC

No modo descentralizado o controle usualmente utilizado é o droop, onde não há um link de comunicação e a rede de distribuição consegue suportar a demanda de carga da microrrede. Tayab *et al.* (2017) cita as vantagens da técnica de controle droop. Uma delas é a prevenção do uso de links de comunicação entre os inversores. Desta maneira, o sistema possui maior flexibilidade e confiabilidade. Todavia, os autores apontam desvantagens dessa técnica, como a baixa resposta do transiente.

2.2.3.1 Controle Droop

Microrredes CC geralmente utilizam o controle droop, onde se mantém a tensão CC das baterias, dos inversores e do controle das cargas (corte das cargas). O controle droop é dado pela equação [Equação \(1\)](#).

$$V_k = V_{ref} - (R_d * i_k) \quad (1)$$

onde V_k é utilizada como referência de tensão para a malha de controle da k-ésima fonte de tensão na microrrede; V_{ref} é a tensão de referência do barramento CC; R_d é a resistência do controle por droop e i_k é a corrente de saída de cada fonte.

Isolando a corrente i_k de tal forma que

$$V_k - V_{ref} = -(R_d * i_k)$$

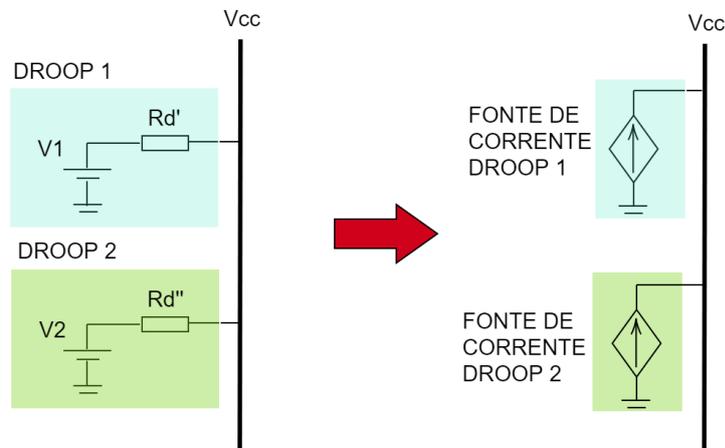
$$i_k = V_k - V_{ref} * \frac{1}{-R_d} \quad (2)$$

Fazendo o valor de 1 sobre $-R_d$ igual a uma constante K e a subtração das tensões V_k e V_{ref} sendo igual a um erro, tem-se a [Equação \(3\)](#) para o controle Droop.

$$i_k = Erro * K \quad (3)$$

A partir da [Equação \(1\)](#) pode-se fazer um circuito equivalente do controle droop, dada pela [Figura 4](#), onde cada controle pode ser representado por uma fonte de tensão V_{ref} com um resistor R_d em série. Essa fonte de tensão com uma resistência R_d virtual, pode ser representada por uma fonte de corrente Droop.

Figura 4 – Circuito equivalente do controle Droop



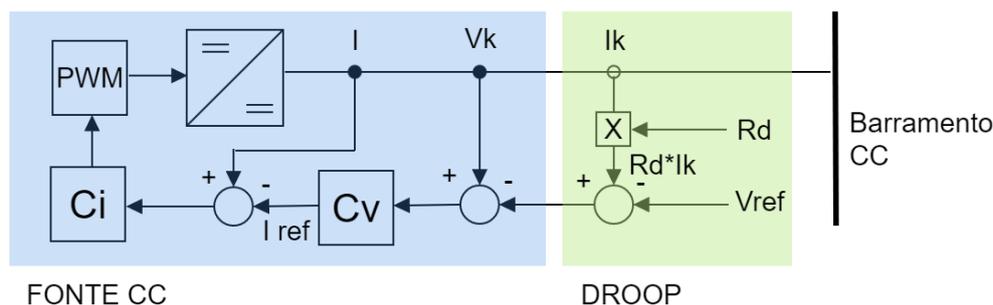
FONTE: A autora (2019)

Vale salientar, que ao longo do barramento CC podem existir diversas fontes CC. Para cada um dessas, necessita-se de um controle droop individual. Ou seja, cada controle Droop é projetado para uma fonte CC específica e deve manter a estabilidade do barramento para quaisquer variação de carga.

Com o circuito equivalente, consegue-se fazer algumas indagações quanto ao controle droop. Ao longo do barramento haverá mais de um conversor conectado, sendo que cada um desses conversores injetam uma corrente na rede dependendo da tensão no barramento. Ainda, as resistências R_d contribuem de maneira proporcional para garantir o controle droop.

O controle droop opera no nível secundário dos sistemas hierárquico e acima das malhas de controle tradicionais, agindo como uma malha de corrente e de tensão. Pode-se decompor a dinâmica associada ao controle droop como uma dinâmica externa à fonte. Isto ocorre, pois o droop opera em paralelo às fontes CC, ajustando o compartilhamento de carga. Ou seja, apenas os terminais de saída da fonte, como corrente e tensão de saída, são primordiais para a operação do controle droop. A representação da implementação do controle droop em uma fonte CC (CESAR, 2017), pode ser vista na Figura 5.

Figura 5 – Implementação do controle Droop em uma fonte CC



FONTE: Adaptado de CESAR (2017)

De forma didática, pode-se resumir o diagrama do controle Droop da Figura 5, através de um exemplo. Onde, dado uma tensão de referência de tensão para o conversor de 700V, um R_d de 2 e uma tensão no barramento CC de 600V, deseja-se encontrar o valor da corrente que irá setar o compensador de corrente do conversor CC/CC. Utilizando a Equação (2).

$$i_k = \frac{600 - 700}{-2} = \frac{-100}{-2} = 50A$$

Contudo, a minha corrente i_k é subtraída da corrente que sai do conversor. Logo, a corrente do barramento CC diminui e, conseqüentemente, a minha tensão no barramento CC aumenta. Se ela continuar inferior à tensão de referência, o Droop continuará atuando.

O inverso também é válido. Caso a tensão no barramento CC esteja acima da tensão de referência, o controle Droop atuará.

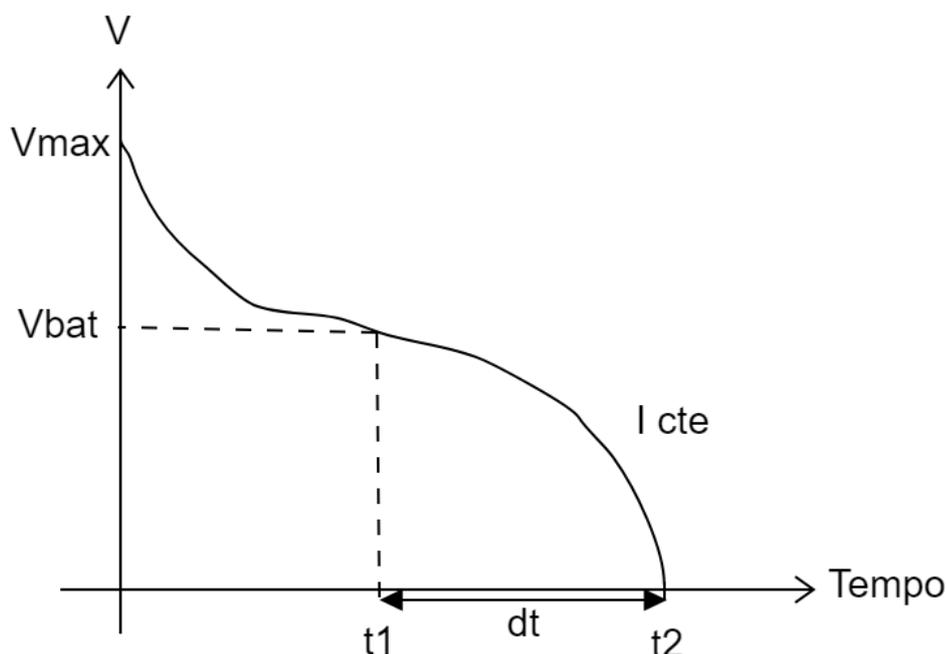
2.3 BATERIAS

2.3.1 Curva de Carga e Descarga das baterias

As curvas de descargas apresentam variação da tensão ao longo do tempo para uma determinada corrente constante. A partir da medição da tensão e da curva de corrente de descarga, consegue-se estimar o intervalo tempo (dt) para que a bateria esteja totalmente descarregada (YU et al., 2016).

O intervalo dt é a diferença entre o tempo total de descarga da bateria e o tempo decorrido de operação para uma determinada corrente, conforme a Figura 6.

Figura 6 – Representação da curva de descarga para uma corrente constante para uma tensão V_{bat}



FONTE: A Autora (2019)

O gráfico da [Figura 6](#) ilustra a forma de uma curva de descarga de uma bateria. Sabe-se que o valor da tensão atual na bateria (V_{bat}) e da corrente de descarga (I_{cte}), logo, consegue-se descobrir o valor do tempo t_1 (tempo decorrido para a tensão chegar no valor de V_{bat}) e do tempo t_2 (tempo para a bateria descarregar completamente com uma corrente I_{cte}). Subtraindo t_2 de t_1 , obtém-se dt , que é o tempo restante de carga da bateria (YU et al., 2016).

Contudo, para obter o tempo restante de carga na bateria durante uma operação normal, onde a corrente não é constante (varia no tempo), deve-se alternar as curvas de descarga para diferentes valores de corrente. Para fazer isso, precisa-se conhecer os valores de V_{bar} e dt para distintas corrente de descarga.

A região entre a tensão máxima de carga e a tensão atual V_{bat} é chamada de região exponencial. A região abaixo de V_{bat} é a região nominal de operação da bateria.

2.3.2 Controle do carga e descarga de baterias

Em seu trabalho Eghtedarpour et al. (2014) reforça a ideia que, para operar as microrredes tanto em modo ilhado como em modo conectado, o sistema de controle das baterias deve ser capaz de monitorar os parâmetros das baterias e, através do controlador externo (por exemplo um CLP), garantir uma operação estável da MR.

Existem diversos modos de operar uma microrrede. Contudo, Eghtedarpour et al. (2014) definiu quatro modos de operação das microrredes quanto ao estado da bateria. Estes

são mostrados na [Tabela 1](#).

Tabela 1 – Modos de operação das microrredes DC conforme o estado da bateria

Modo	Estado de operação da micro-rede	Estado da bateria
I	conexão rede	carregando / off
II	isolado	descarregando / off
III	isolado	carregando / off
IV	isolado	limitado

FONTE: Adaptado de Eghtedarpour *et al.* (2014)

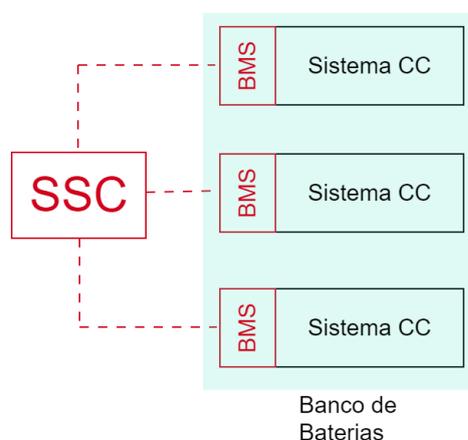
O modo I é uma microrrede DC conectada à concessionária, a bateria esta carregando ou em estado de flutuação enquanto a tensão no barramento CC e a potência de balanceamento é controlada pela fonte de tensão do lado da rede da concessionária. O modo II e III correspondem ao modo isolado e a o déficit de potência é balanceado pela carga ou descarga da bateria. Em ambos os modos, a bateria é responsável pela regulação da tensão. O modo IV, também é em modo isolado e necessita de potência maior que o máximo de potência das baterias, ou a bateria esta abaixo da seu SOC ([EGHTEDARPOUR; FARJAH, 2014](#)).

Eghtedarpour *et al.* (2014) simula em seu trabalho diferentes casos de controle de baterias em microrredes DC. Para o primeiro caso, os autores simularam o processo de carregamento das baterias. Para tanto a microrrede DC foi conectada em uma microrrede AC externa. Parte da carga demandada foi suprida pelos painéis fotovoltaicos e a potência faltante foi provida pela rede principal e SOC da bateria ficou em 85%. De início a bateria foi carregada por 50min com uma corrente constante. Quando a bateria atingiu seu limite superior de tensão, os controles de carregamento de potência constante terminaram de carregar a bateria.

2.3.3 Battery Management System - BMS

Durante o seu ciclo, as baterias tendem a operar fora do seu equilíbrio. Ao longo de sua operação, essas baterias apresentam aumento de temperatura, carregam e descarregam, acelerando, assim, sua degradação. Contudo, ao implementar um sistema de manejo de potência inteligente, o chamado BMS, consegue-se reduzir as causas de deterioração e otimizar a performance da bateria. Caso haja mais de uma baterias conectada ao sistema, o sistema de controle de supervisorio (SSC) monitora o essas baterias ([LAWDER et al., 2014](#)). A ilustração do BMS e do SSC está [Figura 7](#).

Figura 7 – Ilustração do BMS e SSC das baterias



FONTE: A Autora (2019)

A sofisticação do BMS depende principalmente do tipo de bateria - alguns tipos de baterias necessitam de certos cuidados devido à sua composição química - e o local ou produto em que a bateria está inserido. (BERGVELD; KRUIJTPETER; NOTTEN, 2002).

O BMS e o SSC, quando bem dimensionados e implementados, minimizam a temperatura do sistema, protegem as células de degradações internas, oferecem ao sistema parâmetros mais próximos do ideal e balanceam as células. Todavia, alguns parâmetros de operação não podem ser medidos pelo BMS e o SSC. Os únicos parâmetros que podem ser medidos pelo BMS e SSC é a tensão, corrente e a temperatura. Desta maneira, o BMS consegue estimar certas variáveis internas que possibilita o entendimento da SOC e o SOH ¹ da bateria (LAWDER et al., 2014).

O BMS lê os parâmetros da bateria, estima valores de SOC e SOH para o sistema e reporta esses parâmetros para o SSC. O SSC recebe essas informações e repassa para um controlador externo, como um CLP, que fará a gestão dos parâmetros que impactam diretamente na performance da bateria.

¹State Of Health (SOH) é a habilidade da bateria de entregar ou guardar carga (MURNANE; GHAZEL, 2017)

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será descrito a metodologia utilizada no desenvolvimento deste TCC, considerando o cenário que será utilizado para coletar os dados de simulação.

A pesquisa exploratória se baseia em investigar o tema proposta, afim de adquirir familiaridade com o assunto (MOTTA-ROTH; HENDGES, 2016). Para que este estudo seja possível, fez-se um levantamento bibliográfico através do cruzamento de palavras chaves utilizando o instrumento chamado de ProKnow-C.

O assunto microrredes, antes, era desconhecido. Ao iniciar as pesquisar e criar uma fundamentação teórica sólida - buscando referências bibliográficas e citações relevantes - conseguiu-se ter uma visão macro do tema e criar hipóteses que contribuem para o projeto. Este método de estudo é flexível e possui uma abordagem qualitativa.

3.1 SELEÇÃO DO PORTIFÓLIO BIBLIOGRÁFICO

Professores do Laboratório de Metodologias de Multicritérios em Apoio à decisão (LabMCDA) criaram um instrumento chamado de ProKnow-C (Knowledge Development Process-Constructivist), onde se divide o processo de busca em etapas e, ao final, retorna uma base de dados sólida (ENSSLIN; ENSSLIN; PINTO, 2013), focada e totalmente adaptada.

Ao iniciar uma pesquisa, deve-se fazer a seleção do Portifólio Bibliográfico (PB), que compreende um grande conjunto de artigos e materiais científicos referente ao assunto desejado, sendo estes diretamente direcionados à área desejada de pesquisa (ENSSLIN; ENSSLIN; PINTO, 2013).

O instrumento sugere a definição dos eixos principais de pesquisa para, assim, fazer o levantamento focado das palavras-chaves (PCs). Desta maneira, faz-se um cruzamentos dos eixos, tornando a pesquisa objetiva. Para este trabalho escolheu-se as PCs da [Tabela 2](#).

Tabela 2 – Palavras-Chaves (PCs) para o levantamento bibliográfico.

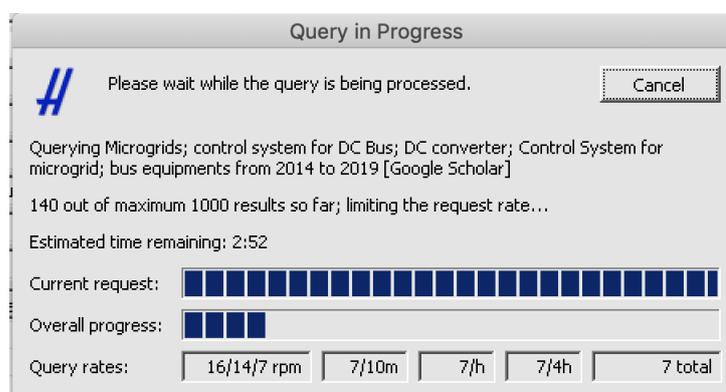
PC 1	PC 2
Microgrid	and DC BUS
Microgrid	and Control System
Stability in DC BUS	and Control System
Battery	and DC Bus
Control System	and DC Bus
Microgrid	and Battery
Load Battery	and DC Bus
DC Converter	and Battery
DC Converter	and Microgrid
DC Converter	and DC BUS

FONTE: A Autora (2019)

Para avaliar a validade da escolha das PCs, leu-se os artigos resultantes da busca para verificar se esses estão alinhados com o tema proposto. Após esta análise, comprovou-se que as PCs adotadas estavam presentes como palavras-chaves dos artigos encontrados.

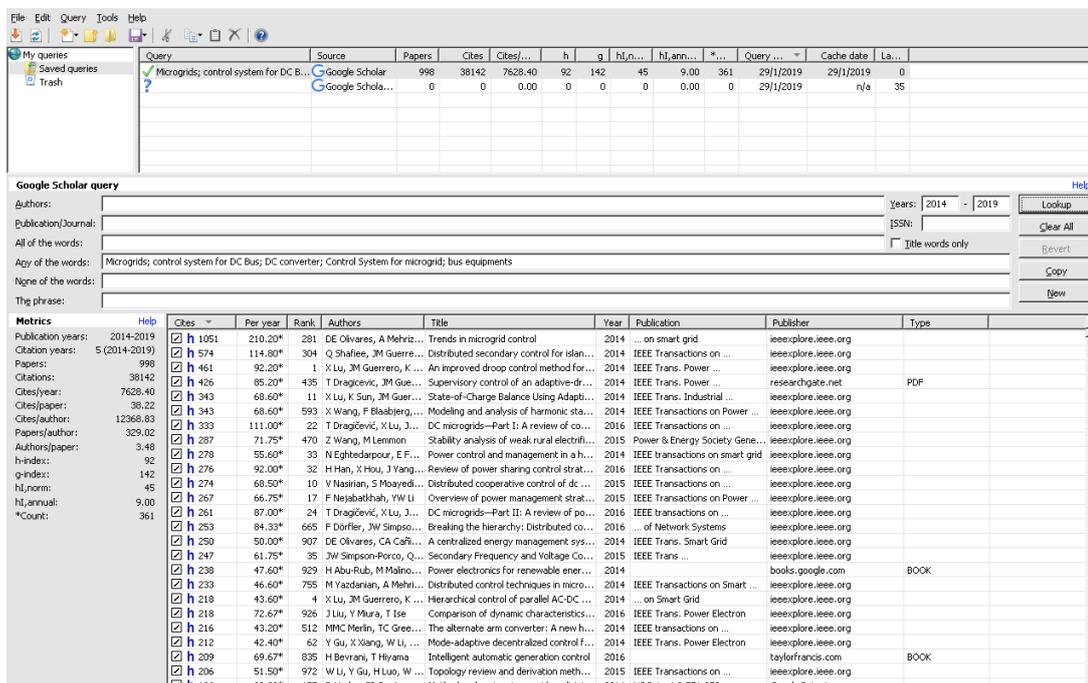
Tendo-se as PCs relacionados à pesquisa, utilizou-se o *software Publish or Perish 6*, ferramenta que extrai dados do Google Scholarship e faz o gerenciamento bibliográfico. Este software exibe os indicadores de procedência dos materiais encontrados, como citações, artigos por autor, índice H, revistas publicadas. Contudo, para filtrar os artigos, focou-se no número de citações por ano e as revistas em que foram publicados. O *software Publish or Perish* possui uma limitação padrão de exibição dos artigos em 1000. A [Figura 8](#) e [Figura 9](#) demonstram a aparência do software e como são realizadas às buscas.

Figura 8 – Exemplo do uso do *software Publish or Perish 6* - Gerenciamento bibliográfico e limite de 1000 resultados



FONTE: Software Publish or Perish 6

Figura 9 – Exemplo do uso do software Publish or Perish 6 - Busca Finalizada



FONTE: Software Publish or Perish 6

Ao iniciar o processo de filtragem dos artigos, verificou-se que a quantidade de artigos era extensa e repetitiva. Logo, diminuiu a quantidade de combinações de palavras-chave, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Nova filtragem das PCs

PC 1	PC 2
Microgrid and	DC BUS
Microgrid and	System Stability
Microgrid and	Battery Load Control
DC Converter and	Microgrid

FONTE: A Autora (2019)

A quantidade de material encontrado nos últimos 10 anos esta presente na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultado do cruzamento das PCs presentes na Tabela 3

	DC BUS	System Stability	Battery Load Control	DC Converter
Microgrid	999	988	977	931

FONTE: A Autora (2019)

Para realizar a filtragem do material científico encontrado, levou em consideração se o material é um artigo científico. Juntamente com isso, verificou-se o conceito da revista

publicadora e o título dos artigos. Assim, o número de artigos alcançados em cada cruzamento das PCs é visto na [Tabela 5](#).

Tabela 5 – Resultado após filtragem do título dos artigos

	DC BUS	System Stability	Battery Load Control	DC Converter
Microgrid	109	99	19	115

FONTE: A Autora (2019)

A partir desta seleção, leu-se os resumos de cada artigo para verificar a relevância para o tema e descartando os que não se encaixavam na proposta do trabalho. O número artigos por PC estão na [Tabela 6](#).

Tabela 6 – Resultado após filtragem do material científico

	DC BUS	System Stability	Battery Load Control	DC Converter
Microgrid	49	69	4	57

FONTE: A Autora (2019)

Após a leitura da introdução e conclusão dos artigos, chega-se ao resultado final de 9 artigos entre os anos de 2013 a 2017. Os artigos escolhidos estão referenciados abaixo na [Tabela 7](#).

Tabela 7 – Artigos escolhidos como referência

Título do Artigo	Autores	Ano	Referência
SoC-Based Output Voltage Control for BESS with a Lithium-Ion Battery in a Stand-Alone DC Microgrid	Yu <i>et al.</i>	2016	(YU <i>et al.</i> , 2016)
Trends in Microgrid Control	Olivares <i>et al.</i>	2014	(OLIVARES <i>et al.</i> , 2014)
DC microgrid - part I: A review of control strategies and stabilization techniques	Dragičević <i>et al.</i>	2015	(DRAGICEVIC <i>et al.</i> , 2016)
Distributed charge/discharge control of energy storages in a renewable-energy-based DC micro-grid	Eghtedarpour <i>et al.</i>	2014	(EGHTEDARPOUR; FARJAH, 2014)
Advanced Control Architectures for Intelligent MicroGrids – Part I: Decentralized and Hierarchical Control	Guerrero <i>et al.</i>	2013	(GUERRERO <i>et al.</i> , 2013)
Microgrids in active network management — Part I: Hierarchical control, energy storage, virtual powerplants, and market participation	Palizman <i>et al.</i>	2014	(PALIZBAN; KAUHANIEMI; GUERRERO, 2014)
A review of droop control techniques for microgrid	Tayab <i>et al.</i>	2017	(TAYAB <i>et al.</i> , 2017)
Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications	Lawder <i>et al.</i>	2014	(LAWDER <i>et al.</i> , 2014)
Modelagem e Análise da Dinâmica de Microrredes de Distribuição de Energia Elétrica	Cesar	2017	(CESAR, 2017)

FONTE: A Autora (2019)

3.2 REVISÃO DA LITERATURA

O artigo de Olivares *et al.* (2014) discute as dificuldades em controlar uma microrrede e aborda algumas estratégias de controle e os princípios utilizados para se manter uma microrrede estável. Os autores ainda classificam o controle das microrredes em três estágios, sendo eles o controle como um todo e a cooperação entre a operação da microrrede com a rede como um todo.

Yu *et al.* (2016) propõe em seu trabalho um novo controle de tensão DC para baterias de lítio baseado no seu SoC. Ainda, os autores verificam o controle proposto através da simulação computacional de uma microrrede isolada composta por baterias, painéis fotovoltaicos, geradores e uma carga DC. Comparou-se os resultados obtidos na simulação com o experimental e constatou-se que o controle proposto provê uma baixa variação na tensão DC da rede.

Estabilidade e dinâmica, são as propriedades discutidas quando se refere a uma microrrede DC. Dragičević *et al.* discutem em seu trabalho estratégias de controle e técnicas

de estabilidade em microredes DC. A estabilização do sistema como um todo é definido no trabalho através da relação da fonte e as cargas.

No artigo de Eghtedarpour *et al.* (2013) evidencia-se diferentes condições de operação de uma microrede. Apresenta-se um sistema de controle que é intrínseco para o carregamento efetivo da bateria na microrrede. Quando a microrede esta operando em condições normais e esta conectada à rede, os conversores AC equilibram a energia para garantir que a tensão DC esta constante. Outras propostas de gerenciamento de carga envolvendo estado de carga das baterias (SoC) é proposto neste trabalho. Os autores apresentam as simulações no software MATLAB / SIMULINK para validar o sistema de controle proposto de carga e descarga da bateria.

É fundamental para se manter a estabilidade de uma microrede o sistema de controle. Quanto mais complexo o sistema, mais robusto deve ser o controle. No trabalho do Guerrero *et al.* (2013) é apresentada técnicas avançadas de controle de microredes. Primeiramente, os autores revisam alguns trabalhos recentes de técnicas de controle. Posteriormente, eles analisam a estabilidade e o controle da microrede em sua totalidade. Por fim, é apresentada a hierarquia de controle das microredes que tendem a se comportar como grandes redes de alimentação .

O trabalho de Palizban *et al.* (2014) tem como objetivo principal descrever o princípio do design das microrredes, assim como os conceitos operacionais e os requisitos para a coordenação dessa rede. Os autores ainda resumem técnicas de controle e princípios básicos de armazenamento de energia através de um fluxograma.

Ao usar baterias como sistema de armazenamento de energia, consegue gerenciar a energia de maneira mais satisfatória. Em seu trabalho, Lawder *et al.* (2014) comenta que o BMS das baterias controla o sistema de armazenamento usado e utiliza modelos robustos de operação deste sistema. Ainda, os autores afirmam que é preciso modelar o BMS para se obter um modelo confiável e robusto deste sistema. Ainda, discute-se arquiteturas, monitoramento e controle do BMS e como é seu comportamento em redes de geração.

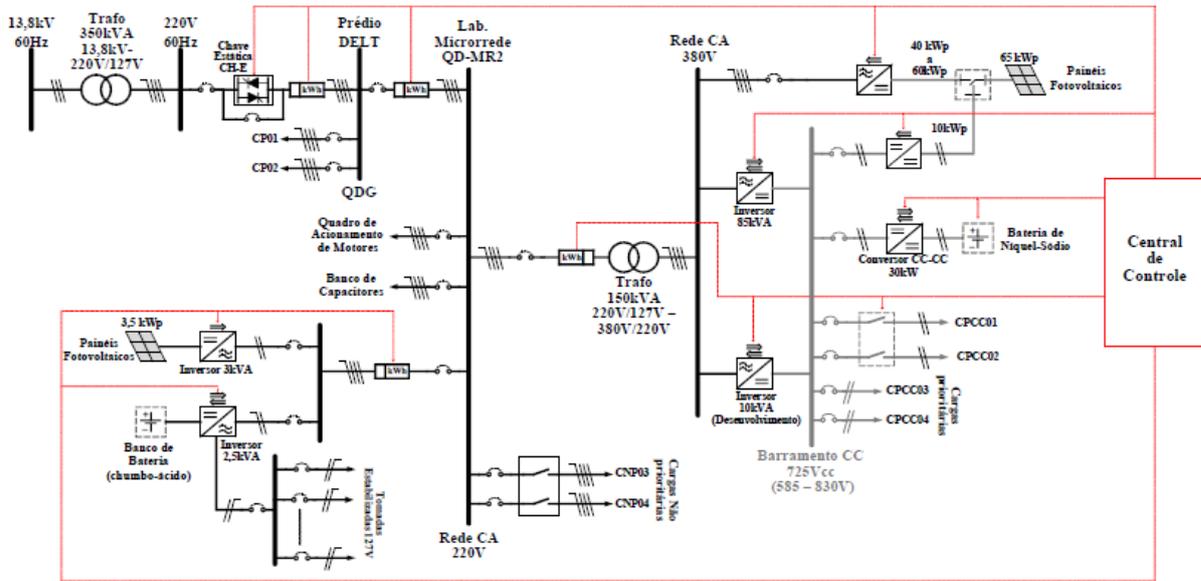
Para suprir o aumento da demanda de energia elétrica, diferentes unidades de geração distribuída vêm sendo desenvolvidas. Diversas estratégias de controle estão sendo implementadas mundialmente com o intuito de operar da distribuição de carga em redes de geração distribuída. Dentre os diversos métodos, Tayab *et al.* (2017) explica detalhadamente em seu trabalho a técnica de controle droop, que é bastante aceita na comunidade científica devido a ausência de links de comunicação.

O trabalho de Cesar 2017 propõe e modela técnicas de controle e analisa a estabilidade de microrredes CC e CA. O autor ainda aponta problemas na operação das MR quando diversas fontes estão operando em paralelo e compartilham a mesma carga. Desta maneira, ele trás o controle por droop que é a maneira mais eficiente de controle em MR, mas não garante a linearidade do sistema. Ainda, apresenta-se procedimentos matemáticos para dar dinâmica na MR, oferecendo informações de otimização no funcionamento que garantem a estabilidade.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A microrrede que será futuramente desenvolvida do DELT pode ser vista na [Figura 10](#).

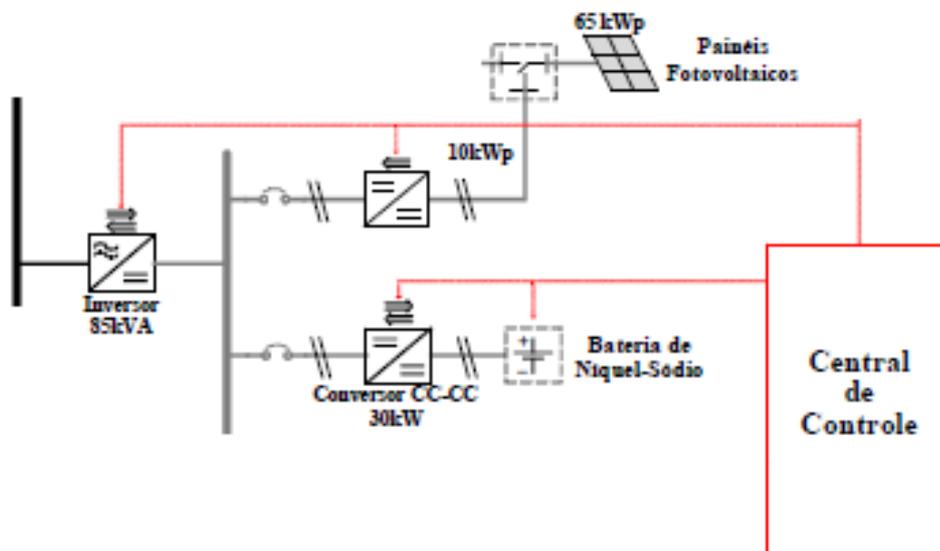
Figura 10 – microrrede que será desenvolvida no DELT



FONTE: Thiago C. Araujo (2018)

O foco deste trabalho de conclusão de curso é visto com mais detalhe na [Figura 11](#). A microrrede CC que será simulada é composta por uma bateria de níquel-sódio, conversor CC/CC, painéis FV e conectado ao barramento CC esta um inversor e uma rede CA de 380V. O conversor e o inversor são controlado por uma central de controle que gerencia os demais equipamentos da microrrede.

Figura 11 – Barramento CC da microrrede DELT que será o foco deste trabalho de conclusão de curso



FONTE: Thiago C. Araujo (2018)

4.1 MATERIAIS

4.1.1 MATLAB

O MATLAB é uma ferramenta computacional utilizada para descrever e resolver problemas de maneira matemática. Este foi concebido inicialmente como “Matrix Laboratory” a mais de 50 anos atrás por três homens, J. H. Wilkinson, George Forsythe e John Todd, mas foi só com Cleve Moler, chefe de departamento de ciências da computação da Universidade do Novo México, que o MATLAB foi desenvolvido e conhecido como é hoje. Inicialmente, Moler desenvolveu essa ferramenta para ajudar seus alunos com os softwares LINPACK (software para performar algébra linear numérica) e EISPACK (software para encontrar autovetores e autovalores de matrizes) sem precisar aprender a linguagem Fortran (utilizada para computação numérica). Logo, este software se espalhou em outras universidades e se disseminou na comunidade de matemática aplicada. Em 1984, Moler e Steve Bangert reescreveram o MATLAB em linguagem C e fundaram a MathWorks ([MOLER, 2004](#)).

Os recursos do MATLAB são semelhantes à linguagem de C++ e o aplicativo foi totalmente concebido utilizando a própria linguagem do MATLAB, onde a linguagem é baseada em matrizes permitindo as expressões matemáticas pareçam mais naturais possíveis. O MATLAB apresenta vários modos de solução, sendo estes desenvolvidos para facilitar a obtenção dos resultados. Nele consegue-se desenvolver aplicativos, modelos matemáticos, analisar dados e desenvolver algoritmos numéricos ([MATHWORKS, 2019b](#)).

4.1.2 SIMULINK

Assim como o MATLAB, o SIMULINK foi desenvolvido pela MathWorks e é utilizado para modelar, simular e analisar sistemas dinâmicos. A interface utilizada é uma diagramação gráfica de blocos, assim como sua biblioteca. O SIMULINK possui interação total com o MATLAB, facilitando a implementação de modelos matemáticos. Ainda, este software é amplamente utilizado em teorias de controle, permitindo a simulação do comportamento de certos sistemas (MATHWORKS, 2019a).

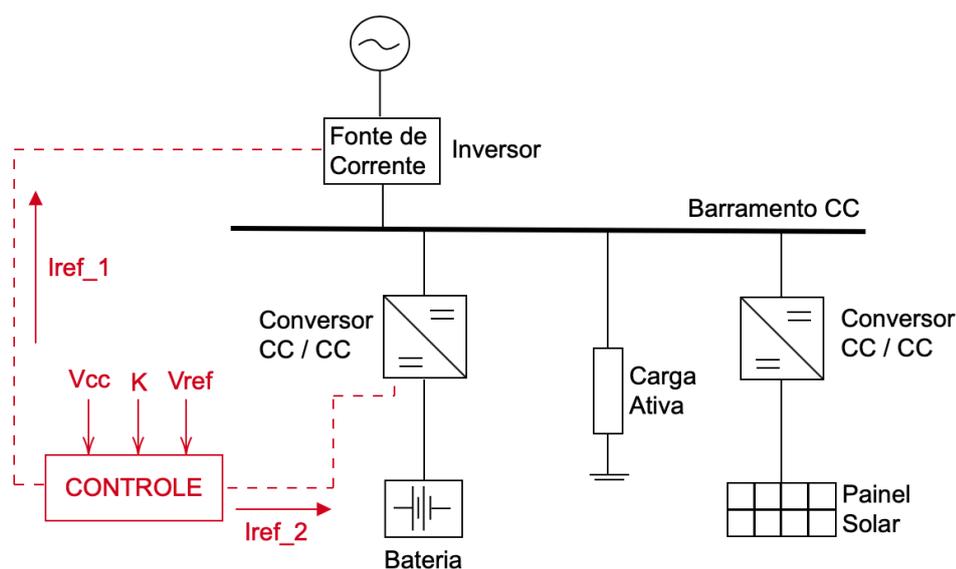
4.2 MÉTODO

De início será realizado o levantamento bibliográfico referente a microrredes e os componentes fundamentais para a operação desta, como o conversor CC/CC, carregamento de baterias e o controle Droop.

Tendo-se em vista os equipamentos futuramente instalados no barramento CC da microrrede do DELT, buscou-se obter os dados de operação destes para realizar a simulação. O conversor CC/CC é o SINAMICS DCP de 30kW; a bateria utilizada é de Níquel-Sódio de 45kWh de capacidade e os painéis fotovoltaicos produzirão uma potência de 65kWp, contudo só 10kWp irão para o barramento CC.

Com os valores de operação dos equipamentos, montou-se o circuito da simulação no MATLAB/SIMULINK conforme a Figura 12.

Figura 12 – Representação do barramento CC da microrrede que será simulado no MATLAB/SIMULINK



FONTE: A autora (2019)

Deseja-se simular diferentes situações de operação desta microrrede CC. Este modelo possui um conversor CC/CC bidirecional conectado a uma bateria e uma carga ativa. À esse

barramento será conectado um inversor (fonte de corrente) e uma fonte de tensão CA conectado à esse inversor com o intuito de simular o sistema elétrico de distribuição da concessionária. O SIN é simplificado para um barramento infinito é implementada para tornar o circuito mais dinâmico para os testes. Haverá um sistema de controle Droop que fará o controle de corrente do conversor e do inversor. O Droop terá como entrada as tensões V_{CC} e V_{ref} e uma constante K , um para cada conversor da microrrede.

Após desenvolver o circuito no MATLAB/SIMULINK será iniciado os testes. Primeiramente, será simulado o sistema com nenhuma carga para verificar as curvas de geração nos PVs e de carga e descarga da bateria. Desta maneira, consegue-se verificar como o barramento se comporta a vazio.

Depois, adiciona-se cargas ao circuito para simular equipamentos (como motores e televisores) conectados à rede do DELT. Ao fazer isso, poderá observar como a rede se comporta e quando há variações no sistema e, ainda, verificar como e quando ocorre a carga e descarga da bateria conforme a geração FV.

Ainda, será feito a simulação para diferentes faixas de tensão para verificar como o controle Droop se comportará. Ou seja, se o controle não irá se perder após um certo tempo, se o regime transitório é aceitável e quando ocorre a estabilidade do sistema.

Com os dados da simulação busca-se obter respostas para as indagações propostas deste trabalho e constar certas condições de operação dessa MR CC.

4.2.1 Resultados Fundamentais a serem atingidos

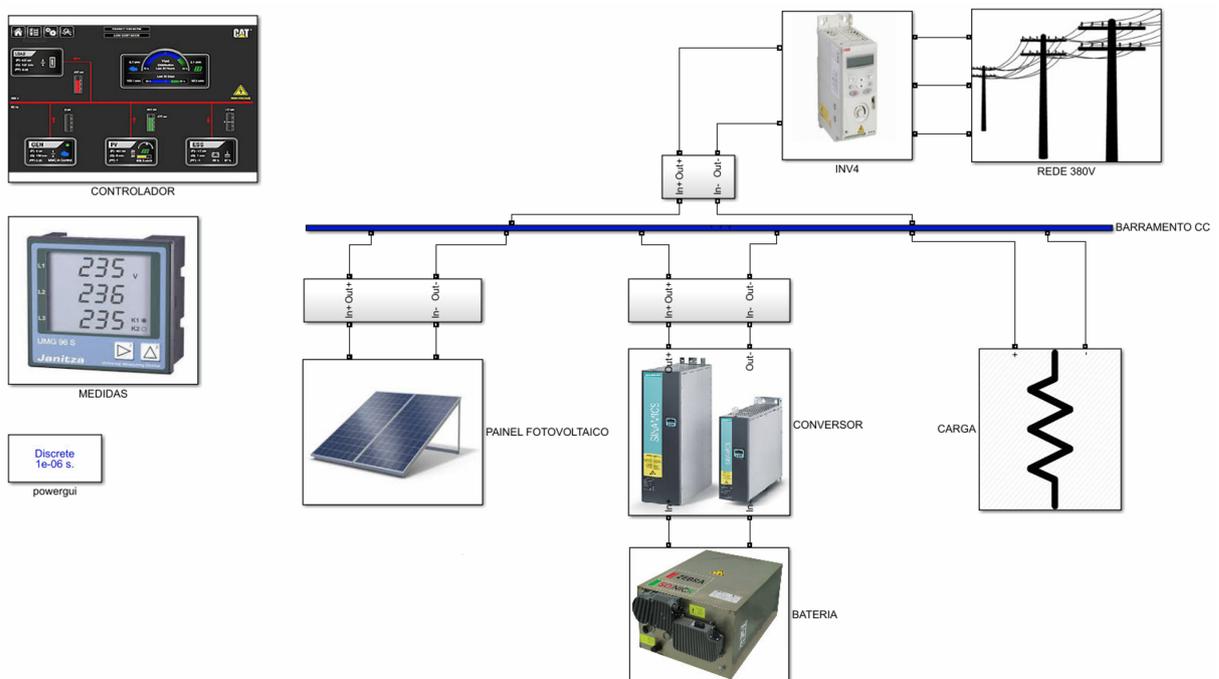
Os resultados a serem atingidos partem da análise dos parâmetros obtidos da bateria e depois comissionados pelo conversor, que são atrelados às avaliações de seus impactos na microrrede, sendo eles:

- a) Análise da simulação da carga da bateria;
- b) Análise da simulação da descarga da bateria;
- c) Análise da simulação do sistema em diferentes faixas de tensão (Droop);
- d) Controle da tensão do barramento CC;
- e) Controle de estabilidade do barramento CC em função da geração fotovoltaica.

5 TESTE E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para as simulações, buscou as faixas de operação dos equipamentos utilizados na MR do DELT. O sistema de armazenamento de energia é constituído de um banco de baterias de níquel-sódio, com potência nominal de 13 kW, capacidade de energia de 45 kWh, tensão de operação de 620 Vcc e carga de 38Ah. Esta bateria está conectada ao barramento CC da microrrede CC através de um conversor de 30kW bidirecional. No mesmo barramento CC esta um painel FV de 10,171kWp Um inversor conecta o barramento CC à rede trifásica de 380V. O circuito, que representa a MR CC e que será utilizada nas simulações esta na [Figura 13](#).

Figura 13 – Circuito no MATLAB/SIMULINK que representa o microrrede CC



FONTE: A autora (2019)

Para simular a operação dessa MR CC durante um dia inteiro, utilizou o período das simulações de 24s. Esse tempo representa 24h, ou seja, para cada 1s da simulação, equivale a 1h.

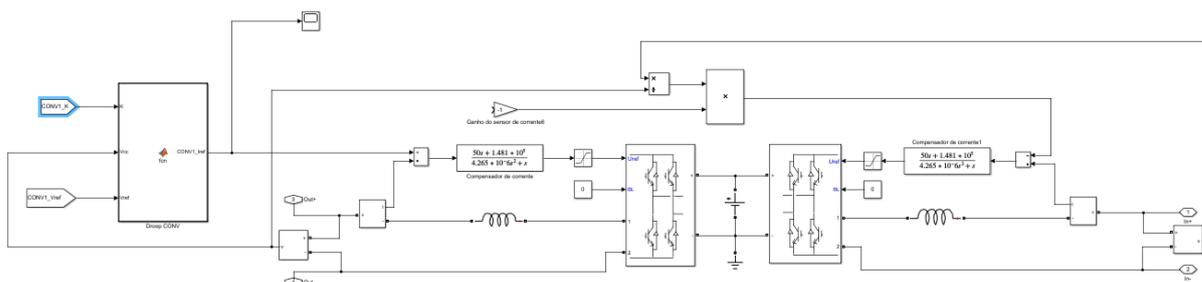
5.1 MODELAGEM NO MATLAB/SIMULINK DOS COMPONENTES UTILIZADOS NO BARRAMENTO CC DA MICRORREDE CC DO DELT

Utilizou-se os dados reais dos componentes desta microrrede CC para modelá-los no MATLAB/SIMULINK. Esses equipamentos são o inversor CC/CA, a rede CA, o painel FV, o conversor CC/CC e a bateria de Níquel-Sódio. As informações da bateria de níquel-sódio e do conversor estão em mais detalhes no [Apêndice A](#) e [Apêndice B](#), respectivamente.

5.1.1 Conversor CC/CC

O conversor bidirecional é formado por dois módulos em ponte compelta da biblioteca SIMSCAPE do SIMULINK. Estes conversores estão interconectados por uma fonte de tensão de 800V para ajustar a referência em um dos lados do conversor. A tensão escolhida deve ser maior que o pico de tensão nos dois lados para manter a estabilidade na conversão. A representação do conversor CC/CC está na [Figura 14](#).

Figura 14 – Representação do Conversor CC/CC no MATLAB/SIMULINK

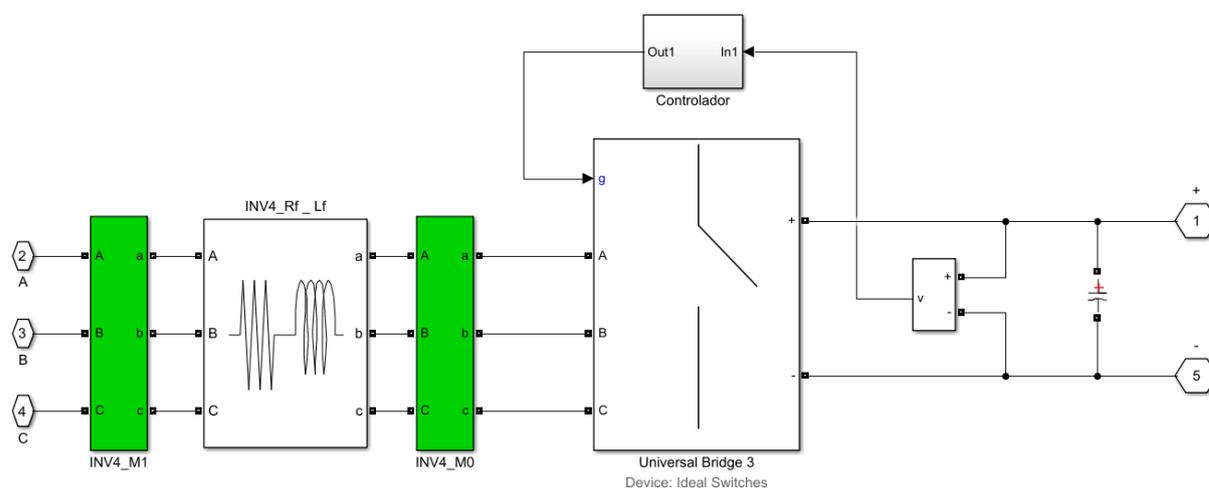


FONTE: A autora (2019)

5.1.2 Inversor CC/CA

Fez-se o seguinte modelo do inversor no MATLAB/SIMULINK.

Figura 15 – Representação do Inversor no MATLAB/SIMULINK

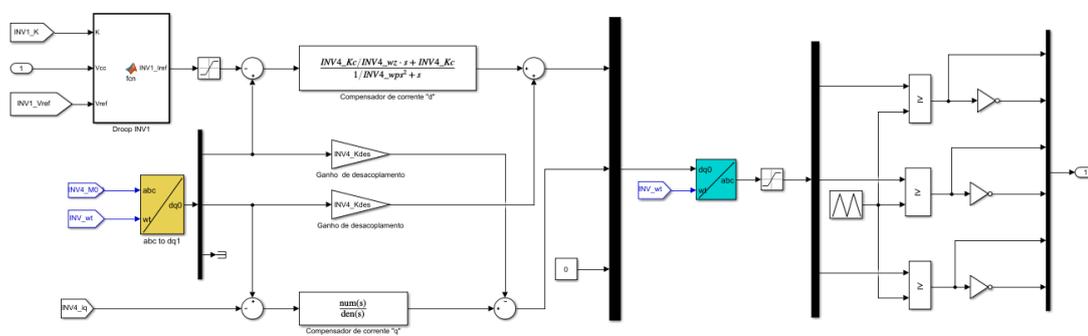


FONTE: A autora (2019)

O inversor utilizado é do tipo vetorial. Esse tipo de inversor promove o desacoplamento entre o controle do fluxo e o controle da velocidade por meio de transformação de variáveis. No bloco controlador desse inversor há dois controles: o controle Droop e o controle vetorial. O controle Droop faz o ajuste da corrente de referência e o controle vetorial faz o controle

através da magnitude e fase das tensões e correntes impostas por um conversor estático (WEINGARTNER, 2007). O circuito do controlador é visto na Figura 16.

Figura 16 – Controlador do Inversor no MATLAB/SIMULINK

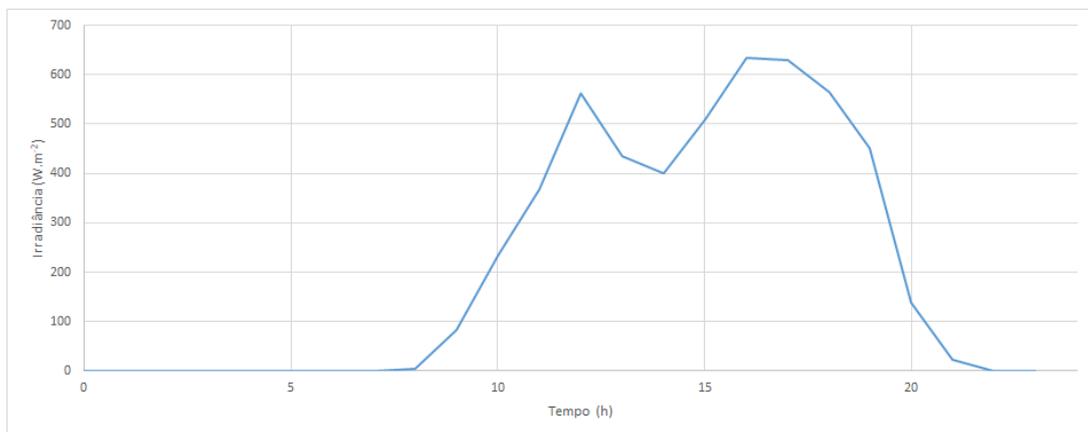


FONTE: A autora (2019)

5.1.3 Painel Fotovoltáico

Para obter a curva de irradiação solar do campus politécnico, utilizou como referência os dados de perfil de carga e a irradiação da estação meteorológica que fica dentro do campus universitário da UFPR. Os dados são do dia 06/11/2018 e simulam um dia no período letivo sem chuva. A irradiação esta representada na Figura 17.

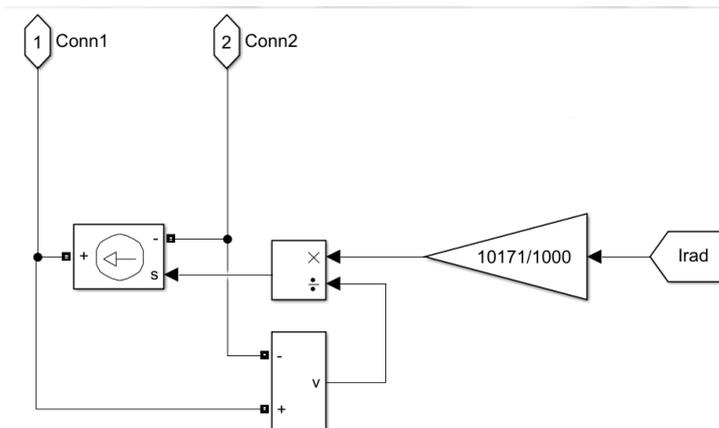
Figura 17 – Curva de Irradiância no dia 06/11/2018 no campus universitário



FONTE: A autora (2019)

Para simular um painel FV, fez uma fonte de corrente representando a máxima corrente que poderia ser extraída do painel (para este caso 10,171kWp). A Figura 18 representa o FV no MATLAB/SIMULINK.

Figura 18 – Representação do painel FV no MATLAB/SIMULINK

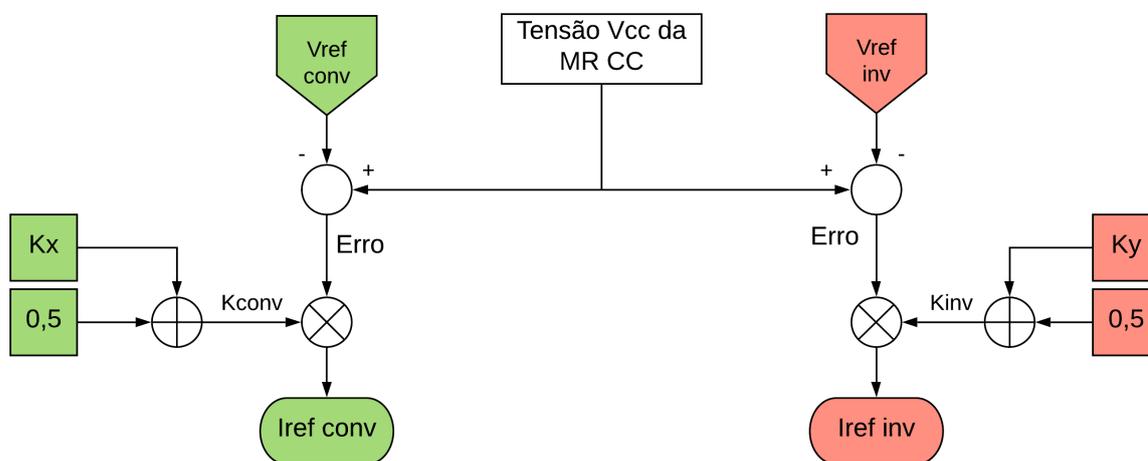


FONTE: A autora (2019)

5.1.4 Controle Droop

O controle Droop criado no MATLAB/SIMULINK foi feito seguindo a lógica do diagrama da Figura 19.

Figura 19 – Diagrama do controle Droop implementado no MATLAB/SIMULINK

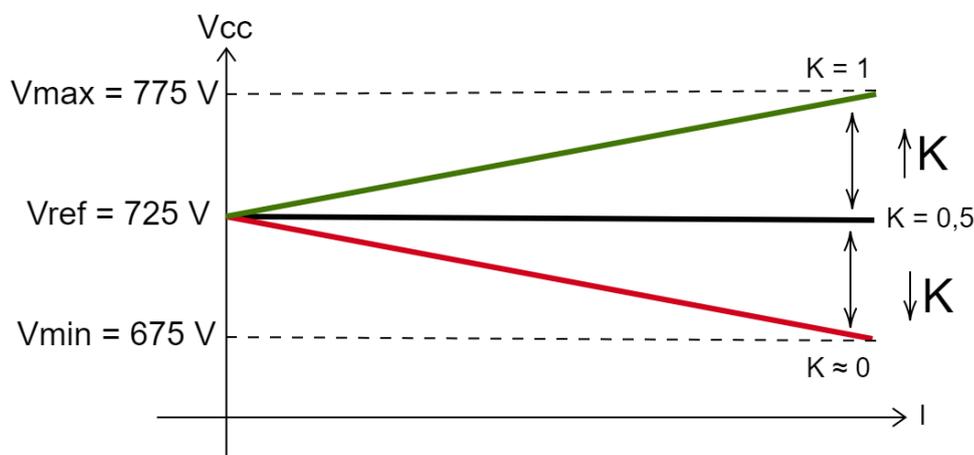


FONTE: A autora (2019)

Tendo em mente o diagrama do controle Droop, estipulou limites de operação para a MR CC, como a tensão máxima e mínima para V_{CC} e os valores máximo de K que serão utilizados.

Estipulou um valor de referência para a MR CC no valor de 725V. A partir desse valor, escolheu a faixa de tensão de operação de V_{CC} . O valor escolhido dessa faixa de tensão é 50V para cima e 50V para baixo da tensão de referência. A Figura 20 ilustra os limites de de operação da tensão do barramento CC.

Figura 20 – Gráfico dos limites propostos para o controle Droop



FONTE: A autora (2019)

A Figura 20 ainda mostra os valores de máximo e mínimo de K . Esses valores são devido a seguinte proporção

Como foi visto anteriormente, o valor de K é inversamente proporcional à R_d ¹. Pode-se afirmar que os valores máximos e mínimos que K pode assumir, são dados por:

$$\begin{aligned} R_d = \infty &\rightarrow K = 0 \\ R_d = 0 &\rightarrow K = \infty \end{aligned}$$

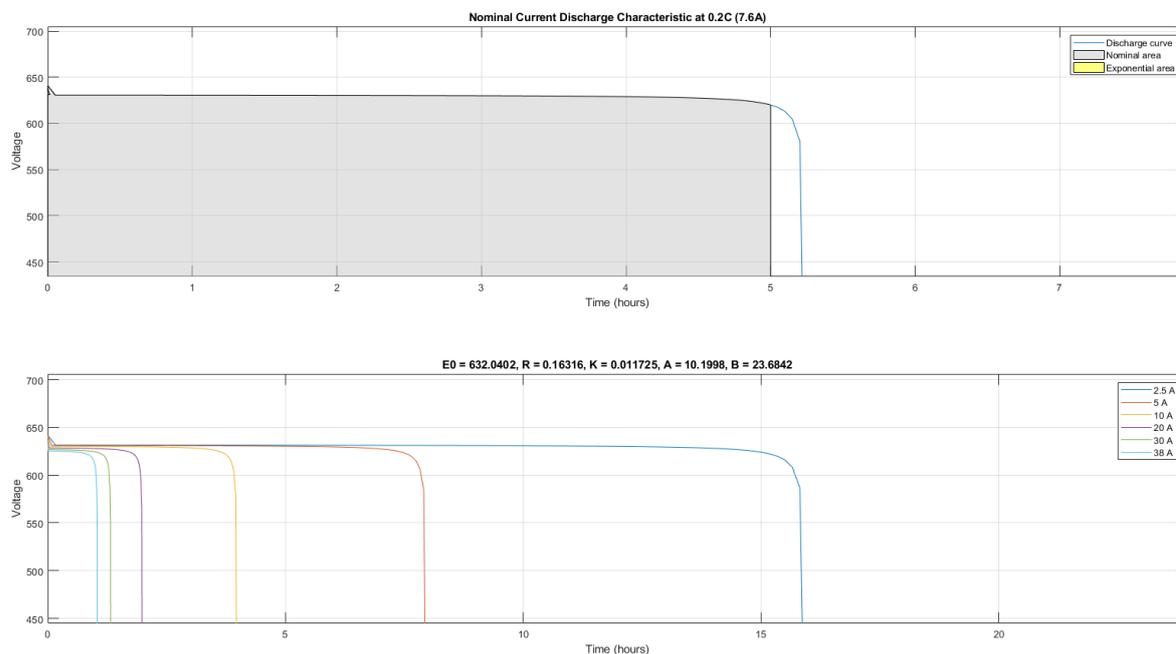
Contudo, como R_d é uma resistência virtual do controle Droop, este valor não chegará a zero e nem no infinito. Isso porque, não teria sentido implementar o controle Droop se não se consegue garantir o controle se R_d do droop esta em curto-circuito ou em aberto.

5.1.5 Bateria de Níquel-Sódio

Para modelar a bateria no MATLAB/SIMULINK, verificou os parâmetros de tensão, corrente e potência de carga e descarga desta. Com esses valores, conseguiu plotar o gráfico da Figura 22. Este gráfico descreve o comportamento de descarga da bateria no tempo, ou seja, indica o SOC da bateria.

¹Conforme as referências escolhidas para o fluxo de potência do circuito, o valor $1/R_d$ pode ser positivo ou negativo

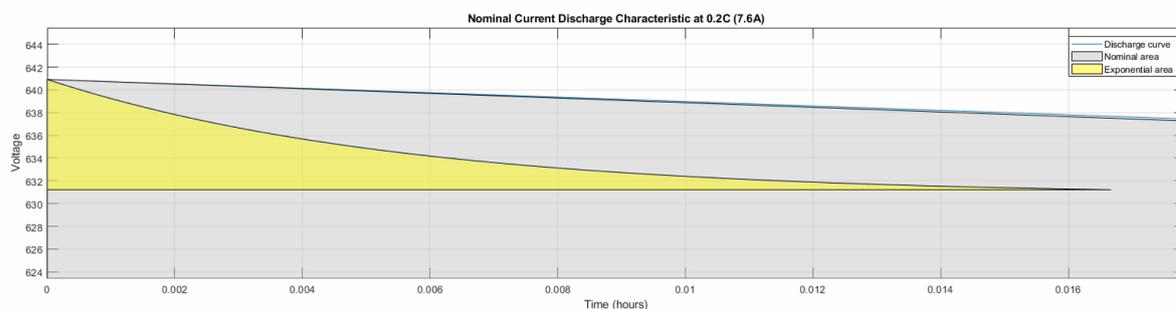
Figura 21 – Gráfico gerado através do MATLAB/SIMULINK da curva corrente nominal de descarga



FONTE: A autora (2019)

Expandindo o gráfico da Figura 22, consegue-se visualizar que a tensão máxima de carga da bateria é de 641V e a tensão atual V_{bat} da bateria é 632V. A região nominal termina no instante em que a tensão da bateria é igual ao seu valor nominal, nesse caso a tensão nominal, especificada no Apêndice A, é 630V.

Figura 22 – Gráfico gerado através do MATLAB/SIMULINK da curva corrente nominal de descarga

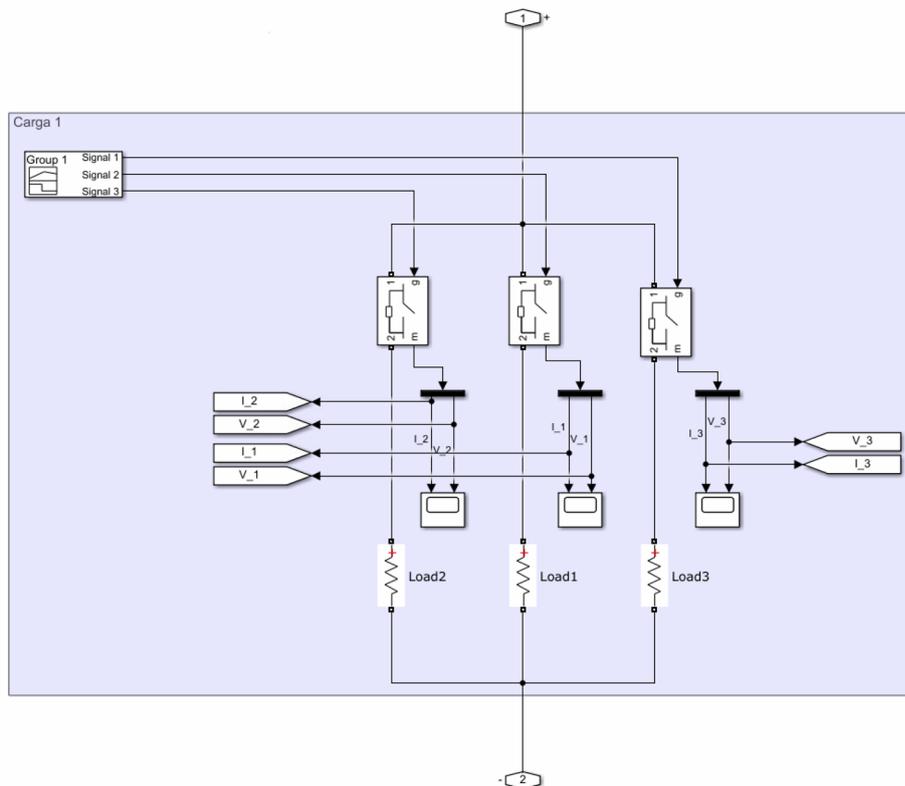


FONTE: A autora (2019)

5.1.6 Cargas Ativas

Para simular as cargas ativas, fez o circuito da Figura 23, onde estão três cargas de 60Ω sendo chaveadas ao longo da simulação.

Figura 23 – Circuito de chaveamento das cargas ativas



FONTE: A autora (2019)

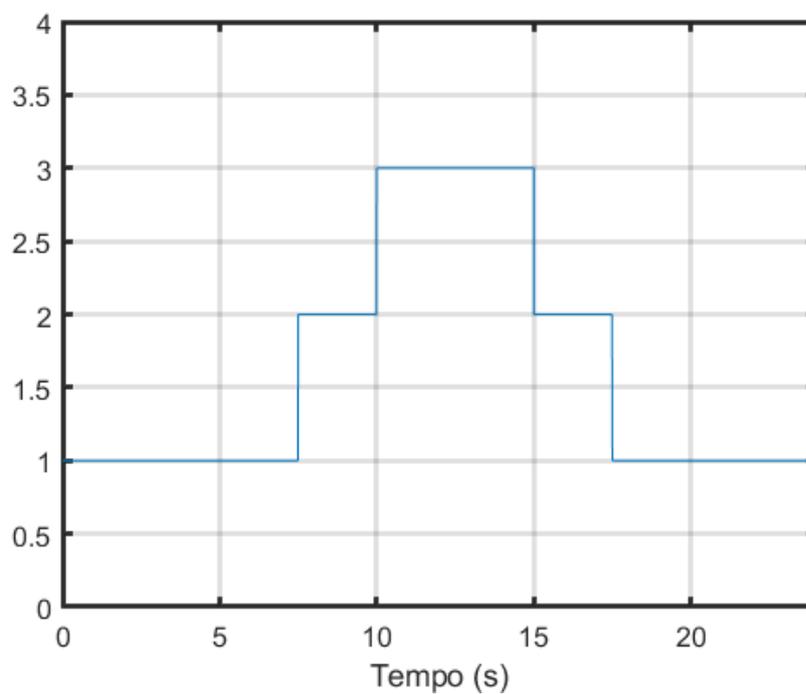
Escolheu esse valor para as cargas para que a potência dessas seja menor que a potência gerada pelo FV. A equação de potência de uma carga é dada pela Equação (4).

$$P_{carga} = \frac{U^2}{R} = \frac{725^2}{60} = 8,76kW \tag{4}$$

$$P_{carga_por_fase} = \frac{1}{3} * \frac{U^2}{R} = 2,92kW \tag{5}$$

Para que ocorra o chaveamento das cargas, desenhou o as curvas de chaveamento das três cargas ao longo da simulação e ela é dada pela Figura 24.

Figura 24 – Comportamento do chaveamento das três cargas ao longo da simulação



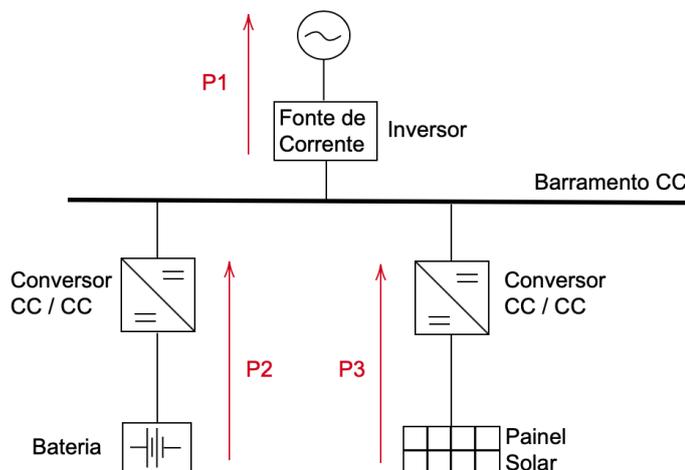
FONTE: A autora (2019)

5.2 SIMULAÇÃO

5.2.1 SEM CARGA CONECTADA AO BARRAMENTO CC DA MICRORREDE CC

Analisou o comportamento da MR CC sem carga conectada. O circuito para a simulação é composto pelo FV, a bateria conectada ao conversor CC e o inversor CC/CA interligada com a rede CA. A [Figura 41](#) representa a MR CC sem as cargas e o sentido das potências.

Figura 25 – Sentido das potências do circuito para $K_{inversor} = K_{conversor}$



FONTE: A autora (2019)

O sentido das potências, representados na [Figura 41](#), foi escolhido de tal forma que, o FV e a bateria fornecem energia para a MR CC e a rede CA esta absorvendo enrgia. Ainda, chamou a potência do inversor de P_1 , a do conversor de P_2 e do FV de P_3 .

É importante salientar que sentido positivo da bateria é quando esta está absorvendo energia do sistema e o sentido negativo da potência do inversor é quando este está fornecendo energia para a rede.

5.2.1.1 Para $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual à 725V

Os valores utilizados para a simulação estão na [Tabela 8](#).

Tabela 8 – Dados de simulação para $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual a 725V

Parâmetros	Valores
Tensão Nominal na rede elétrica	380V
Tensão de Referência do controle Droop do Conversor	725V
Tensão de Referência do controle Droop do Invesor	725V
Constante K do controle Droop do Conversor	0.5
Constante K do controle Droop do Inversor	0.5

FONTE: A Autora (2019)

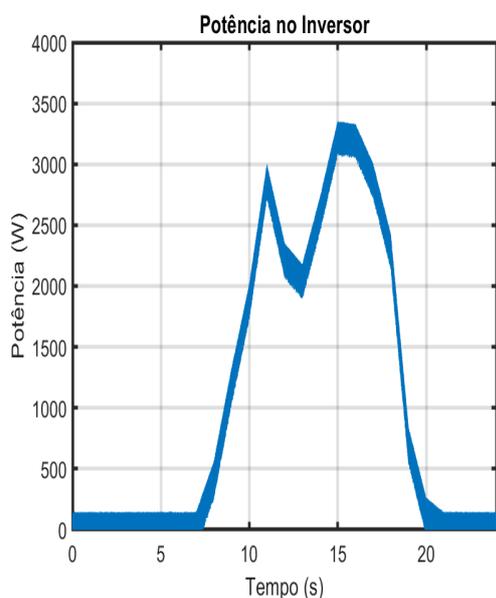
A partir dos dados da [Tabela 8](#) e as referências escolhidas para a simulação, espera-se que o resultado da potência gerada pelo painel FV, seja igual à [Equação \(6\)](#).

$$P_1 = P_3 + (-P_2)$$

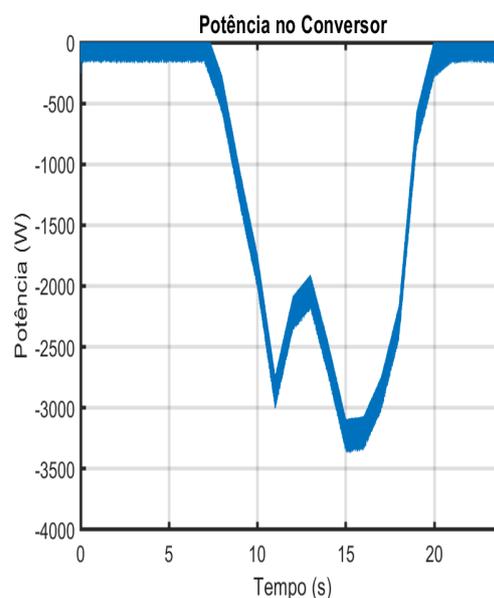
$$P_3 = P_1 + P_2 \quad (6)$$

A partir dos gráficos de potência das [Figura 26a](#) e [Figura 26b](#), verifica-se que ambos os componentes possuem o mesmo valor de potência, mas com sentidos diferentes. No instante 15s, o valor máximo da potência gerado tanto para o inversor como para o conversor, é de aproximadamente 3,23kW.

Figura 26 – Potência do Inversor e do Conversor para $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual à 725V



(a) Potência do Inversor para K=0,5

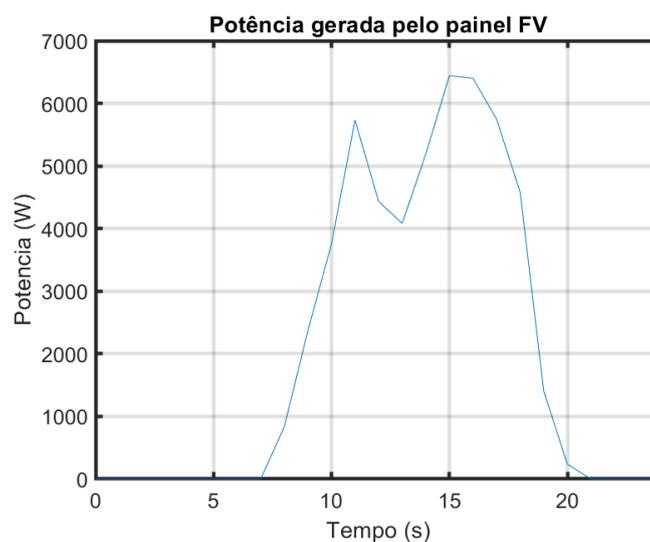


(b) Potência do Conversor para K=0,5

FONTE: A autora (2019)

Espera-se que a potência gerada pelo painel FV seja a soma das potências do inversor e do conversor. O resultado da simulação é dado pela [Figura 27](#).

Figura 27 – Potência gerada pelo painel FV para $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual à 725V

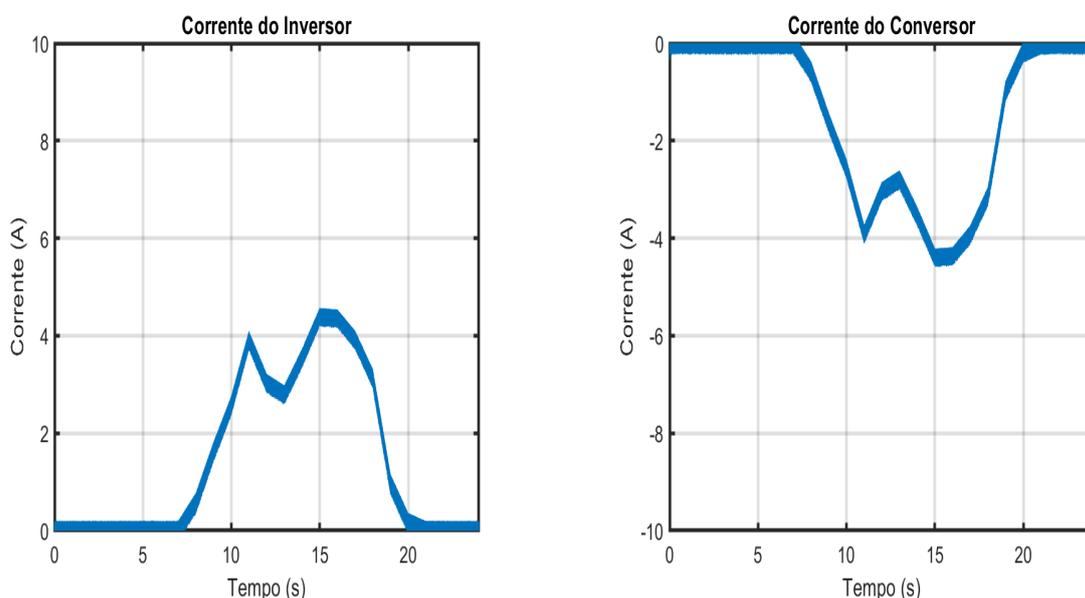


FONTE: A autora (2019)

Verifica-se que potência máxima (no instante 15s) é de 6,45kW. Este valor da potência de geração do FV (P_3) é semelhante ao esperado, ou seja, a soma de P_1 mais P_2 .

Como a saída do controle Droop é uma corrente de referência para os conversores estáticos, verificou as correntes de saída desses componentes, dada pela [Figura 28](#), para verificar o comportamento do controle Droop.

Figura 28 – Corrente do Inversor e do Conversor para $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual à 725V



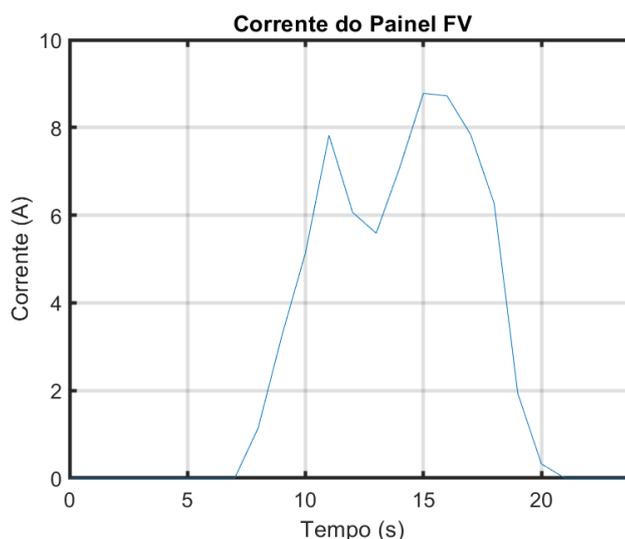
(a) Corrente do Inversor para K=0,5

(b) Corrente do Conversor para K=0,5

FONTE: A autora (2019)

O comportamento das correntes é semelhante ao da potência. Logo, a soma das correntes do conversor e do inversor deve ser igual à do FV. O resultado da simulação da corrente do FV é dado pela [Figura 29](#).

Figura 29 – Corrente do painel FV $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual à 725V

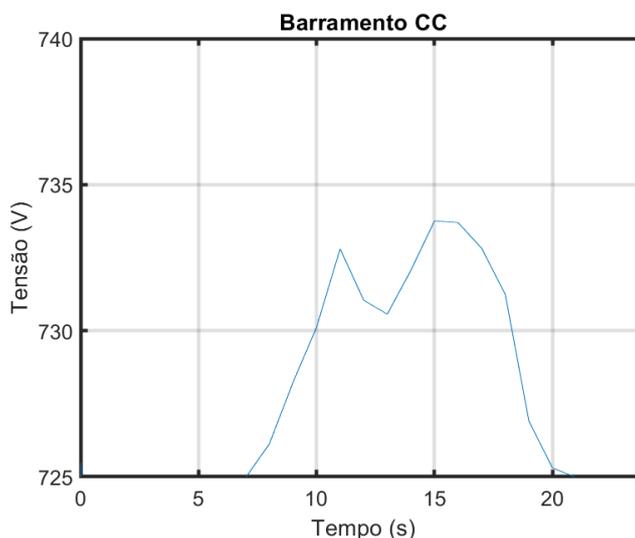


FONTE: A autora (2019)

A tensão no barramento CC da MR CC é dada pela [Figura 30](#). A tensão do barramento

CC teve um comportamento igual ao do painel FV.

Figura 30 – Tensão no barramento CC para $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual à 725V



FONTE: A autora (2019)

A partir da simulação da microrrede CC sem carga e com o valor de $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual à 725V, pode-se fazer as seguintes afirmações:

- A potência da geração FV é dada a partir da soma da potência do inversor e conversor;
- Para um $K=0,5$, a potência tanto do conversor como a do inversor são a metade (50%) da potência total da geração FV;
- O barramento CC é um nó na MR CC, logo, o somatório das potências neste nó é igual a zero

5.2.1.2 Para $K_{inversor} \neq K_{conversor}$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual à 725V

Considerando o sentido das potências, ilustradas na [Figura 41](#), e os dados da [Tabela 9](#), testou o circuito para dois casos.

Tabela 9 – Dados de simulação para $K_{inversor} \neq K_{conversor}$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual à 725V

Parâmetros	Caso 1	Caso 2
Tensão Nominal do barramento CC	725	725
Tensão Nominal na rede elétrica	380	380
Tensão de Referência do controle Droop do Conversor	725	725
Tensão de Referência do controle Droop do Inversor	725	725
Constante K do controle Droop do Conversor	0,8	0,2
Constante K do controle Droop do Inversor	0,9	0,9

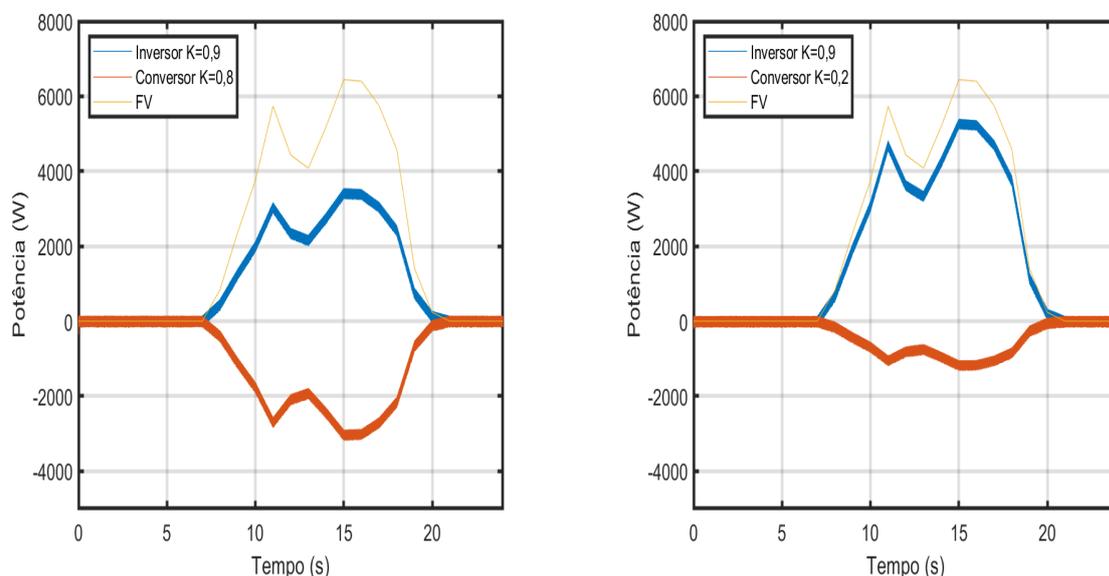
FONTE: A Autora (2019)

Realizou esses teste para verificar a proporcionalidade do somatório das potências totais. Ou seja, se a soma das potências no nó do barramento CC é zero para os dois casos.

O resultado da simulação é dado pela [Figura 31](#). Na [Figura 31a](#) (Caso 1), a soma das potências do conversor e do inversor no ponto de maior potência (no instante 15s) é igual a 6,42kW. Na [Figura 31b](#) (Caso 2), a soma das potências do inversor e conversor (no instante 15s) é igual à 6,415kW. A potência de geração do FV para ambos os casos manteve-se em 6,42kW.

Os valores de potência não foram iguais, provavelmente os capacitores dos conversores estáticos estejam armazenando energia e, para esses casos, a tensão do barramento esta aumentando.

Figura 31 – Potência do Inversor e Conversor para $K_{inversor} \neq K_{conversor}$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual à 725V e potência do FV

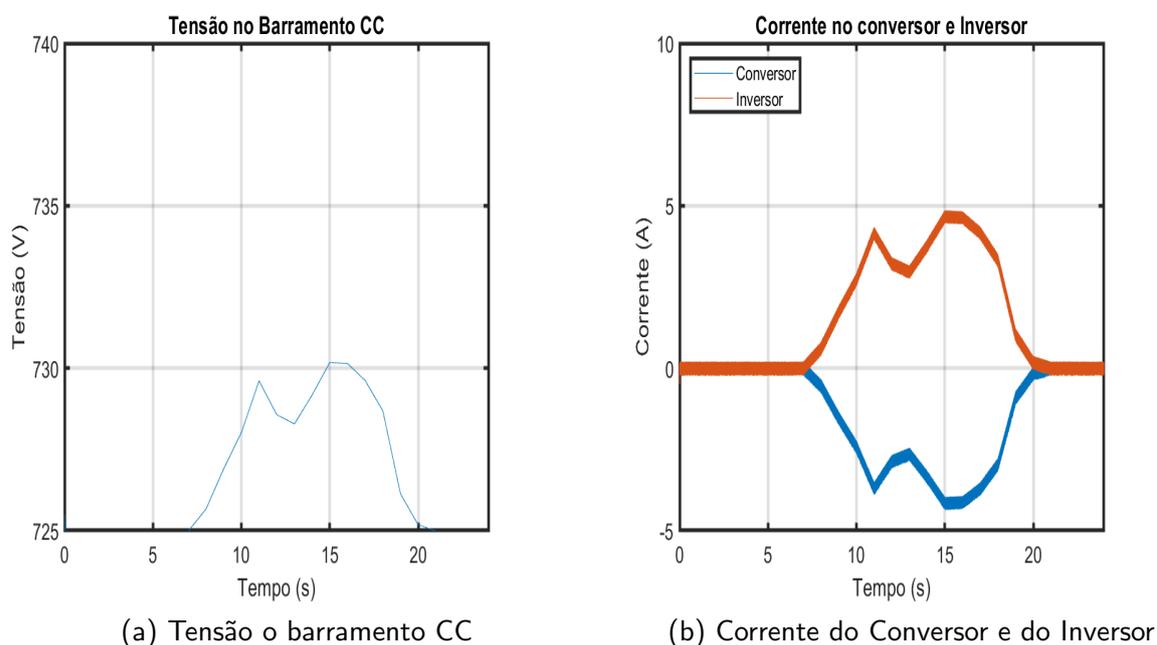


(a) Caso 1: Potência no Inversor para $K=0,9$ e no conversor para $K=0,8$ (b) Caso 2: Potência no Inversor para $K=0,9$ e no conversor para $K=0,2$

FONTE: A autora (2019)

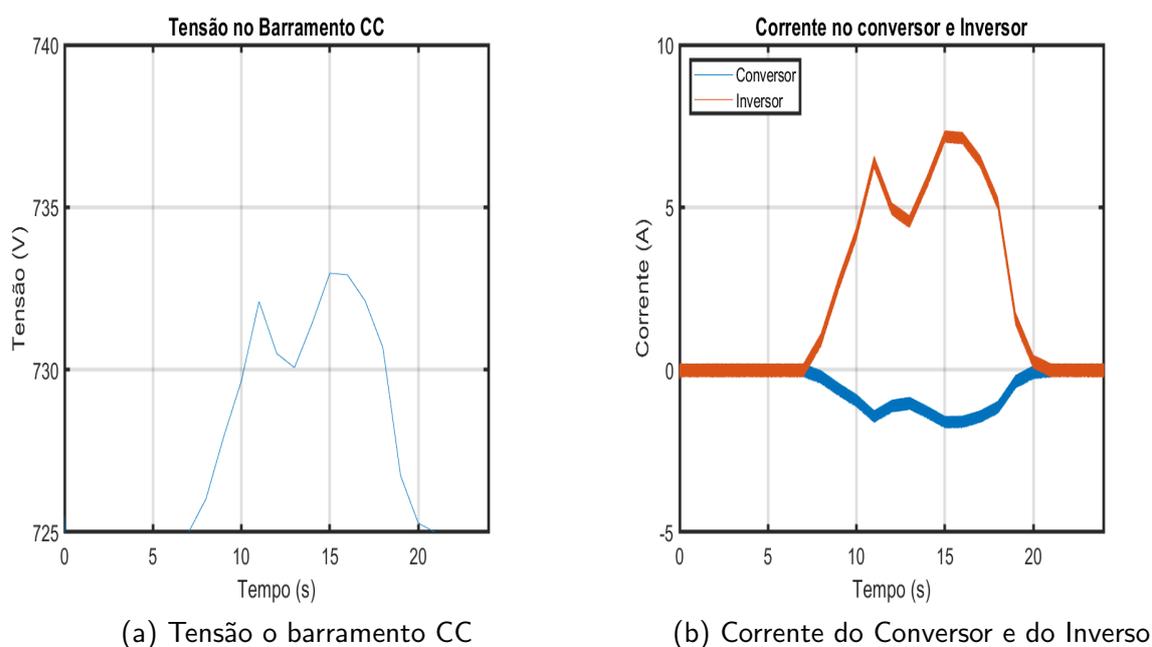
A tensão e a corrente do inversor e do conversor para ambos os casos é dado pela [Figura 32](#) e [Figura 33](#).

Figura 32 – Caso 1: Tensão no barramento CC para $K_{inversor} = 0,9$ e $K_{conversor} = 0,8$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual à 725V



FONTE: A autora (2019)

Figura 33 – Caso 2: Tensão no barramento CC para $K_{inversor} = 0,9$ e $K_{conversor} = 0,2$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual à 725V



FONTE: A autora (2019)

Comparando a tensão no barramento CC do caso 1, dado pela [Figura 32a](#), com a do

caso 2, dado pela [Figura 33a](#), percebe-se um decaimento da tensão. Como as parcelas do K do inversor e a do conversor são maior no caso 1, conseqüentemente, a corrente de referência do controle Droop, acaba sendo maior. A [Equação \(7\)](#) demonstra a tensão V_{CC} esperada no Caso 1.

$$I_{refconv} = (V_{CC} - V_{ref}) * K_{conv} \quad (7)$$

Na [Figura 32b](#) está representada as correntes do conversor e do inversor. Considerando que a corrente máxima é de aproximadamente 5A (no instante 15s), espera-se que a tensão no barramento CC seja:

$$5A = (V_{CC} - 725) * 0,8 \rightarrow V_{CC} = 731V$$

No Caso 2, onde o K do conversor é igual a 0,2, espera-se que para uma mesma tensão $V_{CC}=731V$, a corrente I_{ref} seja menor. A partir da [Figura 33b](#) e da [Equação \(8\)](#) pode-se validar essa afirmação.

$$I_{refconv} = (V_{CC} - V_{ref}) * K_{conv} \quad (8)$$

$$I_{refconv} = (731 - 725) * 0,2 \rightarrow I_{refconv} = 1,2A$$

A partir da simulação da microrrede CC sem carga, com o valor de $K_{inversor} \neq K_{conversor}$ e V_{ref} do inversor e do conversor igual à 725V, pode-se fazer as seguintes afirmações:

- Tanto para o caso 1 e caso 2, aumentando a parcela de K, a proporcionalidade das potências ainda é mantida
- A potência no barramento CC permaneceu zero.

5.2.2 DIFERENTES TENSÕES DE REFERÊNCIA PARA O CONVERSOR E O INVERSOR

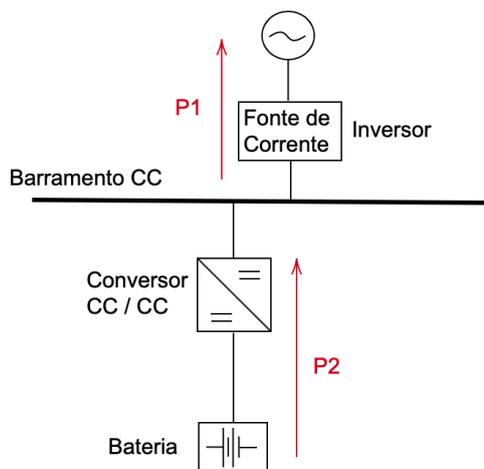
Com o intuito de verificar a atuação do controle Droop na MR CC e se o comportamento simulado é igual ao calculado, escolheu valores de tensão de referência diferentes para o inversor e conversor.

5.2.2.1 Potência no inversor e no conversor para $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$, V_{ref} do inversor igual a 700V e V_{ref} do conversor igual 725V

Para essa simulação, utilizou apenas o conversor CC/CC, a bateria e o inversor. O sentido das potências utilizadas é dado pela [Figura 34](#). Neste caso, o inversor está consumindo energia e a bateria está fornecendo energia para a MR CC.

Para efeito de simulação, baixou-se apenas o valor da tensão de referência do inversor para 700V e manteve-se o valor da referência do conversor igual a 725V.

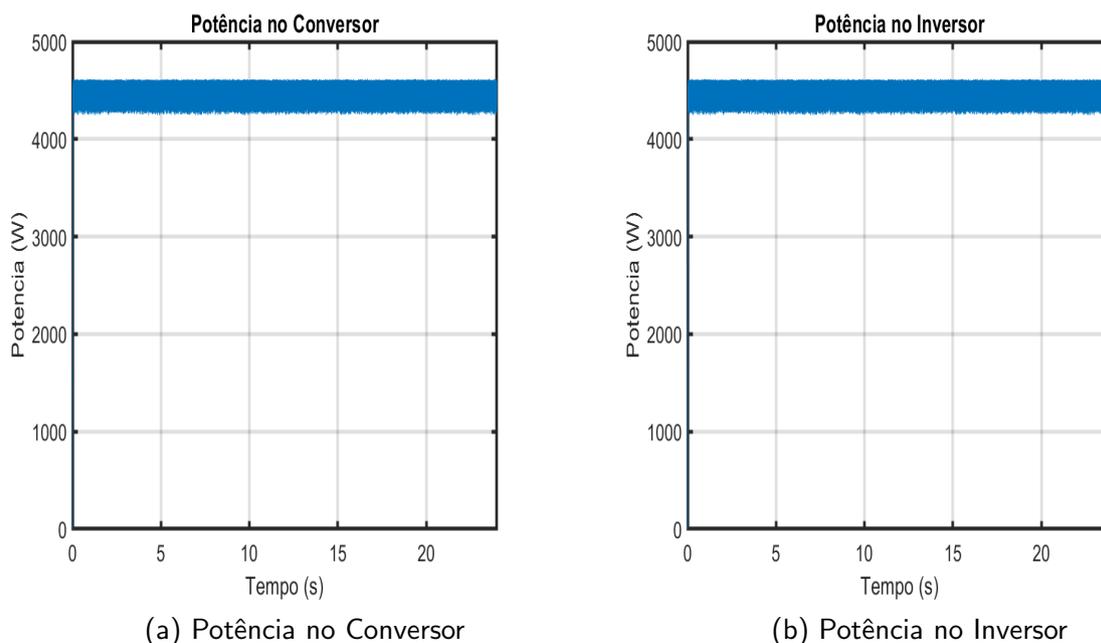
Figura 34 – Sentido das Potências para as simulações com $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$, V_{ref} do inversor igual a 700V e V_{ref} do conversor igual 725V



FONTE: A autora (2019)

Simulou essa configuração de circuito no MATLAB/SIMULINK. A [Figura 35a](#) e [Figura 35b](#) representam a potência no Conversor e no Inversor, respectivamente. A potência ao longo da simulação foi de 4,5kW.

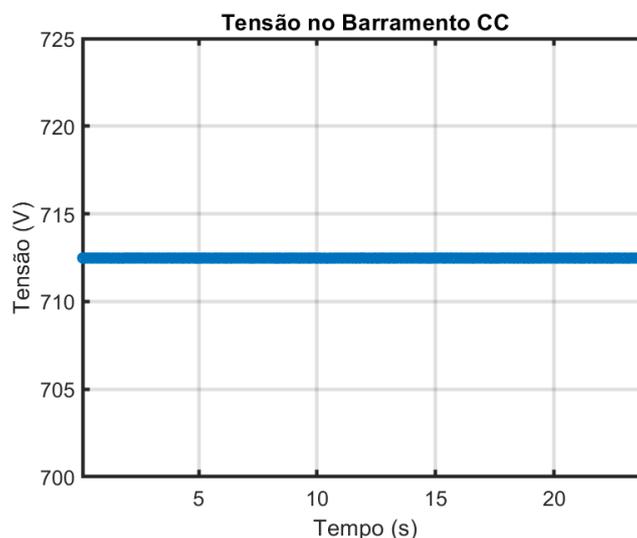
Figura 35 – Potência do Conversor e do Inversor para $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$, V_{ref} do inversor igual a 700V e V_{ref} do conversor igual 725V



FONTE: A autora (2019)

O resultado da tensão no barramento CC é ilustrado na [Figura 36](#).

Figura 36 – Tensão no barramento CC para $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$, V_{ref} do inversor igual a 700V e V_{ref} do conversor igual 725V



FONTE: A autora (2019)

Para conferir se os valores encontrados de potência da simulação condizem com o esperado, realizou uma série de cálculos. Sabendo que a tensão de referência para o inversor é igual a 700V e que K do inversor e do conversor são iguais a 0,5 e a potência esperada é 4,5kW, deseja-se verificar se a tensão de referência do conversor será igual à 725V.

Utilizando a [Equação \(11\)](#) para encontrar a tensão V_{CC} no instante de máxima potência (instante 15s).

$$I_{ref} = (V_{CC} - V_{ref}) * K \quad (9)$$

Sendo a potência igual a

$$P = V_{ref} * I_{ref} \quad (10)$$

Substituindo a corrente de referência pela [Equação \(10\)](#), tem-se

$$\frac{P}{V_{ref}} = (V_{CC} - V_{ref}) * K \quad (11)$$

$$V_{CC} = \frac{P}{V_{ref} * K} + V_{ref} \quad (12)$$

Ao substituir o valor da tensão de referência do inversor, o valor de K e a potência na [Equação \(13\)](#), obtém-se a tensão V_{CC} do barramento CC no instante de maior potência.

$$V_{CC} = \frac{4500}{700 * 0,5} + 700 = 712,85V \quad (13)$$

Para encontrar o valor da tensão de referência do conversor, manipulou a [Equação \(11\)](#), e obteve a [Equação \(14\)](#).

$$\begin{aligned}\frac{P}{V_{ref}} &= (V_{CC} - V_{ref}) * K \\ \frac{P}{K} &= V_{ref} * (V_{CC} - V_{ref}) \\ V_{ref}^2 - V_{CC} * V_{ref} + \frac{P}{K} &= 0\end{aligned}\tag{14}$$

Sabendo o valor de V_{CC} , de K e da potência desejada, consegue encontrar o valor de referência de tensão para o conversor. Como a referência de potência escolhida para o conversor esta no seu sentido negativo, o valor da potência P_2 é negativo. Substituindo os valores na [Equação \(14\)](#), tem-se

$$V_{ref}^2 - 712,85 * V_{ref} + \frac{-4500}{0,5} = 0$$

Resolvendo a equação de segunda ordem para o V_{ref} , obtém-se o valor da tensão de referência para o conversor, que é igual a 725V.

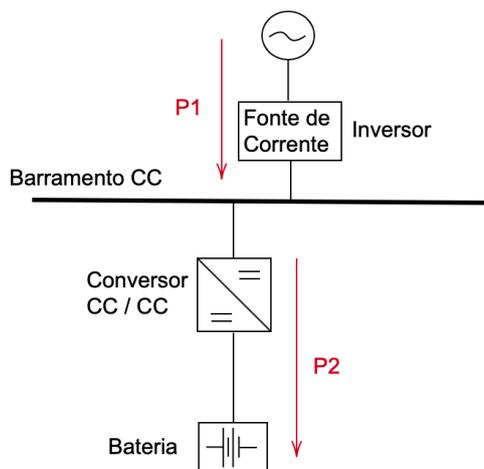
O resultado obtido através dos cálculos condizem com os resultados obtidos através da simulação. Logo, pode-se afirmar que o controle droop esta correto e atuando devidamente.

5.2.2.2 Potência no inversor e no conversor para $K_{inversor} = 0,2$ e $K_{conversor} = 0,8$, V_{ref} do inversor igual a 725V e V_{ref} do conversor igual 685V

Para essa simulação, utilizou novamente apenas o conversor CC/CC, a bateria e o inversor. O sentido das potências utilizadas é dado pela [Figura 37](#). Neste caso, o inversor esta fornecendo energia para o barramento CC e o conversor consumindo energia.

Para efeito de simulação, o valor da tensão de referência do inversor igual a 725V e baixou o valor da tensão de referência de tensão do conversor para 685V.

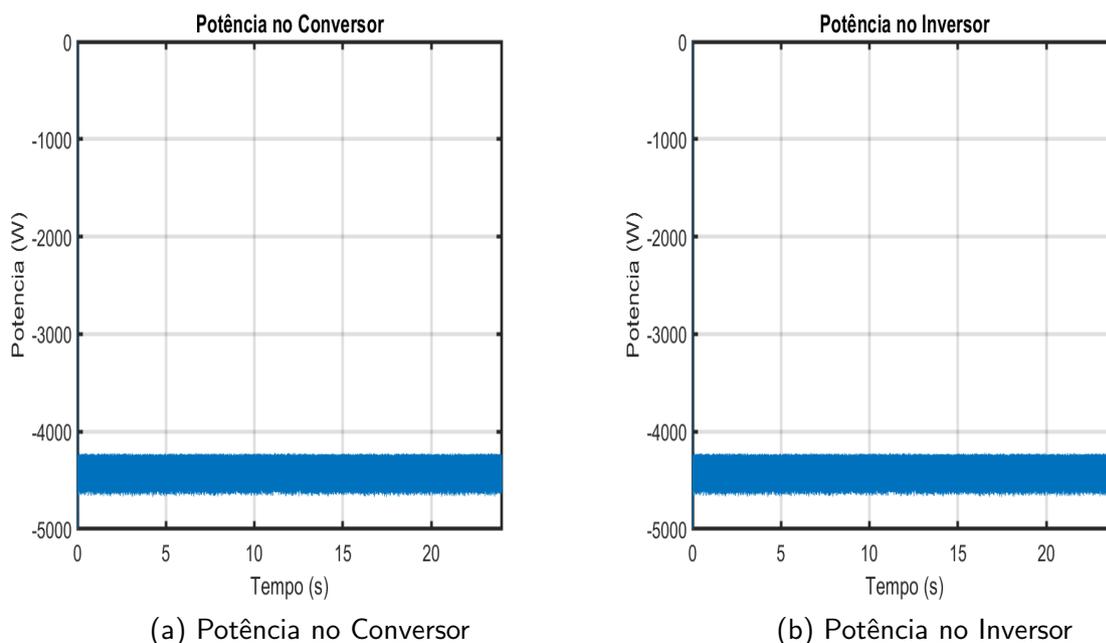
Figura 37 – Sentido das Potências para as simulações com $K_{inversor} = 0,2$ e $K_{conversor} = 0,8$, V_{ref} do inversor igual a 725V e V_{ref} do conversor igual 685V



FONTE: A autora (2019)

Simulou o circuito da [Figura 37](#) no MATLAB/SIMULINK. A [Figura 38a](#) e [Figura 38b](#) representam a potência no Conversor e no Inversor, respectivamente. A potência ao longo da simulação foi igual a -4,5kW.

Figura 38 – Potência do Conversor e do Inversor para $K_{inversor} = 0,2$ e $K_{conversor} = 0,8$, V_{ref} do inversor igual a 725V e V_{ref} do conversor igual 685V



FONTE: A autora (2019)

Como feito anteriormente, para conferir se os valores encontrados de potência da simulação condizem com o esperado, realizou uma nova série de cálculos. Sabendo que a tensão de referência para o inversor é igual a 725V e que K do inversor é igual a 0,2 e do conversor igual a 0,8 e a potência esperada é -4,5kW, deseja-se verificar se a tensão de referência do conversor é igual a tensão estipulada para as simulações, de 685V. Substituiu os valores de K e V_{ref} do inversor e a potência obtida nas simulações de -4,5kW na [Equação \(14\)](#). Obteve-se inicialmente um V_{CC} igual a

$$V_{CC} = \frac{-4500}{725 * 0,2} + 725 = 693V$$

Com o valor de V_{CC} consegue encontrar o valor da tensão de referência do conversor. Substituindo o valor de V_{CC} na [Equação \(14\)](#), tem-se

$$V_{refconv}^2 - 693 * V_{ref} + \frac{-(-4500)}{0,8} = 0$$

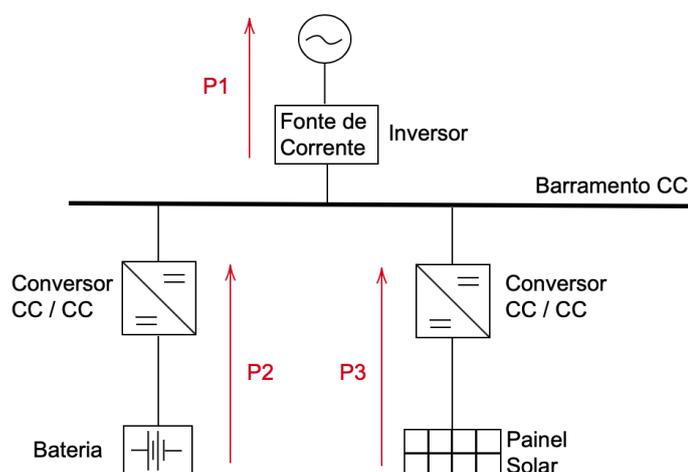
O valor da tensão de referência do conversor calculada é igual a 684,9V.

O resultado obtido através dos cálculos condizem com os resultados obtidos nas simulações, mesmo alterando os valores de K e V_{ref} do inversor e conversor.

5.2.2.3 Potência no inversor e no conversor para uma MR CC com um FV conectado, onde $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e diferentes V_{ref} no inversor e conversor

Para essa simulação, inseriu o FV na MR com o conversor CC/CC, a bateria e o inversor. O sentido das potências utilizadas é dado pela [Figura 41](#). Neste caso, o inversor esta consumindo energia e o conversor e o FV estão fornecendo energia para a MR CC.

Figura 39 – Sentido das potências para uma MR CC com um FV conectado, onde $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e diferentes V_{ref} no inversor e conversor

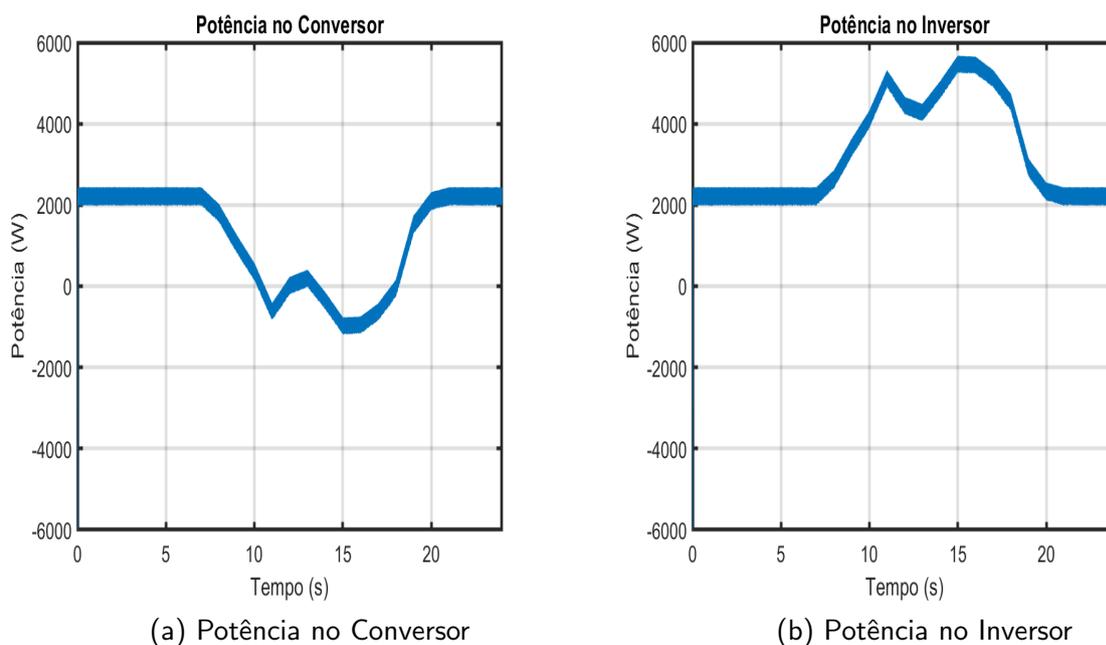


A relação das potências nesta MR CC se dá através da equação [Equação \(15\)](#).

$$P_1 = P_2 + P_3 \quad (15)$$

Para efeito de simulação, estipulou um valor de tensão de referência para o conversor de 700V e do inversor de 680V. O resultado da simulação é ilustrado na [Figura 40](#).

Figura 40 – Potência no inversor e no conversor para uma MR CC com um FV conectado, onde $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e diferentes V_{ref} no inversor e conversor



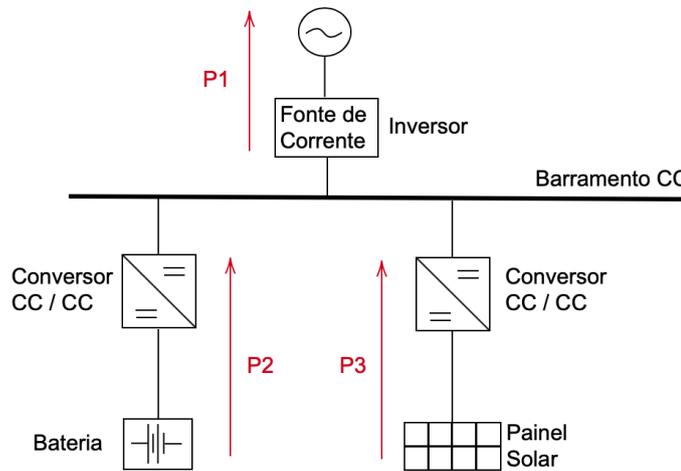
FONTE: A autora (2019)

A potência máxima ocorre no instante 15s. Ao analisar a potência para o inversor e o conversor neste instante, verifica-se que a potência no inversor é próximo de 5,5kW e a do conversor é igual a -1,01kW. Sabe-se que para o instante de 15s, a potência do FV é 6,5kW, logo a [Equação \(15\)](#) é atendida, já que somando as potências do FV e do conversor, resulta na potência do inversor.

5.2.2.4 Potência no inversor e no conversor para uma MR CC com um FV conectado, onde $K_{inversor} = 0,2$ e $K_{conversor} = 0,9$ e diferentes V_{ref} no inversor e conversor

O sentido das potências utilizadas nesta simulação é dado pela [Figura 41](#). Neste caso, o inversor está consumindo energia e o conversor e o FV estão fornecendo energia para a MR CC.

Figura 41 – Sentido das potência para uma MR CC com um FV conectado, onde $K_{inversor} \neq K_{conversor}$ e diferentes V_{ref} no inversor e conversor

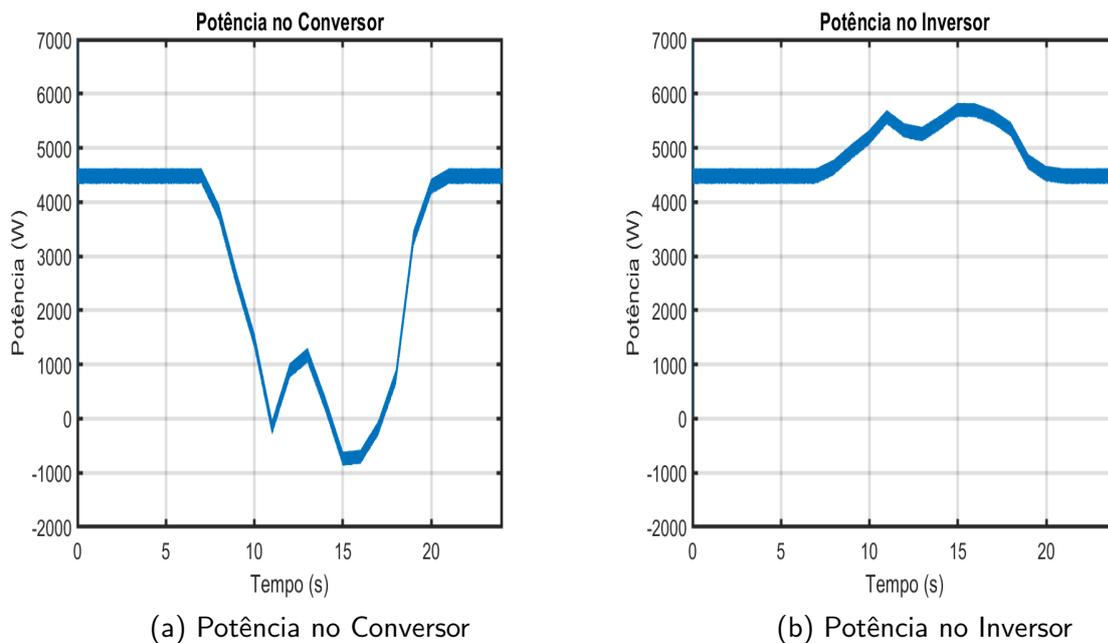


FONTE: A autora (2019)

A relação das potências nesta MR CC se mantém igual à equação [Equação \(15\)](#).

Para efeito de simulação, estipulou um valor de tensão de referência para o inversor de 700V e do conversor de 740V, e os valores de K para o inversor é 0,2 e do conversor é 0,9. O resultado da simulação é ilustrado na [Figura 40](#).

Figura 42 – Potência no inversor e no conversor para uma MR CC com um FV conectado, onde $K_{inversor}=0,2$ e $K_{conversor}=0,9$ e diferentes V_{ref} no inversor e conversor



FONTE: A autora (2019)

A potência máxima ocorre no instante 15s. Ao analisar a potência para o inversor e o conversor neste instante, verifica-se que a potência no inversor é próximo de 5,6kW e a do conversor é igual a -0,95kW. Sabe-se que para o instante de 15s, a potência do FV é 6,5kW, logo a [Equação \(15\)](#) é atendida novamente, já que somando as potências do FV e do conversor, resulta na potência do inversor.

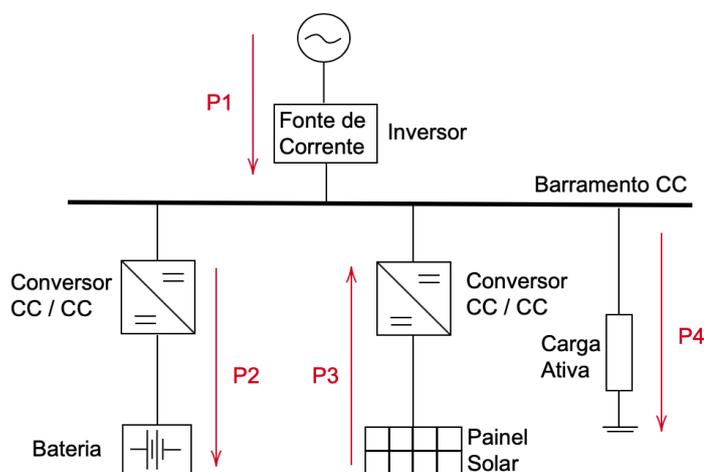
5.2.3 CARGA ATIVA CONECTADA AO BARRAMENTO CC

Para verificar o comportamento da MR CC quando há componentes CC consumindo energia desta, conectou ao barramento CC cargas ativas que variam seu valor de potência ao longo da simulação.

5.2.3.1 Comportamento da MR CC quando $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e V_{ref} do inversor e conversor é 725V

O sentido das potências utilizadas para essa simulação é dado pela [Figura 43](#) e os valores para os componentes utilizados no ensaio estão na [Tabela 10](#).

Figura 43 – Sentido das Potência para uma MR CC com carga conectada quando $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e V_{ref} do inversor e conversor é 725V



FONTE: A autora (2019)

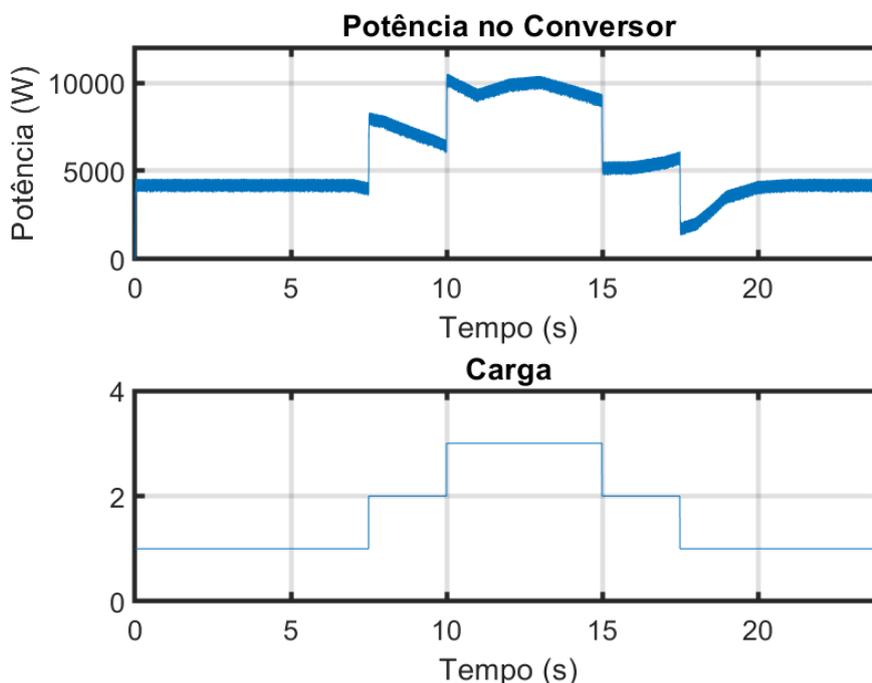
Tabela 10 – Dados de projeto para uma MR CC com carga conectada quando $K_{inversor} = K_{conversor} = 0,5$ e V_{ref} do inversor e conversor é 725V

Parâmetros	Valores
Tensão Nominal barramento CC	725V
Tensão Nominal na rede elétrica	380V
Tensão de Referência do controle Droop do Conversor	725V
Tensão de Referência do controle Droop do Inversor	725V
Constante K do controle Droop do Conversor	0.5
Constante K do controle Droop do Inversor	0.5
Potência da carga por fase	8,76kW

FONTE: A Autora (2019)

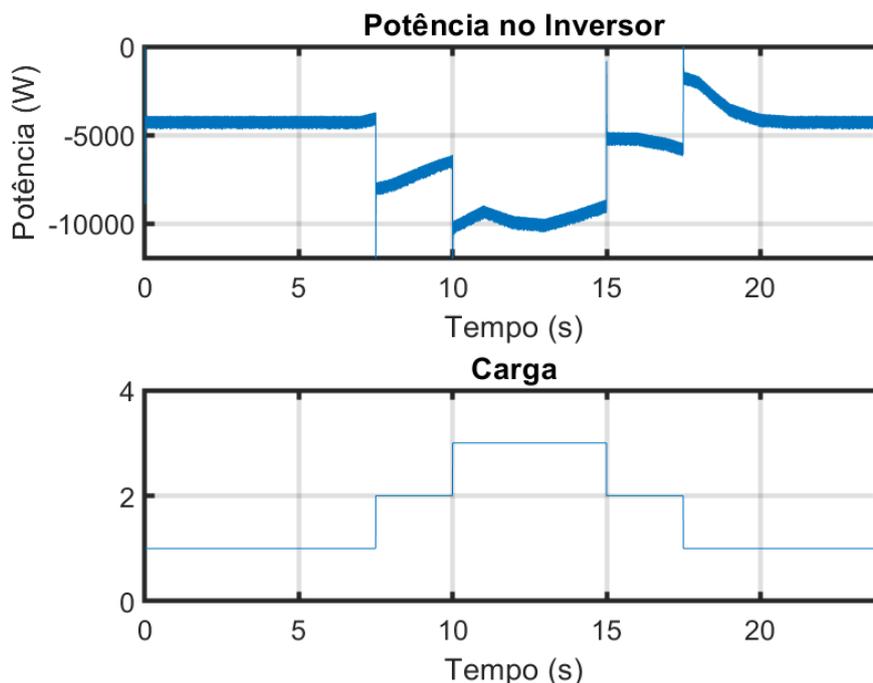
Ao simular a MR CC com cargas ativas conectadas, percebeu que a curva da potência do inversor e do conversor seguem o formato da curva de cargas. As [Figura 44](#) e [Figura 45](#) demonstram essa afirmação.

Figura 44 – Potência no Conversor para uma microrrede CC com carga conectada



FONTE: A autora (2019)

Figura 45 – Tensão no barramento CC para a microrrede CC com carga conectada



FONTE: A autora (2019)

Na [Figura 44](#) pode se fazer a relação do comportamento da potência, com as cargas e a geração FV.

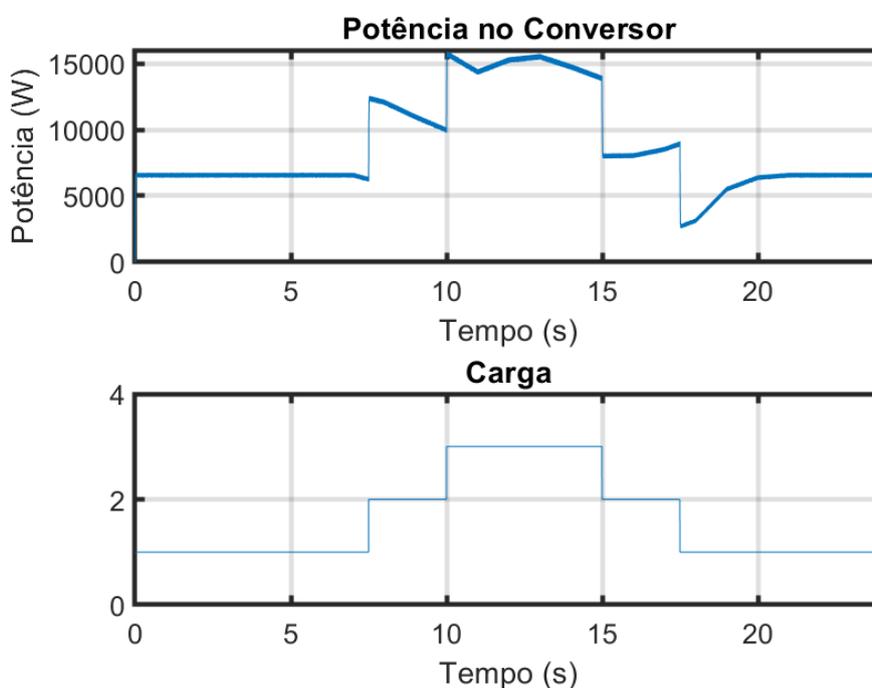
- No instante 7,5s, quando entra a segunda carga no sistema, a resistência cai pela metade e, conseqüentemente, a potência acaba dobrando para o conversor e reduzindo pela metade para o inversor;
- Do instante 7,5 ao instante 10s ocorre o início da geração FV. A potência no inversor sofre um aumento enquanto a do conversor cai na mesma proporção;
- No instante 10s, a terceira carga entra no sistema e a potência aumenta novamente no conversor, com um valor igual a três vezes o valor da potência inicial, e reduz para o inversor, com uma potência um terço da potência inicial;
- Do instante 15s sai a terceira carga e a potência decai novamente para a metade para o conversor e aumenta meio para o inversor;
- No instante 17,5s a segunda carga sai do sistema e a geração FV continua caindo;
- No instante 21s, quando a geração FV vai para zero, a potência retorna para seu valor inicial e permanece neste instante até o final da simulação;

Com essas simulações, verifica-se que o comportamento das potências do inversor e do conversor segue o perfil da curva de carga. Verifica-se também que a potência no barramento CC ainda é zero. Ou seja, mesmo com a adição das cargas ativas na MR CC, o controle Droop atua devidamente garantindo a estabilidade da MR CC.

5.2.3.2 Comportamento da MR CC quando $K_{inversor} = 0,2$ e $K_{conversor} = 0,7$ e V_{ref} do inversor e conversor é 725V

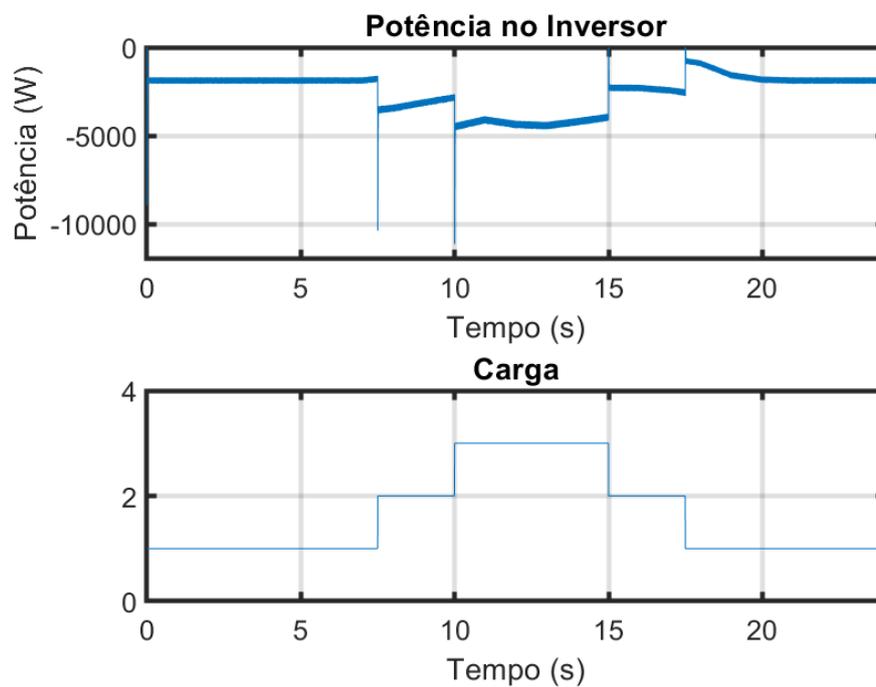
Alterando os valores de $K_{inversor}$ para 0,2 e $K_{conversor}$ para 0,7, mantendo a tensão de referência do inversor e do conversor em 725V e o sentido das potências igual ao da [Figura 43](#), o comportamento das potências se mostrou semelhante se comparado aos resultados obtidos na simulação para $K_{inversor} = K_{conversor}$. O que diferencia as simulações são os valores das potências do inversor e do conversor, já que os valores de K são diferentes, mas a potência do barramento CC em zero ainda é garantida. O valor das potências é dado na [Figura 46](#) e [Figura 47](#)

Figura 46 – Potência no Conversor para MR CC quando $K_{inversor} = 0,2$ e $K_{conversor} = 0,7$ e V_{ref} do inversor e conversor é 725V



FONTE: A autora (2019)

Figura 47 – Potência no Inversor para MR CC quando $K_{inversor} = 0,2$ e $K_{conversor} = 0,7$ e V_{ref} do inversor e conversor é 725V



FONTE: A autora (2019)

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A partir do exposto, pode-se afirmar que o presente trabalho atingiu os objetivos traçados inicialmente. O modelo de simulação desenvolvido no MATLAB/SIMULINK conseguiu representar a microrrede CC, futuramente instalada no DELT, e gerar os resultados que possibilitam a compreensão do funcionamento desta diante de diferentes situações de operação. Ainda, o modelo desenvolvido possibilitou a simulação da MR CC variando os limites de operação do controle Droop, a fim validar a técnica de controle escolhida.

Neste contexto, foram identificadas certas preposições previstas pela literatura quanto ao comportamento da microrrede cc. Para tanto, simulou diferentes configurações da microrrede CC com diferentes valores de K e de tensão de referência V_{ref} do controle Droop.

Ao se avaliar a microrrede CC sem carga conectada e com apenas o FV, o conversor e o inversor conectados ao barramento CC, percebeu que a potência da geração FV é dada a partir da soma da potências do inversor e conversor e que o controle Droop mantém a potência no barramento CC igual à zero. Essa análise é válida tanto para valores iguais como para valores diferentes de K. Isto ocorre, pois a proporcionalidade das potências com o K é garantido pelo controle Droop.

Na análise da MR CC com diferentes tensões de referência para o inversor e conversor, primeiramente, testou a MR CC com apenas o conversor e o inversor conectado ao barramento CC. Mesmo alterando o fluxo de potência do barramento CC, percebeu que as equações do controle Droop condizem com a simulação. Ou seja, através do controle Droop, pode se estimar qual a potência da MR CC e quanto será a tensão no barramento CC. Isto tanto para valores de K iguais e K diferentes do inversor e do conversor. Ainda, avaliando a situação sem carga, conectou à esse barramento CC um FV. Agora, a potência resultante da MR CC é dado pela soma das potências de cada elemento conectado ao barramento CC. Novamente, o controle droop atendeu o esperado e manteve a potência no barramento CC em zero.

Por fim, conectou uma carga ativa formada por três cargas em paralelo de 60Ω ao barramento CC, sendo que essa carga ativa varia ao longo da simulação. Para todos os ensaios feitos, verificou que a potência do conversor e do inversor seguem a forma de onda da carga e que, mesmo ocorrendo variações de potência no sistema, o controle Droop consegue garantir a condição de operação da MR CC.

Este estudo do comportamento da MR CC se difere dos demais, pois, a partir dos dados obtidos neste trabalho, consegue prever certos comportamentos dessa MR CC diante de diferentes situações de operação. Desta maneira, ao finalizar a instalação da Microrrede no DELT, pode se esperar certos valores de geração e distribuição de carga.

Vale lembrar que o papel da simulação não é obter a solução ótima para o problema, mas sim gerar informações que subsidiam a tomada de decisão da escolha de certos parâmetros da MR CC. Por este motivo, apesar das conclusões gerais, não foi apresentado qual a melhor

condição de operação da MR CC, visto que isso está diretamente ligado a, não só a geração FV ou os valores setados para o controle, mas sim a Microrrede do DELT como um todo.

Em termos de trabalho futuro, existem muitas linhas de desenvolvimento que podem ser seguidas. Principalmente quanto ao tempo de vida da bateria de níquel-sódio, visto que atualmente há poucos trabalhos que utilizam essas baterias como unidades armazenadoras em microrredes CC.

Outra linha interessante é, após instalado e finalizado a MR do DELT, validar os testes presentes nesse trabalho, comparando-os com os reais. Para complementar, implementar o controle Droop em um controlador (por exemplo um CLP¹) e visualizar como esse controlador gerencia e trata as informações da MR CC.

A introdução de mais bancos de baterias de tipos diferentes (como por exemplo a bateria de lítio) à essa MR CC seria outra linha a seguir. Pois assim, abrange-se diferentes tratativas de carga e descarga desses bancos de baterias e, também, como ocorre a transferência de energia dessas para o sistema.

¹Controlador Lógico Programável

Referências

- ANEEL, A. D. I. **Geração distribuída ultrapassa 20 mil conexões**. 2018. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/geracao-distribuida-ultrapassa-20-mil-conexoes/656877>. Citado na página 1.
- ANEEL, A. N. de E. E. **Informações Gerenciais – Dezembro 2018**. 2018. Citado na página 1.
- BERGVELD, H. J.; KRUIJTPETER, W. S.; NOTTEN, H. L. Battery management systems. In: **Battery Management Systems**. [S.l.]: Springer, Dordrecht, 2002. cap. 2, p. 9–30. Citado na página 12.
- CESAR, E. L. **Modelagem e Análise da Dinâmica de Microrredes de Distribuição de Energia Elétrica**. Tese (apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Automação e Sistemas) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2017. Citado 5 vezes nas páginas 1, 2, 7, 8 e 17.
- DRAGICEVIC, T. et al. Dc microgrid - part i: A review of control strategies and stabilization techniques. **IEEE Transactions on Power System**, ieeexplore.ieee.org, 2016. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7268934/>>. Citado 4 vezes nas páginas 2, 4, 5 e 17.
- EGHTEDARPOUR, N.; FARJAH, E. Distributed charge/discharge control of energy storages in a renewable-energy-based dc micro-grid. **IET Renewable Power Generation**, ieeexplore.ieee.org, 2014. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6708150/>>. Citado 3 vezes nas páginas 1, 11 e 17.
- ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R.; PINTO, H. d. M. Processo de investigação bibliométrica: avaliação da qualidade dos serviços bancários. **Revista de Administração Contemporânea**, v. 17, n. 3, p. 325–349, 2013. Citado na página 13.
- GUERRERO, J. et al. Advanced control architectures for intelligent microgrids-part i: Decentralized and hierarchical control. **IEEE Transactions on ...**, ieeexplore.ieee.org, 2013. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/iel5/41/4387790/06184305.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 17.
- HATZIARGYRIOU, N. **Microgrids: Architectures and Control**. 1 edição. ed. [S.l.]: John Wiley Sons, 2013. 344 p. ISBN 1118720644, 9781118720646. Citado na página 4.
- LAWDER, M. T. et al. Battery energy storage system (bess) and battery management system (bms) for grid-scale applications. **Proceedings of the IEEE**, IEE, 2014. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6811152>>. Citado 3 vezes nas páginas 11, 12 e 17.
- MATHWORKS. **Simulink**. 2019. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/simulink.html>>. Citado na página 21.

MATHWORKS. **What is MATLAB**. 2019. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>>. Citado na página 20.

MOLER, C. **The Origins of MATLAB**. 2004. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/the-origins-of-matlab.html>>. Citado na página 20.

MOTTA-ROTH, D.; HENDGES, G. **Produção textual na universidade**. 1 edica. ed. [S.l.]: Parábola Editorial, 2016. ISBN 978-85-7934-025-3. Citado na página 13.

MURNANE, M.; GHAZEL, A. A closer look at state of charge (soc) and state of health (soh) estimation techniques for batteries. Analog Devices, 2017. Disponível em: <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/A-Closer-Look-at-State-Of-Charge-and-State-Health-Estimation-Techniques-....pdf>>. Citado na página 12.

OLIVARES, D. et al. Trends in microgrid control. **Task Force on smart grid**, ieeexplore.ieee.org, 2014. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6818494/>>. Citado 4 vezes nas páginas 1, 4, 5 e 17.

PALIZBAN, O.; KAUHANIEMI, K.; GUERRERO, J. Microgrids in active network management - part i: Hierarchical control, energy storage, virtual power plants, and market participation. **Renewable and Sustainable Energy Review**, Elsevier, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114000264>>. Citado na página 17.

TAYAB, U. B. et al. A review of droop control techniques for microgrid. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117303453>>. Citado na página 17.

UNAMUNO, E.; BARRENA, A. Hybrid ac/dcmicrogrids—part i: review and classification of topologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115008412>>. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 4.

WEINGARTNER, C. B. **IMPLEMENTAÇÃO DE UM CONTROLE VETORIAL APLICADO EM UM GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO**. 95 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007. Citado na página 25.

YU, S.-Y. et al. Soc-based output voltage control for bess with a lithium-ion battery in a stand-alone dc microgrid. **Energies**, v. 9, p. 924, 11 2016. Citado 3 vezes nas páginas 9, 10 e 17.

Anexos

ANEXO A – DATASHEET BATERIA NÍQUEL-SÓDIO ST523

FIAMM ST523 620 V 22.5 kWh



ST523 Technical Specification

Electrical Characteristics

Battery / Chemistry Type	NaNiCl ₂
Constant Power Discharge (Rated)	6.25 kW for 3 hours
Total Number of cells	240
Nominal Current Capacity	38 Ah (100% DOD)
Nominal Energy Capacity	22.5 kWh (100% DOD at C/10)
Round Trip Efficiency	90% round trip efficiency (at 6.25 kW constant power discharge 80% DOD & charging maximum power 6.25 kW)
Operation Voltage	Minimum Nominal Maximum 450 VDC 620 VDC 641 VDC
Max Charge Voltage	700 VDC (DC Bus)
Min Discharge	450 VDC (DC Bus)

Operating Conditions

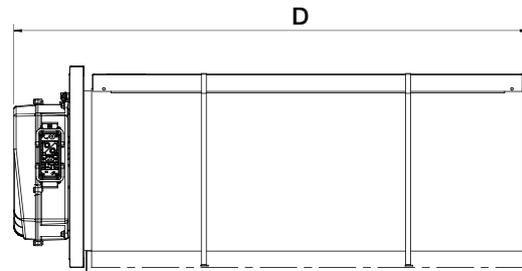
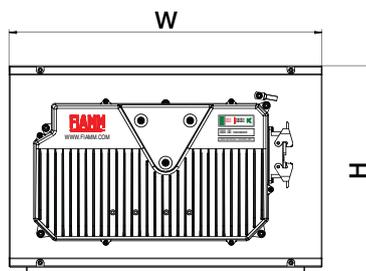
Cooling	Not Needed
Heating from cold to operation temperature	Take up to approximately 15 hours
Design Cycle Life	4500 Cycles at 80% DOD

BMS Characteristics

AUX Power for 24VDC feed	Depends on requirements	
Monitor/Control	<ul style="list-style-type: none"> - SOC - Thermal management - Fault detection 	<ul style="list-style-type: none"> - Over/under voltage - Over/under temperature - Over current
Charge Control	Embedded electronic current control	
Gateway Communications	CAN Open	

Dimensions

Width (W)	624 mm / 24.6 in
Depth (D)	1023 mm / 40.2 in
Height (H)	406 mm / 16 in
Weight	256 kg / 564 lb



ANEXO B – DATASHEET CONVERTOR CC/CC SINAMICS DCP 30KW

Technical information

	SINAMICS DCP 120 kW	SINAMICS DCP 30 kW
Model No.	6RP0010-1AA32-0AA0	6RP0000-0AA25-0AA0
Input/output voltage	0–800V DC	0–800V DC
Max. input voltage	920V DC (with derating)	1000V DC (Imax = 5 A for 30 sec, every 5 min)
Current/voltage/power	Imax = 200 A @ Vin = Vout = 600V DC, P = 120 kW	Imax = 50 A @ Vin = Vout = 600V DC, P = 30 kW
Power supply	24V DC, I = 20 A	24V DC, I = 5 A
Current ripple	< 3 %	
Scalability	4x parallel, input and/or output	
Efficiency	> 98%	
Temperature range	32–104 °F (0–40 °C), up to 131 °F (55 °C) with derating	
Installation altitude	up to 6,500 ft. (2,000 m) without derating up to 16,400 ft. (5,000 m) with current/voltage derating	
Communication	PROFIBUS, PROFINET, EtherNet/IP, DriveCLiQ with OALINK connection to CU320-2	
Closed-loop control	Closed-loop control current, voltage and power	
Control module	Own Control Unit	
Electrical isolation	No	
Degree of protection	IP00	IP20
Weight	Approx. 260 lbs.(118 kg)	Approx. 84 lbs.(38 kg)
Dimensions	35.4 x 8.1 x 19.7 in. (900 x 205 x 500 mm)	23.6 x 6.1 x 21.5 in. (660 x 155 x 545 mm)
Standards	IEC 62109-1, IEC 61800-5-1, IEC 61800-3, UL508C, UL 61800-5-1, CSA C22.2 No. 274	
Certifications/approvals	CE, cURus, EAC, RCM	

Applications

Industry	<ul style="list-style-type: none"> Peak shaving applications using stored energy, e.g. centrifuges, presses, elevators, stacker cranes, Rubber Tired Gantry cranes (RTGs), industrial trucks Peak load buffer in the DC link of drives Connecting DC buses with different voltage levels Diesel operated harbor cranes — Rubber Tired Gantry Cranes (ECO-RTGs) Island grid (e.g. remote mines, remote drill rigs, remote military facilities, remote resorts, ships) Systems with UPS (Uninterruptable Power Supply) functionality
Test systems	<ul style="list-style-type: none"> Battery test systems / SINAMICS DCP as variable DC source Battery simulation Test systems for photovoltaic power plants
Smart grid	<ul style="list-style-type: none"> Energy Storage Systems (ESS) with wind and solar systems Control energy for frequency and voltage stabilization Fuel cell applications (hydrogen production / hydrolyser)
Marine	<ul style="list-style-type: none"> Emissions reduction on boats, ships and cranes in ports and harbors — SINAMICS DCP as inter-connect between energy storage devices and the DC link of motor inverters (e.g. sight seeing ships, water bus, tug boats, RTG, etc.) Offshore platforms and ships (energy saving solutions for winches and crane applications) Charging technology for e-Boats with battery power
e-Mobility	<ul style="list-style-type: none"> Fast charging stations for e-Cars, e-Buses and e-Boats (vehicle to grid (V2G) technology) Hybrid systems (Motors in combination with fuel cells or supercaps)