

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANDRESSA GARBUIO JASINSKI

**SISTEMA DE ACUMULAÇÃO DE ENERGIA EM PEQUENA ESCALA CONECTADO
À REDE ELÉTRICA COMERCIAL**

CURITIBA

2018

ANDRESSA GARBUIO JASINSKI

**SISTEMA DE ACUMULAÇÃO DE ENERGIA EM PEQUENA ESCALA CONECTADO
À REDE ELÉTRICA COMERCIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação
de Engenharia Elétrica, Área de
Eletrotécnica, Departamento de
Engenharia Elétrica, Setor de
Tecnologia da Universidade Federal do
Paraná, como requisito à obtenção do
título de bacharel em Engenharia
Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Rogers Demonti

CURITIBA

2018

TERMO DE APROVAÇÃO

ANDRESSA GARBUIO JASINSKI

SISTEMA DE ACUMULAÇÃO DE ENERGIA EM PEQUENA ESCALA CONECTADO À REDE ELÉTRICA COMERCIAL

Trabalho de Conclusão de Curso Aprovado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Eletricista do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. Rogers Demonti (Orientador)
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Prof. Dr. Carlos Gouvea
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Prof. Dr. Roman Kuiava
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Curitiba, 26 de novembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me proporcionar a força e sabedoria necessárias para que pudesse continuar e alcançar meus objetivos.

A minha família, pelo suporte e paciência nos momentos difíceis.

Ao Prof. Dr. Rogers Demonti pela orientação e dedicação.

Aos meus amigos, pelos momentos de alegria e incentivo, sempre me motivando para que essa etapa fosse concluída.

RESUMO

O uso de fontes renováveis cresce a cada ano como alternativa de solução ambiental viável para geração distribuída em diversos países do mundo. Porém, como se trata de geração de energia a partir de recursos naturais, como energia fotovoltaica e eólica, esse tipo de geração pode ser classificado como intermitente. Sua utilização, muitas vezes, pode gerar problemas quando se trata de fornecimento ininterrupto de energia para as cargas conectadas ao sistema, pois, na falta de luz solar e/ou vento por exemplo, esses sistemas não são suficientes para atender a demanda. Para isso, sistemas de acumulação podem ser inseridos com o objetivo de fornecimento de energia para as cargas como forma de auxílio a esse sistema, além de serem utilizados para redução de energia na utilização da energia em horários de pico de demanda, onde o preço da energia fica mais cara. O objetivo principal desse trabalho é apresentar um estudo de sistema híbrido conectado à rede elétrica convencional, com sistema de armazenamento por baterias chumbo-ácido com sistema de controle e monitoramento remoto. Foi criado um sistema teste utilizando painéis fotovoltaicos conectados ao sistema de acumulação do inversor, atendendo uma carga prioritária. Foram realizados testes que permitiram o entendimento desse sistema como um todo. Durante a realização dos testes, foi possível monitorar e controlar o sistema remotamente e em tempo real. Foi possível avaliar o funcionamento do inversor, controlando a carga e descarga do banco de baterias. Como resultado, foi entendido o funcionamento do inversor e da curva de carga das baterias, além de afirmar que o sistema híbrido estava operando corretamente.

Palavras-chave: Sistema de acumulação de energia; Bateria chumbo-ácido; Sistema híbrido; Sistema de controle e monitoramento remoto; MATE3; Optics RE.

ABSTRACT

The use of renewable sources grows every year as a viable environment-friendly solution for distributed generation in many countries around the world. However, in respect of energy generation from natural resources, such as photovoltaic and wind power, this type of generation can be classified as intermittent. Its use can often cause problems when it comes to providing uninterrupted energy to the loads connected to the system, because in the absence of sunlight and/or wind, for example, these sources are not enough to supply the demand. For this purpose, accumulation systems can be adopted to facilitate the supply of energy for the loads as an addition to the system, besides being used for reducing consumption during peaks of demand, where the price of the energy increases. The main objective of this work is to present a study of hybrid systems connected to the conventional electrical network, with a storage system of lead acid batteries with remote control and monitoring system. It was created a test system utilizing photovoltaic energy with an energy storage system connected to the inverter, with a priority load. Tests were realized and allowed the understanding of the system as a whole. During the tests, it was possible to monitor and control the system remotely in real time. It was possible to evaluate the operation of the inverter by controlling charge and discharge of the battery bank. As a result, the operation of the inverter and the battery charge curve was understood, besides stating that the hybrid system was operating correctly.

Key words: Energy Storage Systems; Lead acid batteries; Hybrid system; Remote control and monitoring system; MATE3; Optics RE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema SFCR.....	17
Figura 2 - Sistema SFI	18
Figura 3 - Exemplo de Sistema Híbrido.....	20
Figura 4 – Estratégia de controle PWM para conversor CC-CA.....	22
Figura 5 – Célula da Bateria NaS.....	28
Figura 6 – Conceito de nivelamento de carga por ESS.....	32
Figura 7 – Conceito de arbitragem de energia por ESS	33
Figura 8 – Conceito de regulação de frequência por ESS.....	34
Figura 9 – Esquema de uma célula fotovoltaica.....	35
Figura 10 – Curva característica I-V de um painel fotovoltaico.....	36
Figura 11 – Curva característica I-V com influência de radiação solar	37
Figura 12 – Curva característica de associação em série	38
Figura 13 – Curva característica de associação em paralelo	38
Figura 14 – Curva característica P-V	39
Figura 15 – Inversor Outback conectado ao sistema do Laboratório.....	42
Figura 16 – Diagrama de conexões CA do inversor GTFX2524LA	43
Figura 17 – Curvas de descarga para corrente constante bateria Freedom DF4001 ..	44
Figura 18 – Configuração de conexão do banco de baterias	44
Figura 19 - Curva de carga e descarga da bateria	45
Figura 20 – Estrutura dos painéis fotovoltaicos utilizados	46
Figura 21 – Curva característica do módulo fotovoltaico conectado ao Laboratório....	47
Figura 22 – Curva de potência do módulo fotovoltaico conectado ao Laboratório.....	47
Figura 23 – Esquema de ligação remota.....	48
Figura 24 – Display do dispositivo MATE3.....	49
Figura 25 – Interface do Optics RE	50
Figura 26 – Conexão do MATE3 à rede de Internet.....	51

Figura 27 – Esquema de ligação do sistema para teste	52
Figura 28 – Tensão nas baterias.....	55
Figura 29 – Corrente para carregamento das baterias.....	56
Figura 30 – Gráfico da tensão nas baterias com média móvel.....	57
Figura 31 – Tensão nas baterias com fontes externas.....	58
Figura 32 – Gráfico de tensão e corrente do sistema.....	59
Figura 33 – Sistema vendendo energia para a rede visto pelo Optics RE.....	60
Figura 34 – Gráfico de tensão e corrente com carga teste.....	61
Figura 35 – Fluxo de potência para a carga visto pelo Optics RE	61
Figura 36 – Tensões CA e CC com interrupção de energia da rede	62
Figura 37 – Curva da tensão CA na carga antes da interrupção da rede	63
Figura 38 – Curva da tensão CA na carga após a interrupção da rede.....	63
Figura 39 – Sistema sem a rede elétrica pelo Optics RE	64
Figura 40 – Tensão da bateria e correntes com interrupção da rede	64
Figura 41 – Gráfico da tensão e corrente das baterias para a carga.....	65
Figura 42 – Sistema operando em modo isolado	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados técnicos de tecnologias de baterias comerciais.....	24
Tabela 2 – Descrição dos dados do sistema.....	53
Tabela 3 – Parâmetros do sistema de monitoramento	54
Tabela 4 – Parâmetros de carregamento das baterias.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CA – Corrente Alternada

CAES – Sistema de armazenamento de ar comprimido (*Compressed air energy storage*)

CC – Corrente Contínua

EPE – Empresa de Pesquisa de Energia

ESS – Sistema de armazenamento de energia (*Energy Storage Systems*)

NBR – Norma Brasileira

NR – Norma Regulamentadora

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

PWM – Modulação de largura de pulso (*Pulse Width Modulation*)

RMS – Valor eficaz (*Root Mean Square*)

SFCR – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

SFI – Sistema Fotovoltaico Isolado

SMES – Sistema de armazenamento magnético supercondutor

UFPR – Universidade Federal do Paraná

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos Específicos	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	16
2.1.1	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede	16
2.1.2	Sistema Fotovoltaico Isolado	18
2.1.3	Sistema híbrido	19
2.2	COMPONENTES DO SISTEMA HÍBRIDO	21
2.2.1	Inversor	21
2.2.2	Baterias	23
2.3	TIPOS DE BATERIAS	24
2.3.1	Baterias chumbo-ácido	25
2.3.2	Baterias Li-Íon	26
2.3.3	Baterias NiCd e NiMH	27
2.3.4	Baterias NaS	28
2.3.5	Outros sistemas de Armazenamento	29
2.4	APLICAÇÕES DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	31
2.5	EFEITO FOTOVOLTAICO	34
2.6	NORMAS DE SEGURANÇA DE ENERGIA ELÉTRICA	40
3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	MATERIAIS	41
3.1.1	Inversor	41
3.1.2	Bateria	43
3.1.3	Painéis Fotovoltaicos	46
3.1.4	Sistema de controle e monitoramento	48
3.1.5	Fontes de alimentação	50

3.1.6	Carga prioritária.....	50
3.2	MÉTODOS	51
3.2.1	Conexão do MATE3 ao Optics RE	51
3.2.2	Sistema conectado ao Laboratório de Eficiência Energética para realização dos testes	52
3.2.3	Descrição dos dados do sistema	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1	PROCEDIMENTOS E ANÁLISES DO TESTE 1.....	54
4.2	PROCEDIMENTOS E ANÁLISES DO TESTE 2.....	56
4.3	PROCEDIMENTOS E ANÁLISES DO TESTE 3.....	58
4.4	PROCEDIMENTOS E ANÁLISES DO TESTE 4.....	60
4.5	PROCEDIMENTOS E ANÁLISES DO TESTE 5.....	62
4.6	PROCEDIMENTOS E ANÁLISES DO TESTE 6.....	65
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	67
5.1	CONCLUSÃO.....	67
5.2	TRABALHOS FUTUROS	68
6	REFERÊNCIAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia produzida a partir de fontes fotovoltaicas está em expansão e cada vez mais ocupa uma parcela maior na matriz energética mundial. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), sistemas de geração fotovoltaica devem atingir 10% da matriz energética do Brasil até 2030. Além da geração fotovoltaica, os sistemas de geração distribuída contam com geração eólica e sistema de armazenamento de energia no auxílio da demanda. Atualmente, a capacidade de geração fotovoltaica conta com 0,93% da potência instalada, e a geração eólica, com 8,48% (ANEEL, 2018).

Os sistemas de acumulação de energia, ou também conhecidos por ESS, possuem diversas aplicabilidades no setor elétrico. Uma delas é a utilização dessa tecnologia para aumentar a confiabilidade do sistema quando se tem fontes de energia renovável conectadas a ele, uma vez que o banco de baterias auxilia no balanço da intermitência geralmente ocasionada por esse tipo de geração.

O projeto de sistema de armazenamento aplicado à Usina Hidrelétrica de Bariri, da AES Tietê, apresentou a utilização da tecnologia de baterias de lítio com capacidade de estoque de 161,4 kW, conectado ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Esse sistema teve como objetivo a realização de testes para entender a funcionalidade desse tipo de sistema quando se trata de suporte à rede em horários de pico, auxiliando no atendimento da demanda e, dessa forma, reduzindo o custo da tarifa de energia.

O projeto desenvolvido neste trabalho propõe a instalação de um sistema de controle e monitoramento remoto, onde o usuário controla os parâmetros do inversor e do carregamento do banco de baterias independente do local, além de que traz conhecimento do funcionamento de um sistema híbrido e das curvas de carga e descarga do sistema de armazenamento com baterias chumbo-ácido.

1.1 JUSTIFICATIVA

O sistema de acumulação de energia está conectado ao Bloco de Engenharia Elétrica da UFPR em uma micro rede que está sendo implementada com base em um

projeto junto com a concessionária da Copel, e foi instalado com o objetivo de ser carregado pela rede elétrica da concessionária e, desde então, não se tem uma funcionalidade maior para esse sistema. O intuito desse trabalho é propor e analisar algumas alternativas de funcionamento para o sistema de acumulação e para o inversor conectado a ele, tornando o sistema instalado em um sistema híbrido com fontes alternativas de energia, com controle e monitoramento remoto.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é estudar o sistema híbrido instalado ao Laboratório de Eficiência Energética do Departamento de Engenharia Elétrica (DELT), de forma que seja possível a compreensão do seu funcionamento, bem como o funcionamento do inversor e do banco de baterias conectados a ele. Foi utilizado um sistema de comunicação remota para que o dispositivo de controle e monitoramento fosse operado pelo usuário sem a necessidade de o mesmo estar no local do sistema híbrido. Para a realização dos testes com o sistema, foi desenvolvido um barramento CC que conta com painéis fotovoltaicos e fonte de corrente para auxiliar na potência fornecida. Ao todo, o sistema implementado conta com: sistema de geração fotovoltaica, fonte de corrente, sistema de armazenamento, inversor, carga prioritária teste, dispositivo de controle e monitoramento e interface *web* para monitoramento e controle remoto.

Atualmente o sistema opera conectado à rede, porém sem fonte de energia para carregamento do banco. Este banco, portanto, é mantido carregado pela própria rede. Além disso, nenhuma carga foi conectada à saída do sistema, ou seja, o sistema não é utilizado para alimentação de qualquer carga crítica.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Conhecer e detalhar o sistema de acumulação de energia em pequena escala interligado à rede;
- b) Conectar o dispositivo de monitoramento MATE3 à rede de internet;
- c) Controlar o inversor remotamente;
- d) Fazer a análise das curvas de carga e descarga do banco de baterias;
- e) Conectar uma fonte de energia externa às baterias e conectar uma carga ao sistema;
- f) Fazer a análise do fluxo de energia do sistema;
- g) Monitorar o sistema via OpticsRE.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A energia gerada ou fornecida pela rede elétrica pode ser gerada através de um conjunto de equipamentos que, por sua vez, devem estar conectados de forma que possam ser suficientes para suprir a demanda dos equipamentos conectados a esse sistema.

Existem diversos tipos de sistemas de geração distribuída, tais como sistema isolado (SFI), conectado à rede elétrica da concessionária (SFCR) ou à uma fonte de geração, seja ela fotovoltaica, eólica e por geradores elétricos como fonte de alimentação das baterias, atuando como um sistema híbrido. A seguir será detalhado cada um dos sistemas, porém o foco do trabalho será no sistema híbrido.

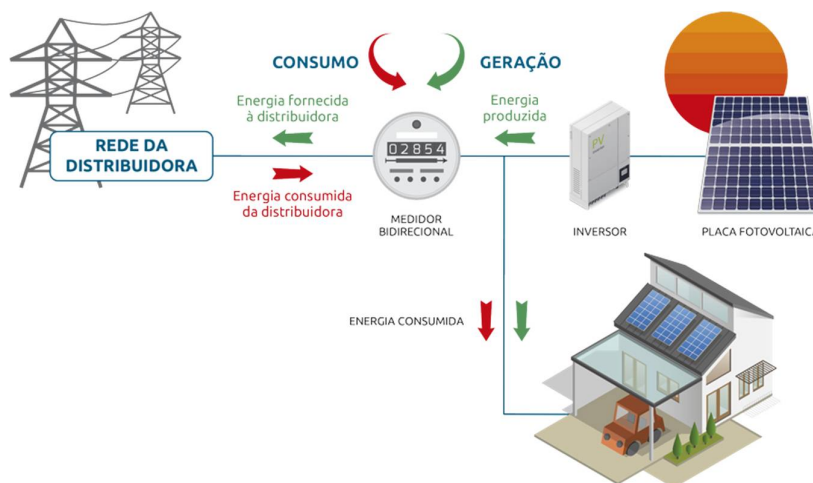
2.1.1 Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

Um sistema de energia SFCR pode ser definido como um arranjo conectado à rede elétrica da concessionária. A energia consumida pelas cargas pode ser entregue tanto da geração distribuída conectada a esse sistema quanto da própria rede elétrica, sendo também possível vender a energia excedente para a concessionária. Para isso, é necessário o uso de um inversor que atenda às especificações de qualidade e segurança do sistema conectado a ele, tendo em vista a não degradação do sistema de geração distribuída (PINHO, 2014).

De acordo com a referência normativa ABNT NBR 11704 (2008), um sistema conectado à rede elétrica possui a característica de não ter sistema de acumulação de energia. A tensão de saída do sistema é alternada para a alimentação das cargas dos consumidores, por esse motivo é necessário o uso de inversor para fazer a conversão da energia produzida pelos módulos fotovoltaicos e posteriormente utilizá-la para alimentação dos equipamentos conectados a ele.

A energia gerada pelos módulos fotovoltaicos é distribuída pelas cargas conectadas ao sistema e a energia excedente é injetada novamente na rede (VILLALVA, 2010). A conexão desse sistema pode ser visualizada na Figura 1.

Figura 1 - Sistema SFCR



(Fonte: INOVACARE SOLAR, 2018)

O uso de inversores conectados à rede possui a vantagem de ser mais barato quando comparado aos outros tipos de sistemas. Isso se dá pelo fato de que o custo do banco de baterias é elevado, e neste tipo de sistema o seu uso não é necessário (BERNO, 2017).

O conceito de micro e mini geração distribuída foi abordado pela resolução normativa da ANEEL (2012), com complementação da resolução de 2016, com o objetivo de regulamentar os sistemas de fontes de energia renováveis conectados à rede elétrica da distribuidora. A micro geração distribuída possui valores de potência nominais de até 75 kW, e a mini geração distribuída fica entre 75 kW e 5 MW de potência instalada. Além disso, a resolução também aborda o uso de inversores com proteção anti-ilhamento, ou seja, uma vez que o sistema esteja conectado à rede e ocorrer alguma falha na mesma, o inversor deverá desconectar todo o sistema automaticamente.

Esse tipo de sistema pode ter aplicações residenciais, comerciais e industriais, além de que a produção de energia pode ser devolvida para a rede elétrica uma vez

que as cargas conectadas ao sistema não estão exigindo nenhuma demanda (ABNT NBR 11704, 2008).

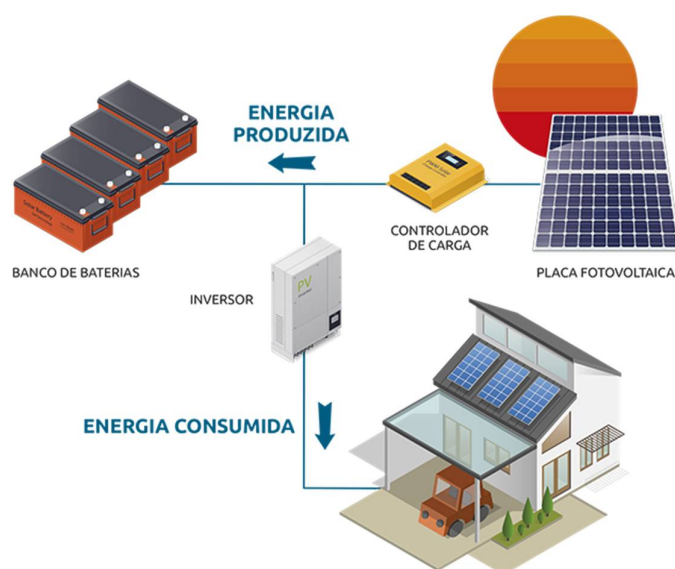
2.1.2 Sistema Fotovoltaico Isolado

Em um sistema isolado, ou também chamado de sistema SFI, a fonte de carga das baterias não se dá pela rede elétrica da concessionária, e sim por fontes alternativas de energia. Esse sistema pode ser classificado como geração distribuída, onde são instalados geradores de energia próximos aos seus centros de consumo e que são capazes de prover a demanda de seus consumidores.

Os sistemas SFI são comumente utilizados em situações onde as residências ou empresas queiram ser autossuficientes em relação ao fornecimento de energia elétrica ou em áreas remotas, nas quais a infraestrutura e serviços por parte da concessionária de energia são precários (RETORTA, 2017).

Os principais componentes desse sistema são banco de baterias, inversores, controlador de carga e uma fonte de energia renovável. Essas conexões e a utilização de placas fotovoltaicas como geração para esse sistema podem ser verificadas na Figura 2.

Figura 2 - Sistema SFI



(Fonte: INOVACARE SOLAR, 2018)

Para cargas onde a alimentação é fornecida em corrente contínua e com a mesma tensão do controlador de carga, não é necessário o uso de inversores, uma vez que o objetivo de sua utilização é transformar a corrente contínua em corrente alternada. Entretanto, se a energia gerada for distribuída para cargas usuais de corrente alternada em residências, por exemplo, é importante o uso do inversor para essa finalidade, além de adequar a frequência para o padrão local (BERNO, 2017).

2.1.3 Sistema híbrido

Sistemas híbridos geralmente operam com mais de uma fonte de energia, sendo ela renovável ou não, com o objetivo de suprir a demanda com uma alta qualidade. O objetivo da coordenação do uso de diferentes fontes de energia se dá pelo fato de que é mais fácil de suprir a necessidade das cargas do sistema de forma que este opere com o mínimo de interrupções.

Algumas dessas fontes de energia podem ser caracterizadas como módulos fotovoltaicos, grupo aerogerador e grupo gerador à diesel. A otimização de operação do sistema necessita de algum tipo de controle que seja capaz de integrar os vários meios de geração de energia, uma vez que a complexidade do sistema conectado aumenta.

Além de aumentar a confiabilidade de geração, os sistemas híbridos também auxiliam no quesito de continuidade de fornecimento de energia. Uma vez que as cargas estão conectadas nesse sistema, não tem necessidade de preocupação em relação à falta de energia, pois a entrega pode ser realizada pelas fontes de energia renováveis ou pela energia armazenada pelo banco de baterias (PINHO, 2014).

De acordo com a norma técnica NBR 11704 (2008), um sistema híbrido pode ser tanto conectado à rede elétrica quanto a um sistema isolado. No caso de um sistema isolado, a tensão de saída do inversor pode ser tanto em corrente alternada como contínua. Já no sistema híbrido conectado à rede, essa saída nominal deve ser necessariamente de corrente alternada para o fornecimento das cargas. Geralmente, esse tipo de sistema apresenta banco de baterias como acumuladores de energia, portanto serve como uma fonte de energia ininterrupta.

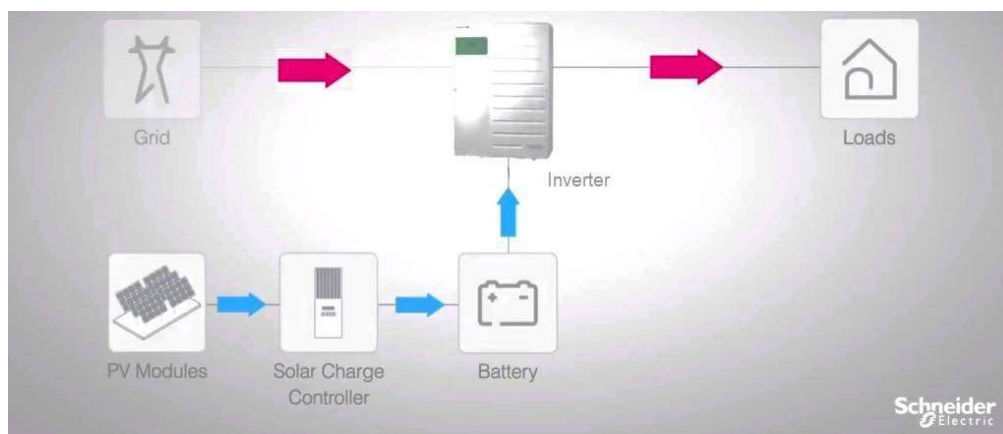
Para a atuação em modo de operação isolado, é necessário o uso de um sistema de armazenamento para que as cargas sejam alimentadas de modo eficiente, uma vez que as fontes de energia renováveis não estão disponíveis todo o tempo. Já para os sistemas interligados, a energia gerada pelas fontes de energia renováveis pode ser entregue novamente à rede, complementando a geração da rede de distribuição.

Essa conexão tem como vantagem as diversas possibilidades de intercâmbio de energia entre o ponto de geração e o consumidor final.

Para a interligação adequada, é necessário o uso de equipamentos que tenham como função a proteção, inversão e sincronismo entre as fontes de tensão em relação aos níveis de tensão e frequência, de forma que a qualidade da energia elétrica seja satisfatória em operação normal e em situações de contingência (PINHO, 2008).

Em geral, o atendimento da demanda residencial se dá em corrente alternada (CA), ou seja, é necessário o uso de um inversor para fazer essa conversão de energia. Os inversores híbridos conectam-se na rede elétrica pela parte CA, aos bancos de baterias e fontes de energia renováveis pela parte CC, e ainda tem a possibilidade de conexão de um grupo moto-gerador com uma entrada auxiliar, como é o caso do sistema estudado neste trabalho. A conexão e os fluxos de energia desse tipo de sistema podem ser verificados na Figura 3.

Figura 3 - Exemplo de Sistema Híbrido



(Fonte: Adaptado – Schneider Electric, 2018)

Como se trata de uma solução versátil, ela pode ser utilizada de diversas maneiras, entre elas correção do fator de potência, ajuste de frequência, regularização de fontes intermitentes, alívios de curva de carga e como um sistema de nobreak, sendo como um back-up de energia para as cargas de maior prioridade.

No presente trabalho, o sistema conectado ao laboratório é considerado híbrido pelo fato de que o inversor é conectado ao sistema de baterias e energia fotovoltaica, juntamente com a rede elétrica para auxílio na demanda das cargas do sistema, e ainda tem a possibilidade de conectar um grupo moto-gerador, finalizando a conexão de um sistema híbrido completo. O carregamento do banco de baterias pode ser feito através da rede elétrica tanto quanto vinda da geração dos painéis fotovoltaicos conectados a ele.

2.2 COMPONENTES DO SISTEMA HÍBRIDO

O sistema de armazenamento de energia é composto por alguns equipamentos, cada um com a sua importância no momento da operação. Como visto anteriormente, a utilização de um sistema de acumulação de energia depende das conexões necessárias para que o seu sistema opere da melhor maneira possível, seja conectado à rede ou isolado.

A seguir serão descritos cada um dos componentes do sistema para que se tenha uma maior compreensão do assunto.

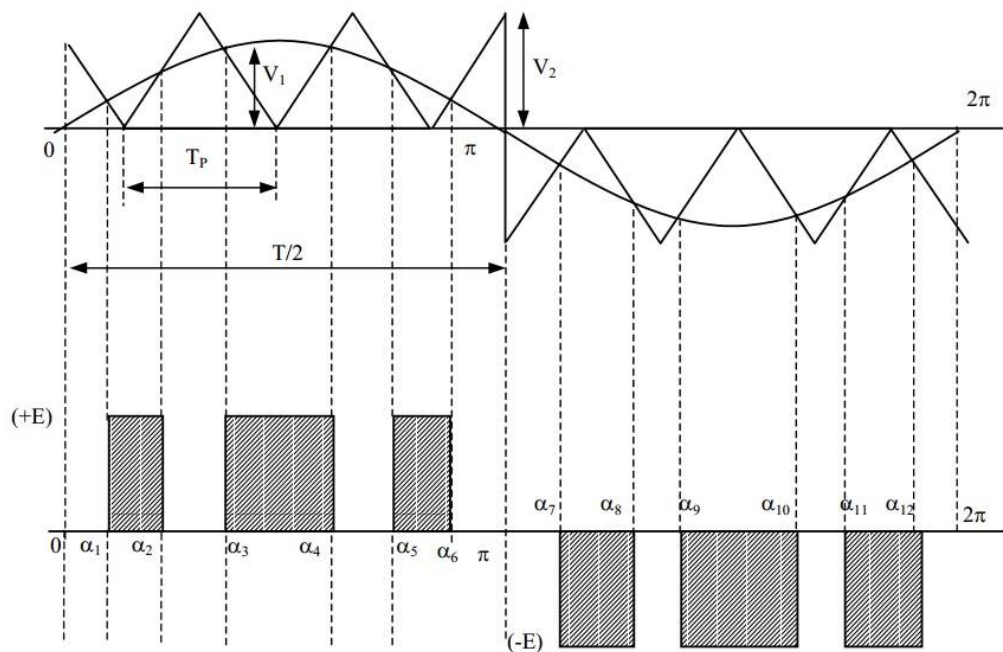
2.2.1 Inversor

Os inversores têm como função a conversão de energia de corrente contínua em corrente alternada, além de ajustarem os valores de tensão e frequência de acordo com os parâmetros impostos pela rede elétrica da concessionária (RUTTER, 2004). Geralmente os valores de corrente DC dos inversores vêm dos terminais da bateria e dos painéis fotovoltaicos, necessitando dessa conversão para que as cargas residenciais conectadas ao sistema sejam alimentadas.

A grande maioria dos inversores utilizados no mercado partem do princípio da conversão CC-CA por PWM (*Pulse-Width Modulation*). PWM é um recurso onde faz o

ajuste da largura do pulso de uma forma de onda, e essa modulação aumenta ou diminui de acordo com o ciclo de trabalho. Para ter-se redução significativa nos níveis de conteúdo harmônico a tensão deve ser gerada por uma modulação senoidal, ou seja, sua frequência fundamental é definida por uma senoide (UNESP, 2002). O ajuste do pulso se dá pela comparação da forma de onda com uma segunda onda triangular. Esse fenômeno pode ser visualizado na Figura 4.

Figura 4 – Estratégia de controle PWM para conversor CC-CA



(Fonte: UNESP, 2002)

Esse tipo de recurso utilizado pelos inversores apresenta diversas vantagens quando comparado a outros métodos de conversão, como por exemplo, elevada eficiência e boa regulação de tensão de saída. Porém, devido à essas questões, possuem um custo maior devido à complexidade dos circuitos internos ao inversor (PINHO, 2014).

Segundo a ANEEL, os inversores conectados à rede elétrica terão que operar de acordo com as normas de qualidade de energia definidas no PRODIST Módulo 8 (ANEEL, 2012b) quando se trata de fator de potência, distorções harmônicas, frequência e desequilíbrio de tensão. Ainda no PRODIST Módulo 3, uma série de documentação precisa ser anexada ao formulário de solicitação de acesso para

microgeração distribuída, tais como certificados de conformidade de inversores em relação à tensão nominal de conexão, diagramas unifilares de conexão dos inversores incluindo a proteção anti-ilhamento do sistema e também registro de concessão do Inmetro (ANEEL, 2012c).

2.2.2 Baterias

As baterias são amplamente utilizadas em sistemas de armazenamento de energia, ou também chamadas de *Energy Storage Systems* (ESS), onde sua aplicabilidade é útil em sistemas nos quais a geração de energia usufrui de fontes intermitentes, possibilitando a estabilização do fornecimento de energia para as cargas.

A partir desse princípio, o uso de sistemas de acumulação de energia em sistemas híbridos faz com que a energia seja armazenada em momentos em que a produção excede a demanda da carga, para então ser utilizada posteriormente quando a situação contrária é apresentada (PINHO, 2008).

O princípio de funcionamento de uma bateria química envolve um conjunto de células conectadas em série ou paralelo, as quais armazenam a energia elétrica aplicada em energia química por meio do processo de oxidação e redução. Uma célula é composta por dois eletrodos, um positivo e o outro negativo. Quando uma carga é conectada aos terminais da bateria ocorre o processo reverso, então a energia química armazenada é convertida em energia elétrica através de uma corrente contínua (PINHO, 2014).

Para a aplicação em acumulação de energia, as baterias necessitam ser do tipo célula secundária. Segundo Pinho (2014), esse tipo de bateria pode ser recarregável com o auxílio de uma fonte externa de corrente e tensão, fazendo com que seja útil em aplicações onde exija-se um longo período de fornecimento de energia. Um exemplo da utilização de baterias secundárias são as baterias automotivas.

2.3 TIPOS DE BATERIAS

Para o uso em sistemas fotovoltaicos, o tipo de bateria comumente utilizado é a estacionário. As baterias são projetadas para ficar em estado de flutuação durante a maior parte do tempo, e ser utilizada ocasionalmente como *backup* de energia. Suas vantagens envolvem operação com regimes de cargas elevados, resistência moderada ao processo de reciclagem e baixo consumo de água (PINHO, 2008).

Na Tabela 1 são apresentas as características técnicas das baterias recarregáveis comercializadas atualmente no mercado.

A seguir serão apresentadas algumas das tecnologias em estudo sobre o material utilizado atualmente em sistemas de acumulação de energia. Entretanto, o sistema de armazenamento do presente trabalho será focado nas baterias chumbo-ácido, pois é a tecnologia utilizada no banco de baterias instalado no sistema do laboratório.

Tabela 1 – Dados técnicos de tecnologias de baterias comerciais

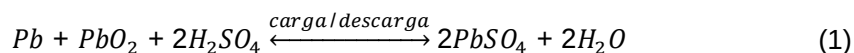
Tecnologia	Eletrólito	Densidade Energética [Wh/kg]	Densidade Energética [Wh/L]	Eficiência [%]	Vida Útil [anos]	Vida cíclica [ciclos]	Temperatura de Operação	
							Carga Padrão [°C]	Descarga [°C]
Chumbo-ácido (Pb-ácido)	H_2SO_4	20-40	50-120	80-90	30-20	250-500	-10 a +40	-15 a +50
Níquel-Cádmio (NiCd)	KOH	30-50	100-150	60-70	3-25	300-700	-20 a +50	-45 a +50
Níquel-hidreto metálico (NiMH)	KOH	40-90	150-320	80-90	2-5	300-600	0 a +45	-20 a +60
Íon de Lítio (Li-Ion)	Polímeros orgânicos	90-150	230-330	90-95	-	500-1000	0 a +40	-20 a +60
Sódio-Enxofre (NaS)	$\beta'' Al_2O_3$	150-240	-	75-90	-	2500	300 a 350	300 a 350

(Fonte: PINHO, 2014; CHEN, 2009)

2.3.1 Baterias chumbo-ácido

As baterias de chumbo-ácido foram inventadas em 1859, e são os dispositivos mais usados em aplicações onde é necessário um menor custo por Wh com uma eficiência plausível quando se trata de sistemas fotovoltaicos e híbridos (CHEN, 2009).

A constituição de uma bateria chumbo-ácido se dá basicamente por um catodo (ou eletrodo positivo) de dióxido de chumbo, um anodo (ou eletrodo negativo) de chumbo esponjoso, imersos em eletrólito de ácido sulfúrico diluído em água fazendo com que a corrente flua através do coletor (ABELHO, 2011). A reação química da célula da bateria durante seu funcionamento é vista na Equação 1.



Quando a bateria está no seu estado de carregamento, o catodo tem um acúmulo de dióxido de chumbo, enquanto o anodo acumula o chumbo esponjoso. O processo libera ácido sulfúrico, aumentando a concentração do eletrólito. No processo reverso, o descarregamento faz com que ambos os eletrólitos acumulem sulfato de chumbo, absorvendo novamente o ácido sulfúrico do eletrólito e, por consequência, diminuindo sua concentração (PINHO, 2008).

Cuidados devem ser tomados na utilização desse tipo de bateria quando se trata de níveis de tensão. Se as baterias ficarem descarregadas por um longo período de tempo, os cristais de sulfato se tornam maiores e mais difíceis de quebrar, ocasionando dificuldades de atingir os níveis de potência máxima da bateria (VAZQUEZ, 2010).

Devido ao seu baixo custo, as baterias de chumbo-ácido prevalecem no mercado, mesmo com a sua densidade energética baixa e seu ciclo de vida limitado. Esse tipo de bateria é implementado em sistemas automotivos, de tração e uso estacionário (PINHO, 2014), como neste caso de sistemas de armazenamento de energia conectado à rede elétrica.

2.3.2 Baterias Li-Íon

As baterias de lítio-íon (Li-Íon) são bastante utilizadas em equipamentos portáteis, tais como laptops, câmeras e celulares. Isso se dá pelo fato de que a densidade energética desse tipo de bateria é relativamente alta, em torno de 90 a 150 Wh/kg (PINHO, 2014), como visto anteriormente. Ou seja, o espaço utilizado para garantir o fornecimento de energia de algum equipamento é menor quando comparado à outras tecnologias.

Essas baterias apresentam tecnologias promissoras quando se trata de aplicações nos sistemas híbridos e veículos elétricos. Alta densidade energética, ausência de “efeito memória”, o qual consiste em capacidade de carga reduzida ocasionado pelo mau uso das baterias, também consegue suportar altas taxas de carregamento e descarregamento, além de baixo tempo de carga e baixa taxa de descarga natural são algumas vantagens ao utilizar esse tipo de bateria (ABELHO, 2011).

Porém, devido à escassez do elemento lítio na natureza, o preço das baterias de lítio-íon pode ser uma desvantagem. Devido ao uso na área de veículos elétricos ter aumentado ao longo dos anos, a quantidade de lítio vem diminuindo. Por consequência, seu preço apresenta um aumento significativo por causa da quantidade limitada da matéria-prima (VAZQUEZ, 2010).

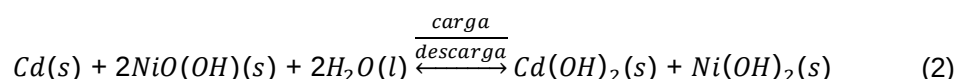
O funcionamento das baterias Li-Íon se dá por um catodo composto de lítio combinado com algum metal de transição, usualmente níquel (Ni), cobalto (Co) ou manganês (Mn), produzindo íons de lítio na descarga. O anodo, por sua vez, recebe e acumula os íons de lítio em seu compartimento, e geralmente é composto pelo elemento de carbono.

Para o manuseio de baterias compostas de lítio, devem ser adotadas medidas de prevenção contra explosão, pois a chance desse material explodir ou incendiar é grande. Contudo, uma estratégia de controle e segurança deve ser tomada, incluindo proteção contra sobrecarga, sobrecorrente, curto-circuito, descarga excessiva e altas temperaturas (PINHO, 2014).

2.3.3 Baterias NiCd e NiMH

As baterias Níquel-Cádmio (NiCd) foram amplamente utilizadas no período de 1970 a 1990, onde eram a principal tecnologia utilizada em aplicações de alta performance. Atualmente, a química utilizada nesse tipo de bateria foi substituída por baterias de lítio e hidreto metálico, Li-Íon e NiMH, respectivamente (VAZQUEZ, 2010).

A estrutura das baterias NiCd é parecida com as baterias de chumbo-ácido, porém o catodo é composto de óxido de níquel e o anodo de cádmio metálico. O eletrólito onde as placas estão imersas é composto de uma solução aquosa de hidróxido de Potássio (KOH), com concentração entre 20 e 34%. Pelo KOH ser uma solução básica, esse tipo de bateria é considerado alcalino (PINHO, 2014). Cuidados no manuseio dessas baterias devem ser tomados, pois o composto utilizado é prejudicial tanto ao ser humano, devido ao seu efeito corrosivo, quanto ao meio ambiente, pela contaminação de rios e solo. A reação eletroquímica da célula de NiCd pode ser expressa pela seguinte equação (Equação 2):

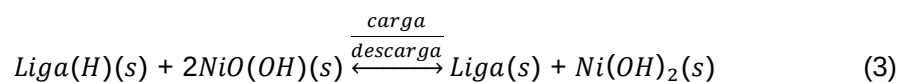


As baterias NiCd possuem algumas vantagens quando comparada às baterias de chumbo ácido, tais quais podem ser submetidas a sobrecargas, não possuem problema com descarregamento total, possuem bom desempenho à baixas temperaturas, tem baixa resistência interna e possuem maior vida útil. No entanto, o custo inicial na obtenção dessas baterias é maior, além de que apresenta materiais tóxicos na composição e alta taxa de autodescarga, fazendo com que seu uso em sistemas fotovoltaicos seja menor (PINHO, 2014).

Devido às desvantagens citadas, a composição Níquel-Cádmio foi substituída por hidreto metálico de Níquel (NiMH), melhorando as taxas de densidade energética, eficiência e substituindo materiais tóxicos por outros que produzem menos impacto ambiental (VAZQUEZ, 2010).

O eletrodo positivo das células NiMH é formado de NiO(OH), ou seja, oxi-hidróxido de Níquel III, e o eletrodo anódico é composto por liga metálica capaz de formar hidretos, tais como Titânio ou Zircônio (PINHO, 2014). O eletrólito utilizado

nessa célula é um composto alcalino de solução KOH, ou seja, hidróxido de Potássio. Seu funcionamento é composto pela seguinte reação química (Equação 3):

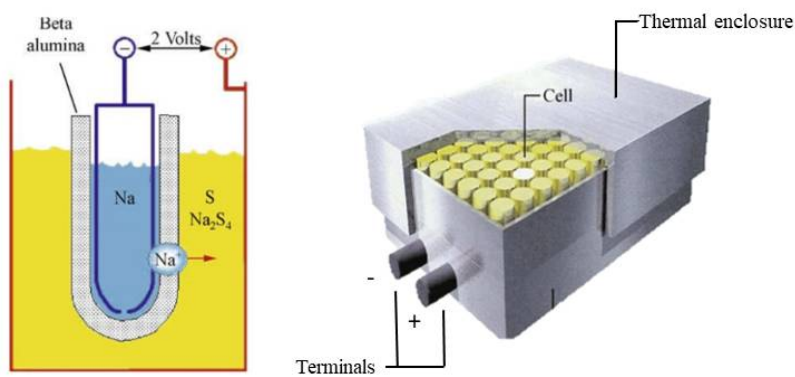


Além disso, as baterias NiMH possuem uma vida cíclica maior, em torno de 600 ciclos, e seu “efeito de memória” é reduzido (VAZQUEZ, 2010). Porém, seu desempenho é afetado quando submetido a carga excessiva, acumulando hidrogênio e corre risco de ocasionar uma ruptura celular. Da mesma maneira, se ocorrer uma descarga excessiva a célula pode ser reversamente polarizada, reduzindo assim a sua capacidade de armazenamento.

2.3.4 Baterias NaS

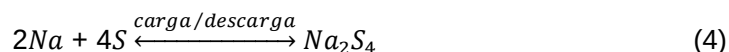
As baterias de sódio-enxofre (NaS) consistem de sódio fundido no eletrodo negativo (anodo) e enxofre fundido na parte positiva de seu eletrodo (catodo). Seus eletrodos são imersos em um eletrólito cerâmico de beta-alumina sólido. Durante o período de descarga, os íons de sódio (Na) passam pelo eletrólito e combinam-se com os átomos de enxofre, formando polissulfetos de sódio. Enquanto isso, os elétrons fluem pelo circuito externo, produzindo corrente. As células de NaS podem ser visualizadas na Figura 5.

Figura 5 – Célula da Bateria NaS



(Fonte: Adaptada CHEN, 2009)

As baterias NaS possuem uma alta densidade energética, em torno de 150-240 Wh/kg, além de terem uma vida cíclica em torno de 2500 ciclos e eficiência de 75 a 90%, conforme visto na Tabela 1. Para que essa operação seja realizada, a temperatura de operação desse tipo de bateria deve ficar em torno de 300-350°C (DIVYA, 2009). Essa reação química pode ser resumida pela seguinte equação (Equação 4):



Segundo Chen (2009), essas características permitem que o uso dessas baterias seja economicamente viável nos sistemas de qualidade de energia e, também, em aplicações onde se deseja o uso da energia armazenada em momentos de pico de demanda da concessionária para a redução da conta de energia (*peak-shaving*).

As vantagens da utilização dessa bateria incluem que são feitas de materiais de baixo custo, uma vez que são elementos abundantes no mercado, sendo economicamente viáveis quando se trata de produção de energia em massa (VAZQUEZ, 2010). Podem ser usadas em sistemas de fornecimento de energia para cargas emergenciais, sendo de grande importância para indústrias e sistemas de geração eólica. Em contrapartida, o seu uso se torna de difícil aplicabilidade devido à alta temperatura de operação.

2.3.5 Outros sistemas de Armazenamento

Apesar da tecnologia mais aplicada em sistemas fotovoltaicos ser a bateria eletroquímica, tanto em sistemas isolados como híbridos, outros tipos de armazenamento também são utilizados, tais como supercapacitores na forma de campo elétrico, indutores com supercondutores na forma de campo magnético, volantes de inércia, ar comprimido e bombeamento de água em energia mecânica, e também células combustíveis como sistema de armazenamento de hidrogênio.

O sistema de armazenamento utilizando ar comprimido (CAES) converte energia elétrica em ar comprimido e a armazena mecanicamente, para ser usada

posteriormente em outros horários de demanda. Basicamente, a energia elétrica é extraída através de uma turbina a gás, fazendo com que a fase de compressão do ar seja substituída pelo sistema de armazenamento de ar comprimido, eliminando o uso de combustíveis para esse efeito, como o uso de gás natural (VAZQUEZ, 2010). Esse tipo de tecnologia pode reduzir o consumo de combustíveis em 40% produzindo a mesma quantidade de energia (ABELHO, 2011). Bem como sistemas de bombeamento de água, o CAES não é considerado de grande utilização quando se trata de sistemas de pequena escala, pois devido ao seu grande porte de instalação, seus custos podem vir a ser inviáveis para esse tipo de aplicação (PINHO, 2014). Contudo, para projetos de larga escala esse sistema é de grande valia.

Supercapacitores e indutores com supercondutores apresentam baixas taxas de perda de energia, ou seja, possuem uma eficiência alta. O funcionamento de um sistema de armazenamento magnético supercondutor (SMES) se dá basicamente pelo uso de um indutor feito de um material supercondutor, o qual é caminho para passagem de corrente elétrica de forma espiral, fazendo com que a energia magnética produzida por esse efeito seja armazenada. Já o funcionamento de armazenamento de energia por supercapacitor parte do mesmo princípio de um capacitor convencional. Porém, ao invés de serem duas placas de metal separadas por um dielétrico, essas placas são separadas por uma solução de eletrólito (CHEN, 2009). Esses tipos de tecnologia de armazenamento elétrico e magnético possuem alta potência, apesar de serem pouco utilizadas e, por isso, possuem elevados custos (PINHO, 2014).

Os volantes de inércia, comumente chamados de *flywheels*, consistem no princípio de armazenamento de energia elétrica em energia mecânica, aplicando força de rotação em uma massa, neste caso o volante. Este, por sua vez, é imerso em um compartimento com vácuo, para que se tenha baixa perda mecânica pelo atrito (PINHO, 2014). Suas vantagens incluem vida longa, baixa necessidade de manutenção, elevada eficiência e densidade de potência, porém possuem baixa densidade energética além de apresentarem altos custos de instalação e manutenção (ABELHO, 2011).

Os sistemas de armazenamento de hidrogênio funcionam em conjunto com uma célula de combustível, ou também conhecida como *fuel cell*. Hidrogênio e oxigênio são utilizados em uma reação eletroquímica para gerar eletricidade e água (CHEN, 2009). Esse tipo de tecnologia apresenta diversos pontos positivos quando se trata de ser um método ambientalmente correto de produção de energia e vida útil.

Apesar desses fatores, o custo de implantação ainda é um empecilho, além de custos de operação e manutenção serem elevados (PINHO, 2014).

2.4 APLICAÇÕES DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

As principais aplicações dos sistemas de armazenamento de energia são as utilizações em soluções de estabilidade do sistema. Com o crescimento de fontes de energias renováveis, a necessidade de manter a estabilidade e qualidade da rede elétrica está cada vez maior. Isso ocorre, pois, essas fontes causam efeitos na rede que devem ser controlados, tal como manter a potência constante. Para isso, o uso do devido sistema de armazenamento auxilia no nivelamento da curva de carga, bem como no controle de frequência e flutuação de tensão (ABELHO, 2011).

Apesar das fontes de energia renovável serem fontes de energia limpa e ambientalmente corretas, ainda existem problemas de variação de tensão e frequência por serem geradas a partir de energias intermitentes. Devido à essa questão, muitas vezes o sistema implantando necessita de fontes de geração que utilizam combustíveis fósseis para mitigar o problema, dado que essa variação nos níveis de tensão é causada pelo fato de que a energia gerada depende de fatores externos, causando muitas vezes desequilíbrio entre geração e demanda (VAZQUEZ, 2010).

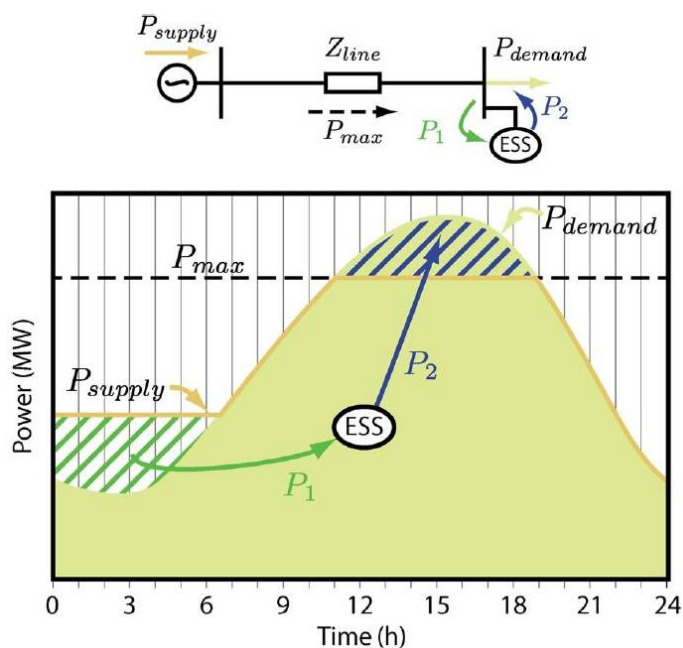
De acordo com Vazquez (2010), fontes de energia renovável necessitam de outras fontes de energia convencionais como suporte de atendimento à demanda, de forma que esse sistema conectado seja confiável. Estudos apontam que cerca de 10% da energia gerada por turbinas eólicas necessitam que 2 a 4% da capacidade eólica instalada seja fornecida por sistema de energia estável. O uso de sistemas de armazenamento auxilia na mitigação desse problema. Para que seja utilizado para esse objetivo, o sistema de armazenamento deve ter um longo ciclo de vida e sistema de armazenamento reversíveis.

Um exemplo de armazenamento que alcança os objetivos é o CAES em alternativa às baterias eletroquímicas, pois estas apresentam altas taxas de envelhecimento e são de difícil reciclagem (ABELHO, 2011).

Outra aplicação possível para sistemas de armazenamento é no auxílio de fornecimento de energia para as cargas. Esse fenômeno é explicado pelo armazenamento de energia durante períodos de pouca demanda para ser utilizado posteriormente, quando se tem picos de demanda. Essa aplicação evita a

necessidade de aumentar a infraestrutura do sistema instalado e utilizar eletricidade vinda de sistemas moto-geradores utilizando combustíveis fósseis como forma auxiliar (VAZQUEZ, 2010). Esse conceito pode ser visualizado na Figura 6.

Figura 6 – Conceito de nivelamento de carga por ESS



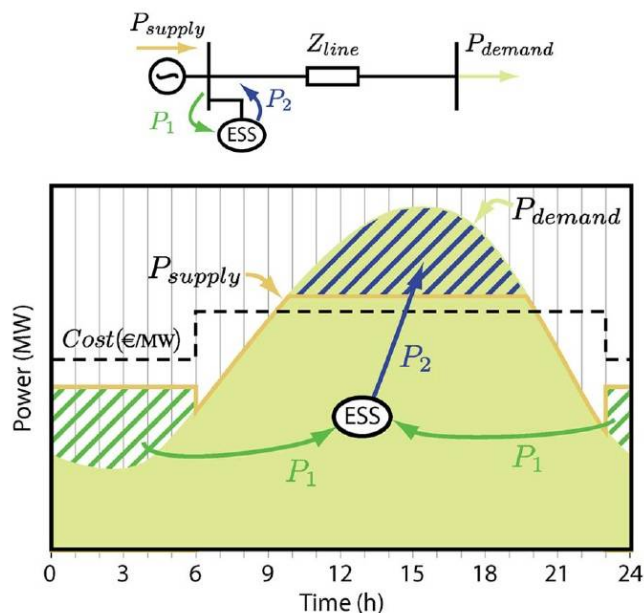
(Fonte: VAZQUEZ, 2010)

A energia armazenada pelo ESS é representada por P_1 , a qual é originada em horários a vazio, e posteriormente utilizada em horários de pico de demanda, representada por P_2 . A potência representada por P_{max} é a máxima potência que pode ser fornecida à carga pelo sistema instalado, evitando gastos com sistemas de transmissão e distribuição de grupos moto-geradores além de redução de consumo de combustíveis fósseis, em caso de sistemas isolados (VAZQUEZ, 2010).

Além do nivelamento de carga, sistemas de armazenamento de energia também são úteis em arbitragem de energia. Nesse caso, o conceito de armazenamento utilizado no nivelamento é o mesmo, ou seja, o ESS armazena a energia vinda da rede elétrica em horários onde a demanda de carga é baixa, contudo o custo da mesma é menor. Porém, ao invés de evitar o uso de grupo moto-geradores, este evita a utilização de energia provida da rede elétrica comercial em horários que o custo de energia é elevado, uma vez que o sistema não é isolado da rede. A vantagem

desse tipo de utilização é que o consumidor diminui o custo da sua tarifa de energia, uma vez que a energia utilizada em horários de pico de demanda será fornecida pelo sistema de armazenamento (VAZQUEZ, 2010). O conceito de arbitragem é visto na Figura 7, e a linha tracejada representa os níveis de custo da energia da rede elétrica.

Figura 7 – Conceito de arbitragem de energia por ESS

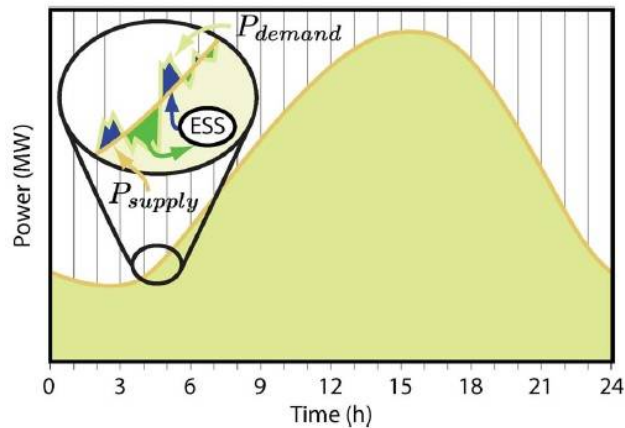


(Fonte: VAZQUEZ, 2010)

Outra aplicação de ESS é baseada no conceito de suporte da estabilização de frequências permanentes e transientes na rede elétrica convencional. Para estabilização de frequências transientes, chamadas de angulares, os sistemas de armazenamento auxiliam na injeção e absorção de potência ativa durante períodos curtos, cerca de 1 a 2 segundos. Esse tipo de aplicação contribui significativamente em sistemas onde é necessário o uso de geradores a diesel (VAZQUEZ, 2010).

Esse tipo de aplicação pode ser visualizada na Figura 8, onde é observado que a sobra de potência nos vales da curva de demanda é utilizada em momentos que existe picos da curva e assim continuamente (ABELHO, 2011).

Figura 8 – Conceito de regulação de frequência por ESS



(Fonte: VAZQUEZ, 2010)

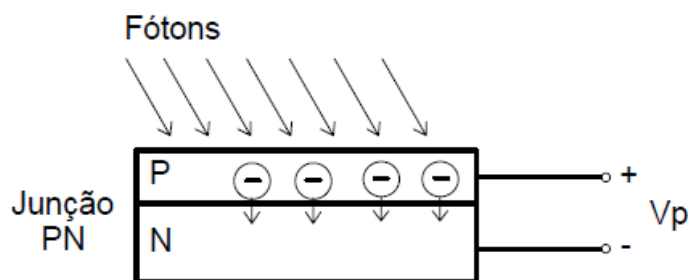
Em sistemas de geração distribuída, os sistemas de armazenamento têm uma gestão de fornecimento integrada, e seu sistema pode ser operado remotamente. O monitoramento pode ser ajustado conforme a carga e descarga das mesmas, uma vez que o sistema de produção de energia elétrica é descentralizado. A geração distribuída envolve sistemas de armazenamento de pequena escala, pois o direcionamento da energia armazenada é diretamente para seu consumidor final. Para essa aplicação, as baterias devem suportar alta demanda nos períodos de verão e atuar no auxílio de fornecimento de energia em paralelo com a rede elétrica, se necessário. Algumas tecnologias que são favoráveis nesse tipo de uso são as baterias de Li-Íon e baterias chumbo-ácido, pois apresentam baixo custo, baixa manutenção e ainda possuem um ciclo de vida longa (ABELHO, 2011).

2.5 EFEITO FOTOVOLTAICO

O principal elemento de um painel fotovoltaico é o conjunto de células fotovoltaicas. Uma célula fotovoltaica se iguala ao funcionamento de um diodo de junção $p-n$, o qual apresenta incidência solar sobre ele. A incidência de raios solares produz um efeito de liberação de portadores de carga, fazendo com que uma corrente flua em seus terminais. Contudo, os portadores de carga se excitam de forma que a absorção de energia do fóton incidente seja suficiente para a mudança de camadas

dos elétrons pelo material semicondutor, geralmente silício (VILLALVA, 2010). O esquema simplificado desse fenômeno é visualizado na Figura 9.

Figura 9 – Esquema de uma célula fotovoltaica

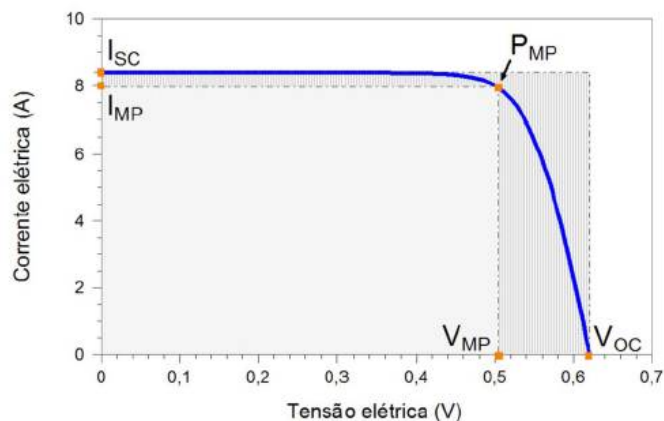


(Fonte: DEMONTI, 1998)

O material semicondutor mais utilizado em sistemas fotovoltaicos é o silício. Isso se dá pois é um material abundante na natureza, fazendo com que seu uso seja mais aplicado no mercado, além de ser um material não tóxico. Existem diversos tipos de silício aplicados nos sistemas fotovoltaicos, tais como silício monocristalino, policristalino e filmes finos. O silício monocristalino é uma solução homogênea e requer alto grau de pureza em sua célula, pois seu coeficiente de absorção de luz é baixo, fazendo com que sua eficiência fique em torno de 15 a 20% quando aplicado comercialmente. O silício policristalino é uma mistura de cristais de silício, apresentando uma alternativa mais barata em relação às células monocristalinas. Apesar dessa vantagem, sua eficiência reduz consideravelmente. Já os filmes finos permitem disposições de várias camadas diferentes de silício, permitindo a incidência de raios solares de diferentes posições. Para a produção desse tipo de célula, é utilizado o silício amorfo (VILLALVA, 2010).

A curva característica I-V de um painel fotovoltaico é não linear e genérica para qualquer tipo de painel. A partir dessa curva são apresentados os dados de tensão de circuito aberto (V_{OC}), corrente de curto circuito (I_{SC}) e o ponto de potência máxima (P_{MP}) e a corrente e tensão máximas (I_{MP} e V_{MP}) produzida pelos painéis, o qual é referente ao ponto ótimo de operação dos mesmos (FERREIRA, 2008). A carga conectada deve ser modelada para que os painéis operem na região de potência máxima. A curva característica e seus parâmetros são visualizados na Figura 10.

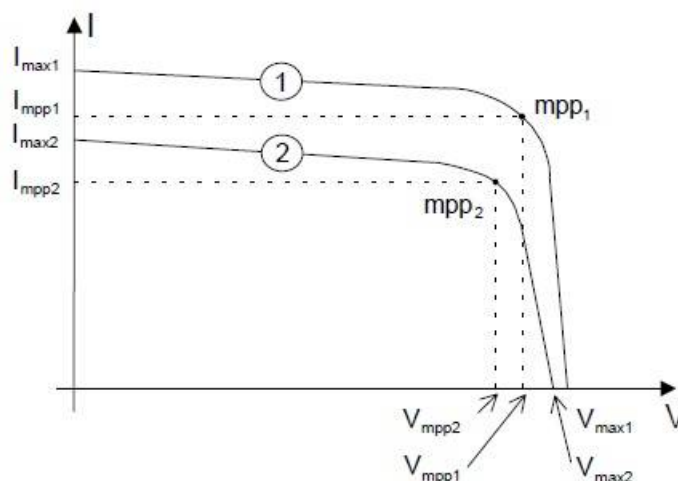
Figura 10 – Curva característica I-V de um painel fotovoltaico



(Fonte: PINHO, 2014)

A curva característica do painel é influenciada por fatores externos, como por exemplo, a incidência de radiação e temperatura sob a célula fotovoltaica. Ou seja, para um valor de radiação solar o módulo fotovoltaico está operando na curva 1 da Figura 11. Se esse valor de radiação diminuir conforme o tempo, tanto por causa do horário do dia quanto por fatores de incidência de nuvens sob o painel, a curva característica diminui seu valor de máxima potência de operação, descrita pela curva 2 (DEMONTI, 1998).

Figura 11 – Curva característica I-V com influência de radiação solar



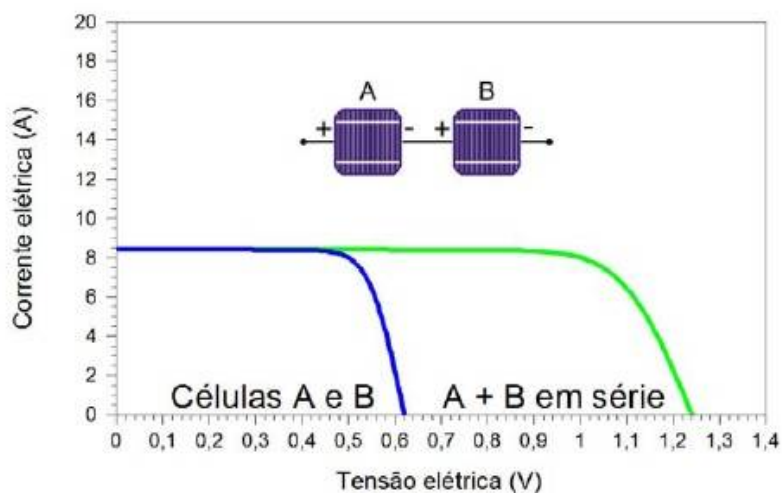
(Fonte: DEMONTI, 1998)

Ainda em relação à variação de radiação, é importante salientar que esses valores variam também com as estações do ano, ou seja, a disponibilidade de energia dos painéis varia dependendo da época em que se encontra (DEMONTI, 1998).

Os módulos fotovoltaicos podem ser arranjados de acordo com os parâmetros de demanda da carga que se pretende conectar, de maneira que se obtenha valores de tensão e/ou corrente desejados. Tendo isso em mente, esses arranjos podem ser tanto em série quanto em paralelo, de forma que se tenha uma única saída de tensão e corrente partindo dos módulos.

Na conexão em série, o terminal positivo de um módulo conecta-se no terminal negativo do outro, e assim por diante. Para esse efeito, as tensões dos módulos são somadas e a corrente permanece inalterada (PINHO, 2014). Na Figura 12, pode ser visualizado o efeito de aumento de tensão ocasionado pela associação em série pela curva característica.

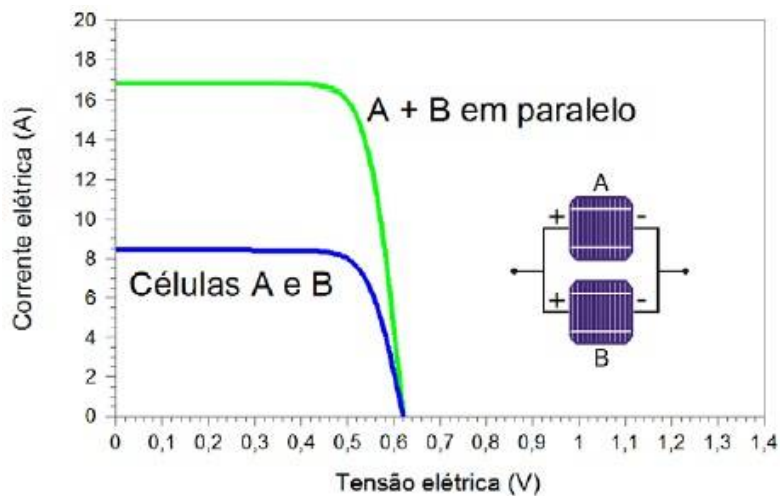
Figura 12 – Curva característica de associação em série



(Fonte: PINHO, 2014)

Já na conexão de painéis em paralelo, os módulos são interconectados em seus terminais positivos e negativos, somando-se as correntes e as tensões permanecem as mesmas em todos os painéis (PINHO, 2014). Esse fenômeno de aumento na corrente pode ser visualizado na Figura 13.

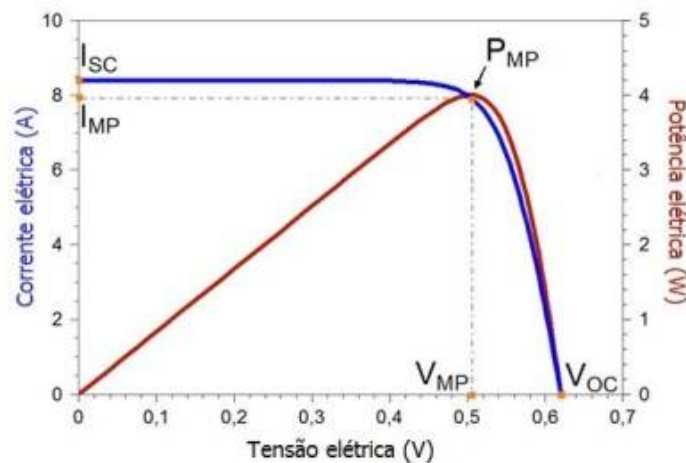
Figura 13 – Curva característica de associação em paralelo



(Fonte: PINHO, 2014)

Além da corrente dos painéis, a curva característica também mostra dados de potência, mostrando a curva característica P-V. Com essa curva, podem-se obter os valores de máxima potência do painel (P_{MP}), sendo que este valor é referente à derivada em relação à tensão igual a zero (PINHO, 2014). Essa curva é caracterizada na seguinte figura em vermelho (Figura 14):

Figura 14 – Curva característica P-V



(Fonte: PINHO, 2014)

Um parâmetro importante a ser considerado na escolha dos painéis utilizados no projeto é a eficiência (η). Esta indica o quanto da energia solar incidente nos módulos é realmente convertida em energia elétrica. É calculada conforme a seguinte equação (Equação 5):

$$\eta = \frac{P_{MP}}{A * G} * 100\% \quad (5)$$

Onde P_{MP} é a ponto de máxima potência dos módulos, A é a área do módulo em m², G é a irradiância solar média em medida em W/m² (PINHO, 2014).

2.6 NORMAS DE SEGURANÇA DE ENERGIA ELÉTRICA

Quando se trata de operação com energia elétrica, é imprescindível atentar-se aos procedimentos de segurança para manuseio de equipamentos energizados. Segundo a NR10 (2004), o uso de dispositivos de seccionamento de energia é obrigatório em qualquer tipo de projeto e equipamento conectado à rede elétrica. Além disso, apesar de sistemas de armazenamento de pequeno porte com baterias serem de baixa tensão, ainda assim é necessário o cuidado com o toque acidental de objetos entre os terminais das baterias, causando grande risco de queimaduras ao operador e, em casos mais extremos, riscos de explosão devido ao curto-circuito.

Outras orientações segundo a ABNT NBR 15389 (2006), que trata de instalação e manutenção de Baterias de Chumbo-ácida estacionária, comentam sobre o local de instalação do banco de baterias, o qual deve ser abrigado do tempo, mas que tenha entrada e saída de ar para evitar o acúmulo de gases originados das reações químicas. É importante salientar que as bitolas dos cabos utilizados para a conexão das baterias sejam do tamanho recomendado pelo fabricante, uma vez que evita-se a ocorrência de incêndio e/ou explosão oriundas da temperatura dos cabos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema em estudo que está conectado ao Laboratório de Eficiência Energética conta com um inversor, um dispositivo de monitoramento e um banco de baterias. As baterias carregam-se pela rede elétrica através do inversor quando atingem a tensão mínima pelo seu descarregamento natural, e o dispositivo de monitoramento serve para salvar as informações de tensão e corrente, além de ajustar os parâmetros do inversor e do carregamento da bateria localmente. Atualmente, não há nenhuma carga ou função para esse sistema conectado, porém serão propostas algumas utilidades para esse sistema através do esquema de ligação abordados neste capítulo e dos testes que serão realizados. Como esse sistema conta com um banco de baterias e também é conectado à rede da concessionária, ele tem características de um sistema híbrido. No entanto, não possui nenhuma fonte de energia externa conectada a ele.

Esse capítulo descreve as especificações dos equipamentos utilizados e também é discutida a metodologia aplicada para a realização dos testes abordados no próximo capítulo, além de propor a conexão de fontes externas ao sistema e conexão de uma carga para ser alimentada isoladamente na falta de energia elétrica da rede da concessionária.

3.1 MATERIAIS

Conforme dito anteriormente, o sistema conta com um inversor Outback, um dispositivo de monitoramento MATE3, e um banco de baterias Freedom configuradas em barramento de 24 V. Serão conectados a um arranjo fotovoltaico e uma fonte de alimentação. Todos os equipamentos serão especificados nos itens a seguir.

3.1.1 Inversor

O inversor utilizado no sistema, fabricado pela empresa Outback Power Technologies, de modelo GTFX2524LA, tem função de conexão com o dispositivo de

monitoramento, tem entrada AC pela rede elétrica da concessionária, saída CC para carga e descarga das baterias, além de saída CA para alimentação de cargas prioritárias. Na Figura 15, pode-se visualizar o inversor conectado ao sistema.

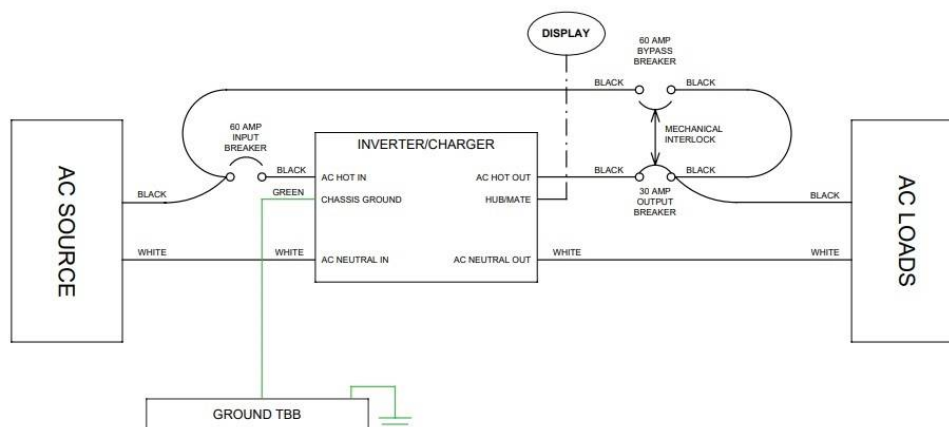
Figura 15 – Inversor Outback conectado ao sistema do Laboratório



(Fonte: A autora)

Opera conectado à rede com tensão CC de entrada de 24 V, e tensão de saída CA de 127 V na frequência de 60 Hz, com potência contínua de 2500 VA em ambiente a 25°C. Sua eficiência fica em torno de 92%, com distorção harmônica típica de 2%. A rede elétrica utiliza as entradas AC HOT IN e AC NEURAL IN do inversor, contando ainda com um disjuntor para proteção do equipamento. O display de monitoramento utiliza a entrada HUB/MATE e a saída CA do inversor utiliza o AC HOT OUT E AC NEUTRAL OUT do inversor. As cargas conectadas à saída desse equipamento têm tensão nominal de 127 V alternada, possibilitando a entrega de energia para um determinado circuito isolado da rede elétrica. Essa conexão é útil para equipamentos ou sistemas de energia que tem que estar energizados ininterruptamente. Possui corrente nominal de saída de 20,8 A na temperatura de 25°C. A corrente eficaz máxima de saída do inversor é de 50 A (100 ms) e a de pico é 70 A (1 ms), de acordo com as especificações do fabricante. As saídas e entradas CA do inversor podem ser visualizadas na Figura 16.

Figura 16 – Diagrama de conexões CA do inversor GTFX2524LA

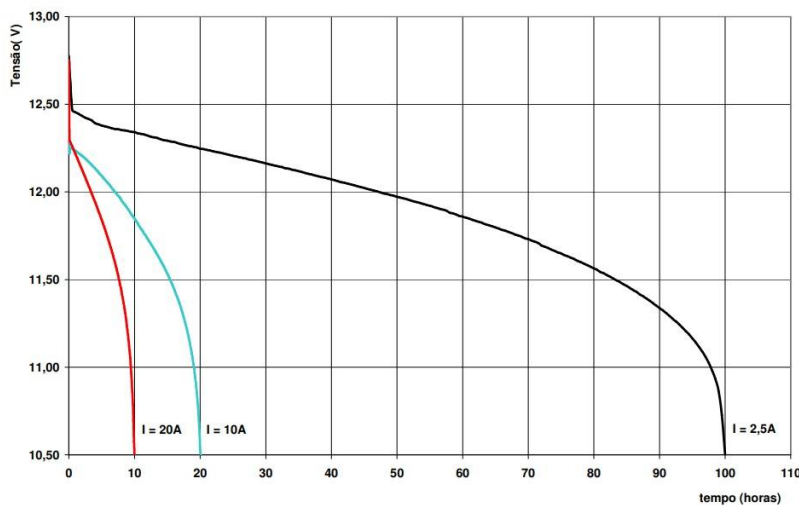


(Fonte: Outback Installation Manual, 2008)

3.1.2 Bateria

Atualmente, o banco de baterias conectado ao sistema do Laboratório de Eficiência Energética conta com quatro baterias Freedom, modelo DF4001, cada uma com tensão de 12 V, capacidade de 220 Ah em regime de 20h e a uma temperatura de 25°C, de acordo com o fabricante (ENERTEC DO BRASIL LTDA, 2008). Além disso, apresentam vida útil de 4 anos, considerando profundidade de descarga de 20%. Na Figura 17, são mostradas as curvas de descarga das baterias com diferentes valores de corrente em relação ao tempo.

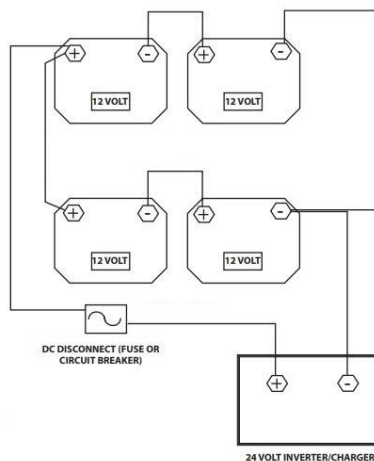
Figura 17 – Curvas de descarga para corrente constante bateria Freedom DF4001



(Fonte: ENERTEC DO BRASIL LTDA, 2008)

Para que o banco de baterias fosse suficiente para o armazenamento de energia, as baterias foram configuradas de maneira que seu barramento forneça uma tensão de 24 V. Para que esse nível de tensão fosse atingido, foram conectados dois pares em série e, posteriormente, conectados em paralelo para que o nível de corrente de suprimento se elevasse. A configuração de conexão do banco de baterias pode ser visualizada na Figura 18.

Figura 18 – Configuração de conexão do banco de baterias



(Fonte: Adaptado – OUTBACK, 2008)

(Fonte: OUTBACK, 2010)

3.1.3 Painéis Fotovoltaicos

O módulo fotovoltaico que será utilizado na realização dos testes do sistema híbrido conta com quatro painéis localizados em cima do Laboratório de Eficiência Energética do Bloco de Engenharia Elétrica, com inclinação de 1° seguindo a forma do próprio telhado. Na Figura 20, a estrutura dos painéis solares pode ser visualizada.

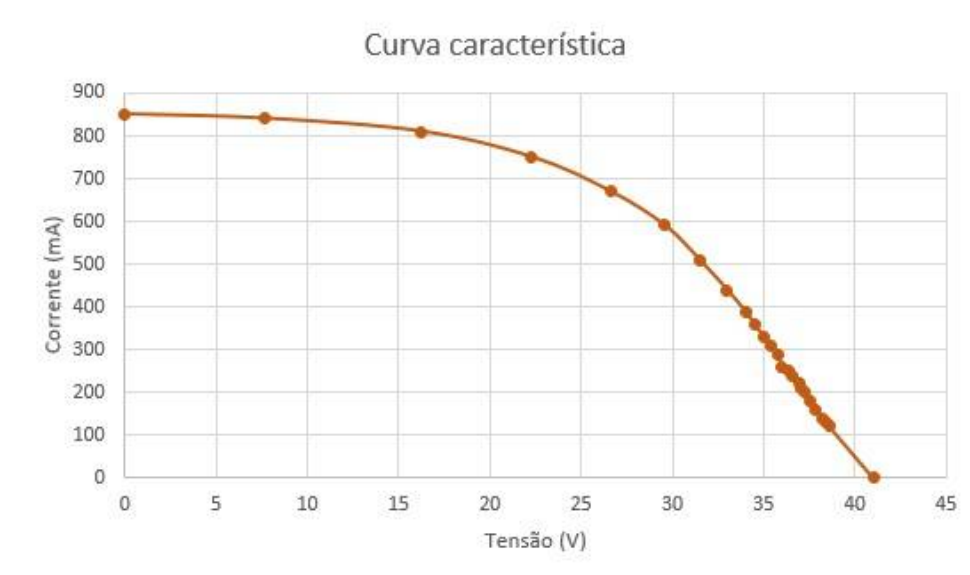
Figura 20 – Estrutura dos painéis fotovoltaicos utilizados



(Fonte: CORSICO, 2012)

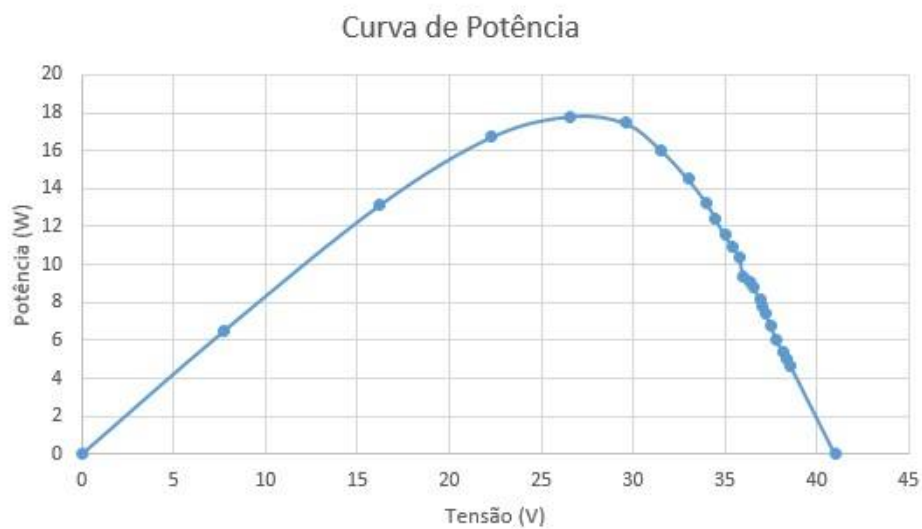
A curva característica dos painéis fotovoltaicos bem como a curva de potência podem ser visualizadas a seguir (Figura 21 e Figura 22), sendo que o ponto de máxima potência desse módulo fica em torno de 17,82 W, na tensão de 26,6 V e corrente de 670 mA.

Figura 21 – Curva característica do módulo fotovoltaico conectado ao Laboratório



(Fonte: Adaptado – CORSICO, 2012)

Figura 22 – Curva de potência do módulo fotovoltaico conectado ao Laboratório

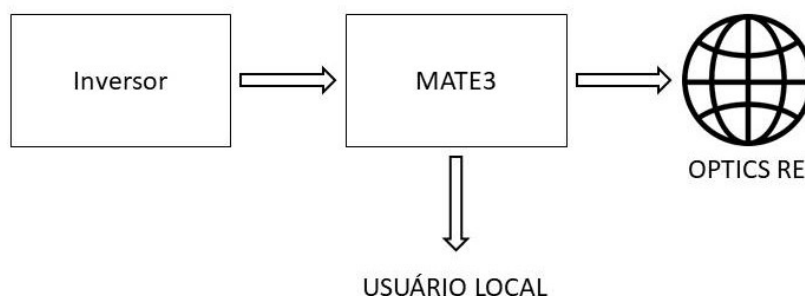


(Fonte: Adaptado – CORSICO, 2012)

3.1.4 Sistema de controle e monitoramento

O sistema de controle e monitoramento tem como objetivo obter informações do comportamento dos equipamentos conectados ao sistema, bem como ajustar parâmetros de equipamentos para que operem de forma eficiente e também auxiliar o controle dos mesmos. O dispositivo utilizado para esse fim é o MATE3, o qual tem ajuste local dos parâmetros. Será feita a conexão através da rede de Internet para que se tenha a opção de operar o sistema do Laboratório remotamente através da interface do Optics RE. Ambos serão especificados nos itens a seguir e o esquema de ligação remota pode ser visualizado na Figura 23.

Figura 23 – Esquema de ligação remota



(Fonte: A autora)

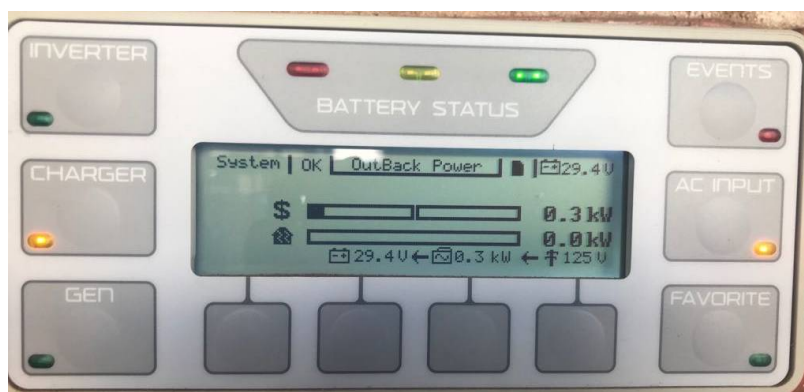
3.1.4.1 MATE3

Como sistemas híbridos requerem diferentes fontes de entrada de energia, tanto renovável, como energia solar e eólica, quanto não renovável, como por exemplo, geradores a diesel, além de controladores de carga e inversores, é necessário o uso de um sistema adequado de monitoramento compatível com todas essas utilidades. Todos esses equipamentos necessitam de ajustes para que o sistema opere da melhor forma possível. É por isso que o display de controle e monitoramento MATE3 é utilizado, uma vez que este se comunica com o inversor Outback e coordena a operação do sistema, maximizando o desempenho dos

equipamentos e evitando que os equipamentos conectados a ele conflitam entre si (OUTBACK, 2011).

Algumas de suas funções permitem que os parâmetros de carga e descarga da bateria sejam ajustados de uma forma que o sistema de baterias seja otimizado. Sua operação pode ser feita tanto localmente à instalação do sistema quanto remotamente, quando conectado à rede de internet e a uma interface. No presente trabalho foi utilizada a interface do Optics RE. Na Figura 24, pode ser visto o display do dispositivo de monitoramento.

Figura 24 – Display do dispositivo MATE3



(Fonte: A autora)

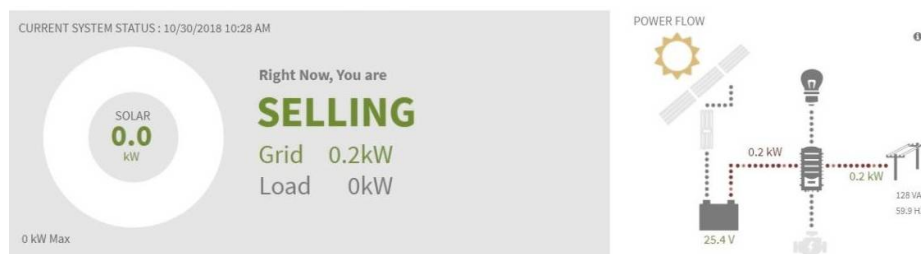
3.1.4.2 Optics RE

A interface do Optics RE é simples, uma vez que siga as instruções de conexão do dispositivo de acordo com o fabricante. Basta apenas acessar o site do Optics RE, criar sua conta e seguir os procedimentos de conexão do dispositivo de monitoramento que queira utilizar. A partir disso você pode acessar o seu sistema remotamente, inclusive tendo a possibilidade de ajustar os parâmetros do inversor e de carga da bateria e acompanhar o desempenho do seu sistema em tempo real.

O Optics RE apresenta a seguinte interface, vista na Figura 25. Podem-se visualizar todos os dispositivos que compõe o seu sistema, os fluxos de energia vindo da rede, das baterias e indo para as cargas, além das tensões nas baterias, tensão da rede, entre outros. Quando o display de monitoramento é conectado ao Optics RE,

automaticamente ele já encontra os outros dispositivos que estão conectados ao sistema.

Figura 25 – Interface do Optics RE



(Fonte: OPTICS RE, 2018)

3.1.5 Fontes de alimentação

As fontes de alimentação auxiliares que serão utilizadas no trabalho são fontes comuns de laboratório, com tela digital e controle de tensão e corrente injetadas no circuito através de botões com potenciômetro. Possui regulação de tensão de 0 a 30 V em CC e injeta corrente de até 3 A. O uso dessas fontes se mostrou necessário porque, como visto anteriormente, a injeção de corrente vinda dos painéis fotovoltaicos não é suficiente para o carregamento eficiente do banco de baterias. A utilização das fontes de alimentação também simula a produção de energia de outras fontes de energia renovável, como por exemplo, a energia eólica.

3.1.6 Carga prioritária

Para a realização dos testes de medição de tensão e corrente do sistema híbrido do Laboratório, será conectada uma resistência de aquecimento de 50 Ω , com potência de 500 W, através de fios flexíveis de cobre de seção 1,5 mm² e disjuntor para ligar e desligar o fornecimento de energia para a carga de acordo com a necessidade dos testes, com o intuito de simular uma carga prioritária que pode ser atendida pelo inversor GTFX2524LA.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Conexão do MATE3 ao Optics RE

Para que o sistema híbrido fosse operado de forma remota, foi conectado o dispositivo de monitoramento MATE3 à rede de Internet do Bloco de Engenharia Elétrica. Essa conexão foi feita através de um cabo categoria 5 de entrada RJ-45 que estabelecia a comunicação do dispositivo com um switch, fornecendo acesso ao servidor da rede de Internet através da conexão da Figura 26.

Figura 26 – Conexão do MATE3 à rede de Internet



(Fonte: OPTICS RE, 2014)

Após a conexão, foi feita a atualização do firmware do dispositivo MATE3. Essa etapa foi necessária para que a comunicação do dispositivo com a interface do Optics RE fosse possível. Para isso, foi feito o download do firmware pelo próprio site da Outback Power Technologies e posteriormente colocado no cartão SD do MATE3 para fazer o *upload* no dispositivo.

Em seguida, o procedimento de atualização foi feito e então foram habilitadas as funções do Optics RE e DHCP no MATE3 para que a conexão fosse estabelecida corretamente. Feito isso, o próximo passo foi de criar uma conta no Optics RE e colocar o sistema do Laboratório de Eficiência Energética nessa interface. Para a criação do perfil, é preciso ter o número MAC do dispositivo MATE3, o qual pode ser encontrado na mesma tela onde se encontra os dados de endereço IP e Gateway.

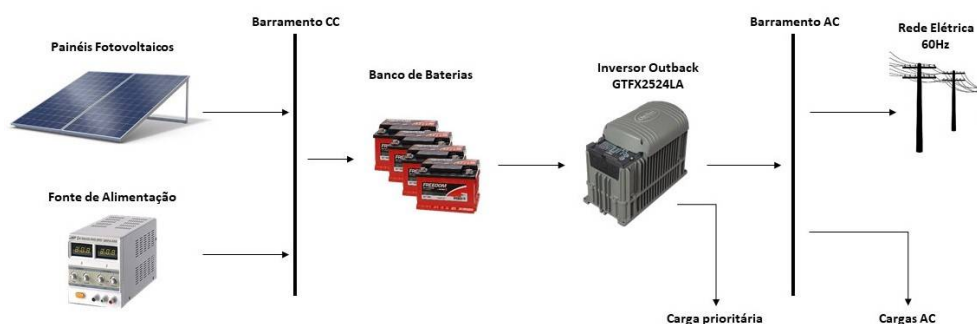
Uma vez que o endereço MAC foi colocado, verificou-se pelo OpticsRE se o dispositivo estava corretamente conectado à rede de Internet, e então foram colocados os dados de localização do Laboratório onde se encontra o sistema que está sendo monitorado.

Por último, ele detectou-se os dispositivos que estão conectados ao MATE3, os quais podem ser inversores, controladores de carga, dispositivos de monitoramento de baterias, etc. Nesse caso foi somente detectado o inversor GTFX2524LA.

3.2.2 Sistema conectado ao Laboratório de Eficiência Energética para realização dos testes

Para que o desenvolvimento dos testes práticos fosse possível no sistema híbrido com sistema de controle e monitoramento remoto do sistema de armazenamento, foi implementado um esquema de ligação, o qual conta com um barramento CC fazendo a interligação dos painéis fotovoltaicos e a fonte de corrente com o banco de baterias. Esse esquema é representado pela Figura 27.

Figura 27 – Esquema de ligação do sistema para teste



(Fonte: A autora)

Os painéis fotovoltaicos foram conectados em paralelo, para que a corrente produzida resultante por eles fosse maior. As conexões tanto entre os painéis, quanto dos painéis para o barramento CC foram feitas via cabo banana-banana do próprio laboratório. Para a medição da corrente vinda das fontes externas foi utilizado um amperímetro em série com os painéis e fonte de alimentação, a qual ficou entre

valores de 4 A. Para a obtenção de dados de corrente e tensão injetadas pelas fontes externas nas baterias, seria ideal obter um gerenciador de carga, porém não foi possível por falta de recursos.

Feito isso, iniciou-se os testes através dos dados descritos no próximo item. A leitura dos dados do dispositivo de controle é feita através do cartão SD do MATE3 em intervalos de 5 segundos. Dessa maneira, as informações dos dados se tornam mais precisas, melhorando a análise de resultados.

3.2.3 Descrição dos dados do sistema

A partir do cartão SD do dispositivo de controle e monitoramento MATE3, é possível ter acesso aos dados dos equipamentos ligados ao sistema, tais como dados de tensão, corrente, erro do inversor, entre outros. O arquivo é originalmente salvo em .csv (*comma-separated values*), com as principais variáveis descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Descrição dos dados do sistema

Inverter Current	Corrente AC que flui das baterias para a carga
Charger Current	Corrente AC que vem da rede elétrica para carregar as baterias
Buy Current	Corrente AC que vem da rede elétrica e flui tanto para a carga quanto para as baterias
AC In Voltage	Tensão AC nos terminais da entrada AC HOT IN do inversor
AC Out Voltage	Tensão AC nos terminais da entrada AC HOT OUT do inversor
Sell Current	Corrente AC que flui das baterias para a rede elétrica
Battery Voltage	Tensão nos terminais das baterias

(Fonte: OUTBACK, 2017)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo, serão descritos e apresentados os resultados dos testes que foram realizados no sistema de armazenamento a partir do sistema de controle e monitoramento MATE3 e Optics RE.

As variáveis adquiridas do dispositivo de monitoramento foram renomeadas segundo a Tabela 3, a fim de que se tenha o melhor entendimento possível.

Tabela 3 – Parâmetros do sistema de monitoramento

Inverter Current	Corrente bateria p/ carga
Charger Current	Corrente de carregamento das baterias
Buy Current	Corrente rede p/ carga
AC In Voltage	Tensão da rede
AC Out Voltage	Tensão da carga
Sell Current	Corrente de venda
Battery Voltage	Tensão na bateria

Ao todo, o trabalho contempla seis testes, cada um com um cenário diferente com o intuito de estudo do armazenamento de energia a partir do sistema de monitoramento implementado.

4.1 PROCEDIMENTOS E ANÁLISES DO TESTE 1

Com o objetivo de mostrar o funcionamento do sistema de controle do carregamento do banco de baterias, a execução do Teste 1 foi feita, monitorando o sistema via Optics RE e tomando como base os valores ajustados remotamente de Tensão *Float*, *Re-Float* e a duração do carregamento das baterias conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de carregamento das baterias

Tensão <i>Float</i>	24,8 V
Tensão <i>Re-Float</i>	27,8 V
Duração	1h

Nesse teste, o sistema de armazenamento de energia estava conectado somente ao inversor, ou seja, o processo de carregamento era unicamente pela rede elétrica da concessionária. Esse processo é necessário para que o banco de baterias não atinja o valor de tensão mínima após o período *Silent*, o qual descarrega-se naturalmente sem a intervenção de fontes externas às baterias.

Como pode ser visto nos gráficos da Figura 28 e Figura 29, o procedimento de carregamento do banco de baterias inicia-se quando o nível de tensão das mesmas atinge o valor de 24,8 V, que é ajustada como Tensão *Re-Float*. A partir desse momento, a rede elétrica fornece energia com um valor maior de corrente para que esse banco de baterias atinja um nível de tensão mais alta durante o processo de carregamento, e então o nível de tensão eleva-se para o valor de 27,8 V, também previamente ajustada pelo dispositivo de monitoramento como Tensão *Float*. Após atingir esse nível de tensão, as baterias carregam-se com valores de tensão e corrente constantes em um período de uma hora. Posteriormente, o valor de tensão após o carregamento fica em torno de 25,6 V, que é um nível aceitável de acordo com o fabricante.

Se nenhuma fonte externa de energia for conectada ao banco de baterias, o ciclo de carregamento recomeça toda vez que o nível de tensão atingir a Tensão *Re-Float* com o intuito de evitar o descarregamento natural excessivo e, consequentemente, afetar a vida útil do sistema de armazenamento.

Figura 28 – Tensão nas baterias

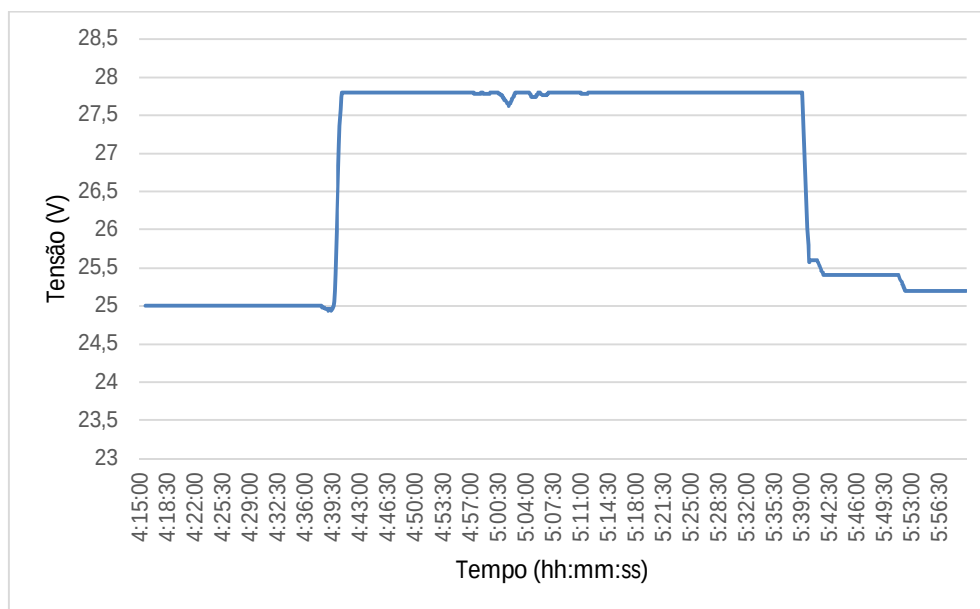
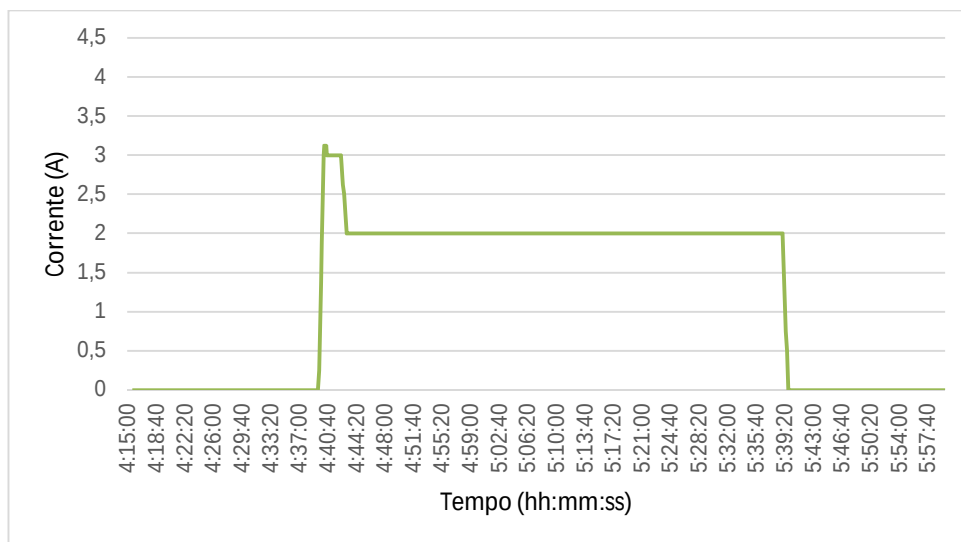


Figura 29 – Corrente para carregamento das baterias

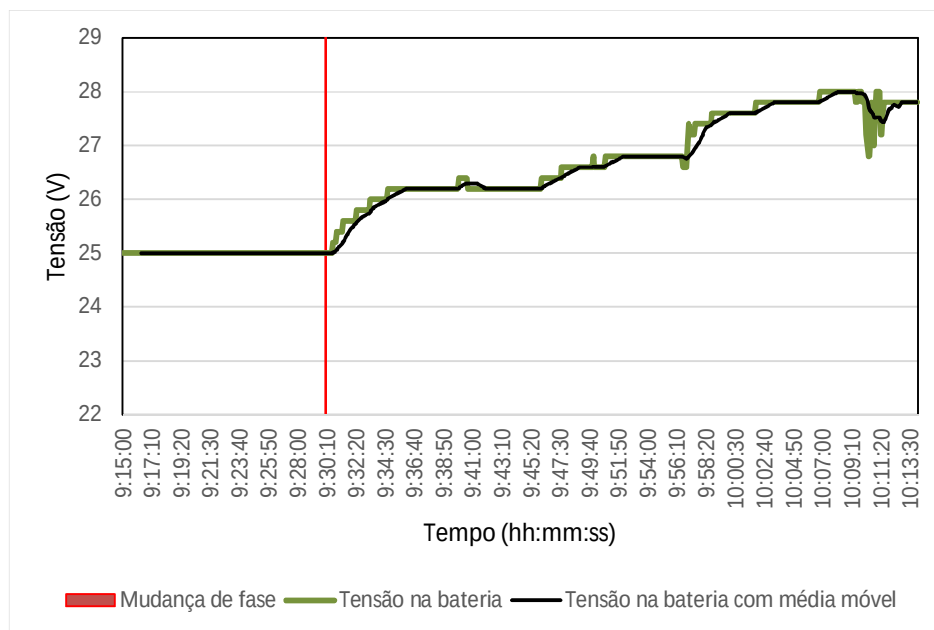


4.2 PROCEDIMENTOS E ANÁLISES DO TESTE 2

Para a realização do Teste 2, os painéis fotovoltaicos e a fonte de corrente foram conectados ao barramento CC, carregando as baterias conforme visto anteriormente na Figura 27.

Visto que o equipamento de monitoramento MATE3 é um dispositivo de baixa resolução, os dados do sistema apresentaram valores discretos, ou seja, com baixa precisão, dificultando a análise do funcionamento do sistema. Os valores de tensão das baterias são medidos em escala de 0,2 V e as correntes, tanto nas baterias quando na rede, são medidas em escala de 1 A. Esse fenômeno pode ser visto na Figura 30.

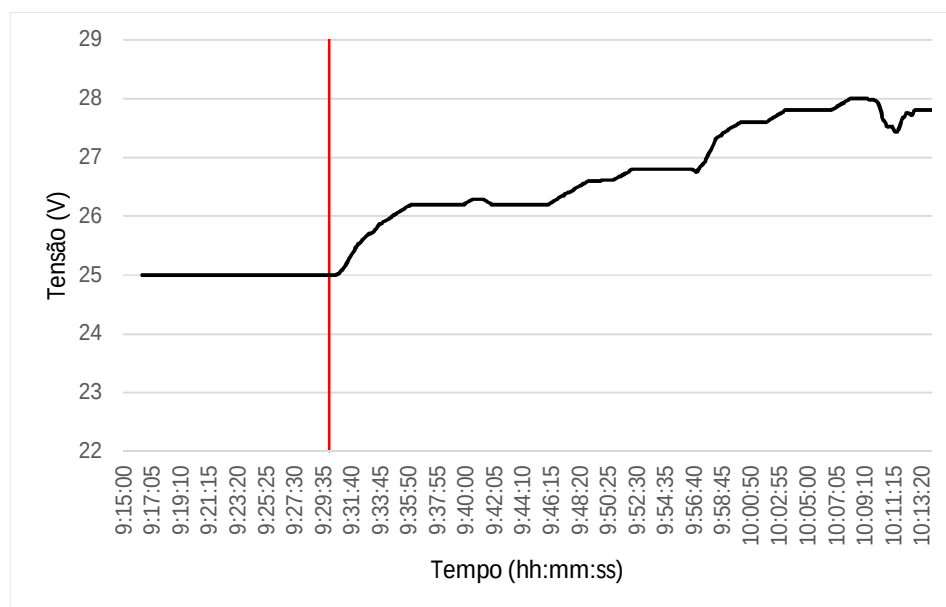
Figura 30 – Gráfico da tensão nas baterias com média móvel



Para solucionar esse problema, foram utilizados recursos de média móvel para que os gráficos de tensão e corrente fossem melhor interpretados.

Conforme visto no gráfico da Figura 31, a tensão inicial do banco de baterias era de 25 V, e com o início do teste conectando as fontes externas às baterias, iniciou-se o armazenamento de energia às 9:30:35 com indicação no gráfico, considerando horas, minutos e segundos (hh:mm:ss), elevando-se a tensão conforme as fontes injetam corrente no banco de baterias até um valor em torno de 28 V. Esse processo durou em torno de 45 minutos para ser realizado.

Figura 31 – Tensão nas baterias com fontes externas



Foi possível observar também que a partir de 10:11:15, a tensão mostrou-se instável. Esse fenômeno ocorreu devido ao mau contato da fonte de corrente utilizada.

A corrente produzida pelo módulo fotovoltaico e pela fonte de corrente foi medida através de um amperímetro analógico, portanto não foi possível obter os gráficos de corrente produzida. Contudo, partindo da análise local do experimento, os valores de corrente ficaram em torno de 3 a 4 A.

4.3 PROCEDIMENTOS E ANÁLISES DO TESTE 3

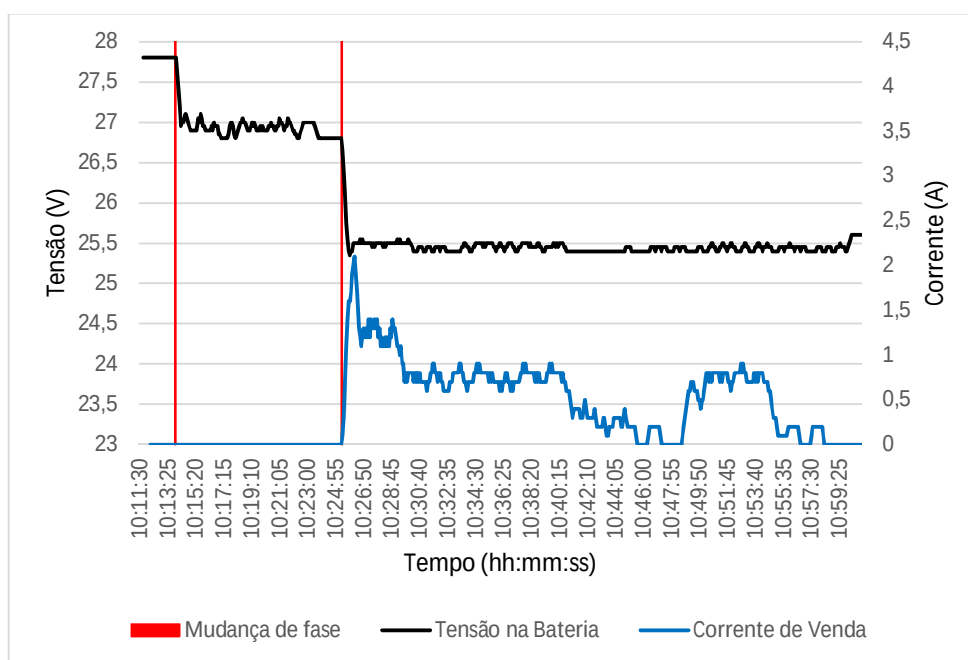
Uma vez que a tensão no banco de baterias elevou-se para 27,8 V com o procedimento do Teste 2, foi possível o início do Teste 3, o qual aborda o procedimento de venda de energia para rede elétrica. Como dito anteriormente, a venda de energia para a rede é um processo que utiliza a energia armazenada e/ou produzida pelo lado CC do inversor conectado ao sistema.

Para que fosse possível a venda de energia do lado CC do inversor, alguns parâmetros foram ajustados, tais como a função *Sell RE* teve que ser habilitada e o valor de tensão de venda foi ajustada conforme o procedimento.

Durante a execução do teste, as fontes externas do barramento CC continuaram conectadas ao banco de baterias, mantendo a injeção de corrente. A partir do gráfico da Figura 32, pode-se visualizar que o teste passa por duas mudanças de fase, sendo elas:

1. Função *Sell RE* habilitada em 27 V;
2. Função *Sell RE* habilitada em 25,4 V.

Figura 32 – Gráfico de tensão e corrente do sistema



No momento em que ocorre a primeira mudança de fase, em 10:13:55, o valor de tensão CC nas baterias cai para a tensão ajustada de venda de energia de 27 V, porém durante esse período, o sistema não fornece energia suficiente para a venda. Contudo, a partir da segunda mudança de fase em 10:25:20, onde a tensão de venda é ajustada para 25,4 V, e então a tensão entre os terminais das baterias fica contínuo nesta tensão durante todo o processo de venda de energia. A partir desse momento, o sistema injeta corrente na rede elétrica, fazendo com que flua potência das baterias para a rede. Esse fluxo de energia pode ser visualizado na Figura 33, onde o sistema é representado via Optics RE.

Figura 33 – Sistema vendendo energia para a rede visto pelo Optics RE



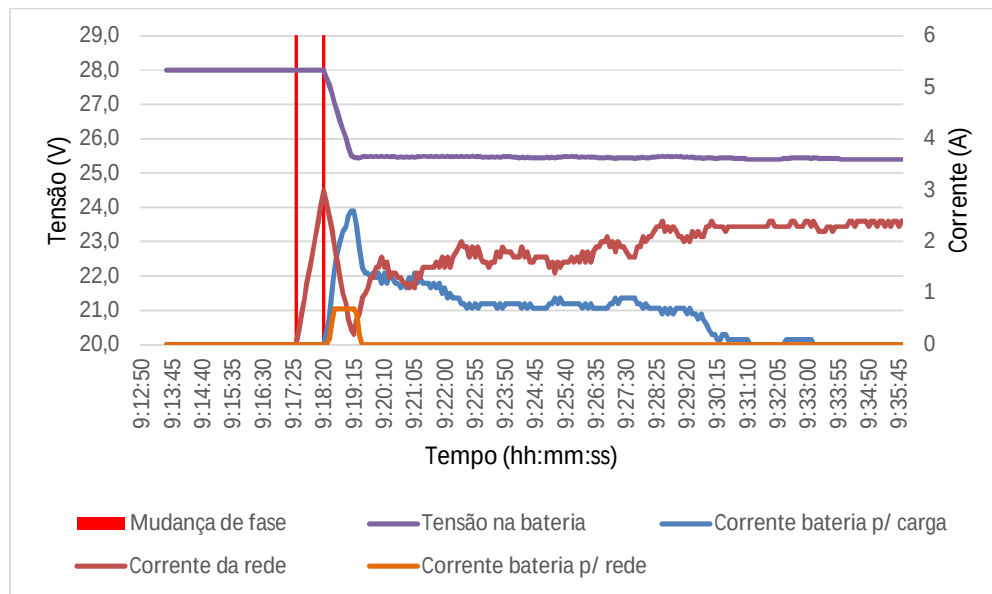
A potência de venda de energia fornecida pelo lado CC do inversor teve duração de cerca de 30 minutos de acordo com os dados obtidos no dispositivo de controle e monitoramento.

4.4 PROCEDIMENTOS E ANÁLISES DO TESTE 4

Para que o Teste 4 fosse realizado, as fontes de energia dos painéis fotovoltaicos, bem como a fonte de corrente continuaram conectados ao barramento CC e este ligado às baterias, contudo, foi implementada uma carga teste de $50\ \Omega$ com potência de até 500 W nos terminais de saída CA do inversor a fim de verificar as condições de operação e fornecimento de energia de uma carga prioritária.

Com a tensão das baterias em 28 V, após seu carregamento pelas fontes do barramento CC, iniciou-se o teste 4. O gráfico da Figura 34 mostra que a partir de 09:17:15, o disjuntor da carga é fechado e a rede começa a fornecer energia para ela. Isso acontece pois nesse período a função *Sell RE* estava desativada. Portanto, em 09:18:15, a função *Sell RE* é ativada utilizando a ação remota do Optics RE, e este comunica-se com o dispositivo MATE3, alterando as funções do inversor e então a energia armazenada no banco de baterias começa a fluir para fornecer energia para a demanda da carga.

Figura 34 – Gráfico de tensão e corrente com carga teste



No começo do teste, a energia do lado CC é suficiente tanto para atender a carga conectada, quanto para vender energia para a rede, como pode ser visto no período logo após a habilitação da função *Sell RE*. A partir desse momento, é notável que o sistema dá preferência ao fornecimento de energia vindo dos terminais CC do inversor para atender a demanda da carga, diminuindo a corrente vinda da rede que antes estava sendo utilizada. Porém, a energia fornecida pelas fontes externas não é suficiente para atender a demanda durante todo o tempo, com isso a rede trabalha em conjunto com as fontes externas para que o fluxo de potência demandada pela carga seja atendido.

O fluxo de energia da carga sendo atendida tanto pelo lado CC quanto pelo lado CA do inversor, que no caso correspondem ao banco de baterias e rede elétrica, podem ser visualizados pelo Optics RE, segundo a Figura 35.

Figura 35 – Fluxo de potência para a carga visto pelo Optics RE

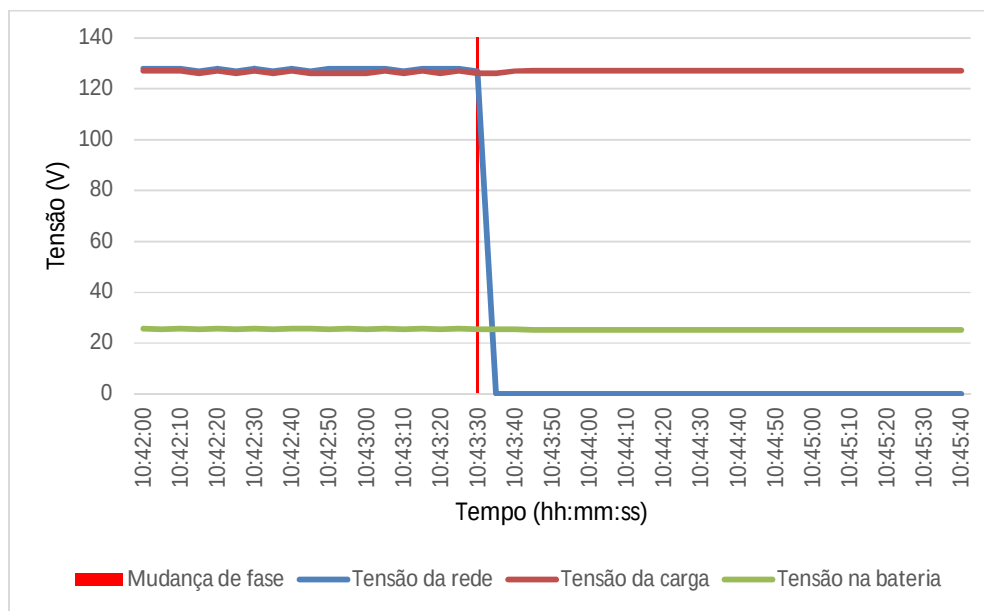


Após a verificação da inexistência de fluxo de potência vindo do lado CC do inversor nos momentos finais do teste e visto que a demanda da carga estava sendo fornecida somente pela rede, o teste foi finalizado.

4.5 PROCEDIMENTOS E ANÁLISES DO TESTE 5

O objetivo da realização do Teste 5 foi de analisar os valores de tensão na saída do inversor para atendimento da carga quando há uma interrupção do fornecimento de energia da rede elétrica da concessionária. Como visto nos testes anteriores, a função *Sell RE* tem que estar habilitada para que o inversor possa utilizar a energia armazenada nas baterias e/ou produzida pelas fontes alternativas do lado CC. A simulação de interrupção da rede foi feita pela abertura do disjuntor no quadro elétrico, em 10:43:30, visto no gráfico mostrado na Figura 36. Pode-se observar que a tensão nos terminais de saída CA do inversor, que atende a carga de teste, permanece com tensão CA em torno de 127 V, mesmo com a tensão da rede elétrica caindo para 0 V. Isso acontece, pois, a partir do desligamento da rede, o inversor continua fornecendo energia para a carga pelo lado CC das fontes externas e pelo banco de baterias e, portanto, não há nenhum afundamento de tensão.

Figura 36 – Tensões CA e CC com interrupção de energia da rede



Para melhor detalhamento do teste, as curvas nos terminais de saída CA do inversor onde a carga estava conectada foram analisadas por um osciloscópio. As curvas do momento anterior e posterior ao desligamento da rede podem ser vistas na Figura 37 e Figura 38. Pode-se visualizar que a tensão RMS antes da interrupção gira em torno de 130 V, na frequência de 60,02 Hz, e o formato da curva aponta algum tipo de problema de estabilidade, visto que não é perfeitamente senoidal. Após a interrupção, portanto, o valor RMS da tensão fica em 133 V, na frequência de 60 Hz, e a curva apresenta formato mais senoidal quando comparada à primeira.

Figura 37 – Curva da tensão CA na carga antes da interrupção da rede

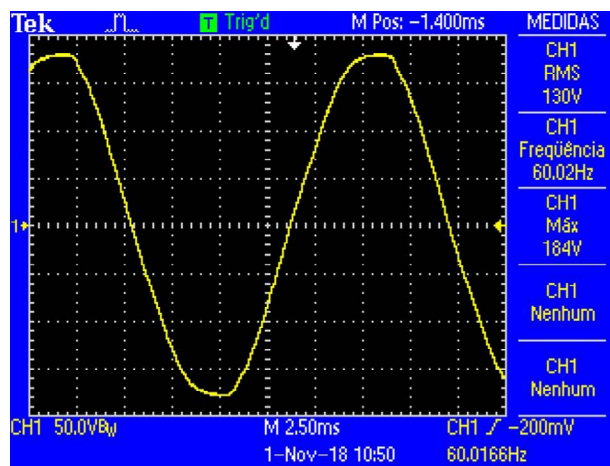
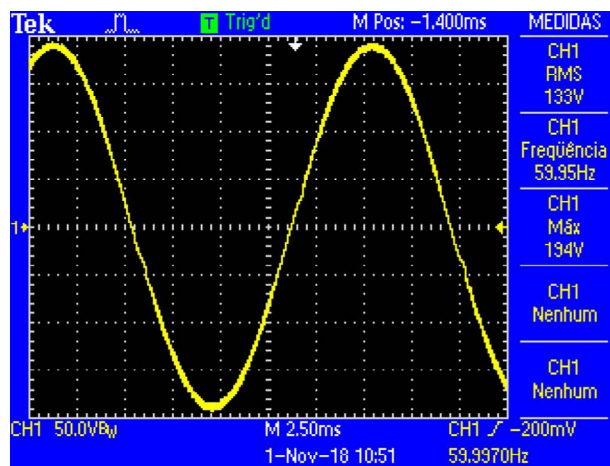
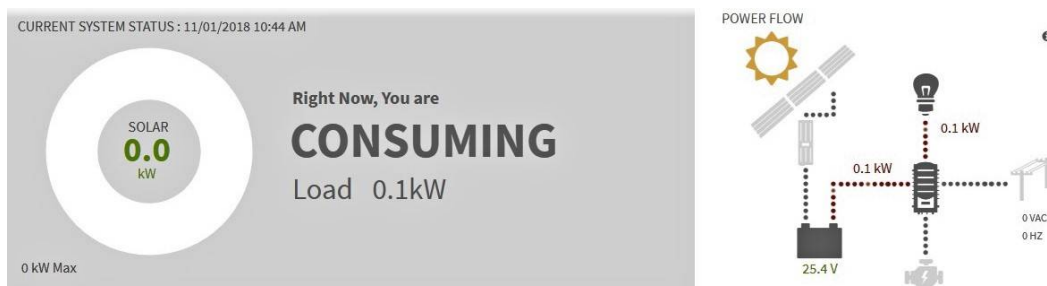


Figura 38 – Curva da tensão CA na carga após a interrupção da rede



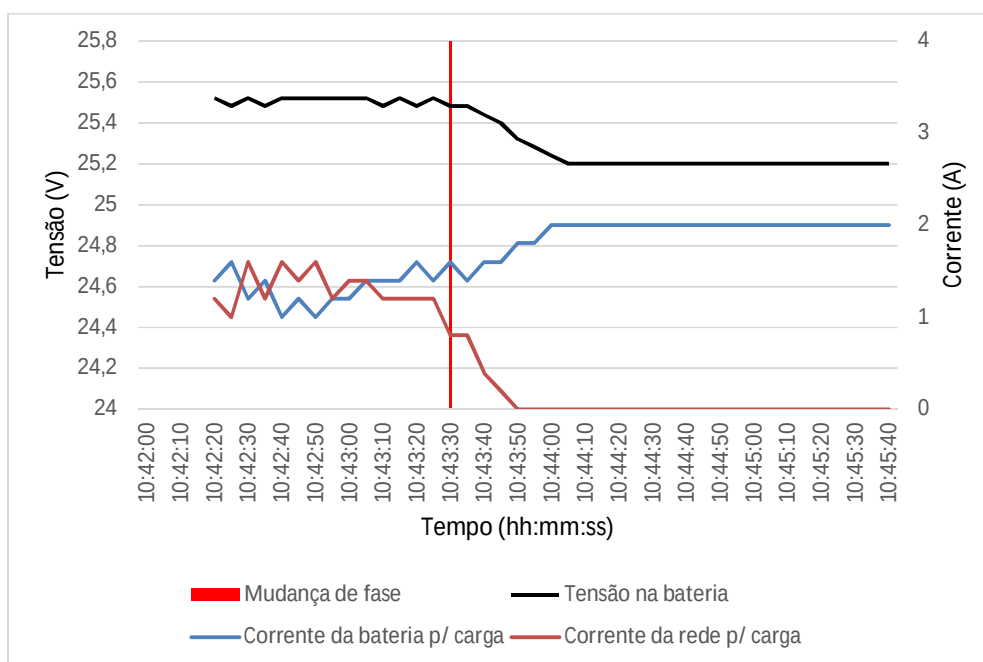
Quando a rede elétrica é desligada, o fluxo de potência do sistema foi acompanhado pelo sistema de monitoramento remoto e é representado pela Figura 39 do Optics RE.

Figura 39 – Sistema sem a rede elétrica pelo Optics RE



No gráfico da Figura 40, pode-se visualizar que a carga está sendo alimentada por ambos os lados CC e CA do inversor antes da interrupção. Contudo, a partir do desligamento da rede, a tensão nas baterias cai para valores em torno de 25,4 V, que é a tensão ajustada pelos valores de *Sell RE*, e a corrente fornecida pela rede é levada a zero, sendo a carga alimentada unicamente pelo lado CC do inversor.

Figura 40 – Tensão da bateria e correntes com interrupção da rede



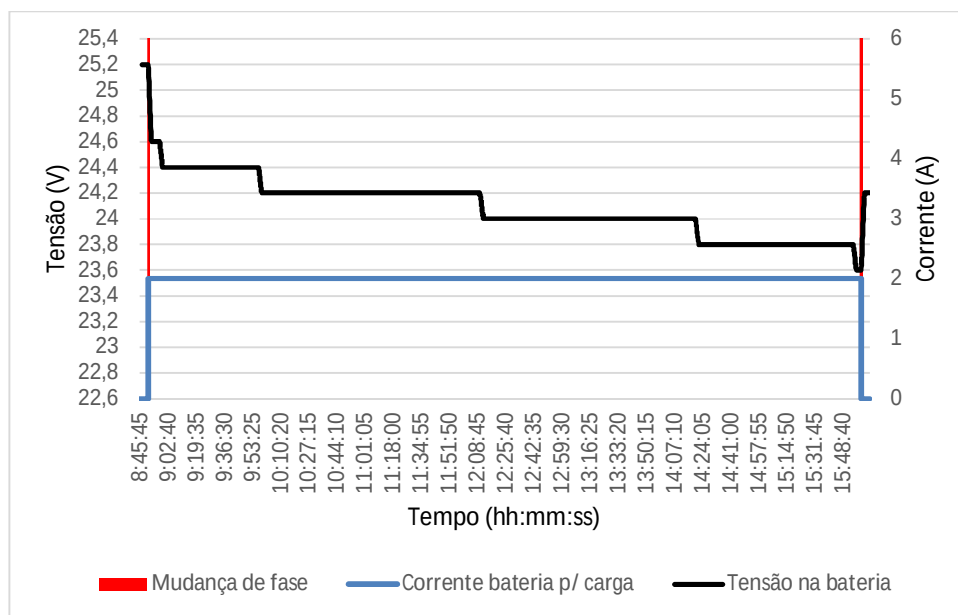
4.6 PROCEDIMENTOS E ANÁLISES DO TESTE 6

O Teste 6 foi feito com o intuito de saber por quanto tempo o banco de baterias é capaz de fornecer energia para a carga prioritária de 500 W de potência, a partir do ajuste da tensão mínima das baterias para que o teste realizado não afete a sua vida útil.

Primeiramente, a rede elétrica foi desconectada através do disjuntor do quadro elétrico, e a carga foi ligada através do mesmo método, fechando o circuito através de um disjuntor. É importante ressaltar que esse teste foi feito sem o uso do barramento CC com as fontes externas dos painéis fotovoltaicos e da fonte de alimentação, somente com o banco de baterias fornecendo energia para a carga, com o objetivo de simular a operação do sistema em modo isolado da rede e sem o auxílio de fontes externas de energia.

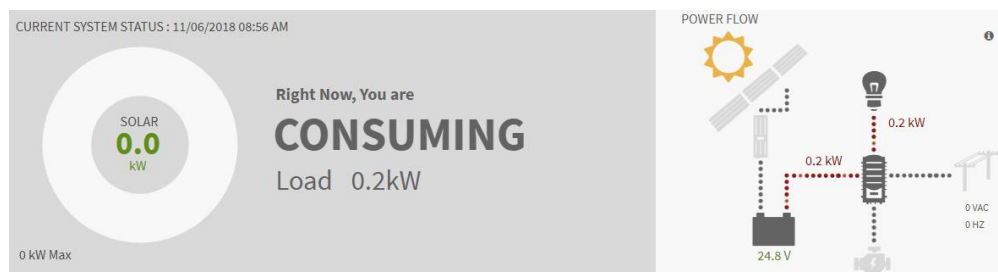
O teste inicia com o nível de tensão nas baterias de 25,2 V. Quando atinge uma tensão abaixo do nível mínimo, o qual neste caso foi de 23,8 V, o inversor interrompe o fornecimento de corrente para a carga, voltando ao nível de tensão de 24,2 V. Esse processo dura em torno de 7 horas de acordo com os dados adquiridos do dispositivo de monitoramento e pode ser verificado na Figura 41.

Figura 41 – Gráfico da tensão e corrente das baterias para a carga



Na Figura 42, é mostrado o sistema operando em modo isolado da rede, com o fluxo de potência fornecida do banco de baterias, com uma tensão de 24,8 V nos terminais das baterias e um fluxo de 0,2 kW.

Figura 42 – Sistema operando em modo isolado



Quando a bateria atingiu a tensão mínima de 23,8 V, o sistema parou de fornecer energia para a carga e ficou em modo de operação *stand-by*.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÃO

No presente trabalho de conclusão de curso um, sistema de acumulação de energia interligado à rede foi estudado e suas partes constituintes, assim como os modos de operação, foram descritos. O sistema encontra-se implementado no Laboratório de Eficiência Energética do DELT, de forma que vários ensaios experimentais foram realizados, bem como a análise da curva de carga e descarga do banco de baterias ligado ao sistema. Além disso, foi feita a conexão do sistema do Laboratório a uma interface *web* para que o usuário pudesse controlar os parâmetros do inversor remotamente, alterando os valores de tensão de ajuste da curva das baterias, e também havendo a possibilidade de habilitar ou desabilitar a função de venda de energia para a rede.

Foi descrito os diferentes tipos de sistemas de geração distribuída, visto que o presente sistema se enquadra nas especificações de um sistema híbrido, pois o inversor é conectado à rede elétrica, apresenta sistema de armazenamento de energia e também possibilita a adição de uma ou mais fontes alternativas de energia. Foram estudados os vários tipos de tecnologias utilizadas em ESS, visto que o foco foi nas baterias de chumbo-ácido, pois o sistema de armazenamento em estudo utiliza esse tipo de bateria.

Foram descritos os conceitos de funcionamento de um inversor, além do princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica levando em conta a irradiância e os tipos de conexão série-paralelo dos módulos para obter maiores valores de tensão e corrente.

Todos as especificações dos equipamentos utilizados foram detalhadas de acordo com os dados dos fabricantes, como o inversor GTFX2524LA, o banco de baterias Freedom, o dispositivo de controle e monitoramento MATE3 e a interface *web* utilizada do Optics RE. Além disso, foram descritos os demais equipamentos utilizados no sistema teste implementado, como por exemplo o resistor utilizado para simulação de carga prioritária, os painéis fotovoltaicos e a fonte de alimentação para auxílio na demanda de energia da carga.

Após a inserção do sistema proposto na metodologia com o barramento CC e as fontes alternativas de energia, a realização dos testes permitiu que o funcionamento do inversor e a curva de carga e descarga das baterias fosse compreendida. Os ajustes dos parâmetros do inversor foram feitos através da interface *web* do Optics RE, de forma que se tenha uma comunicação remota através da rede entre o sistema conectado ao Laboratório e o usuário, sem a necessidade de este estar operando no mesmo local.

Os testes executados apresentam valores de dados de acordo com os especificados teoricamente, mostrando que o sistema híbrido do Laboratório é eficaz quando se trata de aquisição de dados de monitoramento e, também, o sistema é ajustado adequadamente quando o inversor é submetido a ajustes remotos via Optics RE pela rede de Internet. Foi possível manter o fornecimento da carga quando houve interrupção na rede elétrica, além de se calcular o tempo de fornecimento da demanda e detalhar a operação de um sistema híbrido.

Por fim, o trabalho de conclusão de curso permitiu ampliar os conhecimentos na área de redes de comunicação com a interconexão do dispositivo MATE3 com o Optics RE pela rede do servidor de Internet, além de conhecimentos na área de eletrônica de potência, proteção elétrica e instalações de baixa tensão a partir do funcionamento e conexões do inversor e do banco de baterias. O trabalho contribuiu para que se tivesse um conhecimento aprofundado do sistema híbrido conectado à rede, com possibilidade de venda de energia excedente para a rede elétrica comercial, e também com a utilização do sistema para atender cargas prioritárias na falta de energia da rede da concessionária.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para eventuais trabalhos futuros, sugere-se fazer um projeto fotovoltaico que atenda as especificações de potência do inversor, bem como a instalação de um controlador de carga para atender os requisitos de tensão das baterias, além de obter informações de valores de corrente CC do inversor. Isto porque com essa solução introduzida no sistema, pode-se obter um sistema eficiente no atendimento da demanda, sem a necessidade da utilização da rede elétrica na maior parte do tempo.

Outra opção seria de inserir o sistema no barramento existente de 220 V utilizando um transformador, para que o resto da implementação dos sistemas de geração da micro rede do Departamento de Engenharia Elétrica seja aproveitado pelo inversor e pelo banco de baterias,

Outra sugestão é a análise de qualidade de energia nos terminais de entrada do inversor, visto que ocorrem pequenos distúrbios na rede, afetando a sua estabilidade na forma de onda senoidal, conforme visto no item 4.5.

6 REFERÊNCIAS

ABELHO, S. G. **Armazenamento de Energia Elétrica: Cenários para o Sistema Elétrico Português**. FCT/UNL, 2011.

ABNT NBR 11704. **Sistemas Fotovoltaicos - Classificação**. 2008.

ABNT NBR 15389. **Bateria Chumbo-Ácida Estacionária Regulada por Válvula - Instalação e Montagem**. 2006.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012**. 2012a.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. 2012b.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **PRODIST Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição**. 2012c.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em 20/11/2018. 2018.

BERNO, K. C.; PAZINATO, M. S. **Energia Solar Fotovoltaica – Tecnologia, dimensionamento e projeto**. Elco Solar, Curitiba – PR, 2017.

CHEN, H.; CONG, T.N.; YANG, W.; TAN, C.; LI, Y.; DING, Y. **Progress in electrical energy storage system: A critical review**. 2009.

CORSICO, F. H. et al. **Projeto Paine Solar**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

DEMONTI, R. **Sistema de Co-Geração de Energia a partir de Painéis Fotovoltaicos**. UFSC, Florianópolis – SC, 1998.

DIVYA, K. C.; ØSTERGAARD, J. **Battery energy storage technology for power systems - An overview**. Elsevier - Electric Power Systems Research 79 (2009) p. 511–520, 2009.

ENERTEC DO BRASIL LTDA. **Manual técnico Bateria Estacionária – Freedom**. Disponível em: <<file:///C:/Users/05839667994/Desktop/TCC/TCC/FOTOS%20-%20SISTEMA/File-1366223633.pdf>>. Acesso em: 12/11/2018. Sorocaba, 25 de Julho, 2008.

FERREIRA, R. **Painéis Fotovoltaicos - Curvas de Funcionamento**. Disponível em: https://paginas.fe.up.pt/~ee03195/Carro_Solar/PaineisCurvasdeFuncionamento.html>, 2008. Acesso em: 31/10/2018.

INOVACARE SOLAR. **Soluções para Geração de Energia Fotovoltaica**. Disponível em: < <http://www.inovacare.solar/tecnologia>>. Acesso em: 25/09/2018.

NR 10. **NR 10 - SEGURANÇA EM INSTALAÇÕES E SERVIÇOS EM ELETRICIDADE**. 2004.

OPTICS RE. **Setup Instructions**. Disponível em: < http://www.outbackpower.com/downloads/documents/system_management/optics_re/opticsre_manual.pdf>. Acesso em: 12/11/2018. Outback Power Technologies, Novembro, 2014.

OPTICS RE. Disponível em: < <https://opticsre.com/>>. Acesso em: 12/11/2018.

OUTBACK. **FX Series Inverter/Charger FX/VFX/GTFX/GVFX/MOBILE Installation Manual**. Outback Power Technologies, Junho, 2008.

OUTBACK. **GFX Series Operator's Manual**. Outback Power Technologies, Outubro, 2010.

OUTBACK. **MATE3 System Display and Controller – Owner's Manual**. Outback Power Technologies, Novembro, 2011.

OUTBACK. **MATE3 – Class System Display Data Logging References**. Outback Power Technologies, 2017.

PINHO, J. T.; BARBOSA, C. F. O.; PEREIRA, E. J. S.; SOUZA, H. M. S.; BLASQUES, L. C. M.; GALHARDO, M. A. B.; MACÊDO, W. N. **Sistemas híbridos - Soluções energéticas para a Amazônia**. 1ª edição Brasília, Brasil: Ministério de Minas e Energia, 396 p, 2008.

PINHO, J.T.; GALDINO, M.A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CEPEL - CRESESB, Rio de Janeiro - RJ, 2014.

RETORTA, F. S.; SALAMANCA, H. L. L.; FARINA, A. S.; NETTO, A. M.; KÜSTER, K. K.; SALAS, C. S. S.; AOKI, A. R.; SILVEIRA, L. H. S. **Análise de Sistemas Fotovoltaicos OFFGRID na região do Pantanal Sulmatogrossense**. Curitiba – PR, Brasil, 2017.

RUTTER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos**. 1a edição ed. 113 p. 2004.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Conext XW+ - Hybrid Inverter**. Disponível em: <<https://www.schneider-electric.com/en/product-range-presentation/7654-conext-xw%2B/>>. Acesso em: 26/09/2018.

UNESP. **Teoria Básica dos Inversores**. Conversores CC-CA: inversores. cap 9, 24 p. (Apostila da disciplina Eletrônica de potência 2). 2002. Disponível em: <<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/lepnovo/curso2002/cap9.pdf>>. Acesso em: 26/09/2018.

VAZQUEZ, S.; LUKIC, S. M.; GALVAN, E.; FRANQUELO, L. G.; CARRASCO, J. M. **Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications**. IEEE, vol. 57, nº 12, Dezembro, 2010.

VILLALVA, M. G. **Conversor Eletrônico de Potência Trifásico para Sistema Fotovoltaico conectado à Rede Elétrica**. UNICAMP – FEEC, Campinas – SP, Brasil, 2010.