

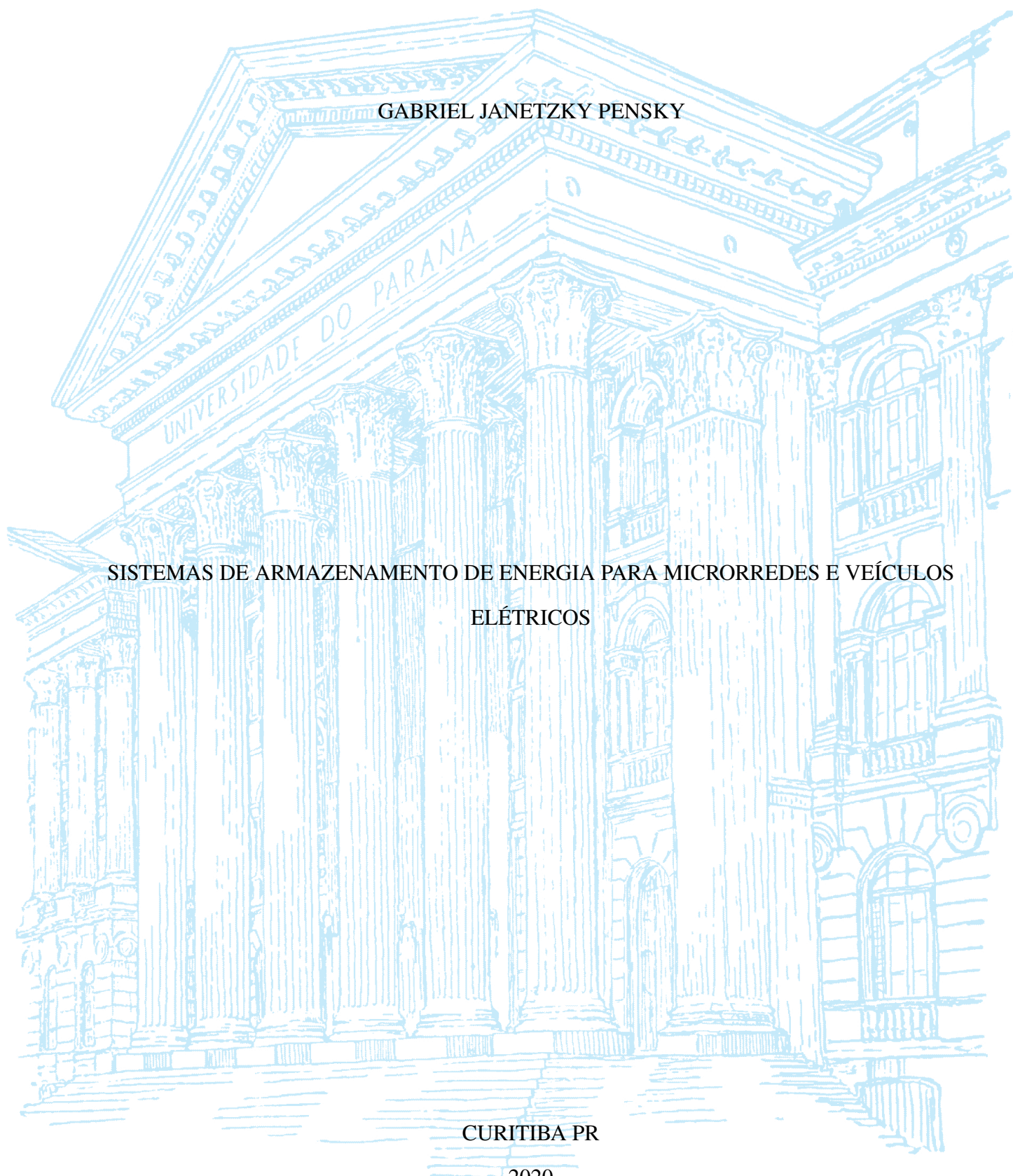
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GABRIEL JANETZKY PENSKY

SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA MICRORREDES E VEÍCULOS
ELÉTRICOS

CURITIBA PR

2020



GABRIEL JANETZKY PENSKY

SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA MICRORREDES E VEÍCULOS
ELÉTRICOS

Relatório apresentado à Coordenação de Iniciação Científica e Tecnológica da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial da conclusão das atividades de Iniciação Científica ou Iniciação em desenvolvimento tecnológico e Inovação - Edital 2019.

Orientador: Rogers Demonti.

CURITIBA PR

2020

RESUMO

Uma crescente preocupação com fatores climáticos e com o aquecimento global visando uma diminuição do consumo de combustíveis fósseis, vem abrindo espaço para o desenvolvimento de novos modelos na geração e consumo de energia. Uma evolução das fontes renováveis de energia trouxe a possibilidade de uma geração descentralizada, surgindo assim, o conceito da microrrede. Essas, trazem novas necessidades na manutenção da qualidade e no controle da energia elétrica em redes com geração intermitente, levando assim, ao uso de sistemas de armazenamento de energia. Além disso, o avanço na mobilidade elétrica, proporcionando uma maior densidade de energia das baterias, possibilitou o surgimento de veículos elétricos baratos e competitivos.

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de dois sistemas de armazenamento de energia, um conectado à microrrede do Departamento de Engenharia Elétrica (DELT) localizado no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR) em Curitiba e outra utilizada em um veículo elétrico do tipo Formula SAE, para competição nacional pela equipe UFPR Formula.

Primeiramente foi feito um estudo dos sistemas nos quais o armazenamento seria integrado, com uma revisão teórica do funcionamento dos principais componentes; foi então feito um estudo dos diferentes tipos e tecnologias de sistemas de armazenamento de energia, suas aplicações, características, estado da arte e aspectos de segurança; uma metodologia de organização do projeto foi definida: inicialmente definidos requerimentos para cada subsistema, depois projeto da arquitetura e integração do sistema, chegando na especificação do componente; e finalmente, como resultado se teve um projeto completo e especificado para os dois sistemas.

LISTA DE FIGURAS

2.1	Diagrama completo da microrrede (Demonti, 2019).	13
2.2	Curva $I \times V$ característica de célula fotovoltaica típica.	15
2.3	Circuito equivalente da célula fotovoltaica prática (de Oliveira, 2016).	15
2.4	Conversores CC-CC citados.	16
2.5	Inversores citados.. . . .	16
2.6	Comparação dos parâmetros de potência e energia de diferentes sistemas de armazenamento de energia.	17
2.7	Esquema de funcionamento de uma célula de íons de lítio. Adaptado de (Walker, 2019)	19
2.8	Esquema do funcionamento de um <i>Thermal Runaway</i>	20

LISTA DE TABELAS

2.1	Comparativo entre diferentes tecnologias de baterias (Warner, 2015)..	18
-----	---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1	A MICRORREDE NO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA . .	13
2.2	O CARRO ELÉTRICO DA UFPR FORMULA 2020	14
2.3	DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS.	14
2.4	CONVERSORES CC-CC	14
2.5	INVERSORES	15
2.6	SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	16
2.6.1	Tecnologias de sistemas de armazenamento de energia	16
2.6.2	Baterias	17
2.6.3	Baterias de íons de lítio	18
	REFERÊNCIAS	21

1 INTRODUÇÃO

O termo microrrede descreve o conjunto de microfontes, cargas e sistemas de armazenamento de energia elétrica que operam em conjunto e através de um sistema único de controle. Dessa forma, pode oferecer para seu usuário uma melhor confiabilidade na qualidade da energia, possibilidade da operação ilhada ou completamente desconectada da rede de distribuição (Lasseter, 2002; Tan et al., 2013).

De forma prática, uma microrrede é composta por diversos tipos de fontes de energia. Mais especificamente, fontes caracterizadas como Geração Distribuída (GD). Tipicamente pequenas turbinas (aerogeradores de pequeno porte ou pequenas centrais hidrelétricas (PCHs)) painéis fotovoltaicos ou células a combustível de baixo custo, baixa tensão e baixa emissão de poluentes.

Sistemas de armazenamento de energia (ESS) são indispensáveis em microrredes com fontes de energia renováveis, visto que esse tipo de fonte não tem a habilidade de responder a uma demanda imediata, sendo intermitentes e dependentes de variações sazonais. Além disso, ESSs proporcionam um aumento na confiabilidade e qualidade da energia elétrica (Zobaa et al., 2018).

Além disso, microrredes ainda são compostas de cargas diversificadas e conversores estáticos (CA-CC, CC-CC e CC-CA). Com eles, o fluxo de potência entre os dois barramentos pode ser facilmente controlado.

Veículos elétricos são muito parecidos com microrredes, com os 3 principais componentes: geradores, armazenamento de energia e conversores. Dependendo do nível de eletrificação (híbrido, híbrido plug-in ou elétrico), um motor a combustão é usado como gerador de energia elétrica. As baterias têm capacidade e potência para suprir energia aos motores, sendo que este é controlado por um inversor (conversor de energia CC-CA).

Neste trabalho serão investigados os principais aspectos no desenvolvimento de projetos de sistemas de armazenamento de energia para microrredes e veículos elétricos, buscando o melhor desempenho e segurança na operação.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 A MICRORREDE NO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

O projeto da microrrede como um todo foi planejado para ser flexível com relação aos modos de operação, sendo possível utilizar conectado à rede de distribuição, quanto de forma isolada. Isso faz com que o fluxo de energia seja permitido nos dois sentidos.

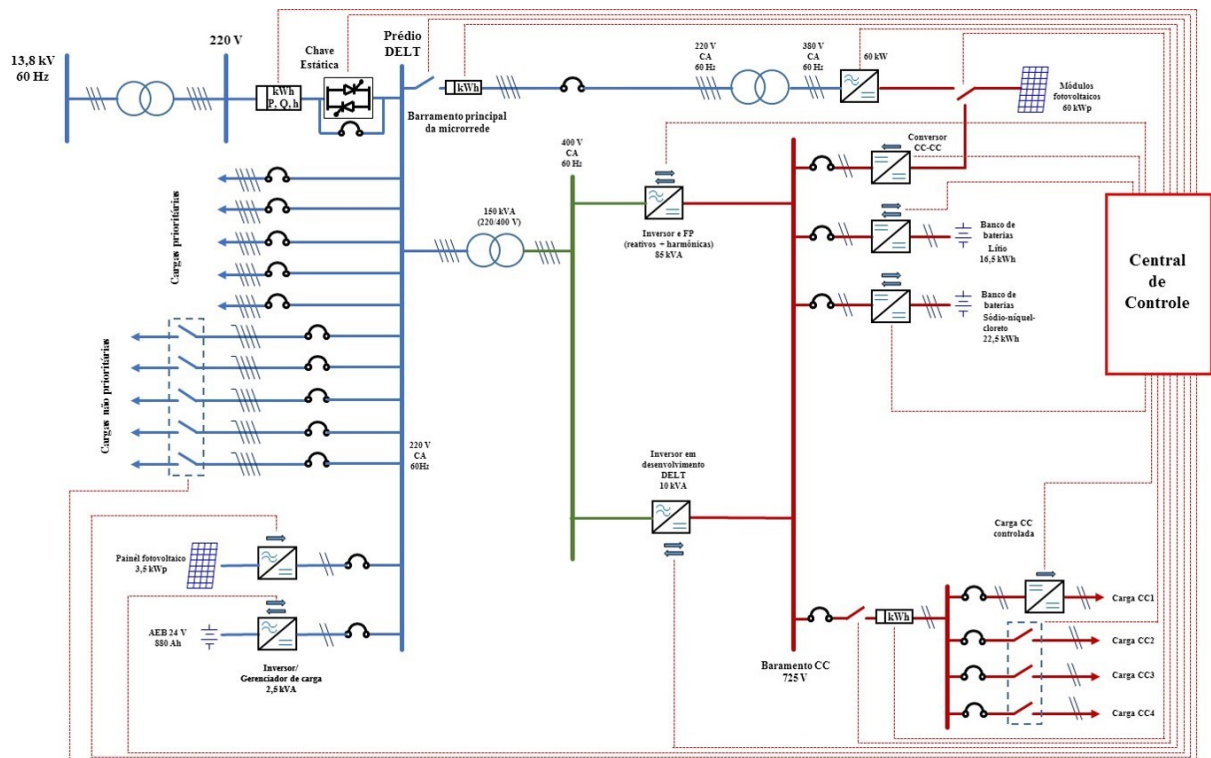


Figura 2.1: Diagrama completo da microrrede (Demonti, 2019).

A microrrede está localizada no laboratório de Eficiência Energética do Departamento de Engenharia Elétrica (DELT), no Centro Politécnico da UFPR. No diagrama da figura 2.1 podemos identificar os principais itens. Na subestação principal do compus se conecta um transformador de 350 kVA, na qual se ligam o prédio do departamento e outros prédios próximos com a tensão de 220 V. Após isso está o quadro de distribuição de energia geral. Continuando, temos uma chave eletrônica, responsável por fazer a desconexão da microrrede.

Parte da microrrede já está montada e é formada por um sistema de geração solar fotovoltaica de 3,5 kWp e um sistema de armazenamento de baterias de chumbo-ácido de capacidade total de 880 Ah em 24 V. Neste banco de armazenamento há um inversor e gerenciador de carga de 2,5 kW com capacidade de gerar um barramento estável monofásico em 127 V. Outros dispositivos instalados são as cargas formadas por diversos motores de indução acionando bombas d'água, uma bomba de calor de 3 kW e um banco trifásico de capacitores com 10 kVar.

Está previsto ainda a instalação de três inversores, estes farão a conversão a energia proveniente de 208 módulos fotovoltaicos com um total de 65,5 kWp. Dois sistemas de armazenamento de energia serão utilizados no barramento CC de 725 V. Um será com baterias

de sais de sódio-níquel-cloreto com capacidade de 22,5 kWh e os outros serão com baterias de íons de lítio desenvolvidos nesse trabalho.

Por último, ainda no barramento CC, serão conectadas várias cargas de corrente contínua, um conversor CC-CC de 30 kW e um conversor CC-CA de 85 kW. Este último é responsável pela conexão do barramento CC de 725 V em um barramento CA de 400 V. Um transformador de 150 kVA 220/400 V fará o acoplamento dos barramentos CA.

2.2 O CARRO ELÉTRICO DA UFPR FORMULA 2020

Neste ano de 2020 o projeto do carro elétrico da equipe UFPR Formula está em sua terceira revisão. Nos últimos 2 anos foram usados dois motores a indução da fabricante brasileira WEG, assim como 2 inversores também da mesma fabricante. Estes tinham uma potência máxima de 20kW e nominal de 6kW cada. O sistema de armazenamento de energia utilizado em 2018 tinha 4,3 kWh, já em 2019 esse foi reduzido por vários aspectos de projeto, chegando a 3,4 kWh. Este conjunto garantia uma autonomia de cerca de 7 km.

No projeto atual, o objetivo é se alcançar uma melhora de desempenho a ponto de competir no topo da competição nacional. Todo o projeto mecânico foi repensado pensando numa diminuição do peso e melhora da dinâmica do veículo. Já na parte elétrica, o sistema de tração foi inteiro renovado. O motor utilizado é um motor síncrono de fluxo axial da fabricante Emrax, com peso e tamanho reduzido, além de uma potência máxima de mais de 100 kW e nominal de 60 kW (a potência máxima na competição é limitada em 80 kW). O inversor é formado por um módulo de potência e um módulo de controle desenvolvido também no DELT por membros da equipe UFPR Formula.

Para se adequar ao novo projeto, a bateria foi inteira repensada e reprojetada. Uma nova tecnologia com maior densidade de potência e energia em relação à anterior foi escolhida, o nível de tensão foi aumentado para reduzir tamanho de componentes condutores e a capacidade foi drasticamente aumentada, para que fosse possível uma autonomia de pouco mais que 20 km (prova mais longa da competição).

2.3 DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS

No uso de células fotovoltaicas, determinar o ponto de operação de máxima potência (*Maximum Power Point – MPP*) é essencial para que toda a energia disponível seja utilizada (Demonti, 2003). A curva característica $I \times V$ de uma célula hipotética é apresentada a seguir (figura 2.2), considerando a temperatura constante e em duas situações de insolação diferentes. Para que a máxima potência do módulo seja utilizada, ela deve operar nos pontos marcados como mpp. Pode-se observar que a localização do ponto no gráfico muda de acordo com a insolação, fazendo com que o controle da operação das células não seja trivial. Este controle normalmente é feito pelo dispositivo conversor acoplado às células fotovoltaicas.

Além disso, podemos entender um dispositivo fotovoltaico pelo seu circuito equivalente, este é apresentado abaixo.

2.4 CONVERSORES CC-CC

Conversores CC-CC são dispositivos formados por componentes passivos e semicondutores atuando como chave que têm por função controlar o fluxo de energia entre sua entrada e saída. Realizam isso convertendo a amplitude de tensão e corrente contínua da entrada em uma outra amplitude de saída, também em corrente contínua.

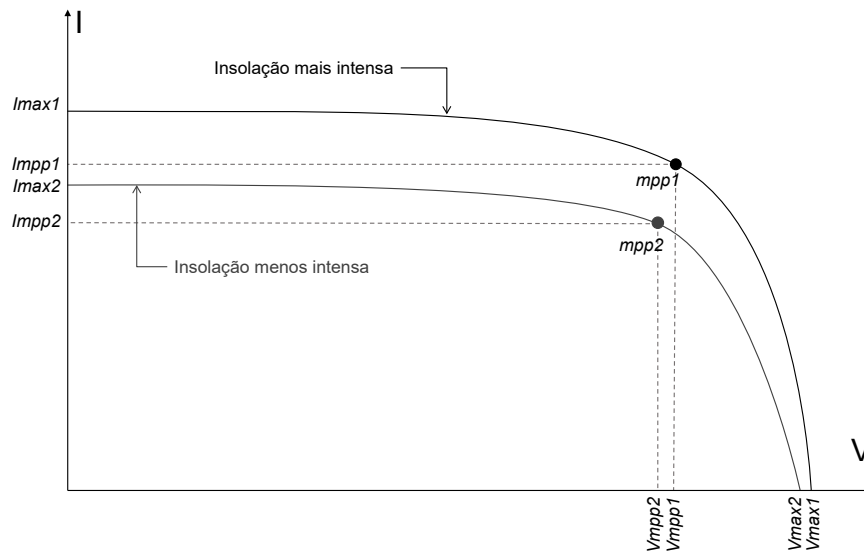


Figura 2.2: Curva $I \times V$ característica de célula fotovoltaica típica.

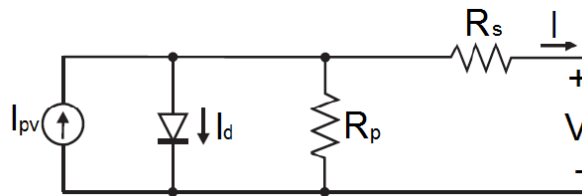


Figura 2.3: Circuito equivalente da célula fotovoltaica prática (de Oliveira, 2016).

Conversores simples têm por característica serem unidirecionais, podendo ser categorizados como abaixador, elevador ou abaixador-elevador de tensão. Considerado o conversor mais simples, o conversor abaixador de tensão, Buck, contém em sua forma mais reduzida um indutor (L_o), um diodo (D), um capacitor (C_o) e um semicondutor atuando como chave (S), como pode ser visto na figura 2.4(a).

O funcionamento exato não será discutido nesse trabalho, mas é importante saber que eles podem ser controlados pela ativação da chave S , alterando a frequência de ativação e outros parâmetros

Além desses, outra categoria importante de conversor são os conversores bidirecionais, que têm por característica a habilidade de conduzir corrente nos dois sentidos, da entrada para a saída e da saída para a entrada. Uma das topologias mais simples é o conversor boost bidirecional apresentado na figura 2.4(b).

2.5 INVERSORES

De forma semelhante aos conversores CC-CC, inversores são dispositivos formados por componentes passivos e semicondutores, mas que realizam a conversão da energia em corrente contínua para corrente alternada. É possível ainda que o sinal CA tenha uma ou mais fases, conforme necessidades do projeto. Para entendermos o funcionamento de um inversor podemos começar com o circuito mais simples: ponte H. Este é formado por apenas 4 chaves, que realizam a conexão entre a fonte e a carga (figura 2.5(a)). É um inversor monofásico, ou seja, gera apenas um sinal de corrente alternada de saída.

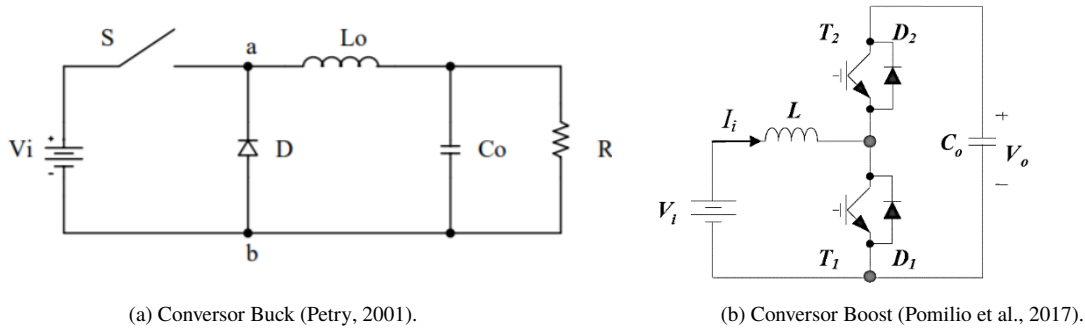


Figura 2.4: Conversores CC-CC citados.

Ele funciona invertendo a polaridade da carga conectada à fonte DC ao acionar de forma sincronizada duas chaves de cada vez, em um ciclo a chave $S1$ e $S4$, e em outro a chave $S2$ e $S3$, ou com todas as chaves abertas. Assim como os conversores CC-CC, o funcionamento não será investigado em detalhes. É importante sabermos que ele também funciona controlando a ativação das chaves com um sinal modulado na largura de pulso (PWM).

Para que seja possível conectarmos inversores às redes de energia trifásicas ou máquinas trifásicas, precisamos também de um inversor trifásico. Este é muito semelhante à ponte H apresentada acima, mas conta com 6 chaves eletrônicas para gerar o sinal trifásico (figura 2.5(b)). As chaves também são acionadas de forma a gerar um sinal PWM de uma fonte senoidal, mas agora é possível que gere um sinal trifásico.

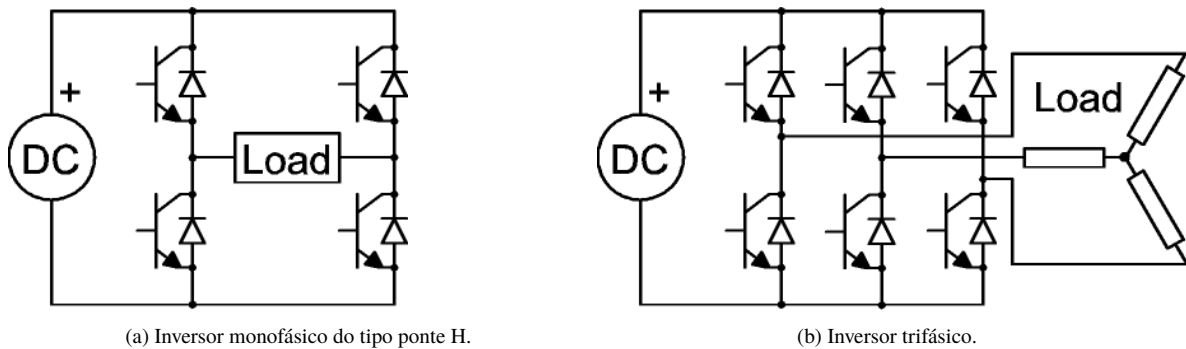


Figura 2.5: Inversores citados.

2.6 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Recentemente, a demanda de energia elétrica se tornou mais imprevisível, além disso, fontes renováveis são em sua maioria intermitentes, como a geração eólica e fotovoltaica. Sistemas de armazenamento de energia vêm para facilitar a integração dos sistemas, melhorar a estabilidade, confiabilidade, qualidade e eficiência da energia, provendo uma distribuição robusta e resiliente (Zobaa et al., 2018).

2.6.1 Tecnologias de sistemas de armazenamento de energia

Várias tecnologias de armazenamento de energia vêm sendo testadas para possibilitar uma maior flexibilidade nos seus sistemas. O uso de cada uma dessas tecnologias, tem suas especificidades, variando o tempo de resposta, capacidade, dentre outros parâmetros. Na

figura abaixo podemos comparar as características de potência e energia de cada tecnologia de armazenamento. Interessante é observar que baterias de íons de lítio ocupam o meio do gráfico, sendo um equilíbrio entre alta potência e energia.

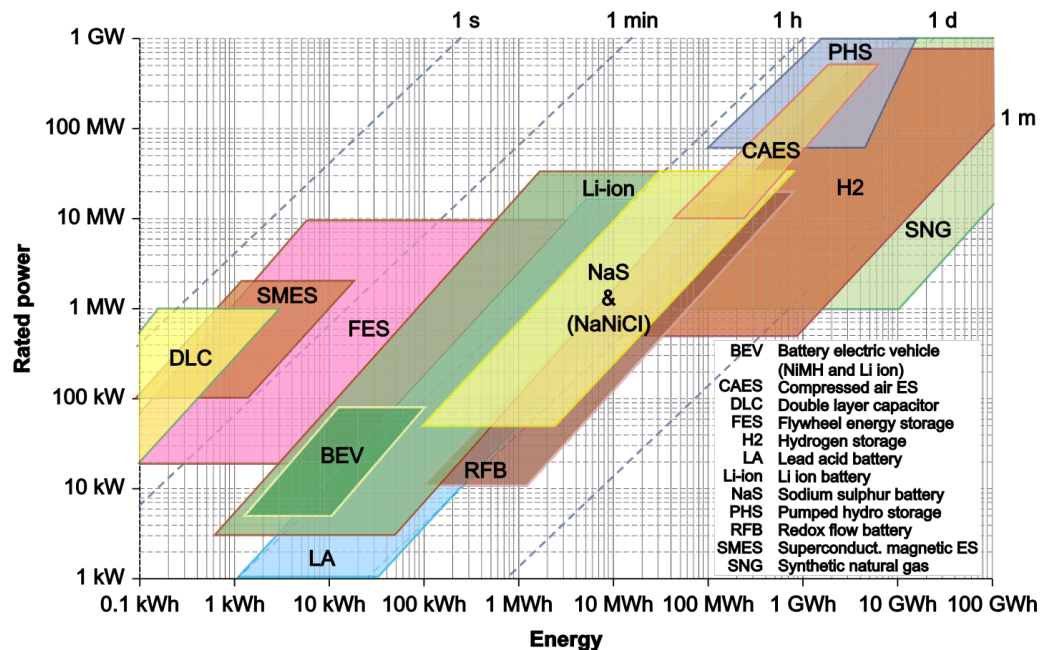


Figura 2.6: Comparação dos parâmetros de potência e energia de diferentes sistemas de armazenamento de energia.

2.6.2 Baterias

Baterias normalmente são consideradas como uma invenção recente, mas foram a partir delas que surgiram os primeiros estudos no campo da eletricidade. Em 1799, Alessandro Volta (1745–1827) publicou suas descobertas ao desenvolver o que iria ser conhecido posteriormente como pilha de volta, sendo essa reconhecida como a primeira célula eletroquímica usada para o armazenamento de energia elétrica. Posteriormente, em 1859, Gaston Planté (1834–1889) desenvolve o que é considerada a primeira bateria recarregável moderna: a bateria de chumbo ácido. Esta é composta de chapas de chumbo usadas como anodo e catodo, banhadas em ácido sulfúrico, o eletrólito. Desde então, essa tecnologia vem sendo melhorada por vários pesquisadores e laboratórios ao redor do mundo, sendo hoje em dia a tecnologia com maior oferta e menor custo no mercado de armazenamento de energia em baterias (Warner, 2015).

Um outro tipo de bateria recarregável muito conhecido é a bateria de níquel cádmio (NiCd). Esta foi desenvolvida em 1899 por Ernst Waldemar Jungner (1869–1924), mas apenas por volta de 1950 se tornou comercialmente disponível. Ela se popularizou muito com o aumento do consumo de dispositivos eletrônicos portáteis, sendo a única disponível até os anos 1980. Essas baterias apresentam o efeito memória e uma menor vida útil quando comparada com outros tipos de baterias, além de serem ambientalmente danosas. Foram substituídas em sua maior parte por baterias de níquel-hidreto metálico (NiMH), que têm características muito parecidas e um impacto ambiental reduzido.

Incentivado pelo mercado crescente de dispositivos portáteis a partir dos anos 1980, já comentado acima, inúmeras pesquisas foram desenvolvidas na tentativa de viabilizar células de íons de lítio, até então apenas teóricas. Em 1991 a Sony começa a comercialização dos primeiros dispositivos portáteis com esse tipo de tecnologia, que possui inúmeras vantagens:

maior densidade de potência e energia, baixa auto descarga e não possuir o efeito memória (Warner, 2015). Para resumir as características comentadas acima e trazer mais alguns detalhes, foi feita a tabela 2.1 abaixo.

Tabela 2.1: Comparativo entre diferentes tecnologias de baterias (Warner, 2015).

	Chumbo ácido	Níquel cádmio	Níquel metal hidreto	Íons de lítio ¹
Descritor da química do catodo	PbA/LAB	NiCd	NiMh	LCO
Energia específica (Wh/kg)	30-40	40-60	30-80	120-150
Densidade de energia (Wh/L)	60-70	50-150	140-300	250-450
Potência específica (W/kg)	60-180	150	250-1000	600
Densidade de potência (W/L)	100	210	400	1200-3000
Tensão nominal (V)	2,0	1,2	1,2	3,6-3,8
Ciclos	300-800	1000-2000	500-1500	>700
Auto descarga (% por mês)	3-5	20	30	1-5
Temperatura de operação (°C)	-20 a 60	-40 a 60	-20 a 60	-20 a 60

2.6.3 Baterias de íons de lítio

2.6.3.1 Funcionamento

Baterias são dispositivos eletroquímicos, quando olhados apenas com o olhar de engenharia elétrica é comum classificar a célula de bateria como uma caixa fechada e indivisível com propriedades normalmente apenas empíricas. Mas é importante que se tenha uma visão química por diversos motivos: a segurança do sistema é dependente da estabilidade térmica interna dos componentes das células, diferentes componentes químicos utilizados nas células podem resultar em características elétricas distintas e por consequência um circuito equivalente diferente na modelagem.

Na figura 2.7 pode-se ver uma ilustração do funcionamento de uma célula de íons de lítio no processo de descarga. É chamado de ânodo o eletrodo com o menor potencial da reação, o polo negativo, e de cátodo o polo positivo. Em células de íons de lítio, o ânodo é de algum material carbônico e o material do cátodo varia conforme o tipo da célula. Entre os eletrodos se encontra o eletrólito e o separador: o eletrólito tem por função conduzir os componentes químicos entre os eletrodos e o separador impede que elétrons passem de um lado para o outro por dentro da célula, permitindo apenas a passagem dos íons, que são átomos de lítio com carga positiva ou negativa. Conectado nos eletrodos estão os coletores de corrente, esses têm por função conduzir os elétrons para o exterior da célula e são de material metálico.

A bateria ganha sua capacidade de armazenar energia elétrica quando os átomos de íons de lítio se intercalam no ânodo ou cátodo durante a descarga e a carga. Na figura 2.7 está representado o processo de descarga de uma célula, sendo que na carga apenas os sentidos dos íons de lítio e da corrente se invertem.

Baterias de íons de lítio não são apenas um tipo de bateria com uma composição química, mas sim um conjunto de diferentes tipos. Isso se dá, normalmente, pela variação dos componentes do cátodo. Tipos muito comuns são o NCA (Lítio Níquel Cobalto Alumínio) e o NMC (Lítio Níquel Manganês Cobalto) que apresentam as maiores densidades de energia. Mas é possível encontrar outros tipos com propósitos mais específicos, como LTO (Titanato de Lítio), que é muito segura e tem uma alta densidade de potência.

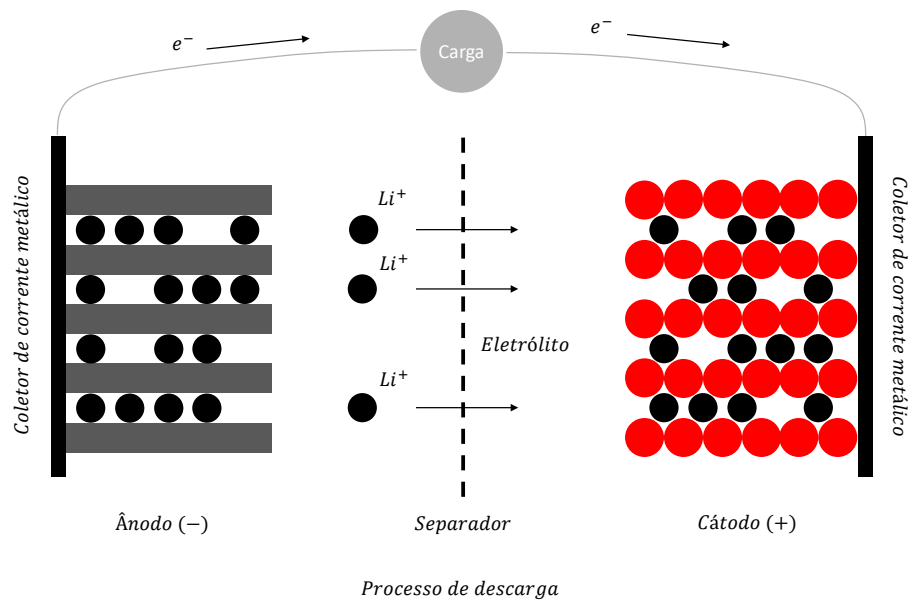


Figura 2.7: Esquema de funcionamento de uma célula de íons de lítio. Adaptado de (Walker, 2019)

2.6.3.2 Formatos

Assim como a química varia entre diferentes células de baterias de íons de lítio, há uma variedade de formatos. Entre os principais formatos comercializados atualmente estão: células prismáticas, *pouch* e cilíndricas.

As vantagens da célula cilíndrica incluem uma maior facilidade de fabricação e uso, resistência mecânica e um controle térmico facilitado. Um dos tamanhos mais comuns de bateria cilíndrica é o padrão 18650, medindo 18 mm de diâmetro e 65 mm de comprimento, mas variantes, como 21700 ou 20650, vêm se tornando cada vez mais comuns.

2.6.3.3 Segurança

Se tornou comum nos últimos anos vermos notícias de falhas em baterias de íons de lítio que causam todo tipo de problema, desde voos cancelados quando smartphones pegam fogo dentro da cabine até robô protótipo da NASA (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço dos Estados Unidos) sendo destruído após explosão das baterias. Assim, é necessário que tomemos todos os cuidados ao projetar um acumulador, entendendo o que leva as células à falha e prevendo formas evitar isso.

Essa preocupação com a segurança vem de um efeito chamado *Thermal Runaway* que acontece em células de íons de lítio. Que é basicamente uma reação em cadeia de aquecimento que gera um *feedback* positivo até sua destruição. Em elevadas temperaturas uma decomposição exotérmica dos componentes internos da bateria começa, quando o calor gerado nessa reação é maior que a capacidade da célula de dissipar se inicia o auto aquecimento. A taxa de decomposição aumenta conforme a temperatura, seguindo a equação de Arrhenius. Eventualmente, a estabilidade da célula é perdida, o que leva à ruptura da mesma, liberando o restante da energia eletroquímica armazenada na célula. A propagação é uma reação em cadeia quando a energia liberada de uma célula se espalha para as células adjacentes, fazendo com que elas aqueçam o suficiente para iniciar a decomposição exotérmica interna (Walker, 2019).

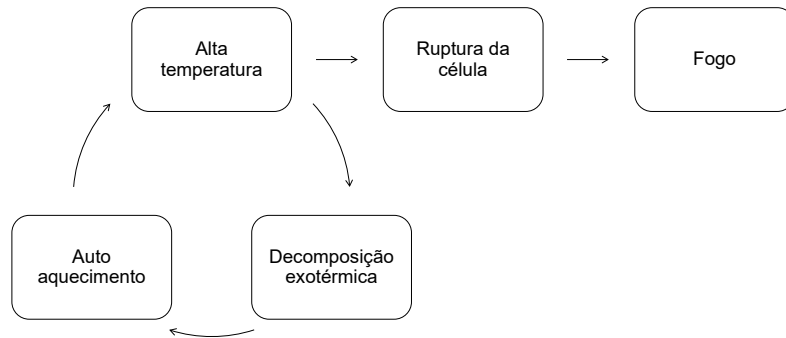


Figura 2.8: Esquema do funcionamento de um *Thermal Runaway*

Como mostrado, essa reação se inicia com uma alta temperatura e pode ter resultados catastróficos. Mas vários motivos podem causar esse aquecimento da célula, sendo eles: a falha térmica, que seria devido à elevadas temperaturas externas; a falha mecânica, quando a célula sofre penetração ou é dobrada; curto circuito interno, normalmente causado por falhas de manufatura das células; curto circuito externo; e abuso eletroquímico, que inclui sobrecarga e sobredescarga da célula. Cada um desses motivos deve ser investigado e cuidado deve ser tomado ao projetar sistemas de mitigação de cada uma dessas falhas.

No projeto de um acumulador é incluído um dispositivo de gerenciamento e monitoramento das células, conhecido como BMS. Esse tem por função medir a tensão, temperatura e corrente, além de ter a capacidade de controlar os dispositivos que usam a energia da bateria e em últimos casos desconectar o sistema. Um projeto mecânico sólido e bem feito do container pode prevenir falhas mecânicas, e o uso de fusíveis impedir curto-circuito.

REFERÊNCIAS

- de Oliveira, F. J. (2016). Estudo da implementação de um conversor cc-cc aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Dissertação de Mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Demonti, R. (2003). *Processamento da energia elétrica proveniente de módulos fotovoltaicos*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Demonti, R. (2019). Implantação de uma microrrede no departamento de engenharia elétrica da universidade federal do paraná. Em *XVIII ERIAC*, Foz do Iguaçu.
- Lasseter, R. H. (2002). Microgrids. Em *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309)*, volume 1, páginas 305–308 vol.1.
- Petry, C. A. (2001). Introdução aos conversores cc-cc.
- Pomilio, J. A., Paredes, H. K. M. e Deckmann, S. M. (2017). *Eletr nica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica*, p ginas 3.1–3.31. Universidade Estadual de Campinas.
- Tan, X., Li, Q. e Wang, H. (2013). Advances and trends of energy storage technology in microgrid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 44(1):179 – 191.
- Walker, W. (2019). Short course on lithium-ion batteries. fundamental concepts, battery safety, and modeling techniques.
- Warner, J. (2015). Chapter 2 - history of vehicle electrification. Em Warner, J., editor, *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design*, p ginas 9 – 21. Elsevier, Amsterdam.
- Zobaa, A., Ribeiro, P., Abdel Aleem, S. e Afifi, S. (2018). *Energy Storage at Different Voltage Levels: Technology, integration, and market aspects*.