

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Vitor Volpato Goulart

**PROJETO DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA
UTILIZANDO BATERIAS DE LÍTIO DE SEGUNDA VIDA
DESCARTADAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NISSAN LEAF**

Florianópolis

2021

Vitor Volpato Goulart

**PROJETO DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA
UTILIZANDO BATERIAS DE LÍTIO DE SEGUNDA VIDA
DESCARTADAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NISSAN LEAF**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Ricardo Rüther, Ph.D.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Goulart, Vitor

PROJETO DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA
UTILIZANDO BATERIAS DE LÍTIO DE SEGUNDA VIDA DESCARTADAS
DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NISSAN LEAF / Vitor Goulart ;
orientador, Ricardo Rüther, 2021.

91 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Armazenamento de energia
elétrica. 3. Baterias íon-lítio. 4. Baterias de segunda
vida. I. Rüther, Ricardo. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Vitor Volpato Goulart

**PROJETO DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA
UTILIZANDO BATERIAS DE LÍTIO DE SEGUNDA VIDA
DESCARTADAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NISSAN LEAF**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 19 de maio de 2021.

Prof. Jean Viane Leite, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Ricardo Rüther, Ph.D.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a Helena Flávia Naspolini, Dr.^a
Universidade Federal de Santa Catarina


Eng. Eletric. Marcel Hermano Dall Pai
WEG Equipamentos Elétricos

Este trabalho é dedicado aos meus pais, que me deram todos os meios e exemplos que me trouxeram até aqui.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, João e Vânia, que nunca mediram esforços para me proporcionar todo o conforto, educação e amor que me moldaram, além de me apoiarem em todos os sonhos que me trouxeram até aqui e ainda vão me levar longe.

Aos meus irmãos, João Pedro e Nina, que sempre me fizeram buscar ser o melhor exemplo que eu pudesse e me ensinaram que não há graça em ter e não ter com que dividir.

Ao Ricardo Rütther, meu orientador, não só neste trabalho, mas em toda a minha jornada no mundo das energia renováveis e armazenamento, responsável direto pelas oportunidades que recebi, pela bagagem que adquiri e pelas conquistas que tive nesses quase três anos.

À Caroline, amiga que esteve ao meu lado nas celebrações de vitória e nas consolações de derrota, alguém que realmente se importa e que é muito importante pra mim.

Aos meus amigos Burigo, João e Roldo, irmãos que a vida me deu, que me fazem olhar para o futuro de maneira mais clara, e que com certeza farão parte dele.

Aos meus amigos Caio, Gabriel e Rafael, companheiros de longa jornada e que, mesmo às vezes distantes, sempre estão presentes.

Ao Arthur e Matheus, pela amizade e pelo suporte durante o final da graduação.

Ao Giu, Rafa e Amanda, pessoas que tornaram o trabalho mais descontraído e divertido, e com quem construí grande amizade.

Aos meus tios, tias, primos, primas e avós, principalmente a Branca, que está ansiosa pela primeira formatura de um neto.

Aos meus amigos do Laboratório Fotovoltaica/UFSC, grandes exemplos de dedicação e companheirismo, que me proporcionaram excelentes momentos e muito aprendizado.

Aos sócios da NewCharge, Markus e Marinete, que me deram uma grande oportunidade de aprendizado, em que parte dos frutos se convertem neste trabalho.

Ao Waleri e toda a equipe do Fraunhofer ISE, que me acolheram, ensinaram e deixaram portas abertas.

Ao David, Joscha, Hirak, Marco e Heiner, uma mistura de nacionalidades que resultou em uma família quando a minha estava há mais de 10.000 km de distância.

A todos os outros amigos e amigas que, mesmo não cabendo nessa página, tem espaço no meu coração.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre os ombros de gigantes.”

(NEWTON, 1676)

RESUMO

Neste trabalho foi projetado um sistema de armazenamento de energia em baterias de íons de lítio descartadas de veículos elétricos, desde as definições elétricas básicas do arranjo – como a deliberação sobre a conexão série e paralela das células –, até a escolha dos principais componentes que compõem o circuito. Os módulos de bateria íon-lítio utilizados no sistema são provenientes de veículos elétricos Nissan Leaf que rodaram por cerca de cinco anos em uma frota de táxis e atingiram níveis razoáveis de redução em sua capacidade de carga. Esta redução de capacidade de carga compromete a autonomia de um veículo elétrico, mas representa uma desvantagem muito menor em sistemas estacionários de acumulação de energia elétrica. A reatribuição dessas baterias em aplicação estacionária proporciona a chamada segunda vida, onde se pode estender a vida útil dos elementos através de sua aplicação em sistemas de menor exigência de capacidade e restrição física. Como resultado do estudo, são apresentados: o projeto do conjunto de baterias, na forma de diagramas de blocos; os componentes escolhidos para cada tarefa, bem como os motivos que levaram a cada decisão; e a modelagem tridimensional simplificada, a fim de possibilitar a pré-visualização do sistema de baterias.

Palavras-chave: Bateria de lítio. BESS. Segunda vida. Nissan Leaf

ABSTRACT

In this thesis a lithium-ion battery energy storage system was designed, starting from second life batteries discarded from electric vehicles, from the basic electrical definitions of the array – as the option for the series and parallel connection of the battery cells –, to the choice of the main components that will comprise the circuit. The lithium-ion battery modules utilized in this system came from Nissan Leaf electric vehicles, which ran for about five years in a taxi fleet and reached reasonable levels of storage capacity reduction. This reduction in capacity is a serious limitation to an electric vehicle's driving range, but much smaller problem for stationary applications. The repurposing of these batteries in a stationary application leaves to what is called second life, when the element's life span can be extended through its use in stationary applications of lower capacity needs and room restriction. The results of this study are: the battery array project, using block diagrams; the chosen components for each duty, as well as the reasons for selecting each option; and the simplified three-dimensional modelling, important to help the previous visualization of the battery system.

Keywords: Lithium battery. BESS. Second life. Nissan Leaf

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de fluxo de energia em um sistemas isolado.....	23
Figura 2: Gráfico de fluxo de energia em sistemas isolados.....	24
Figura 3: Diagrama de fluxo de energia em um BESS operando em modo de despacho estratégico de energia.	25
Figura 4: Gráfico de fluxo de energia em um BESS operando em modo de despacho estratégico de energia.	26
Figura 5: Diagrama de fluxo de energia de um BESS atuando no controle da demanda contratada.	27
Figura 6: Gráfico de fluxo de energia de um BESS atuando no controle da demanda contratada.....	27
Figura 7: Diagrama de fluxo de energia de um BESS aplicado na proteção contra falta de energia elétrica.....	28
Figura 8: Gráfico de fluxo de energia de um BESS aplicado na proteção contra falta de energia elétrica.....	29
Figura 9: Diagrama de fluxo de energia de um BESS atuando na linearização de fonte solar.	30
Figura 10: Gráfico de fluxo de energia de um BESS atuando na linearização de fonte solar.	30
Figura 11: Topologias de conexão de BESS.....	31
Figura 12: Posição do BESS em relação ao medidor de energia elétrica.....	32
Figura 13: Diagrama de blocos geral de um BESS.....	33
Figura 14: Perfil de tensão em função da profundidade de descarga.....	34
Figura 15: Topologia elétrica do módulo do Nissan Leaf.....	36
Figura 16: Princípio de balanceamento de uma célula de bateria.	37
Figura 17: Hierarquia de um BMS genérico de três níveis.	38
Figura 18: Diagrama de blocos de uma <i>junction-box</i>	39
Figura 19: Diagrama de blocos do QDCC.	40
Figura 20: Exemplo de inversão de 48 V CC para 220 V CA.	41
Figura 21: Diagrama de blocos simplificado do EMS.	43
Figura 22: Nissan Leaf utilizado como táxi no Rio de Janeiro. Fonte: Carro Elétrico (2017).	44

Figura 23: Diagrama de blocos simplificado do Laboratório Fotovoltaica/UFSC. ...	46
Figura 24: Diagrama de blocos da gaveta de baterias.	48
Figura 25: Arranjo série de gavetas para composição do armário de baterias.	50
Figura 26: Diagrama de blocos dos armários de bateria ligados em paralelo ao barramento.	51
Figura 27: EMUS G1 <i>Cell Module – Small type</i> . Fonte: EMUS BMS (2021).	55
Figura 28: Comportamento da potência dissipada para uma corrente de balanceamento constante.	56
Figura 29: EMUS G1 CAN <i>Cell Group Module</i> . Fonte: EMUS BMS (2021).	57
Figura 30: EMUS G1 BMS <i>Control Unit</i> . Fonte: EMUS BMS (2021).	58
Figura 31: Diagrama sugerido de conexão dos produtos listados. Fonte: EMUS BMS (2021).	59
Figura 32: Diagrama de blocos completo da gaveta.	60
Figura 33: Modelo 3D do módulo de bateria do Nissan Leaf. Fonte: Brock Winberg (2015).	61
Figura 34: Modelo 3D da barra de cobre.	62
Figura 35: Modelo 3D do fusível Schurter 8020.2055. Fonte: Schurter (2021).	62
Figura 36: Segmento do diagrama de conexões do BMS_S.	63
Figura 37: Modelo 3D simplificado do BMS_S.	64
Figura 38: Modelo 3D do BMS_M. Fonte: EMUS BMS (2021).	64
Figura 39: Modelo 3D do 3-way CAN <i>Connector</i> . Fonte: EMUS BMS (2021).	65
Figura 40: Modelo 3D da ventoinha 24 V. Fonte: Philip Diegel (2020).	66
Figura 41: Modelo 3D do conector de potência APTIV 33211753. Fonte: APTIV (2021).	67
Figura 42: Modelo 3D do conector de comunicação Amphenol MRJ5480BF. Fonte: Amphenol (2020).	67
Figura 43: Modelagem 3D da gaveta de baterias.	68
Figura 44: Detalhe interno da modelagem 3D, mostrando a ligação dos módulos de bateria.	69
Figura 45: Diagrama de blocos simplificado do armário.	70
Figura 46: Diagrama de blocos da <i>junction-box</i>	71
Figura 47: Modelo 3D simplificado do BMS_C. Fonte: EMUS BMS (2021).	71

Figura 48: Modelo 3D da chave contatora TDK HVC500B-24. Fonte: TDK (2021).	73
Figura 49: EMUS G1 <i>Bus Bar Dual Range Current Sensor</i> . Fonte: EMUS BMS (2021).	74
Figura 50: Modelo 3D da chave EATON M22-WRKK10. Fonte: EATON (2020)..	74
Figura 51: Modelo 3D do EPO EATON M22-PVK11. Fonte: EATON (2020).....	75
Figura 52: Modelo 3D do conector de potência APTIV 35166503. Fonte: APTIV (2020).	76
Figura 53: Modelo 3D do conector de alimentação TE Molex 2-179553-4. Fonte: TE (2020).	76
Figura 54: Modelo 3D do conector USB Amphenol MUSBD111M1. Fonte: Amphenol (2020).....	77
Figura 55: EMUS G1 <i>Display Unit</i> . Fonte: EMUS BMS (2021).	77
Figura 56: Modelo 3D da luz LED TRU 140394.....	78
Figura 57: Modelagem 3D simplificada da <i>junction-box</i>	79
Figura 58: Detalhe do painel na modelagem 3D.....	79
Figura 59: Diagrama de blocos do sistema.	80
Figura 60: Modelagem 3D do sistema completo.....	81

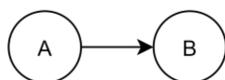
LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tarifa de energia em algumas concessionárias brasileiras.	25
Tabela 2: Média de capacidade medida para cada carro avaliado. Fonte: Laboratório Fotovoltaica/UFSC (2019).	45
Tabela 3: Valores de tensão para a célula, módulo e gaveta.	48
Tabela 4: Especificação básica de alguns modelos selecionados de PCS.	49
Tabela 5: Relação mínima e máxima de módulos e gavetas obtida para cada modelo de PCS.	50
Tabela 6: Resultado do cálculo da capacidade esperada para um conjunto de armários de bateria.	51
Tabela 7: Modelos disponíveis para o BMS_S no catálogo da EMUS.	54
Tabela 8: Características técnicas do EMUS G1 <i>Cell Module – Small type</i>	55
Tabela 9: Características técnicas do EMUS G1 CAN Cell Group Module.	57
Tabela 10: Características técnicas do G1 BMS <i>Control Unit</i>	58
Tabela 11: Lista de componentes selecionados para o projeto.	82

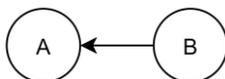
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
BMS	<i>Battery Management System</i> (Sistema de gerenciamento de baterias)
CA	Corrente Alternada
CAN	<i>Controlled Area Network</i> (Rede de área controlada)
CC	Corrente Contínua
CLP/PLC	Controlador Lógico Programável / <i>Programmable Logic Controller</i>
CTA	Chave de Transferência Automática
DoD	<i>Depth of Discharge</i> (Profundidade de descarga)
DPS	Dispositivo de Proteção contra Surtos
EMS	<i>Energy Management System</i> (Sistema de gerenciamento de energia)
EPO	<i>Emergency Power Off</i> (Desligamento de emergência)
EUA	Estados Unidos da América
GD	Geração Distribuída
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i> (Sistema de ar-condicionado)
Idec	Instituto de Defesa do Consumidor
IHM	Interface Homem-Máquina
IMD	<i>Insulation Monitoring Device</i> (Dispositivo de monitoramento de isolamento)
ONS	Operador Nacional do Sistema elétrico
PCS	<i>Power Conversion System</i> (Sistema de conversão de potência)
QDCA	Quadro de Distribuição de Corrente Alternada
QDCC	Quadro de Distribuição de Corrente Contínua
QTA	Quadro de Transferência Automática
RTE	<i>Round Trip Efficiency</i> (Eficiência de ciclo)
SIN	Sistema Interligado Nacional
SoC	<i>State of Charge</i> (Estado de carga)
SoH	<i>State of Health</i> (Estado de saúde)
UC	Unidade Consumidora

LISTA DE SÍMBOLOS



Fluxo de energia de A para B



Fluxo de energia de B para A



Conexão elétrica de corrente contínua



Conexão elétrica de corrente contínua, polo negativo



Conexão elétrica de corrente alternada



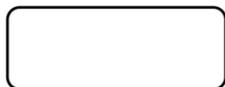
Conexão de comunicação



Representação de componentes no diagrama



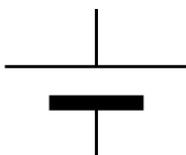
Representação de componentes no diagrama



Ligação com componente no diagrama



Ponto de aterramento elétrico



Célula de bateria íon-lítio

A Ampére

Ah Ampére-hora

V Volt

W Watt

Wh Watt-hora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Objetivo geral	19
1.2	Objetivos específicos	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1	Ciclo de vida das baterias de íon-lítio	20
2.1.1	Início da vida.....	20
2.1.2	As etapas da vida	20
2.1.3	Fim da vida.....	21
2.2	Sistemas de armazenamento de energia em baterias	22
2.2.1	Definição de um BESS.....	22
2.2.2	Aplicações de um BESS.....	22
2.2.2.1	<i>Redes isoladas de energia elétrica (off-grid)</i>	22
2.2.2.2	<i>Despacho estratégico de energia.....</i>	24
2.2.2.3	<i>Controle de demanda contratada (peak-shaving)</i>	26
2.2.2.4	<i>Proteção contra falta de energia (back-up)</i>	27
2.2.2.5	<i>Linearização de fonte eólica e solar.....</i>	29
2.2.2.6	<i>Suporte de qualidade do suprimento</i>	31
2.2.3	Topologias de conexão	31
2.2.3.1	<i>Conexão série e paralela</i>	31
2.2.3.2	<i>Posição em relação ao medidor</i>	32
2.2.4	Funcionamento básico de um BESS.....	33
2.2.4.1	<i>Diagrama geral de blocos</i>	33
2.2.4.2	<i>Células e módulos de bateria de íon-lítio.....</i>	34
2.2.4.3	<i>BMS.....</i>	36
2.2.4.4	<i>Junction-box</i>	38
2.2.4.5	<i>QDCC.....</i>	39

2.2.4.6	<i>PCS</i>	40
2.2.4.7	<i>QDCA e QTA</i>	41
2.2.4.8	<i>Sistemas auxiliares</i>	41
2.2.4.9	<i>EMS</i>	42
3	MÉTODO	44
3.1	A origem do projeto.....	44
3.1.1	Parceria Fotovoltaica/UFSC e Nissan do Brasil	44
3.1.2	Estudo das baterias do Nissan Leaf	45
3.2	Definições iniciais.....	46
3.2.1	Funcionalidades	46
3.2.2	Topologia de conexão do BESS	46
3.2.3	Parâmetros de operação	47
3.3	Topologia elétrica e de comunicação.....	47
3.3.1	Topologia elétrica	47
3.3.1.1	<i>Gaveta</i>	47
3.3.1.2	<i>Armário</i>	48
3.3.1.3	<i>Sistema</i>	51
3.3.2	Topologia de controle	52
3.3.2.1	<i>Especificação necessária</i>	52
3.3.2.2	<i>Comparativo de modelos considerados</i>	53
3.3.2.3	<i>Modelo escolhido</i>	54
3.3.2.3.1	BMS_S.....	54
3.3.2.3.2	BMS_M.....	56
3.3.2.3.3	BMS_C.....	57
3.3.2.3.4	Topologia de comunicação.....	59
4	RESULTADOS	60
4.1	Gavetas.....	60

4.1.1	Diagrama de blocos completo	60
4.1.2	Ligação dos módulos de bateria	60
4.1.3	Fusível	62
4.1.4	BMS_S	63
4.1.5	BMS_M	64
4.1.6	Arrefecimento	65
4.1.7	Conectores	66
4.1.8	Modelo 3D	68
4.2	Armários	69
4.2.1	Diagrama de blocos completo	69
4.2.2	Junction-box	70
4.2.2.1	<i>BMS_C</i>	71
4.2.2.2	<i>Fusível</i>	72
4.2.2.3	<i>Chave contatora</i>	72
4.2.2.4	<i>Sensor de corrente</i>	73
4.2.2.5	<i>Chave de comando</i>	74
4.2.2.6	<i>Botão de emergência</i>	75
4.2.2.7	<i>Conectores</i>	75
4.2.2.8	<i>Display</i>	77
4.2.2.9	<i>LED de indicação “ligado”</i>	78
4.2.2.10	<i>Modelo 3D</i>	78
4.3	Sistema	80
4.3.1	Diagrama de blocos completo	80
4.3.2	Modelo 3D	80
4.3.3	Lista de materiais	81
5	CONCLUSÕES	83
	REFERÊNCIAS	85

1 INTRODUÇÃO

Por mais que a necessidade de armazenamento de energia elétrica seja uma problemática relativamente atual, há séculos o ser humano domina um conceito semelhante, quando, por exemplo, armazenava gordura animal para abastecer as tochas que os provinham com iluminação mesmo quando não havia mais luz do sol. Por mais distante que esse exemplo pareça, a ideia de intermitência de um certo recurso fez a humanidade manipular o curso natural das coisas e passar a controlar as formas de energia, passo fundamental no progresso das civilizações. (PRESSLEY, 1996)

A evolução dessa tendência nos traz aos dias de hoje, onde a complexidade da nossa relação com a energia elétrica nos leva à inevitabilidade de armazená-la, para que possamos utilizá-la conforme demanda, e não apenas quando ela estaria naturalmente disponível. Nesse conceito, podemos abranger desde as barragens construídas em usinas hidrelétricas – onde a energia, na verdade, é armazenada na forma potencial gravitacional –, até a bateria do celular que cada um de nós carrega no bolso diariamente.

Os automóveis movidos a eletricidade também são um bom exemplo disso, uma vez que a transição para mobilidade elétrica significou o aumento da necessidade de armazenamento de energia elétrica. Dada a acentuada redução dos custos de aquisição desse meio de transporte – majoritariamente representado pelos acumuladores de energia –, o volume de baterias, principalmente as de íon-lítio, vem crescendo intensamente nos últimos anos, em uma curva de formato exponencial. (TYSON; CHARLIE, 2019)

Por mais que longa, a vida útil dessas baterias quando aplicadas em carros elétricos não é infinita, significando que, em cerca de dez anos ou menos, elas deixam de servir com qualidade ao seu propósito inicial, limitando sobremaneira a autonomia do veículo. Mesmo assim, essas células ainda possuem razoável capacidade de armazenamento de energia que, por mais que não seja mais compatível com sua aplicação em automóveis, pode ser muito bem recebida em outros tipos de sistema. (STRICKLAND et al., 2014)

Paralelamente à ascensão da mobilidade elétrica, o armazenamento de energia em baterias de grande porte para outras aplicações é algo que, mesmo para muitos ainda parecendo um futuro distante, já pode ser considerado uma realidade, com diversos casos de sucesso pelo mundo. No Brasil, mesmo que ainda sem grande expressão, esse tipo de tecnologia já está em funcionamento, auxiliando a rede elétrica e os consumidores em funções

como aumento da qualidade do suprimento e redução de custos com energia elétrica. (GREENER; NEWCHARGE, 2021; PARKER BRAZIL, 2019)

Por possuírem menor restrição de massa e volume quando comparados a um veículo, sistemas de armazenamento de energia estacionários podem ser grandes beneficiados das células descartadas de veículos elétricos, chamadas de baterias de segunda vida. A reutilização desses elementos tem o objetivo de diluição dos custos de produção e dos impactos ambientais gerados pelo seu ciclo de vida, indicando forte viabilidade financeira e ambiental para esse tipo de aplicação. (CICCONI et al., 2012)

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é projetar o conjunto de acumuladores do sistema de armazenamento de energia com baterias de segunda vida do veículo elétrico Nissan Leaf, associado ao projeto de pesquisa e desenvolvimento realizado no Laboratório Fotovoltaica/UFSC (www.fotovoltaica.ufsc.br).

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos desse trabalho, podem ser elencados:

- definir os parâmetros do arranjo de baterias dos sistema quanto à ligação série e paralelo dos módulos;
- determinar a topologia e as especificações necessárias para o sistema de gerenciamento de baterias e escolher um modelo compatível;
- especificar e selecionar os componentes que compõe a caixa de junção, mais conhecida pela nomenclatura internacional *junction-box*, que será adotada neste trabalho, como chaves contadoras, fusíveis, sensores e conectores;
- desenhar modelos tridimensionais simplificados do sistema projetado em ferramenta computacional, auxiliando na visualização prévia do resultado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CICLO DE VIDA DAS BATERIAS DE ÍON-LÍTIO

2.1.1 Início da vida

Compostas dos mais variados conjuntos de elementos químicos, as baterias chamadas de íon-lítio são na verdade uma família, onde diversas combinações diferentes geram modelos com características, custos e aplicações muito distintas. A grande semelhança entre todas essas combinações é a presença do lítio, metal extremamente leve e de baixo potencial de redução, que possibilita que os compostos gerados armazenem grandes quantidades de energia em leves e reduzidos volumes. (NITTA et al., 2015)

Por mais que estejam em geral associadas a energias renováveis e mobilidade elétrica, é inegável o impacto ambiental gerado pela extração dos elementos químicos para sua construção e pelo restante do processo produtivo das baterias. As reservas de vários dos elementos químicos usados em sua produção estão hoje concentradas em poucos países, muitos deles subdesenvolvidos, com pouco zelo ambiental e histórico de exploração de mão de obra em atividades extrativistas. (COSTA et al., 2021)

2.1.2 As etapas da vida

O emprego de baterias íon-lítio em veículos elétricos, embora não tão recente, ganhou força na segunda década desse século, onde a autonomia de rodagem e o preço desses carros passaram a atingir níveis já atraentes para alguns usuários de maior poder aquisitivo. A boa relação de custo e benefício das baterias de lítio acabou tornando essa tecnologia a mais aplicada nos meios de transporte, inclusive por conta de sua boa densidade de energia armazenada. Mesmo que a vida útil dessas baterias nos carros não seja curta, à medida que as células são carregadas e descarregadas, o desgaste químico dos elementos que as compõem resultam em uma perda de desempenho e autonomia, indicando que os acumuladores de energia já estão com capacidade de retenção de energia menor que a nominal e precisam de manutenção. (IEA, 2020)

Atenta a essa necessidade, uma *joint venture* entre as japonesas Nissan Motor Corporation e a Sumitomo Corp, batizada de 4R Energy Corp, iniciou suas operações no ano de 2020 com o objetivo de recondicionar os arranjos de baterias dos veículos elétricos Nissan Leaf, de modo que sua vida útil seja prolongada. O serviço da empresa consiste na substituição dos módulos do carro que estejam com mais de 20% de sua capacidade inicial comprometida, por unidades também usadas, mas com maior capacidade remanescente. A

medida visa aumentar a autonomia dos veículos, estendendo sua primeira vida e postergando seu descarte. (HANLEY, 2018)

Os módulos retirados dos veículos elétricos, por mais que possuam menos de 80% da capacidade inicial, ainda têm grande potencial para armazenamento de energia, tornando possível sua aplicação em sistemas customizados para diversas outras aplicações, principalmente estacionárias, também chamada de segunda vida. A baixa restrição física dos sistemas estacionários casa muito bem com a maior necessidade de espaço necessária, uma vez que, após a degradação das células, sua densidade energética é reduzida na mesma proporção.

Na aplicação estacionária os sistemas de armazenamento de energia podem executar diversas funções, tanto em benefício de consumidores específicos, quanto ao sistema elétrico como um todo. Tais funções são abordadas em detalhes no capítulo seguinte, onde fica evidente a gama de benefícios que podem ser fornecidos pelos sistemas de baterias. A reutilização dessas células de bateria traz generosos benefícios econômicos e ambientais, uma vez que não é necessário manufaturar um novo conjunto para a aplicação, poupando recursos ambientais, energéticos e financeiros. Além disso, o reemprego das baterias acaba por estender seu ciclo de vida, resultando em uma diluição do custo econômico e ambiental da construção original. (CICCONI et al., 2012)

2.1.3 Fim da vida

No momento em que estas baterias – já muito aproveitadas durante toda sua alongada vida útil – deixam de suprir a energia necessária em sua aplicação final, chega finalmente o fim de sua vida. A legislação de diversos países do mundo, incluindo o Brasil, prevê hoje a obrigação de logística reversa para qualquer tipo de bateria comercializada. Na prática, os fabricantes são incumbidos de recolher os produtos vendidos e proporcionar o descarte correto de todo o conjunto. (BORGES; FRANCO, 2013)

A complexidade do processo de reciclagem dos elementos varia conforme a química usada na composição de cada bateria, gerando significativa distinção nos processos industriais necessários para recuperar os elementos originalmente utilizados na fabricação de cada uma. Alguns metais como cobalto, níquel, manganês, alumínio e o próprio lítio podem ser extraídos nesses processos, gerando uma nova cadeia de valor para a bateria, onde a reciclagem, além de atender aos requisitos de responsabilidade ambiental pré-estabelecida legalmente, também retorna parte do investimento realizado na produção dessa bateria. (SLATER et al., 2019)

Por mais que muitos aparelhos como *laptops* e *smartphones* sejam equipados com baterias de lítio, o volume que esse mercado representa ainda não é significativo o suficiente para que haja grande atenção para o mercado de reciclagem de acumuladores de energia. A promessa de mudança nesses números está no rápido avanço da mobilidade elétrica e das tecnologias de armazenamento estacionário de energia, que serão futuramente responsáveis por um enorme volume de baterias que, eventualmente, atingiram o final de sua vida. Espera-se que com a realização dessa tendência muita coisa mude no mercado de baterias, inclusive a ótica sobre a qual é tratada a questão do fim de suas vidas e reciclagem. (TYSON; CHARLIE, 2019)

2.2 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS

2.2.1 Definição de um BESS

Focando em aplicações estacionárias de armazenamento de energia elétrica, as baterias têm papel essencial em diversas aplicações que dizem respeito à qualidade e confiabilidade do suprimento, algo que há tempo é fundamental em instalações como aeroportos e hospitais. Mesmo que as baterias íon-lítio sejam algo popularizado apenas na última década, as baterias chumbo-ácido vêm executando a tarefa de armazenar e energia elétrica há muito tempo, mostrando que o conceito de sistemas de armazenamento de energia elétrica não é novo. (WEG, 2021)

No universo moderno dos sistemas baseados em novas tecnologias de armazenamento de energia, os conjuntos são em geral conhecidos pela sigla em inglês ESS, de *Energy Storage System*. Por mais que os ESS possam funcionar com os mais variados princípios de armazenamento da energia, inclusive conceitos físicos relacionados a energia mecânica e térmica, esse trabalho aborda apenas os do tipo BESS, quando se especifica que baterias (por isso o “B”, de *Battery*) fazem o papel de armazenamento de energia no ESS. (NYSERDA, 2021)

2.2.2 Aplicações de um BESS

2.2.2.1 Redes isoladas de energia elétrica (*off-grid*)

Dadas as dimensões continentais do Brasil e a complexidade de seu sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, se faz necessário um controle centralizado de todos os nós que o compõe, a fim de garantir constante suprimento de energia elétrica para todo o país. Com esse objetivo, a criação do Sistema Interligado Nacional (SIN), visa permitir ao Operador Nacional do Sistema (ONS) tomar decisões sobre a geração de

energia e seu fluxo até os consumidores. O SIN é dividido em quatro subsistemas, sendo eles Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte, garantindo que as sazonalidades de carga e geração de cada região possam ser amenizadas e haja elevação da confiabilidade do sistema elétrico brasileiro. (ONS, 2021a)

Apesar do SIN abranger mais de 99% da carga do país, algumas localidades, principalmente na região Norte ainda não possuem conexão com os nós do sistema interligado, os denominados sistemas isolados (SISOL). Segundo a EPE, em 2019 existiam 212 sistemas isolados no Brasil, distribuídos pelos estados do Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia e Roraima, todos na região norte; a ilha de Fernando de Noronha, em Pernambuco, e algumas poucas cidades do Mato Grosso. Dentre todas as localidades atendidas pelo SIN, Boa Vista, no estado de Roraima, é a única capital que não faz parte da lista. (EPE, 2020, 2021; ONS, 2021b)

Uma vez que não há conexão com o SIN, a dinâmica de operação de um BESS em um sistema isolado pode ser ilustrada com os cenários mostrados na Figura 1. Admitindo que o BESS está inicialmente descarregado, em A tem-se, simultaneamente, o fornecimento de energia para ele e para a carga, em B o carregamento já está concluído, logo a geração está apenas alimentando a carga, em C o fornecimento de energia é compartilhado entre a Geração e o BESS e, por fim, em D apenas o BESS está alimentando a carga.

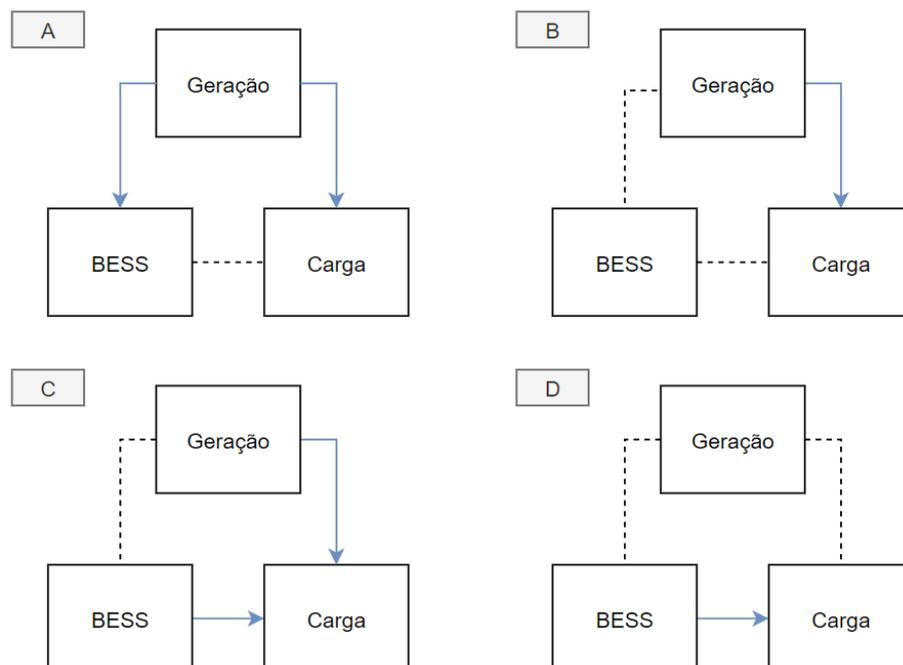


Figura 1: Diagrama de fluxo de energia em um sistemas isolado.

Tal dinâmica exemplifica a operação de um sistema hipotético, onde a presença de um sistema de geração intermitente, como uma usina eólica ou solar, torna o BESS corresponsável pelo fornecimento de energia, fazendo com que haja abastecimento contínuo das cargas.

Uma aplicação interessante para BESS em sistemas isolados é sua integração com energia solar e geração diesel, o que resulta em um abastecimento energético confiável, de baixo custo e relativamente baixo impacto ambiental. Na Figura 2 pode ser observado o fluxo de energia entre os diferentes elementos do sistema. Chama-se atenção ao padrão adotado para o sinal da potência neste gráfico e nos seguintes, considerando positivo para fontes de energia e negativo para cargas. A bateria, uma vez que opera nos dois sentidos, tem sua carga representada pelo sinal negativo e a descarga pelo positivo. (RODRÍGUEZ-GALLEGOS et al., 2018)

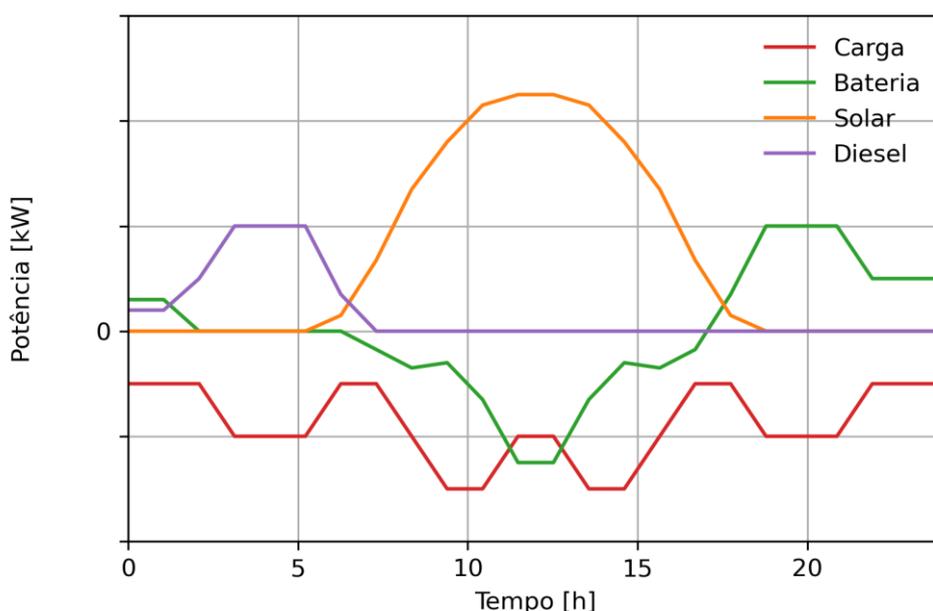


Figura 2: Gráfico de fluxo de energia em sistemas isolados.

2.2.2.2 Despacho estratégico de energia

Após publicação da REN 414/2010 pela ANEEL, foi adotado no sistema elétrico brasileiro o regime de postos tarifários, horários pré-definidos onde consumidores alocados na tarifa branca de energia ficam expostos à cobrança de valores por quilowatt-hora variáveis em relação à hora do dia. Conforme a determinação, as concessionárias possuem certa autonomia na definição das janelas de tempo relativas ao horário de ponta, o horário intermediário e o horário fora-ponta. Além disso, existe o horário especial, também conhecido como horário

irrigante, onde produtores rurais possuem desconto na tarifa para energia usada em irrigação durante a madrugada. (ANEEL, 2010, 2016)

No estado de Santa Catarina, atendido pela CELESC, a diferença de valor entre os postos tarifários é pequena quando comparada a outros estados. Na Tabela 1 podem ser observados os valores praticados pela COELBA (concessionária baiana), CELESC e pela ENEL-SP (concessionária paulista) para unidades consumidoras atendidas em média tensão. Nota-se que, por mais que tenha o menor custo no horário fora-ponta, a COELBA possui uma diferença muito grande no valor na ponta, chegando a um múltiplo de quase oito vezes. (CELESC, 2021; COELBA, 2021; ENEL, 2021)

Tabela 1: Tarifa de energia em algumas concessionárias brasileiras.

	COELBA	CELESC	ENEL SP
Horário ponta [R\$/kWh]	R\$ 2,16	R\$ 1,28	R\$ 1,02
Horário fora-ponta [R\$/kWh]	R\$ 0,27	R\$ 0,33	R\$ 0,32
Delta [R\$]	R\$ 1,89	R\$ 0,95	R\$ 0,71
Delta [%]	793%	385%	324%

Dada a diferença do valor da energia elétrica nos horários de ponta e fora-ponta, uma possível aplicação para BESS é o chamado despacho estratégico de energia elétrica, onde o princípio é ilustrado na Figura 3. Em A a rede elétrica alimenta a carga e carrega a bateria com a energia mais barata, em B, onde a energia é mais cara, o sistema de armazenamento se encarrega de fornecer a energia solicitada pela carga. (RENIERS; MULDER; HOWEY, 2021)

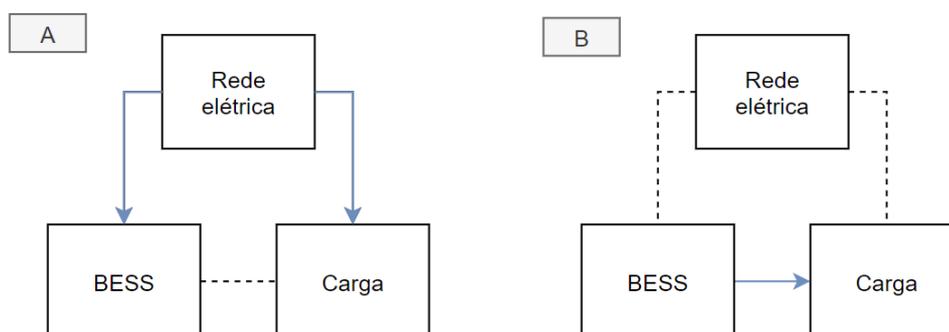


Figura 3: Diagrama de fluxo de energia em um BESS operando em modo de despacho estratégico de energia.

Na Figura 4 é possível notar o sistema operando no mesmo modo, com atenção ao intervalo entre 18h00 e 21h00, onde a bateria é descarregada a fim de que a carga não exija

energia da rede elétrica. Dessa maneira os custos com energia elétrica podem ser severamente reduzidos, uma vez que toda a carga do horário ponta é deslocada para os instantes onde há um menor valor de tarifa em vigor.

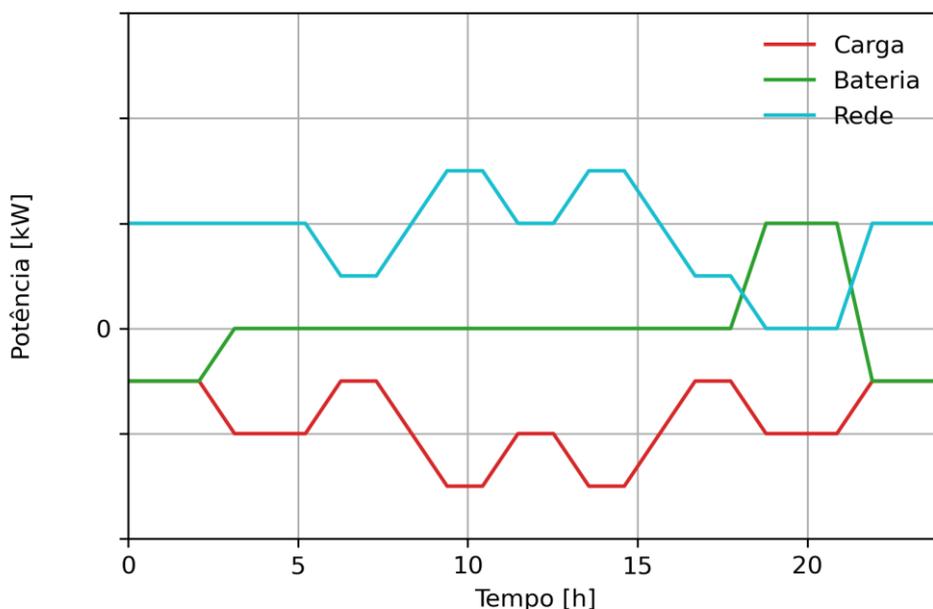


Figura 4: Gráfico de fluxo de energia em um BESS operando em modo de despacho estratégico de energia.

2.2.2.3 Controle de demanda contratada (*peak-shaving*)

Para consumidores classificados nas faixas de maior consumo de energia elétrica, com regras variando entre as concessionárias, existe a contratação da chamada demanda de energia elétrica, que estabelece um limite de potência que pode ser solicitado da rede por parte da unidade consumidora. O cálculo é realizado pela média da potência praticada em intervalos de quinze minutos, fixados nos quartos de uma hora (00-14, 15-29, 30-44 e 45-59). Dessa forma, se a UC ultrapassar a demanda contratada em alguma dessas leituras, há cobrança adicional da conta de energia elétrica, com valor relativamente mais caro do que o normalmente praticado na contratação da demanda. A aplicação de sistemas de armazenamento pode ser muito interessante para acabar com as multas por ultrapassagem de demanda contratada, muitas vezes permitindo que seja também diminuído o valor contratado com a concessionária. (MANOJKUMAR et al., 2021)

O diagrama da Figura 5 mostra a dinâmica de operação de um sistema de baterias configurado dessa maneira. Em A o sistema de armazenamento está auxiliando o suprimento de energia para a carga, evitando que potência além do limite estabelecido seja solicitada da

rede elétrica. Já em B a rede elétrica recarrega o BESS e alimenta a carga, numa situação onde a soma dos dois não ultrapassa a demanda contratada.

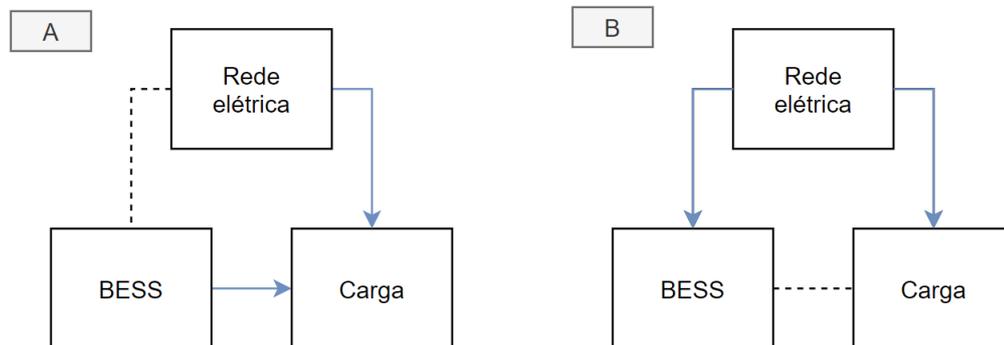


Figura 5: Diagrama de fluxo de energia de um BESS atuando no controle da demanda contratada.

No exemplo da Figura 6 é mostrado uma unidade consumidora com demanda contratada de 200 kW, ou seja, valores médios de potência da carga em cada intervalo que ultrapassem esse valor, resultam em considerável cobrança extra na conta de energia elétrica. Para evitar isso, o BESS proposto identifica a ultrapassagem do limite e, imediatamente, supre o excesso com a energia armazenada, carregando posteriormente quando a carga está reduzida.

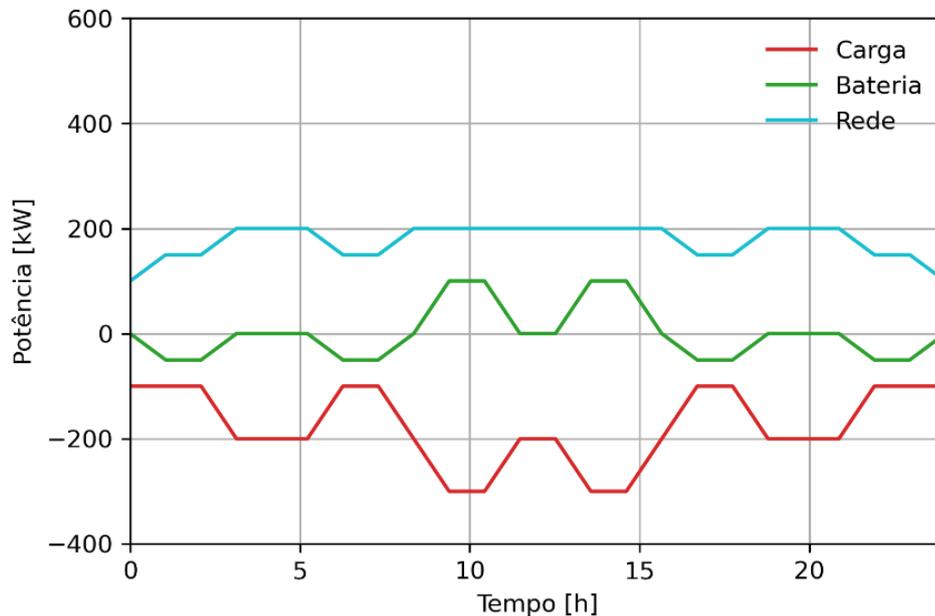


Figura 6: Gráfico de fluxo de energia de um BESS atuando no controle da demanda contratada.

2.2.2.4 Proteção contra falta de energia (back-up)

Segundo o Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor (IDEC), 47% dos consumidores de energia elétrica no Brasil não recebem um serviço de qualidade adequada, chegando a incríveis 62% na região Centro-oeste do país, apontam os dados de uma pesquisa

realizada com base nos dados fornecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (IDEC, 2019).

Unidades Consumidoras (UC) comerciais são duramente afetadas com essas interrupções, uma vez que muitos processos fabris precisam ser interrompidos e recomeçados a cada ocorrência de uma falta na rede elétrica. Outro exemplo relevante são hospitais e instituições relacionadas, onde é necessária energia ininterrupta e de qualidade para assegurar a integridade dos pacientes e seguimento dos procedimentos médicos.

Pensando nisso, a aplicação de BESS como proteção contra falta de energia é algo que vem sendo realizado há tempo com os conhecidos *no-breaks*, equipados, em geral, com baterias de chumbo-ácido. Por mais que as baterias de chumbo-ácido tenham espaço em aplicações de menor porte, por terem densidade energética entre três e cinco vezes menor que as principais tecnologias de baterias de íon-lítio, sistemas de maior capacidade só são possíveis quando empregadas as de tecnologia mais eficiente. (BATTERY UNIVERSITY, 2011a)

No diagrama de blocos da Figura 7 pode ser observada a topologia simplificada de um sistema de proteção contra falta de energia, com destaque ao Quadro de Transferência Automática (QTA), ator fundamental no processo, responsável por isolar a UC do sistema de distribuição de energia quando há interrupção no fornecimento, medida obrigatória para qualquer sistema de autoprodução de energia que pretende operar mesmo que a rede esteja indisponível. Em A nota-se que a rede elétrica está fornecendo energia para a carga, através do QTA, já em B, onde ocorreu a falta, o QTA desconecta a UC da rede elétrica e permite ao BESS suprir a energia demandada pela carga. (SUBHANA et al., 2019)

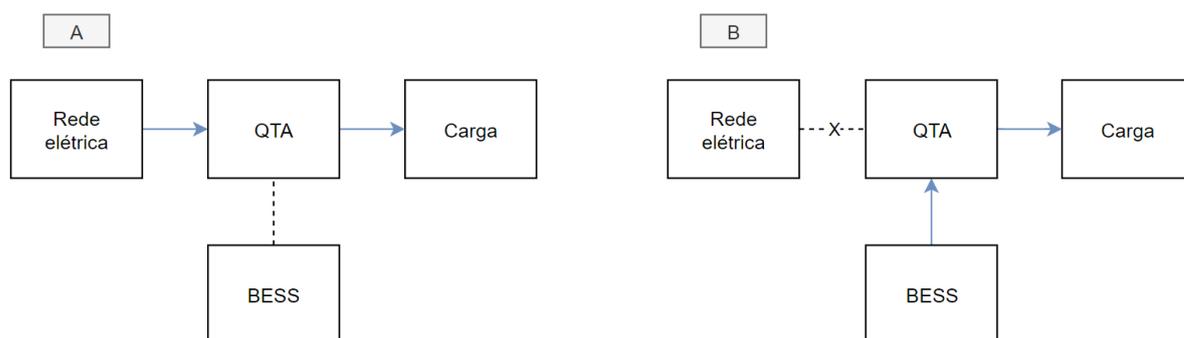


Figura 7: Diagrama de fluxo de energia de um BESS aplicado na proteção contra falta de energia elétrica.

Na Figura 8 é representado o fluxo de energia em um sistema que sofreu duas interrupções no mesmo dia, indicados pelos momentos onde a rede elétrica não é capaz de fornecer energia elétrica, mesmo havendo demanda por parte da carga. Uma vez que as

interrupções podem durar de alguns poucos segundos até muitas horas, é comum que sistemas de *back-up* de energia possuam gerenciamento de cargas prioritárias, fazendo com que equipamentos menos importantes sejam desligados à medida que o estado de carga da bateria vá diminuindo.

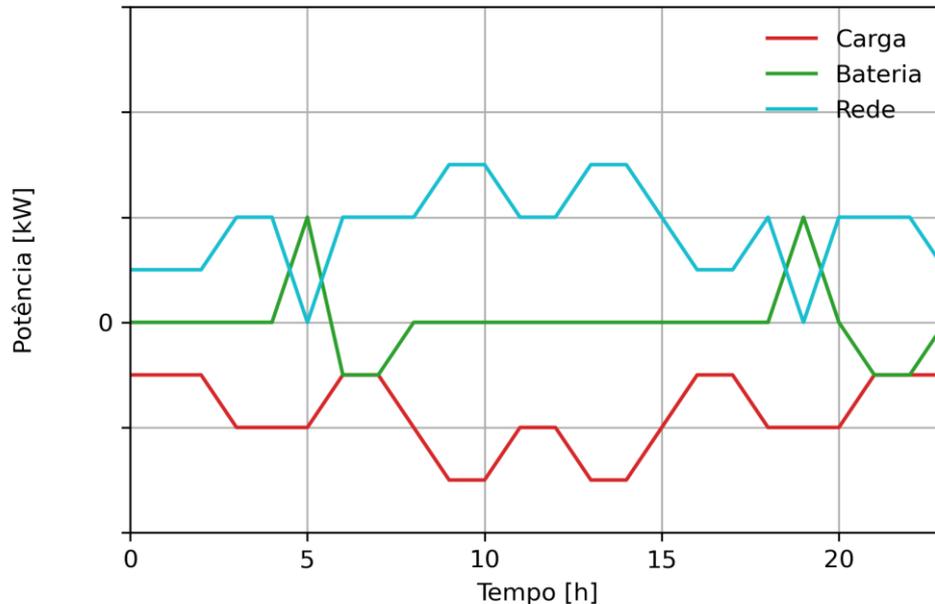


Figura 8: Gráfico de fluxo de energia de um BESS aplicado na proteção contra falta de energia elétrica.

2.2.2.5 Linearização de fonte eólica e solar

Uma vez que a geração fotovoltaica está associada diretamente com a irradiância solar do instante considerado e que não há qualquer tipo de inércia energética na entrega de energia elétrica, a intermitência desse tipo de fonte renovável já é fato conhecido dos agentes geradores. Além disso, essa dependência impede que energia seja injetada na rede elétrica em momento onde não há presença de sol, como no horário de ponta, por exemplo. (LOPES, 2015)

A fim de resolver essas questões, um BESS com dinâmica de operação semelhante à da Figura 9 apresenta-se como uma solução viável, dada sua alta velocidade de atuação e sistema de controle facilmente integrável com a fonte fotovoltaica. Nota-se em A um momento onde a geração fotovoltaica apenas carrega o BESS; já em B, a energia gerada é suficiente para atender parcialmente a rede elétrica, enquanto segue com a carga da bateria; em C, o sistema de armazenamento já pode auxiliar o suprimento de energia, a fim de mantê-lo linear; e, por fim, em D, a bateria se descarrega completamente. (YU, 2021)

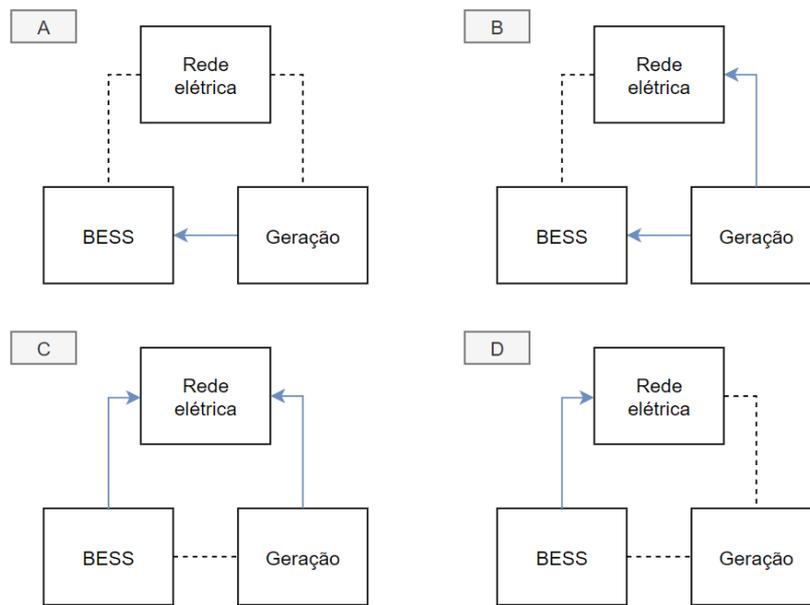


Figura 9: Diagrama de fluxo de energia de um BESS atuando na linearização de fonte solar.

A dinâmica citada na descrição de operação em diagrama de blocos pode ser também observada na Figura 10, onde fica clara a importância da reserva de energia para o horário de ponta, onde o sistema elétrico apresenta forte demanda de energia. Tal perfil de operação pode também ser aplicado a uma residência com geração fotovoltaica, onde o emprego de uma bateria pode auxiliar no autoconsumo da energia elétrica produzida por fonte solar, ao invés da utilização da rede como componente de armazenamento.

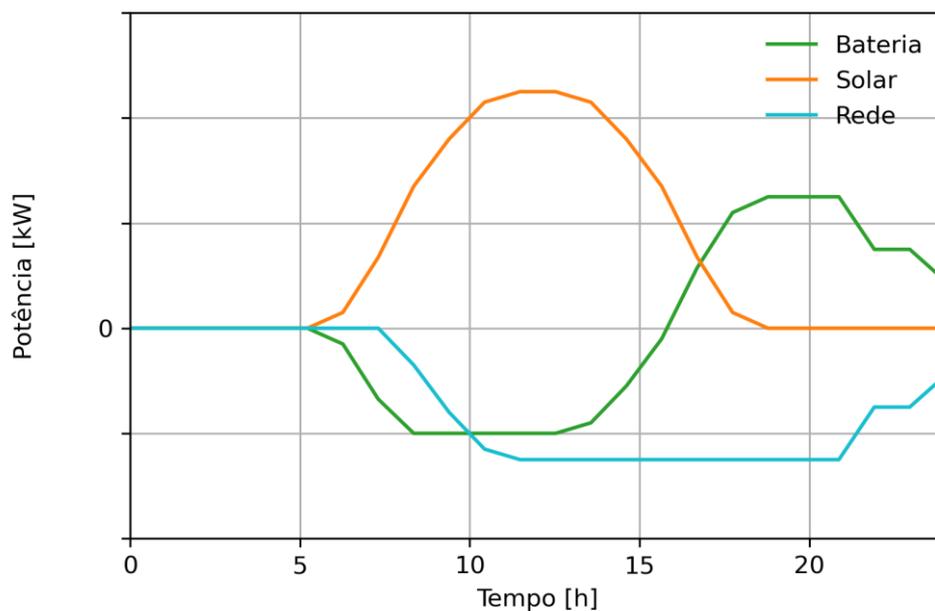


Figura 10: Gráfico de fluxo de energia de um BESS atuando na linearização de fonte solar.

2.2.2.6 Suporte de qualidade do suprimento

Dada a grande expansão dos sistemas de geração distribuída (GD) de energia nos últimos anos e sua inerente intermitência, principalmente no caso da fonte solar, problemas como variação na tensão e frequência da rede de distribuição têm sido cada vez mais presentes. Felizmente, sistemas de armazenamento de energia elétrica de rápida resposta têm se mostrado como solução eficaz na mitigação dos impactos da GD na qualidade do suprimento (HUA et al., 2019).

Nos Estados Unidos da América (EUA) a distribuição de BESS em pontos críticos de carga e geração já é realidade, contando com muitos equipamentos preparados para executar tal tarefa. Mais da metade destes estão localizados nas áreas cobertas pelas concessionárias CAISO e PJM, instalados através de contratos de longo prazo com entidades privadas. (GREENER; NEWCHARGE, 2021)

Por questões legais, os sistemas prestadores de serviços ancilares (nome dado aos sistemas que servem ao sistema de distribuição de energia) ainda não podem operar com finalidade comercial no Brasil. Por conta do P&D ANEEL 021/2016, alguns sistemas operam em caráter experimental, a fim de validar a aplicabilidade da tecnologia no país e fomentar a discussão sobre as regulamentações necessárias para sua liberação.

2.2.3 Topologias de conexão

2.2.3.1 Conexão série e paralela

Quanto à maneira de se conectar o BESS à rede elétrica e às cargas, pode-se optar por uma das duas topologias mostradas na Figura 11.

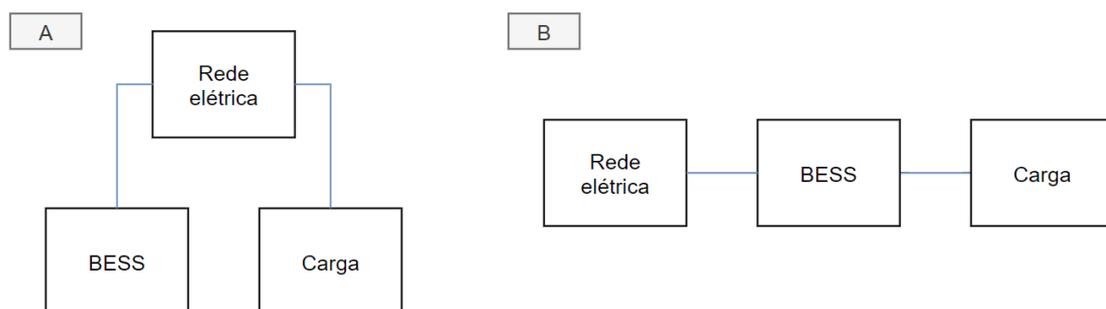


Figura 11: Topologias de conexão de BESS.

Em A está ilustrada a conexão paralela, onde todos os elementos do circuito estão ligados em um ponto comum. Nesse tipo de disposição, o BESS fica restrito à operação paralela com a rede, uma vez que não é permitido que ele entregue a energia em caso de uma falta na rede elétrica, por exemplo. Por conta disso, a operação neste tipo de arranjo permite

quase todos os modos de funcionamento citados, com exceção da proteção contra falta, e desde que haja presença da rede elétrica. (CEMIG, 2012)

Uma dúvida comum dos consumidores que instalam sistemas fotovoltaicos em sua residência é justamente o motivo da incapacidade de manterem suas UCs ativas mesmo em casos de falta de energia da concessionária que ocorram durante períodos de sol. Isso se deve ao fato de que a energização do sistema de distribuição durante uma falta da rede pode ocasionar riscos aos responsáveis pela manutenção do sistema e aos próprios equipamentos conectados.

Em B é possível observar que o BESS ocupa o espaço entre os dois elementos da rede exemplo proposta. Dessa forma, contando com o auxílio de um circuito de chaveamento interno, é possível que o sistema de baterias identifique uma falta na rede elétrica e atue no processo denominado ilhamento, onde há desconexão da rede elétrica da distribuidora. Após esse processo, é possível carregar e descarregar livremente as baterias, sem que haja quaisquer riscos ao sistema de distribuição e aos equipamentos envolvidos.

2.2.3.2 Posição em relação ao medidor

Por mais que hoje no Brasil só seja possível conectar, com caráter não-experimental, sistemas de armazenamento atrás do medidor de energia elétrica da UC, como mostrado em A1 e A2 da Figura 12, as discussões atuais indicam que em breve será possível também conectá-los em frente ao medidor, como exposto em B.

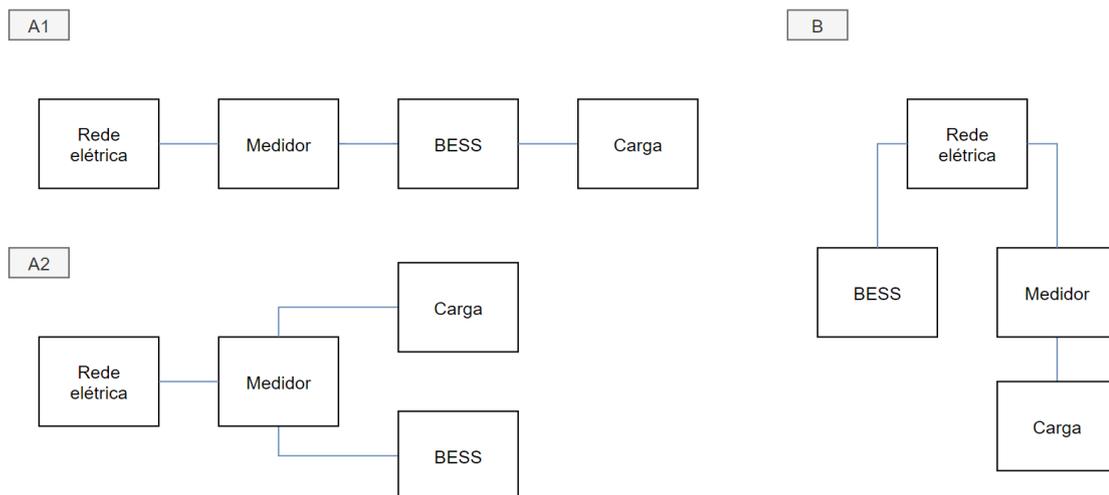


Figura 12: Posição do BESS em relação ao medidor de energia elétrica.

As recentes chamadas de contribuição da ANEEL deixam clara a intenção de fomentar uma discussão sobre os caminhos dos sistemas de armazenamento em nosso país. Dentre os tópicos abordados, a homologação da conexão de sistemas de armazenamento

ligados diretamente à rede de distribuição parece ser ponto de especial interesse. (ARAÚJO, 2021)

Com a aprovação de medidas favoráveis a isso, a prestação de serviços ancilares, como auxílio na estabilidade de tensão e frequência, controle dos picos de demanda e correção de fator de potência, avançará na direção de grandes melhorias da qualidade de energia do sistema elétrico brasileiro. (HUA et al., 2019)

2.2.4 Funcionamento básico de um BESS

2.2.4.1 Diagrama geral de blocos

A fim de ilustração, na Figura 13 pode ser observado um diagrama de blocos genérico de um sistema de armazenamento de energia em baterias, contando com os principais componentes necessários para o seu funcionamento. Os blocos do projeto apresentado serão posteriormente abordados individualmente nas seções subsequentes, onde seu funcionamento será abordado em maiores detalhes.

Uma vez que o padrão de cores e setas utilizado foi levado pelo seguimento deste trabalho, chama-se atenção aos padrões seguidos, onde azul representa as conexões CA, vermelho as conexões CC e verde os segmentos de comunicação, seja qual for o protocolo utilizado em cada. Além disso, a ponta das setas indica o sentido do fluxo de energia ou informação.

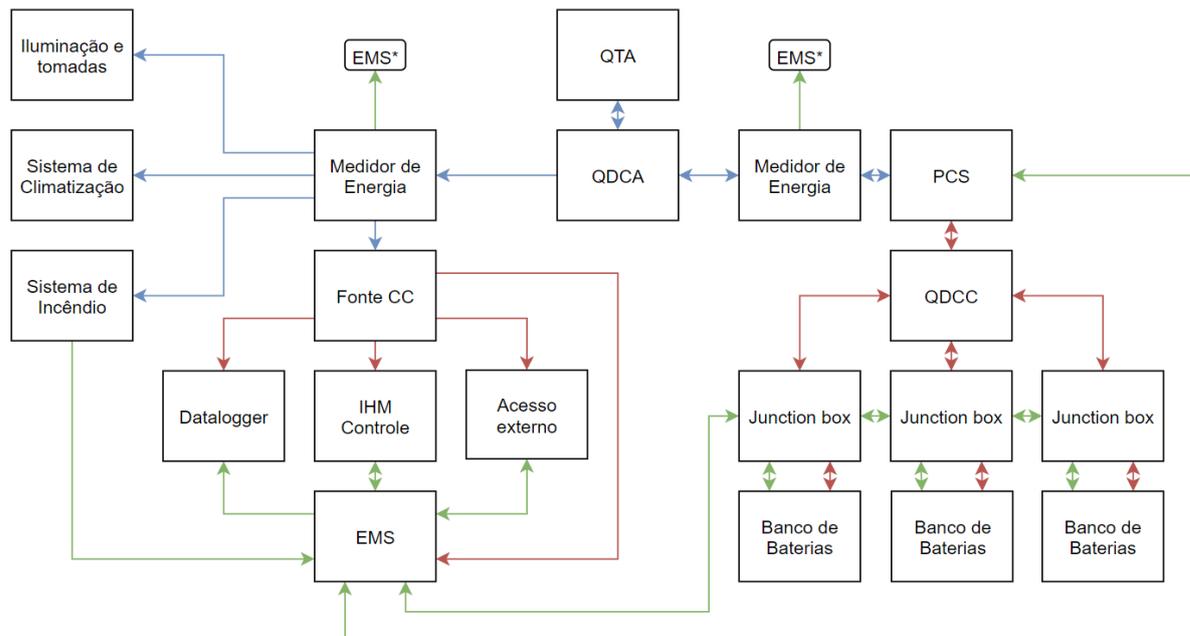


Figura 13: Diagrama de blocos geral de um BESS.

2.2.4.2 Células e módulos de bateria de íon-lítio

As células de bateria íon-lítio são elementos capazes de, através de reações químicas, armazenar energia elétrica, permitindo arbitragem de carga e descarga conforme necessidade. A célula é definida como a menor unidade de armazenamento de um sistema de armazenamento, semelhante ao conceito de uma molécula de H₂O em um copo de água, assim como os diversos elementos químicos que a compõe podem também ser entendidos como os átomos de hidrogênio e oxigênio que compõe essa molécula de água.

A tensão nominal de cada célula varia conforme a combinação de elementos químicos utilizada, principalmente em relação ao catodo, porém em todas as variações, os valores de tensão atingidos são inversamente proporcionais à profundidade da descarga a que o elemento foi submetido. Na Figura 14 pode ser observado o comportamento para uma célula genérica, mostrando o decaimento da tensão da célula de bateria à medida que aconteceu o seu descarregamento. (ADAFRUIT, 2012)

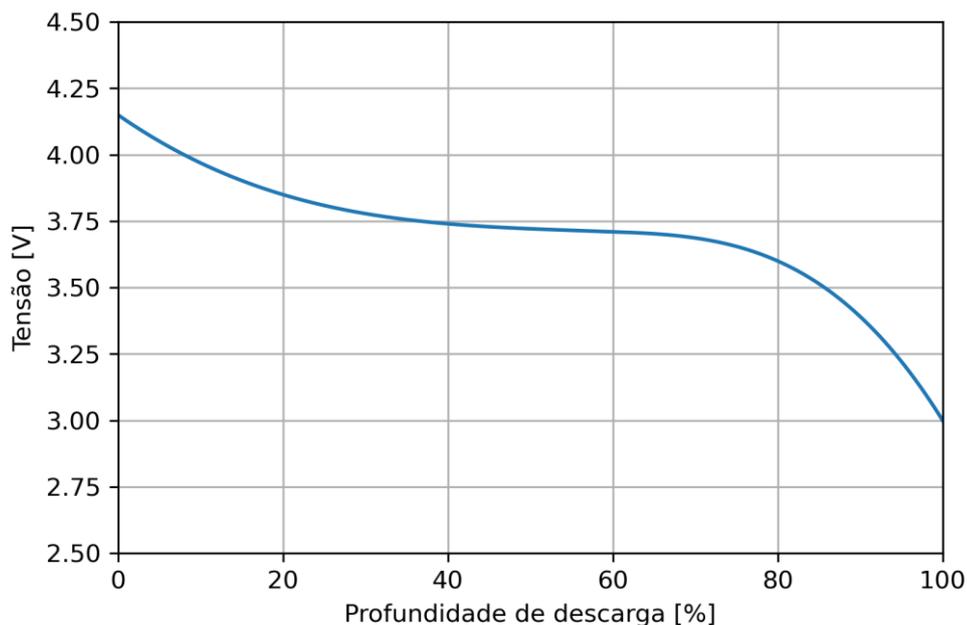


Figura 14: Perfil de tensão em função da profundidade de descarga.

É importante salientar que a ultrapassagem dos limites, tanto superior, quanto inferior, de tensão das células acarreta sérios danos aos elementos e até riscos para a operação do sistema, como incêndios e curto-circuitos. Por conta disso, durante o procedimento de carga é importante que haja o monitoramento individual de cada célula do conjunto e sua descarga individualizada caso o valor de tensão chegue próximo ao limite máximo

estabelecido. Esse procedimento é conhecido como balanceamento, e será abordado com mais detalhes posteriormente.

No caso das baterias de íon-lítio de maior capacidade energética, mecanicamente elas podem ser divididas em três grupos: cilíndricas, prismáticas e bolsa (do inglês *pouch*). (BATTERY UNIVERSITY, 2011b)

As células cilíndricas possuem larga aplicação na indústria, uma vez que são mecanicamente resistentes e de fácil fabricação, motivos que fazem com que sejam comumente encontradas em *notebooks*, brinquedos e ferramentas elétricas. Esse tipo de geometria também pode ser encontrada em alguns veículos elétricos, como os da fabricante norte-americana Tesla, dada a grande versatilidade em termos de configuração elétrica e mecânica do banco de baterias. (BATTERY UNIVERSITY, 2011b; IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2018; TESLA, 2017)

As células prismáticas se caracterizam por serem opções mais finas e robustas, dada sua montagem revestida com um encapsulamento plástico ou metálico. Essa peculiaridade garante um excelente aproveitamento de espaço físico, mas penaliza o desempenho térmico e o custo de manufatura. Sua aplicação mais conhecida é nos telefones celulares e *tablets*, visto que podem atingir espessuras muito reduzidas. (BATTERY UNIVERSITY, 2011b; IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2018)

Por último, as células bolsa são compostas de finas lâminas dos materiais escolhidos para cada química em particular, formando uma estrutura leve e de razoável flexibilidade. Por conta da pequena dilatação nos processos de carga e descarga e da fragilidade mecânica, muitas vezes essa tecnologia é encapsulada em conjuntos de duas ou mais unidades, como é o caso das baterias encontradas no veículo elétrico Nissan Leaf, objeto chave neste trabalho. (BATTERY UNIVERSITY, 2011b; IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2018)

No Leaf as células são arranjadas na configuração 2S2P, indicando que dois conjuntos de duas células paralelas são colocados em série, totalizando quatro unidades por módulo, nomenclatura que será usada ao longo das próximas seções. Na Figura 15 são mostrados os pontos de acesso elétrico ao módulo, permitindo que a corrente flua pelos terminais V0 e V2. V2 e V1 são também fundamentais na leitura da tensão dos conjuntos 2P de células, permitindo que o sistema de gerenciamento das baterias verifique a conformidade do parâmetro. (NISSAN, 2021)

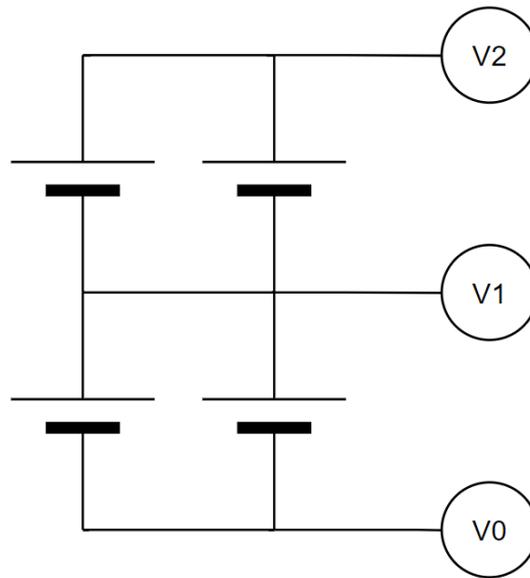


Figura 15: Topologia elétrica do módulo do Nissan Leaf.

No caso do Nissan Leaf 2012, a especificação de cada célula é 3,75 V e 33 Ah, fazendo com que o arranjo 2S2P do módulo resulte em 7,50 V e 66 Ah, ou 495 Wh. O conjunto motor do carro é montado com 48 módulos ligados em série, fornecendo aproximadamente 24 kWh a uma tensão nominal de 360 V. (LAJUNEN et al., 2016)

Além de tensão, corrente, capacidade e energia, existem outras variáveis importantes relacionadas ao funcionamento das baterias de íon-lítio. Como principal, a temperatura é um fator crucial no desempenho e durabilidade das baterias, visto que as reações químicas nas baterias são exotérmicas e necessitam que haja controle do limite aceitável de calor. (ZHUANG et al., 2021)

Também podem se citar outros parâmetros associados a baterias como o estado de carga (SoC), o estado de saúde (SoH), a profundidade máxima de descarga (DoD) e a eficiência de volta completa (RTE). Todas as siglas citadas serão abordadas com mais detalhes em momentos pertinentes durante esse trabalho.

2.2.4.3 BMS

Com o advento das células de íon-lítio, surgiu a necessidade de um controle mais individualizado e preciso dos elementos, uma vez que eles requerem mais rigor no monitoramento da tensão, corrente e temperatura. O BMS (do inglês *Battery Management System*) é o sistema de gerenciamento de baterias, responsável pelo monitoramento e controle pontual de cada célula do sistema, garantindo que não haja qualquer evento interno que exponha o sistema ao colapso térmico ou elétrico. (RANAWAT; PRASAD, 2018)

A especificação de cada célula de íon-lítio determina os valores máximos de corrente, tensão e temperatura que ela pode ser submetida, além do valor mínimo de tensão até o qual se pode descarregar o elemento. É função do BMS monitorar e proteger o sistema para que não haja ultrapassagem desses limites, o que poderia resultar em danos ao sistema ou até ao ambiente que o cerca, como incêndio ou explosão. (ORION BMS, 2019)

Uma das principais funções do BMS é o balanceamento de tensão das células, procedimento necessário para que todas elas permaneçam em um nível semelhante de tensão e possam ser integralmente carregadas. Isso acontece através do descarregamento individual de cada elemento que ultrapassar certo limite superior de tensão, utilizando um ou mais resistores que são chaveados para que haja fluxo de corrente de descarga. Os instantes A e B da Figura 16 ilustram a inserção do resistor de balanceamento do circuito, incorrendo em uma corrente elétrica no circuito. Ao criar essa corrente, a energia armazenada na célula é lentamente dissipada, fazendo que com o valor de tensão nos seus terminais retorne à proximidade da média dos outros elementos. (NIZAM et al., 2019)

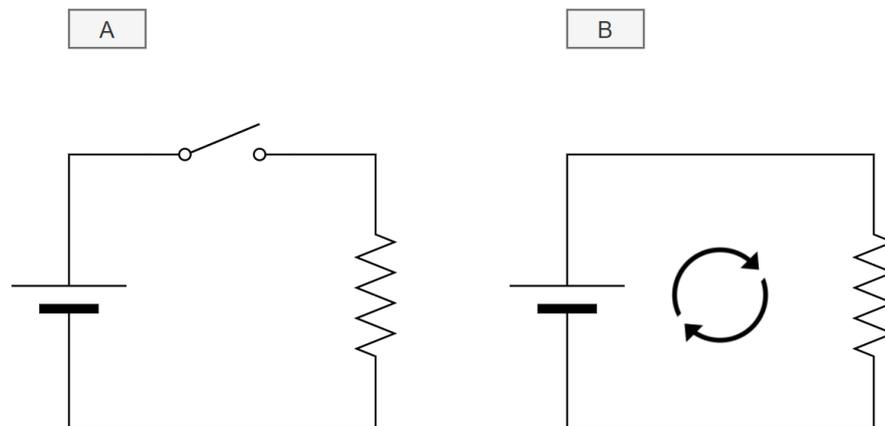


Figura 16: Princípio de balanceamento de uma célula de bateria.

Além disso, o BMS também é capaz de calcular a quantidade de energia disponível nas baterias (SoC) e o monitorar o estado saúde da bateria (SoH), parâmetros importantes que irão ditar o regime de operação do sistema. Em um veículo elétrico, por exemplo, o cálculo do SoC é de extrema importância, uma vez que esse valor ditará a expectativa de autonomia restante (MANTHOPOULOS; WANG, 2020).

Em termos de interface com outros periféricos, muitos BMS são equipados com protocolos de comunicação que permitem a troca de informação, aumentando a versatilidade e segurança do conjunto. Em geral, é utilizando o protocolo *Controlled Area Network* (CAN),

padrão de indústria em sistemas industriais e automotivos, mas alguns modelos podem contar com outras variantes, como MODBUS ou protocolos proprietários.

Pensando na modularidade e maior autonomia das soluções, muitos fabricantes de BMS estão adotando a hierarquia em três níveis, ilustrada na Figura 17, onde as funções de cada componente são mais restritas. O BMS_S (*Slave*, escravo) é responsável pela leitura dos valores de tensão e temperatura de sua respectiva célula, transmitindo a informação de maneira serial até que atinja o BMS_M (*Master*, mestre), que centraliza e processa os dados recebidos, posteriormente os enviando ao BMS_C (*Controller*, controlador), encarregado de supervisionar todo o conjunto e realizar a comunicação com outros componente do sistema de armazenamento. (EMUS BMS, 2021a)

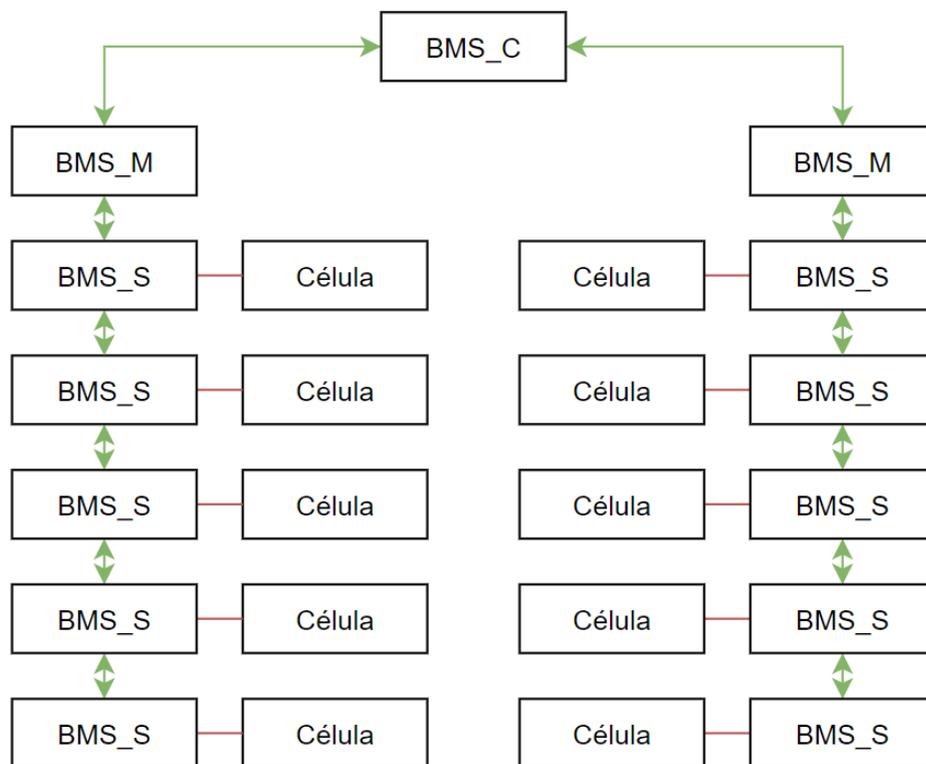


Figura 17: Hierarquia de um BMS genérico de três níveis.

2.2.4.4 Junction-box

A *junction-box* (caixa de junção em inglês) é o nome mais comum do conjunto de dispositivos que está localizado entre os conjuntos série de baterias – em geral denominados de armários – e os barramentos de corrente contínua do sistema. A função do conjunto é, de maneira semelhante ao BMS, garantir a segurança das baterias e do sistema de uma forma geral. Enquanto o BMS é responsável exclusivamente pelas células da bateria, a *junction-box*

é quem responde por cada conjunto, atuando em caso de quaisquer anomalias. (FRAUNHOFER IISB, 2020)

O diagrama da Figura 18 mostra os principais componentes desse segmento do circuito, com destaque ao BMS_C, responsável pelo controle de todos os blocos e pela comunicação com os níveis inferiores (BMS_M e BMS_S) da hierarquia do BMS. As chaves contadoras e o fusível têm papel fundamental na segurança do conjunto, visto que são incumbidas de seccionar o circuito em caso de qualquer incidente, garantindo a integridade do circuito e a segurança de eventuais operadores.

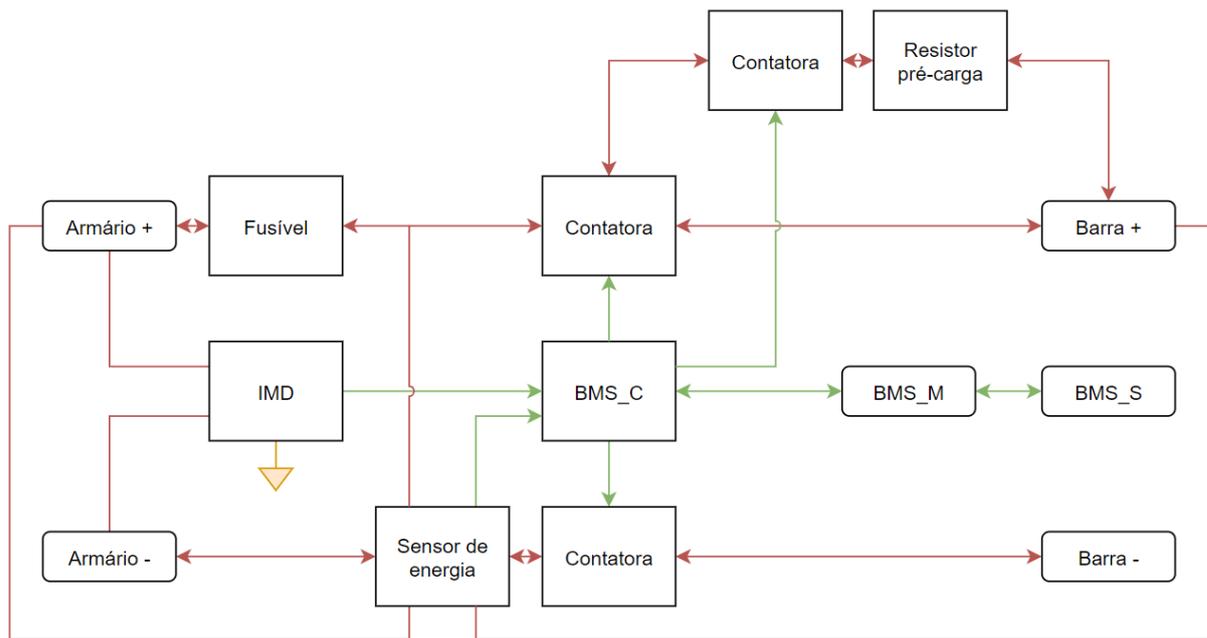


Figura 18: Diagrama de blocos de uma *junction-box*.

O sensor de energia é responsável pela leitura dos valores de tensão e corrente no circuito, os informando ao BMS_M para que as devidas decisões sejam tomadas. Também atuando na proteção, o medidor de isolação elétrica ou *Insulation Monitoring Device* (IMD) é capaz de medir a resistência elétrica entre os terminais do conjunto de bateria, garantindo que, caso ela venha a apresentar um valor abaixo do especificado pelo projetista do sistema, haja desligamento de todo o circuito para evitar maiores problemas. (GOULART, 2020)

2.2.4.5 QDCC

O Quadro elétrico de Distribuição em Corrente Contínua (QDCC) é o ponto de ligação elétrica de todos os armários conectados às Barras CC do BESS, seccionados por chaves contadoras e protegidos por Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS) e fusível, como mostrado na Figura 19.

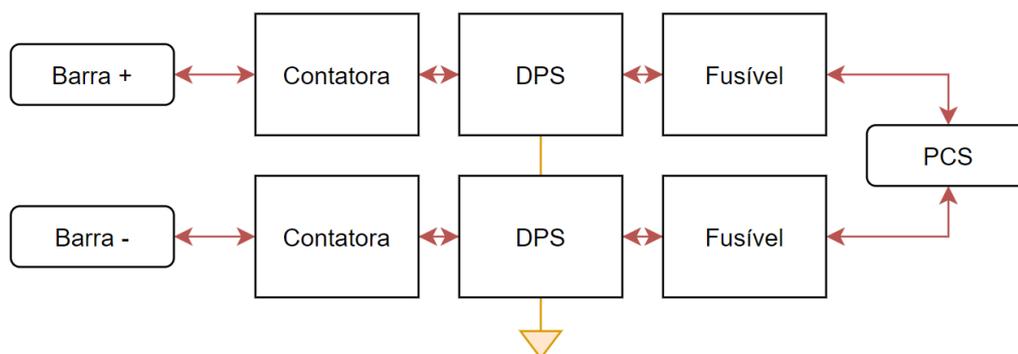


Figura 19: Diagrama de blocos do QDCC.

Por mais que seu funcionamento seja simples, o QDCC é responsável por garantir que falhas que aconteçam no segmento de corrente contínua do sistema sejam facilmente contidas, antes que se tornem problemas graves como curtos-circuitos e incêndios.

2.2.4.6 PCS

O PCS (do inglês *Power Conversion System*) é nada mais que um inversor de tensão, equipamento muito conhecido, principalmente por sua aplicação em sistemas fotovoltaicos. Em sistemas de armazenamento de médio e grande porte, o que antes era chamado de inversor, passa agora a ser apelidado de PCS, uma vez que a inteligência, antes embarcada no inversor, agora passa a estar do lado de fora, não integrada. Essa dissociação ocorre pela complexidade dos sistemas de grande porte, onde cada projeto apresenta distinções e, por isso, o sistema de controle deve ser projetado de maneira mais personalizada. Além disso, uma grande diferença do PCS para os inversores fotovoltaicos comuns é a capacidade de circulação bidirecional de corrente, possibilitando a carga e descarga das baterias através da retificação ou inversão da corrente, respectivamente.

O princípio de funcionamento de um PCS é o mesmo de um inversor de tensão comum, onde sua função é transformar a corrente contínua em corrente alternada. Essa conversão é necessária pois a característica química das baterias só as permite armazenar energia na forma de corrente contínua, fazendo-se necessária a transição em corrente alternada para que se possa usar a energia para alimentar equipamentos convencionais e ligar o sistema à rede elétrica padronizada. Na Figura 20 está exemplificado um sistema, onde a energia CC de um banco de baterias em 48 V é convertida para os 220 V CA (311 V de pico), valores muito comuns para alguns sistemas de armazenamento baseados em baterias chumbo-ácido. (MUELLER et al., 2020; TESVOLT, 2021)

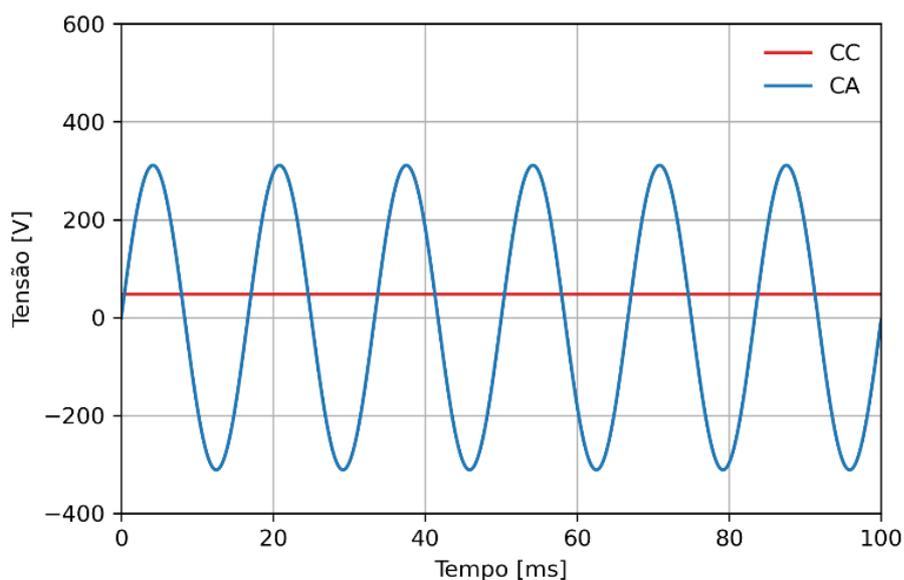


Figura 20: Exemplo de inversão de 48 V CC para 220 V CA.

2.2.4.7 QDCA e QTA

O Quadro elétrico de Distribuição de Corrente Alternada (QDCA) é o ponto onde a rede elétrica, o BESS e a carga se conectam, garantindo todas as proteções adequadas às partes. Seu projeto varia consideravelmente conforme diversas decisões de projeto, como a topologia de conexão com a rede, com a carga, as funcionalidades desejadas e até as outras fontes de energia presentes na instalação.

Como principais atores na segurança e manobra desse segmento, estão o disjuntor termomagnético, disjuntor diferencial residual, DPS, fusível, chave de manobra e demais componentes auxiliares. (JUNIOR, 2013)

O QDCA também permite que manobras de conexão entre os componentes da rede, como controle do despacho de eventuais fontes de energia, isolamento das partes para manutenção e desligamento segmentado em caso de falha. Para que a UC também possa se isolar da rede, é necessária uma Chave de Transferência Automática (CTA, também chamada de QTA quando considerados seus periféricos), capaz de realizar o ilhamento do sistema e garantir alimentação às cargas mesmo em caso de falta na rede elétrica. (CUMMINS, 2021)

2.2.4.8 Sistemas auxiliares

Não menos importantes, os sistemas auxiliares de um BESS são periféricos essenciais para a operação e segurança de um sistema de armazenamento.

O sistema de climatização, popularizado no meio como HVAC (do inglês *Heating, Ventilation and Air Conditioning*), é incumbido de garantir que a temperatura e umidade no

interior do invólucro do BESS esteja dentro dos parâmetros especificados pelos fabricantes de todos os componentes. Na maioria das vezes as células de bateria são os componentes mais delicados em termos de restrição de temperatura de operação, dessa forma, o valor ideal de temperatura para elas é, geralmente, o valor configurado para a operação do HVAC. (AIRLINK, 2017)

Outro componente de fundamental importância é o sistema de detecção e combate a incêndios, capaz de agir rapidamente em caso de fogo ou fumaça no interior do BESS. Sensores instalados em diversas partes do sistema informam anomalias à central, que então toma a decisão de liberar os agentes extintores, que devem ser apropriados para o uso em incêndios em sistemas de energia elétrica. Além disso, é ideal que sejam usados os chamados agentes limpos, que não deixam resíduos nos equipamentos eletrônicos, como FM-200, NOVEC 1230 e CO₂. (FIREPRO, 2021)

Adicionalmente, outros subsistemas, como o de conversão CA-CC para os sistemas alimentados em 24 V e o de iluminação e tomadas 220 V também são peças essenciais no projeto de um BESS.

2.2.4.9 EMS

O EMS (sigla do inglês *Energy Management System*) é o sistema de gerenciamento do conjunto, responsável pela aquisição de dados, tomada de decisão e atuação no BESS, garantindo a correta operação e segurança de todos os componentes envolvidos.

Em geral o EMS é implementado com o auxílio de um Controlador Lógico Programável (CLP, ou PLC, no inglês) ou alguma outra plataforma de automação industrial. O CLP podem ser equipados com diversas entradas e saídas, tanto analógicas, quanto digitais, e variados protocolos de comunicação diferentes, permitindo que sejam aplicados em numerosas tarefas de monitoramento e controle. A finalidade industrial desses equipamentos garante alta confiabilidade e robustez, motivo pelo qual é largamente utilizado para compor o que podemos chamar de “cérebro” de um BESS. (WAGO, 2021)

Dada a complexidade na operação de um sistema de baterias, é papel do EMS monitorar e atuar nos blocos apresentados na Figura 21. O protocolo utilizado na comunicação com cada periférico varia conforme o modelo adotado para cada equipamento, mas como exemplos, podem ser citados ASI, Modbus, CANopen e TCP/IP. (SILVA; PAULA; SILVA, 2011)

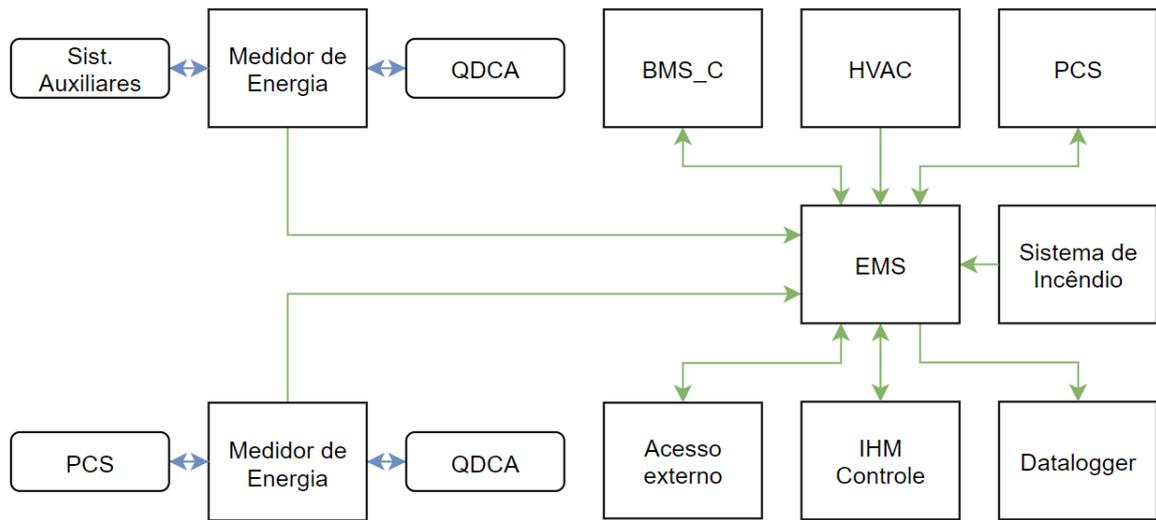


Figura 21: Diagrama de blocos simplificado do EMS.

Além dos blocos abordados, não foram representados, por questão de simplificação do diagrama alguns componentes do sistema, como chaves contatoras, chaves e sensores. Em geral as chaves contatoras e chaves operam através dos chamados contatos secos, ou seja, pinos comandados digitalmente pelo CLP, definindo o estado aberto ou fechado de cada uma. Já os sensores são, na maioria das vezes interpretados como entradas analógicas, como um sensor de temperatura do tipo PTC, ou digitais, a exemplo de um sensor de fechamento de porta.

Outra função importante do EMS é a interação com o operador, a fim de informar sobre as falhas, alarmes, estado dos parâmetros e permitir a execução local ou remota de comandos por parte do usuário. Essa interação pode ser feita através de uma Interface Homem Máquina (IHM), que consiste basicamente em um conjunto de botões, seletores e luzes que criam um meio do usuário executar tarefas e ter retorno visual sobre o sistema, alternativamente, nos sistemas mais modernos, sendo substituída por telas sensíveis ao toque. A visualização e comando do sistema muitas vezes também pode ser realizada remotamente, através de *softwares* capazes de reproduzir as mesmas funções da IHM.

3 MÉTODO

Esta seção aborda, de maneira ilustrativa, a contextualização do projeto que deu origem a esse trabalho na parceria entre o Laboratório Fotovoltaica/UFSC e a Nissan do Brasil. Aspectos relacionados às motivações desse estudo também são enumerados, a fim de compor os objetivos da cooperação entre as duas instituições.

Além disso, são definidos os alicerces técnicos para a realização do projeto, fundamentais para as decisões subsequentes sobre as tecnologias adotadas para solução de cada necessidade. Dentre esses pontos, destaca-se a escolha da topologia elétrica do sistema, a fim de estabelecer a maneira como os módulos de bateria são interligados e a deliberação referente ao modelo de BMS que é responsável pela gestão das células de bateria do sistema.

3.1 A ORIGEM DO PROJETO

3.1.1 Parceria Fotovoltaica/UFSC e Nissan do Brasil

Após os cinco anos da bem-sucedida experiência na utilização de 25 unidades do Nissan Leaf, mostrado na Figura 22, como táxis nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro, a Nissan do Brasil buscou avaliar as consequências da exaustiva operação nos veículos. Os carros juntos foram submetidos a mais de dois milhões de quilômetros rodados, muitos deles utilizando de postos de recarga rápida, o que acelerou ainda mais os desgastes dos automóveis. (CANAL DANA, 2016)



Figura 22: Nissan Leaf utilizado como táxi no Rio de Janeiro. Fonte: Carro Elétrico (2017).

Pensando nisso, a parceria firmada entre a montadora e o Laboratório Fotovoltaica/UFSC tem como objetivo avaliar a degradação sofrida nos bancos de bateria de

cada carro, a fim de estudar possíveis aplicações e maneiras de rentabilizar o grande investimento realizado nos conjuntos motores de cada carro. (SPAUTZ, 2019)

O esforço conjunto levou a Nissan a apresentar no Salão do Automóvel 2018 um espaço parcialmente alimentado pelas baterias retiradas dos veículos, mostrando que, mesmo após severo desgaste na aplicação automotiva, ainda podem ser realizadas funções estacionárias com a energia armazenada. (UFSC, 2018)

3.1.2 Estudo das baterias do Nissan Leaf

Com os chassis dos carros fornecidos pela Nissan, o primeiro passo da equipe do laboratório consistiu na desmontagem do conjunto, catalogando as baterias de acordo com a unidade de origem e sua posição absoluta no conjunto série de cada veículo. O processo exige uma série de cuidados e proteções, uma vez que a tensão no interior do sistema pode atingir mais de 400 V, quando plenamente carregado. (LAJUNEN et al., 2016)

Os testes realizados pela equipe do laboratório foram realizados de forma amostral, selecionado alguns módulos de bateria para medição apropriada de sua capacidade remanescente. Na Tabela 2 podem ser observados os valores médios obtidos para cada veículo, bem como a energia média calculada, que foi usada como ponto de partida para algumas definições neste trabalho. (LAMBERT et al., 2016)

Tabela 2: Média de capacidade medida para cada carro avaliado. Fonte: Laboratório Fotovoltaica/UFSC (2019).

Carro	Energia medida [kWh]	Energia relativa [%]
1	0,76	50,37%
2	0,96	64,29%
3	1,30	86,58%
4	0,82	54,33%
5	0,90	60,30%
6	0,85	56,97%
7	0,93	61,69%
Média	0,93	62,08%

O valor de 62,08% de capacidade energética média restante nos veículos foi usado posteriormente, dado que a construção do BESS projetado foi realizada utilizando módulos dos diversos carros analisados nas medidas.

3.2 DEFINIÇÕES INICIAIS

3.2.1 Funcionalidades

Uma vez que os geradores solares fotovoltaicos que integram as coberturas do Laboratório Fotovoltaica/UFSC em certos momentos produzem mais energia do que o consumo das edificações do laboratório, dada a grande potência fotovoltaica instalada, a proposta do BESS em questão é uma híbrida entre o autoconsumo de energia solar e o despacho estratégico de energia em horário de ponta. Tal dinâmica de operação armazena a energia solar excedente gerada e cria créditos de energia no horário onde a tarifa é mais cara, beneficiando o *campus* central da instituição com um generoso desconto na conta mensal de energia elétrica. (ZOMER et al., 2020)

3.2.2 Topologia de conexão do BESS

Dada a complexa infraestrutura elétrica da instalação, já contando com diversos sistemas de geração fotovoltaica e alguns de armazenamento de energia, a topologia escolhida para o BESS projetado foi a paralela atrás do medidor. A conexão do sistema será realizada ao longo de 2021 no QDCA de outro sistema de armazenamento de mesma capacidade, já projetado conforme especificação para se adequar com o seu semelhante, como mostrado na Figura 23.

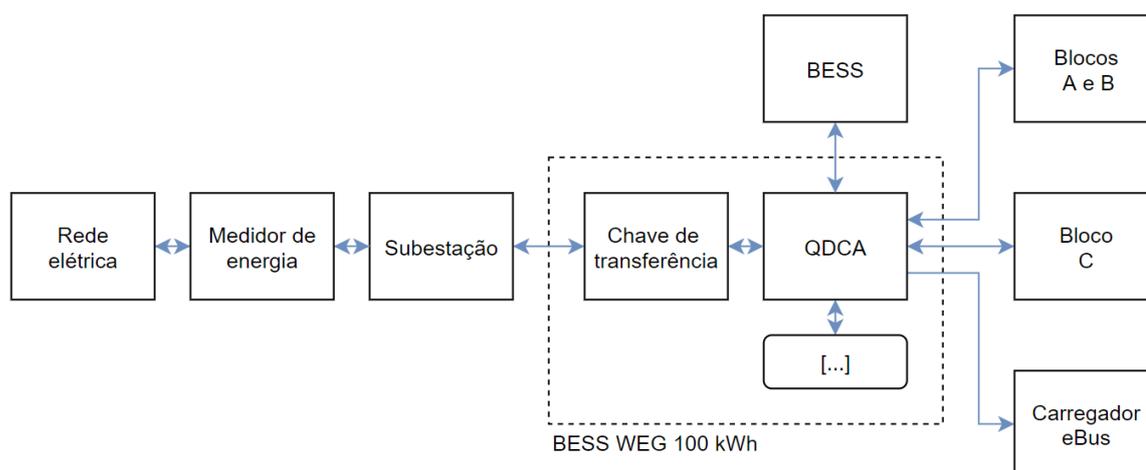


Figura 23: Diagrama de blocos simplificado do Laboratório Fotovoltaica/UFSC.

3.2.3 Parâmetros de operação

Uma vez que o sistema de armazenamento instalado no laboratório possui 100 kWh de capacidade, foi definido arbitrariamente que o BESS projetado deveria atingir um valor próximo, como o objetivo de facilitar a comparação de desempenho dos dois conjuntos em análises futuras.

Outras definição importante para o sistema é a capacidade de carga e descarga do conjunto, o *C-rate*. Dado que muitas baterias disponíveis no mercado são especificadas para 1C – que corresponde a carga ou descarga em uma hora – o mesmo valor foi definido como uma característica necessária ao sistema projetado, implicando nos passos subsequentes.

3.3 TOPOLOGIA ELÉTRICA E DE COMUNICAÇÃO

3.3.1 Topologia elétrica

3.3.1.1 Gaveta

Seguindo a tendência de grandes sistema de armazenamento de energia, a primeira definição importante em relação às baterias nesse sistema é a sua divisão em pequenos conjuntos série, denominados “gavetas”. A implementação do sistema de gavetas traz uma série de vantagens, como a montagem e manutenção facilitadas, já que cada uma podem ser operada individualmente; segurança na contenção de falhas, pois cada gaveta será equipada com proteção individual; e possibilidade de substituição pontual em caso de problemas com apenas uma unidade. (DYNESS, 2020)

Uma vez que 48 V é uma tensão padronizada para diversos tipos de aplicação CC, como sistemas de bateria chumbo-ácido, pequenos veículos elétricos e até alguns equipamentos elétricos, dividiu-se esse valor pela tensão nominal de cada módulo de bateria do Nissan Leaf, a fim de obter-se a quantidade ideal de módulos para conexão série em cada gaveta. Como o resultado de 6,40 módulos por gaveta é quase equidistante dos inteiros seis e sete, optou-se por utilizar o maior valor para que houvesse maior aproveitamento de espaço no sistema como um todo.

Na Tabela 3 são expostos os valores mínimos, nominais e máximos para a célula de bateria do Nissan Leaf; o módulo, compostos por um arranjo 2S2P de células; e a gaveta, montada com sete módulos ligados em série. (LAJUNEN et al., 2016; NISSAN, 2021)

Tabela 3: Valores de tensão para a célula, módulo e gaveta.

Parte	Parâmetro	Valor	
Célula	Tensão [V]	Mínima	3,20
		Nominal	3,75
		Máxima	4,15
Módulo	Tensão [V]	Mínima	6,40
		Nominal	7,50
		Máxima	8,30
Gaveta	Tensão [V]	Mínima	44,80
		Nominal	52,50
		Máxima	58,10

Na Figura 24 está ilustrado o sistema desenhado para cada gaveta, já adotando o padrão de cor vermelho e preto para os terminais positivo e negativo, respectivamente. Para fins de simplificação, as ligações elétricas internas (que não o ponto mais negativo e o mais positivo) serão mantidas na cor vermelha.

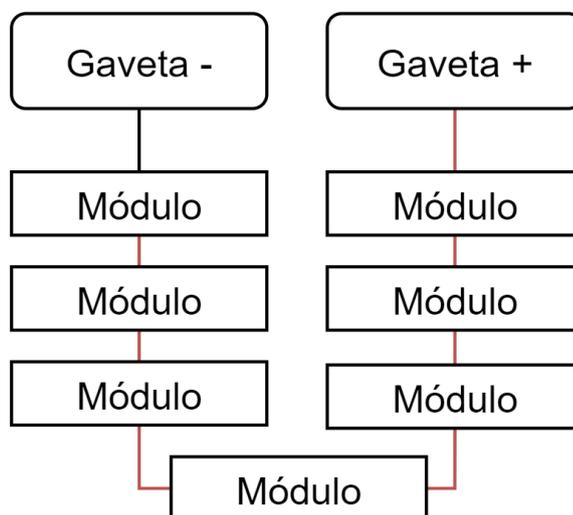


Figura 24: Diagrama de blocos da gaveta de baterias.

3.3.1.2 Armário

Após a definição do arranjo no interior de cada gaveta e da potência desejada para o sistema, foi então possível iniciar a pesquisa sobre os principais modelos de PCS disponíveis no mercado para a faixa de interesse. Por não ser o foco do trabalho, os critérios de escolha e

demais funcionalidades dos PCS não foram abordados; apenas foi citado que a experiência do fabricante e qualidade esperada dos produtos são pontos importantes na definição da lista de opções encontradas, composta por quatro fabricantes, que se mostraram interessados no projeto e no suporte ao desenvolvimento da solução.

A Tabela 4 apresenta os dados elétricos mais relevantes, retirados das folhas de dados do fabricante de cada equipamento. (REFU, 2021; SINEXCEL, 2021; SMA SOLAR TECHNOLOGY, 2021; WEG, 2007)

Tabela 4: Especificação básica de alguns modelos selecionados de PCS.

Fabricante	Origem	Modelo	Potência CA	Tensão CC		Corrente CC
			Nominal [kVA]	Mínima [V]	Máxima [V]	Máxima [A]
REFU	Alemanha	REFUstorage 88K/100K	83	555	900	153
SMA	Alemanha	STP60	75	575	1000	140
SINEXCEL	China	PWS1-100K-NA	100	500	850	220
WEG	Brasil	Enterprise 100 kVA	100	600	900	170

Nesse ponto da análise, os itens de atenção são os valores mínimos e máximos de tensão CC, que se referem ao intervalo que pode haver variação da tensão dos bancos de baterias durante seu procedimento de carga e descarga. Nota-se que há certa semelhança dos valores para cada produto, indicando que há certo padrão de mercado para sistemas desse porte. Uma das razões para isso é a grande disponibilidade de suprimentos (conectores, chaves, fusíveis) projetados para um limite de 1000 V, facilitando a integração desses PCS com diversos periféricos.

Para definição da quantidade mínima e máxima de gavetas que seriam compatíveis com cada modelo de equipamento, colunas da Tabela 5 foram preenchidas respectivamente com as Equações 1, 2, 3 e 4. A fim de obter-se valores inteiros para cada cálculo, realizou-se arredondamento para o inteiro acima, quando se tratava de um valor mínimo e para o inteiro abaixo, quando se tratava de um valor máximo, garantindo que as faixas de tensão nunca seriam ultrapassadas.

$$Quant_Módulo_{MIN} = \frac{V_Inversor_{MIN}}{V_Módulo_{MIN}} \quad 1$$

$$Quant_Módulo_{MAX} = \frac{V_Inversor_{MAX}}{V_Módulo_{MAX}} \quad 2$$

$$Quant_Gaveta_{MIN} = \frac{Quant_Módulo_{MIN}}{7} \quad 3$$

$$Quant_Gaveta_{MAX} = \frac{Quant_Módulo_{MAX}}{7}$$

4

Tabela 5: Relação mínima e máxima de módulos e gavetas obtida para cada modelo de PCS.

Fabricante	Módulos [2S2P]		Gavetas [7 módulos]	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
REFU	87	108	13	15
SMA	90	120	13	17
SINEXCEL	79	102	12	14
WEG	94	108	14	15

Pode se observar que a operação com quatorze gavetas seria compatível com todos os quatro modelos de PCS avaliados, por estar sempre entre os mínimos e máximos estabelecidos pelo cálculo. Por esse motivo, esse foi o número de gavetas em série, chamado de “armário” durante este trabalho. O diagrama de blocos do armário de baterias pode ser observado na Figura 25, já contando com a *junction-box*, componente que é abordado mais adiante neste trabalho.

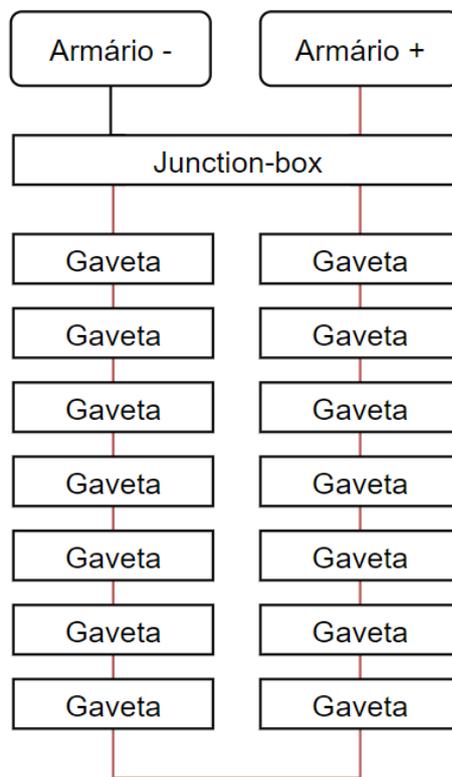


Figura 25: Arranjo série de gavetas para composição do armário de baterias.

3.3.1.3 Sistema

O último passo para a definição do arranjo de baterias é a quantidade de armários que são necessários para atingir a capacidade desejada de energia armazenada, já revelada nessa secção. Outro fato também já conhecido é a degradação da capacidade de armazenamento de energia das células, fazendo com que sejam necessárias mais células de segunda vida, do que seriam necessárias células novas. Com essas informações em mente, a Tabela 6 expõe os valores que seriam obtidos para cada arranjo de armários, calculados conforme a quantidade de módulos fixada por armário e a degradação prevista para esses módulos.

Tabela 6: Resultado do cálculo da capacidade esperada para um conjunto de armários de bateria.

Quantidade de armários	Capacidade [kWh]		Módulos necessários	Carros necessários
	Nominal	Esperada		
1	49	30	98	2,04
2	98	61	196	4,08
3	147	91	294	6,13
4	196	122	392	8,17

Uma vez que o valor mais próximo a 100 kWh de capacidade é obtido com a ligação paralela de três armários, essa foi a configuração escolhida para o sistema, além de ilustrada na forma de diagrama na Figura 26.

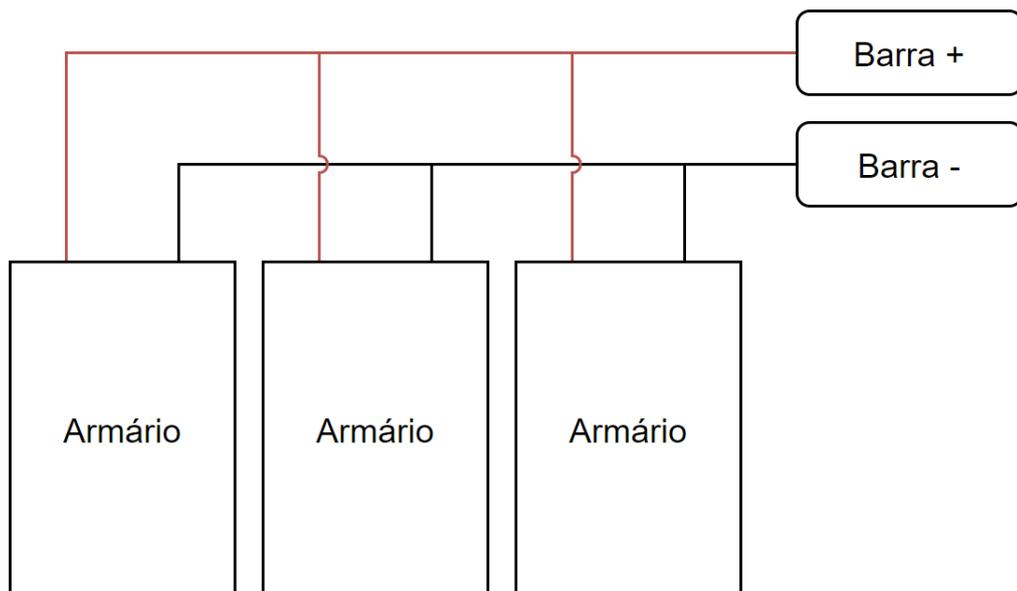


Figura 26: Diagrama de blocos dos armários de bateria ligados em paralelo ao barramento.

3.3.2 Topologia de controle

3.3.2.1 Especificação necessária

Dando continuidade à ideia de modularidade, proporcionada pela divisão do sistema em gavetas, a comunicação deve também se adaptar a essa necessidade. Pensando nisso, a já citada topologia de três níveis hierárquicos é a solução para que haja maior segurança e eficiência no processo de controle das células de bateria, levando ao primeiro requisito para o BMS do sistema.

Outro fator de altíssima importância são os limites de tensão com os quais o BMS é capaz de operar, uma vez que diferentes tecnologias de baterias íon-lítio também possuem certa variação nesses valores. Felizmente, a maioria dos equipamentos disponíveis no mercado já é preparada para trabalhar com as mais variadas químicas comerciais. No caso das células de bateria do Nissan Leaf os valores são 3,20 V e 4,15 V, para a tensão mínima e máxima de cada célula, respectivamente.

A última definição fundamental do sistema de gerenciamento das baterias é a corrente de balanceamento. Por mais que a resistência paralelo inserida nos terminais da célula de bateria seja expressa em Ohms (Ω), essa especificação é comumente encontrada nos manuais dos produtos em miliamperes (mA), representando a maior corrente de balanceamento admitida pelo BMS.

Quando originalmente embarcadas nos automóveis elétricos da Nissan, as baterias usufruíam de um complexo sistema de gerenciamento próprio da montadora, com escassa documentação, por razões de segredo industrial. Por conta disso, não pode se afirmar qual era de fato a corrente de balanceamento utilizada pela montadora em suas células de bateria. (KELLY, 2019)

Segundo a literatura analisada, manuais de equipamentos e conversas com profissionais de uma grande empresa nacional do setor de baterias e de um renomado instituto alemão de pesquisa na área, a regra prática para o cálculo da corrente de balanceamento pode ser resumida pela Equação 5. Com a aplicação dos valores nominais das células do Leaf, obtém-se o valor de 0,33 A, ou 330 mA, como referência para o projeto. Nessa situação em particular foi utilizada a capacidade nominal, em vez da capacidade média, uma vez que o dimensionamento da corrente de balanceamento está sendo realizado para o caso mais extremo possível. (ANDREA, 2010; KIVRAK; OZER; OGUZ, 2018; VULLIGADDALA et al., 2020)

$$I = C \times 0,5\% \rightarrow I = 66 \times 0,5\% \rightarrow I = 0,33 [A]$$

5

3.3.2.2 Comparativo de modelos considerados

Após a definição da topologia elétrica dos módulos de bateria e da corrente de balanceamento necessária, foi iniciada a busca por modelos de BMS compatíveis com a arquitetura proposta. Além disso, podem ser citadas como funções importantes para o equipamento a comunicação com o EMS em protocolo CAN, a possibilidade do controle de chaves contadoras e ventilação, e uma interface com o usuário amigável.

Por mais que haja diversos veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia comerciais, o BMS que é usado em cada produto é geralmente desenhado sob medida, inclusive sendo objeto de segredo industrial dada a sua importância no desempenho de sistemas de armazenamento de energia. Por conta desse motivo, a maior parte dos modelos de BMS disponíveis comercialmente para aquisição são voltados ao público amador e projetos de menor porte.

Esse fato foi constatado após longas pesquisas em *sites* de diversos fabricantes, tornando a tarefa de encontrar um BMS compatível com o sistema desenhado extremamente complexa. Como destaques das buscas realizadas, podem ser citados alguns modelos relevantes, bem como os motivos que levaram cada um deles a não cumprirem todos os requisitos estabelecidos para o projeto.

O Lithiumate Pro, da fabricante americana eLithion, é sem dúvida um modelo muito completo, com possibilidade de comando externo para chaves contadoras e diversas interfaces de comunicação. Por mais que o produto da eLithion atenda bem a topologia de um armário, a impossibilidade de conexão paralela dos BMS_C limitaria sua aplicação a cerca de 31 kWh de capacidade, o tirando da disputa. (ELITHION, 2021)

Os próximos da lista de destaques são os produtos da francesa PowerSafe, que possui uma ampla linha de produtos voltados à mobilidade elétrica. Dentre as opções disponíveis em seu catálogo, a hierarquia dos produtos é pouco flexível, sendo limitados ou apenas conexão paralela, ou apenas série. Por conta desse fato, a PowerSafe também deixa de ser uma opção para o BESS desenvolvido. (POWERSAFE BMS, 2021)

Os produtos da Batrium, empresa australiana focada em sistemas de menor porte, possuem muita tecnologia embarcada e funcionalidades. Apesar disso a proposta da empresa

acaba limitando a aplicação de seus produtos a 96 V, nível de tensão incompatível com o porte do projeto desenvolvido neste trabalho. (BATRIUM, 2020)

Por último, a também americana Orion possui limitação semelhante de sua conterrânea eLithion. Embora os produtos da marca possam lidar com altas tensões e correntes, a restrição da conexão série dos módulos acaba limitando sua aplicação na topologia que considera múltiplos armários conectados em paralelo. (ORION BMS, 2021)

O modelo que satisfaz as necessidades levantadas será apresentado a seguir.

3.3.2.3 Modelo escolhido

Com a promessa de ser o “BMS mais flexível do mundo”, segundo a própria fabricante, a linha de produtos da EMUS, situada na Lituânia, impressiona pela grande modularidade e descentralização. Além disso, o catálogo da empresa engloba componentes para diversos tamanhos de sistema e tensões de operação, permitindo uma grande customização do resultado. A seguir são apresentados os componentes escolhidos para cada parte do circuito, abordando suas principais características e motivos de escolha. (EMUS BMS, 2021b)

3.3.2.3.1 BMS_S

Buscando no catálogo da EMUS BMS é possível encontrar diversas opções para o papel do BMS_S, uma vez que há uma ampla variedade de modelos, variando, além do formato mecânico de fixação, os parâmetros referentes ao processo de balanceamento das células de bateria. Na Tabela 7 podem ser observados todos os produtos citados, com suas principais características referentes à descarga dos elementos de bateria. Cabe ressaltar que todos os modelos listados possuem tensão de operação entre 2,00 V e 4,55 V, garantindo compatibilidade com as principais químicas de baterias presentes hoje no mercado.

Tabela 7: Modelos disponíveis para o BMS_S no catálogo da EMUS.

Modelo	Resistência [Ω]	Corrente [mA]	Potência [W]
G1 Cell Module – Small type	4,10	700	2
G1 Cell Module – CALB CAM 72Ah type	3,00	1200	4
G1 Cell Module – A/B type	2,70	1350	5
G1 Cell Module – GBS type	2,05	1400	4
G1 Cell Module – 1.5A	2,50	1500	8
G1 Cell Module – 3A	1,35	2700	10
G1 Cell Module – 200-400Ah type	0,80	6125	30

Dentre os expostos, o produto “G1 Cell Module – Small type”, ilustrado na Figura 27, se mostrou como a melhor opção para o papel de BMS_S, uma vez que a corrente máxima de balanceamento é compatível com os 330 mA calculados anteriormente. Segundo o fabricante, o modelo é o ideal para células de bateria com capacidade entre 50 Ah e 100 Ah, faixa que contempla os 66 Ah da bateria estudada. (EMUS BMS, 2021c)

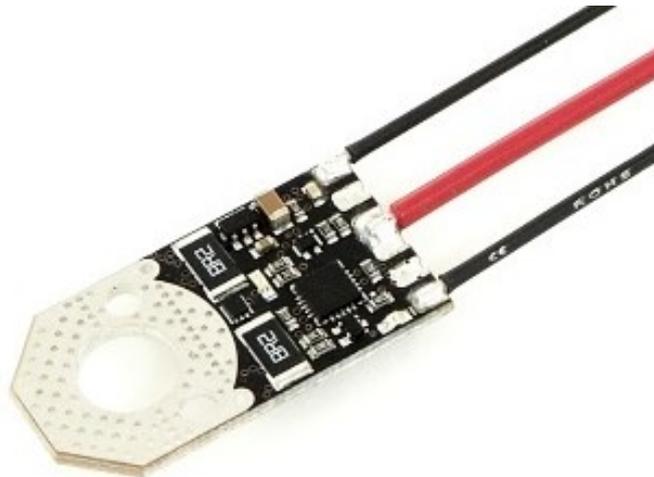


Figura 27: EMUS G1 Cell Module – Small type. Fonte: EMUS BMS (2021).

Na Tabela 8 estão listadas suas principais características da versão escolhida, onde chama-se atenção para os valores relativos ao balanceamento.

Tabela 8: Características técnicas do EMUS G1 Cell Module – Small type.

Característica		Valor	Unidade
Tensão de operação	Mínima	2,00	V
	Máxima	4,55	V
Temperatura de operação	Mínima	-40	°C
	Máxima	80	°C
Balanceamento	Resistência	4,10	Ω
	Corrente máxima	700	mA
	Potência máxima	2	W
Precisão da leitura	Tensão	10	mV
	Temperatura	5	°C

Considerando o limite da corrente de balanceamento em 330 mA, valor obtido anteriormente, é possível traçar o gráfico do comportamento da potência dissipada pela

resistência de balanceamento durante o procedimento de regulação da tensão das células. Aplicando-se a Lei de Ohm, o resultado obtido pode ser observado na Figura 28, percorrendo-se todo o intervalo de tensões que pode ser admitido pela célula de bateria no Nissan Leaf.

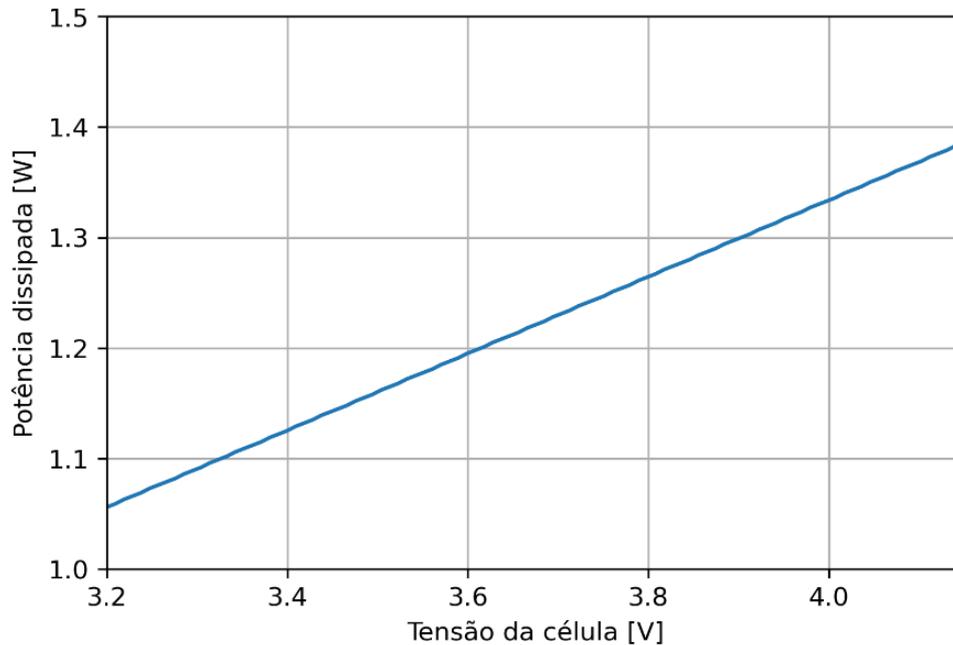


Figura 28: Comportamento da potência dissipada para uma corrente de balanceamento constante.

Uma vez que não houve ultrapassagem da potência máxima de 2 W estabelecida pelo fabricante, pode-se concluir que o procedimento de balanceamento com o limite de corrente imposto será possível ao longo de toda a faixa de valores que podem ser admitidos pela célula estudada, garantindo que menos de 70% do limite será dissipado na situação mais estressante do ponto de vista elétrico.

3.3.2.3.2 BMS_M

Pensando na modularidade da solução idealizada o “G1 CAN Cell Group Module”, mostrada na Figura 29, é o produto da EMUS BMS responsável por possibilitar a divisão do sistema em gavetas de baterias. Usado nesse projeto como o BMS_M do circuito, esse componente permite a centralização de toda a informação coletada pelo BMS_S, simplificando a comunicação com o nível superior, o BMS_C.

Equipado com protocolo CAN, o BMS_M pode ser responsável por até cem BMS_S, conectados de maneira serial em termos de comunicação. Além disso, até 32 BMS_M podem ser ligados na mesma rede, tornando possível um controle de até 3.200 células de bateria por conjunto. (EMUS BMS, 2021c)

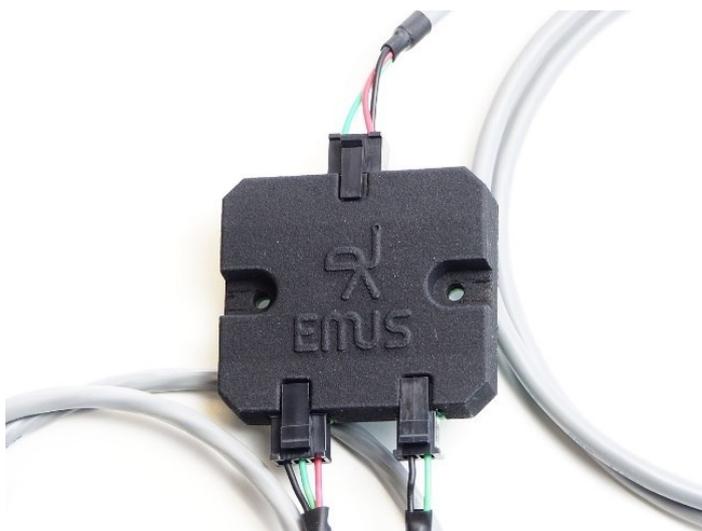


Figura 29: EMUS G1 CAN Cell Group Module. Fonte: EMUS BMS (2021).

Na Tabela 9 podem ser observadas algumas das principais características do componentes, comprovando que a tensão de 24 V, padrão em diversos sistemas de controle industriais, pode ser usada para alimentar o BMS_M escolhido.

Tabela 9: Características técnicas do EMUS G1 CAN Cell Group Module.

Característica		Valor	Unidade
Número de células	Máximo	100	-
Tensão de operação	Mínima	6	V
	Máxima	64	V
Temperatura de operação	Mínima	-40	°C
	Máxima	80	°C
Protocolo de comunicação		CAN	-

3.3.2.3.3 BMS_C

O último componente em termos de topologia de controle e comunicação é o BMS_C, responsável por todo o conjunto instalado abaixo dele, composto por diversos BMS_S e BMS_M. No catálogo da EMUS, o modelo disponível é o “G1 BMS Control Unit”, visto na Figura 30.

via CAN, como é o caso do preciso IVT-S da fabricante alemã Isabellenhütte. (ISABELLENHÜTTE, 2018)

Além de todas as funcionalidades citadas, o equipamento possui uma ampla lista de inversores com o qual já foi testado e tem sua comunicação validada. Dentre a ampla lista de inversores divulgada, destacam-se as marcas Victron e SMA, muito tradicionais e renomadas no meio. (EMUS BMS, 2021c)

3.3.2.3.4 Topologia de comunicação

Listados os principais componentes escolhidos para compor o sistema de gerenciamento de baterias do projeto, resta entender como a se dará a interligação entre eles, a fim de consolidar a hierarquia desenhada ao longo deste trabalho.

Na Figura 31 pode ser observado o diagrama básico proposto pelo fabricante para um sistema de três níveis, exatamente como o desejado para o sistema de armazenamento projetado. Os detalhes referentes ao cabeamento e acessórios necessários para o correto funcionamento do circuito são abordados mais adiante, mas já é possível notar no diagrama a presença do “3-way CAN Connector”, adaptador necessário para que seja possível a ligação de diversos dispositivos BMS_M em uma mesma rede CAN de comunicação. (EMUS BMS, 2021a)

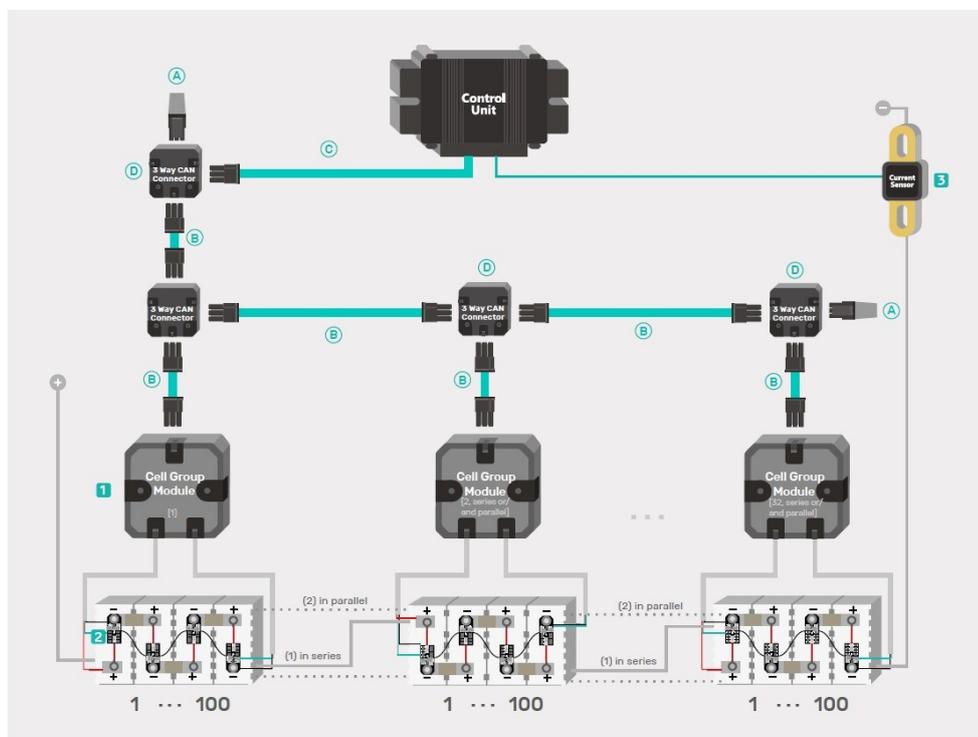


Figura 31: Diagrama sugerido de conexão dos produtos listados. Fonte: EMUS BMS (2021).

4 RESULTADOS

Após as definições técnicas realizadas na secção anterior, o resultado obtido no projeto dos segmentos do circuito é apresentado a seguir. Com o objetivo de manter a lógica de divisão adotada até o momento, essa secção foi desenvolvida percorrendo o caminho das gavetas, passando pelos armários e finalizando no sistema completo.

Além disso, é apresentada a relação de componentes idealizada para o segmento desenvolvido do projeto, quantificada e orçada para atender a construção do sistema projetado.

4.1 GAVETAS

4.1.1 Diagrama de blocos completo

Na Figura 32 pode ser observado o diagrama de blocos completo da gaveta, englobando todos os componentes em questão. Por questão de simplificação do desenho, foram omitidas as conexões de alimentação 24 V CC, necessárias para o funcionamento do BMS_M e do Relé.

Ao longo das próximas secções todos os blocos são contemplados em detalhes.

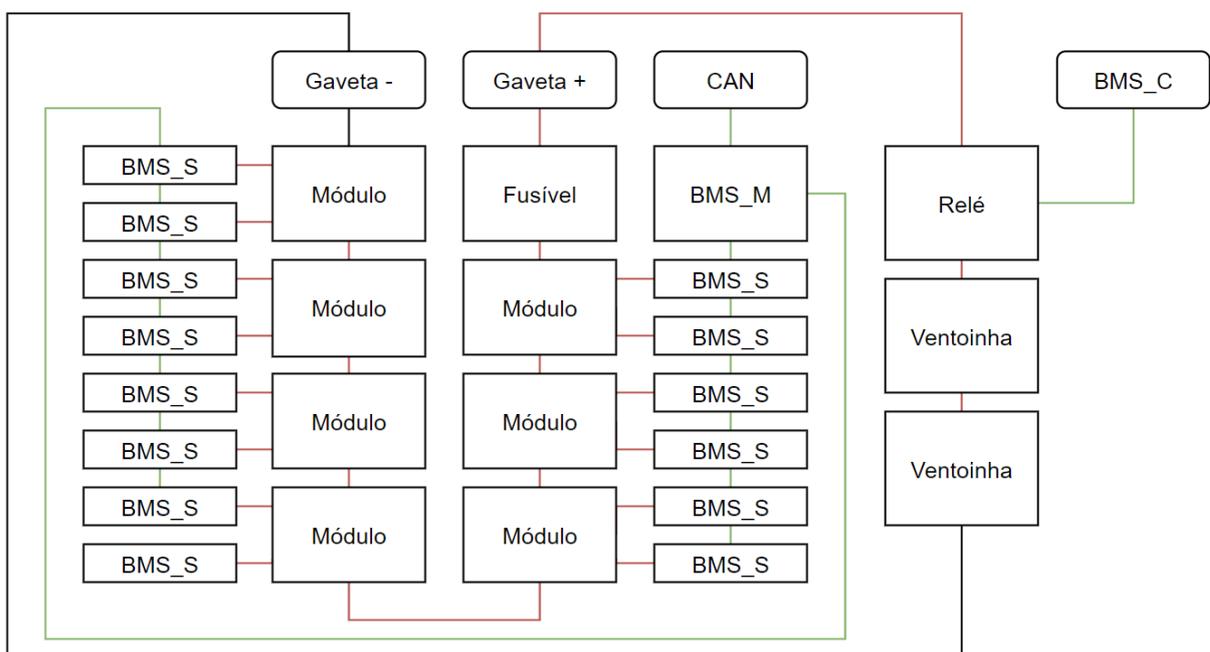


Figura 32: Diagrama de blocos completo da gaveta.

4.1.2 Ligação dos módulos de bateria

Como abordado anteriormente, a ligação dos módulos no interior de uma gaveta é realizada de maneira serial. Para isso, o terminal mais positivo de um módulo é ligado ao

terminal mais negativo do módulo subsequente, criando o arranjo de uma gaveta. Na Figura 33 pode ser observado o módulo de bateria do Nissan Leaf.

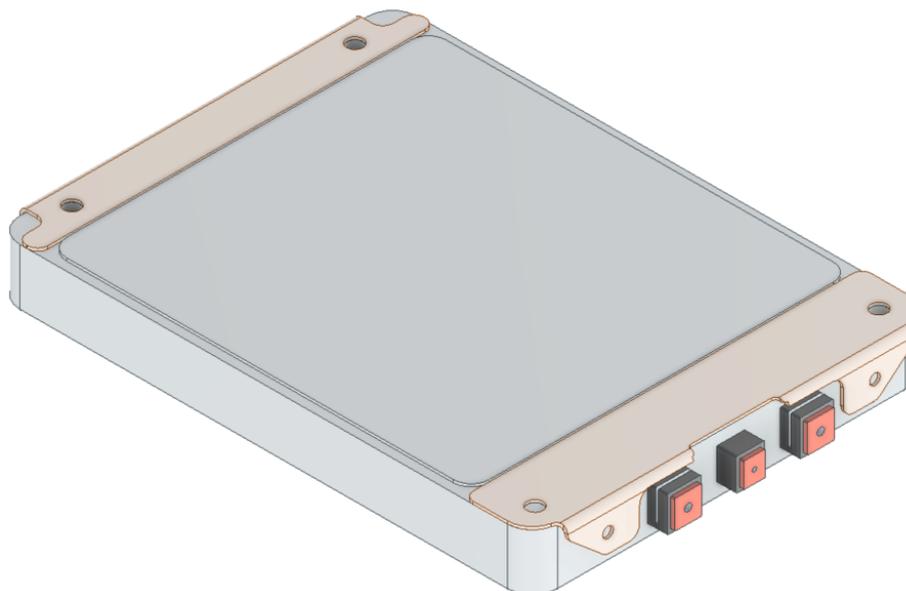


Figura 33: Modelo 3D do módulo de bateria do Nissan Leaf. Fonte: Brock Winberg (2015).

Para o dimensionamento da corrente que circulará em todas as gavetas do armário, já que a ligação do sistema é serial, foi admitido que a operação limite das baterias seria a 1C, ou seja, o menor período para um procedimento de carga ou descarga seria de uma hora. Dado essa fato, a corrente nominal do circuito será, no máximo, igual ao valor numérico da capacidade média de um módulo, 40,96 A considerando a degradação média exposta anteriormente.

A ligação será realizada através de pequenas barras de cobre, escolhidas por conta de sua manufatura simplificada, não necessitando crimpagem de conectores, além da facilidade na montagem e da resistência mecânica que proporcionam, auxiliando inclusive na fixação dos módulos no interior da gaveta.

As dimensões de cada barra, mostradas na Figura 34, foram idealizadas de maneira que houvesse o melhor aproveitamento mecânico no sistema, mesmo que isso signifique um considerável superdimensionamento na sua capacidade de corrente. Foi considerada uma chapa de cobre de 2 mm, com largura igual à do terminal do módulo do Nissan Leaf, 16 mm, e 76 mm de comprimento, garantindo espaço entre os módulos para ventilação adequada. Aproximações indicam que a barra dimensionada possui capacidade de condução de corrente de mais de 100 A, atendendo o sistema com muita segurança. (ALTE, 2021; SOLAR-WIND, 2020)



Figura 34: Modelo 3D da barra de cobre.

Como os módulos de bateria possuem roscas de fixação M8, as barras de cobre serão presas por conjuntos de parafusos M8 sextavados, auxiliados por arruelas de pressão também M8.

4.1.3 Fusível

Para aumentar o grau de proteção do projeto contra curto-circuitos e sobrecorrentes, cada gaveta possui seu próprio fusível de corrente contínua. O princípio de funcionamento do fusível se baseia na ruptura do elemento metálico através de fusão, uma vez que sua corrente nominal é ultrapassada. Dessa forma, a especificação do fusível deve estar entre a corrente máxima esperada para o circuito, 40,96 A, e a corrente máxima suportada pelas barras de cobre.

O modelo escolhido foi o Schurter 8020.2055, especificado para 50 A, uma vez que esse valor de corrente está bem localizado na faixa calculada para a operação correta da gaveta. Mostrado na Figura 35, o componente é ideal para a aplicação proposta, uma vez que foi desenvolvido para atuar em sistemas de corrente contínua com tensão até 1000 V. (SCHURTER, 2021)

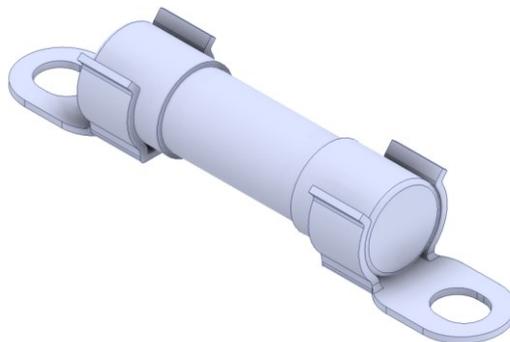


Figura 35: Modelo 3D do fusível Schurter 8020.2055. Fonte: Schurter (2021).

4.1.4 BMS_S

Para exemplificar o método de conexão elétrica de cada BMS_S no arranjo série de uma gaveta, a Figura 36 apresenta um recorte dos módulos três e quatro. Uma vez que cada módulo necessita de duas leituras de tensão – dada a topologia 2S2P no seu interior – nota-se que duas unidades do BMS_S devem ser conectadas a cada um, também seguindo a ordem lógica de numeração, contada a partir do ponto mais negativo de cada gaveta.

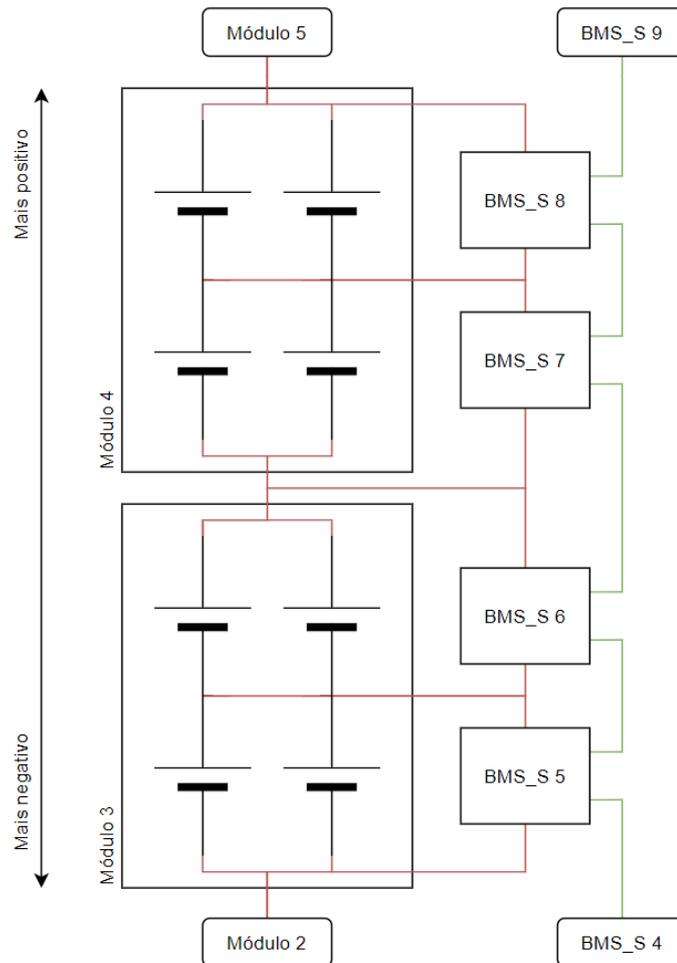


Figura 36: Segmento do diagrama de conexões do BMS_S.

Outro fato interessante sobre o diagrama é a ligação serial de comunicação entre os elementos, tornando possível a utilização de apenas um cabo para fluir os dados pelo arranjo. Nessa configuração, o BMS_S 1 e o BMS_S 14 de cada gaveta são ligados ao BMS_M dela, a fim de centralizar toda a informação e reportá-la à instância superior, o BMS_C.

Na Figura 37 é mostrado o modelo tridimensional simplificado do BMS_S, usado no projeto em três dimensões do circuito, que será apresentado posteriormente. Nele é possível observar a furação maior, de oito milímetros, já idealizada para permitir a fixação do

componente juntamente aos terminais do módulo, entre a barra metálica e a arruela de pressão mencionadas.

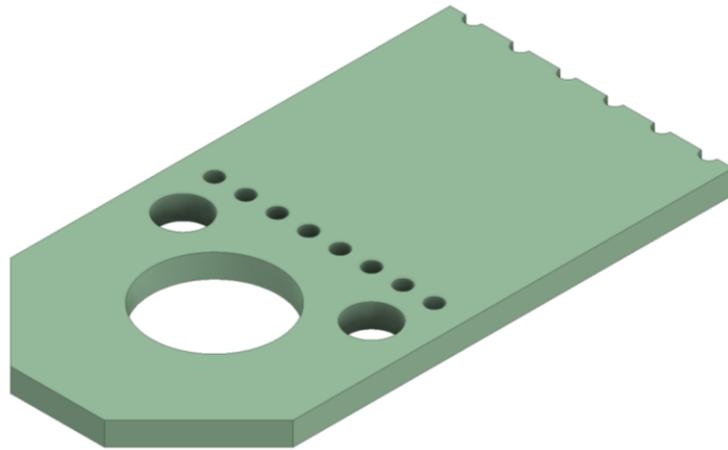


Figura 37: Modelo 3D simplificado do BMS_S.

4.1.5 BMS_M

O BMS_M, mostrado na Figura 38 é onde serão ligados os terminais de comunicação dos BMS_S instalados nas extremidades do arranjo série de módulos, através de um cabo de duas vias.

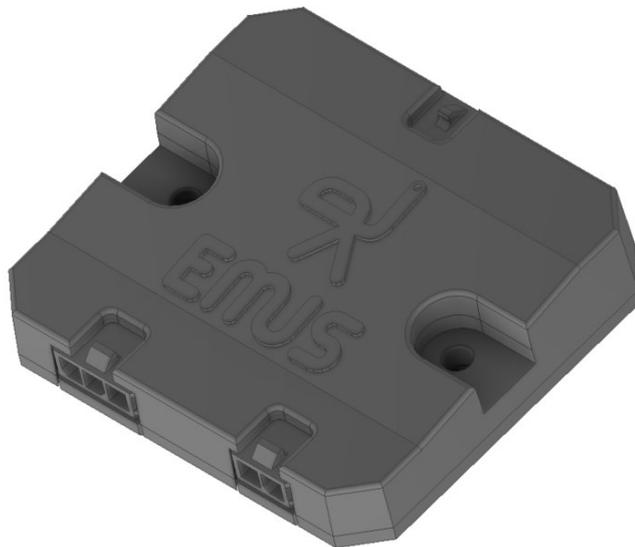


Figura 38: Modelo 3D do BMS_M. Fonte: EMUS BMS (2021).

Além disso, o componente também é alimentado por uma tensão contínua de 24 V, necessária para seu funcionamento. Essa energia é proveniente da *junction-box* de cada armário, e transmitida via cabo para todas as gavetas do arranjo.

A última ligação necessária é ao barramento CAN do armário, capaz de transmitir toda a informação entre os BMS_M e o BMS_C. Dado o princípio de funcionamento do

CAN, apenas com dois cabos, isso simplifica também a quantidade de fios percorrendo o sistema.

Para simplificar o cabeamento e evitar emendas elétricas, será empregado no circuito o *3-way CAN Connector*, também da EMUS, mostrado na Figura 39. O funcionamento desse componente é semelhante ao popular “T elétrico”, onde há uma derivação de um ponto para que sejam conectados mais elementos. Com esse componente também será mais simples executar a instalação do terminador CAN, um resistor, em geral de 120 Ω , que deve ser ligado nas extremidades de uma rede baseada em tal protocolo. O resistor é responsável por estabelecer um potencial entre os dois condutores do sistema, permitindo que os dispositivos consigam transmitir e receber as informações adequadamente. (CORRIGAN, 2002)

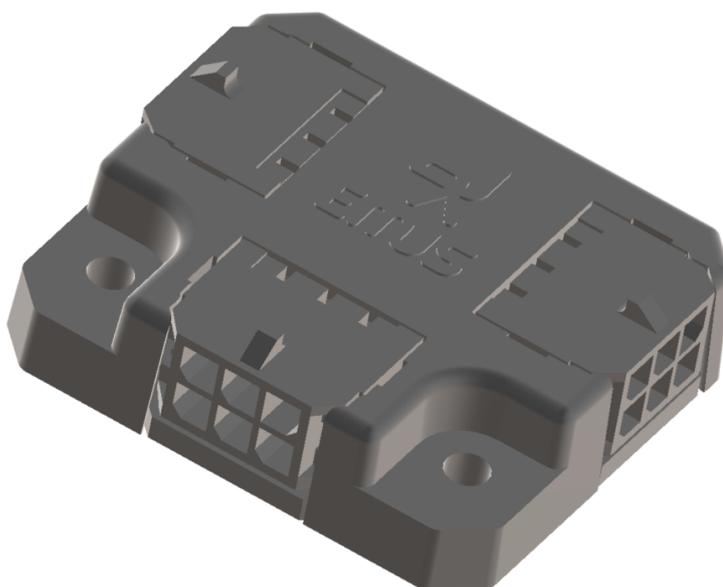


Figura 39: Modelo 3D do 3-way CAN Connector. Fonte: EMUS BMS (2021).

4.1.6 Arrefecimento

Visto que as baterias íon-lítio naturalmente produzem calor devido às reações químicas exotérmicas que possibilitam o armazenamento de energia elétrica, é necessário que haja maneira de controlar tal temperatura. Por mais que o BESS seja climatizado como um todo, mantido em temperaturas relativamente baixas, o espaço confinado onde os módulos são montados pode não permitir a troca de calor adequada para que as baterias equalizem sua temperatura com o ambiente. (IBRAHIM; JIANG, 2021)

Pensando na mitigação desse fato, a instalação de ventoinhas de 120 mm de diâmetro, como a mostrada na Figura 40, auxiliam na circulação de ar no interior da gaveta e, conseqüentemente, mantém os módulos de bateria em uma temperatura reduzida.



Figura 40: Modelo 3D da ventoinha 24 V. Fonte: Philip Diegel (2020).

Como não há necessidade de que fiquem sempre em operação, o comando dos dois pequenos ventiladores instalados em cada gaveta é realizado através do BMS_C de cada armário. Um sinal de comando é enviado a um relé também instalado no interior da gaveta assim que certo valor de temperatura, determinado em configuração pelo usuário, é detectado em alguma célula. O fechamento do relé energiza com a tensão dos terminais da gaveta as duas ventoinhas 24 V, ligadas em série, fazendo com que iniciem a operação.

4.1.7 Conectores

Capaz de suportar até 40 A em cada um de seus dois pinos e operar em tensões de até 1000 V, o APTIV 33211753 apresenta-se como uma excelente opção para as conexões de potência entre as gavetas de bateria e com a *junction-box*. O modelo escolhido, apresentado na Figura 41, possibilita um simples manejo de cabos, uma vez que a corrente poderá ser dividida em seus dois pinos, permitindo consequentemente a utilização de dois conectores mais finos, em vez de um de maior capacidade. (APTIV, 2020a)

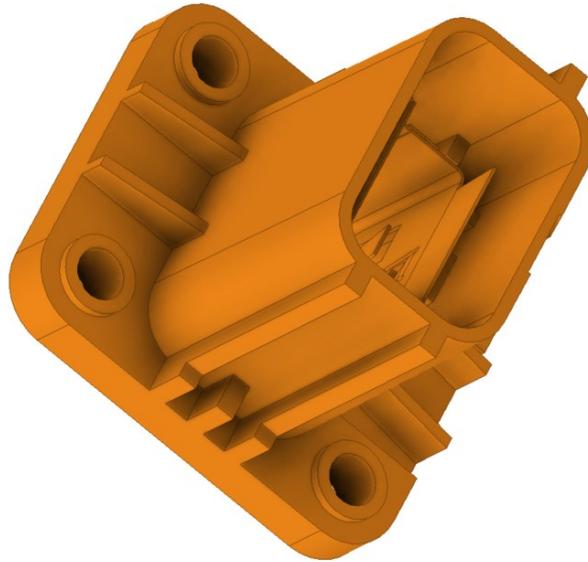


Figura 41: Modelo 3D do conector de potência APTIV 33211753. Fonte: APTIV (2021).

O conector do tipo RJ-45, visto na Figura 42, é muito comum em instalações de internet, motivo que o levou a ser o modelo escolhido para a conexão de comunicação entre as gavetas de bateria e a *junction-box* de cada armário. Através de cabos de rede comuns é possível interligar as partes, simplificando o processo de instalação e manutenção do sistema. Dotado de oito pinos, o Amphenol MRJ5480BF pode acomodar, com espaço para ampliação futura de funcionalidades, os pares de alimentação 24 V, CAN e ainda o comando para controle das ventoinhas de arrefecimento do sistema. (AMPHENOL, 2008)

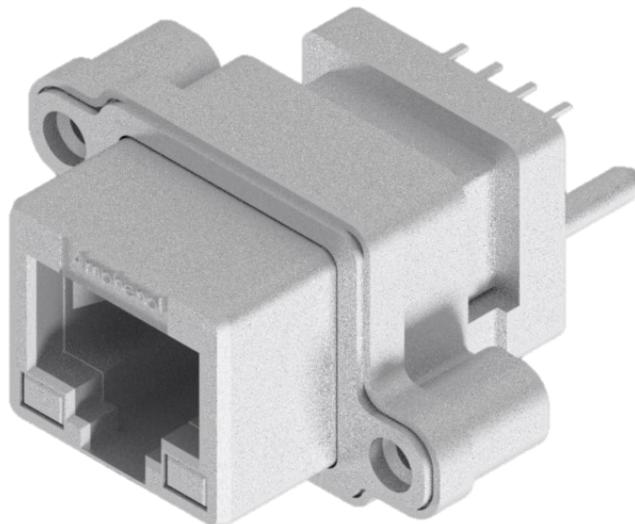


Figura 42: Modelo 3D do conector de comunicação Amphenol MRJ5480BF. Fonte: Amphenol (2020).

4.1.8 Modelo 3D

Na Figura 43 é apresentado o resultado obtido na modelagem tridimensional da gaveta de baterias. As dimensões são 483x265x495 mm, considerando largura, altura e profundidade, respectivamente. Nota-se a presença de dois conectores laranjas, dada a topologia série, tornando possível que cada gaveta receba o potencial da superior e se conecte ao potencial da inferior, formando a tensão total do arranjo. Já os dois conectores de comunicação foram idealizados para simplificar a instalação e manutenção do sistema, além de não exigir que seja crimpado um cabo único que atenderia toda a série de gavetas.

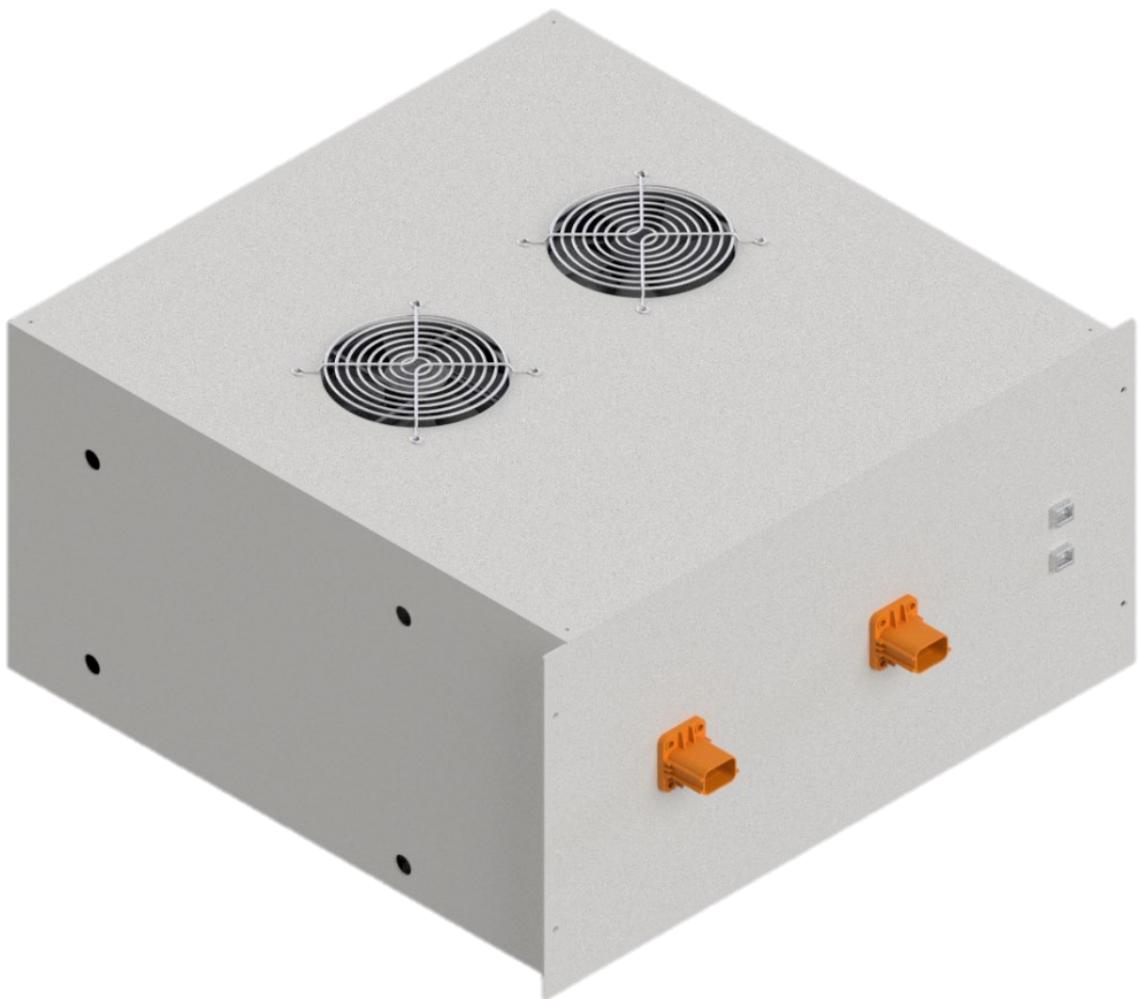


Figura 43: Modelagem 3D da gaveta de baterias.

Um detalhe interessante de ser observado é a posição das ventoinhas na gaveta, responsáveis por proporcionar um fluxo ascendente de ar, em consonância com a tendência natural do ar quente em subir. Na face inferior da gaveta foram previstos orifícios que permitem a circulação de ar na direção vertical.

Na Figura 44 é apresentada a proposta de conexão elétrica dos módulos de bateria do Nissan Leaf no interior da gaveta, utilizando alguns dos componentes citados anteriormente. Conectores do tipo olhal foram colocados nas extremidades do conjunto, permitindo a rápida e simples ligação aos conectores presentes no painel da gaveta.

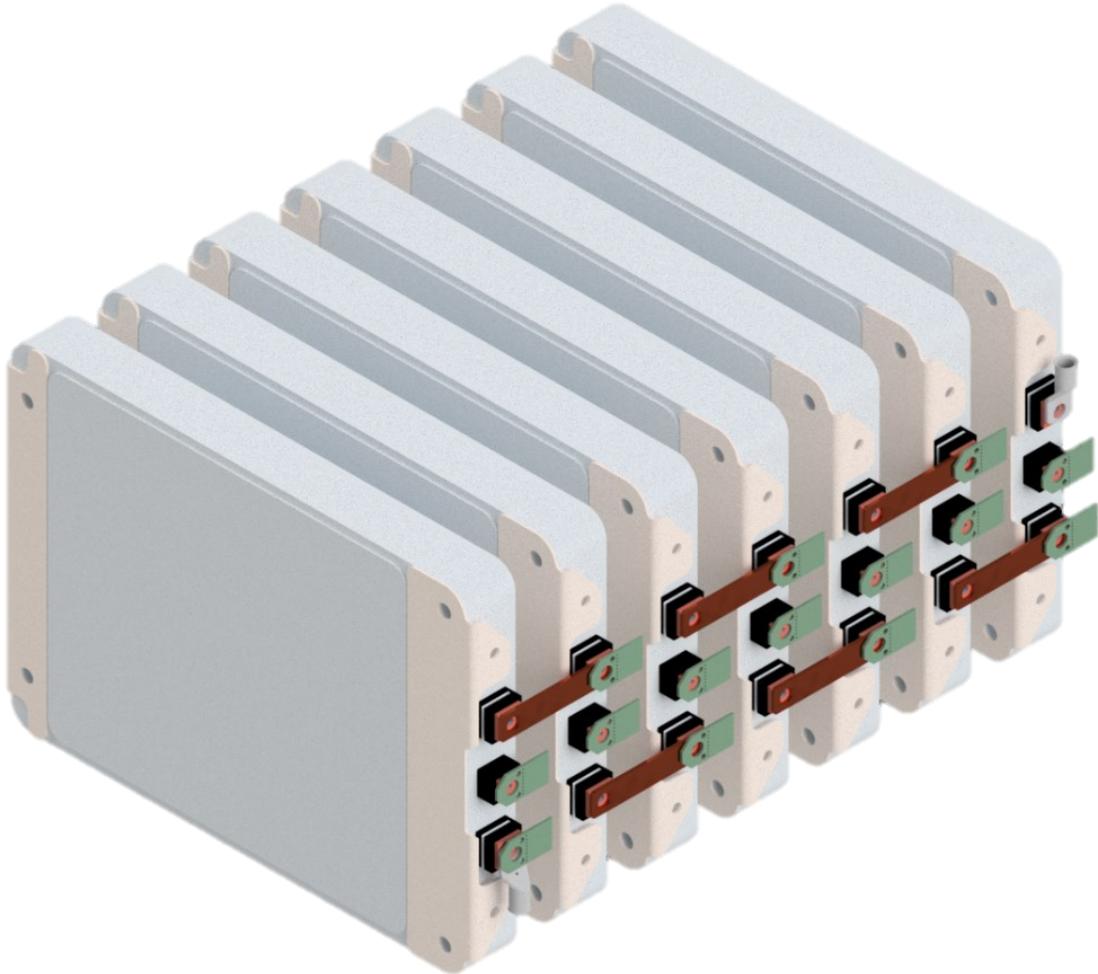


Figura 44: Detalhe interno da modelagem 3D, mostrando a ligação dos módulos de bateria.

4.2 ARMÁRIOS

4.2.1 Diagrama de blocos completo

Visto na Figura 45, o armário de baterias, que compreende a ligação série de quatorze gavetas de baterias, conectadas através da *junction-box* aos barramentos de tensão contínua e CAN do sistema. Os elementos são abordados individualmente em detalhes ao longo das secções subsequentes.

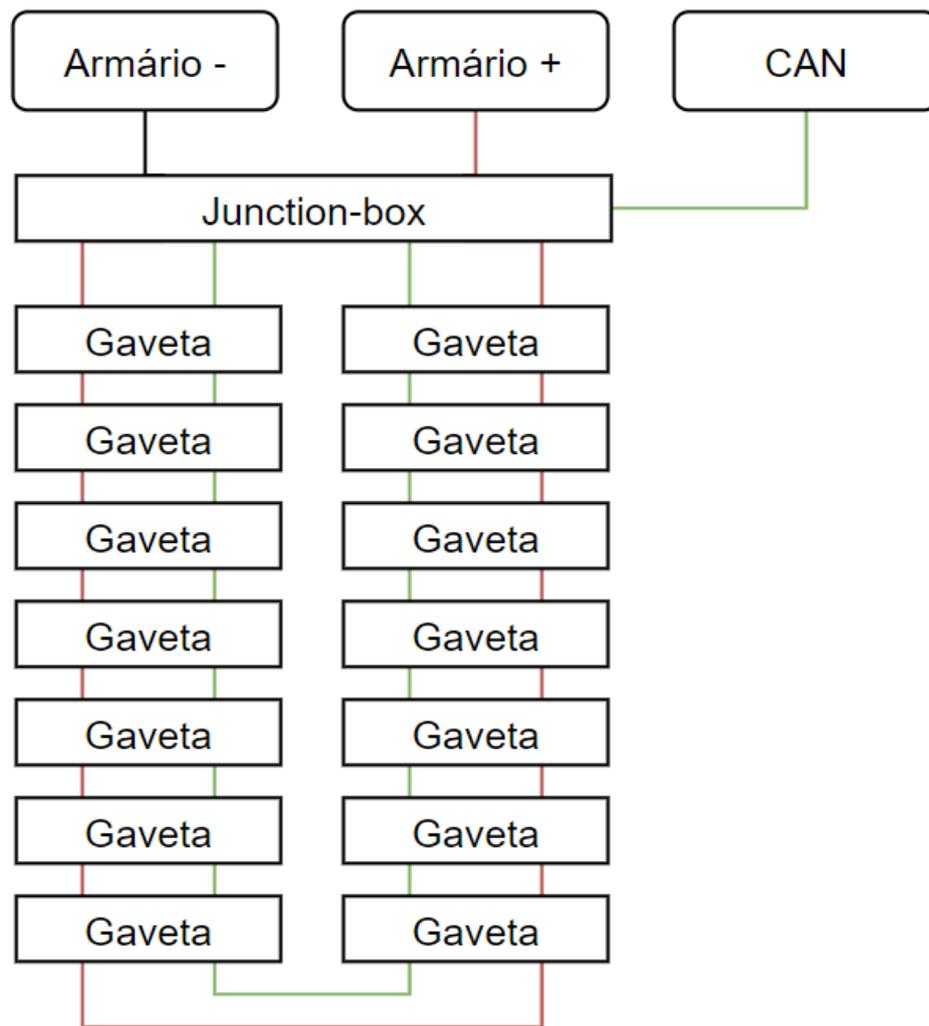


Figura 45: Diagrama de blocos simplificado do armário.

4.2.2 Junction-box

A *junction-box* pode ser encontrada no topo de cada armário, visto que a série de gavetas deve ser conectada a ela. Além de abrigar o BMS_C, responsável pelo controle de todo o armário, nela são encontrados diversos componentes relacionados ao monitoramento e proteção do circuito, abordados em detalhes ao longo dessa secção. Na Figura 46 podem ser observados os principais elementos que compõe o circuito, abordados em detalhes a seguir. (GOULART, 2020)

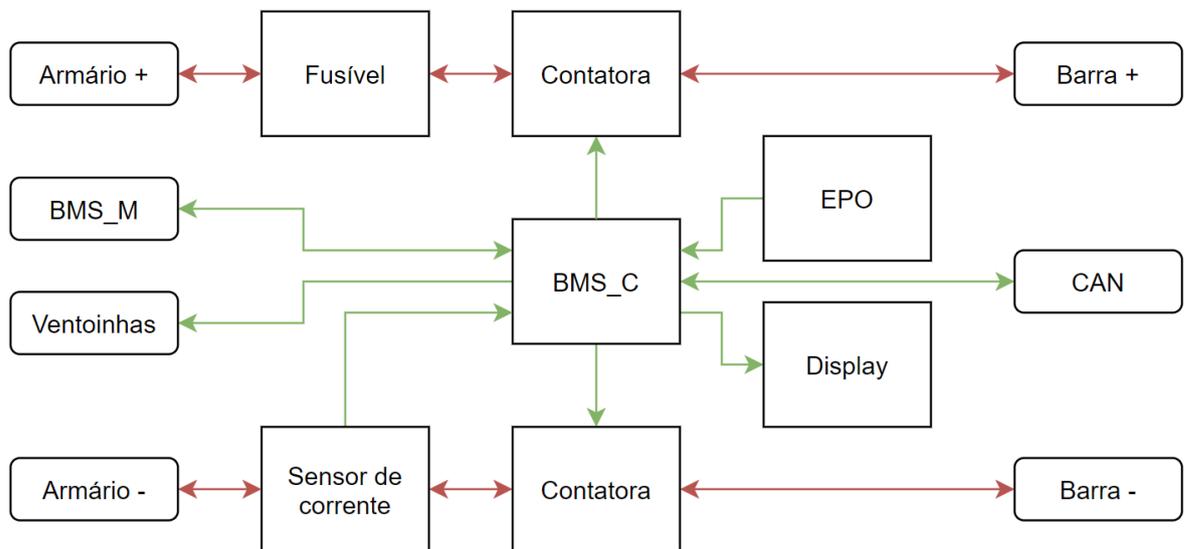


Figura 46: Diagrama de blocos da *junction-box*.

Por questão de simplificação do diagrama, foram omitidas as conexões de alimentação contínua de 24 V do BMS_C e chaves contadoras.

4.2.2.1 BMS_C

O BMS_C, mostrado na Figura 47, é o cérebro de todo o armário, onde os demais componentes da *junction-box* são conectados. Do ponto de vista das gavetas, é o responsável pelos sinais de comunicação enviados para cada BMS_M e as ventoinhas, usando as informações recebidas na tomada de decisão. Do outro lado, a tensão contínua disponibilizada no barramento e as informações que trafegam na linha CAN entre os armários são as saídas geradas pela *junction-box*.

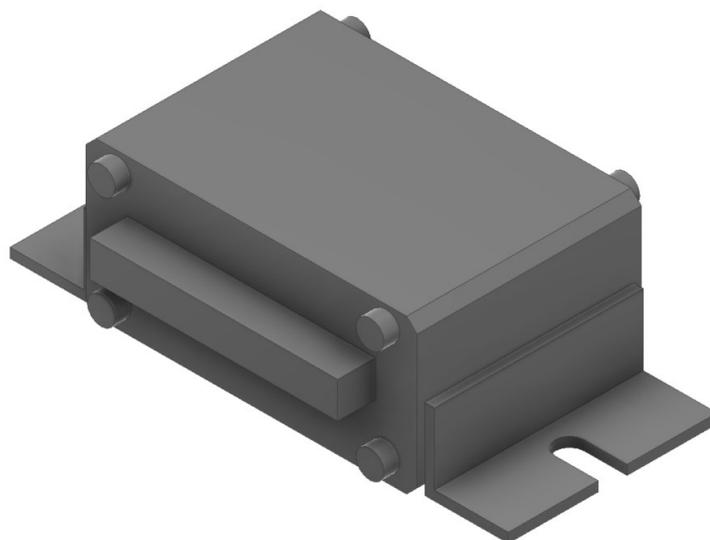


Figura 47: Modelo 3D simplificado do BMS_C. Fonte: EMUS BMS (2021).

Abordando a segurança do sistema, o BMS_C está conectado às chaves contadoras de corrente contínua, que podem ter sua abertura comandada à medida que qualquer anormalidade aconteça. Esse estado de falha pode ser gerado por diversos fatores, dentre eles: sobrecorrente, sub ou sobretensão nas baterias, perda de comunicação com algum elemento ou a interação humana com o botão de emergência (EPO, do inglês *Emergency Power Off*). (EMUS BMS, 2021c)

Sobre a interpretação e apresentação de informações, o sensor de corrente e o display são os últimos componentes da lista relacionados à entrada e saída de dados do BMS_C, respectivamente.

4.2.2.2 Fusível

O dimensionamento do fusível de corrente contínua presente na *junction-box* é exatamente o mesmo realizado para o fusível serial de cada gaveta de baterias; logo, não é necessário repetição de todo o procedimento de cálculo e justificativa de escolha.

4.2.2.3 Chave contadora

As chaves contadoras são peças importantíssimas no circuito, uma vez que são as responsáveis pela interrupção da tensão e da corrente em caso de quaisquer problemas. Por esse motivo, é fundamental que seja escolhido um produto de qualidade, confiável para executar a função.

Uma vez que os elementos estarão submetidos à tensão máxima de 813 V e corrente máxima de 50 A, essas são as especificações mínimas necessárias a serem cumpridas pela chave contadora escolhida.

Na Figura 48 está ilustrado modelo HVC500B-24 da TDK, chave contadora projetada para operação em tensões de até 1000 V contínuos e corrente máxima de 500 A. Por mais que a corrente real no circuito seja muito menor que o suportado pelo produto, comercialmente não são abundantes chaves contadoras para alta tensão e baixas correntes, fazendo com que seja necessária a adoção de um modelo com muito mais potencial de condução de corrente. (TDK, 2009)

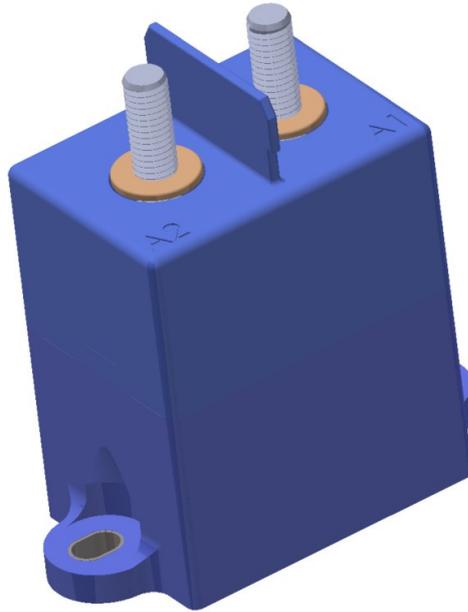


Figura 48: Modelo 3D da chave contatora TDK HVC500B-24. Fonte: TDK (2021).

4.2.2.4 Sensor de corrente

O sensor de corrente é peça chave no controle e proteção do sistema de baterias. Falando de proteção, a informação da corrente fluindo no circuito é importante para decisão de interrupção do circuito se esta for maior que a permitida, selecionada através de configuração prévia. Uma vez que a informação fornecida pelo sensor de corrente ao BMS_C indique anormalidade, ocorre a abertura das chaves contadoras do circuito, prevenindo quaisquer danos graves.

Já do ponto de vista de controle, a indicação fornecida por ele é importantíssima na estimação de variáveis relacionadas à energia do circuito, como o estado de carga (SoC) e a potência instantânea. Esses e outros dados são levados em conta nas decisões realizadas pelo EMS, e até pelo próprio BMS_C. Além disso, também são parâmetros interessante para serem mostrados ao usuário e armazenados para futuras consultadas e estudos.

Para o projeto apresentado, o sensor de corrente do tipo barramento da EMUS, mostrado na Figura 49, foi escolhido por apresentar integração facilitada e aprovada com o BMS_C, também da empresa. O modelo em questão apresenta erro de leitura máxima de 1%, e realiza leituras até 500 A, nas duas direções de circulação da corrente. (EMUS BMS, 2021c)



Figura 49: EMUS G1 *Bus Bar Dual Range Current Sensor*. Fonte: EMUS BMS (2021).

4.2.2.5 Chave de comando

Para permitir que cada armário seja individualmente desligado e ligado pelo usuário, a chave de comando atua diretamente na alimentação 24 V da *junction-box*, desligando todo o conjunto. O modelo escolhido é o M22-WRKK10 da EATON, mostrado na Figura 50, uma chave de dois polos e duas posições. (EATON, 2016)



Figura 50: Modelo 3D da chave EATON M22-WRKK10. Fonte: EATON (2020).

4.2.2.6 Botão de emergência

Fabricado pela mesma empresa, o M22-PVK11, na Figura 51, é o EPO (botão de emergência) escolhido para função, especificado como uma chave normalmente fechada. Visto que o circuito de corrente contínua é interrompido por ele, ao ser acionado, nenhum elemento presente na *junction-box* permanece ligado, isolando quaisquer possíveis falhas. Dotado de um sistema de travamento, uma vez pressionado, é necessário que a parte vermelha do botão seja rotacionada para que haja destravamento, aumentando a segurança do sistema. (EATON, 2015)

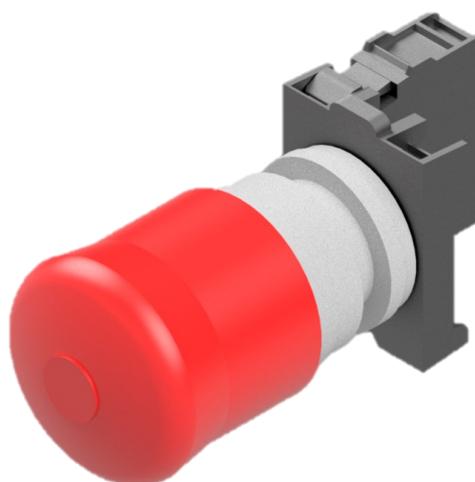


Figura 51: Modelo 3D do EPO EATON M22-PVK11. Fonte: EATON (2020).

4.2.2.7 Conectores

Na *junction-box* o conector RJ-45 da Amphenol é novamente utilizado aqui para a conexão CAN entre os armários, assim como mostrado anteriormente. Além dele e do conector de potência que interliga a *junction-box* com as gavetas de bateria, dois outros conectores são necessários para interligação dos armários com os barramentos.

O primeiro deles é responsável pela condução da corrente do arranjo série de baterias para o barramento de corrente contínua, operando também em alta tensão. Para a tarefa, o APTIV 35166503, ilustrado na Figura 52, se mostrou como uma boa escolha, dado seu moderno sistema de conexão e travamento, bem como sua corrente limite de 180 A. Projetado para sistemas de armazenamento e veículos elétricos, o componente pode operar a um limite de 1000 V contínuos, valor que atende as expectativas do projeto. (APTIV, 2020b)

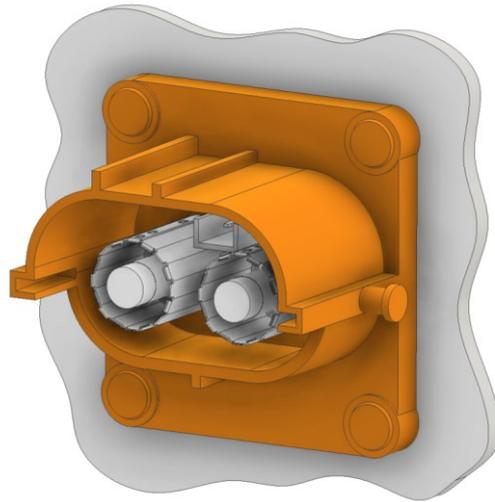


Figura 52: Modelo 3D do conector de potência APTIV 35166503. Fonte: APTIV (2020).

O segundo é utilizado para suprir com 24 V contínuos a *junction-box* e alguns outros componentes presentes nas gavetas de bateria. Para isso, o TE Molex 2-179553-4, mostrado na Figura 53, foi escolhido por conta de sua boa capacidade de condução de corrente de 8 A, além de seus quatro pinos possibilitarem implementação futura de novas funções, já que apenas um par será usado no primeiro momento. (TE CONNECTIVITY, 2020)



Figura 53: Modelo 3D do conector de alimentação TE Molex 2-179553-4. Fonte: TE (2020).

Além disso, um conector USB foi incluído no gabinete, permitindo comunicação com o BMS_C. A conexão permite que diversas funções sejam executadas no *software* da EMUS, como leitura de falhas e parâmetros, atualização de *firmware* e configuração da unidade. O modelo escolhido foi o Amphenol MUSBD111M1, mostrado na Figura 54. (AMPHENOL, 2021)



Figura 54: Modelo 3D do conector USB Amphenol MUSBD111M1. Fonte: Amphenol (2020).

4.2.2.8 Display

Pensando em praticidade na interação com o usuário, importante para eventuais manutenções, inspeções e até demonstrações do sistema em funcionamento, cada armário contempla a instalação de um display EMUS, como o da Figura 55.



Figura 55: EMUS G1 Display Unit. Fonte: EMUS BMS (2021).

Através de configuração realizada no software de computador da própria empresa, é possível determinar quais informações serão mostradas no visor, já contando com sugestões de configuração. Variáveis como temperatura, tensão, corrente, SoC e tantas outras podem ser inseridas no mostrador, que ainda conta com opção de mostrar os valores mínimos, médios ou máximos de cada parâmetro. (EMUS BMS, 2011)

A programação do modo de exibição é feita por um computador, conectando-se diretamente à interface *micro-USB* instalada no produto. Já a interação com o BMS_C, incumbido de fornecer os dados atualizados para exibição é feita pelo protocolo serial RS-232, em pinos específicos para a aplicação.

4.2.2.9 LED de indicação “ligado”

Para indicação de energização com 24 V do circuito, uma luz LED de mesma tensão nominal foi posicionada eletricamente após a chave que interrompe a alimentação do circuito da *junction-box*. O modelo escolhido foi a TRU 140394, vista na Figura 56. (TRU COMPONENTS, 2003)



Figura 56: Modelo 3D da luz LED TRU 140394.

4.2.2.10 Modelo 3D

Feita com o objetivo de auxiliar na visualização e montagem do painel da *junction-box*, a modelagem 3D simplificada pode ser observada na Figura 57. Nela podem ser notados alguns dos componentes citados anteriormente. As dimensões são 483x176x495 mm, considerando largura, altura e profundidade, respectivamente.



Figura 57: Modelagem 3D simplificada da *junction-box*.

Na Figura 58 é apresentada uma visão alternativa, onde os elementos podem ser observados em mais detalhes para que se compreenda melhor a dinâmica de operação do sistema.

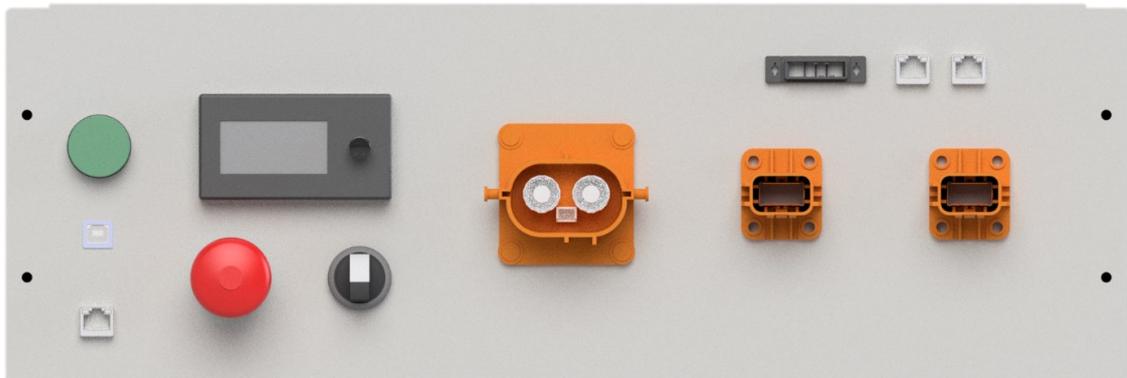


Figura 58: Detalhe do painel na modelagem 3D.

O posicionamento dos elementos segue uma separação estratégica, onde os conectores de alta tensão estão posicionados mais ao lado direito e a parte que corresponde à interação com o usuário no esquerdo. Essa divisão aumenta a segurança na manipulação do sistema, além de simplificar a operação mantendo tudo mais próximo.

4.3 SISTEMA

4.3.1 Diagrama de blocos completo

Na Figura 59 pode ser observado o diagrama de blocos para o sistema, tratando cada armário como um bloco único, para fins de simplificação. Além das barras de tensão contínua já apresentadas anteriormente, o diagrama conta com um par 24 V contínuo para alimentação dos componentes e uma linha CAN, capaz de interligar os armários entre si e com o EMS.

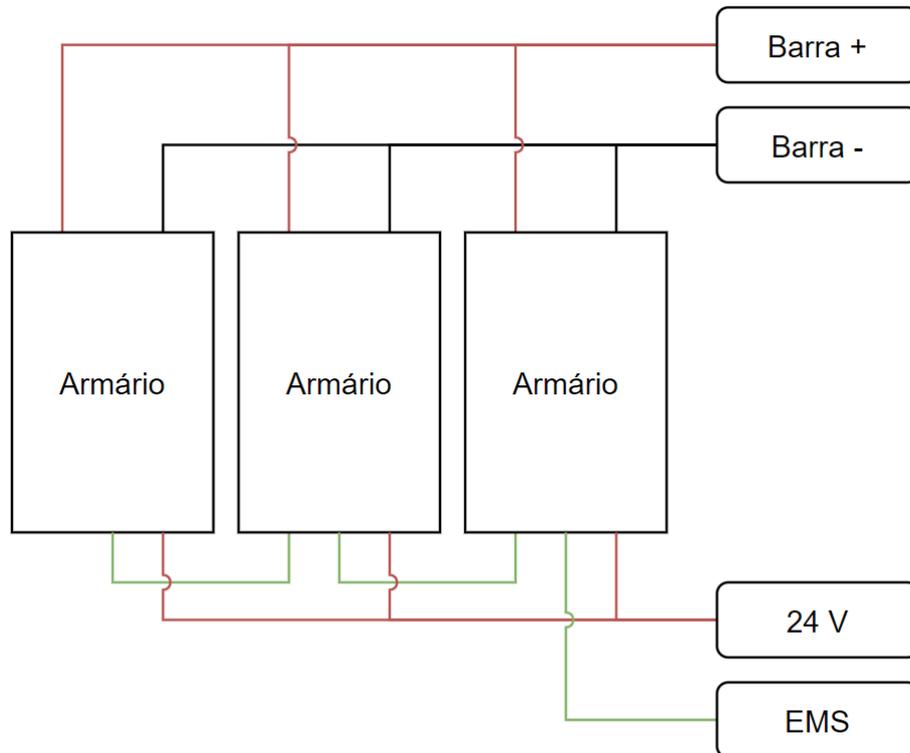


Figura 59: Diagrama de blocos do sistema.

4.3.2 Modelo 3D

Na Figura 60 pode ser observado o resultado final da modelagem, onde os três armários de bateria são mostrados em conjunto. A *junction-box* ocupa a posição mais elevada de cada armário, simplificando a operação do usuário e a saída dos cabos para as calhas presentes nas instalação do BESS. Por motivo de clareza na imagem, foram omitidos os cabos de conexão de potência e dados.

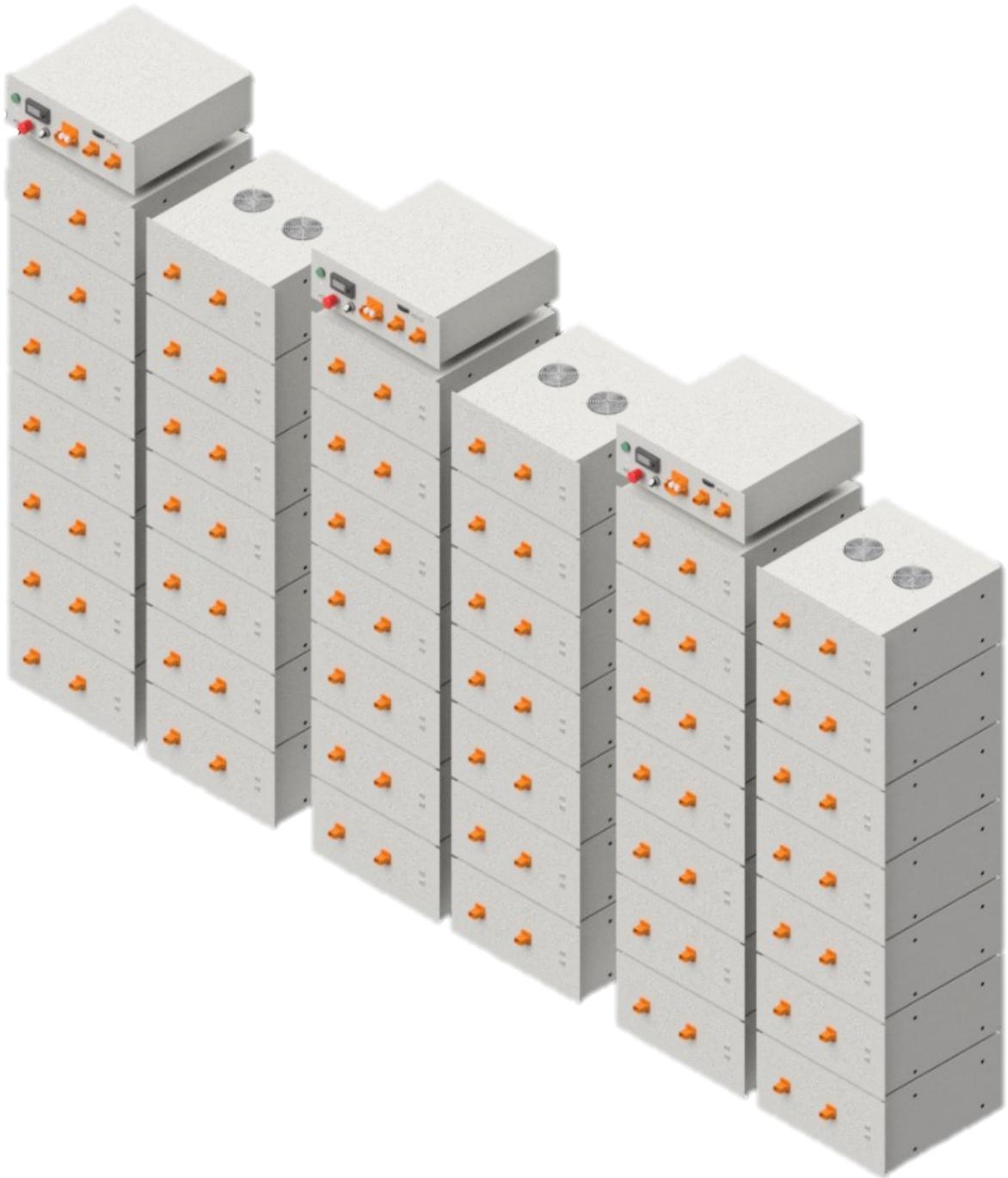


Figura 60: Modelagem 3D do sistema completo.

4.3.3 Lista de materiais

Como último ponto entregável deste trabalho, a Tabela 11 apresenta a listagem simplificada dos principais componentes selecionados para o projeto, abordados anteriormente. Como referência para alguns deles, são apresentados os números seriais do fabricante, auxiliando na sua procura em lojas *online*.

Tabela 11: Lista de componentes selecionados para o projeto.

Parte	Componente			Quantidade	
	Descrição	Marca	Modelo / PN	Parte	Total
Gaveta	Adaptador CAN	EMUS	3-way CAN Connector	1	42
	Barra de cobre	-	3x16x76 mm	6	252
	BMS_M	EMUS	G1 CAN Cell Group Module	1	42
	BMS_S	EMUS	G1 Cell Module – Small type	14	588
	Conector de potência	APTIV	33211753	2	84
	Conector de sinal	Amphenol	MRJ5480BF	2	84
	Fusível	Schurter	80202055	1	42
	Módulo de bateria	Nissan	Nissan Leaf 66 Ah	7	294
	Ventoinha	-	120 mm - 24 V	2	84
Junction-box	BMS_C	EMUS	G1 Control Unit	1	3
	Chave de comando	EATON	M22-WRKK10	1	3
	Conector de alimentação	TE	Molex 2-179553-4	1	3
	Conector de potência	APTIV	35166503	1	3
	Conector de sinal	Amphenol	MRJ5480BF	3	9
	Conector USB	Amphenol	MUSBD111M1	1	3
	Contatora	TDK	HVC500B-24	2	6
	Display	EMUS	G1 Display Unit	1	3
	EPO	EATON	M22-PVK11	1	3
	Fusível	Schurter	80202055	1	3
	LED	TRU	140394	1	3
	Sensor de corrente	EMUS	Current sensor busbar type	1	3

5 CONCLUSÕES

A realização deste trabalho indicou a viabilidade técnica no rearranjo de módulos de bateria do Nissan Leaf em arranjos com tensão, capacidade e potência significativamente diferentes das originais do veículo. Tal resultado corrobora a modularidade e versatilidade nesse tipo de solução, permitindo a construção de sistemas de armazenamento de diversos portes e para diversas aplicações.

Também foi possível verificar a vasta oferta de material no mercado, desde componentes simples, como fusíveis e chaves, até partes mais complexas como o BMS e PCS. A contração ou expansão da capacidade do sistema desenvolvido se mostrou também viável nesse ponto, dado que a ampla linha de produtos semelhantes aos escolhidos permitiria a fácil alteração dos parâmetros de projeto.

A escolha dos componentes para cada tarefa possibilita um melhor planejamento financeiro do projeto, uma vez que os modelos selecionados podem ser facilmente orçados nos principais fornecedores do mercado. Os valores obtidos nesta estimativa podem servir como norte para a composição dos custos do projeto, que conta com diversas outras partes de grande expressão em seu custo final. Uma vez que a definição de cada componente nesse projeto também seguiu critérios de otimização financeira, espera-se que o projeto se torne viável para o teto de gastos estabelecido.

A futura implementação do projeto pela equipe do Laboratório Fotovoltaica/UFSC será de extrema importância na validação ou retificação de sua elaboração. Possivelmente, alguns obstáculos acabarão surgindo no momento de transição da etapa de concepção para a de implementação do projeto, mesmo que esse trabalho tenha buscado contornar alguns possíveis problemas que poderiam vir a acontecer.

As modelagens tridimensionais feitas durante o projeto, além de auxiliarem na visualização do resultado deste trabalho, serão fundamentais na idealização do sistema como um todo. A inserção dos modelos criados nas próximas etapas de planejamento de espaço físico do BESS ajudarão na compatibilização mecânica com as outras partes, como o PCS, HVAC e quadros elétricos.

Acredita-se que a realização desse trabalho fomente o ambiente de pesquisa e desenvolvimento relacionado a sistemas de armazenamento de energia e utilização de baterias de segunda vida. Com o crescente volume de veículos elétricos comercializados já

mencionado, espera-se que o mercado de reutilização de baterias cresça no Brasil e no mundo, fortalecendo a relevância do estudo desenvolvido.

Dada a dificuldade de se encontrar informações de qualidade sobre sistemas de armazenamento em português, uma vez que a maior parte do material é produzido em inglês, essa barreira acaba freando o acesso a esse assunto no Brasil. O desenvolvimento desse trabalho foi realizado pensando também na criação de um material de consulta sobre armazenamento em português. Espera-se que essa singela contribuição sirva para instigar curiosidade e espalhar o conhecimento para estudantes, profissionais e entusiastas.

REFERÊNCIAS

ADAFRUIT. **Voltages**. Disponível em: <<https://learn.adafruit.com/li-ion-and-lipoly-batteries/voltages>>. Acesso em: 25 mar. 2021.

AIRLINK. **Entenda o que é HVAC e a importância do sistema para conforto térmico de ambiente**. Disponível em: <<https://www.airlinkfiltros.com.br/artigos/entenda-o-que-e-hvac-e-importancia-do-sistema-para-conforto-termico-de-ambiente>>. Acesso em: 24 mar. 2021.

ALTE. **Wire Sizing Chart for 12V, 24V, and 48V DC Systems**. Disponível em: <<https://www.altestore.com/diy-solar-resources/wire-sizing-tool-for-12-24-and-48-volt-dc-systems>>. Acesso em: 16 abr. 2021.

AMPHENOL. Folha de dados do Amphenol MRJ5480BF. 2008.

AMPHENOL. Folha de dados do MUSBD111M1. 2021.

ANDREA, D. **White Paper - How much balancing current do you need?** Disponível em: <http://liionbms.com/php/wp_balance_current.php>. Acesso em: 4 abr. 2021.

ANEEL. 12.007, De 29 De Julho De 2009, N. **Resolução Normativa nº 414**, p. 205, 2010.

ANEEL. **Tarifas consumidores**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/tarifas-consumidores/-/asset_publisher/zNaRBjCLDgbE/content/alta-tensao/654800?inheritRedirect=false>. Acesso em: 22 mar. 2021.

APTIV. Folha de dados do Shieldpack HV 280 SI. 2020a.

APTIV. Folha de dados do SHIELDPACK HV AK CLASS 4 SI. 2020b.

ARAUJO, E. **ANEEL recebe contribuições sobre regulação de sistemas de armazenamento**. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/aneel-recebe-sugestoes-sobre-regulacao-de-sistemas-de-armazenamento>>. Acesso em: 17 mar. 2021.

BATRIUM. Folha de dados do MultiMon - MM8 Mates. 2020.

BATTERY UNIVERSITY. **BU-205: Types of Lithium-ion**. Disponível em: <https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion>. Acesso em: 16 mar. 2021a.

BATTERY UNIVERSITY. **BU-301a: Types of Battery Cells**. Disponível em: <https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells>. Acesso em: 16 mar. 2021b.

BORGES, I. F.; FRANCO, S. **CAS aprova regulamentação de descarte de**

baterias automotivas e industriais usadas. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2013/05/08/cas-aprova-regulamentacao-de-descarte-de-baterias-automotivas-e-industriais-usadas>>. Acesso em: 27 abr. 2021.

CANAL DANA. **Após 4 anos, Nissan encerra programa experimental de táxis elétricos.** Disponível em: <<https://dana.com.br/canaldana/2016/04/20/apos-4-anos-nissan-encerra-programa-experimental-de-taxis-eletricos>>. Acesso em: 23 abr. 2021.

CELESC. **Tarifas consumidores.** Disponível em: <<https://www.celesc.com.br/tarifas-de-energia#tarifas-vigentes>>. Acesso em: 14 mar. 2021.

CEMIG. Manual de Distribuição: Requisitos para a conexão de Acessantes ao Sistema de Distribuição Cemig - Conexão em Baixa Tensão (ND - 5.3). p. 39, 2012.

CICCONI, P. et al. Feasibility analysis of second life applications for Li-Ion cells used in electric powertrain using environmental indicators. **2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition, ENERGYCON 2012**, p. 985–990, 2012.

COELBA. **Tarifas grupo A.** Disponível em: <[https://servicos.coelba.com.br/residencial-rural/Pages/Alta Tensão/tarifas-grupo-a.aspx](https://servicos.coelba.com.br/residencial-rural/Pages/Alta_Tensao/tarifas-grupo-a.aspx)>. Acesso em: 14 mar. 2021.

CORRIGAN, S. Introduction to the Controller Area Network (CAN) Application Report Introduction to the Controller Area Network (CAN). n. May, p. 1–17, 2002.

COSTA, C. M. et al. Recycling and environmental issues of lithium-ion batteries: Advances, challenges and opportunities. **Energy Storage Materials**, v. 37, n. January, p. 433–465, 2021.

CUMMINS. **Chave de transferência automáticas.** Disponível em: <<https://www.cummins.com.br/geradores/chaves-de-transferencia-automaticas>>. Acesso em: 24 mar. 2021.

DYNESS. PowerRack datahseet. 2020.

EATON. Folha de dados do M22-PVK11 datasheet. 2015.

EATON. Folha de dados do M22-WRKK10 datasheet. 2016.

ELITHION. **Lithiumate Lithium-ion BMS.** Disponível em: <<https://www.elithion.com/lithiumate.php>>. Acesso em: 29 mar. 2021.

EMUS BMS. Folha de dados do Display Unit. 2011.

EMUS BMS. **Application examples.** Disponível em: <<https://emusbms.com/application-examples>>. Acesso em: 14 abr. 2021a.

EMUS BMS. **Products catalogue**. Disponível em: <<https://emusbms.com/products-catalogue>>. Acesso em: 14 abr. 2021b.

EMUS BMS. Folha de dados do G1 Battery Management System User Manual v1.3.0. 2021c.

ENEL. **Tarifa de energia elétrica ENEL SP**. Disponível em: <<https://www.eneldistribuicao.sp.com.br/corporativo-poder-publico/tarifa-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 14 mar. 2021.

EPE. Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados Horizonte 2024 - Ciclo 2019. p. 56, 2020.

EPE. **Sistemas isolados**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/sistemas-isolados>>. Acesso em: 12 mar. 2021.

FIREPRO. **Tecnologia FirePro**. Disponível em: <<https://www.firepro.com/pt-BR/tecnologia-supressao-incendios>>. Acesso em: 14 mar. 2021.

FRAUNHOFER IISB. **foxBMS documentation**. Disponível em: <https://iisb-foxbms.iisb.fraunhofer.de/foxbms/docs/latest/hardware_documentation/bjb/bjb.html>. Acesso em: 22 mar. 2021.

GOULART, V. Battery Junction Box Manual. **Fraunhofer ISE**, p. 26, 2020.

GREENER; NEWCHARGE. Estudo Estratégico - Mercado de Armazenamento. Aplicações, Tecnologias e Análises Financeiras. p. 125, 2021.

HANLEY, S. **Nissan Begins Offering Remanufactured Batteries For LEAF**. Disponível em: <<https://cleantechnica.com/2018/05/15/nissan-begins-offering-remanufactured-batteries-for-leaf/>>. Acesso em: 23 abr. 2021.

HUA, Y. et al. Voltage/frequency deviations control via distributed battery energy storage system considering state of charge. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 9, n. 6, 2019.

IBRAHIM, A.; JIANG, F. The electric vehicle energy management: An overview of the energy system and related modeling and simulation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 144, n. August 2019, p. 111049, 2021.

IDEC. **Idec aponta baixa qualidade dos serviços de energia no Brasil**. Disponível em: <<https://idec.org.br/idec-na-imprensa/idec-aponta-baixa-qualidade-dos-servicos-de-energia-no-brasil>>. Acesso em: 13 mar. 2021.

IEA. Global EV Outlook 2020. **Global EV Outlook 2020**, 2020.

IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY. **IEEE Guide for the Characterization**

and Evaluation of Lithium-Based Batteries in Stationary Applications IEEE Std 1679.1-2017. [s.l: s.n.].

ISABELLENHÜTTE. Folha de dados do IVT-S. 2018.

JUNIOR, G. M. Dispositivos de proteção. p. 1–31, 2013.

KELLY, J. D. **2011 Nissan LEAF Battery - Deep Drive** Weber State University, , 2019. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=vYQJatWpBXY>>

KIVRAK, S.; OZER, T.; OGUZ, Y. Battery Management System Implementation with Pasive Control Method. **2018 4th International Conference on Information Technologies in Engineering Education, Inforino 2018 - Proceedings**, p. 22–25, 2018.

LAJUNEN, A. et al. 2011 Nissan Leaf VIN 0356 Electric Vehicle Battery Test Results. **The Idaho National Laboratory**, v. 5, n. June, p. 1, 2016.

LAMBERT, S. M. et al. A rapid non-destructive-testing technique for in-line quality control of Li-ion batteries. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS**, v. 285385, n. 0, 2016.

LOPES, M. G. Análise dos Impactos Técnicos Resultantes da Intermitência de Geração de Sistemas Fotovoltaicos na Qualidade da Tensão. p. 1–124, 2015.

MANOJKUMAR, R. et al. Optimal Peak Shaving Control Using Dynamic Demand and Feed-In Limits for Grid-Connected PV Sources With Batteries. **IEEE Systems Journal**, p. 1–11, 2021.

MANTHOPOULOS, A.; WANG, X. **SOC Estimation Methods for Electric Vehicles**. IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference). **Anais...2020**

MUELLER, J. et al. Power Conversion Systems. p. 1–27, 2020.

NISSAN. **Electric vehicle lithium-ion battery**. Disponível em: <https://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/li_ion_ev.html>. Acesso em: 17 mar. 2021.

NITTA, N. et al. Li-ion battery materials: Present and future. **Materials Today**, v. 18, n. 5, p. 252–264, 2015.

NIZAM, M. et al. Design of Battery Management System (BMS) for Lithium Iron Phosphate (LFP) Battery. **ICEVT 2019 - Proceeding: 6th International Conference on Electric Vehicular Technology 2019**, p. 170–174, 2019.

NYSERDA. **Types of Energy Storage**. Disponível em: <<https://www.nyserda.ny.gov/All-Programs/Programs/Energy-Storage/Energy-Storage-for->

Your-Business/Types-of-Energy-Storage>. Acesso em: 12 mar. 2021.

ONS. **O Sistema Interligado Nacional**. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acesso em: 12 mar. 2021a.

ONS. **Sistemas isolados**. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/sistemas-isolados>>. Acesso em: 12 mar. 2021b.

ORION BMS. **How the BMS works**. Disponível em: <<https://www.orionbms.com/general/how-it-works/#:~:text=There are also secondary functions,are charged more than others.&text=Monitors the temperature of the,the temperature of the pack>>. Acesso em: 17 mar. 2021.

ORION BMS. Orion BMS 2 Purchasing Guide. p. 1–18, 2021.

PARKER BRAZIL. **AES Tietê inaugura primeiro sistema de armazenamento de energia do País**. Disponível em: <<http://blog.parker.com/br/aes-tiete-inaugura-primeiro-sistema-de-armazenamento-de-energia-do-pais>>. Acesso em: 25 abr. 2021.

POWERSAFE BMS. PowerSafe BMS catalogue. 2021.

PRESSLEY, B. **Conquering The Darkness: Primitive Lighting Methods**. Disponível em: <http://www.hollowtop.com/spt_html/lighting.htm>. Acesso em: 25 abr. 2021.

RANAWAT, D.; PRASAD, M. P. R. A Review on Electric Vehicles with perspective of Battery Management System. **3rd International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer Technologies and Optimization Techniques, ICECCOT 2018**, n. December, p. 1539–1544, 2018.

REFU. Folha de dados do REFUstore 50K - 100K. 2021.

RENIERS, J. M.; MULDER, G.; HOWEY, D. A. Unlocking extra value from grid batteries using advanced models. **Journal of Power Sources**, v. 487, n. October 2020, p. 229355, 2021.

RODRÍGUEZ-GALLEGOS, C. D. et al. A diesel replacement strategy for off-grid systems based on progressive introduction of PV and batteries: An Indonesian case study. **Applied Energy**, v. 229, n. April, p. 1218–1232, 2018.

SCHURTER. Folha de dados do AEO 10.3x38. 2021.

SILVA, G. B. S. E; PAULA, G. B. DE; SILVA, S. F. DE P. **Automação industrial automação industrial utilizando clp, sistema supervisorio e seus protocolos de comunicação**. 2011

SINEXCEL. Folha de dados do PWS1-50K-NA. 2021.

SLATER, P. et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles There are amendments to this paper. **Nature**, v. 575, n. November, p. 75–86, 2019.

SMA SOLAR TECHNOLOGY. Sunny Tripower Storage 60 Technical Information. 2021.

SOLAR-WIND. **DC Cable Sizing Tool**. Disponível em: <<https://www.solar-wind.co.uk/info/dc-cable-wire-sizing-tool-low-voltage-drop-calculator>>. Acesso em: 16 abr. 2021.

SPAUTZ, D. **Parceria entre a UFSC e a Nissan testa bateria de carros elétricos para iluminação pública**. Disponível em: <<https://www.nsctotal.com.br/colunistas/dagmara-spautz/parceria-entre-a-ufsc-e-a-nissan-testa-bateria-de-carros-eletricos-para>>. Acesso em: 20 abr. 2021.

STRICKLAND, D. et al. Estimation of transportation battery second life for use in electricity grid systems. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 5, n. 3, p. 795–803, 2014.

SUBHANA, A. et al. **Emergency Backup Power to a Rural Hospital in Disaster Condition**. 2019 IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference, IFEEEC 2019. **Anais...IEEE**, 2019

TDK. Folha de dados do HVC500B-24. 2009.

TE CONNECTIVITY. Dynamic Series Connectors Dynamic 2020 Edition. 2020.

TESLA. **Battery Cell Production Begins at the Gigafactory**. Disponível em: <<https://www.tesla.com/blog/battery-cell-production-begins-gigafactory>>. Acesso em: 16 mar. 2021.

TESVOLT. **TS 48 V LITHIUM STORAGE SYSTEM**. Disponível em: <<https://www.tesvolt.com/en/products/ts-48-v.html>>. Acesso em: 24 mar. 2021.

TRU COMPONENTS. TRU 140394 datasheet. 2003.

TYSON, M.; CHARLIE, B. Breakthrough Batteries: Powering the Era of Clean Electrification. **Rocky Mountain Institute**, p. 1–84, 2019.

UFSC. **Fotovoltaica UFSC e Nissan levam baterias de lítio de segunda vida para o Salão do Automóvel 2018**. Disponível em: <<https://noticias.ufsc.br/2018/11/fotovoltaica-ufsc-e-nissan-levam-baterias-de-litio-de-segunda-vida-para-o-salao-do-automovel-2018>>. Acesso em: 20 abr. 2021.

VULLIGADDALA, V. B. et al. A 7-Cell, Stackable, Li-Ion Monitoring and Active/Passive Balancing IC with In-Built Cell Balancing Switches for Electric and Hybrid Vehicles. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 16, n. 5, p. 3335–3344, 2020.

WAGO. **CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL**. Disponível em: <<https://www.wago.com/br/automacao-wago/controlador-logico-programavel>>. Acesso em: 27 mar. 2021.

WEG. WEG Enterprise - Manual do usuário. 2007.

WEG. **Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias ESSW**. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Critical-Power/Armazenamento-de-Energia-em-Baterias/Sistema-de-Armazenamento-de-Energia-em-Baterias-ESSW/Sistema-de-Armazenamento-de-Energia-em-Baterias-ESSW/p/MKT_WDC_BRAZIL_SISTEMA_ESSW>. Acesso em: 3 mar. 2021.

YU, H. J. J. System contributions of residential battery systems: New perspectives on PV self-consumption. **Energy Economics**, v. 96, p. 105151, 2021.

ZHUANG, W. et al. An intelligent thermal management system for optimized lithium-ion battery pack. **Applied Thermal Engineering**, v. 189, n. August 2020, p. 116767, 2021.

ZOMER, C. et al. Energy balance and performance assessment of PV systems installed at a positive-energy building (PEB) solar energy research centre. **Solar Energy**, v. 212, n. June, p. 258–274, 2020.