

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ROGÉRIO CORRÊA PERES

SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA
INTEGRAÇÃO DE VEÍCULO ELÉTRICO E MICRORREDE

CURITIBA

2021

ROGÉRIO CORRÊA PERES

SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA
INTEGRAÇÃO DE VEÍCULO ELÉTRICO E MICRORREDE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki

CURITIBA
2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

P437s Peres, Rogerio Correa

Sistema de gerenciamento de energia elétrica para integração de veículo elétrico e microrrede [recurso eletrônico] / Rogerio Correa Peres – Curitiba, 2021.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki

1. Veículos elétricos. 2. Internet das coisas. I. Aoki, Alexandre Rasi. II. Universidade Federal do Paraná. III. Título.

CDD 629.2293

Bibliotecária: Vilma Machado CRB-9/1563



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
ELÉTRICA - 40001016043P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ROGERIO CORREA PERES** intitulada: **SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA INTEGRAÇÃO DE VEÍCULO ELÉTRICO E MICRORREDE**, sob orientação do Prof. Dr. ALEXANDRE RASI AOKI, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 20 de Outubro de 2021.

Assinatura Eletrônica
22/10/2021 17:21:36.0
ALEXANDRE RASI AOKI
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
22/10/2021 13:40:20.0
ANDRÉ AUGUSTO MARIANO
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
26/10/2021 15:28:05.0
FABRICIO AUGUSTO MATHEUS MOURA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIANGULO
MINEIRO)

Assinatura Eletrônica
22/10/2021 12:15:00.0
CLODOMIRO UNSHUAY-VILA
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Este trabalho é dedicado às crianças adultas que, quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.

“A conjunção de tecnologia de comunicação de Internet e energia renovável está dando origem a uma Terceira Revolução Industrial”

(Jeremy Rifkin, 2019)

AGRADECIMENTOS

Ao Deus “Jeová-Jireh”, que proveu, foi torre forte e alargou meu caminho.

À minha esposa e companheira Claudia Morosini e filhos amados, Manuela e Lucas que se mostraram como pilares sólidos nas horas mais difíceis.

Aos professores da UFPR, pelo conhecimento transmitido. A dedicação e paciência sempre à mão.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki, estimulador das ideias, guia na caminhada e um novo amigo desenvolvido.

Aos amigos Marcos Schreiber e Zeno Nadal, pelo enorme interesse na pesquisa, apoio técnico-financeiro ao projeto. Verdadeiros engenheiros “fuçadores” a serviço da criatividade.

Também aos amigos Arno e Maribel. Obedientes a palavra de Deus, conforme Provérbios 18:24.

RESUMO

Com a esperada integração dos veículos elétricos à frota de veículos, o setor de transportes passará por profundas transformações. Uma das principais mudanças será a mudança de paradigma na estrutura de energia elétrica no modelo atual. Essa mudança tem sido aceita pela sociedade, em termos ecológicos, mas traz consigo grandes desafios para os sistemas de distribuição de energia. Esses veículos precisarão ser recarregados, por exemplo, em corrente alternada no modo residencial na maior parte do tempo. A quantidade extra de energia exigida nesta operação pode levar a diversos problemas operacionais nas redes de geração, transmissão e distribuição. Para promover o sucesso da implementação deste novo modo de transporte e evitar problemas operacionais, soluções de recarga coordenadas com a geração de energia renovável são adaptadas às necessidades que começam a surgir. Dessa forma, eles devem ser o mais simples possível e não devem ser percebidos como novos investimentos para a rede de distribuição e também aos donos de veículos elétricos que se utilizam dessa infraestrutura de recarga. Assim, foi projetado e implementado em uma residência na cidade de Curitiba-PR, uma estação de recarga real em corrente alternada para veículos elétricos que possui geração fotovoltaica, armazenamento local por baterias em sistema de microrrede e o controle do despacho de energia através de dispositivo IoT. O algoritmo que controla o despacho de energia foi desenvolvido usando linguagem ARDUINO como base. O método de despacho de energia controlado pelo algoritmo é baseado no estado de carga do armazenamento local. Além disso, esse algoritmo também monitora o momento em que a tensão de pico da rede local passa por zero para comandar a comutação entre as diferentes fontes de energia disponíveis. Quatro cenários básicos foram simulados e comparados entre si para mostrar o desempenho e efetividade do método apresentado. Esses cenários são em modo ilhado, modo misto, conectado e também um cenário em regime de tarifa branca que trata do processo de recarga em horários específicos do dia. A aplicação desse método durante o mês de análise, trouxe uma eficiência nos valores de energia elétrica não consumida da rede de distribuição local para a residência e também favoreceu a recarga em uma faixa de horários de ponta específica do dia.

Palavras-chave: Microrrede. Eletroposto. Veículo Elétrico. Internet das Coisas (IoT).

ABSTRACT

With the expected integration of electric vehicles into the vehicle fleet, the transport sector will undergo profound changes. One of the main changes will be the paradigm shift in the structure of electricity in the current model. This change has been accepted by society, in ecological terms, but it brings with it great challenges for energy distribution systems. These vehicles will need to be recharged, for example, in alternating current in residential mode most of the time. The extra amount of energy required in this operation can lead to several operational problems in the generation, transmission and distribution networks. To promote the successful implementation of this new mode of transport and avoid operational problems, recharge solutions coordinated with the generation of renewable energy are adapted to the needs that are beginning to emerge. Therefore, they should be as simple as possible and should not be seen as new investments for the distribution network and also for owners of electric vehicles that use this charging infrastructure. Thus, it was designed and implemented in the city of Curitiba-PR, in a regular house, a real alternating current charging station for electric vehicles that count with photovoltaic generation, battery storage system all connected in a microgrid way and a energy dispatch control that uses an IoT device. The algorithm that runs on IoT device and controls the energy dispatch was developed using ARDUINO. These control energy dispatch method is based according to the state of charge of the local storage and also monitors the moment when the local power network peaking voltage crossing to zero to start the switching process between available energy resources. Four basic scenarios were simulated and compared to each other to show the performance and effectiveness of the presented method. These scenarios are in island mode, mixed mode, connected and also a scenario in a white tariff regime that deals with the recharge process at specific times of the day. The application of this method during the month of analysis, brought an efficiency in the values of electricity not consumed from the local distribution network to the home and also favored charging at a specific peak hour range of the day.

Keywords: Microgrid. Charging Stations. Electric Vehicle. Internet of things (IoT).

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Aplicação do controle centralizado para sincronização de MR	21
FIGURA 2 – Fluxo trazido pela revisão da literatura	29
FIGURA 3 – Contribuição dessa dissertação a partir do fluxo da revisão da literatura	29
FIGURA 4 – Módulo fotovoltaico half-cell	31
FIGURA 5 – Curva MPP típica I-V de uma célula FV	32
FIGURA 6 – Diagrama simplificado a partir de geração fotovoltaica	33
FIGURA 7 – Principais características das diferentes tecnologias de armazenamento	34
FIGURA 8 – Tipos de carregadores	36
FIGURA 9 – OBC veículo Mitsubishi i-MiEV	39
FIGURA 10 – Arquitetura de entrada monofásica	40
FIGURA 11 – Arquitetura de entrada trifásica	41
FIGURA 12 – Tipos veículos híbridos e elétricos	44
FIGURA 13 – Classificação da arquitetura da estação de carregamento	47
FIGURA 14 – ESP-WROOM-32 com interface OLED	49
FIGURA 15 – ESP-WROOM-32 pin-out (pinagem)	49
FIGURA 16 – Projeto arquitetônico para estação de carregamento e a implementação	51
FIGURA 17 – Diagrama de integração da gestão de energia proposta com a estação de carregamento	52
FIGURA 18 – Interface GIVEc	53
FIGURA 19 – Topologia de comunicação de rede do sistema de gerenciamento GIVEc	56
FIGURA 20 – Interfaces de usuário final GIVEc	56
FIGURA 21 – Fluxograma da programação de controle	59
FIGURA 22 – Diagrama de blocos da ligação entre inversor Off-Grid, RL e chave SSR	61
FIGURA 23 – SSR Fotek	63
FIGURA 24 – Sequência de telas do aplicativo JuiceNET [®] -fabricante do carregador Juicebox mod. Pro 40	67
FIGURA 25 – Vista painel do inversor Off-Grid	68
FIGURA 26 – Medição de corrente nas baterias	68
FIGURA 27 – Transitório de chaveamento entre a RL e inversor utilizando-se um relé eletromecânico	70
FIGURA 28 – Transitório de chaveamento entre a RL e inversor - PWM	71
FIGURA 29 – Transitório de chaveamento entre a RL e inversor utilizando-se um SSR	72
FIGURA 30 – Transitório de chaveamento entre a RL e inversor Off-Grid	72
FIGURA 31 – Histórico de irradiação CRESESB	74
FIGURA 32 – Cidade de Curitiba-PR - condições de tempo referentes ao dia 29/03/21	74
FIGURA 33 – Cenário 1-gráficos totais das leituras referentes ao dia 29/03/21	76

FIGURA 34 – Cidade de Curitiba-PR - condições de tempo referentes ao dia 14/04/21	78
FIGURA 35 – Cenário 2-gráficos totais das leituras referentes ao dia 14/04/21	80
FIGURA 36 – Cidade de Curitiba-PR - condições de tempo referentes ao dia 12/05/21	81
FIGURA 37 – Cenário 3-gráficos totais das leituras referentes ao dia 12/05/21	83
FIGURA 38 – Gráfico tarifa branca - Maio/2021	84
FIGURA 39 – Cidade de Curitiba-PR - condições de tempo referentes ao dia 31/05/21	85
FIGURA 40 – Cenário TB-gráficos totais das leituras referentes ao dia 31/05/21	86
FIGURA 41 – Destaque gráfico Potência de recarregamento leitura referente ao dia 31/05/21-TB	88
FIGURA 42 – Apresentação do consumo real da residência	90
FIGURA 54 – Tipos de conectores padronizados atualmente em uso	115
FIGURA 55 – Disposição dos cabos em função do nível de carregador	116
FIGURA 56 – Comunicação entre estação de carga e VE. Padrão IEC 61851-1	117
FIGURA 57 – Diagrama genérico de um veículo elétrico	118
FIGURA 58 – Comparativo entre tipos de motores elétricos atuais	119
FIGURA 59 – Motor ímã permanente e sensor resolver	120
FIGURA 60 – Trem de força - Renault ZOE®	121
FIGURA 61 – Conjunto (<i>pack</i>) de baterias - Renault ZOE®	122
FIGURA 62 – Escala percentual de envelhecimento vs estágio de vida do <i>pack</i> de baterias	124
FIGURA 63 – Dados técnicos dos painéis modelo HCP78X9-400W utilizados na projeto	128
FIGURA 64 – Dados técnicos do SSR-40DA utilizado no projeto	129

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Requisitos de reconexão de microgrid	20
TABELA 2 – Tabela com comparativo de tempo vs. tipo de EVSE	37
TABELA 3 – Tabela de características fundamentais dos veículos híbridos	43
TABELA 4 – Médias de carga, capacidades nominais e tempo médio até a carga completa - Veículos BEV	45
TABELA 5 – Médias de carga, capacidades nominais e tempo médio até a carga completa - Veículos PHEV	45
TABELA 6 – Cenário 1-tabela com um trecho parcial das leituras referentes ao dia 29/03/21	75
TABELA 7 – Cenário 2-tabela com um trecho parcial das leituras referentes ao dia 14/04/21	79
TABELA 8 – Cenário 3-tabela com um trecho parcial das leituras referentes ao dia 12/05/21	82
TABELA 9 – Tabela de valores (com impostos) praticados pela companhia distribuidora de energia elétrica na cidade de Curitiba-PR - Maio/21	84
TABELA 10 – Tabela comparativa de valores financeiros e eficiência energética	87
TABELA 11 – Tabela comparativa em um cenário de 25 dias de uso do VE	88
TABELA 12 – Tabela comparativa de valores financeiros e eficiência energética - Cenário Tarifa Branca	89
TABELA 13 – Tabela sumarizada de energia utilizada em recarga com VE (26 coletas)	91
TABELA 14 – Percentual SOC mínimo da bateria em relação ao tipo de veículo elétrico híbrido	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	Application Programming Interface, interface de programação de aplicações, conjunto de rotinas e padrões estabelecidos por um software.
BESS	Battery Energy Store System, sistema de armazenamento de energia em baterias.
BEV	Battery Electric Vehicle, veículo puramente elétrico a bateria.
CA	Corrente Alternada.
CC	Corrente Contínua.
DER	Distributed Energy Resources, recursos de energia distribuída.
ESS	Energy Storage Systems, sistema de armazenamento de energia.
EVSE	Electric Vehicle Supply Equipment, estação de carregamento de veículos elétricos.
GD	Geração Distribuída.
HEV	Hybrid Electric Vehicles, veículo elétrico híbrido.
IoT	Internet Of Things, internet das coisas.
mDNS	Multicast Dns, método de descoberta de vizinhos de uma rede de dados, usado em pequenas redes sem servidores dns próprios.
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport, protocolo de mensagens padrão oasís para internet das coisas (iot).
MR	Microrrede. Em inglês, Microgrid.
PFC	Power Factor Correction, correção de fator de potência.
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle, veículo elétrico híbrido-plug in (com tomada para carga em estação de carregamento).
PV	Photovoltaic Painel, o mesmo que painel fotovoltaico (FV).
RED	Recursos de Energia Distribuída.
RL	Rede Local.
SD	Sistema De Distribuição.

SFA	Sistema Fotovoltaico Autônomo, geração através de FV isolados da RL.
SEP	Sistema elétrico de potência.
SOC	State Of Charge, estado de carga da bateria.
VE	Veículo Elétrico.
Wp	Watts Pico, potência máxima instantânea.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contexto	14
1.2	Justificativa	15
1.3	Objetivos	16
1.4	Estrutura da Dissertação	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	O Sistema De Energia e a Microrrede	18
2.2	Redes Elétricas Inteligentes a sua Relação Com Veículos Elétricos	23
2.3	Considerações Finais do Capítulo	28
3	REVISÃO DE TECNOLOGIAS DE MICRORREDES E DE VEÍCULOS ELÉTRICOS	30
3.1	Geração e Armazenamento de Energia Renovável	30
3.1.1	Energia Fotovoltaica	30
3.1.2	Painéis "meia célula" - Half-Cell	31
3.1.3	Equipamentos Utilizados em Geração de Energia Renovável	31
3.1.4	Sistemas de Armazenamento de Energia Local	33
3.2	Estações de Carregamento	35
3.2.1	Arquitetura de Estações de Carregamento em CA e Carregadores integrados	38
3.2.1.1	Arquitetura Monofásica CA	38
3.2.1.2	Arquitetura Trifásica CA	41
3.3	Tipos de Veículos Elétricos Leves	42
3.3.1	Modelos de Veículos BEV e PHEV	44
3.4	Considerações Finais sobre o Capítulo	46
4	MATERIAIS E MÉTODO	48
4.1	Materiais	48
4.1.1	Principais Equipamentos Elétricos	48
4.1.2	Principais Equipamentos Eletrônicos	49
4.1.3	Resumo de Aplicativos, Softwares e Hardwares	50
4.1.4	Montagem da Estação de Recarga	51
4.2	Método	53
4.2.1	Metodologia de Programação do Equipamento IoT	54
4.2.2	Estrutura e Fluxo de Operação a partir do Equipamento IoT	60

	13
5 APLICAÇÃO DO MÉTODO	65
5.1 Caso de Aplicação do Método	65
5.2 Transitório entre RL e REDs	70
5.3 Aplicação do Cenário 1 de Recarga	73
5.4 Aplicação do Cenário 2 de Recarga	77
5.5 Aplicação do Cenário 3 de Recarga	81
5.6 Aplicação do Cenário Tarifa Branca	83
5.7 Discussão dos Resultados dos Cenários 1, 2, 3 e Tarifa Branca	86
6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	92
Referências	95
Apêndices	101
APÊNDICE A Cenário 1 - BESS/SFA	102
APÊNDICE B Cenário 2 - MISTO	106
APÊNDICE C Cenário 3 - REDE LOCAL	111
Anexos	113
ANEXO A Conectores, Cabos, Comunicação entre VE e estação de recarga .	114
A.1 Cabos e formas de conexões	116
A.2 Comunicação entre veículo e estação de recarga	116
ANEXO B O trem de força, motores mais utilizados, baterias de um veículo elétrico e seu gerenciamento de carga	118
B.1 Tipos de motores elétricos mais utilizados	118
B.2 Baterias do VE	121
B.3 Sistema de gerenciamento de carga de baterias	124
ANEXO C Painel DAHSOLAR	128
ANEXO D SSR Fotek	129

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

Em um momento em que fatores geopolíticos estão exercendo novas e complexas influências nos mercados de energia, ressaltando a importância crucial da segurança energética o World Energy Outlook 2020, cita através da principal publicação da International Energy Agency (IEA, 2020), detalhes das tendências globais de energia e o possível impacto que elas terão sobre a oferta e demanda, emissões de carbono, poluição do ar e acesso à energia. Grandes mudanças estão em andamento no setor de energia em âmbito global, desde maior eletrificação até a expansão da inserção dos recursos energéticos distribuídos (REDs), ou em inglês, *distributed energy resources (DER)*.

A sustentabilidade na geração de energia elétrica passa pela adoção de fontes renováveis de energia - como exemplo: aerogeradores e painéis solares - que inseridos para formar microrredes, podem suprir a demanda crescente por energia elétrica complementando os modais atuais. Essas fontes oferecem um contraste aos caminhos atuais e que possibilitariam o atingimento das metas climáticas no longo prazo sob o Acordo de Paris, citado nesse mesmo trabalho, e assim reduzindo os índices de poluição e garantindo o acesso universal à energia.

Já outra forma alternativa sustentável que poderá impulsionar a redução na emissão de poluentes em termos gerais é a adoção de Veículos Elétricos (VE), em suas mais variadas arquiteturas, de forma massiva nos próximos anos. A análise baseada em cenários realizada pelo (IEA, 2020) descreve diferentes futuros possíveis para o sistema de energia com base em todos os combustíveis atuais e novas tecnologias.

Inicialmente, a integração de quantidades moderadas de VE nas redes elétricas não devem provocar impactos consideráveis. Mas, sua ampla adoção provavelmente criará alguns problemas em relação aos modelos de gestão e operação atuais. Quando observa-se o comportamento do VE como um consumidor simples, este representa uma quantidade de energia consumida que poderia facilmente se aproximar do perfil de uma residência convencional, por exemplo; no momento de pico de carga (IEA (2020)).

Sendo assim, pode-se prever problemas em tensão e frequência nas redes elétricas já carregadas, problemas de baixo valor de tensão (p.ex.: redes radiais), picos de carga e perdas de energia e provavelmente, grandes desequilíbrios entre fases nas redes contendo esses VE. Esses problemas podem se tornar realidade nos próximos anos, uma vez que, de acordo com as projeções da IEA, as vendas de VE serão impulsionadas a partir de 2020 e poderão atingir mais de 100 milhões de unidades vendidas por ano em todo o mundo até 2050.

Há duas maneiras de acomodar a presença do carregamento das baterias dos VE

nas redes de distribuição evitando os problemas na rede elétrica. A primeira é reforçar as infraestruturas existentes e planejar novos sistemas de geração, transmissão e distribuição de maneira que elas comportem essa integração, mesmo para um cenário de grande número de veículos. No entanto, essa solução exige altos investimentos em infraestruturas de rede, principalmente na área de geração. A segunda forma consiste em desenvolver e implementar estratégias de gerenciamento das redes de distribuição combinadas com a geração de energia elétrica através de recursos energéticos distribuídos somado ao armazenamento desta energia, com funcionalidades dinâmicas, capazes de controlar as necessidades da rede local de distribuição *versus* a demanda dos proprietários dos VE (IEA (2020)).

A contribuição para a rede local, dessa segunda estratégia, reside na elasticidade dos investimentos realizados pelas empresas de distribuição de energia até o presente momento, permitindo que a estrutura atual seja mantida por mais algum tempo. Já para os proprietários de VE, tornar as cobranças em valores proporcionais e atrativos aos serviços da rede de energia.

1.2 Justificativa

Essa dissertação vai trazer uma visão sobre os parâmetros mínimos de operação do tema microrredes. Aspectos técnicos de um eletroposto, revisão do sistemas de geração e armazenamento de energia elétrica, além dos tipos de veículos elétricos leves. Oferecer uma visão mínima sobre o processo de transitório entre duas fontes geradoras e suas particularidades sobre o momento de comutação entre elas. Na aplicação do método, apresenta-se o desenvolvimento de um sistema de gerenciamento apoiado em solução determinística, para controle de uma estação de carregamento de veículos em corrente alternada que possibilita a reversão entre a fonte de energia renovável, armazenamento local e rede local, sem interrupções ou prejuízos ao processo de recarga.

Sendo assim, este trabalho irá se concentrar em implantar e analisar três cenários comuns de recarga de um VE, tanto em seu formato quanto em momentos específicos do dia. Além desses cenários, será trazido um quarto sob tarifação horária diferenciada. Por fim, as conclusões e contribuições na trazidas pelo segundo cenário tanto para usuários desse modal de transporte, quanto a academia. O trabalho vai apresentar uma solução simples, porém robusta e que traz baixo impacto na operação de recarga em corrente alternada comum ao usuário de VE, principalmente quando se utiliza a sua residência como ponto de recarga. A gestão proposta se baseia em três pontos básicos: o uso de armazenamento local, o controle sobre estado de carga das baterias que compõe este armazenamento para posterior despacho ao VE e detecção de passagem por zero dos valores de tensão da rede local e da microrrede.

A visão trazida através dessa dissertação não busca explorar a possibilidade de despacho de energia quando o armazenamento local estiver carregado ou houver excedente de produção solar, porque este não é o foco aqui. Entende-se aqui haver essa a possibilidade, porém o horizonte se ampliaria em demasiado.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e avaliar um estudo de caso real da implantação de um sistema de gerenciamento que atua através de um dispositivo IoT e controla o despacho de energia em uma estação de recarga para veículos elétricos em corrente alternada que conta com recursos energéticos distribuídos.

Os objetivos específicos desta dissertação, podem ser citados:

- Revisar a literatura técnico-científica sobre definições e normas para o sistema de potência, microrredes e as técnicas inteligentes (meta-heurística) em controle mais usuais.
- Avaliar equipamentos e técnicas construtivas utilizados nas estações de carregamento em microrrede além de características de veículos elétricos.
- Desenvolver e implantar um algoritmo para gerenciar e controlar o despacho de energia elétrica para o processo de recarga de um veículo elétrico em corrente alternada quando se combina rede local e recursos energéticos distribuídos como fontes de energia.
- Analisar os resultados obtidos após quatro cenários reais que comprovam a redução na demanda de energia elétrica da rede local e a eficiência energética apresentada através do método aplicado.

1.4 Estrutura da Dissertação

A dissertação será apresentada começando por sua introdução, justificativas e objetivos, seguindo a fundamentação teórica no capítulo dois, discorrendo tópicos de sistemas de energia, microrredes, os padrões aplicáveis e métodos de aplicação de sincronização entre a rede local e a microrrede. A seguir, trata-se da relação entre as redes inteligentes e veículos elétricos. Ainda na revisão da literatura, cita-se alguns trabalhos de autores diversos e grupos de trabalhos que fundamentaram o desenvolvimento deste trabalho. Além disso, os pontos aderentes a esta dissertação são também apresentados ao final deste capítulo.

Apresenta-se, no capítulo três, algumas informações básicas sobre geração e armazenamento de energia, destacando-se de forma breve as tecnologias mais empregadas no armazenamento local. Em sequência, são apresentados os modos e sistemas de recarga veicular mais empregados atualmente e as suas classificações por arquiteturas. Disserta-se, ao final deste capítulo, sobre a tipologia de veículos elétricos leves, suas arquiteturas básicas e modelos mais comuns em função da capacidade de bateria empregada.

Logo depois, no capítulo quatro, são listados os materiais e métodos empregados aqui para se realizar a implantação da estação de carregamento, o gerenciamento do processo de carregamento veicular, o armazenamento local, a conectividade IoT com um servidor de rede de dados e a estrutura de programação aplicada para uso desse o microcontrolador.

No capítulo cinco se apresenta a aplicação do método, o transitório entre fontes de geração de energia diferentes. Trata-se ainda neste capítulo, sobre as aplicações dos quatro cenários criados para levantar fatos e dados. Como tópico final deste capítulo, se apresentam as discussões e análises a partir dos dados levantados.

No capítulo final, têm-se a seguinte distribuição: primeiramente as conclusões, propostas e sugestões para trabalhos futuros. Já no Apêndice 1, têm-se os mesmos cenários adotados no capítulo cinco, porém, com outras datas e informações a partir das coletas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O Sistema De Energia e a Microrrede

Um sistema de energia consiste de três partes que são: geração, transmissão, distribuição e cargas. A geração pode vir de muitas fontes de energia primária diferentes, como hídrica, eólica, solar ou nuclear. As cargas são representadas pelos consumidores conectados a rede elétrica e podem ser residencial ou industrial. A geração geralmente não é próxima das cargas, portanto, existe a necessidade de uma rede de transmissão para transportar a energia da geração para centros de consumo. No Brasil, algumas normas estrangeiras são adotadas integralmente ou adaptadas parcialmente. Grupos de técnicos e especialistas, coordenados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2021) e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2018), têm continuamente trabalhado para se chegar a um conjunto de procedimentos e recomendações aplicáveis tanto no nível da rede básica como das redes de distribuição, para viabilizar os contratos de conexão entre os diversos agentes na nova estrutura do setor elétrico. Os procedimentos na sua versão atual podem ser encontrados nos portais da ANEEL e do ONS.

As instalações de transmissão que compõem o Sistema Interligado Nacional (SIN) no Brasil são classificadas em dois grupos: a rede básica e as demais instalações de transmissão. A rede básica é constituída por instalações de uso compartilhado e por transformadores de potência que operam com tensão igual ou superior a 230 kV. As demais instalações de transmissão englobam as instalações com tensão menor que 230 kV. A rede básica do SIN foi regulamentada pelo Decreto nº 1.717, de 24/11/1995 e segue a Resolução Normativa Nº 414, de 09/09/2010. Em dezembro de 2004 atingiu uma extensão de aproximadamente 80.022 km, com 815 circuitos de transmissão e uma capacidade de transformação de 178.447 MVA, distribuída em 321 subestações, conforme consta na Nota Técnica ANEEL nº 068/2006-SRT. Já em 2015 a extensão já passava de 129.000 km e uma capacidade de transformação de 321.336 MVA.

A estrutura de transmissão é um sistema de malha parcial com mais de uma conexão a cada barramento para evitar que uma falha grave ocorra. Um sistema de malha parcial é um sistema em que os barramentos são conectados a outros barramentos, enquanto que em um sistema de malha todos os barramentos são conectados uns aos outros (ANEEL (2021)). Ambos os tipos de sistema de malha criam a possibilidade para um *loop* de energia, o que significa que a energia pode alcançar o mesmo barramento sem fluir no caminho oposto nas linhas. A rede de distribuição é majoritariamente parte de uma estrutura radial, uma estrutura em forma de árvore sem possibilidade de loops de energia.

As iniciativas no sentido de discutir as normas e se atingir um consenso com padrão internacional, partiram dos órgãos que historicamente têm suportado a maior parte

da documentação normativa, como o IEEE (IEEE Standard Association, 2019) nos Estados Unidos, International Electrotechnical Commission (IEC, 2019) e International Council for Large Electric Systems (CIGRÈ, 2019) na Europa. A convergência talvez venha a ocorrer em longo prazo e, por enquanto, o que se dispõe são normas nacionais (ou regionais, como as vigentes na Comunidade Europeia) ou recomendações internacionais.

A microrrede (MR), conforme definição dada pelo Departamento de Energia dos EUA, são “um grupo de cargas interconectadas e recursos energéticos distribuídos (RED), incluindo muitas vezes, Energy Storage Systems - (ESS), ou sistemas de armazenamento de energia, com limites elétricos claramente definidos e que atuam como uma única entidade controlável em relação à rede e podem se conectar e desconectar da rede principal para permitir a operação em ambos os modos conectado à rede ou ilhado”. (ENERGY (2012))

As instalações do RED podem ser consideradas, com base nessa definição, como uma MR, se forem compostas de três características distintas: elas devem ter limites elétricos claramente definidos; precisa haver um controlador mestre para gerenciar e operar os REDs e suas cargas como um única entidade e a capacidade de geração instalada deve exceder a carga crítica de momento de ponta, portanto, ela poderia ser desconectada da rede pública, ou seja, o modo ilhado e manter-se auto-suficiente às suas cargas críticas locais. Baseando-se assim nessas características, MRs são sistemas de energia de pequena escala com a capacidade autossuficiente e ilhamento suportável que poderiam gerar, distribuir e regular o fluxo de energia elétrica para seus consumidores. MRs, no entanto, fornecem uma gama mais ampla de benefícios e são significativamente mais flexíveis do que a geração de backup. As unidades de geração como backup existem há algum tempo para garantir um fornecimento temporário de eletricidade a cargas locais quando o fornecimento de eletricidade através da rede local é interrompido.

São apresentadas por IEEE Standard Association 1547 (2018), definições e classificações que concordam com as afirmações anteriores para as MRs. As MRs conectados à rede possuem dois termos comuns na língua inglesa, o ponto de interconexão (POI) ou ponto de acoplamento comum (PCC) e na sigla na língua portuguesa, chamada de PAC, ou ponto de acoplamento comum. Essas MR normalmente estão conectadas há uma rede de energia elétrica e devem ser capazes de fazer uma transição direta para o modo ilhado de operação. Nos modos de operação em rede ilhada ou isolada, as MRs devem manter o equilíbrio entre a geração e o consumo, enquanto satisfazem padrões de confiabilidade e qualidade de energia. Para se atingir esses objetivos, todos os RED e cargas controláveis devem estar ativamente envolvidos para manter a tensão e a frequência do sistema estáveis dentro de faixas aceitáveis. Em MRs conectadas à rede, o ilhamento pode ocorrer intencionalmente (por exemplo, para realizar manutenção programada) ou, não intencionalmente, devido a falhas (IEEE Standard Association 1547 (2018)).

Para ambos os casos, uma MR deve utilizar técnicas de controle apropriadas para

continuar sua operação normal. Por outro lado, as MRs isoladas não têm PAC, portanto, ilhamento não é um problema nesses sistemas. Como exemplo de MRs isoladas, têm-se as que fazem atendimento a comunidades remotas ou radiais e locais industriais longe dos grandes centros consumidores (IEEE Standard Association 1547 (2018)).

A operação de uma MR pode ser estabelecida a partir de dois modos: ilhado ou conectado à rede local de distribuição (RL), conforme visto em IEEE Standard Association 1547 (2018). Como uma estação de carregamento para veículos elétricos normalmente está conectada a uma MR, assim a estação de carregamento também deve seguir esses modos de operação. Este padrão trata fundamentalmente da interconexão de RED com o SEP. São fornecidas especificações e requisitos técnicos e funcionais obrigatórios, bem como opções sobre equipamentos e detalhes operacionais. Esta norma apresenta requisitos rigorosos quanto da verificação da diferença de frequência, diferença de fase e variação na magnitude de tensão, conforme resumido na Tabela 1.

TABELA 1 – Requisitos de reconexão de microgrid

Classificação média de RD (kVA)	Dif. De Freq. (Δf -Hz)	Dif. De Tensão (ΔV -%)	Dif. Entre Fases ($\Delta \varphi$ -°)
0-500	0.3	10	20
>500-1500	0.2	5	15
>1.500-10.000	0.1	3	10

FONTE: Adaptado de IEEE Standard Association 1547 (2018)

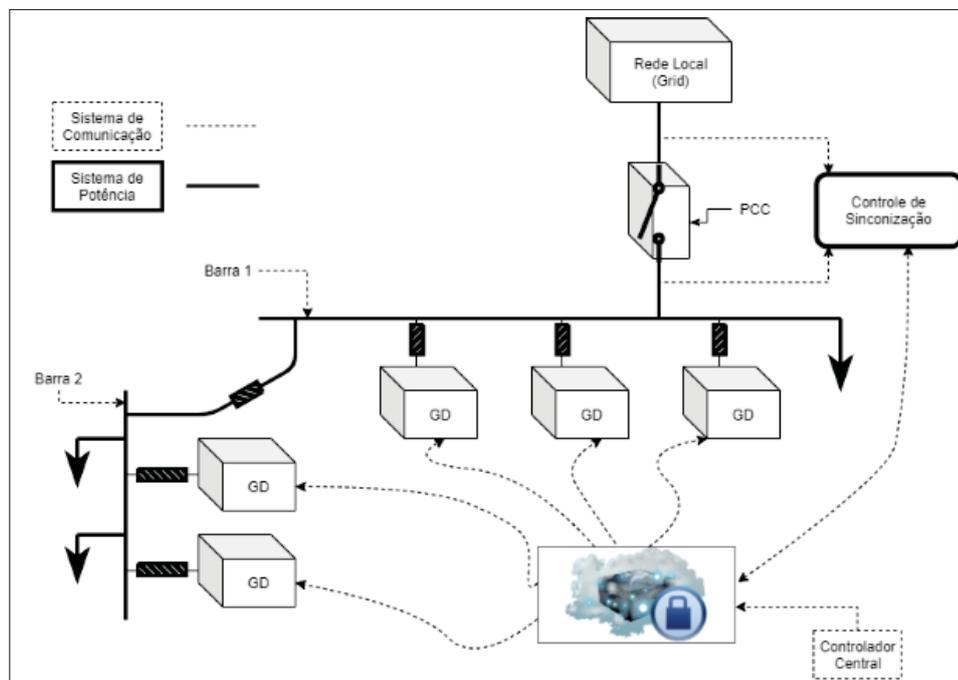
Segundo citado no trabalho de Poloni (2020), existem três métodos para aplicação de sincronismo entre redes elétricas. São eles:

1. Sincronização Através do Controle Centralizado
2. Sincronização Através do Controle Descentralizado
3. Sincronização Através de Inserção de Impedância

Destaca-se o método de sincronização através do controle centralizado. A sincronização de diferentes tipos de MR sob regras e topologias diferentes, torna obrigatória a existência uma comunicação constante com o controlador central da MR. Outro ponto de destaque do controle central é a sua simplicidade aplicada aos controladores locais, pois como o ajuste cabe ao controlador central, então a sincronização se procede mais facilmente, conforme trazido nos trabalhos de Cho *et al.* (2011); Lee, Jiang e Cheng (2013); Bellini, Bifaretti e Giannini (2013).

Observa-se na Figura 1 a presença de um controlador central que estabelece a comunicação bidirecional com o controle de sincronização e unidirecional com todas as fontes de geração distribuída (GD) e o PAC (Sun *et al.* (2017)).

FIGURA 1 – Aplicação do controle centralizado para sincronização de MR



FONTE: Adaptado de Sun *et al.* (2017)

Cho *et al.* (2011) em seu artigo, oferece uma proposta de sincronização por meio do controle centralizado onde os autores incluem GD de vários tipos, como sistemas fotovoltaicos, etc, além do armazenamento local. É necessário verificar o estado presente de tensão da rede principal, para em seguida, ativar a chave de conexão no PAC. A MR possui um equipamento de controle inteligente (do inglês: Intelligent Electronic Device - IED). Aqui os autores apresentam um algoritmo de sincronização implementado no controlador central que verifica a frequência e tensão da RL e repassa estas informações a MR para início do processo de sincronização. Toda o canal de comunicação deve ser robusto para permitir essa troca de informações em tempo real; pois caso contrário, segundo Cho *et al.* (2011), o sincronismo ficaria comprometido.

Para os autores, Lee, Jiang e Cheng (2013), a MR é composta apenas de GD baseada em inversores de frequência e cargas. Quando o controlador central recebe as informações das fontes e da rede principal, ele envia os valores das diferenças a partir do PAC, para os controladores autônomos. O controle local atua através das alterações percebidas nas relações entre as curvas de potência ativa ($P-\omega$) e potência reativa ($Q-V$) dessas fontes; assim essas alterações constam do controle em malha PI (proporcional-integral) que somam-se aos sinais de potência ativa e reativa de referência do controle das fontes de GD. Assim, o ajuste de frequência, tensão e ângulo no PAC é realizado de maneira sequencial para permitir o alinhamento das grandezas elétricas com a RL. Para os autores Lee, Jiang e Cheng (2013), a transição entre os modos de operação ocorre de maneira suave, sem perturbações na presença das diversas fontes de GD e sem transitórios na MR.

Observando-se o artigo de Bellini, Bifaretti e Giannini (2013), nota-se a implementação de controles centralizados robustos com as especificações das conexões de comunicação entre o nó de controle centralizado e os diversos nós de controle locais (GD). O artigo propõe um novo método, baseado em diferentes sistemas *Phase Locked Loop* (PLL), que demonstra ser útil para sincronizar a fase e frequência entre uma MR centralizada com a RL. Segundo o trabalho apresentado, as performances e a robustez do método proposto são comprovados através de diferentes testes experimentais que contabilizaram operação em regime permanente e transitório.

O artigo trazido por Olivares *et al.* (2014) mostra as classificações estratégicas de controle de MRs em três níveis: primário, secundário e terciário. Os níveis primário e secundário são definições ligadas ao funcionamento da MR em si. Já o nível terciário descreve a operação coordenada da MR e da rede principal ou barra geradora. Segundo citado nesse trabalho, o conceito de MR foi introduzido pela primeira vez na literatura através trabalhos de Lasseter (2002a) e Lasseter (2002b) como uma solução para a integração confiável de REDs incluindo BESS, ou seja, a utilização de baterias para possibilitar o acúmulo de energia gerada, além é claro, das cargas controláveis. Essa MR seria percebida pela rede principal como um único elemento respondendo a sinais de controle adequados. Os autores ainda citam que, uma MR pode ser descrita como um agrupamento de cargas, unidades de GD e ESS operando em coordenação para fornecer eletricidade de forma confiável, para o sistema de energia principal no nível de distribuição em um único PAC.

Um dos benefícios da implantação das MRs é que ela promove a integração de fontes de energia renováveis e distribuídas no sistema elétrico, assim como também o armazenamento distribuído e o gerenciamento pelo lado da demanda. Isto ajuda a reduzir o pico da demanda e as perdas, devido à proximidade das fontes de geração e dos consumidores, proporcionando também maior eficiência, qualidade e confiabilidade ao sistema. Outro benefício é a escalabilidade, já que MRs podem ser expandidas internamente ou adicionadas ao sistema elétrico. Segundo o autor Tahim (2015), as MRs podem ser descritas como subsistemas do sistemas de distribuição (SD), pois englobam a geração e o armazenamento distribuídos junto as cargas. Elas operam como uma rede única e autossuficiente, conectada ou de forma isolada do SD.

Para os autores Dawoud, Lin e Okba (2018), as MRs são consideradas como uma solução potencial para lidar com os principais eventos de interrupção de energia devido à sua capacidade de ilharem-se por um PAC e ao potencial de sustentarem-se através da inserção de fontes renováveis. São analisados o papel das MRs na melhoria da resiliência dos sistemas de energia e uma análise em três etapas é realizada neste artigo. Essas estratégias incluem planejamento proativo, gerenciamento de interrupções e estratégias avançadas de operação para reduzir o impacto de grandes interrupções.

2.2 Redes Elétricas Inteligentes a sua Relação Com Veículos Elétricos

Uma série de características definem uma MR. Uma delas é a confiabilidade. Um dos benefícios mais importantes das MRs é melhorar a confiabilidade no fornecimento de energia aos consumidores. Controladores constantemente monitoram os níveis de confiabilidade aos consumidores e procedem atualizações no sistema necessárias para melhorar a disponibilidade de fornecimento e alcançar ou manter o desempenho desejado. Paradas programadas ou não, como por exemplo; tempestades, chuvas causam ou afetam o provisionamento de energia. A inteligência artificial intrínseca (controle e sistemas de automação) de MRs possibilitam a utilização de REDs que passam a permitir operação ilhada em relação à rede elétrica local. Como a geração em MRs está geralmente localizada próximo as áreas de consumo, estas são menos propensas a serem afetadas por perturbações na rede de transmissão e distribuição assim como problemas de infra-estrutura.

No artigo publicado por Lopes, Soares e Almeida (2011), os veículos elétricos atuam nos sistemas de elétricos com função similar ao BESS para se obter confiabilidade. Esta seria a proposta em se utilizar os VEs como estratégia de se transformar de carga descontrolada para controlada. Para os autores, caso o modo de carregamento dos VEs não seja gerenciado de alguma forma, será gerado um aumento de consumo nos períodos de picos de demanda, o que também poderia significar que a atual margem de capacidade ou segurança existente no sistema seria reduzida e investimentos em aumento de geração poderiam ser necessários para manter os mesmos níveis de qualidade desse sistema. Os custos envolvidos nessa expansão de capacidade precisarão ser distribuídos nos valores finais, e isto levará a um aumento no custo financeiro da eletricidade em termos de preços e tarifas. A partir da análise do impacto que poderia ser observado nas curvas de demanda diária de redes elétricas e nos preços do mercado de compensação, os autores concluem que; se não houver alguma estratégia aplicada em termos de gerenciamento, os VE podem aumentar a demanda, por exemplo, nos momentos de pico e criar escassez na geração além de gerar picos tarifários em horários de maior demanda. Os autores ainda sugerem em seu trabalho, o desenvolvimento de várias soluções de gerenciamento e controle inteligentes para VE. Foram propostas algumas estruturas de controle pelos membros do grupo de trabalho, com o objetivo de integrar os VEs à rede elétrica de maneira inteligente, evitando-se reforços de geração e distribuição, preservando as condições operacionais da rede atual. Ainda nesse trabalho, o grupo apresenta também os três tipos de estruturas de controle: Controle hierárquico centralizado, sistema multi-agentes para controle distribuído e Controle de agentes móveis.

Através do artigo escrito por Saber e Venayagamoorthy (2011), que propõe um algoritmo de otimização de enxame de partículas, ou em inglês, *particle swarm optimization* (PSO) para lidar com o comprometimento de um sistema de energia considerando uma grande penetração de energias renováveis além dos VE. Os autores concluíram que o uso dos VE no conceito V2G - (*vehicle-to-grid*) dentro da rede inteligente contribuirá para a minimização de

custos, emissões e para reduzir o desequilíbrio entre produção e fornecimento introduzido na operação típica das energias renováveis intermitentes.

Aplicando um sistema BESS em paralelo a uma estação de carregamento, ou se utilizando de um VE - como tal - para regulação de tensão em uma MR foi apresentado um caso real no artigo dos autores Marra *et al.* (2013). O artigo apresenta também uma visão geral das tecnologias existentes no momento e desafios no controle de MRs e dentre eles cita-se também a técnica PSO, que se enquadra sob uma técnica de inteligência artificial (IA) somado ao uso fundamental de BESS. A aplicação das baterias dos VE, pode então ser usada para armazenar parte da energia produzida durante os períodos de pico de geração através de fontes renováveis e despachá-la durante a noite, por exemplo, evitando variações em valores de tensão e frequência; de forma dinâmica e automática. Cabe ressaltar que, apesar de ser uma rede real e com comportamento particular, os autores citam ainda que o método foi também aplicado em outras redes obtendo-se resultados qualitativos semelhantes. Com o uso das baterias dos VEs - como acumuladores - durante a geração dos sistemas solares, evita-se assim, a necessidade de reforços na rede atual.

Com base nas afirmações do artigo trazido por Soares *et al.* (2013), onde se aponta o aumento da complexidade no modelamento em função da grande quantidade de recursos de energia, incluindo-se VE, o que levaria a um aumento na complexidade de operação e planejamento de redes de distribuição; os métodos de inteligência computacional passam a ter um papel importante na rede elétrica inteligente, segundo os autores. São apresentados pelos autores, dois algoritmos que podem ser usados no contexto de rede elétrica inteligente que tem penetração massiva de VE, nos quais os veículos podem participar ativamente e também proporcionar eficiência em relação à redução dos custos operacionais do ponto de vista do operador de rede. Para resolver o problema não linear de fluxo de potência em corrente alternada, os autores propuseram a utilização do PSO. Segundo o estudo comparativo conduzido por eles entre a abordagem tradicional *Mixed Integer Non-Linear Programming* (MINLP) e PSO; este último apresenta, redução na variabilidade dos resultados e fornece soluções satisfatórias para o problema com um ganho de tempo computacional melhor.

Reforçando essa abordagem da aplicação de otimização baseada em IA, os autores Yang, He e Fu (2014) em seu trabalho, expõem os resultados das simulações mostrando que essa proposta pode reduzir consideravelmente o custo operacional da rede elétrica, atendendo ao requisito de satisfação do proprietário de VE. Além disso, um melhor desempenho nos parâmetros globais de desempenho da rede foi verificado. Os parâmetros podem ser anotados como as limitações da operação da rede elétrica, o estado de carga da bateria, sigla inglesa (SOC) que quer dizer, *state of charge*; um fluxo de potência otimizado e a estratégia de carga e descarga do VE.

Os autores Ansari *et al.* (2015), propõem um modelo utilizando um conjunto *fuzzy* para lidar com incertezas relacionadas aos preços no mercado de eletricidade e auxiliar a

implantação de serviços auxiliares. Os diferentes parâmetros relacionados aos VE também são considerados, como a disponibilidade o mais breve possível de VE, duração de consumo de bateria em uso, duração e tempo de viagens em deslocamento. Os resultados das simulações e análises comparativas mostraram que o método *fuzzy* aumenta os lucros dos operadores de frotas de veículos e diminui a diferença entre os lucros esperados (método estocástico) e reais (método determinístico).

O artigo apresentado por Hu *et al.* (2016), traz uma revisão e classificação dos métodos de carregamento inteligente (incluindo G2V, quanto V2G) de veículos elétricos para operadores de frotas. O estudo primeiramente apresenta relações de serviço entre operadores de frota e outros quatro atores em redes inteligentes. Em seguida, a modelagem da dinâmica da bateria e os padrões de condução dos veículos elétricos, padrões de carregamento e de comunicação são introduzidos. Após isso, três estratégias de controle e seus algoritmos comumente usados são descritos. O objetivo estudado pelos autores é fornecer uma compreensão abrangente sobre o gerenciamento de frotas de veículos elétricos permitindo que agentes comerciais, por exemplo, explorem a operação de frotas de veículos elétricos baseados em serviços e façam com que os veículos elétricos se tornem parte integrante de redes elétricas inteligentes. Hu *et al.* (2016) cita também a necessidade de novas pesquisas em termos do controle de despacho centralizado, favorecendo assim, a adoção desse método como padrão, estabelecendo desta forma, um modelo de negócios colaborativo que garanta o engajamento adequado entre operadores do sistema de energia e frotistas de VE.

Buscando apresentar uma forma de operação ideal de uma MR e conseguir a gestão econômica e otimizada das baterias de veículos elétricos, o artigo apresentado por Lu, Zhou e Yang (2017) propõe um modelo de despacho ideal para MRs sob o modo conectado à rede, que considera o custo de operação e o custo de proteção ambiental do sistema de MRs. As fontes geradoras em um sistema de MRs incluem painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas, motores a diesel, micro-turbinas e VEs. As baterias dos VEs que acessam esta MR são tratadas, nesse estudo, como uma espécie de energia distribuída móvel chamado de dispositivo de armazenamento no modelo.

Ao estudar o artigo apresentado por Bui, Hussain e Kim (2017), nota-se como objetivo o desenvolvimento de um sistema de gerenciamento de energia (EMS) baseado em uma estrutura de otimização centralizada, que é usado para otimizar o agendamento de uma MR considerando o serviço V2G. Por meio do serviço V2G, os veículos elétricos e híbridos plug-in (PHEV) são considerados também pelos autores como sistemas móveis de armazenamento de energia. Em operação normal, a MR está conectado à rede elétrica, onde a MR pode retornar a energia excedente com a rede externa para manter o equilíbrio de energia do todo. Quando a MR está desconectado da rede pública, a MR pode operar de forma autônoma e realizar suas cargas usando seus próprios recursos. Utilizando-se ESS ou unidades de baterias distribuídas, como baterias eletroquímicas e super capacitores apresentadas como aplicações importantes no

sistema MR, que podem acumular o excesso de energia gerados nos intervalos fora de ponta para os intervalos de pico com objetivo a compensar o desequilíbrio de produção de energia pelo modo de carga / descarga. Como resultado, a confiabilidade do sistema pode ser melhorada usando ESS. No entanto, as ESS distribuídas exigem altos custos de investimento.

O trabalho trazido por Rodrigues, Souza e Ribeiro (2018) apresenta a participação relevante dos VEs em uma rede elétrica inteligente criando um sentido G2V - quando essa rede inteligente controla a carga do VE e também quanto no sentido reverso; ou seja, quando as baterias do VE passam a serem utilizadas como fonte de acúmulo de energia quando essa MR inteligente está num sistema ilhado. E por último uma proposta de operação inovadora e ampla onde o VE se comporta de maneira bidirecional em modos conectada e ilhada. O método proposto pelos autores foi projetado baseando-se em um sistema de distribuição trifásico desbalanceado com uma ampla gama de recursos, tais como inserção de geração renovável, unidades geradoras despacháveis, demanda variável, cargas pontuais e distribuídas, regulação de tensão, limites operacionais e técnicos, limitações especiais e controles primários e secundários. O estado de carga das baterias (SOC) e a potência despachável também foram consideradas. Segundo as simulações apresentadas, os resultados apresentados ofereceram uma resposta satisfatória e garantiram a operação da MR dentro de limites aceitáveis tanto em situações conectadas como em ilhadas.

No artigo trazido por Prokop, Vantuch e Mišák (2018), retrata um experimento em um estacionamento real localizado na República Tcheca, distribuído em forma de um edifício de 4 pisos funcionando como uma plataforma off-grid capaz de armazenar e recarregar veículos elétricos. Esta plataforma, com 36 postos de carga para VE, duas centrais fotovoltaicas, um sistema de armazenamento de energia, um sistema de estacionamento auto-acionado e múltiplos mecanismos de controle representa a mais moderna aplicação de trabalho nesta área, denominada Automated Parking System (APS). O experimento buscou projetar e avaliar um gerenciamento de carga adaptativo que reflita as condições e necessidades em situações normais como também em um momento determinado ou situações de estresse do sistema. Tomando como base o número de carros, os tempos de chegada e nos níveis de energia necessários para carregá-los, esse modelo produzirá, segundo os autores, diferentes vetores de carga, o que implicará em mudanças na demanda total alterando o comportamento de todo o sistema. A segunda parte do algoritmo simula a demanda de energia através do BESS enquanto na terceira parte o algoritmo tenta cobrir a demanda de energia utilizando energia renovável, enquanto o restante é armazenado pelo próprio sistema.

O artigo trazido por Jha *et al.* (2019) são estudados os benefícios da adoção de fontes fotovoltaicas (FV) junto com dispositivos de armazenamento de baterias. Um conversor multi porta é proposto para integrar o FV, as estação de carregamento e o ESS ao sistema de rede elétrica. Para controlar o fluxo de potência bidirecional entre as fontes geradoras e as cargas, é proposto um sistema inteligente de gerenciamento de energia junto ao conversor para aumentar

a eficiência entre essas duas fontes. O sistema proposto é simulado e os resultados mostraram uma comutação rápida entre as duas fontes e sem interromper o carregamento dinâmico dos VE. O sistema de gerenciamento de recarga de VE proposto, de acordo com o artigo, coordena a disponibilidade de energia fotovoltaica acumulada no ESS.

Entre os dias 07 e 31 de dezembro de 2019, Zuidema (2020) fez um levantamento baseado em um questionário online que foi enviado a proprietários de veículos elétricos. No total 5.493 participantes começaram a preencher o questionário do quais 4.492 preencheram pelo menos 80% do questionário. No total, 50% dos participantes eram da Holanda, 32% da Alemanha, 6% da Bélgica, 5% do Reino Unido e os 7% restantes de outros países europeus. Para a coordenação e análise desse relatório, Zuidema (2020) contou com pesquisadores da Universidade de Groningen-Holanda (Rijksuniversiteit Groningen) e com Omnicom PR-Holanda.

Baseado neste relatório de pesquisa de campo, destaca-se a informação trazida pelo autor que por volta de 2030, o recurso energético principal para recarga de veículos será a energia elétrica. Em sequência, pôde-se observar a informação sobre o método preferido dos usuários de VE no momento da recarga. 77% dos proprietários têm um ponto de carga em casa, enquanto mais da metade dos respondentes (55%) têm pelo menos um ponto de carga disponível no trabalho. Dos entrevistados que não têm ponto de recarga em casa, 53% afirmam que também não têm disponível no trabalho. Mais da metade, ou seja, 61% das pessoas sem um ponto de carga em casa usariam uma tomada ou soquete padrão para carregar um VE em casa, enquanto 30% simplesmente preferem carregar em trabalho ou em locais públicos.

Já segundo o relatório trazido por IEA (2020), o modo de carregamento privado ou residencial para veículos elétricos leves vai dominar em número e capacidade, pois esse modal de carregamento doméstico é mais favorável aos proprietários de VE, mesmo que o tipo da residência seja independente ou geminada, ou com acesso a uma garagem fechada ou estrutura de estacionamento. Através do relatório, nota-se que, o número estimado de carregadores privados para veículos leves CA em 2020 era de 9,5 milhões, dos quais 7 milhões estavam instalados em residências e o restante em locais de trabalho. Isso representou 40 gigawatts (GW) de capacidade instalada a mais nas residências e mais de 15 GW de capacidade instalada nos locais de trabalho.

Carregadores privados em CA para veículos elétricos leves aumentarão para 105 milhões até 2030, segundo o relatório; no cenário mais moderado de recarga, enquanto que no cenário mais agressivo, acima de 140 milhões. No cenário moderado, isso equivaleria a um universo de 80 milhões de carregadores nas residências e 25 milhões nos locais de trabalho. Isso representaria 670 GW a mais no total instalado como capacidade de carga e fornecerá 235 terawatts-hora (TWh) de energia elétrica em 2030. No cenário agressivo, esses valores subiriam para respectivamente, 1.2 TW (80% acima do cenário moderado) e um aumento no fornecimento de 400 terawatts-hora (TWh) no mesmo ano (IEA (2020)).

2.3 Considerações Finais do Capítulo

Existe uma série de pesquisas na literatura relacionadas a processo de recarga dos VEs. Os trabalhos aqui escolhidos, focam principalmente nas técnicas e objetivos de otimização empregados para carregamento inteligente de VEs, modelos de controle da sincronização da comutação do despacho entre RL e REDs. Os autores fornecem uma revisão abrangente sobre o carregamento de VE, cobrindo as estruturas de controle centralizadas, descentralizadas e híbridas. Um carregamento de VE programado ideal envolve as técnicas de otimização apresentadas pela literatura e os objetivos esperados.

As principais contribuições trazidas por estas literaturas são as seguintes:

1. No mercado de eletricidade, as políticas dinâmicas de preços elétricos têm importância fundamental e tem peso na influência e na forma de consumo de eletricidade do cliente.
2. Foram empregadas, em cada trabalho revisado, diferentes técnicas de otimização para atender a demanda de carregamento de VEs.
3. Os objetivos de otimização observados durante este processo de pesquisa, norteiam também os propósitos desta dissertação.

Como o principal local de recarga de VEs, são as residências, conforme observado no estudo Zuidema (2020), nota-se que, apesar da facilidade e simplicidade do controle centralizado, torna-se necessário um sistema de controle descentralizado próximo a carga e com comunicação confiável entre o controlador central e as fontes REDs para então se obter a sincronização suave entre a MR e a RL.

Da perspectiva de serviços de distribuição de energia, a cobrança dos VEs é um assunto típico de gerenciamento de demanda e pode ser efetivamente realizado pela precificação dinâmica da eletricidade, que influencia diretamente no modelo de cobrança. Uma das estratégias de precificação em pico de consumo de energia que se aplica diretamente a essa pesquisa de dissertação é o horário com tarifa branca, em inglês, Time of Use (ToU).

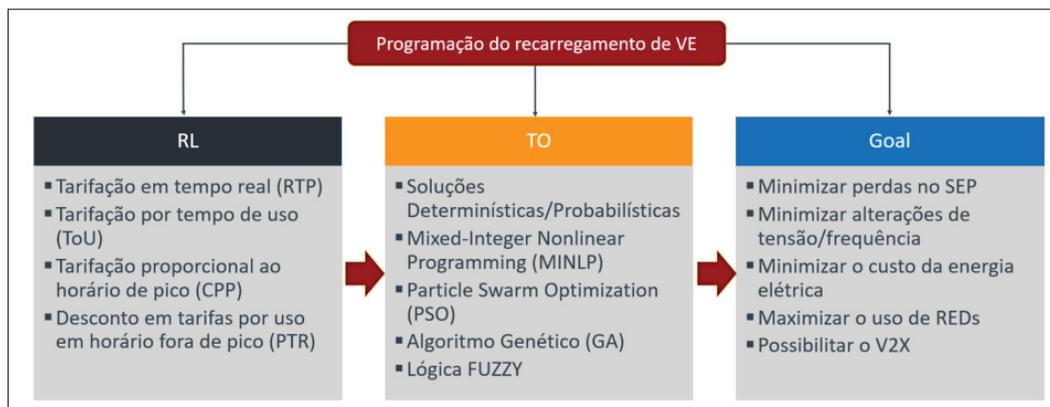
O ToU é geralmente baseado em três períodos de tempo de acordo com a carga: fora do ponta, intermediário e ponta (pico crítico). Durante o momento fora ponta, a capacidade de fornecimento de energia elétrica é maior do que a demanda, então o custo de ToU torna-se baixo. No horário intermediário, a capacidade e demanda estão muito próximas, o que proporciona preços moderados. As cargas elétricas tornam-se muito altas durante os horários de ponta. Conforme o fornecimento de energia elétrica aumenta, as perdas técnicas de um sistema também aumentam, o que gera o maior valor cobrado Lu, Zhou e Yang (2017). Este modelo é muito útil na melhoria da curva de carga e redução da conta de energia no modelo de recarga residencial.

Os resultados apresentados por esta revisão bibliográfica, mostram a eficácia para os processos de recarga de VE diante de ToU, a perspectiva de minimização dos custo de recarregamento e redução dos picos de demanda.

Conforme observado, as estratégias de carregamento inteligente seriam diferentes de acordo com as condições do sistema de energia, incluindo as várias formas de geração de energia renovável, perfil de carga e interconexões disponíveis. Algumas das técnicas trazidas também se apoiam em uso de BESS instalado localmente, o que permite tanto armazenar a energia intermitente gerada por sistemas como o fotovoltaico, como despachá-la à demanda de carga do VE ou até mesmo a RL.

A Figura 2 mostra o fluxo hierárquico da literatura reunida, que se concentra principalmente no ambiente de programação de recarga de VEs, sendo os pontos mais relevantes, as políticas ou cenários de tarifação dinâmica das companhias distribuidoras de energia elétrica (RL), as técnicas de otimização citadas (TO) juntamente com os objetivos das técnicas de otimização (Goal). O gráfico apresentado favorece uma melhor percepção sobre o estado-da-arte atual relativo ao processo de carregamento de VEs.

FIGURA 2 – Fluxo trazido pela revisão da literatura



FONTE: O Autor

A partir desse hierárquico da literatura, a Figura 3 apresenta os pontos trabalhados durante essa dissertação.

FIGURA 3 – Contribuição dessa dissertação a partir do fluxo da revisão da literatura



FONTE: O Autor

3 REVISÃO DE TECNOLOGIAS DE MICRORREDES E DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

3.1 Geração e Armazenamento de Energia Renovável

Revisão de Tecnologias de Microrredes de Veículos Elétricos A energia que é obtida dos recursos naturais, como luz solar, vento, marés, calor geotérmico etc. é chamada de energia renovável. Como esses recursos podem ser reabastecidos naturalmente, para todos os fins práticos, eles podem ser considerados ilimitados, ao contrário do fóssil convencional.

A crise global de energia proporcionou um impulso renovado ao crescimento e desenvolvimento de fontes de energia limpa e renovável. *Clean Development Mechanisms* (CDMs), ou em português, Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (Pedroni (2004)) estão sendo adotados por organizações em todo o mundo. Outra vantagem da utilização de recursos renováveis em relação aos métodos convencionais é a redução significativa no nível de poluição associado. Como o custo da energia convencional está aumentando e a energia solar e a energia eólica emergem como alternativas interessantes do ponto de vista econômica.

Abundantes, livres de poluição, distribuídos por toda a terra e renováveis. A energia fotovoltaica consiste no aproveitamento da energia eletromagnética e energia térmica ambas geradas pelo sol, dependendo das especificações atmosféricas (por exemplo, insolação solar e temperatura).

3.1.1 Energia Fotovoltaica

A geração fotovoltaica apresenta um perfil estocástico, sendo adotada como uma fonte de energia intermitente devido a este perfil. São muitas as variáveis que podem ser consideradas na estimação da energia fotovoltaica gerada por um Sistema Fotovoltaico Autônomo (SFA). Cita-se aqui como exemplos destas variáveis: o recurso solar, índice de sujidade do ar, entre outras.

Recurso solar: Este parâmetro é definido por um conjunto de fatores, tais como: relativo às estações do ano ocorrem mudanças nas informações sobre níveis de ocorrência de chuvas (pluviabilidade) e posição da Terra em relação ao sol (Duffie e Beckman (2013)).

Índice de sujidade do ar: Parâmetro referente ao acúmulo de sujeiras diversas, sendo que a localização da instalação do SFA define a proporção do impacto deste parâmetro na geração fotovoltaica para uma MR. Aspectos que devem ser considerados na aquisição e utilização de placas fotovoltaicas são, por exemplo, a proximidade de grandes centros, uma vez que estes concentram níveis de poluição no ar.

Para melhoria na performance de um SFA, a alternativa mais recente apresentada comercialmente é a adoção de módulos half-cell (módulos meia célula) que apresentam maior

eficiência diante da ocorrência de sombras do que os módulos tradicionais, por exemplo.

3.1.2 Painéis "meia célula" - Half-Cell

A Figura 4 apresenta módulos reais com tecnologia *half-cell* utilizados nesta dissertação. Essa tecnologia surge na construção dos módulos fotovoltaicos com células cortadas ao meio. No lugar das tradicionais células quadradas, utilizam-se células retangulares. Isso favorece a eficiência, pois na mesma superfície quadrada padrão desse módulo, têm-se uma divisão que, em caso de sombreamento, não afetaria a performance total do módulo. Apenas a parte sombreada seria afetada. Com essa divisão, têm-se menos fitas que interligam as células solares, que são utilizadas e gera-se a metade da corrente de energia. O resultado final é redução de 1/4 das perdas na interligação das células e o consequente aumento da potência.

FIGURA 4 – Módulo fotovoltaico half-cell

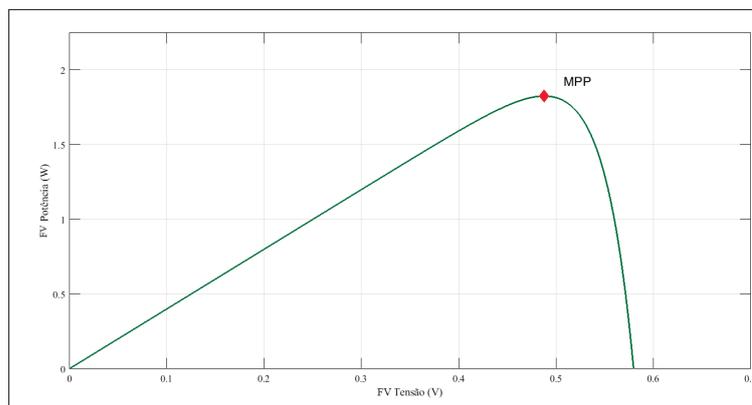


FONTE: O Autor

3.1.3 Equipamentos Utilizados em Geração de Energia Renovável

O ponto de potência máxima (MPP) de qualquer painel varia em função das condições atmosféricas (irradiação solar e temperatura). Isso significa que há sempre algum valor de tensão na sua saída. A Figura 5 apresenta uma curva típica de corrente-tensão de um painel ideal. A partir dessa informação, pode-se estimar a eficiência do conjunto de painéis. Com essa simulação prévia, obtém-se os parâmetros básicos de busca de um painel real e assim a procura comercial se torna mais objetiva.

FIGURA 5 – Curva MPP típica I-V de uma célula FV



FONTE: Adaptado de Blaabjerg e Ionel (2017) MATLAB®

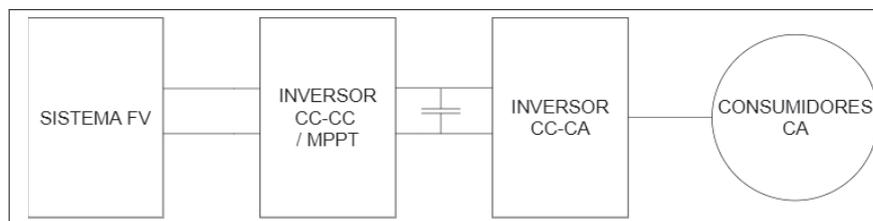
Os modernos controladores de carga MPPT – Maximum Power Point Tracking, em português, ponto de potência máxima atingida, possuem recursos avançados para garantir que o sistema de baterias seja carregado com precisão e eficiência. Trabalham conectados a uma fonte não linear - painéis fotovoltaicos (FV), que geram corrente CC e a carga - as baterias. Atualmente, esta é a forma de regulação da potência do painel mais utilizada comercialmente.

Segundo o artigo trazido por Pereira e Gonçalves (2008), os inversores têm a finalidade de transformar uma corrente contínua em corrente alternada, mudando a sua forma de onda. São utilizados, por exemplo, quando se quer alimentar uma carga CA através de uma fonte CC. Como módulos fotovoltaicos geram tensão sob a forma de corrente contínua, para ser utilizada em equipamentos como TV's, rádios, motores ou qualquer outro tipo de carga que opere em corrente alternada, deve-se utilizar um conversor CC/CA. Nessa dissertação, observou-se que as funções descritas abaixo por Pereira e Gonçalves (2008) em seu trabalho, tem aderência e se aplicam diretamente aqui. Quando conectados a rede e a sistemas fotovoltaicos, inversores Off-Grid, têm essas particularidades:

- Rastreamento do Ponto de Máximo de Potência – Através do controle da corrente e tensão, esse sistema é capaz de fazer ajustes para manter os módulos fotovoltaicos operando perto do seu ponto de maior potência, que varia de acordo com a radiação solar incidente.
- Converter a corrente CC gerada pelo painel fotovoltaico em CA - Como a corrente gerada através do efeito fotovoltaico apresenta-se na forma contínua, o inversor deve criar uma forma de onda alternada. O nível de semelhança com a forma de onda senoidal deve ser alto (pouca distorção). A principal tarefa do inversor CC-CA é transformá-la em uma tensão de saída CA simétrica, com amplitude e frequência próximas a da rede local existente.

A Figura 6 representa um diagrama simplificado de um sistema CA a partir de energia fotovoltaica.

FIGURA 6 – Diagrama simplificado a partir de geração fotovoltaica



FONTE: O Autor

3.1.4 Sistemas de Armazenamento de Energia Local

As baterias já provaram ser uma tecnologia de armazenamento de energia comercialmente viável. *Battery Energy Storage Systems* - (BESS), ou em português, armazenamento por meio de banco de baterias, são sistemas modulares que podem ser implantados em contêineres padrão, próximos ao local de consumo. Diversas aplicações e casos de uso, incluindo regulação de frequência, integração e redução da instabilidade causadas pela alta penetração de recursos energéticos distribuídos (REDs) e permitir a integração com microrredes ilhadas ou não deram maior atenção a esta técnica. Por exemplo, como primeiro lugar, na regulação de frequência, o uso de baterias são tecnicamente mais adequadas (Olivares *et al.* (2014)). Em segundo lugar, as baterias se destacam como uma alternativa econômica para a expansão das microrredes conectadas, pois ajudam a evitar os picos de consumo de carga do consumidor, fornecendo energia durante os horários de ponta de consumo (Jha *et al.* (2019)). E em terceiro lugar, como a geração por REDs muitas vezes não coincide com o momento da demanda por energia, o excedente de pode ser acumulado e despachado para rede local (Hussain, Bui e Kim (2018)).

BESS podem ser usados para fonte de alimentação ininterrupta (uninterruptible power supply-UPS), transmissão e suporte do sistema de distribuição (TD) ou no setor da geração, dependendo da tecnologia aplicada e na capacidade de armazenamento. Entre os dispositivos de armazenamento eletroquímico, físico de energia, as tecnologias que mais têm recebido atenção recentemente estão dentro do escopo de UPS e TD. Estas tecnologias representativas incluem baterias de fluxo de redução-oxidação (redox), sódio-enxofre (Na-S), bateria de níquel-cádmio (Ni-Cd), chumbo-carbono (Pb-C), supercapacitor, bateria de lítio (Li-ion), além do *flywheel*. Hoje as baterias de chumbo-carbono e baterias de lítio tem um uso mais comum.

As tecnologias de bateria para BESS podem ser diferenciadas com base na densidade de energia, eficiência de carga e descarga, vida útil e eco-compatibilidade dos componentes em relação a sua reciclagem futura. A densidade de energia é definida como a quantidade de energia que pode ser armazenada em um único sistema por unidade de volume ou por unidade de peso. Por exemplo, baterias de lítio armazenam 150-250 watts-hora por quilograma (W/kg) e podem armazenar uma e meia a duas vezes mais energia do que as baterias Na-S, duas a três vezes mais do que as baterias de fluxo redox e cerca de cinco a seis vezes mais do que as baterias de chumbo-carbono e bateria de níquel-cádmio. O limitante para sua maior aplicação,

está nos valores financeiros atuais.

A eficiência de carga e descarga é uma escala de desempenho que pode ser usada para avaliar a eficiência da bateria. As baterias de lítio têm a maior eficiência de carga e descarga, com 95%, enquanto baterias de chumbo-carbono estão em cerca de 60% -70%, e baterias de fluxo redox, em cerca de 70% -75%. Um importante elemento de desempenho dos dispositivos de armazenamento de energia é sua vida útil, e esse fator tem o maior impacto na revisão da eficiência econômica. Outra consideração importante é o respeito ao meio ambiente, ou até que ponto os dispositivos são ambientalmente inofensivos e recicláveis (ADB (2018)). A Figura 7 apresenta uma adaptação de parte desse trabalho para melhorar e resumir estas informações.

FIGURA 7 – Principais características das diferentes tecnologias de armazenamento

Ranking	Densidade de energia (kW/kg)	Eficiência de carga (%)	Vida útil (anos)	Eco compatibilidade (sim/não)
(1º) Li-íon	150-250	96	10-15	Sim
(2º) NaS	125-150	75-85	10-15	Não
(3º) Fluxo redox	60-80	70-75	5-10	Não
(4º) Ni-Cd	40-60	60-80	10-15	Não
(5º) Pb-C	30-50	60-70	3-6	Não

FONTE: Adaptado de ADB (2018)

Na maioria dos projetos e aplicações, é importante entender os desafios e restrições ao realizar uma implantação de armazenamento de energia de bateria. Não existe somente a solução de armazenamento aqui apresentada como possível solução universal e aplicada em todos os sistemas de recarga, sendo que cada situação precisa ser avaliada para haver adequação as necessidades, por exemplo, do porte e capacidade das baterias do veículo elétrico a ser carregado. Uma vasta gama de tecnologias com suporte mecânico, eletroquímico e elétrico, estão hoje disponíveis no mercado para armazenamento de energia elétrica, sendo mais particular a sua solução tanto maior seja a necessidade de projeto.

A opção pelo tipo de bateria chumbo-carbono adotada nessa dissertação, se deu por ser a mais prática e de menor custo em ser obtida no mercado, e que para fins de prova de conceito prático, atenderiam tecnicamente, mesmo não sendo eco-compatíveis. A opção por baterias de lítio, seria a mais lógica, mas foi descartada exatamente por ter maior custo na sua aquisição além da sua dificuldade em ser obtida atualmente no mercado local.

3.2 Estações de Carregamento

Carros puramente elétricos, ou em inglês, *battery electric vehicle* (BEV), veículos híbridos (HEV) e veículos híbridos plug-in (PHEV) são relativamente novos no mercado e o fato de usarem eletricidade para sua recarga significa que uma nova infraestrutura precisa ser implantada, sendo considerado similar a um novo consumidor. Nesse capítulo seguirão explicações sobre tipos de veículos e as diferentes soluções de motorização usadas para trem de força, ou *powertrain* em inglês.

Um PHEV ou um BEV requerem um sistema eletrônico de potência entre a rede elétrica e a bateria de alta capacidade de tensão localizada no interior do veículo. Este sistema eletrônico é dividido em duas partes: uma estação de carregamento, normalmente externa ao veículo, que também é chamada de estação de recarga do veículo (EVSE) sigla inglesa que significa *electric vehicle supply equipment* ou eventualmente aqui chamado de eletroposto, além de uma unidade chamada de carregador integrado ao veículo (*on-board*). Esta última, em caso de carregamento CA, se comporta como um inversor de corrente.

O processo de carregamento de VE se assemelha ao processo de carga de um aparelho celular. Com potência nominal específica, tipos de conectores apropriados, requisitos mínimos de cabeamento além das especificações do veículo a considerar, todas essas informações padronizadas através da norma IEC 61851-1 (IEC (2019)).

Seguindo o padrão internacional, a ABNT no Brasil adotou o padrão IEC 62196 para plugues, tomadas, tomadas móveis, plugues fixos nos veículos elétricos e padrão de recarga condutiva no Brasil. A designação para as expressões “carga lenta” e “carga rápida” se dá em função da tensão aplicada. Se for aplicada uma fonte de tensão em corrente alternada, ou em inglês, *alternating current* (AC), obtem-se carga lenta. Já quando a fonte de tensão está em corrente contínua, que na língua inglesa chama-se *direct current* (DC) tem-se carga rápida.

Existem quatro modos de recarga de acordo com o padrão IEC:

- Modo 1- Carregamento lento a partir de uma tomada convencional do tipo tomada em CA monofásica. O inversor de corrente aqui fica externo, sendo muito próximo de um inversor fornecido junto com um celular ou laptop convencional. O conector padrão desse inversor é o tipo 1. Os tipos de conectores serão mostrados adiante. O carregador utilizado está instalado no próprio veículo como apresentado na Figura 8a, sendo passivo e sem gerenciamento e o valor de tensão está entre de 127/230V (normalmente monofásico) e a corrente não excede a 16A. São utilizados para carregamento durante a noite, por exemplo, em ambiente residencial e usualmente se gasta entre 6 e 12 horas para um BEV ou 2-4 horas para um PHEV.
- Modo 2- A partir deste nível os carregadores serão sempre externos ao veículo para aumentar a segurança aos usuários (conforme Figura 8b). Carregamento lento, porém, com uma unidade apropriadamente instalada por um técnico eletricista (no caso de

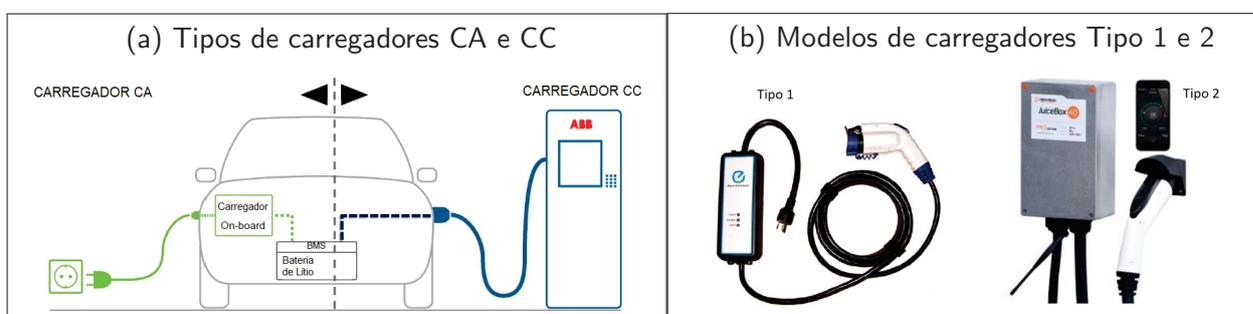
instalação residencial) e assim passa a fornecer o dobro de potência do nível 1 por se tratar de sistema trifásico. Conta com um dispositivo de proteção junto ao cabo na CA e novamente se processa como uma conexão passiva, mas garantindo dessa vez, proteção ao sistema pelo aterramento, proteção contra sobrecorrente, etc. O valor de tensão está entre 230/400V com a corrente não excedendo 32A. Podem carregar um BEV em 3-4 horas, praticamente a metade do tempo em relação ao Nível 1. Conectores aqui comuns são tanto um tipo 1 quanto tipo 2 conectado (através de um cabo adaptador fornecido com o veículo).

- Modo 3- Possibilidade de ser encontrado carregamento lento (CA) ou rápido (CC) utilizando um tipo específico de conector com a associação da função de controle, comunicação PWM (*Pulse Width Modulation*) e também contam com proteções de aterramento, sobrecorrente, etc. Aqui os conectores são sempre ofertados como padrão tipo 3, citados adiante no Anexo A. A conexão só estará ativa com os pinos de comunicação para controle adequadamente conectados e, da mesma forma anterior do nível 2, Os valores de tensão são de 230V monofásica e 400V trifásica e a corrente não excedendo 250A.
- Modo 4- Carregamento rápido e/ou ultra-rápido usa um carregador em CC. Normalmente montado em uma estação de carregamento ou local público apropriado. Exigem instalações e projetos adequados, cabos apropriados ao nível de potência e corrente circulante e assim segue-se um alto investimento financeiro. Também contam com formato de comunicação PWM, instalação protetiva de DR's (diferencial residual), etc. Não há ainda uma padronização no modo de carga CC, conforme se lê em seguida.

Pode ser dividido em dois subníveis:

1. Modo 4.1, em que os valores de tensão estão acima e $500V_{CC}$, corrente acima de 100A e $P_{max} = 50kW$;
2. Modo 4.2, em que os valores de tensão estão acima e $500V_{CC}$, corrente acima de 300A e $P_{max} = 350kW$ ou acima.

FIGURA 8 – Tipos de carregadores



FONTE: (a) Adaptado de ABB Group (2019) e (b) Adaptado de ENELX (2019)

Com relação a classificação dos carregadores nos três primeiros níveis; a potência

entregue ao VE é relativamente pequena. A partir dos modos de carga em CC, a potência fornecida é maior, o que torna o processo de recarga mais rápido. Por critérios de segurança, esse carregador está sempre montado externamente ao veículo (IEC 61140, IEC 60529, ISO/FDIS 17409).

Além disso, os locais onde estes carregadores podem estar localizados são diferentes. A localização provável para carregadores lentos podem, por exemplo, ser em locais residenciais, enquanto carregadores rápidos geralmente são encontrados em lugares públicos, como um estacionamento de um super mercado ou dentro de um estacionamento de uma empresa. Os carregadores níveis 2, 3 e 4 contam com disjuntores e outros métodos de proteção ativa e passiva típicos de instalações industriais (IEC 60364-7-722).

Ainda se tratando de segurança, pode-se notar que todos os sistemas contam com sensores de corrente que monitoram a potência consumida e mantêm a conexão somente se houver demanda em uma faixa pré determinada. Carregadores internos e externos precisam cumprir várias especificações, exigências governamentais e conselhos, dependendo da localização da estação (ISO 6469-3).

Em geral, esses são os principais requisitos de segurança e operação atualmente:

- Emissão de compatibilidade eletromagnética (EMC) (US Federal Commission Part 15 Class A; União Europeia - Norma europeia(UE): EN 55011, EN 55022 e IEC 61000-4).
- Eficiência (96% ou mais).
- Índice de distorção harmônica total (iTHD) <7% (está em conformidade com o requisito IEEE 519).
- Proteção em estanqueidade (como IP54).

Segue a Tabela 2 com a organização dos tempos aproximados de recarga para um VE com uma bateria de 40kWh de capacidade e 4 formas de recarga.

TABELA 2 – Tabela com comparativo de tempo vs. tipo de EVSE

Tipo de carregador	Tomada doméstica	Carregador CA monofásico	Carregador CA trifásico	Carregador CC trifásico
Potência	2,3kW	7,4kW	22kW	24kW
Tempo para recarga total (aproximadamente)	18 horas	7 horas	2:30 horas	2 horas
% de carga atingida em 30 min	3%	7%	20%	25%

FONTE: Adaptado de ABB Group (2019)

3.2.1 Arquitetura de Estações de Carregamento em CA e Carregadores integrados

Como apresentado no capítulo 3.2 página 37, diferentes modos de carregamento tem diferentes classificações de nível de potência do carregador integrado ou externo. Isso divide a eletrônica de potência em uma arquitetura de entrada monofásica e uma arquitetura de entrada trifásica, respectivamente, onde o maior impacto é no circuito corretor de fator de potência, *power factor correction* (PFC), em inglês.

Atualmente, de acordo com as normas SAE J1772, IEC62196-2 e CHAdeMO, os modos de carregamento podem ser chamados de carregamento monofásico, trifásico e corrente contínua (CC não será abordado neste trabalho). O padrão SAE J1772 define os níveis de carregamento como Nível 1, Nível 2 e Nível 3, para CA e CC, respectivamente.

Enquanto o modo de carregamento CC considera-se o equipamento de alimentação VE externo (EVSE), o modo de carregamento CA é coordenado principalmente com os carregadores OBC - On Board Charger, ou em português normalmente chamado de carregador interno do veículo (IEC 61851-1).

3.2.1.1 Arquitetura Monofásica CA

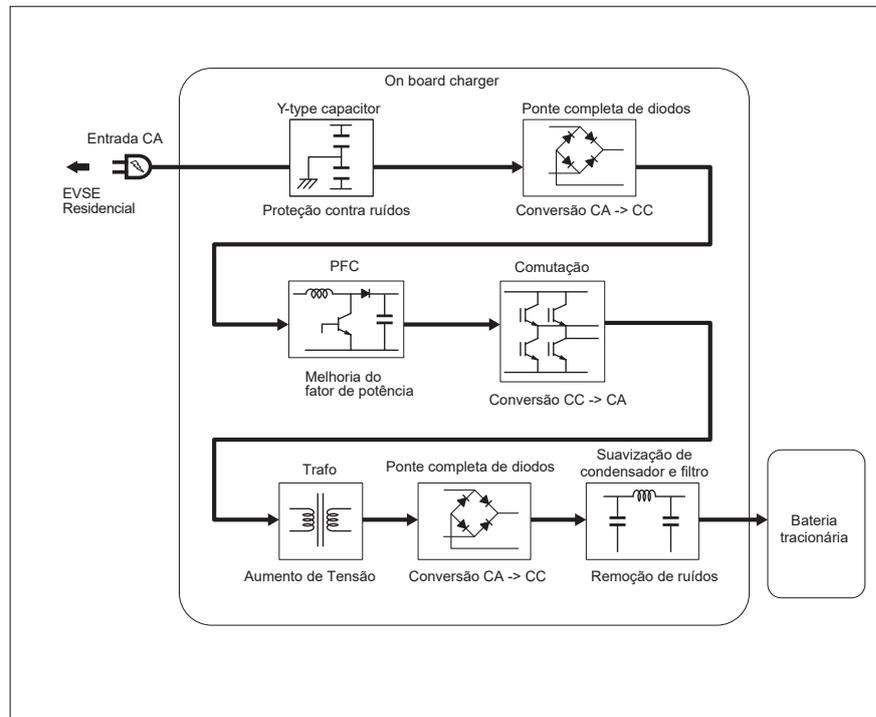
À medida que os projetos automotivos se movem em direção à eletrificação, a eletrônica de alta potência torna-se fundamental para novos sistemas eletrônicos de powertrain e bateria. Nessas aplicações, os controladores digitais interagem com segurança com os sistemas de alta tensão dos veículos elétricos possibilitado pelo isolamento galvânico. Trata-se de um meio que previne o fluxo de corrente entre duas partes de um sistema elétrico. O ponto de diferença entre o isolamento galvânico, comparado ao isolamento ôhmico, é que ele não tem sentido de condução direta entre os dois circuitos. Em outras palavras, o circuito de potência de saída está eletricamente e fisicamente isolado do circuito de alimentação de entrada. O isolamento galvânico é fundamental para o funcionamento desses circuitos em paralelo.

O OBC monitora as tensões de entrada e saída em direção a bateria tracionária, a corrente e o sinal piloto. Esse último, em processo de carga, serve para troca de sinalização entre o VE - que ajusta os valores de tensão e corrente dinamicamente - e o carregador. O PFC é o primeiro passo em um estágio interno do OBC.

O objetivo de um PFC é transformar a corrente de entrada senoidal, reduzir as harmônicas injetadas pela rede elétrica local e melhorar assim, o fator de potência para atender aos padrões internacionais, evitando danos ao longo prazo as baterias tracionárias do veículo. Em segundo lugar, o PFC gera uma tensão de saída regulada para o conversor CC / CC que é controlado pelo sistema de gerenciamento de bateria, ou em inglês *Battery Management System* (BMS). Esse subsistema monitora e gerencia o carregamento e descarga das células da bateria tracionária para garantir alta eficiência e segurança. Especificamente, o BMS controla o carregamento, estado de SOC, profundidade de descarga e condicionamento de células de

bateria individualmente. Maiores informações podem ser obtidas no Anexo B.3, que consta na página 124 dessa dissertação. Na Figura 9 é apresentado o diagrama de blocos do OBC do veículo Mitsubishi i-MiEV[®] utilizado durante este trabalho.

FIGURA 9 – OBC veículo Mitsubishi i-MiEV

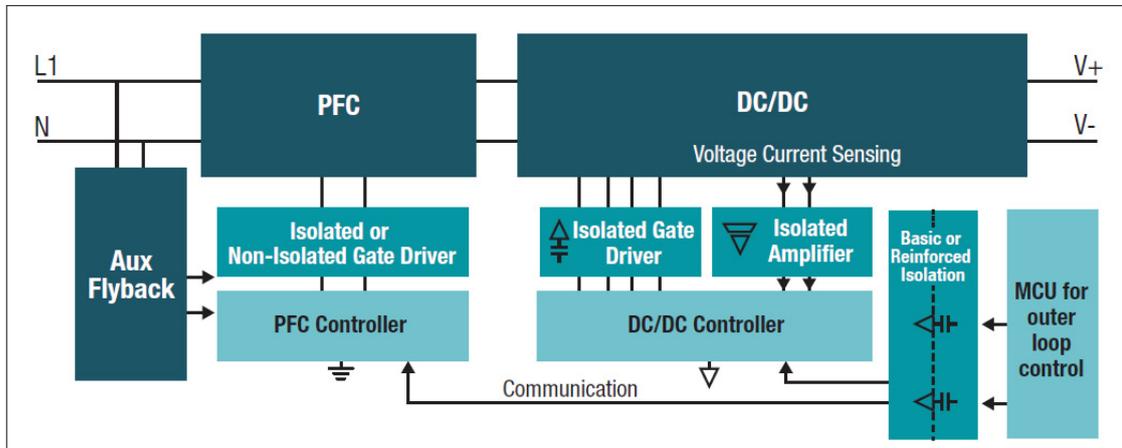


FONTE: Adaptado de Mitsubishi (2021)

A Figura 10 apresenta um diagrama de blocos de uma arquitetura com entrada monofásica, contando com uma única fase e o neutro como entrada. Encontram-se projetos com bloco PFC de estágio único (monofásico) ou um PFC de estágio duplo (bifásico) intercalado para uso do neutro. O PFC monofásico oferece o benefício da simplicidade e emprega um controlador de baixo custo. A topologia intercalada favorece o cancelamento de corrente de entrada e saída, resultando em um projeto de filtro de interferência eletromagnética (EMI) mais eficiente, elementos de armazenamento menores e melhor dissipação térmica, por isso amplamente aplicados nos carregadores em CA residenciais.

O bloco CC/CC (DC/DC) conecta a bateria de alta tensão à rede interna CC de 12V, que também alimenta acessórios convencionais, como vidro elétrico, sistema de som, etc. O inversor principal alimenta o motor elétrico de tração e também é usado para o processo de frenagem regenerativa e retorno de energia não utilizada à bateria. A seleção de uma topologia inversora depende da necessidade de suprimento das tensões em cada projeto. Existem diversas topologias, por exemplo, em meia ponte, meia ponte comutada, ponte completa com mudança de fase ou uma ponte dupla (Gong e Rangaraju (2018)).

FIGURA 10 – Arquitetura de entrada monofásica



FONTE: Gong e Rangaraju (2018)

Os outros seis subsistemas apresentados são:

- Uma fonte de alimentação auxiliar. (Aux. flyback)
- Um filtro isolador. Também pode integrar vários recursos de segurança como proteção contra sobrecorrente, etc.
- Um driver não isolado. Existe uma tendência nos novos projetos em substituir a arquitetura sem ponte (utilizando-se o mesmo referencial de terra do PFC) com o a eliminação da ponte de diodos tradicional.
- Um sensor de tensão. Ele monitora a magnitude de tensão. Um isolamento galvânico (aterramento) é necessário para evitar qualquer risco elétrico com a alta tensão. Essa isolação protege os demais controladores no veículo contra tensões elevadas, podendo atingir valores acima de 300V. Como esse sensor fica conectado ao OBC, o isolamento entre circuitos de baixa e de alta tensão é importante, pois permite comunicação entre os vários módulos, como ECU (eletronic control unit). Essa central gerencia todas as operações do veículo elétrico através da rede CAN (Controller Area Network). Normalmente esta rede trabalha com valores próximos a $5V_{CC}$.
- Um sensor de corrente. Ele monitora a magnitude e direção do fluxo de corrente na entrada e saída do conversor CC / CC. Normalmente é utilizado um sensor Hall de corrente ou um sensor de corrente direta usando um resistor *shunt*.
- Isolamento do sinal, que fornece o valor de isolamento entre os dois sistemas com diferentes potenciais de terra. Isso permite a alta velocidade de comunicação da unidade de controle microcontrolada, ECU, localizada no lado de baixa tensão com o controlador CC / CC ou controlador PFC localizado no lado de alta tensão. São utilizadas várias tecnologias de isolamento em veículos elétricos, incluindo transformadores de isolamento, optoacopladores, isoladores semicondutores à base de capacitores e isoladores semicondutores baseados em transformadores. A microeletrônica e o aumento da densidade de energia da

eletrônica automotiva aumentam as temperaturas de operação, o que pode estressar os opto-acopladores e reduzir seu desempenho. O isolamento baseado em semicondutores tem uma confiabilidade significativamente melhor sobre essas faixas de temperatura mais altas, tornando-os uma boa escolha para projetos de VE.

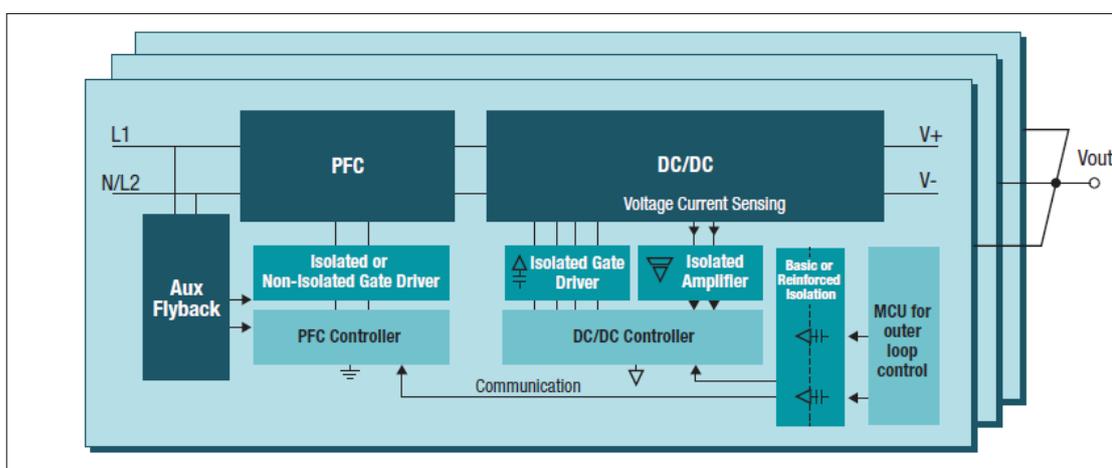
3.2.1.2 Arquitetura Trifásica CA

Uma entrega de potência mais alta requer uma entrada trifásica. Para maximizar a transferência, minimizando o volume dos cabos condutores da rede de distribuição, geralmente adota-se três fases. Elas podem diferir por apresentarem uma arquitetura definida por ter a presença ou não de um circuito neutro (Gong e Rangaraju (2018)). O benefício da conversão de energia mais simples e eficiente é trazido através dos módulos monofásicos de entrada e a arquitetura pode ser multiplicado por três.

A Figura 11 ilustra a arquitetura com a combinação de três módulos monofásicos. A entrada pode ser um valor de tensão fase-neutro ou fase-fase. Todos os subsistemas e requisitos aqui são semelhantes aos de uma entrada monofásica de um carregador integrado ou carregador EVSE. Embora essa estrutura possa exigir um aumento no número de transistores de potência e circuitos de sensores, há uma redução nos esforços de estabilização e filtragem.

Portanto, podem ser usado componentes menores com um tamanho discreto. Esta combinação modular também reduz estresse sobre os recursos de controle do PFC e CC / CC, permitindo a implementação de um controlador analógico separadamente, com menor custo, maior controle e menor complexidade para o *microcontroller control unit* (MCU) (Arancibia, Strunz e Mancilla-David (2013)) e (Gong e Rangaraju (2018)).

FIGURA 11 – Arquitetura de entrada trifásica



FONTE: Gong e Rangaraju (2018)

3.3 Tipos de Veículos Elétricos Leves

A área automobilística está entre os setores que permitem uma enorme variedade de produtos e recursos adicionais para se adequar de acordo com os gostos dos clientes. No entanto, hoje em dia o recurso mais útil e desejado é a compatibilidade ecológica, onde os motores de combustão interna (ICEs) lutam para se sobressair. Essa é uma das razões porque os veículos elétricos (VE) estão se tornando populares e sua aceitação está aumentando dia a dia. Inicialmente, a mudança para um dispositivo de transporte mais ecológico levou a criação dos veículos híbridos elétricos (HEV) que usa para a propulsão uma parte da energia proveniente de um motor de combustão interna e o restante de uma bateria que alimenta um segundo motor elétrico. Esse novo tipo de veículo apareceu no final de 1990. O Toyota Prius[®] é o primeiro veículo do gênero a ser produzido em massa e foi lançado no Japão em 1997. Depois disso, o Honda Insight[®] e o Ford Escape Hybrid[®] começaram a ser produzidos. HEVs podem ser considerados como uma transição entre veículos ICE e BEV (WLTP (2019), IEA (2020)).

Nesses modelos, a bateria de tração permite fluxo de energia bidirecional enquanto o ICE, apenas unidirecional. Os HEVs são mais eficientes, em termos de gasto energético, que os veículos ICE convencionais (Denton (2016), Zuidema (2020)).

Estimulada pelo crescimento da penetração dos telefones celulares e laptops na década de 1990, a tecnologia da bateria melhorou enormemente. Novas tecnologias de baterias foram comercializadas, como níquel-cádmio, níquel-hidreto metálico e mais recentemente baterias de lítio-íon.

Com o desenvolvimento da tecnologia de baterias, os BEV tornaram-se um produto comercialmente disponível desde o final dos anos 2000. Segundo Cobb (2015), mais de 500.000 veículos elétricos de passageiros e veículos utilitários leves foram vendidos em todo o mundo desde 2008, do total de vendas globais de cerca de 850.000 veículos elétricos na época.

Em dezembro de 2015, o Nissan Leaf[®], com 200.000 unidades vendidas em todo o mundo, era o veículo BEV mais vendido do mundo seguido pelo Tesla Model S[®] com entregas globais de cerca de 100.000 unidades. Como um acumulado parcial em 2021, o Tesla Model 3[®] vem em primeiro lugar com 285.047 unidades, seguido pelo Wuling HongGuang Mini EV que tem valores unitários vendidos igual a 253.704 e em terceiro lugar, novamente um veículo Tesla[®], dessa vez o Model Y, com 180.953.

A Tabela 3 apresenta as classificações, de acordo com a *Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure* - (WLTP, 2019) quanto ao índice de hibridização do veículo.

TABELA 3 – Tabela de características fundamentais dos veículos híbridos

Classificação	Start-Stop	Regeneração	Assist. Elétrica	Modo Somente Elétrico	Recarga de Energia na Rede Elétrica
Micro	ok	ok	-	-	-
Médio (Mid)	ok	ok	ok	-	-
Completo (Full)	ok	ok	ok	ok	-
Plug-in	ok	ok	ok	ok	ok

FONTE: Adaptado de WLTP (2019)

Um sistema *start-stop* adotado em um veículo ICE o torna em um micro híbrido e possui as funções de partida e desligamento do motor bem como algum nível de regeneração da energia cinética causada pelo processo de frenagem do veículo. Para executar essa manobra, é necessário inverter a ligação do circuito indutor com as escovas do alternador, a fim de aproveitar o efeito do magnetismo residual permitindo a auto excitação.

Em um processo de desaceleração, o alternador se comporta como um freio eletromagnético, passando a funcionar como um gerador aproveitando-se deste efeito para gerar mais energia para sua bateria e favorecendo a próxima partida. A regeneração se dá quando a central de gerenciamento do veículo, desliga o circuito indutor do motor e que está alimentando a bateria. Desta forma o alternador se comporta como um dínamo de excitação e fornece energia para a linha de alimentação e auxilia no processo de frenagem do veículo. Esse processo pode unicamente limitar a velocidade do motor a combustão, sem porém conseguir freá-lo totalmente. Seu motor de combustão interna é desligado através da estratégia de gerenciamento eletrônico quando esse não é requerido, gerando-se a economia de combustível e redução nos índices de poluentes emitidos. É necessário adotar um motor de partida adequado a essa forma de operação severa. A economia de combustível pode atingir até 5%, segundo a WLTP.

Já o híbrido médio agrega essa função anterior e adiciona algum nível de assistência durante acelerações. Em especial, durante regimes de baixa velocidade do veículo, como por exemplo, em ambiente urbano. Nessa classe de veículo, ainda não encontra-se a operação em modo puramente elétrico, pois o motor a combustão sempre estará presente. Segundo informação anotada em testes pela WLTP, tem-se em torno de 15% de economia de combustível.

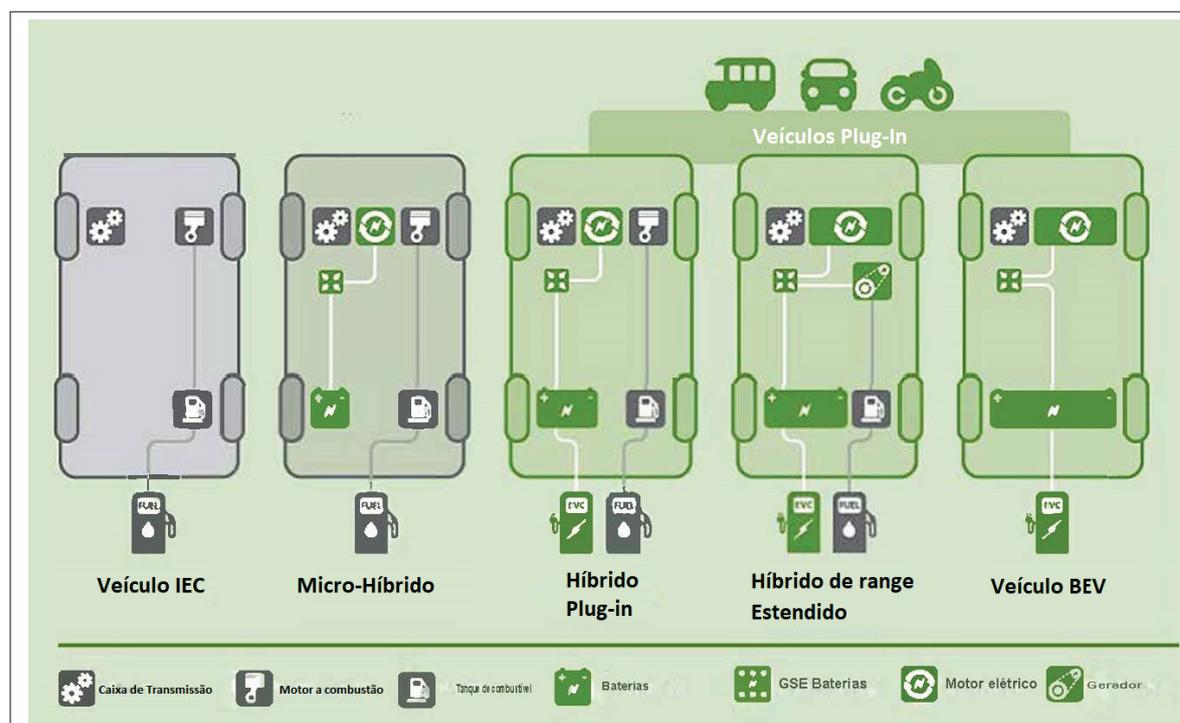
Um híbrido completo, contempla todas as funcionalidades anteriores e possibilita que o motor elétrico seja gerenciado de forma independente, podendo atuar sozinho para impulsionar o veículo parcialmente ou em regime complementar ao motor à combustão. Aqui a economia de combustível atinge índices da ordem de 30%.

Há um caso particular de veículo híbrido, o *plug-in*, que tem características idênticas ao híbrido anterior, que porém se diferencia por contar com um plugue e/ou conector que possibilita também a recarga das baterias através da rede elétrica e tem internamente o seu

carregador. O índice de economia de combustível pode atingir percentuais de 70% quando temos uma bateria tracionária de maior capacidade, ou chamado veículo híbrido de range estendido.

A Figura 12 apresenta um esquema para visualização das arquiteturas de veículos elétricos atualmente encontradas.

FIGURA 12 – Tipos veículos híbridos e elétricos



FONTE: Adaptado de FREEMANTLE (2019)

No lado direito da Figura 12, se observa o segundo tipo de veículo chamado de BEV. Nele não se encontra mais motor a combustão. Seu sistema de tração agora depende apenas dos motores elétricos e de suas baterias internas para fornecimento de energia e obtendo valores de emissão de poluentes muito próximos de zero. Outras informações sobre trem de força, motores mais utilizados e baterias de um veículo elétrico podem ser encontrados no Anexo B.

3.3.1 Modelos de Veículos BEV e PHEV

As Tabelas 4 e 5 fornecem alguns exemplos de opções atualmente disponíveis, suas médias de carga, capacidades nominais de baterias e tempo médio até a carga completa (em horas) e utilizáveis da bateria estimadas com base no procedimento de teste da Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA, 2019). O veículo utilizado no desenvolvimento dessa dissertação consta na Tabela 4 em destaque.

As faixas de potência e capacidade da bateria indicadas na Tabela 5 são valores médios estimados pela EPA. Por causa do tamanho do motor e arquitetura dos híbridos requer-se o

uso de seu motor de combustão interna para completar o procedimento padrão EPA: primeiro a operação combinada (motor combustão carrega baterias tracionárias) até final do combustível e em seguida; operação somente por essa bateria.

TABELA 4 – Médias de carga, capacidades nominais e tempo médio até a carga completa - Veículos BEV

Veículo tipo BEV	Média de carga (kW)	Capacidade da bateria (kWh)	Tempo até a carga completa (em horas)	
			Nível de carga 1 (120V e 12A máx.)	Nível de carga 2 (240V e 32A máx.)
BMW Active E [®]	7	32	4,5	23
Chevrolet Bolt [®]	7,2	60	8,5	43
Fiat 500E [®]	6,6	24	3,5	17
Ford Focus EV [®]	6,6	33,5	5	24
Honda Clarity [®]	6,6	25,5	4	18
Hyundai Ioniq [®]	6,6	28	4	20
Jaguar I-PACE [®]	7	90	13	64
Kia Soul [®]	6,6	27	4	19
Mercedes B Class B250e [®]	9,6	28	3,5	20
Mitsubishi i-MiEV [®]	3,3	16	5	11
Nissan Leaf 2018 [®]	6,6	40	6	29
Tesla Model S [®]	17,2	100	13	71
VW e-Golf 2017 [®]	7,2	35,8	5	26

FONTE: Adaptado de EPA (2019)

TABELA 5 – Médias de carga, capacidades nominais e tempo médio até a carga completa - Veículos PHEV

Veículo tipo PHEV	Média de carga (kW)	Capacidade da bateria (kWh)	Tempo até a carga completa (em horas)	
			Nível de carga 1 (120V e 12A máx.)	Nível de carga 2 (240V e 32A máx.)
BMW i8 [®]	3,6	7,1	8	3
Chevrolet Volt 2019 Premier [®]	7,2	18,4	21	4
Ford C Max Energi [®]	3,3	7,6	9	3
Honda Accord [®]	6,6	6,7	8	2
Hyundai Sonata [®]	3,3	9,8	11	5
Kia Optima [®]	3,3	9,8	11	5
Mercedes GLE 550e [®]	3,3	8,8	10	4
Mitsubishi Outlander [®]	3,3	12	14	6
Range Rover P400e [®]	7	13,1	15	3
Subaru Crosstrek PHEV [®]	3,3	8,8	10	4
Porsche 918 Spyder [®]	3,6	6,8	8	3
Toyota Prius Prime EV [®]	3,3	8,8	10	4
Volvo XC90 T8 [®]	6,5	6,5	5	5

FONTE: Adaptado de EPA (2019)

3.4 Considerações Finais sobre o Capítulo

A visão trazida aqui se concentrou nos aspectos mínimos e fundamentais do sistema de geração de energia em uma microrrede, os sistemas de armazenamento de energia mais convencionais atualmente; já no tópico estações de carregamento para veículos elétricos, apresenta-se os modos e potências, principalmente, o modo mais convencional de carregamento residencial que é o carregamento em corrente alternada (modo 2), segundo o estudo trazido por Zuidema (2020) e IEA (2020), anteriormente apresentados no capítulo 2, página 27.

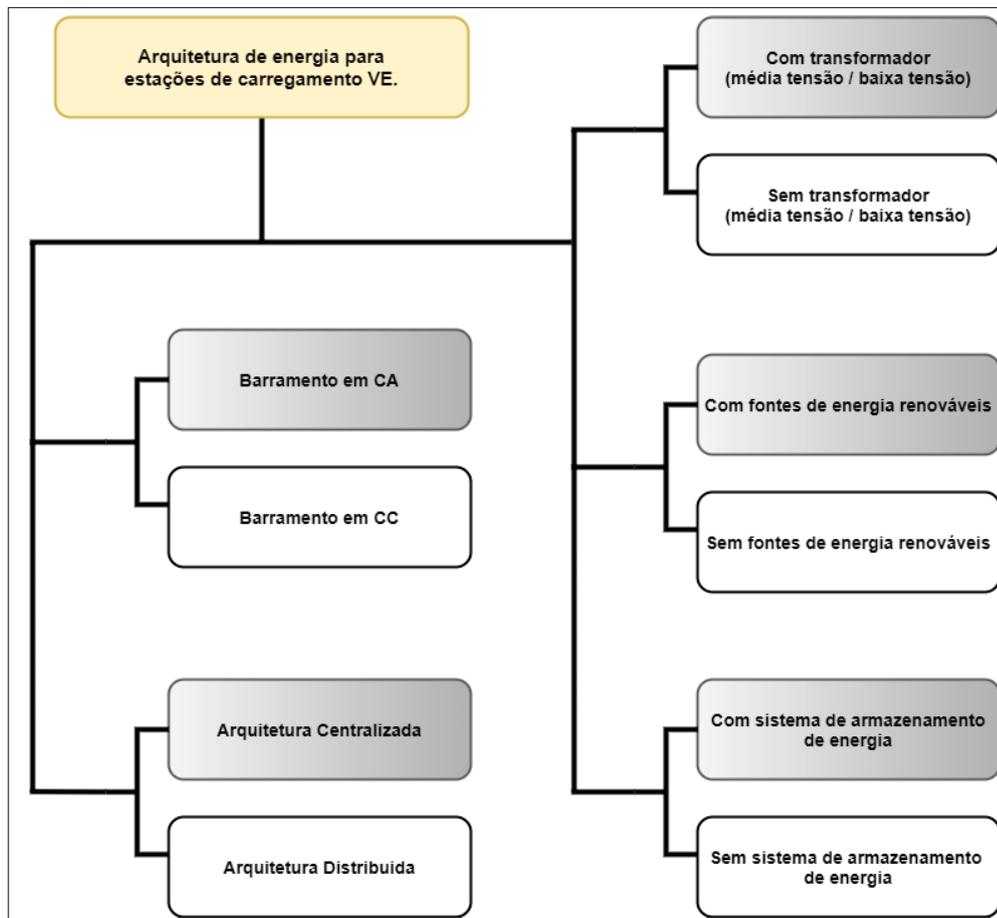
Como o padrão a ser mais utilizado pelos proprietários de VE no processo de recargas maioritariamente tende a ser em CA, a visão dessas arquiteturas se torna relevante, para apresentar os aspectos técnicos mínimos e suas relações entre os seus submódulos. Dessa forma, facilitar o entendimento das classificações e arquiteturas das estações de carregamento.

A visão relativa aos VEs trazida aqui, apresenta os tipos e arquiteturas mais comuns na indústria automotiva, suas características, além das capacidades de baterias (em kWh) que diferenciam esses VEs entre si. Nos Anexos deste trabalho se pode obter mais informações sobre as estações de recarga e demais características dos veículos elétricos

Esse levantamento ajudou o norteamento da escolha do VE a ser aplicado nos levantamentos de dados dessa dissertação. Também trouxe o entendimento sobre diversos aspectos construtivos das estações de carregamento em CA. Dessa maneira, ajudou na delimitação do cenário de implantação final tanto no modo de carregamento mais utilizado quanto no tipo de veículo elétrico mais comum.

Por fim, a Figura 13 apresenta um resumo sobre as características de classificação das arquiteturas das estações de carregamento usuais e em destaque na cor cinza, apresenta-se a estratégia adotada nesse trabalho.

FIGURA 13 – Classificação da arquitetura da estação de carregamento



FONTE: O Autor

4 MATERIAIS E MÉTODO

4.1 Materiais

São descritos nesta seção os materiais, instrumentos e equipamentos utilizados na construção de um carport (em inglês) ou eletroposto residencial que aproveita radiação solar por módulos solares e baterias em banco compondo o RED como pilares do método. Para a aquisição destes equipamentos tanto foram utilizadas parcerias particulares quanto recursos próprios. Além destes, inclui-se as ferramentas computacionais Latex[®] (escrita e elaboração desta dissertação) e Excel[®] para apresentação de Tabelas e gráficos obtidos pós-processamento dos dados. Como a geração solar varia espacial e temporalmente, as informações de incidência solar foram extraídas das bases CRESESB (2020) para calcular o potencial fotovoltaico disponível na localidade. As informações foram utilizadas apenas para referência (em projeto) entre os meses e estações do ano. Cabe ainda a citação de outros softwares GIS como Google Earth[®] (ferramenta de geoprocessamento) para definição da melhor posição de instalação dos painéis solares em relação a irradiação solar diária local.

4.1.1 Principais Equipamentos Elétricos

1. Um arranjo de oito painéis fotovoltaicos com $400W_p$ cada um, totalizando $3200W_p$ ou $3,2kW_p$. Segundo informação trazida pelo fabricante, cada um tem 18,38% (max.) de eficiência (para maiores informações, vide Anexo C).
2. Inversor senoidal Off-Grid de $3000W$, $48V_{CC}$ / $220V_{CA}$, contando com MPPT interno.
3. Um transformador 1:1 isolador de $3,0kVA$.
4. Quatro unidades de bateria do tipo chumbo-carbono para aplicação em sistemas de energia com tensão de $12V$ e capacidade de $236Ah$ em ligação série = $48V - 236A$.
5. Veículo iMiEV - Mitsubishi[®] com motor síncrono de ímã permanente montado no eixo traseiro com potência de $47kW$ e saída de torque de $180Nm$. A bateria tracionária de íons de lítio com $16kWh$ de capacidade colocadas sob o piso base do mesmo.
6. Um carregador para veículo elétrico tipo 2 com as seguintes capacidades e características:
 - a) Monofásico;
 - b) Tensão e corrente iguais a $240V - 40A$ (máx);
 - c) Plugue SAE J1772;
 - d) Certificação EN 61851.

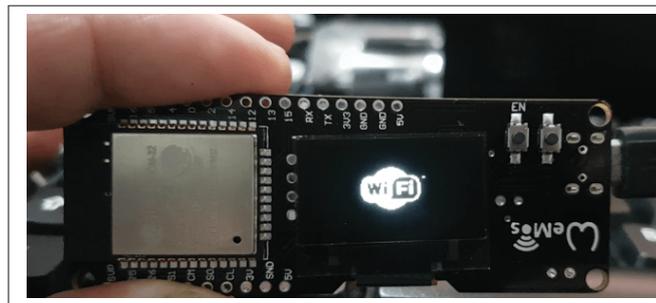
O padrão de entrada do plugue de energia adotado no carregador tipo 2, segundo o padrão IEC62196 (2014) é:

- i. Pino 1 Método padrão $220V$.
- ii. Pino 2 (central) - Aterramento.
- iii. Pino 3 - Neutro de referência.

4.1.2 Principais Equipamentos Eletrônicos

O módulo Arduíno escolhido é um facilitador nas aplicações IoT, pois possui como exemplo, alimentação em nível de tensão em 5V, um botão para realizar o reset, uma memória flash de 4MB além de uma conexão padrão USB para carga de código e obtenção de relatórios. O módulo conta ainda microprocessador dual core a 240MHz equipado com SPI de memória flash de 4MB, com comunicação de rede WI-FI e possibilidade de programação através de linguagem Arduíno. Isso favorece a execução dos controles e também a rotina de gravação sem travamentos. A tela OLED de tamanho reduzido (apenas 0.96 polegadas), conforme Figura 14, facilita a interface homem-máquina (HM). Pode-se visualizar partes do código ou como por exemplo, se houve conexão ou não com a rede WI-FI. Isso otimiza o tempo.

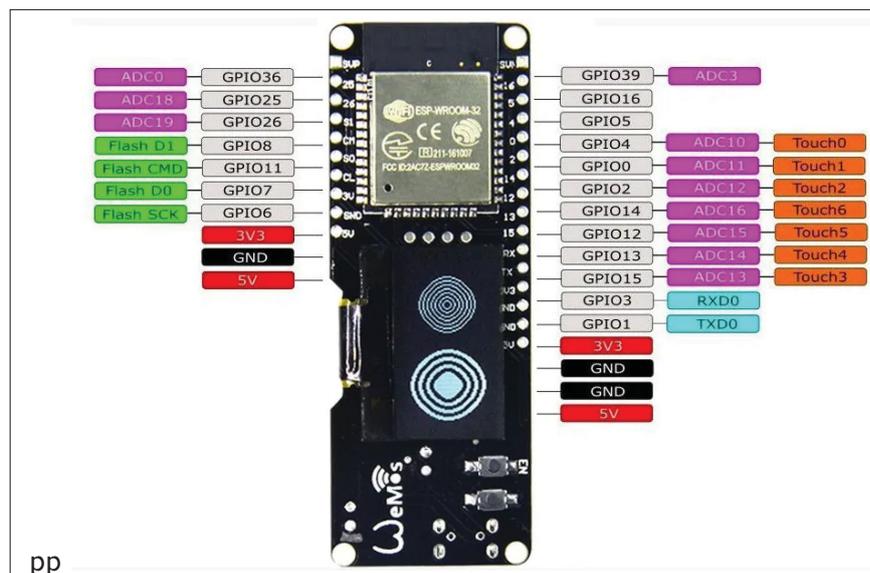
FIGURA 14 – ESP-WROOM-32 com interface OLED



FONTE: O Autor

A seguir a Figura 15 oferece uma visão das conexões de entrada e saídas, ou em inglês, pin-out. Importante: Cada fabricante expõe os pinos que ele quer de acordo com a compactação e funções que ele quer apresentar.

FIGURA 15 – ESP-WROOM-32 pin-out (pinagem)



FONTE: Adaptado de Suhanko (2017)

São estas algumas de suas características:

- 18 canais analógicos-digitais (ADC)
- 3 interfaces SPI
- 3 interfaces UART
- Interfaces I2C
- 16 canais de saída PWM
- 2 Conversores digitais-analógicos (DAC)
- Interfaces I2S 2
- 10 GPIOs de sensoriamento capacitivo
- WiFi: 2,4 GHz, 802.11 b/g/n.

Além destes itens também foram utilizados componentes eletrônicos para a parte de controle de potência e automação. São eles:

- Opto-acopladores CI PC817
- Resistores 1/4W
- Sensor de efeito Hall, bidirecional, 100A (ACS758)
- Capacitores eletrolíticos
- Placas com relés, com acionamento via opto-acoplador/transistor
- Dois SSRs (Solid State Relay) ou relê de estado sólido para reversão de cargas CA, em modo sincronizado, sem interrupção de corrente
- Placa de circuito impresso, cabos e fiações.

4.1.3 Resumo de Aplicativos, Softwares e Hardwares

- Aplicativo IDE Arduíno (programação em C++ adaptado) com extensões e bibliotecas para ESP32 Wemos Lolin[®], Display OLED, WiFi e MQTT.
- Aplicativo MQTT Dash para utilização como aplicação em celular/smartphone.
- Aplicativo Multi VirAnalyzer v3.10.3.6 (osciloscópio) para coleta de informações gráfica e analíticas das reversões.
- Notebook para programação e uso de aplicativo de osciloscópio digital
- Unidade externa osciloscópio Instrustar ISD205A 20MHz
- Multímetro FLUKE 88V
- Alicates amperímetro 3320A Minipa, com capacidade de leitura de corrente CC por efeito Hall, sem o uso de “shunts”
- Diversas ferramentas para montagens como chaves de fenda, chaves hexagonais, etc.

4.1.4 Montagem da Estação de Recarga

Nesta seção detalha-se a montagem dos equipamentos e o papel individual de cada componente escolhido para o dimensionamento. Ao final da seção, constrói-se o gerenciador de controle, que faz a monitoração e operação de reversão ou comutação entre diferentes fontes do sistema de recarregamento.

O trabalho de construção e montagens envolveu adequação do terreno para a instalação com o conceito de um *carport* com vaga para até 2 veículos de pequeno porte com aproximadamente 16m². O projeto apresentado na Figura 16a conta com uma área de manobra para os veículos, uma estrutura de fixação para instalação dos equipamentos elétricos e eletrônicos bem como o BESS, ou em português, bancos de baterias estacionárias e a entrada de energia da distribuidora. A Figura 16b mostra uma foto após a conclusão. O projeto arquitetônico está fora de escala para fins de adaptação a impressão deste.

FIGURA 16 – Projeto arquitetônico para estação de carregamento e a implementação



Os oito painéis fotovoltaicos policristalinos instalados para a composição do SFA da estação, tem 400Wp cada um e foram conectados em configuração 2S-4P, ou conectados dois a dois em série e esse grupo de quatro grupos de painéis conectados em paralelo, totalizando 3200W_p ou 3,2kW_p. Os painéis aqui escolhidos são comumente chamados de "meia-célula" ou half cell (em inglês), pois são mais eficientes em condições de sombreamento parcial.

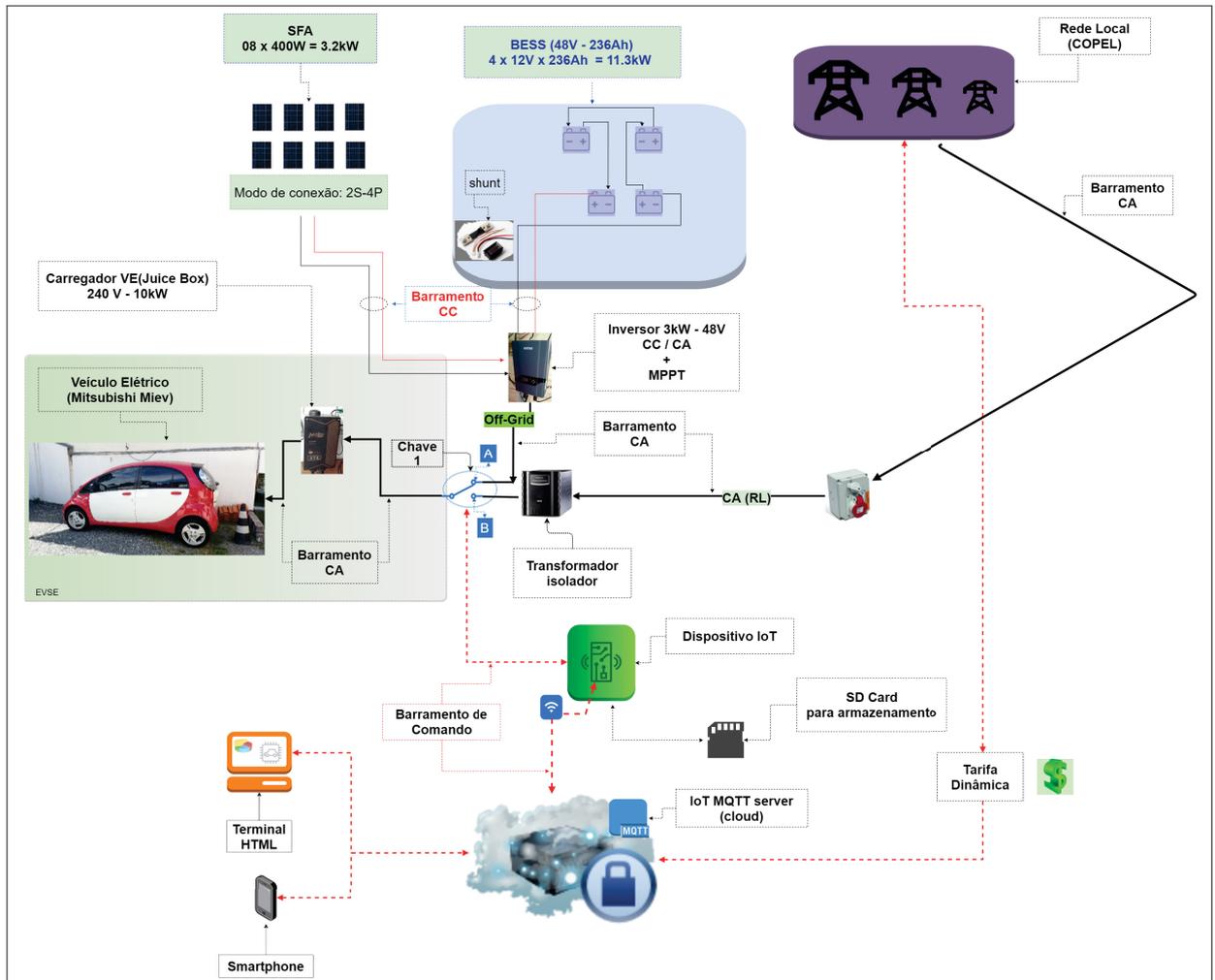
O barramento em corrente contínua servirá ainda como referência na obtenção dos parâmetros que formarão as respostas no momento do processo da recarga veicular, como por exemplo, direcionar o excedente de produção energética gerado pelo SFA. O bloco destacado em azul na Figura 17 é o BESS, terá papel fundamental aqui neste projeto em assegurar estabilidade em termos de fornecimento energético para o processo de carga veicular.

A Figura 17 mostra o esquema de ligação entre os equipamentos envolvidos no projeto, com destaque ao sistema fotovoltaico autônomo (SFA), o BESS e a conexão com o inversor Off-Grid, criando assim o barramento em corrente contínua.

Foram utilizadas quatro unidades de bateria tipo chumbo-carbono (Pb-C) adequadas

a aplicação em sistemas de energia com tensão de 12V e capacidade de 236Ah em ligação série totalizando 48V – 236Ah, ou seja, 11,33kWh em armazenamento local ou BESS.

FIGURA 17 – Diagrama de integração da gestão de energia proposta com a estação de carregamento

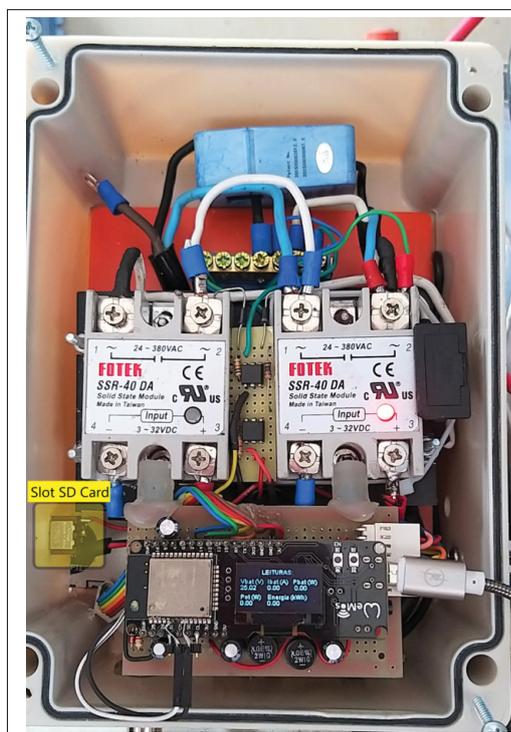


FONTE: O Autor

Observa-se na parte central da Figura 17, a imagem do inversor Off-Grid que terá a função de despachar a partir dos parâmetros estabelecidos pelo sistema de gerenciamento e controle de recarga veicular, o fluxo energético em corrente alternada para o carregador do tipo 2, o qual fará a interface elétrica com o veículo. Ele também fica a cargo de receber a entrada de energia que vem da rede elétrica da companhia distribuidora. Como esse inversor Off-Grid fica exatamente como um nó central da RL do eletroposto, sobre ele ficam as conexões de controle do sistema proposto.

Foi desenvolvido um algoritmo para atuar como o controlador de chaveamento entre as fontes de geração RL e o inversor Off-Grid, monitoramento das leituras do BESS/SFA. Chamado aqui por *GIVEc*, Acrônimo para “Gerenciador Inteligente de Carga em Veículo Elétrico”. Os principais componente são exibidas através da Figura 18.

FIGURA 18 – Interface GIVEc



FONTE: O Autor

Optou-se por manter o processo de carga do VE registrado em um cartão de memória tipo *flash* ou em inglês; SD card, instalado junto a unidade de controle para gravação local (destacado em amarelo na Figura 18). Aqui a sistemática de armazenamento em modo *stand-alone* se dá, principalmente, em razão do melhor custo em relação a uma estrutura com servidor em nuvem. Este último agregaria custos tanto no seu desenvolvimento quanto financeiro. O foco do trabalho fica restrito a coleta dos dados e sua apresentação através dos resultados obtidos, olhando para a eficiência ou não do método. No aspecto financeiro, a contratação de um servidor e programação em SQL, elevariam ainda mais os investimentos.

4.2 Método

Parte da base deste trabalho de dissertação é vista no trabalho (Schreiber (2020)), onde o autor trata como um sistema de gestão energética semi-autônoma (do ponto de vista da rede elétrica) onde a ausência total do fornecimento de energia elétrica por parte da distribuidora de energia não é uma opção, pois a variabilidade na produção de energia a partir de fontes renováveis tornaria o sistema instável sendo inseguro garantir a recarga em 100% das tentativas. Assim sendo, a proposta desse trabalho fundamenta-se na gestão de recarga veicular em uma estação de carregamento, que conta com:

- Fornecimento de energia elétrica pela RL, SFA e baterias conectado numa configuração de microrrede, o qual visa coordenar o carregamento semi-autônomo do VE através de

um carregador externo de VE em CA. Uma infraestrutura baseada em internet das coisas (IoT) desenvolvida para integrar todos esses equipamentos como um controlador central da microrrede.

O trabalho apresentado por Schreiber (2020) oferece mais detalhes técnicos e informações sobre o projeto eletrônico e seu desenvolvimento, por esse motivo, optou-se por deixá-lo como indicação. Busca-se aqui, facilitar a leitura e entendimento desta dissertação, além de evitar a redundância nas informações.

Dentre os aspectos metodológicos que serão abordados, destacam-se: avaliação dos cenários de operação de uma estação de recarga de forma a proporcionar entendimento sobre como o despacho segue ao carregador externo sempre pelo modo ótimo, garantindo assim o processo de recarga. Será apresentado, também um cenário de simulação de recarga em horário de tarifa branca, para comprovação da eficiência do método.

4.2.1 Metodologia de Programação do Equipamento IoT

A plataforma Arduino IoT, foi aqui escolhida, pois sua facilidade de aquisição e de implementação trazem grande peso as aplicações, o que possibilitou o grau de liberdade desejado sem prejuízos a gestão sobre as reversões das chaves e mantendo o modo ótimo de carregamento ao VE. Contando com acesso a camada de rede de dados através do módulo WiFi embutido, oferta de bibliotecas correspondentes e compilador para linguagem C++ (adaptado). A linguagem suportada pelo Arduino IDE é basicamente o "C" com alguns recursos adicionais implementados pelos desenvolvedores Arduino, por isso o nome "adaptado".

Como essa plataforma oferece suporte a essa linguagem, isso tornou ainda mais favorável, pois trata-se de uma linguagem funcional quando se busca aplicações e funções matemáticas. Ela fornece as possibilidades de se enfatizar mudanças de estados na programação, entre outros pontos, como o fato de ser orientada e objetos, além de robusta e de amplo conhecimento. Essa linguagem confere facilidade a programação e pode ser dividida em três partes principais: estruturas, valores (variáveis e constantes) e funções. A programação é enviada através de uma porta serial USB e carregada na memória flash de escrita do microcontrolador. Através desse suporte dado pelo C++ (adaptado), foi possível a criação de uma página HTML (em inglês: Hypertext Markup Language).

A página HTML apresenta ao usuário as informações mais importantes baseadas nas leituras dos sensores do BESS durante o processo de recarga. São elas:

- Tensão média por bateria (V)
- Fluxo de potência por bateria (W)
- Recarga realizada (kWh)

Cabe dizer aqui que, o ambiente Web (HTML) não oferece interação homem-máquina, pois não se buscava esse objetivo no trabalho. Buscou-se a simplificação tanto na redução de

tráfego de internet quanto em envolver custos em termos temporais em desenvolvimento de aplicação em banco de dados (SQL), etc. Caberia portanto, desenvolvimento.

Um servidor em nuvem, sob protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) (Figura 19), utilizado para telemetria foi escolhido aqui para monitoramento e controle via internet. Trata-se de um protocolo de mensagens destinado a sensores e pequenos dispositivos móveis. Na solução aqui apresentada, optou-se por utilizar-se de um *front-end*, termo inglês que define o modo como o usuário final fará sua interface com a aplicação ou sistema.

Segundo EngProcess (2018), na arquitetura MQTT, existem dois tipos de sistemas: clientes e *broker*. O *broker* é o servidor onde se apoia as aplicações e por onde os clientes se comunicam podendo receber esses dados de alguns clientes MQTT e enviar essas informações para outros clientes. Já os clientes não se comunicam diretamente uns com os outros, mas através do *broker*. As medições foram classificadas em tópicos que são enviados ao *broker*.

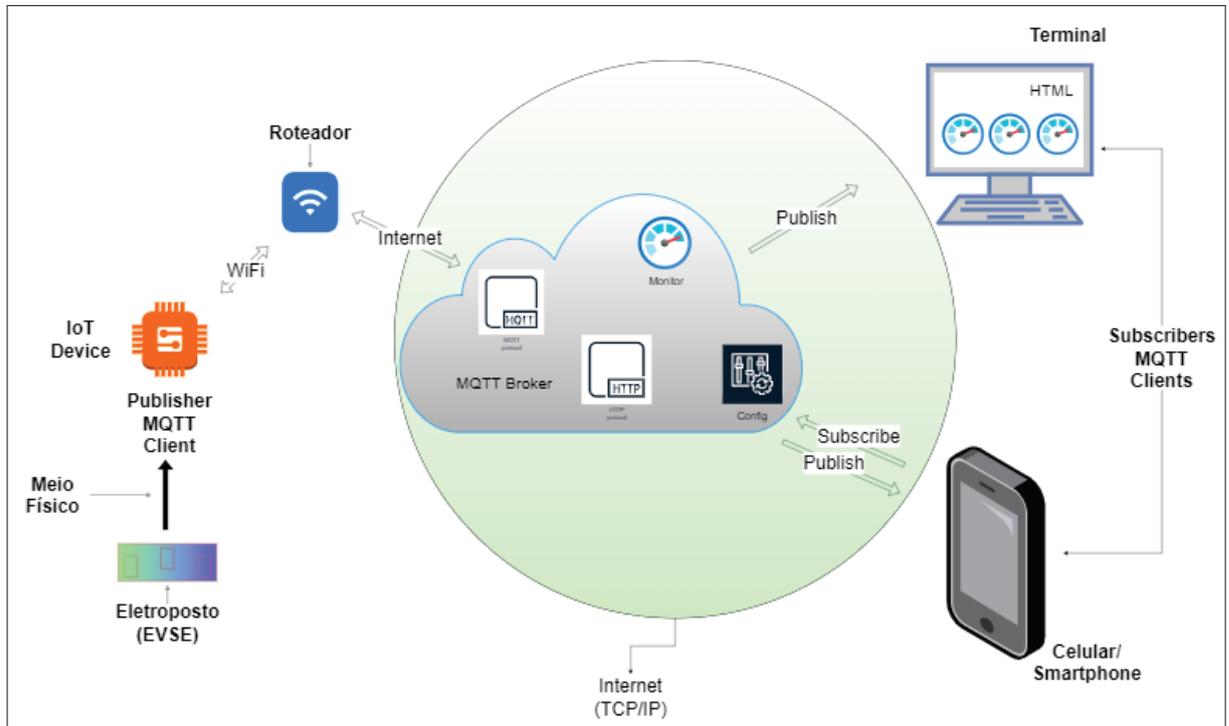
Inicialmente o equipamento IoT envia dados para o *broker* (servidor) MQTT, pois sua principal função é fazer com que essas soluções IoT troquem informações, modalidade de comunicação conhecida como Machine-to-Machine (M2M, ou em português, de máquina para máquina). Essa tecnologia embarcada capaz de coletar e transmitir dados — basicamente permite que elementos de rede sejam acessados como provedores e controlados de maneira remota, pois é executado em cima do protocolo TCP/IP usando uma topologia PUBLISH/SUBSCRIBE (EngProcess (2018)). Essa dinâmica possibilitou a utilização de aplicativo de celular (API) chamado MQTT Dash.

Ele oferece possibilidade de ser customizado e atuar sobre o sistema GIVEc através de comandos *publish*, como por exemplo, as mesmas informações obtidas no ambiente HTML. Tudo em tempo real com o recarregamento e utilizando-se a ferramenta mDNS (multicast DNS), para introduzir interações e possibilitar controle por parte do usuário à solução GIVEc. Por exemplo, reverter ou comutar o modo de despacho através da RL ou BESS/SFA. Como há uma limitação no número de caracteres dos campos disponíveis nesse visualizador, aqui os valores se apresentam arredondados em apenas uma casa decimal.

Esses clientes podem acessar diferentes níveis de tópicos. Alguns apenas leitura e outros de leitura e controle. Aqui esses clientes são as General Purpose Input/Output (GPIO), demonstradas na Figura 15, ou em português, conexões de entrada e saída - para uso de automação geral.

A conexão de rede de dados WiFi, possibilita tanto o acesso ao equipamento quanto possibilita que ele envie dados ao *broker*. Trafegando pela internet, as informações são percebidas pelo *broker* MQTT, que possibilita apresentação dos dados em tempo real no ambiente HTML, citado anteriormente. Na Figura 19 observa-se a estrutura básica de rede internet sob protocolo TCP/IP.

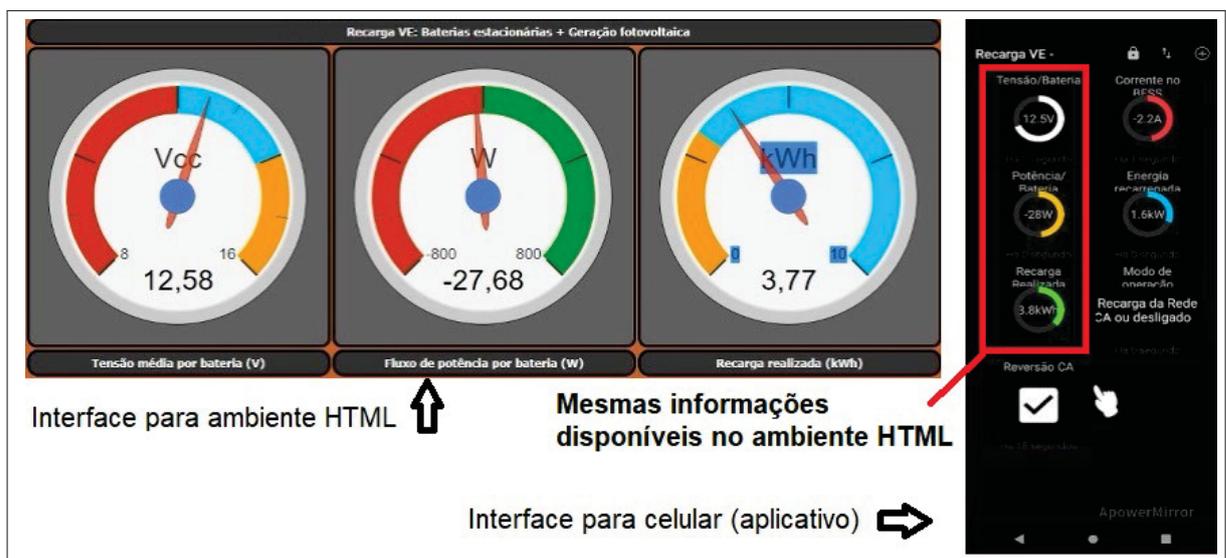
FIGURA 19 – Topologia de comunicação de rede do sistema de gerenciamento GIVEc



FONTE: O Autor

A Figura 20 apresenta a tela do aplicativo (à direita) e também da interface HTML (figura à esquerda) citada para melhor entendimento. Ambas interfaces foram adaptados e customizados para uso nesse trabalho de dissertação a partir do trabalho apresentado por Schreiber (2020).

FIGURA 20 – Interfaces de usuário final GIVEc



FONTE: O Autor

O hardware IoT escolhido oferece a possibilidade de processamento assíncrono, pois conta com dois núcleos no processador independentes. As rotinas paralelas podem ser executadas em cada núcleo, trocando as suas variáveis e resultados. Isso possibilitou monitorar a RL enquanto se gerencia o estado de carga do BESS, etc. O sistema tem alimentação em CC desse IoT depende diretamente das baterias do BESS e contando com suporte essencial de energia.

Para acesso local apenas, o equipamento oferece a opção de um kit (usado aqui), com uma tela sensível ao toque (display touch screen) de 0,96 polegadas que permite a visualização durante processo de inicialização do sistema (setup) e observação instantânea dos valores apresentados. São as mesmas informações do API de dispositivo móvel. A ideia é a tomada de ações pontuais e rápidas, uma vez que tanto usuário quanto VE estão no mesmo local:

- Vbat (V) - Valor de tensão média por bateria do banco de baterias (BESS).
- Ibat (A) - Valor de corrente total do banco de baterias (BESS). Como estão conectadas em série, é a mesma pra todas as baterias. Valores positivos significam que estão sendo carregadas, negativos descarregadas.
- Pbat (W) - Produto dos valores de Vbat e Ibat, ou seja, potência média em cada bateria. Valores positivos significam potência recebida (carga) e negativos potência fornecida (descarga).
- Pot(W) - Potencia utilizada no processo de recarga do VE.
- EN(kWh) - Quantidade energia utilizado no processo de recarga do VE.

O controle IoT obtém dados do sensor de corrente por efeito “Hall” aplicada sobre o BESS obtendo, assim as leituras instantâneas da grandeza em tempo real. Isto possibilita a leitura em num dado instante; se o BESS combinado com SFA está sustentando o processo de recarga veicular ou se esta recarga está sendo feita através da energia fornecida pela RL. O funcionamento do sensor de corrente é relativamente simples. Quando determinado valor de corrente de carga é percebido em seu terminal, este gera um campo magnético, o qual é identificado por meio do sensor “Hall”, resultando em uma tensão de saída que pode ser interpretada pelo microcontrolador IoT. Aqui se utilizou o sensor bidirecional ACS758 com capacidade de medida igual ou inferior a 100A.

Foram nomeados três modos para a recarga veicular para efeito dos testes e coletas de dados. São eles e suas características:

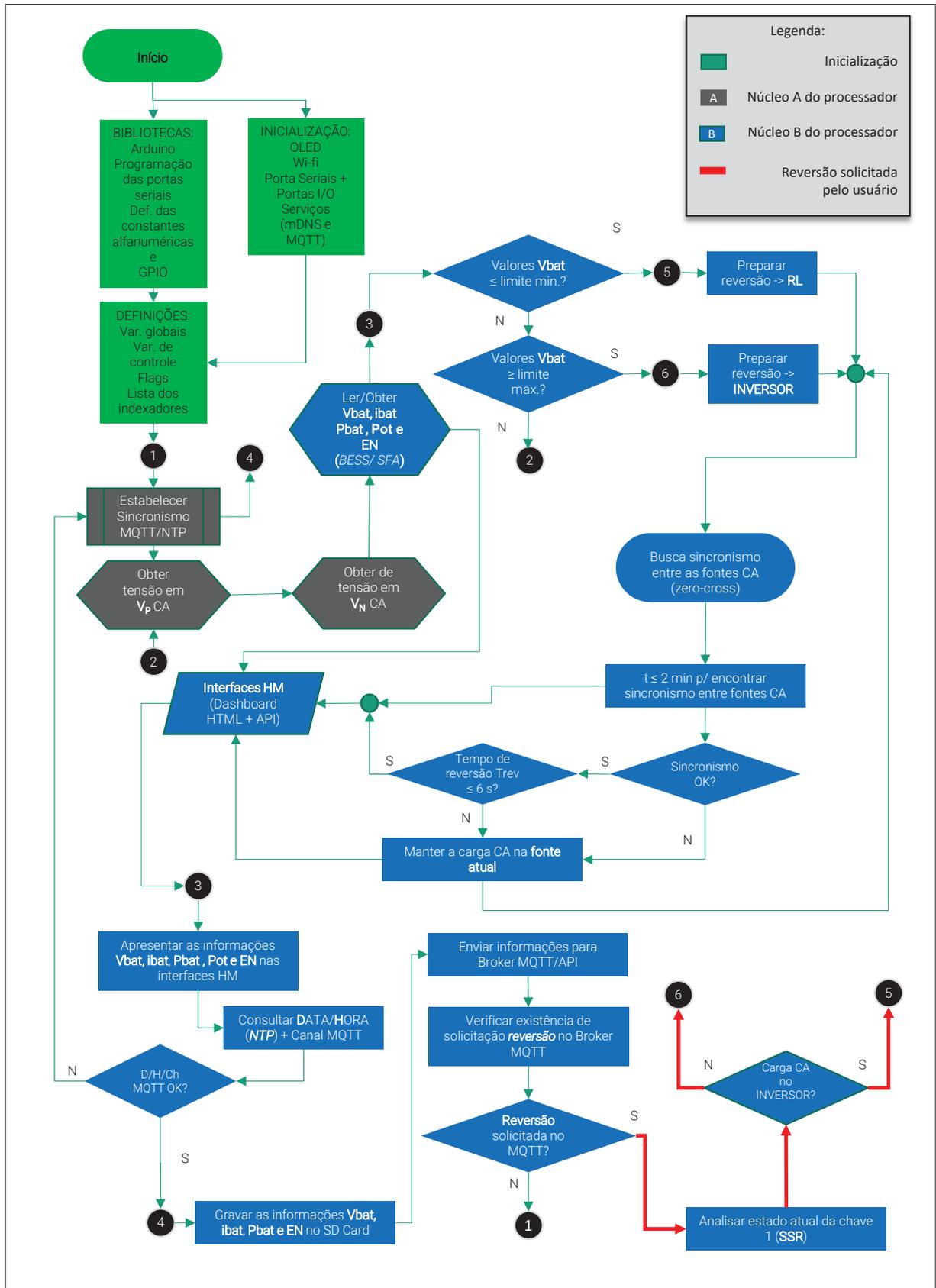
1. Modo 1 - recarga veicular sem tomar energia da RL. Puramente através do BESS/SFA. O SOC está acima de 75% e as condições de geração através do SFA são favoráveis em função das condições climáticas no dia e no local.
2. Modo 2 - modo híbrido, onde parte da energia fornecida ao carregamento veicular se origina no BESS, mas se os valores de SOC do BESS apresentarem valor abaixo de 75%, então o processo de carga é comutado de forma síncrona entre a RL e produção BESS/SFA, através do inversor Off-Grid. Nesse modo não há ocorrências de interrupções no processo de recarga, sendo o modo “default” de operação, pois todas comutações são

feitas dinamicamente e sem intervenção do usuário. Aqui o grau de liberdade é, dado em programação pelo algoritmo levando-se em conta o tipo de bateria que compõe o BESS que este vai gerenciar. Por exemplo, baterias de lítio podem suportar descargas mais profundas e isto foi previamente programado no algoritmo. Assim, as comutações entre RL e BESS/SFA são menos frequentes e o usuário pode decidir qual tecnologia de bateria vai empregar no BESS.

3. Modo 3 - a recarga veicular é estabelecida unicamente através da RL sendo possível a sua comutação pelo API, apenas e tão somente, se o limite mínimo do SOC do BESS for atendido. Caso contrário, o fornecimento de energia seguirá pela RL até o término do processo.

A Figura 21, apresenta o fluxograma resumido de programação do sistema GIVEc.

FIGURA 21 – Fluxograma da programação de controle



FONTE: O Autor

4.2.2 Estrutura e Fluxo de Operação a partir do Equipamento IoT

Baseando-se nos três modos anteriormente citados em 4.2.1, página 57, foram definidos três cenários em que um usuário padrão pode se encontrar no dia-a-dia de recargas utilizando-se esse sistema. Os cenários são:

1. Cenário 1 - mais eficiente energeticamente, pois o processo de recarga utiliza apenas energia acumulada no BESS e/ou gerado pelo SFA. Nesse modo, o usuário fica sujeito a um tempo maior de parada, sendo assim recomendado para intervalos maiores de parada do VE ou pouca quantidade de energia demandada pelo veículo. Um investimento maior em um BESS utilizando-se de outra estratégia, por exemplo, baterias de lítio, pode ajudar a mitigar esse cenário.
2. Cenário 2 - nesse modo o usuário pode dispor da recarga através da energia acumulada no BESS e possivelmente terminar a recarga através da RL. Aqui o usuário tem uma expectativa específica de tempo de partida e também uma necessidade mínima de recarga em função dos limites mínimos - apresentados pela leitura do SOC da bateria interna do veículo - terem sido atingidos.
3. Cenário 3 - Aqui o usuário tem seu momento de partida próximo e não há energia acumulada no BESS em condições de fornecer nenhuma economia a ele. Provavelmente um dia de baixa ou nenhuma geração fotovoltaica. Similar a um processo de recarga convencional feito em uma estação sem REDs ou alguma inteligência de controle do processo de recarga, sendo assim, esse é o modo menos eficiente em termos gerais.

Os valores mínimos e máximos de tensão e corrente de cada bateria BESS servem para satisfazer a seguinte condição de SOC do BESS. Como primeira condição que deve ser atendida, o valor de tensão deve ficar em flutuação entre o máximo estabelecido de 13,8V (média por bateria) e 12V. A segunda condição, analisa-se o valor da corrente neste BESS. Se a corrente de flutuação for maior que 10A, significa dizer que a recarga do BESS ainda está distante do valor de corrente de flutuação. Entretanto, quando o valor é menor que de 10A, equivale a dizer que o processo de reversão da recarga do VE pode ser direcionado ao BESS. O atendimento destes dois parâmetros nas quatro unidades de baterias que compõe o BESS, favorece sua integridade, preservando sua vida útil, pois evita-se ciclos profundos de descarga. Os valores limites de tensão e corrente de carregamento das baterias são determinados pelo manual dos fabricantes.

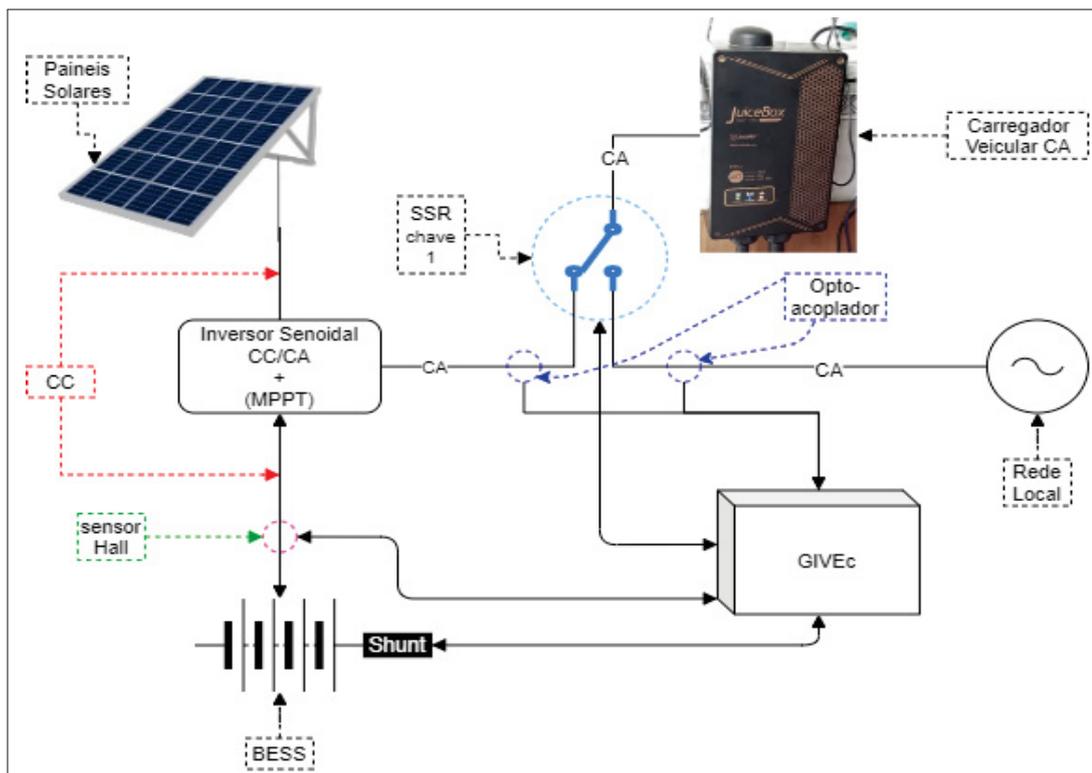
Esses valores são adotados aqui como parâmetros e foram sugeridos tanto no livro Buchmann (2016) como valores seguros em operação para maioria dos testes e casos, quanto os parâmetros apresentados por Moura (2021), fabricante das baterias.

A aplicação busca sempre preservar o SOC do BESS, em primeiro lugar, iniciando um processo de recarga sempre em modo 1 de recarga. Caso o BESS esteja com suas baterias insuficientemente carregadas, comuta-se para o modo 3, onde a RL suporta por completo o

carregamento do VE e também contribui indiretamente com a recarga do BESS, pois quando a recarga segue nesse modo, a chave permanece fechada entre carregador do VE e RL, o que favorece a recarga do BESS através do SFA sem interrupções. Esse, então, é a maneira padrão de uso ou modo 2.

O equipamento GIVEc atua no que se conhece na literatura como PAC, ou seja, ponto de acoplamento comum (PAC) - (IEEE Standard Association 1547 (2018)). Esta chave mostrada na Figura 22 e leva o nome de chave 1. Previamente ao momento de reversão por meio dessa chave, utilizando-se de sensores opto-acopladores também chamados de zero-crossing peak detection (ZCPD); inicia-se a detecção do sincronismo de fase entre a senoide da RL e a senoide produzida pelo inversor Off-Grid, mesmo que este não gere uma senoide perfeita. O sistema GIVEc aguarda até o próximo instante onde o sincronismo ocorre e, assim inicia-se o acionamento da reversão no ponto de passagem por zero da fase de ambas as fontes. As cores aplicadas as linhas tracejadas apontam o posicionamento dos elementos no diagrama. As linhas contínuas indicam linhas físicas ou as conexões entre o IoT e os elementos.

FIGURA 22 – Diagrama de blocos da ligação entre inversor Off-Grid, RL e chave SSR



FONTE: O Autor

Este monitoramento, por programação, pode levar até dois minutos no processo de busca do ZC, não sendo imediata a comutação ou reversão para um dos três modos já comentados. A programação leva em conta também o pequeno, mas não desprezível, “delay” existente no acionamento dos SSRs, que é de aproximadamente 2 milissegundos para que haja a reversão com segurança e sem interrupção no processo de recarga.

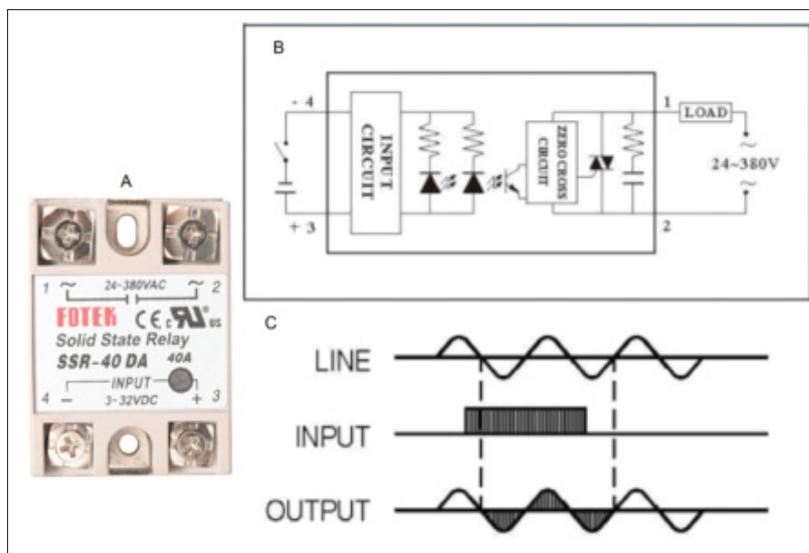
Esta passagem por zero, na literatura leva o nome de *zero cross* (em inglês). De acordo com o trabalho realizado por Amanci e Dawson (2010), sistema de sincronização é baseado em cruzamento na passagem pelo zero, em inglês, zero-cross (ZC) e algoritmo de detecção de pico. Entre suas vantagens, o sistema ZCPD, abordado no trabalho, performa bem na presença de distorções do sinal de entrada com *THD* (total harmonic distortion) baixos e também para valores próximos de 50% de distorção. Segundo os autores comprovam através do uso dessa sistemática em um sistema elétrico de potência, o ZCPD é capaz de facilitar a recuperação e resincronização em distúrbios transitórios, como quedas e elevações de amplitude, por exemplo da ordem de 0,2pu a 1,8pu, diferenças entre fase positiva e negativa da senoide de aproximadamente 60° e interrupções de sinal que vão desde alguns ciclos até vários segundos.

Para obtenção de parâmetros elétricos a partir das conexões entre RL e inversor Off-Grid, e assim acionar estes relés de estado sólido, a unidade de controle IoT, está conectada aos opto-acopladores CI PC817 que trabalham de forma análoga a chaves transistorizadas, ou seja, percebendo a circulação de corrente alternada em sua entrada, internamente, o seu diodo emissor de luz (LED) se acende e permite que circule corrente pulsante quadrada no circuito localizado no lado de saída que está ligado ao IoT. Essa unidade de controle recebe os pulsos digitais e dessa forma o processo de conversão de informação analógica em sinais amostrais digitais se completa. Os opto-acopladores permitem que um circuito controle outro, de forma similar a um transistor ou um relé. Diferentemente do transistor e do relé, o opto-acoplador evita completamente o contato elétrico entre o circuito controlador (master) e o circuito controlado (slave), já que os comandos entre eles são passados por energia luminosa, dentro do CI.

Os dados obtidos pelos sensores opto-acopladores PC817 foram calibrados previamente a partir de referências obtidas pelo alicate amperímetro 3320A Minipa, multímetro FLUKE 88V e osciloscópio Instrustar ISD205A 20MHz. Os dados foram coletados de forma paralela e inseridos nas tabelas de referência para uso através do algoritmo.

A chave 1 apresentada na Figura 22, possibilita os modos anteriormente citados, utilizando-se a solução dos relés de estado sólido, ou a sigla em inglês, SSR. O modelo adotado nesse projeto é o Fotek SSR-40DA (apresentado previamente na Figura 18) e tem seus detalhes, como o circuito interno apresentado na Figura 23. Esse modelo foi aplicado porque tem capacidade de chaveamento de até $40A_{CA}$ e após a próxima passagem por zero da tensão de rede. No momento de desligamento acontece o mesmo. O sinal de comando é retirado, porém o SSR somente bloqueia (desliga) na próxima passagem por zero em CA. Os relés de estado sólido são dispositivos comumente utilizados no acionamento de cargas que trabalham em corrente alternada, pois tem maior velocidade de chaveamento, maior vida útil, fácil acionamento, não produzem faiscamentos, além de facilitar o acionamento diretamente por um microcontrolador, como o utilizado nesse trabalho.

FIGURA 23 – SSR Fotek



FONTE: www.e-radionica.com

Destaca-se a imagem (A), onde se observa a construção do SSR, a imagem (B), seu diagrama elétrico interno e (C) o processo de resposta em comando. Em (B), nota-se os quatro terminais rotulados com 1, 2, 3 e 4. Aos dois primeiros (1 e 2) conectados a carga de maior potência que se deseja controlar, e aos outros dois terminais (3 e 4), conecta-se o microcontrolador (entrada). O sinal de entrada (entrada) do relé deve ser de 3 a 32 V (CC), o que significa que o relé ligará se a tensão entre o positivo e o negativo estiver dentro desse intervalo. Além disso, há um LED vermelho no relé que exibe visualmente o status do relé (acende-se quando está ligado). O componente básico deste relé é o chamado TRIAC.

A partir deste esquema (B), vemos que o lado de controle é opticamente isolado do lado de saída, de modo que a operação de controle através do relé com um microcontrolador é segura. Quando percebido um sinal de excitação no lado de controle, um LED dentro do isolador óptico acenderá e acionará o lado de controle do TRIAC. No lado de controle do TRIAC, há também um circuito que detecta o ponto zero da tensão CA (C), o que significa que ao se ligar o relé em algum momento, o interruptor primeiro terá que esperar que a tensão de entrada caia para 0V e, em seguida, ligar o relé. Isso reduz muito o aparecimento de interferência eletromagnética, pois ao ligar o relé em algum momento do período em que a tensão está mais próxima do valor máximo, ocorrerá um súbito pico de tensão, o que significa altas frequências. Como último detalhe relevante; observa-se que o SSR têm um filtro *snubber*¹ incorporado, o que favorece o não aparecimento de interferências e picos de corrente sobre a carga.

A decisão de projeto em possibilitar a operação das reversões de chave no PAC, segundo sistemática aqui adotada, baseia-se na premissa de que o sistema deve ser operativo

¹Trata-se de um circuito RC que controla taxas de variação de corrente ou tensão, atenua sobretensões e oscilações, dissipando potência sobre os elementos chaveadores.

em qualquer tipo ou modelo de micro geração em CA, desde a simples geração através de painéis solares (como os aqui utilizados) até a introdução de pequenas turbinas eólicas para uso residencial, por exemplo, pois, sempre haverá a seção em CC e que obrigatoriamente trará a Figura do inversor CC/CA senoidal. As demonstrações sobre os processos de comutação serão apresentadas no item 5.2.

A partir de simulações e testes com uso de osciloscópio Instrustar ISD205A 20mHz, observou-se o registro e momento entre as comutações através da chave anteriormente citada. Na sequência das capturas de telas realizadas com o auxílio do aplicativo para computador, pôde-se observar as transições tanto no sentido RL (senoide pura) - inversor (senoide quadrada e senoide pura) quanto vice versa. De maneira proposital foi aplicado aqui o inversor com senoide quadrada, apenas para fins explicativos do processo de comutação entre geradores diferentes.

5 APLICAÇÃO DO MÉTODO

5.1 Caso de Aplicação do Método

Foi utilizada uma residência na cidade de Curitiba-PR para a instalação e as coletas. O perfil do consumidor de energia elétrica tem as seguintes características:

- Residência com perfil de consumidor “B1” e entrada de energia trifásica.
- Itens e componentes constantes na descrição, conforme seção 4.1.1
- Veículo elétrico iMiEV - Mitsubishi® (VE)

Esse VE tem características de uso normais, ou seja, o proprietário utiliza o veículo de maneira convencional como ir e retornar do trabalho, etc. O veículo possui duas interfaces elétricas ou dois tipos de plugue para recarga. Possui o padrão utilizado aqui em CA - conector SAE J1772 (SAE (2017) localizado na lateral direita traseira do veículo e na lateral esquerda traseira ele também conta com um plugue tipo CHAdeMO (CHAdeMO (2018)); o que permite também recargas em CC, não abordada aqui neste trabalho de dissertação.

A rede elétrica do local não é dedicada para este eletroposto. São duas fases (220V) obtidas dentre a alimentação trifásica do imóvel (estúdio/escola) que vão para um transformador 1:1, isolador, cuja saída permite obter 220V entre fase e neutro, compatibilizando assim com a saída CA do inversor (também 220V entre fase e neutro). Isso possibilitou ao GIVEc fazer as reversões sincronizadas entre as fontes para a recarga veicular.

Cabe aqui o comentário sobre a necessidade apresentada durante a pesquisa de interconectar a rede elétrica da distribuidora de energia com o inversor Off-Grid através de um transformador isolador. Isto é necessário porque uma referência de terra ou aterramento comum é requisitada pelo veículo no momento inicial do processo de carregamento. O veículo inicia um teste, segundo o padrão IEC62196 (2014) em que ele verifica o referencial comum da rede e utiliza-se de dados programados pelo fabricante para efeito de comparação e somente inicia o carregamento após este referencial ser atendido. Sem este referencial comum, é praticamente impossível a manutenção por mais do que alguns segundos, do processo de recarga, pois a ECU (*Electronic Control Unit*), ou em português, Unidade de Controle Eletrônico do veículo, ao perceber a conexão entre o mesmo e o carregador externo, verifica estas informações em um banco de dados de sua programação e libera ou nega o andamento do processo de carga. Assim, o transformador isolador tem função de equalizar o ponto de aterramento comum entre as duas redes. Por exemplo, no caso do veículo iMiEV®, de acordo com as informações do fabricante, se esse valor de referência ficar bem abaixo de 30 Ohm, a ECU desativa o processo de carga.

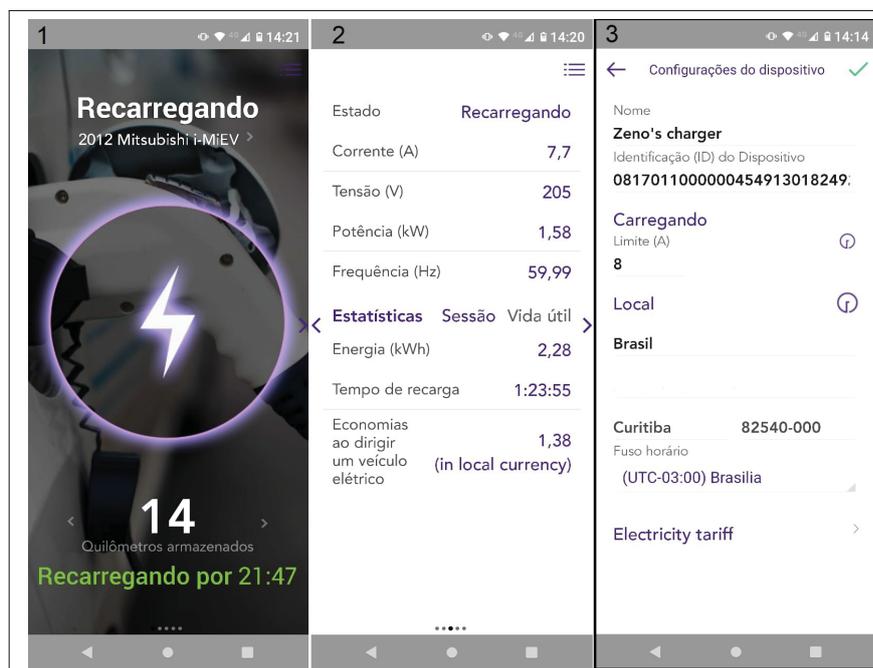
Os valores de recarga foram sempre entre 15% e 30% (aproximadamente) do valor de capacidade total da bateria do veículo iMiEV - Mitsubishi[®], que é de 16kWh. Estes percentuais ficam dentro do intervalo apresentado no trabalho de Han *et al.* (2019) como o SOC mais adequado para baterias LiFePO₄ (utilizadas como as células da bateria do veículo). Segundo os autores, o processo de carga deve ser estabelecido entre 30% - 80% e assim evitar tanto o cenário de descargas profundas quanto a sobrecarga.

Como o conjunto de baterias conectadas em série (BESS) tem como produto entre 48V de tensão das baterias e 236Ah de corrente, e assim oferecer 11,3kW como limite máximo de energia a ser destinada ao processo de carga. Segundo o fabricante das baterias Moura (2021), o valor máximo deste total que deve ser considerado como útil está em 25% deste total, ou seja, somente 2,83kW como potência disponível, em função das características físico-químicas deste tipo de armazenamento.

A Figura 24, mostra apenas para fins de conhecimento, a tela inicial do aplicativo proprietário do carregador (1) e a tela de acompanhamento em tempo real de um processo de recarga (2) citado aqui para melhor entendimento. A tela contornada em preto e de nome (3) apresenta o campo LIMITE (A), onde se limita o valor de corrente no carregador CA. Cabe dizer que a plataforma do aplicativo permite ajustar valores entre 6 e 40A. Optou-se por ajustar e limitar o valor de corrente de trabalho em 8A, por critérios de segurança. Esse valor pode oscilar dinamicamente durante o processo de recarga, em função da coordenação demandada pelo VE, baseado na IEC (2017).

Dessa forma, o valor de energia a ser utilizada no processo de recarga, ficou limitada a 1,7kWh, sendo o resultado do produto tensão por corrente, em CA. Os valores de tensão medidos também podem variar ao longo do processo de recarga, de acordo com o módulo 8 do PRODIST. Esse módulo estabelece valores bem definidos para todos os parâmetros relativos ao fornecimento ou consumo da energia elétrica dentro do regime permanente.

FIGURA 24 – Sequência de telas do aplicativo JuiceNET[®]-fabricante do carregador Juicebox mod. Pro 40



FONTE: Adaptado de ENEL (2020)

O inversor Off-Grid foi programado seguindo os parâmetros abaixo:

- PV IN: Tensão CC fornecida pelos painéis fotovoltaicos conectados na entrada do Controlador MPPT embutido;
- AC IN: Não foi conectada nenhuma fonte CA na entrada do inversor, pois quem gerencia a chave é o sistema GIVEc. Logo o inversor está totalmente Off-Grid;
- OUT: Tensão CA na saída do Inversor. Aqui utilizado 230V (valor default);
- BATT: Tensão CC máxima e mínima do banco de baterias. Aqui foram programados os valores de 55.6V para máximo e 48V como mínimo;
- BATT Type: Tensão CC corte do banco de baterias. Aqui programado em 11,99V por ser utilizadas baterias chumbo-carbono;
- Maximum utility charging current: Valor máximo de corrente CC a ser utilizado. Adotado valor default = 15A;
- FREQ: Frequência de operação padrão de 60 Hz;
- LOAD Power Source: O sistema de painéis fotovoltaicos fornece energia para as cargas como primeira prioridade.

A Figura 25 mostra o visor do inversor e como se acessam as informações acima.

FIGURA 25 – Vista painel do inversor Off-Grid



FONTE: O Autor

Para estabelecimento dos parâmetros de coleta de dados no algoritmo, as informações a seguir foram coletadas e ajustadas:

- A medição dos painéis fotovoltaicos - SFA - (em kWh) obtido através do próprio inversor Off-Grid.
- Informação CC/CA - medição de consumo de energia por ciclo de recarga completa do BESS.
- Fluxo de potência nas baterias - Medição direta de corrente e tensão nas unidades de baterias que compõe o BESS. Foram adotados valores positivos como sendo situação de carregamento destas unidades e valores negativos, para descarga. A Figura 26 mostra o medidor de corrente. Para o valor de tensão, considerou-se o valor medido pelo inversor Off-Grid através do item BATT apresentado no seu display.
- Potência consumida (autonomia) - O valor é apresentado através do item "Load" diretamente no inversor Off-Grid, em percentual.

FIGURA 26 – Medição de corrente nas baterias



FONTE: O Autor

Foi estabelecido cronograma de recarga veicular buscando apresentar aqui um período de pelo menos 5 dias úteis de recargas onde cada um dos três modos de carregamento

apresentados anteriormente pudessem ser observados em seus detalhes. Para a apresentação utiliza-se uma planilha Excel[®] onde se trata as informações das coletas diárias e também a apresentação dos gráficos resultantes dessas coletas.

Cabe aqui alguns comentários pertinentes em função do momento em que esse trabalho foi desenvolvido:

- O cronograma para coleta dos dados foi definido inicialmente como o período entre 29/03/21 e 16/04/21; os horários foram fixados em três períodos do dia. P1 (08:00-10:00), P2 (13:00-15:00) e P3 (17:00-19:00).
- Porém, em função das restrições a circulação em função da Pandemia COVID-19 (período de quarentena), algumas mudanças importantes na maneira da coleta dos dados foram necessárias. Foi preciso alterar algumas datas e também horários diferentes. A circulação com o VE, por essa razão, foi bastante dificultada no cumprimento dessa primeira agenda acima.
- Adotou-se, então um plano contingencial deixando os horários de recarga mais flexíveis para viabilizar a coleta dos dados. A circulação do veículo em momentos mais favoráveis ao uso do proprietário, por exemplo.
- Para as aplicações do método trazidas aqui, buscou-se dias com condições climáticas diferentes entre si, para evidenciar as características de atuação do sistema de gestão apresentado.

A informação da coluna/gráfico chamado *Tensão/Bateria*, traduz-se como valor de tensão média por bateria do BESS. Como destaque em relação a coluna *Corrente no BESS*, na programação do algoritmo considera-se valores negativos apresentados nas células como sendo corrente de descarga das baterias no sentido do inversor Off-Grid e assim, carregando o VE. O sentido contrário, ou seja, inversor Off-Grid para as baterias, fica entendido como fluxo de corrente de recarga do BESS, oriunda do SFA.

O cálculo das integrais das áreas das curvas apresentadas no gráfico chamado de *Potência de recarregamento*, é adotado aqui como a energia total entregue ao VE naquele dia, independentemente da fonte geradora. Já a coluna/gráfico *Energia recarregada no VE*, apresenta a quantidade de energia instantânea utilizada no processo de recarga do VE.

Foi escolhido apenas um trecho de cada uma das tabelas geradas através das coletas para as apresentações nas seções 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6, pois cada recarga gera um arquivo de coleta (log) de aproximadamente oito mil linhas (média), uma vez que são coletadas informações - através do algoritmo de programação - a cada três milissegundos, sendo inviável sua apresentação em totalidade.

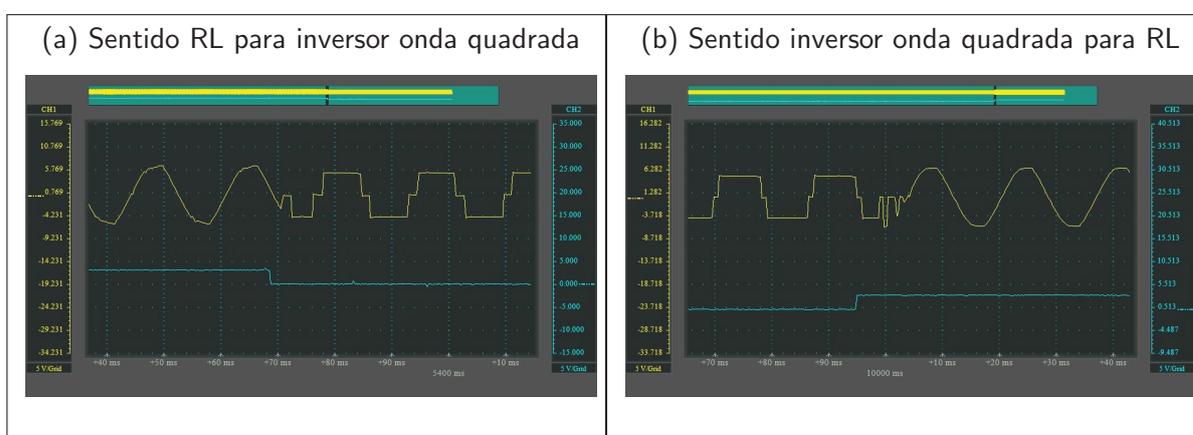
5.2 Transitório entre RL e REDs

Nesta seção serão mostrados alguns exemplos onde se demonstra o chaveamento entre as duas fontes geradoras distintas exatamente no PAC para demonstração da eficiência do processo de comutação. Aqui foram utilizados dois inversores com respostas de saída distintos apenas para ilustração didática do método de comutação ZCPD. Eles não foram utilizados como parte da aplicação.

No primeiro caso, observa-se como exemplo de um transitório de passagem da RL para um inversor onda quadrada (apenas utilizado nesta demonstração para ressaltar a eficiência do método) - Figura 27a e a seguir seu retorno - Figura 27b, observado através do osciloscópio.

Nesta tela tem-se duas formas de onda. A linha amarela demonstra o comportamento temporal da carga em CA e a linha azul é exatamente a aplicação de um comando ao relé eletromecânico. No primeiro momento buscou-se obter o chaveamento através de relés eletromecânicos convencionais, pois tem uma técnica mais barata em termos financeiros, mas conforme a demonstração apresentada, notou-se um “repique” ou “rebote” natural causado - principalmente pela mola interna desse tipo de relé, sendo esse efeito sua característica própria.

FIGURA 27 – Transitório de chaveamento entre a RL e inversor utilizando-se um relé eletromecânico



FONTE: (a) e (b) O Autor

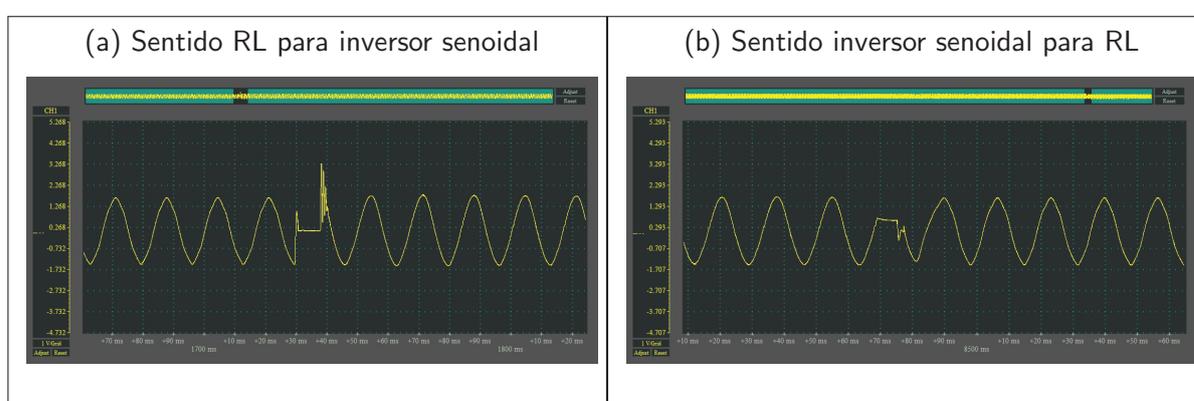
Dessa forma, esse efeito indesejado, pode traduzir-se em um excursionamento e instabilidade entre as fontes geradoras, pois nota-se que mesmo após receber o comando no ponto de zero de tensão, ocorre um atraso no processo interno de conexão do relé. O tempo necessário para o processo de energização da bobina desse relé, toma em si os 2 milissegundos iniciais. Os próximos 2 milissegundos são gastos com a alavanca de contato interna do relé entre os contatos. Aproximadamente 4 milissegundos são gastos entre acionamento efetivo e o início da passagem de corrente entre redes local e inversor onda quadrada. Na Figura 27b, o processo de reversão para RL é observado. Apesar de iniciado o processo de reversão no instante zero, nota-se que o relé mantém por aproximadamente 3 milissegundos o contato ainda

estendido através do inversor. Isso ocorre, porque há um campo magnético ainda existente na bobina do relé que tende a manter este contato na sua posição inicial.

Tão logo este campo se enfraquece, ocorre a liberação da alavanca, mas se observa um centelhamento entre contatos até a interrupção total entre corrente fornecida pelo inversor. Nesse retorno foram gastos um tempo de aproximadamente 6 milissegundos entre o instante de comando e a finalização do chaveamento entre fontes de geração.

Buscou-se também a integração direta entre inversor e RL. Uma vez que o inversor possui internamente um chaveamento em PWM sob uma modulação senoidal que possibilitaria essa comutação, mas conforme se nota nas Figuras 28a e 28b, obteve-se um cenário similar ao ocorrido no exemplo um.

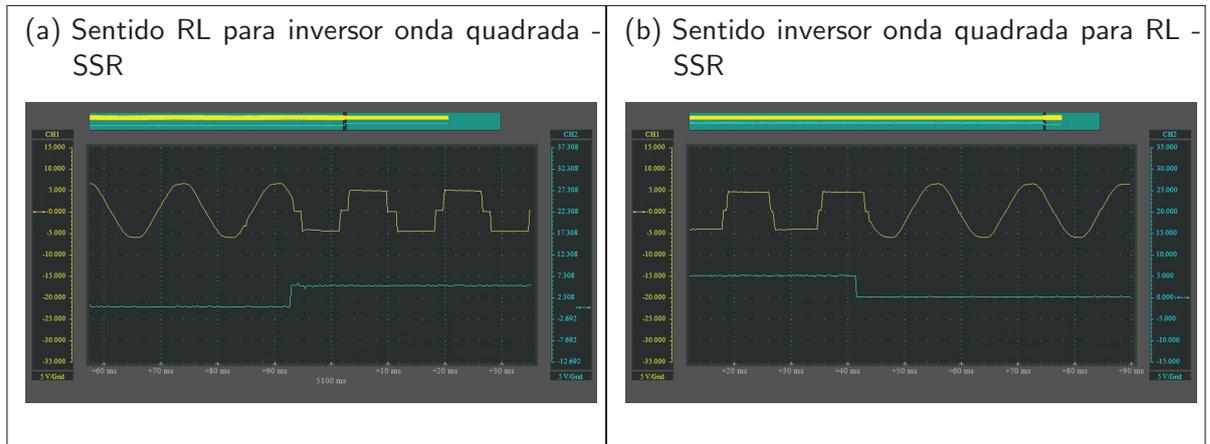
FIGURA 28 – Transitório de chaveamento entre a RL e inversor - PWM



FONTE: (a) e (b) O Autor

O segundo exemplo, mostra o mesmo processo adotado de comutação entre redes (local e inversor onda quadrada), mas desta vez utilizando-se como chaves reversoras os SSRs para a comutação entre fase. Neste exemplo, o envio do sinal de controle acontece em sincronismo e no transitório por zero entre as duas fontes, o processo fica bastante otimizado. Nas Figuras 29a e 29b se observa o comportamento do acionamento, nos mesmos moldes anteriores, agora utilizando-se o SSRs supra citado como chave. Nota-se que comutação entre geradores fica mais adequada, em termos de estabilidade de tensão e frequência, conforme apresentado no trabalho IEEE Standard Association 1547 (2018) citado na página 20.

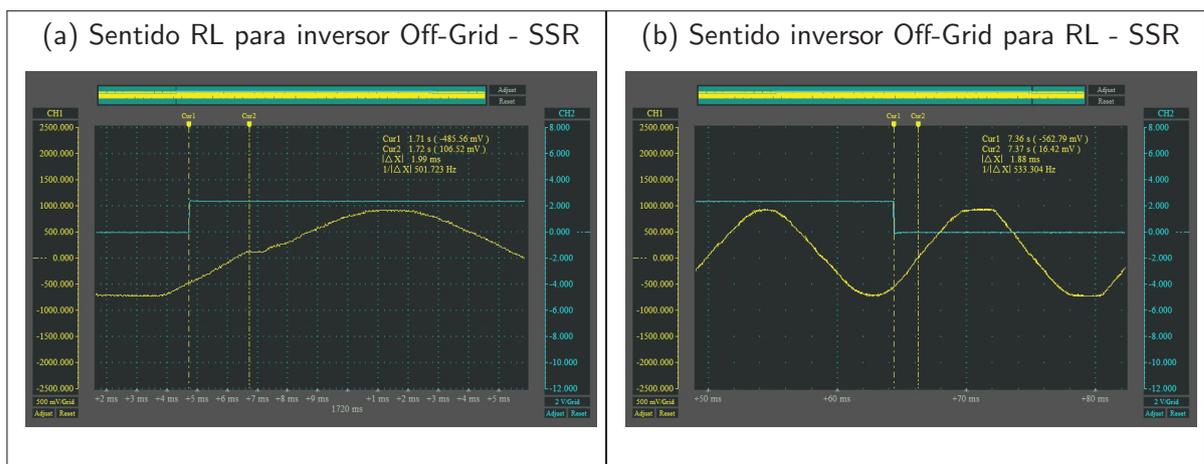
FIGURA 29 – Transitório de chaveamento entre a RL e inversor utilizando-se um SSR



FONTE: (a) e (b) O Autor

Como terceiro e último exemplo dessa demonstração, se apresenta o caso particular utilizado nesse trabalho de dissertação. Nas Figuras 30a e 30b têm-se a comutação entre a fonte senoidal CA - rede da concessionária local e o inversor onda senoidal pura Off-Grid. Aqui as comutações estão em detalhes, para assim ser possível medir o tempo de resposta entre o comando (que já vem propositalmente adiantado à passagem por zero das senoides) e a efetiva reversão. Nota-se que a senoide da concessionária tem o seu “topo ou pico” ligeiramente achatado (Figura 30b). Por isso o *THD* do inversor é menor que o da própria RL, uma vez que essa senoide está submetida a uma gama de cargas consumidoras com fontes chaveadas em sua maioria (lâmpadas eletrônicas, computadores, TVs, etc).

FIGURA 30 – Transitório de chaveamento entre a RL e inversor Off-Grid



FONTE: (a) e (b) O Autor

Para que os circuitos internos dos SSRs atuem de acordo com o informado anteriormente, o sinal que dispara o comando para a reversão foi programado para ser aplicado um

pouco antes da passagem por zero. O tempo de atraso para esse comando é indicado como 10 milissegundos, porque está ligado ao ponto de acionamento e desligamento em relação a senoide da fonte RL CA. Dessa maneira, ao finalizar o acionamento no SSR 1, um pouco antes, ele permitirá que se aguarde a chegada do próximo ponto zero para só então cortar a corrente da carga. De forma análoga, o SSR 2 será disparado, atentando a chegada do ponto zero. Desta maneira, evita-se que - em um dado instante - ambas as fontes estejam despachando corrente para carga simultaneamente.

Dessa maneira, o método de chaveamento utilizando-se SSRs foi o mais estável e seguro. Também foi buscada alguma solução que ao invés de se utilizar a tensão, passasse a utilizar a referência de corrente, mas isso não seria possível, pois sempre haverá um SSR sem corrente, ou seja, sem uma referência para conduzir o chaveamento.

5.3 Aplicação do Cenário 1 de Recarga

Para facilitar a montagem do sistema fotovoltaico, foi utilizado uma das várias ferramentas disponíveis para consulta de dados relacionados à incidência solar nos mais diversos municípios brasileiros, assim como em localidades de outros países. Como fonte de consulta deste trabalho foi utilizado o Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito - CRESESB (2020), pertencente ao Ministério de Minas e Energia em parceria com a Eletrobrás. Esta plataforma foi escolhida pela facilidade na consulta sobre irradiação solar, pois se baseia nas coordenadas da localidade.

A partir da inserção dos dados da localidade em questão, a ferramenta disponibiliza o histórico de irradiação no plano horizontal, na análise com ângulo igual à latitude, na maior média anual para a localidade analisada e a maior média mensal. A relevância se dá, porque a partir dessas informações, podê-se dimensionar a quantidade de painéis minimamente necessários para a obtenção da potência solar. A ferramenta, para resposta, não baseia-se apenas na informação da localidade de interesse. Ela usa dois outros pontos aleatórios com raio de nove a dez quilômetros para a formação de uma média entre estes pontos. Assim, os pontos apresentados abaixo na região de Curitiba-PR tem aproximadamente o mesmo valor de irradiação, o que permite a afirmação de que este sistema teria validade em qualquer outra região desse plano, desde que sejam seguidos os mesmos critérios desse trabalho, conforme se lê na Figura 31 extraída do site CRESESB (2020).

A produção diária média de energia fotovoltaica exibe uma diferença de algo como o dobro entre o verão e o inverno. Essa é a razão pela qual se requer uma conexão de RL para que o carregador obtenha fornecimento de energia no inverno ou em períodos de baixa irradiação, por exemplo. Já no verão, o contexto se torna ainda mais favorável às recargas em modo 1, pois têm-se um nível maior de energia fotovoltaica disponível. Dessa maneira, o investimento em volume de densidade de energia do BESS se torna moderado.

FIGURA 31 – Histórico de irradiação CRESESB

#	Estação	Município	UF	País	Irradiação solar diária média [kWh/m ² .dia]														Média	Delta		
					Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov			Dez	
✓	Curitiba	Curitiba	PR	BRASIL	25,401° S	49,249° O		7	5,32	5,16	4,54	3,78	3,05	2,76	2,89	3,86	3,83	4,36	5,23	5,56	4,19	2,80
✓	Curitiba	Curitiba	PR	BRASIL	25,401° S	49,349° O		9,7	5,31	5,18	4,57	3,79	3,05	2,74	2,90	3,89	3,86	4,41	5,29	5,59	4,21	2,86
✓	Pinhais	Pinhais	PR	BRASIL	25,401° S	49,149° O		10,5	5,31	5,15	4,50	3,77	3,04	2,73	2,89	3,83	3,79	4,34	5,21	5,56	4,18	2,83

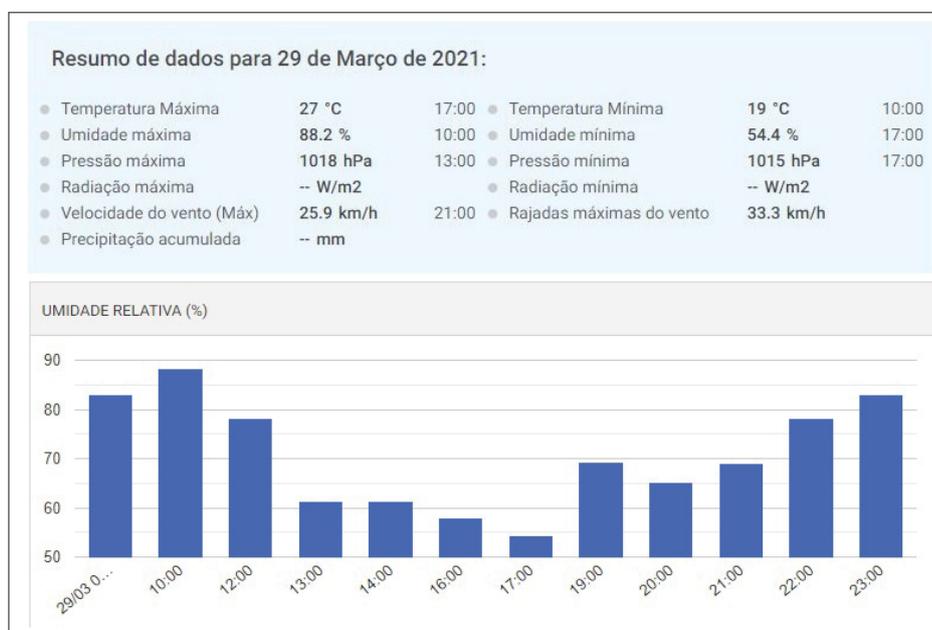
FONTE: Site CRESESB (2020)

No cenário 1, apresenta-se a simulação da melhor condição, onde a recarga segue todo tempo através da energia previamente acumulada no BESS. Em momentos de excedente de produção através do SFA, a recarga também pode ser conduzida por ele, em paralelo. É o método de recarga mais eficiente energeticamente, uma vez que nenhuma energia elétrica é despachada pela RL e, conseqüentemente não há sobrecarga apresentada aos componentes do sistema de distribuição.

No dia 29 de março de 2021, a cidade de Curitiba - PR tinha as condições climáticas, conforme anotados através do site tempo.com (2021) e demonstrado pela Figura 32. Segue também um breve relato sobre o momento da coleta:

-Dia ensolarado, recarga exclusivamente através do sistema BESS/SFA.

FIGURA 32 – Cidade de Curitiba-PR - condições de tempo referentes ao dia 29/03/21



FONTE: Adaptado site: tempo.com (2021)

Segue Tabela 6 com visualização parcial (em relação ao total de dados) relativa a coleta do dia 29 de março de 2021 e seus gráficos (Figura 33). Os gráficos deste e demais dias

em sequência em modo 1, modo 2 e modo 3, constam dos Apêndices A, B e C, respectivamente, logo após o final deste trabalho.

TABELA 6 – Cenário 1-tabela com um trecho parcial das leituras referentes ao dia 29/03/21

Horário (hh:mm:ss)	Tensão/bateria (V)	Corrente no BESS (A)	Potência de recarregamento (kW)	Energia recarregada no VE (kWh)	Pot. fornecida pelo SFA (W)
12:14:50	12,78	1,58 (*)	1,63	1,72	80,77
12:14:53	12,76	1,6	1,63	1,72	81,66
12:14:56	12,8	2,49	1,63	1,72	127,48
12:15:00	12,81	1,47	1,63	1,72	75,32
12:15:03	12,77	1,47	1,63	1,72	75,09
12:15:07	12,83	6,13	1,63	1,73	314,59
12:15:10	12,84	3,47	1,63	1,73	178,22
12:15:13	12,82	1,38	1,63	1,73	70,77
12:15:17	12,82	1,25	1,63	1,73	64,10
12:15:20	12,79	1,53	1,63	1,73	78,27
12:15:24	12,79	3,92	1,63	1,73	200,55
12:15:27	12,82	2,16	1,63	1,73	110,76
12:15:31	12,8	2,15	1,63	1,74	110,08
12:15:34	12,77	3,19	1,63	1,74	162,95
12:15:37	12,8	2,93	1,63	1,74	150,02
12:15:41	12,8	3,27	1,63	1,74	167,42
12:15:44	12,9	2,49	1,63	1,74	128,48
12:15:48	12,49	-27,55 (**)	1,63	1,74	-1376,40
12:15:51	12,39	-30,92	1,63	1,74	-1532,40
12:15:55	12,32	-32,86	1,63	1,75	-1619,34
12:15:58	12,27	-33,31	1,63	1,75	-1634,85
12:16:01	12,21	-29,02	1,63	1,75	-1417,34
12:16:05	12,21	-28,03	1,63	1,75	-1368,99
12:16:08	12,33	-14,33	1,63	1,75	-706,76

FONTE: O Autor

Baseado na Tabela 6, destaca-se as informações na sequência.

A coluna *Potência de recarregamento* apresenta valores incrementais, ou seja, como a recarga efetivamente se inicia 10:47:30, têm-se como valor apresentado, por exemplo, as 12:14:50 como sendo o somatório até esse horário e continua-se até seu valor final apresentado na Figura 33. A coluna segue o seguinte raciocínio de cálculo:

1. Efetuar o produto quatro vezes o valor médio da *Tensão/bateria* (V) pela *Corrente no BESS* (A).
2. Conversão do valor obtido no item 1 de Watts para quilowatts. Os valores em Watts são apresentado aqui na coluna *Pot. fornecida pelo SFA (W)* para visualização da contribuição de cada um dos sistemas.
3. Conversão do valor *Energia recarregada no VE* de Watts para quilowatts.
4. Obter o somatório dos itens 2 e 3 e sua adequação unitária a kWh.

Se o valor apresentado no item 1 acima for um valor positivo (*), indica que este é um excedente da geração solar e assim, está servindo para recarregar diretamente o VE, pois neste dado instante o despacho é 100% atendida pelo SFA, além de recarregar o BESS. Caso o valor calculado no item 1 seja um valor negativo (**), têm-se o cenário onde a produção

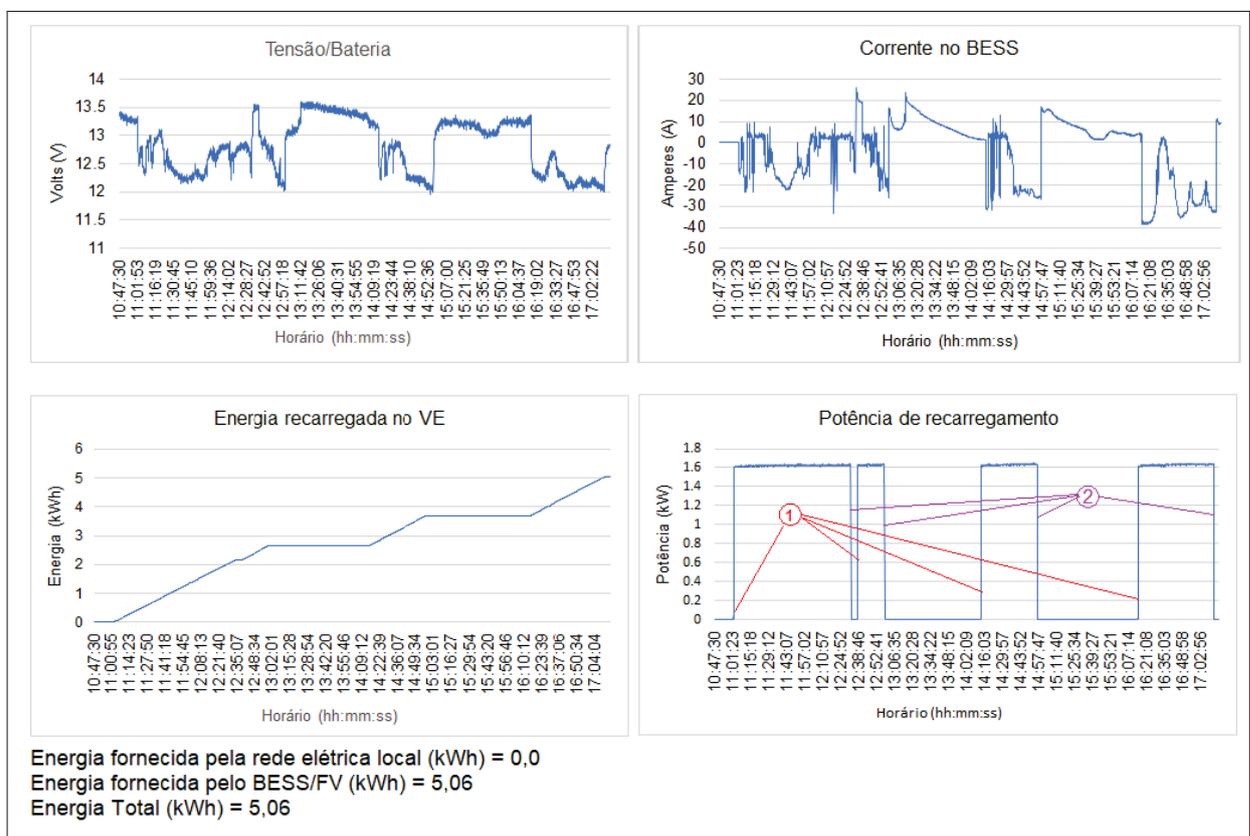
através do SFA se torna insuficiente para a manutenção da recarga do VE, portanto as baterias que compõe o BESS despacham o fluxo de energia para esse processo de recarga.

Portanto, no intervalo de tempo entre 12:14:50 - 12:15:44 dessa amostra, as células destacadas em amarelo relativas a coluna *Corrente no BESS*, apresentam os momentos em que o processo de recarga está sendo despachado através do SFA. Confrontando-se essa informação a figura 32 - resumo de dados climáticos em Curitiba-PR para esse dia, percebe-se, uma redução na umidade relativa do ar, o que indica presença solar intensa na localidade.

Alguns milissegundos adiante na amostra, mais exatamente no intervalo entre 12:15:48 - 12:16:08 dessa mesma coluna, destacada em azul, têm-se o momento que o sistema GIVeC registra o despacho do fluxo de energia acumulada nas baterias do BESS sentido VE através do carregador veicular, conforme o sinal negativo apresentado e previamente descrito. Provavelmente, alguma fonte de sombra sobre os painéis e assim o BESS passa a suportar o processo de recarga, exclusivamente.

Já na coluna *Energia recarregada no VE* é apresentado o valor que é a soma da energia no instante imediatamente anterior somada a potência atual de recarga dividido pelo período de uma hora (em segundos). Os valores menores ou maiores na segunda casa decimal são apenas erros de arredondamento no cálculo.

FIGURA 33 – Cenário 1-gráficos totais das leituras referentes ao dia 29/03/21



Nota-se, olhando os gráficos *Tensão/Bateria*, *Energia recarregada no VE* e *Potência de recarregamento* apresentados na Figura 33, as seguintes informações:

No gráfico *Tensão/Bateria*, têm-se a informação de flutuação de tensão entre um valor máximo de 13,8V e 12,0V em média nas baterias do BESS. Quando a tensão fica abaixo de 12,5V, o sistema de gerenciamento mantém a recarga até que BESS atinja o mínimo de 11,99V, quando favoreceria o início do processo de reversão para RL. Intencionalmente isto não acontece nesse cenário 1 para sua completa demonstração.

Já a informação trazida pelo gráfico *Energia recarregada no VE*, apresenta o somatório de energia no processo de recarga do dia. Na interpretação de cada intervalo reto da curva, apresentam-se paradas no processo de recarga, feitas de forma espontânea feitas pelo usuário. Nos momentos de aclave da curva, observa-se o acumulado de energia, que no exemplo, igual a 5,06kWh. Esse valor é positivo no balanço energético.

Por fim, na informação do gráfico *Potência de recarregamento*, obtêm-se as informações de momentos que o usuário parou de forma voluntária o processo de recarga (seção reta da curva em zero kW) e os momentos em que a recarga era executada da maneira esperada (seção reta da curva próximo ao valor estabelecido para recarga, ou 1,7kW). Os intervalos em que se vê a rampa de subida (1) ou descida (2), têm-se o acionamento da recarga e a interrupção desta, respectivamente.

5.4 Aplicação do Cenário 2 de Recarga

Este cenário é a maneira padrão de uso, podendo ser considerado a forma automática de controle do despacho de energia elétrica para o processo de recarga. O algoritmo efetua as comutações entre RL e a associação BESS/SFA sempre buscando o modo ótimo para oferecer ao processo de recarga a potência requerida. Aqui a recarga usualmente inicia-se pela energia acumulada no BESS. Caso esse esteja abaixo dos valores de tensão e corrente estabelecidos, é observado a produção através do SFA. Se então, este for insuficiente, ocorre a comutação a RL. Dependendo do porte do BESS utilizado, pode ser considerado moderadamente eficiente, pois, um percentual variável da energia é despachada pela RL.

No dia 14 de abril de 2021, a cidade de Curitiba - PR tinha as condições climáticas, conforme anotados através do site tempo.com (2021) e demonstrado pela Figura 34. Segue também um breve relato sobre o momento da coleta:

-Dia com alta nebulosidade e garoa ocasional. Pequena abertura de sol no meio da tarde, voltando logo à alta nebulosidade.

FIGURA 34 – Cidade de Curitiba-PR - condições de tempo referentes ao dia 14/04/21



FONTE: Adaptado site: tempo.com (2021)

Quando se observa as condições do tempo descrito para o dia e adiciona-se a informação trazida pela Figura 34, nota-se que o intervalo de tempo selecionado na Tabela 7 como amostra entre 12:14:36 - 12:48:01, oferece diversos eventos que são relevantes para a análise desse modo de recarga. Nesse intervalo de tempo observa-se um aumento na umidade (pico do dia), indicando pouco ou nenhuma geração através do SFA.

Como esse deveria ser o horário de maior incidência solar do dia, a recarga está sendo despachada através da RL (destacado em amarelo), porque as condições de geração através do SFA eram desfavoráveis. Isso é percebido até o momento 12:15:24, quando a recarga do VE comuta para o despacho através do BESS e se estende até 12:47:06 (trecho destacado em azul), pois o sistema utilizou a pouca geração solar - até esse momento - para elevar os valores de SOC mínimo do BESS.

Aqui o raciocínio é o mesmo apresentado na página 75, onde se destacou que valores de potência negativa na coluna *Pot. fornecida pelo SFA* indicam despacho com origem no BESS e o contrário - nesse cenário 2 - tem origem na RL.

TABELA 7 – Cenário 2-tabela com um trecho parcial das leituras referentes ao dia 14/04/21

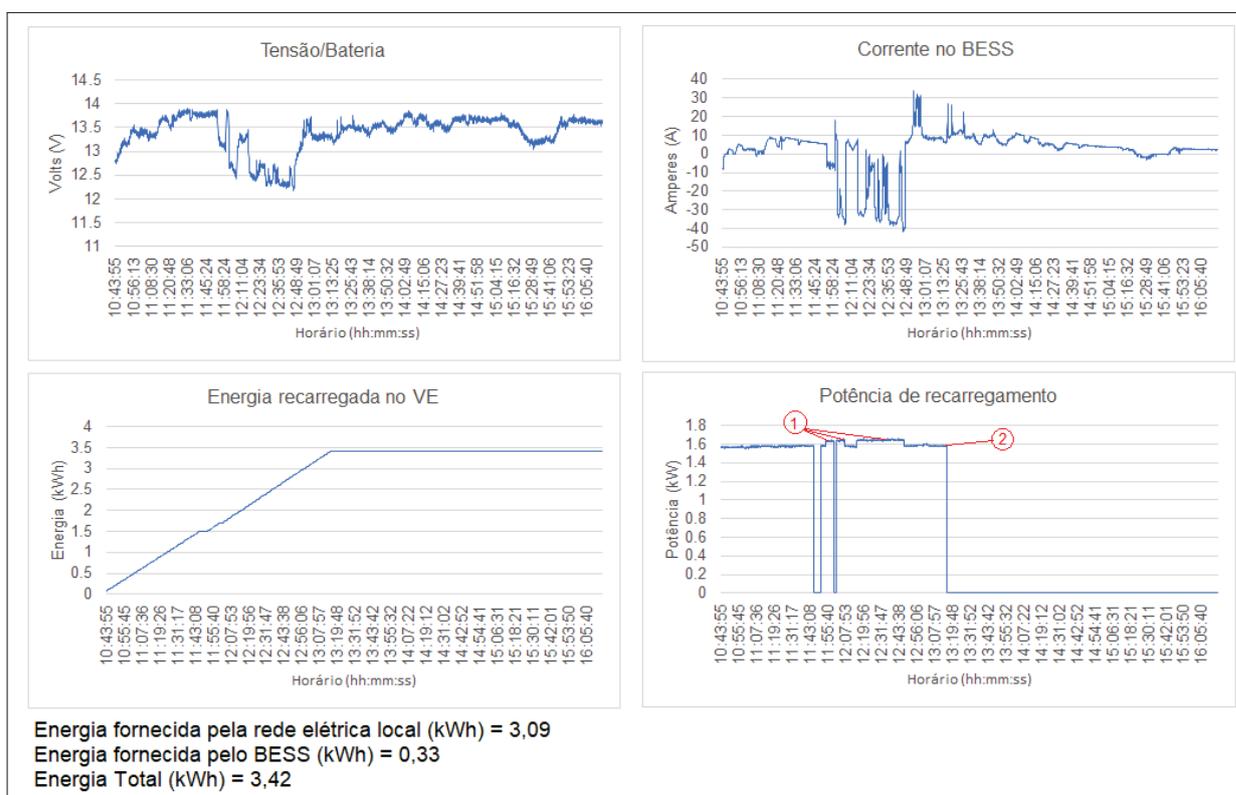
Horário (hh:mm:ss)	Tensão/bateria (V)	Corrente no BESS (A)	Potência de recarregamento (kW)	Energia recarregada no VE (kWh)	Pot. fornecida pelo SFA (W)
12:14:36	13,38	6,08	1,57	1,99	325,40
12:14:39	13,36	6,18	1,56	2	330,25
12:14:43	13,30	5,91	1,57	2	314,41
12:14:46	13,35	6,91	1,57	2	368,99
12:14:49	13,35	6,85	1,57	2	365,79
12:14:53	13,40	6,96	1,57	2	373,05
12:14:56	13,43	6,98	1,57	2	374,96
12:15:00	13,47	7,20	1,58	2	387,93
12:15:03	13,45	6,92	1,57	2	372,29
12:15:07	13,40	7,21	1,57	2,01	386,45
12:15:10	13,41	7,43	1,57	2,01	398,54
12:15:13	13,44	7,55	1,57	2,01	405,88
12:15:17	13,44	7,90	1,57	2,01	424,70
12:15:20	13,46	8,05	1,56	2,01	433,41
12:15:24	13,47	8,04	1,57	2,01	433,19
12:15:39	12,99	-31,23	1,64	2,01	-1622,71
12:15:42	12,99	-30,93	1,64	2,01	-1607,12
12:15:46	12,85	-31,69	1,64	2,02	-1628,86
12:15:49	12,77	-32,09	1,63	2,02	-1639,15
12:15:53	12,77	-31,65	1,64	2,02	-1616,68
12:15:56	12,72	-32,14	1,64	2,02	-1635,28
12:16:00	12,67	-32,08	1,64	2,02	-1625,81
12:16:03	12,64	-32,30	1,64	2,02	-1633,08
12:16:06	12,66	-32,76	1,64	2,02	-1658,96
12:16:10	12,60	-32,36	1,64	2,03	-1630,94
12:16:13	12,61	-32,27	1,64	2,03	-1627,69
12:16:17	12,59	-33,10	1,65	2,03	-1666,91
.
.
.
12:46:59	12,27	-39,05	1,65	2,77	-1916,57
12:47:03	12,28	-38,79	1,64	2,77	-1905,36
12:47:06	12,24	-39,45	1,65	2,77	-1931,47
12:47:47	12,70	7,07	1,57	2,77	359,15
12:47:51	12,73	6,67	1,57	2,77	339,63
12:47:54	12,72	6,58	1,58	2,77	334,79
12:47:58	12,73	6,18	1,58	2,78	314,68
12:48:01	12,77	5,70	1,57	2,78	291,15

FONTES: O Autor

Assim, olhando para os gráficos *Tensão/Bateria* e *Corrente no BESS*, apresentado na Figura 35, percebe-se que no momento anterior a 12:14:36, a recarga do veículo se dava prioritariamente, através da RL. Isso fica claro pelo fato das oscilações de tensão entre o valor máximo e o mínimo de tensão na recarga das baterias. Esse evento, favorece descargas mais profundas por parte do BESS. Sob modo 2 de recarga, percebeu-se que dada a menor incidência solar sobre os painéis, o BESS contribuiu com o recarregamento na menor parcela do processo, ou apenas 9,6%. Isso é equivalente a 0,33kWh. Nesse caso, o SFA, em função da menor incidência solar do dia, está comprometido com a manutenção do BESS. De maneira automática, o sistema de gerenciamento mantém a recarga despachada pela RL.

Já através da informação trazida no gráfico *Corrente no BESS*, observa-se os múltiplos picos negativos de corrente entre o período de 12:14:36 - 12:48:01, que comprova a afirmação

FIGURA 35 – Cenário 2-gráficos totais das leituras referentes ao dia 14/04/21



FONTE: O Autor

das condições momentâneas do tempo, porque se compararmos o mesmo intervalo de tempo no gráfico *Tensão/Bateria*, confirma-se ausência de incidência solar sobre os painéis.

O gráfico *Potência de recarregamento*, apresenta algumas alterações na curva do valor de potência de recarga (kW). Essas são as comutações sucessivas aplicadas pelo sistema GIVeC a chave 1 estão destacadas na figura. As comutações entre despacho através das baterias do BESS (1) e RL (2), durante o processo de recarga mostram que os valores mais próximos do máximo programado como valor de recarga (1,7kW), são despachados pelo BESS. Quando se observa valores próximos a 1,5kW, significa dizer que a RL está fornecendo energia.

De forma análoga ao cenário 1, aqui também o usuário precisou manobrar seu veículo por duas vezes durante o processo. Isso explica as interrupções do processo, visualizadas através do gráfico *Potência de recarregamento*.

O gráfico *Energia recarregada no VE*, se traduz no acumulado de energia do processo de recarga do dia. Aqui o destaque cabe aos valores apresentados na Figura 35. Como as condições do tempo estavam desfavoráveis ao carregamento em modo 1, o mesmo se deu em sua maior parte (aprox. 90,35%) através da energia fornecida pela RL.

5.5 Aplicação do Cenário 3 de Recarga

O cenário 3 equivale a uma recarga de um veículo elétrico em uma estação de recarga CA inserida em um sistema de potência convencional; sem um sistema de RED e nem alguma inteligência a disposição para gerenciar o processo ou caso o usuário desse veículo tivesse acesso a todas essas técnicas, mas por algum motivo, precisasse lançar mão de recarga em RL, por exemplo, por algum critério particular de tempo versus objetivo de uso do VE. Este é o modo menos eficiente, em termos energéticos, pois ao contrário do cenário 1, a totalidade da energia é despachada através da RL.

No dia 12 de maio de 2021, a cidade de Curitiba - PR tinha as condições climáticas, conforme anotados através do site tempo.com (2021) e demonstrado pela Figura 36. Segue também um breve relato sobre o tempo no momento da coleta:

-Dia de intensa nebulosidade e chuva. Baixa irradiação solar durante o período.

FIGURA 36 – Cidade de Curitiba-PR - condições de tempo referentes ao dia 12/05/21



FONTE: Adaptado site: tempo.com (2021)

Como as condições climáticas estavam desfavoráveis à aplicação em modo 1, a baixa geração através do SFA era destinada à recarga e manutenção do BESS, como se lê nos gráficos *Tensão/Bateria e Corrente no BESS*. O sistema GIVEc, recebe esses dados e se prepara para que no próximo momento de recarga ele seja conduzido através da RL. Como processo de recarga inicia-se as 13:26:51, ele segue automaticamente pela RL para preservar o BESS de descargas profundas.

Os pontos destacados a seguir trazem as informações mais relevantes percebidas no modo 3. A seguir esses pontos destacados em forma de Tabela 8 que foi gerada no dia 12

de maio de 2021 em processo de recarga modo 3. Na sequência, se acompanham os gráficos gerados a partir da tabela (totalizada).

TABELA 8 – Cenário 3-tabela com um trecho parcial das leituras referentes ao dia 12/05/21

Horário (hh:mm:ss)	Tensão/bateria (V)	Corrente no BESS (A)	Potência de recarregamento (kW)	Energia recarregada no VE (kWh)	Momento
14:59:50	13,12	1,08	1,58	2,2	1
14:59:53	13,17	0	1,58	2,2	2
15:00:24	13,2	0	1,5	2,22	3
15:03:59	13,19	0	1,41	2,29	4
15:10:09	13,1	0	1,12	2,41	5
16:42:00	13,11	0	0	2,5	6

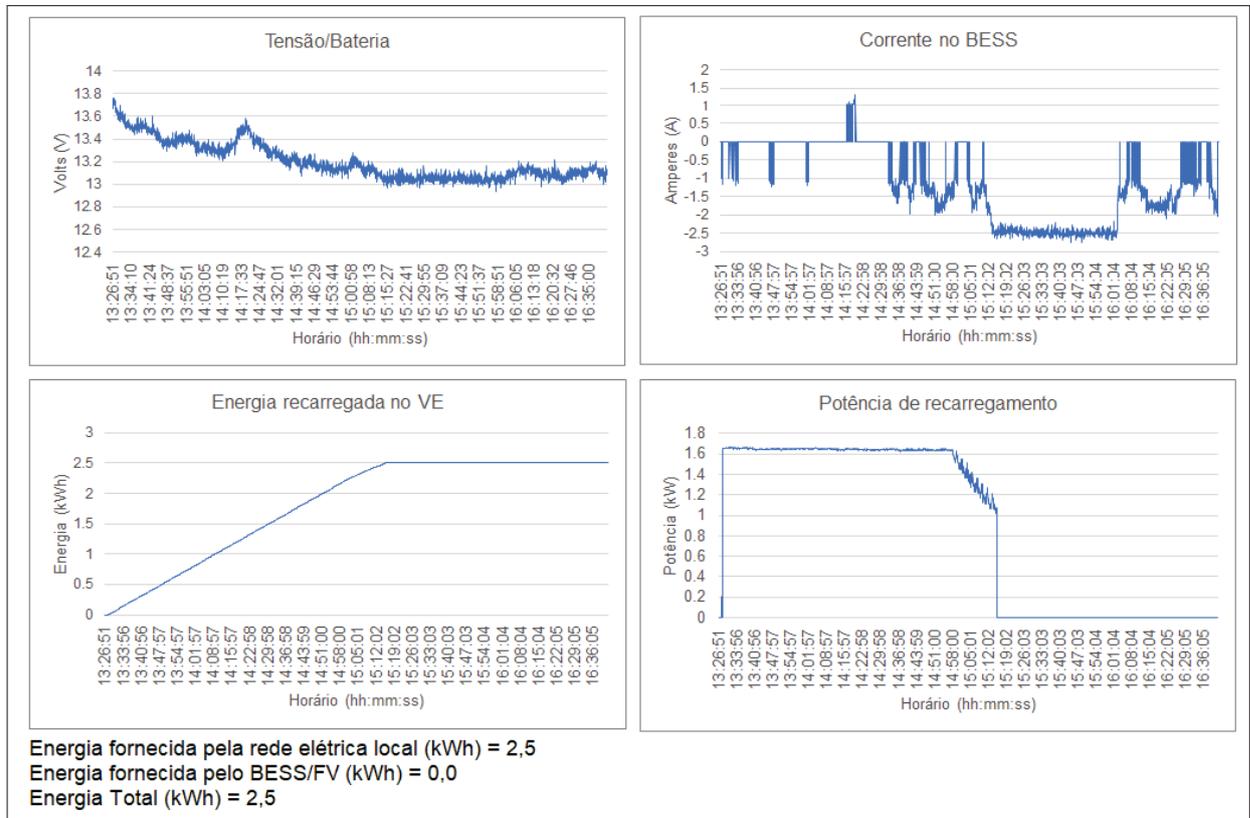
FONTE: O Autor

Os seis pontos destacados na coluna *Momento* são:

1. Momento em que o veículo solicita através do protocolo descrito na norma IEC (2017) a interrupção do processo, pois este atingiu o limite de corrente necessária para carga.
2. Momento onde a recarga inicia a parada aguardando novo comando por parte do VE.
3. Instante onde a recarga é efetivamente interrompida.
4. Nesse instante, pela norma IEC (2017), o VE busca o estado de flutuação de corrente. Observa-se que o valor da coluna *Potência de recarregamento* apresenta tendencia de redução no fluxo de energia demandada. Próximo a 1,40kW.
5. O processo de flutuação tem início e nesse modo - coordenado pelo VE, permanece até o momento 6.
6. Aqui a recarga é finalmente interrompida pelo VE e o usuário recebe um aviso através de um LED no painel, que indica a sua finalização e o destravamento físico entre VE e carregador (plugue tipo 1) acontece. Nesse caso a diferença de praticamente 01:40h (uma hora e quarenta minutos) entre o início do processo de suspensão de recarga até sua desconexão final, se deu por motivos particulares do usuário.

A recarga total em modo 3 foi 2,50kWh sendo despachado 100% do tempo pela RL. Já observando o gráfico *Corrente no BESS*, nota-se valores negativos desprezíveis entre 0 e -3A. Isso indica flutuação entre o MPPT interno do inversor trabalhando a vazio, conseqüentemente, confirma que o VE está tomando energia da RL. Por suas características de fabricação, o inversor Off-Grid utilizado consome entre 80W-100W quando opera em vazio. Isto ocorre em função da filtragem do chaveamento em PWM sob uma modulação senoidal, que procura diminuir o parâmetro do sinal senoidal total produzido.

FIGURA 37 – Cenário 3-gráficos totais das leituras referentes ao dia 12/05/21



FONTE: O Autor

5.6 Aplicação do Cenário Tarifa Branca

Nessa seção será apresentado apenas os gráficos resumindo a gestão em tarifa branca (TB).

A TB é uma nova opção de tarifa que sinaliza aos consumidores a variação do valor da energia conforme o dia e o horário do consumo. Segundo cronograma estabelecido pela ANEEL, a modalidade é oferecida desde 01 de janeiro de 2018 para as unidades consumidoras atendidas em baixa tensão. As condições para aplicação da TB estão estabelecidas nas Resoluções Normativas Aneel 414/2010 e 733/2016 (COPEL, 2021).

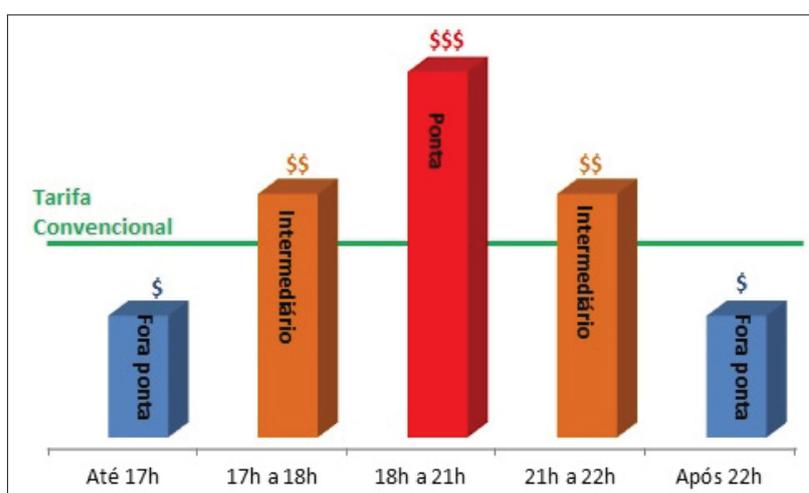
Nos dias úteis, o valor da TB varia em três horários: ponta, intermediário e fora de ponta. Na ponta e no intermediário, a energia é mais cara. Fora de ponta, é mais barata. Nos feriados nacionais e finais de semana o valor é sempre fora de ponta. Segue Tabela 9 e gráfico 38 com os horários extraídos do site da companhia distribuidora local.

TABELA 9 – Tabela de valores (com impostos) praticados pela companhia distribuidora de energia elétrica na cidade de Curitiba-PR - Maio/21

Tarifa Branca B1 Residencial	Consumo (R\$/kWh)
Ponta	1,45488
Intermediário	0,93679
Fora de ponta	0,68559

FONTE: (COPEL, 2021)

FIGURA 38 – Gráfico tarifa branca - Maio/2021



FONTE: COPEL (2021)

A quarta avaliação foi feita no dia 31 de maio de 2021 afim de reproduzir um cenário que mostrasse a eficiência do controle de recarga sob a programação desta TB. O algoritmo conta com a possibilidade de inserção de tabelas como esta, permitindo ao usuário do VE, controlar da maneira mais econômica possível o processo de recarga.

Nota-se através da Figura 39 que as condições climáticas no dia estavam desfavoráveis a alguma possível recuperação por parte do SFA. E de acordo com a informação trazida na Figura 31, temos para a localidade de Curitiba-PR o menor valor de insolação do ano, com 2,76kWh/m².

FIGURA 39 – Cidade de Curitiba-PR - condições de tempo referentes ao dia 31/05/21



FONTE: Adaptado site: tempo.com (2021)

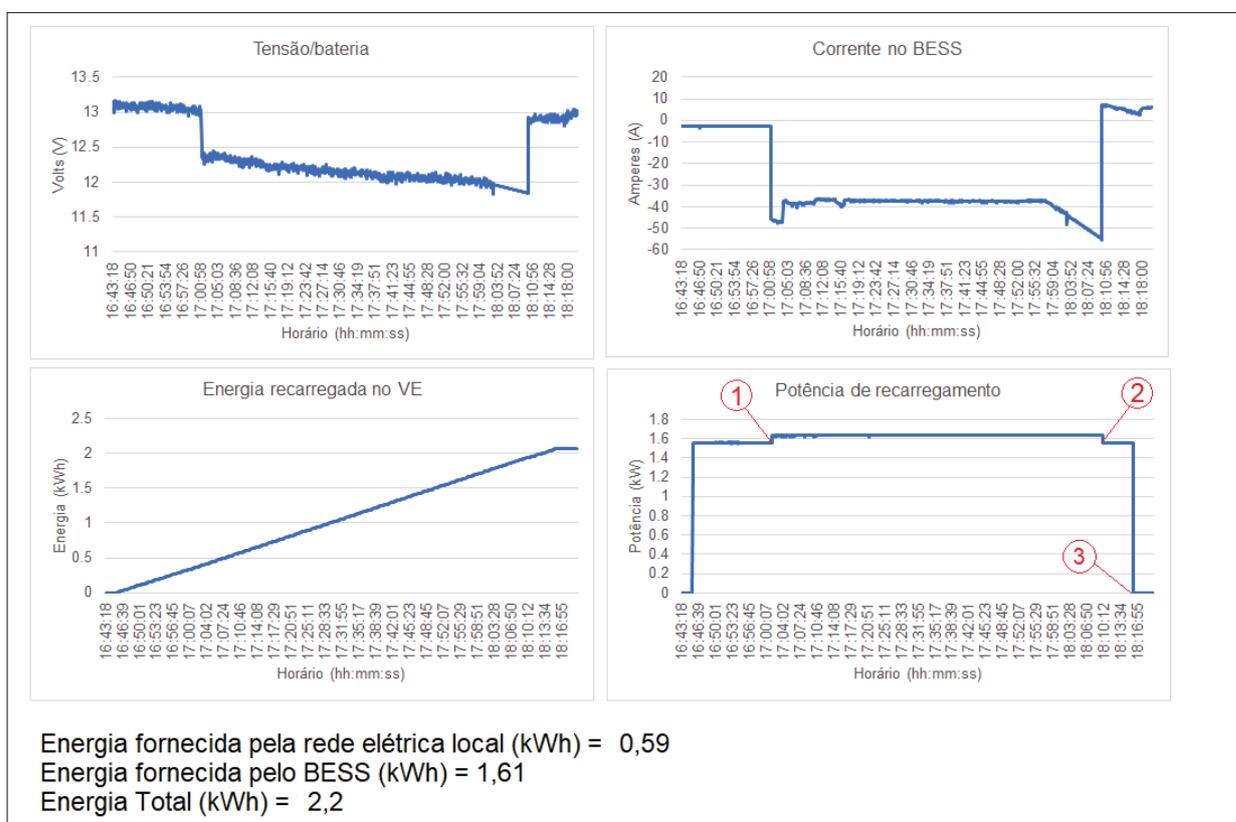
Foi simulado um processo de recarga que se inicia no horário fora de ponta em modo 3 por ser mais vantajoso economicamente. Ao entrar em horário intermediário, o sistema comuta, baseando-se na informação da tabela da TB com os valores de horário, para modo 1, conforme marcação destaque (1) apresentada no gráfico *Potência de recarregamento* (Figura 40).

Em função do SOC das baterias do BESS estar em uma condição desfavorável, acontece uma reversão automática (2) - mesmo a tabela de TB estando em andamento - às 18:10:18, para RL em horário de ponta. Em seguida, o algoritmo efetua as medições do BESS e como esse apresenta SOC abaixo de 75%, então mantêm a recarga ativa por mais cinco minutos e depois efetua a interrupção do processo de recarga (3), pois o horário tarifário está desfavorável a recarga pela RL.

Essa comutação se deu, porque a medida que a tensão do BESS cai durante a recarga, chega um determinado instante no final, em que a corrente se torna ainda maior (em módulo) chegando próxima a -55A. Isso ocorre em função do alargamento dos pulsos PWM do inversor, que busca compensar a queda de tensão de entrada CC (BESS descarregado) e, então, para protegê-las de uma descarga profunda, o algoritmo reverte a recarga do VE para a RL, por critério de segurança.

Caso as baterias chumbo-carbono estivessem em condições de SOC acima de 75%, a programação de recarga em TB teria seguido até o final do processo. Como a premissa do algoritmo é a manutenção do SOC do BESS em 75%, então essa foi a logica aplicada baseado nos parâmetros apresentados por Moura (2021), fabricante das baterias.

FIGURA 40 – Cenário TB-gráficos totais das leituras referentes ao dia 31/05/21



FONTE: O Autor

De maneira complementar, observa-se o comportamento de descarga do BESS através dos gráficos *Tensão/Bateria* e *Corrente no BESS* no intervalo 17:00:00 - 18:10:05. Em ambos os gráficos, nota-se o comportamento de queda de tensão e corrente gradativamente, comprovando que o fluxo de potência para o processo de recarga foi despachado pelo BESS/SFA no período.

A energia total acumulada nesse processo de recarga foi de 2,2kWh, sendo a menor parcela ofertada pela RL, ou seja, 0,59kWh ou 27% do total. O BESS contribuiu com 1,61kWh ou 73% do total.

Pode-se afirmar que o método de gestão de controle de recarga ocorreu de forma satisfatória, pois atendeu a programação imposta pelos horários da tabela TB, inclusive com os critérios de proteção as baterias do BESS, tornando a recarga mais econômica. Isso proporciona uma melhor configuração de recarga no uso diário, em caso de aplicação deste tipo de política tarifária por parte da companhia distribuidora.

5.7 Discussão dos Resultados dos Cenários 1, 2, 3 e Tarifa Branca

Primeiramente, são apresentadas as análise entre os modos 1, 2 e 3. A seguir, trata-se do modo TB e as conclusões sobre o método.

Para o perfil de residência (“B1”) onde está instalada a estação de recarga; a companhia de distribuição local pratica, em Maio/2021, utiliza os seguintes valores já apresentados na Tabela 9 como sua política de R\$/kWh.

O modo 1 gerou uma economia em termos de consumo de 5,06kWh no dia 29/03/2021, uma vez que nada tomou da RL. Em modo 2, no dia 14/04/2021, obteve-se 0,33kWh (9,65% - aprox. 10%) através do conjunto BESS/SFA e o restante, 3,09kWh (90,35%) fornecido pela RL. Já em modo 3 no dia 12/05/2021, obteve-se o valor de 2,5kWh totalmente obtido na RL. Nesse período de testes, o consumo medido desta residência foi de aproximadamente 222kWh. Foi adotado, assim um valor próximo para efeito de cálculos igual a 230kWh.

Todas as recargas foram realizadas no horário “fora de ponta” e o fator (em reais) de multiplicação aplicado foi R\$ 0,68559. Assim, temos os valores em reais (R\$/dia) para cada modo de recarga apresentados em sumário na Tabela 10. O sinal positivo antes do valor em reais e valor em kWh, indica se o processo foi econômico em termos financeiros, portanto, também eficiente energeticamente. Para os valores negativos, o contrário. Apenas recordando que como não foi possível seguir um cronograma rígido nos horários de recarga (lock down COVID-19), os valores se apresentaram diferentes entre si em função disso.

TABELA 10 – Tabela comparativa de valores financeiros e eficiência energética

Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	
kWh (RL)	R\$	kWh (RL)	R\$	kWh (RL)	R\$
0	0	(-) 3,09	(-) 2,12	(-) 2,5	(-) 1,71
kWh (BESS/SFA)	R\$	kWh (BESS/SFA)	R\$	kWh (BESS/SFA)	R\$
+5,06	3,47	+0,33	0,23	0	0
TOTAIS	kWh	kWh	R\$	kWh	R\$
	+5,06	(-) 2,76	(-) 1,89	(-) 2,5	(-) 1,71

FONTE: O Autor

De acordo com a informação obtida em EPA (2019), o percentual de gatilho para recarga recomendado para o VE iMiEV - Mitsubishi® deve ficar entre 20-25% da capacidade total da bateria - que tem capacidade de 16kWh. Isso equivale a valores de aproximadamente 4kWh (valor médio de recarga). Se imaginarmos um cenário onde o uso do veículo, por parte do seu proprietário, seja de 25 dias no período de um mês e com recargas iguais ao valor médio de recarga, pode-se inferir os valores tanto em termos financeiros (reais - R\$) quanto em termos de eficiência energética, conforme apresentados na Tabela 11.

TABELA 11 – Tabela comparativa em um cenário de 25 dias de uso do VE

Tarifa Branca B1 Residencial	Cenário 1				Cenário 2				Cenário 3			
	kWh (RL)	(R\$)	kWh (BESS+ SFA)	(R\$)	kWh (RL)	(R\$)	kWh (BESS+ SFA)	(R\$)	kWh (RL)	(R\$)	kWh (BESS+ SFA)	(R\$)
Ponta	0	0	100	145,49	90	(-) 131,00	10	14,55	100	(-) 145,49	0	0
Intermediário	0	0	100	93,68	90	(-) 84,31	10	9,34	100	(-) 93,68	0	0
Fora de Ponta	0	0	100	68,56	90	(-) 61,71	10	6,86	100	(-) 68,56	0	0

FONTE: O Autor

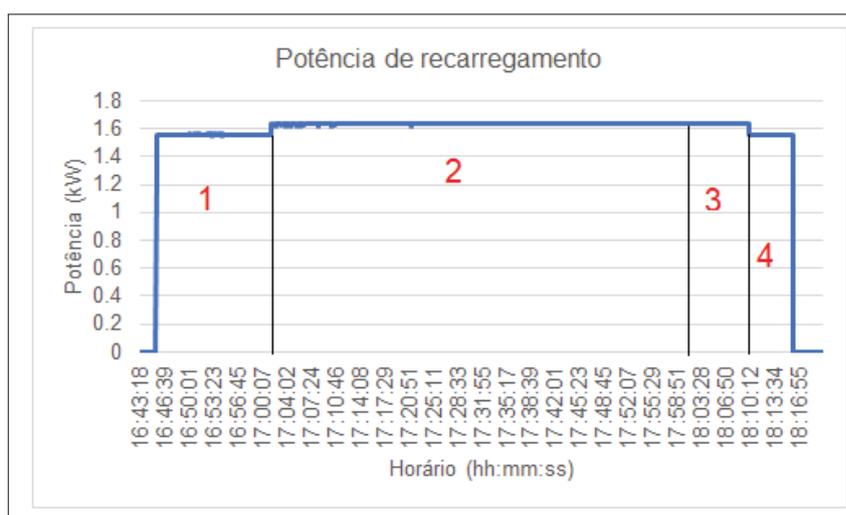
O carregamento apresentado como cenário 1 pode ser entendido aqui como o mais favorável em termos energéticos, e consequentemente, financeiros. Como este valor obtido deixou de ser tomado da RL, ele é um valor positivo na relação matemática do cálculo da eficiência energética desta residência; uma vez que a parte negativa deste cálculo ficaria por conta dos momentos em que a recarga se dá em parte (em termos percentuais) ou em sua totalidade da energia tomada da RL.

O cenário 4, ou em período horário de TB, para ser analisado, foram aplicados os seguintes intervalos para facilitar o entendimento da análise:

1. Fora de ponta - 16:45:24-17:00:00 - Período de recarga por RL .
2. Intermediário - 17:00:00-18:00:00 - Período de recarga por BESS/SFA.
3. Ponta - 18:00:00-18:10:00 - Período de recarga por BESS/SFA*.
4. Ponta - 18:10:00-18:15:00 - Período de recarga por RL.

Em destaque a Figura 41 que mostra estes quatro intervalos.

FIGURA 41 – Destaque gráfico Potência de recarregamento leitura referente ao dia 31/05/21-TB



FONTE: O Autor

Iniciar o (1) processo de recarga com energia despachada pela RL foi mais favorável uma vez que o valor em reais do kWh é o mais baixo, conforme Tabela 9, página 84. Após as

17:00, o gerenciamento comuta para o despacho através do BESS/SFA, em função da tabela TB inserida em sua programação. Isso se dá até 18:10h (3) quando ocorre - por segurança - uma reversão automática direção RL.

No intervalo entre 17:00-18:00 (2), o BESS/SFA despacha 1,4kwh (A). Para o intervalo entre 18:00-18:10 (3), aplica-se um raciocínio de proporcionalidade escalar para se extrapolar o valor de recarga para o restante dessa hora. Ora, se nesse período de dez minutos, tivemos 0,21kWh despachados através do conjunto BESS/SFA, ao se extrapolar este valor para 60 minutos, então teríamos 1,26 kWh (B), de forma proporcional. E efetuando a soma de (A) e (B), teríamos um valor de 2,66kWh sendo fornecidos pelo BESS/SFA em horário de ponta. A Tabela 12 traz um resumo dessa análise.

Entende-se também que o sistema de gerenciamento trouxe uma economia financeira. Como o processo ocorreu em uma janela de tarifária intermediária/ponta e nesse período o valor de 2,66kWh (A+B) seria despachado através do BESS/SFA, evitando o pagamento de R\$ 3,14 (valor somado de A e B) a companhia distribuidora. Essa energia se traduz, assim em eficiência energética, pois é exatamente nesse momento que a RL começa a ser mais exigida.

TABELA 12 – Tabela comparativa de valores financeiros e eficiência energética - Cenário Tarifa Branca

Tarifa Branca B1 Residencial	Modo Tarifa Branca			
	kWh (RL)	(R\$)	kWh (BESS+SFA)	(R\$)
Ponta	0	0	1,26	1,83
Intermediário	0	0	1,4	1,31
Fora de ponta	0,46	0,32	0	0
TOTAIS	0,46	0,32	2,66	3,14

FONTE: O Autor

Quanto ao desempenho do algoritmo de controle, a partir das informações previamente programadas e que conduziram os chaveamentos/comutações e facilitando o despacho de energia, conclui-se que demonstrou sua eficiência, atuando com precisão e de forma satisfatória, não se observando paralisações nos processos de recarga ou centelhamento no PAC.

O conceito de sistema semi-autônomo foi testado e em função das variações sazonais nos níveis de irradiação solar na localidade, a utilização de armazenamento local de energia gerada pelo SFA se mostrou robusto e adequado ao porte do veículo utilizado. Esse armazenamento de pequeno porte, da ordem de 11kWh, ajudou a mitigar as variações de irradiação solar. Assim pode-se concluir que a eficiência energética desse modelo de solução, é diretamente proporcional a capacidade do BESS. Por exemplo, caso a opção fosse montar um conjunto de capacidade similar, porém, montado com baterias de lítio, estas favoreceriam descargas mais

profundas, o que se traduziria em maior tempo de recarga do VE sem uso da RL.

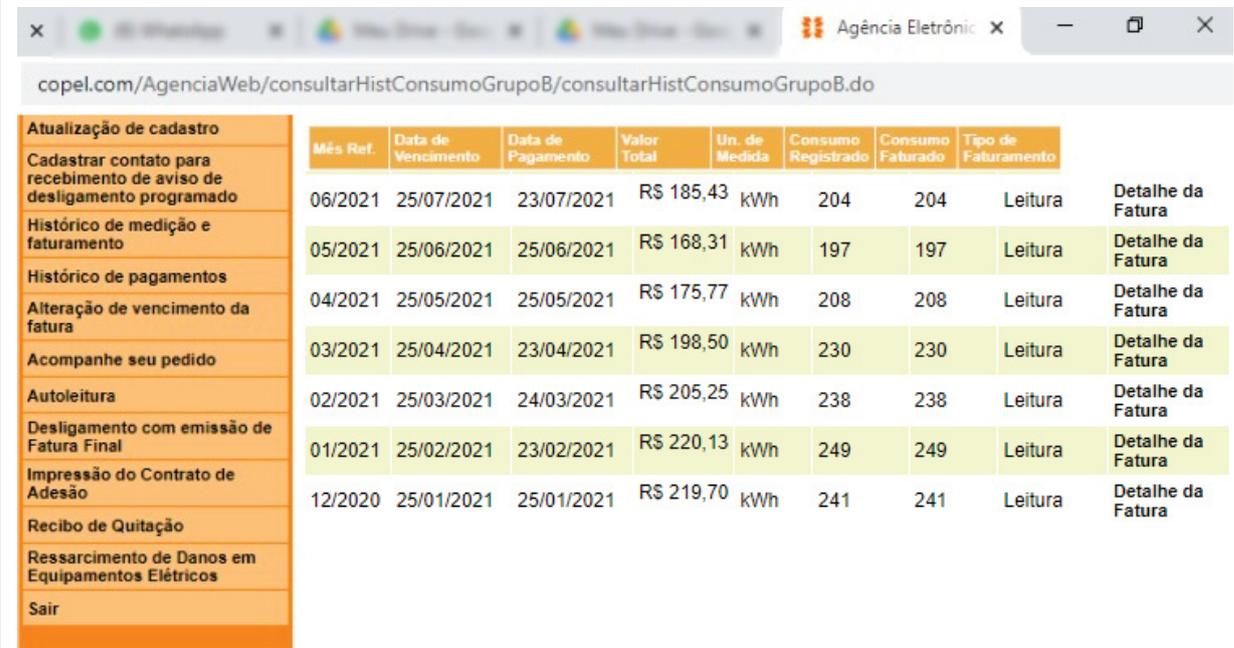
Apesar das limitações impostas pelo modelo de bateria adotado neste projeto, os resultados demonstraram claramente os benefícios da combinação do carregamento gerenciado, uma unidade BESS local em uma estação de carregamento em CA e o emprego de REDs que servem de suporte ao processo de recarga de VEs mitigando o impacto negativo na infraestrutura energética existente.

Ao longo do período entre 29/03/2021 a 12/05/2021 foram feitas as seguintes quantidade de coletas por modo de carga em dias úteis:

- Modo 1 - 12 coletas. 1 expurgada.
- Modo 2 - 10 coletas. 1 expurgada.
- Modo 3 - 4 coletas.

Na Figura 42 estão os seis primeiros meses do ano com o consumo da residência extraídos do site da distribuidora de energia e a na Tabela 13 a apresentação dos valores sumarizados de energia elétrica empregada nos processos de recarga durante o processo de coleta:

FIGURA 42 – Apresentação do consumo real da residência



Mês Ref.	Data de Vencimento	Data de Pagamento	Valor Total	Un. de Medida	Consumo Registrado	Consumo Faturado	Tipo de Faturamento	
06/2021	25/07/2021	23/07/2021	R\$ 185,43	kWh	204	204	Leitura	Detalhe da Fatura
05/2021	25/06/2021	25/06/2021	R\$ 168,31	kWh	197	197	Leitura	Detalhe da Fatura
04/2021	25/05/2021	25/05/2021	R\$ 175,77	kWh	208	208	Leitura	Detalhe da Fatura
03/2021	25/04/2021	23/04/2021	R\$ 198,50	kWh	230	230	Leitura	Detalhe da Fatura
02/2021	25/03/2021	24/03/2021	R\$ 205,25	kWh	238	238	Leitura	Detalhe da Fatura
01/2021	25/02/2021	23/02/2021	R\$ 220,13	kWh	249	249	Leitura	Detalhe da Fatura
12/2020	25/01/2021	25/01/2021	R\$ 219,70	kWh	241	241	Leitura	Detalhe da Fatura

FONTE: Adaptado de COPEL (2021)

TABELA 13 – Tabela sumarizada de energia utilizada em recarga com VE (26 coletas)

Valores de energia utilizados entre 29/03 a 31/05/2021	kWh	% Geral	% Recargas	índice
Recarga (BESS/SFA)	62,17	-	55,52	A
Recarga (RL)	49,8	-	44,48	B
Acréscimo energia elétrica VE (A+B)	111,97	48,7	100	C
Consumo médio da residência	230	100	-	D
Consumo da residência (C+D)	341,97	148,7	-	E
Novo consumo da residência (B+D)	279,8	121,65	-	F
Comparação (E÷F)	62,17	18,15	-	G

FONTE: O Autor

Caso esse valor (C) fosse computado aos 230kWh (valor médio) já consumidos normalmente, a conta de energia residencial, saltaria para aproximadamente 341,97kWh. Trazendo o novo valor de conta R\$ 234,50 (considerando apenas no horário fora de ponta como valor de referência). Equivalente a um aumento de 48% tanto financeiramente como energeticamente.

O valor final agregado ao consumo normal desta residência foi de apenas 49,8kWh, conforme apresentado na Tabela 13 (Recarga - RL). O restante da energia foi despachada através do conjunto BESS/SFA. Por fim, a economia energética ficou em 18,15% comparando-se o total de energia consumida, caso não se utilizasse a solução do gerenciamento da estação de carregamento. Assim pode-se afirmar que a gestão de controle da estação de recarga foi comprovada.

Apesar das limitações impostas a circulação com o VE pela Pandemia COVID-19, foi possível obter os dados mínimos para este trabalho, mas isto porém, não se traduziu em um problema, mas sim, em dados mais próximos de um perfil encontrado na realidade de um usuário comum de VE, sendo um ganho intangível ao levantamento da informação, por ser um cenário real.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A principal preocupação durante do desenvolvimento desse trabalho foi o longo tempo de carregamento aplicado nesse cenário onde os usuários de VEs iniciam recarga utilizando-se apenas a RL; se utilizando da rede em CA, o que tornaria este nível de carregamento crítico a longo termo. Além disso, do ponto de vista da distribuidora de energia, as longas horas de carregamento sobrecarregam os transformadores de distribuição, pois a pequena margem atual de segurança dos dispositivos *tap* (Chapman (2013), Schuch *et al.* (2016)) seria comprometida pelo aumento das cargas conectadas. Além de obrigar a companhia de distribuição a investir em bancos de capacitores, principalmente nas barras radialmente mais afastadas da subestação. O carregamento de VEs dentro de um sistema dinâmico que utiliza geração fotovoltaica combinada com armazenamento local de energia elétrica, oferece inúmeras vantagens, ao mesmo tempo em que favorece a operação da rede local.

O objetivo da técnica proposta nesse trabalho é contribuir com uma topologia que suporte o carregamento em CA de veículos elétricos, em uma estação de carregamento que conte com RL e com geração SFA e BESS, e assim oferecer uma redução no estresse na rede elétrica convencional devido ao recarregamento de forma ilhada, buscando energia elétrica da RL apenas nos momentos desfavoráveis. A ideia proposta foi implementada definindo modos de recarga e priorizando o SOC das baterias utilizadas no BESS, buscando sua melhor condição de trabalho. O armazenamento local foi capaz de regular o despacho de energia para o processo de recarga, e assim reduzir a sobrecarga da RL enquanto que o SFA, simultaneamente, repõe a energia. A possibilidade de inserir a política de preços no algoritmo, melhora esta relação econômica e também oferta melhor eficiência energética ao usuário do VE.

A tecnologia Internet das Coisas (IoT) tem imenso potencial para aplicação em melhoria e desenvolvimento de redes elétricas inteligentes, ou smart grids. No nível da GD, equipamentos ou aplicações IoT podem ser facilmente adicionados ao gerenciamento de REDs, em particular, energia solar e armazenamento de energia local. A utilização dessa técnica pode ajudar a aumentar a controlabilidade e observabilidade do sistema do ponto de vista do usuário final.

A disponibilização da informação durante a recarga, seja pelo aplicativo de celular, que dá ao usuário final maior grau de autonomia sobre o processo de recarga, ou seja através da interface HTML, onde se acompanha o processo de forma passiva, abre-se a possibilidade de expansão, pois sua atuação, que hoje está no modo dedicado ao eletroposto, podendo ser facilmente ampliado e adicionados outros controles e interfaces formando o que se chama *font-end colaborativo*. A facilidade na integração de dispositivos IoT favorece essa proposta, pois se apoia nos conceitos ubíquos dos dias atuais, como redes Wi-Fi, redes celulares 4G/5G e método de programação em ambiente conhecido e não proprietário. Isto tem aumentado o

interesse em pesquisas em áreas multidisciplinares da engenharia elétrica. Limitando-se aqui, apenas para efeito de exemplo, a um cenário composto por outros dispositivos IoT formando um supervisor de energia completo, aplicados a uma microrrede que tem eletropostos, pode-se ampliar os parâmetros de atuação a:

- Prevenir falhas em eletropostos durante o processo de recarga.
- Despachar energia para RL em momentos de alta geração fotovoltaica.
- Integrar sistemas de acompanhamento de meteorologia, buscando o estado ótimo de carga das unidades de bateria locais.
- Redirecionar processos de recarga para momentos específicos, apoiando-se sobre o armazenamento local, evitando assim sobrecarga ao sistema elétrico de potência.
- Otimizar as diversas recargas para buscar os menores custos e maior eficiência energética.
- Administrar o fluxo de carga tanto no sentido do armazenamento local para o veículo quanto o sentido contrário, onde esse veículo passa a atuar como um fator importante dentro do contexto *smart grid*.

A estação de carregamento está em operação desde o final de fevereiro/21, exceto por uma semana, que foi dedicada a reorganização de equipamentos, re-montagens, etc. O sistema de carregamento é usado rotineiramente pelo usuário do veículo iMiEV - Mitsubishi®. Os dados tem fluxo contínuo de coleta e continuarão a ser examinados regularmente como parte do processo de melhoria contínua da pesquisa.

A que se ressaltar a importância no balanceamento entre investimento em um sistema de armazenamento local que apresenta maior densidade de energia e de menor porte, pois esse efetivamente é o ponto principal na tomada de decisão deste tipo de solução tecnológica. Evidentemente, um sistema de baterias de maior densidade energética, ou por exemplo, utilizando-se baterias de lítio, fornecerá uma confiabilidade maior; maior número de recargas em horário de ponta, etc, o que se traduz em maior eficiência energética. A partir dessa aplicação implantada em escala real, percebeu-se vantagem na utilização de um veículo elétrico como modal de transporte.

O trabalho realizado no âmbito desta dissertação abre novos horizontes para desenvolvimentos futuros. Assim, a lista a seguir fornece algumas sugestões para a atualização da proposta e da metodologia apresentada:

- Preparar mais casos de teste, considerando diferentes cenários de penetração de VEs e outras redes de distribuição;
- Comparar a solução de IoT proposta com outros hardwares e outras variantes de algoritmos de controle;
- Investigação adicional utilizando-se de um BESS formado por baterias de lítio, simulando descargas mais profundas;
- Estudar a integração com outros equipamentos IoT para incluir a possibilidade de despacho do excedente de energia a RL, o que tornaria o projeto ainda mais interessante

financeiramente;

- Investigar problemas de função multi-objetivo na programação da operação do dia seguinte, como contexto, usando meta-heurística;
- Utilizar o protocolo OCPP de comunicação entre o VE e a estação de carregamento para melhorar as informações prestadas ao usuário e complementar o banco de dados para a tomada de decisão.

Estes trabalhos, quando desenvolvidos, se tornam aderentes as diversas pesquisas de empresas do setor elétrico, como por exemplo a Nota Técnica nº 0076/2021-SRD/ANEEL, pois representam ganho na previsão de consumo energético, auxiliando na previsão de demanda.

Referências

- ABB Group. **ABB Group**. 2019. Disponível em: <<https://new.abb.com/>>. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- ADB. **Asian Development Bank**. 2018. <https://www.adb.org/publications/battery-energy-storage-system-handbook>. Citado na página 34.
- AMANCI, A. Z.; DAWSON, F. P. Synchronization system with zero-crossing peak detection algorithm for power system applications. In: **The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA** -. [S.l.: s.n.], 2010. p. 2984–2991. Citado na página 62.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional-PRODIST**. 2021. Disponível em: <<http://www.aneel.gov>>. Citado na página 18.
- ANSARI, M.; AL-AWAMI, A. T.; SORTOMME, E.; ABIDO, M. A. Coordinated bidding of ancillary services for vehicle-to-grid using fuzzy optimization. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 6, n. 1, p. 261–270, jan 2015. Citado na página 24.
- ARANCIBIA, A.; STRUNZ, K.; MANCILLA-DAVID, F. A unified single- and three-phase control for grid connected electric vehicles. **IEEE Transactions on Smart Grid**, IEEE, v. 4, n. 4, p. 1780–1790, 2013. ISSN 19493053. Citado na página 41.
- BELLINI, A.; BIFARETTI, S.; GIANNINI, F. A robust synchronization method for centralized microgrids. In: **2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 4587–4594. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.
- BLAABJERG, F.; IONEL, D. M. Livro. **Renewable energy devices and systems with simulations in MATLAB® and ANSYS®**. [S.l.]: content.taylorfrancis.com, 2017. 1–402 p. ISBN 9781498765831. Citado na página 32.
- BUCHMANN, I. livro. **Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers**. Cadex Electronics Inc., 2016. Disponível em: <www.batteryuniversity.com>. Citado 4 vezes nas páginas 60, 124, 125 e 126.
- BUI, V.-H.; HUSSAIN, A.; KIM, H.-M. A Strategy for Optimal Microgrid Operation Considering Vehicle-to-Grid Service. **International Journal of Control and Automation**, Science and Engineering Research Support Society, v. 10, n. 3, p. 405–418, mar 2017. ISSN 2005-4297. Citado na página 25.
- CHADEMO. Technical specifications of quick charger for the electric vehicle. **CHAdeMO Protoc. Rev**, p. 1–170, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 65, 114 e 115.
- CHAPMAN, S. Livro. **Fundamentos de máquinas elétricas**. [S.l.]: books.google.com, 2013. Citado na página 92.
- CHO, C.; JEON, J.-H.; KIM, J.-Y.; KWON, S.; PARK, K.; KIM, S. Active synchronizing control of a microgrid. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 26, n. 12, p. 3707–3719, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

CIGRÈ. International Council for Large Electric Systems, **CIGRÈ**. 2019. Disponível em: <<https://www.cigre.org/>>. Citado na página 19.

COBB, J. One Million Global Plug-In Sales Milestone Reached. **Hybridcars.com**, 2015. Disponível em: <<http://www.hybridcars.com/one-million-global-plug-in-sales-milestone-reached/>>. Citado na página 42.

COPEL. Website, **Companhia Paranaense de Energia - Tarifa Branca**. 2021. Disponível em: <<https://www.copel.com/>>. Citado 3 vezes nas páginas 83, 84 e 90.

CRESESB. Website, **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica**. 2020. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#localidade_4185>. Citado 3 vezes nas páginas 48, 73 e 74.

DATLINGER, C.; HIRZ, M. An extended approach for validation and optimization of position sensor signal processing in electric drive trains. **Electronics**, v. 8, n. 1, 2019. ISSN 2079-9292. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2079-9292/8/1/77>>. Citado na página 120.

DAWOUD, S. M.; LIN, X.; OKBA, M. I. Hybrid renewable microgrid optimization techniques: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Pergamon, v. 82, p. 2039–2052, fev 2018. ISSN 18790690. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117311383>>. Citado na página 22.

DENTON, T. Livro. **Electric and hybrid vehicles**. books.google.com, 2016. Disponível em: <<https://www.amazon.com/Electric-Hybrid-Vehicles-Tom-Denton/dp/0367273233>>. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 118.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. book. **Solar Engineering of Thermal Processes**. John Wiley & Sons, Inc., 2013. 992 cites:. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/9781118671603>>. Citado na página 30.

ENEL. The Faster and Smarter Electric Vehicle Charger, **ENEL**. 2020. Disponível em: <<https://evcharging.enelx.com/>>. Citado na página 67.

ENELX. **Enelx**. 2019. Disponível em: <<https://support-emobility.enelx.com/hc/en-us/>>. Citado na página 36.

ENERGY. Department of Energy (DOE), **Summary report: 2012 DOE microgrid workshop**. 2012. 1–33 p. Disponível em: <<http://energy.gov/sites/prod/files/2012MicrogridWorkshopReport09102012.pdf>>. Citado na página 19.

ENGPROCESS. Website, **Você sabe o que é MQTT?** 2018. Disponível em: <<https://engprocess.com.br/mqtt/>>. Citado na página 55.

EPA. **Environmental Protection Agency**. 2019. Disponível em: <<https://www.fueleconomy.gov/feg/download.shtml>>. Citado 3 vezes nas páginas 44, 45 e 87.

EV BITZ. **EV Bitz**. 2019. Disponível em: <<http://evbitz.uk/EVBitz.uk/Welcome.html>>. Citado na página 115.

FLOREA, B. C.; TARALUNGA, D. D. Blockchain iot for smart electric vehicles battery management. **Sustainability**, MDPI AG, v. 12, n. 10, p. 3984–3984, 2020. ISSN 2071-1050. 4 cites:. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/su12103984>>. Citado na página 124.

FREEMANTLE. **Freemantle**. 2019. Disponível em: <<https://freemantle.co.uk/>>. Citado na página 44.

GIERAS, J. Livro. **Electrical Machines: Fundamentals of Electromechanical Energy Conversion**. books.google.com, 2016. Disponível em: <shorturl.at/aqs48>. Citado na página 119.

GONG, X.; RANGARAJU, J. Taking charge of electric vehicles-both in the vehicle and on the grid. **Texas Instruments, Dallas, TX, USA**, 2018. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/wp/szzy007/szzy007.pdf>>. Citado 3 vezes nas páginas 39, 40 e 41.

HAN, X.; LU, L.; ZHENG, Y.; FENG, X.; LI, Z.; JIANQIU, L.; OUYANG, M. A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle. **eTransportation**, v. 1, p. 105, 08 2019. Citado 3 vezes nas páginas 66, 126 e 127.

HU, J.; MORAIS, H.; SOUSA, T.; LIND, M. Electric vehicle fleet management in smart grids: A review of services, optimization and control aspects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier BV, v. 56, p. 1207–1226, apr 2016. Citado na página 25.

HUSSAIN, A.; BUI, V.; KIM, H. A resilient and privacy-preserving energy management strategy for networked microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 9, n. 3, p. 2127–2139, maio 2018. ISSN 1949-3053. Citado na página 33.

IEA. International Energy Agency - World Energy Outlook (WEO) 2020, **IEA**. 2020. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>. Citado 5 vezes nas páginas 14, 15, 27, 42 e 46.

IEC. IEC 61851-21-1:2017. In: **IEC 61851-21-1:2017**. [S.l.: s.n.], 2017. Citado 2 vezes nas páginas 66 e 82.

IEC. **International Electrotechnical Commission**. 2019. Disponível em: <<https://www.iec.ch/>>. Citado 3 vezes nas páginas 19, 35 e 117.

IEC62196. **Standard - Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles - Part 1: General requirements IEC 62196-1:2014**. 2014. Disponível em: <<https://www.iec.ch/>>. Citado 3 vezes nas páginas 48, 65 e 114.

IEEE Standard Association. **IEEE**. 2019. Disponível em: <<https://www.ieee.org/>>. Citado na página 19.

IEEE Standard Association 1547. IEEE Std. 1547-2018. Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. **IEEE Std 1547-2018 (Revision of IEEE Std 1547-2003)**, p. 1–138, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 19, 20, 61 e 71.

JHA, M.; BLAABJERG, F.; KHAN, M. A.; KURUKURU, V. S. B.; HAQUE, A. Intelligent control of converter for electric vehicles charging station. **Energies**, v. 12, n. 12, p. 2334, jun 2019. ISSN 19961073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/12/12/2334>>. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 33.

LARMINIE, J. Electric vehicle technology explained 2nd edition. **Whiley and Sons Ltd**, 2012. 2 cites: <https://scholar.google.com/scholar>. Citado na página 119.

LASSETER, B. Microgrids [distributed power generation]. In: **2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194)**. IEEE, 2002. v. 1, p. 146–149. ISBN 0-7803-6672-7. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/917020/>>. Citado na página 22.

LASSETER, R. MicroGrids. In: **2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309)**. IEEE, 2002. v. 1, p. 305–308. ISBN 0-7803-7322-7. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/985003/>>. Citado na página 22.

LEE, C.-T.; JIANG, R.-P.; CHENG, P.-T. A grid synchronization method for droop-controlled distributed energy resource converters. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 49, n. 2, p. 954–962, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

LOPES, J. A. P.; SOARES, F. J.; ALMEIDA, P. M. R. Integration of Electric Vehicles in the Electric Power System. **Proceedings of the IEEE**, v. 99, n. 1, p. 168–183, jan 2011. ISSN 0018-9219. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5593864/>>. Citado na página 23.

LU, X.; ZHOU, K.; YANG, S. Multi-objective optimal dispatch of microgrid containing electric vehicles. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier BV, v. 165, p. 1572–1581, nov 2017. ISSN 0959-6526. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 28.

MARRA, F.; YANG, G. Y.; TRAEHOLT, C.; LARSEN, E.; OSTERGAARD, J.; BLAZIC, B.; DEPRez, W. EV Charging Facilities and Their Application in LV Feeders With Photovoltaics. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 4, n. 3, p. 1533–1540, sep 2013. ISSN 1949-3053. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6575166/>>. Citado na página 24.

MITSUBISHI. **Mitsubishi**. 2021. <https://www.mitsubishicars.com/>. Citado na página 39.

MONOLITHICPOWER.COM. **monolithicpower.com**. 2019. Disponível em: <monolithicpower.com>. Citado na página 120.

MOURA. **Moura**. 2021. <https://www.moura.com.br/> visitado em janeiro/21. Citado 3 vezes nas páginas 60, 66 e 85.

OLIVARES, D. E.; MEHRIZI-SANI, A.; ETEMADI, A. H.; CAÑIZARES, C. A.; IRAVANI, R.; KAZERANI, M.; HAJIMIRAGHA, A. H.; GOMIS-BELLMUNT, O.; SAEEDIFARD, M.; PALMA-BEHNKE, R.; JIMÉNEZ-ESTÉVEZ, G. A.; HATZIARGYRIOU, N. D. Trends in microgrid control. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 5, n. 4, p. 1905–1919, 2014. ISSN 19493053. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 33.

ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico, **Requisitos Técnicos Mínimos para a Conexão à Rede Básica**. 2018. Disponível em: <<http://ons.org.br/>>. Citado na página 18.

PEDRONI, L. Semana Científica 2004. Memory clean development mechanism: opportunities and challenges. **6. Semana Científica - Turrialba**, sidalc.net, 2004. Disponível em: <<http://www.sidalc.net>>. Citado na página 30.

PEREIRA, O.; GONÇALVES, F. Dimensionamento de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: Estudo de caso do sistema de tubarão-sc. **Revista Brasileira de Energia**, neosolar.com.br, 2008. 26 cites: <https://scholar.google.com/scholar>. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/>>. Citado na página 32.

POLONI, P. **Sincronização de microrrede com diferentes fontes de geração distribuída a partir de controle baseado em hierarquia de agentes**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2020. Disponível em: <<http://tede.unioeste.br/handle/tede/4923>>. Citado na página 20.

PROKOP, L.; VANTUCH, T.; MIŠÁK, S. Multi objective optimization in charge management of micro grid based multistory carpark. **Energies**, MDPI AG, v. 11, n. 7, p. 1791, jul 2018. Citado na página 26.

PUMPS, E. Website, **AC INDUCTION MOTORS VS. PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS**. 2017. Disponível em: <<https://empoweringpumps.com/ac-induction-motors-versus-permanent-magnet-synchronous-motors-fuji>>. Citado na página 119.

RENAULT. **Renault**. 2019. Disponível em: <<https://group.renault.com/>>. Citado 3 vezes nas páginas 120, 121 e 122.

RODRIGUES, Y. R.; SOUZA, A. Z. de; RIBEIRO, P. An inclusive methodology for plug-in electrical vehicle operation with g2v and v2g in smart microgrid environments. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier, v. 102, p. 312–323, 2018. Citado na página 26.

SABER, A. Y.; VENAYAGAMOORTHY, G. K. Plug-in Vehicles and Renewable Energy Sources for Cost and Emission Reductions. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 58, n. 4, p. 1229–1238, 2011. Citado na página 23.

SAE. **SAE Electric Vehicle and Plug in hybrid electric vehicle Conductive Charge Coupler**. 2017. Citado 3 vezes nas páginas 65, 114 e 115.

SCHNEIDER Electric. **Schneider Electric**. 2019. Disponível em: <<https://www.schneider-electric.us/en/>>. Citado na página 116.

SCHREIBER, M. **Gerenciador de Armazenamento e Demando por IoT para ambiente Smart Grid**. Dissertação (Mestrado) — Instituto LACTEC, 2020. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/profile/Marcos-Schreiber>>. Citado 3 vezes nas páginas 53, 54 e 56.

SCHUCH, L.; BELTRAME, R.; CAZAKEVICIUS, F.; ... Computador eletrônico de taps aplicado a um transformador de distribuição monofásico. [swge.inf.br](http://www.swge.inf.br), 2016. Query date: 2021-08-31 13:37:22. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/anais/SBSE2012/PDFS/ARTIGOS/96769.PDF>>. Citado na página 92.

SOARES, J.; MORAIS, H.; SOUSA, T.; VALE, Z.; FARIA, P. Day-ahead resource scheduling including demand response for electric vehicles. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 4, n. 1, p. 596–605, mar 2013. Citado na página 24.

SUHANKO, D. **Wemos ESP32 com OLED onboard • Do bit Ao Byte**. DJames Suhanko, 2017. Disponível em: <<https://www.dobitaobyte.com.br/wemos-esp32-com-oled-onboard/>>. Citado na página 49.

SUN, Y.; ZHONG, C.; HOU, X.; YANG, J.; HAN, H.; GUERRERO, J. M. Distributed cooperative synchronization strategy for multi-bus microgrids. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 86, p. 18–28, 2017. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061516309644>>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

TAHIM, A. **Controle de Microrredes de Distribuição de Energia Elétrica em Corrente Contínua**. 1–238 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2015. Citado na página 22.

TEMPO.COM. Website, **Histórico da previsão do tempo para Curitiba - PR**. 2021. Disponível em: <<https://www.tempo.com/curitiba-sactual.htm>>. Citado 5 vezes nas páginas 74, 77, 78, 81 e 85.

WLTP. **Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure**. 2019. Disponível em: <<https://wltpfacts.eu/>>. Citado 3 vezes nas páginas 42, 43 e 122.

YANG, J.; HE, L.; FU, S. Applied energy. **An improved PSO-based charging strategy of electric vehicles in electrical distribution grid**, Elsevier BV, v. 128, p. 82–92, sep 2014. Citado na página 24.

ZUIDEMA, S. New Motion, **EV Driver Survey Report 2020**. 2020. <https://newmotion.com/>. Citado 4 vezes nas páginas 27, 28, 42 e 46.

Apêndices

APÊNDICE A – Cenário 1 - BESS/SFA

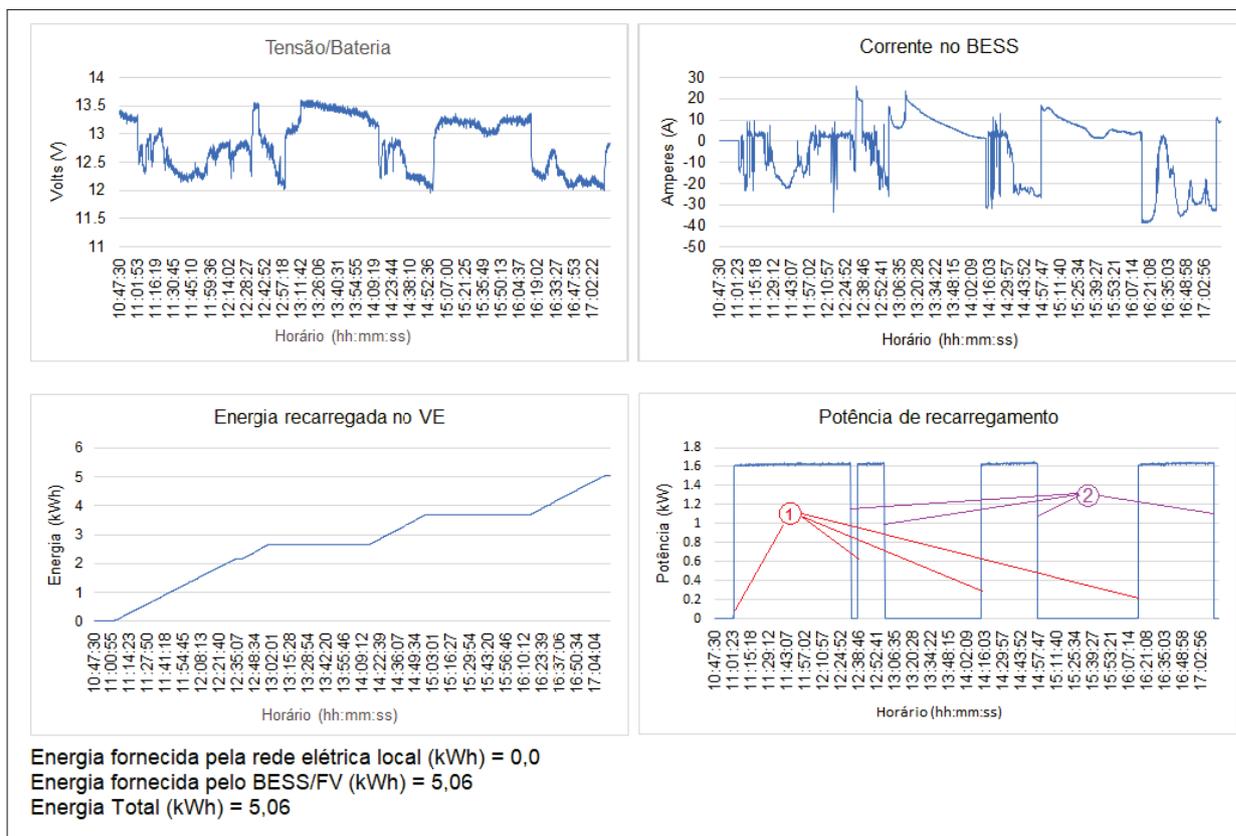
Compêndio de medições realizadas na estação de carregamento (cenários 1, 2 e 3), com implementação do sistema GIVEc.

Nesse primeiro apêndice, apresentam-se os gráficos totalizados realizadas durante o período de 29/03/2021 a 05/04/2021 para a aplicação do Modo 1. A coleta do dia 01/04 foi expurgada. O dia 02/04 foi um feriado (Páscoa) e por esse motivo não houve recarga relevante.

Os gráficos de Tensão/Bateria, Corrente no BESS, Energia recarregada no VE e Potência de recarregamento aqui apresentados demonstram as similaridades com o apresentado no texto, indicando um gerenciamento efetivo do sistema GIVEc. As poucas diferenças se dão, como informado, na diferença do horário de recarga em função das medidas restritivas causadas pela pandemia COVID-10, o que obrigou a mudança no cronograma.

Informações coletadas em 29/03/2021.

FIGURA 43 – Gráficos totais das leituras referentes ao dia 29/03/21



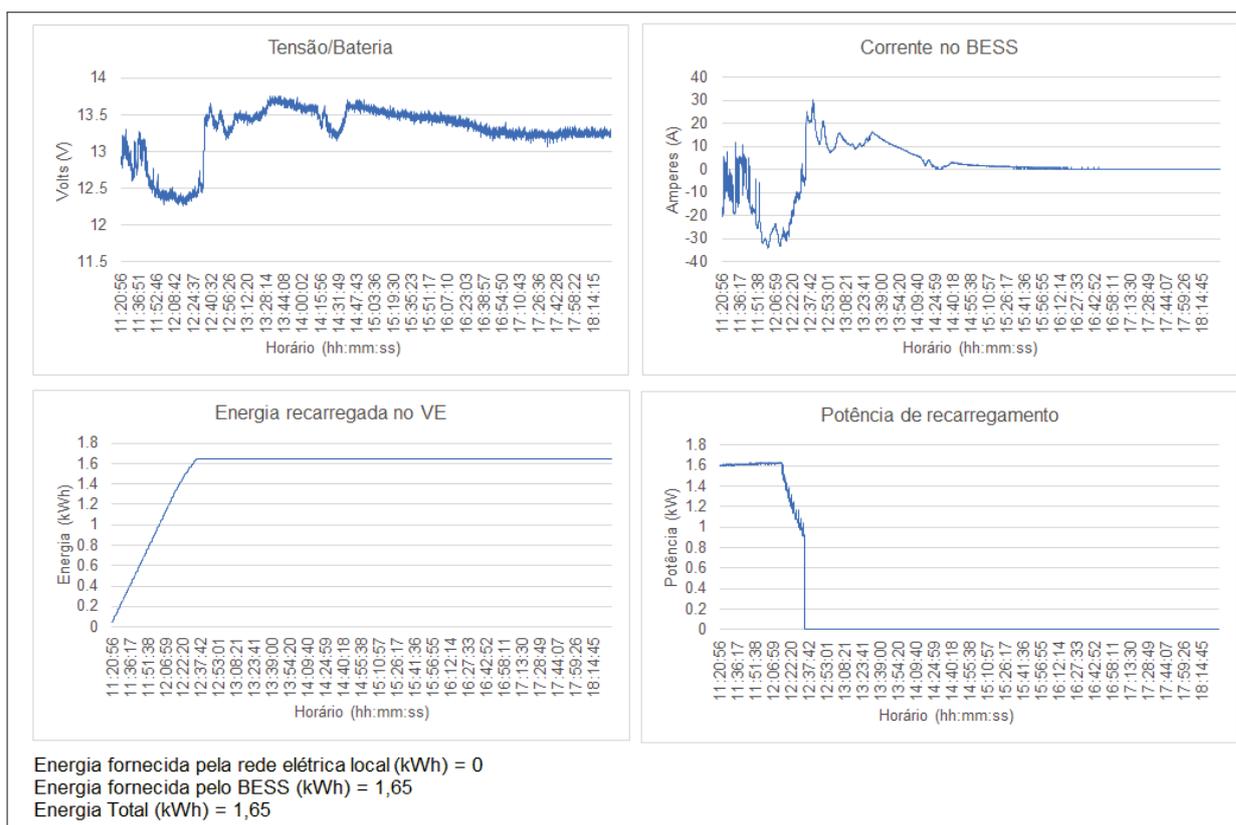
FONTE: O Autor

Condição climática neste dia: Dia ensolarado, recarga exclusivamente no modo FV.

No gráfico *Potência de recarregamento*, os intervalos destacados em que se vê a rampa de subida (1) ou descida (2), têm-se o acionamento da recarga e a interrupção desta.

Informações coletadas em 30/03/2.021.

FIGURA 44 – Gráficos totais das leituras referentes ao dia 30/03/21

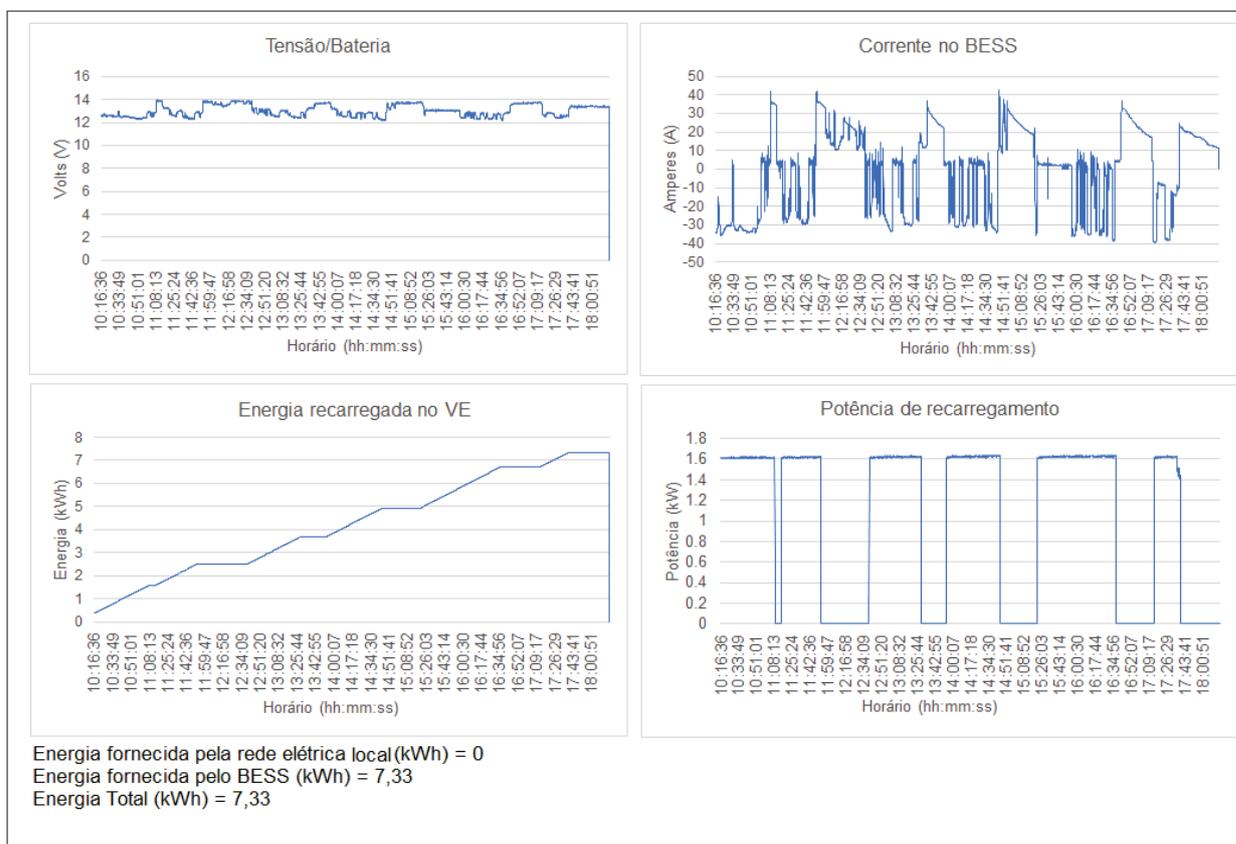


FONTE: O Autor

Condição climática neste dia: Dia nublado por toda a manhã, sol aparecendo no início da tarde. VE necessitando de pouca recarga. Baterias estacionárias provendo essa recarga.

Informações coletadas em 31/03/2.021.

FIGURA 45 – Gráficos totais das leituras referentes ao dia 31/03/21

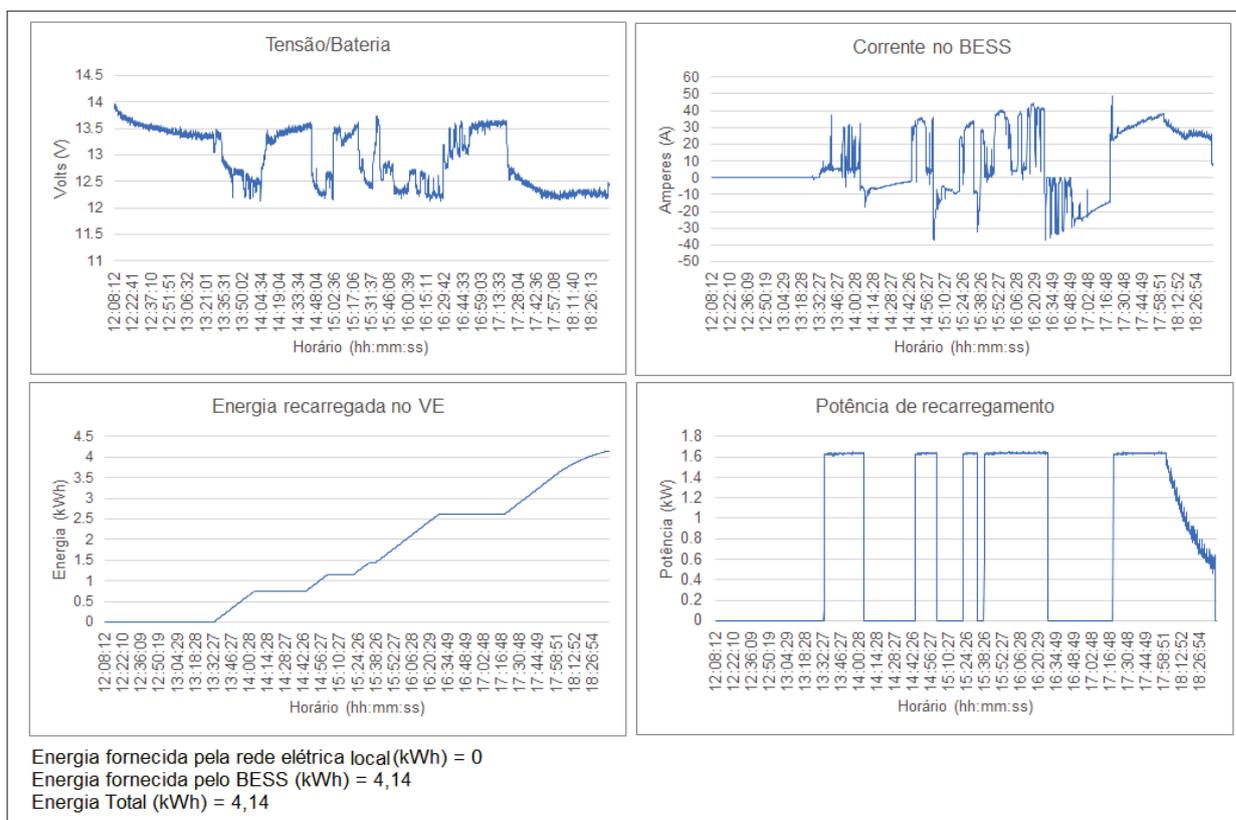


FONTE: O Autor

Condição climática neste dia: Dia ensolarado. VE utilizado antes das 10 horas da manhã. Recarga interrompida múltiplas vezes para uso não programado do VE.

Informações coletadas em 05/04/2.021.

FIGURA 46 – Gráficos totais das leituras referentes ao dia 05/04/21



FONTE: O Autor

Condição climática neste dia: Dia nublado parte da manhã. Sol aparecendo no meio do dia. Baterias estacionárias provendo essa recarga.

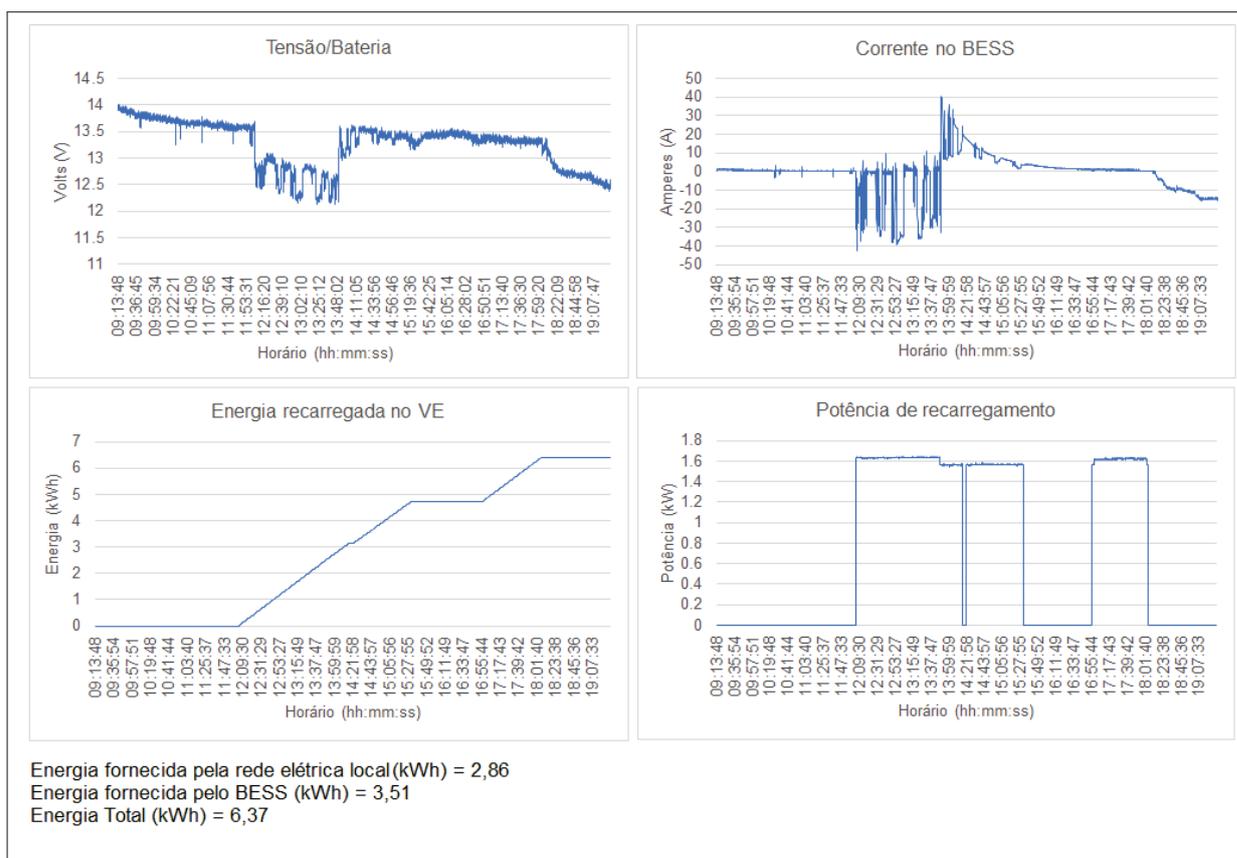
APÊNDICE B – Cenário 2 - MISTO

O segundo apêndice apresenta os gráficos também totalizados realizadas durante o período de 09/04/2.021 a 22/04/2.021 para a aplicação do Modo 2. O período entre os dias 15/04 a 21/04 pertencem a outro modo. O dia 21/04 foi um feriado (Tiradentes) e por esse motivo não houve recarga relevante.

Os gráficos de Tensão/Bateria, Corrente no BESS, Energia recarregada no VE e Potência de recarregamento aqui apresentados demonstram as similaridades com o apresentado no texto, indicando um gerenciamento efetivo do sistema GIVEc. As poucas diferenças se dão, como informado, na diferença do horário de recarga em função das medidas restritivas causadas pela pandemia COVID-10, o que obrigou a mudança no cronograma.

Informações coletadas em 09/04/2.021.

FIGURA 47 – Gráficos totais das leituras referentes ao dia 09/04/21

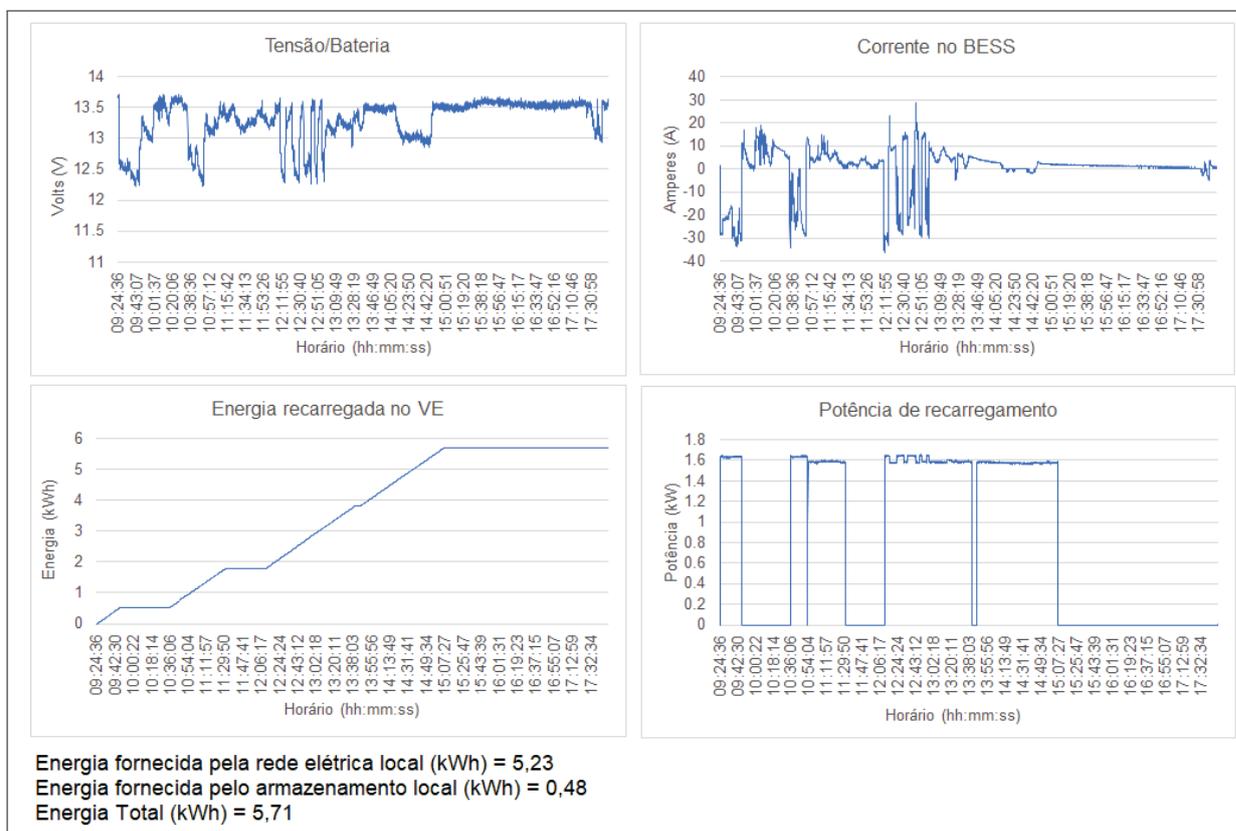


FONTE: O Autor

Condição climática neste dia: Dia com sol entre nuvens. Nebulosidades se intensificaram ao longo da tarde.

Informações coletadas em 12/04/2.021.

FIGURA 48 – Gráficos totais das leituras referentes ao dia 12/04/21

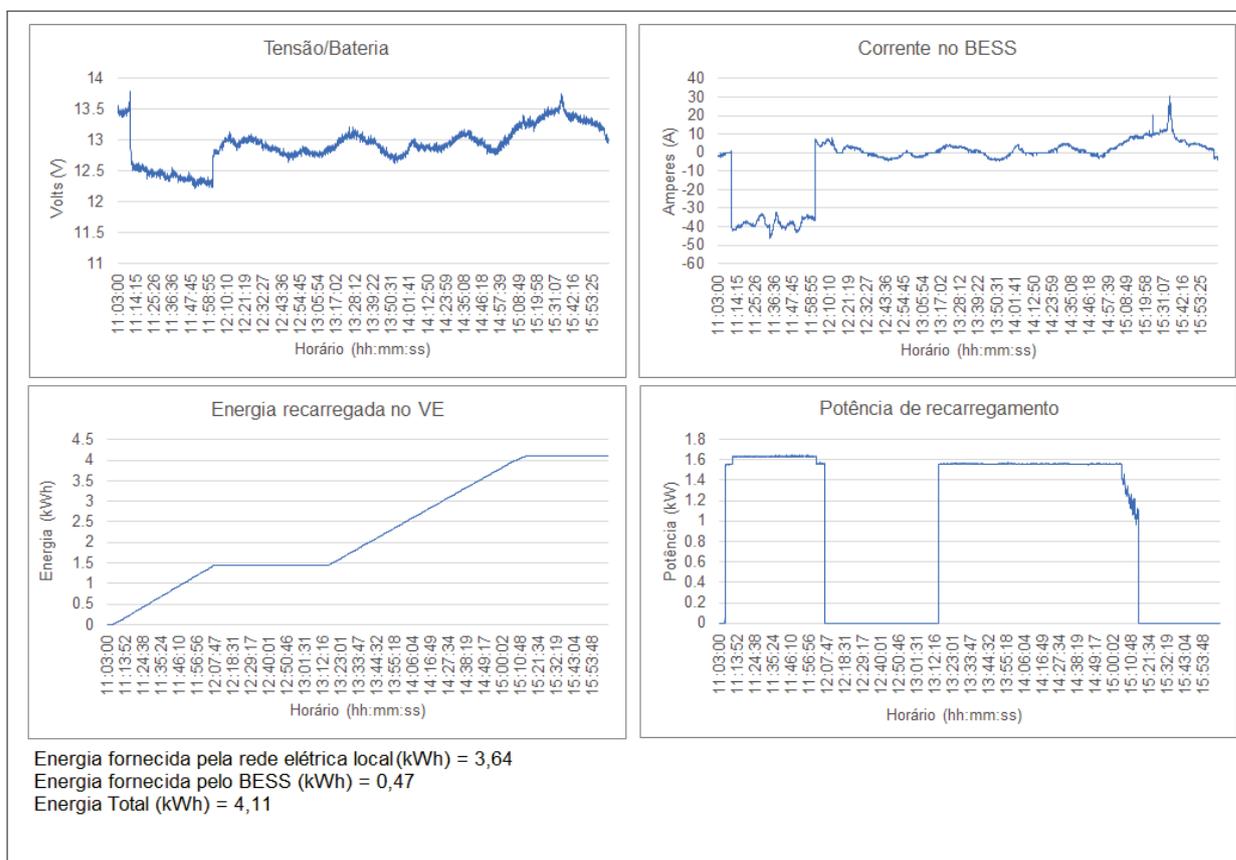


FONTE: O Autor

Condição climática neste dia: Dia com nebulosidades que se intensificaram ao longo do período, com pouca insolação.

Informações coletadas em 13/04/2.021.

FIGURA 49 – Gráficos totais das leituras referentes ao dia 13/04/21

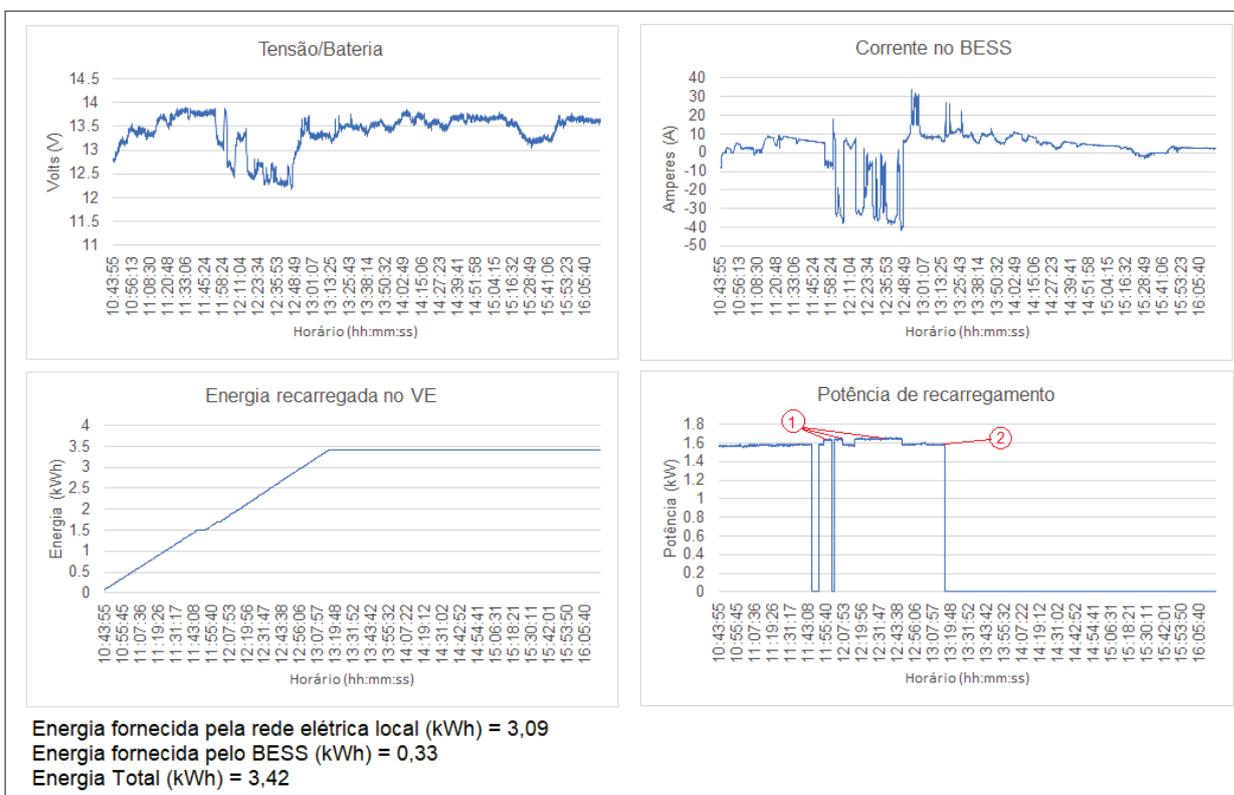


FONTE: O Autor

Condição climática neste dia: Dia com alta nebulosidade, baixa intensidade luminosa, propício a chuvas.

Informações coletadas em 14/04/2.021.

FIGURA 50 – Gráficos totais das leituras referentes ao dia 14/04/21

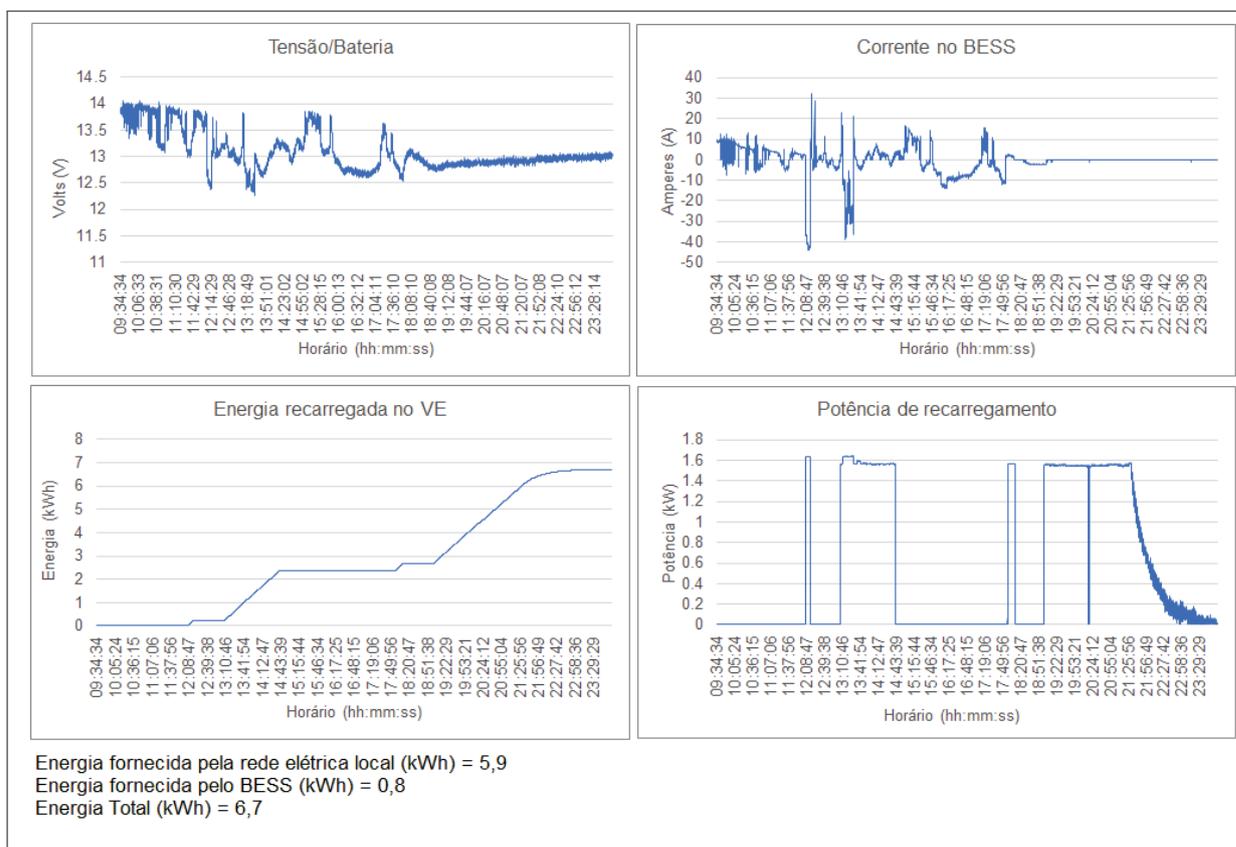


FONTE: O Autor

Condição climática neste dia: Dia com alta nebulosidade, baixa intensidade luminosa, propício a chuvas. Os pontos destacados (1) e (2), foram comentados no texto. São os momentos onde se percebe a carga através do sistema FV+BESS (1) e em (2), através da rede local.

Informações coletadas em 22/04/2.021.

FIGURA 51 – Gráficos totais das leituras referentes ao dia 22/04/21



FONTE: O Autor

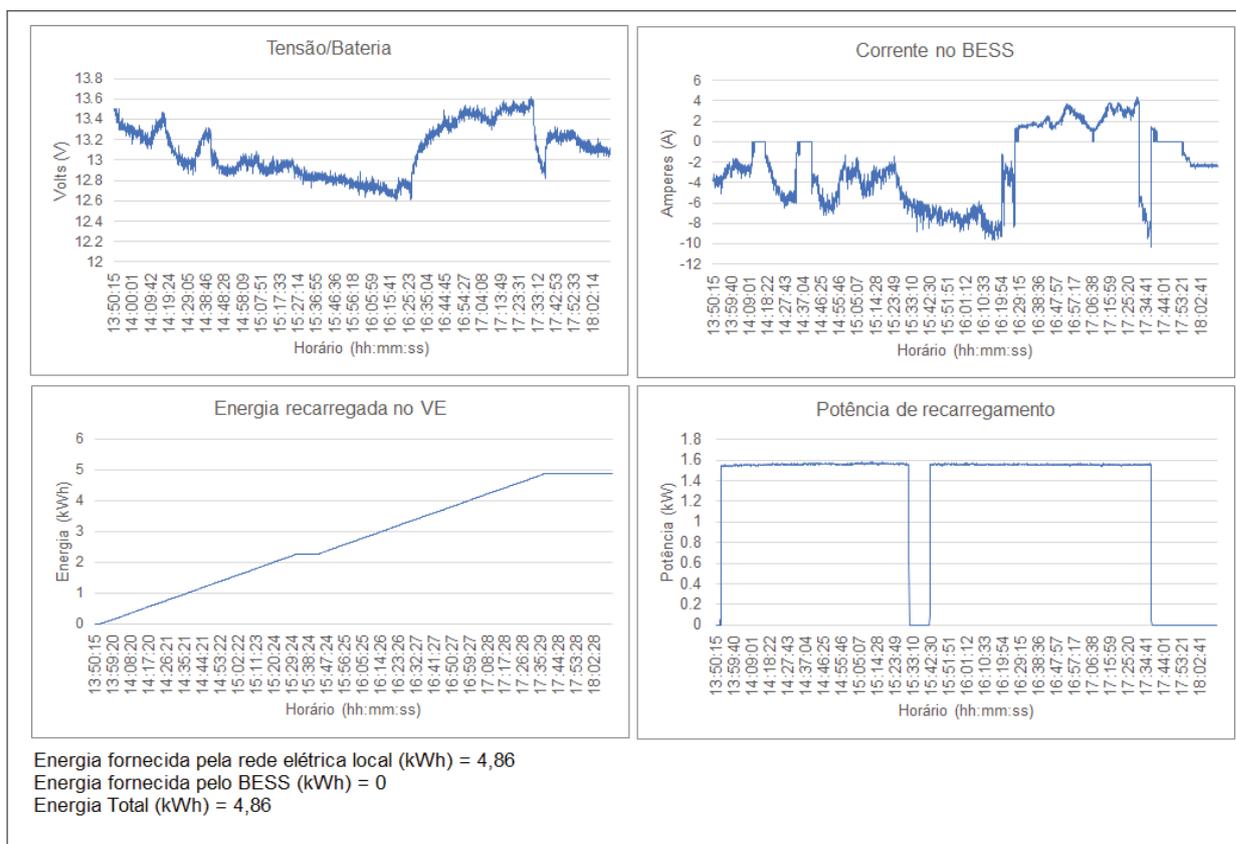
Condição climática neste dia: Dia com alta nebulosidade, baixa intensidade luminosa e chuvas ocasionais.

APÊNDICE C – Cenário 3 - REDE LOCAL

Este último apêndice apresenta os gráficos totalizados realizadas durante os dias 07/05 e 12/05/2021 para a aplicação do Modo 3. As outras coletas dentro desse modo foram feitas em finais de semana e, por isso foram expurgados.

Informações coletadas em 07/05/2021.

FIGURA 52 – Gráficos totais das leituras referentes ao dia 07/05/21

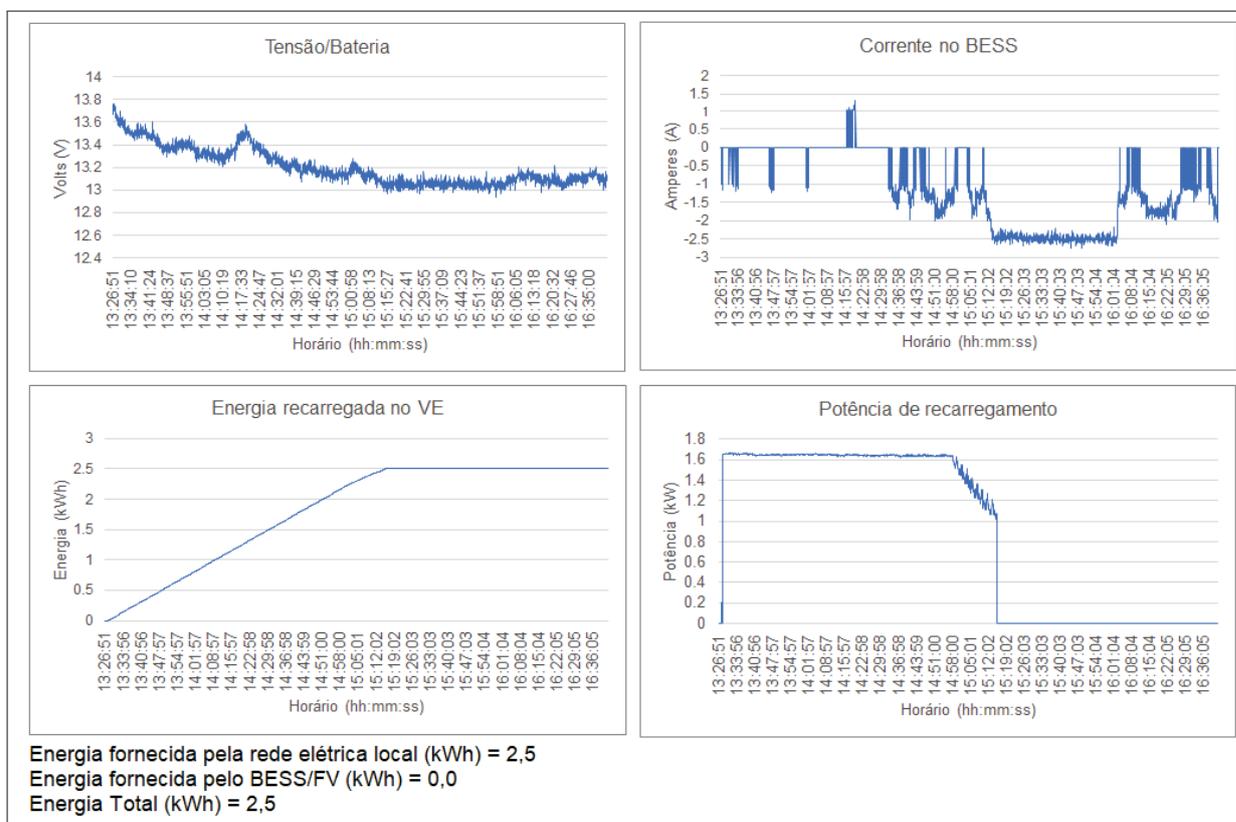


FONTE: O Autor

Condição climática neste dia: Dia com alta nebulosidade, baixa irradiação solar e chuvas ocasionais.

Informações coletadas em 12/05/2.021.

FIGURA 53 – Gráficos totais das leituras referentes ao dia 12/05/21



FONTE: O Autor

Condição climática neste dia: Dia de intensa nebulosidade e chuva. Baixa irradiação solar durante o período.

Anexos

ANEXO A – Conectores, Cabos, Comunicação entre VE e estação de recarga

Nesse apêndice estão demais informações sobre as estações de recarga como conectores, cabos, etc.

Cada tipo de carregador possui um conjunto associado de conectores projetados para uso de baixa ou alta potência, para carregamento CA ou CC, carga lenta ou rápida e se a direção de conexão é entre o carro e a rede elétrica ou vice versa.

A seção a seguir oferece uma descrição detalhada dos três principais tipos de conectores disponíveis. Nenhum desses conectores são intercambiáveis, o que significa que um carro com uma tomada tipo 1 não pode carregar usando um tipo 2 e vice-versa. É como um veículo a gasolina que não pode ser abastecido com diesel. São eles:

- Tipo 1 e 2- Conector de recarga monofásica (1) ou trifásica (2) em formato carga lenta CA e normalmente instalado no veículo. Cabos conectorizados são entregues na aquisição do veículo e usados para se conectar o VE através de uma tomada CA regular que varia em função do plugue “padrão” daquele continente ou país, como por exemplo, Reino Unido de 3 pinos (BS 1363) e Industrial Commando (IEC 60309). Os principais modelos encontrados nos veículos são:
 1. Tipo Americano 1 SAE (2017)
 2. Tipo Europeu 2 IEC62196 (2014)
- Tipo 3- Para carregamento rápido CC, o (CHAdeMO (2018)) e SAE Combo (também chamado de CCS que significa, “Combo Charging System”) são os conectores mais utilizados pelos fabricantes de carros elétricos.
- Tipo Tesla, sendo um conector proprietário.

Em relação aos tipos de conectores 2 e 3, estes possuem também a condição de retorno para sinalização e monitoramento. Apenas conectores tipo 1 não dispõe esta função. Todos estes conectores possuem algum tipo de travamento mecânico para evitar desconexão acidental.

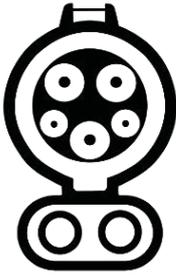
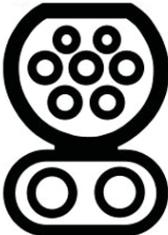
No lado do veículo, os modelos VE europeus (por exemplo: Audi[®], BMW[®], Renault[®], Mercedes [®], VW[®] e Volvo[®]) tendem a ter entradas Tipo Europeu 2 e o padrão rápido CCS correspondente, enquanto os fabricantes asiáticos (por exemplo: Nissan[®] e Mitsubishi[®]) preferem uma entrada Tipo Americano 1 e CHAdeMO em combinação. Isso nem sempre se aplica, como por exemplo, o Hyundai Ioniq Electric[®] e o Toyota Prius Plug-In[®] sendo portanto, tratados como exceções.

O padrão CHAdeMO, padrão adotado predominantemente nos mercados asiáticos, é um método de carregamento rápido para VE e que oferece por volta de 60 kW e em trinta minutos pode-se atingir até 80% da carga das baterias considerando um modelo de VE de baixa autonomia. A tensão máxima reconhecida é de $500V_{CC}$ e a corrente máxima é de $125A_{CC}$. Uma nova revisão do padrão CHAdeMO em abril de 2019, chamada de versão 2.0, aumentou estes valores para respectivamente: tensão máxima reconhecida é de $1000V_{CC}$ e a corrente máxima é de $400A_{CC}$.

Há ainda um terceiro conector importante usado pela fabricante Tesla[®]. Esse conector é usado em estações de carregamento Supercharger Tesla[®] de nível 2 e nível 3 e são compatíveis apenas com carros Tesla[®]. Normalmente, este fabricante, também fornece junto com o veículo um “plugue” cabeado com adaptador para o formato CHAdeMO (CHAdeMO (2018)) ou SAE J1772 (SAE (2017)), conforme país ou continente (local de venda).

Já os conectores CCS foram baseados no conector Tipo 1, o padrão norte-americano, e no conector Tipo 2, o padrão europeu, conforme descrito na IEC 62196-2. Um dos desafios do CCS era desenvolver um padrão de entrada no veículo compatível com os conectores de veículo CA existentes e contatos CC adicionais. Tanto para o Tipo 1 como para o Tipo 2 isso foi conseguido estendendo a entrada com dois contatos CC adicionais abaixo dos contatos CA e mais os conectores de comunicação existentes. As novas configurações resultantes são comumente conhecidas como Combo 1 e Combo 2. A Figura 54 mostra a conectorização dos modelos abordados por tipo de carga.

FIGURA 54 – Tipos de conectores padronizados atualmente em uso

Carga Lenta (Corrente Alternada)	Carga Rápida (Corrente Contínua)	Combo (Corrente Contínua e Alternada)
GBT Tipo 1 SAE J1772 (E.U.A.) 	CHAdeMO (E.U.A. e Japão) 	CCS Tipo 1 (E.U.A. e Japão) 
GBT Tipo 2 (Mennekes) Europa IEC 62196 	Supercargador Tesla (E.U.A. e Japão) 	CCS Tipo 2 Europa 

FONTE: Adaptado de EV BITZ (2019)

A.1 Cabos e formas de conexões

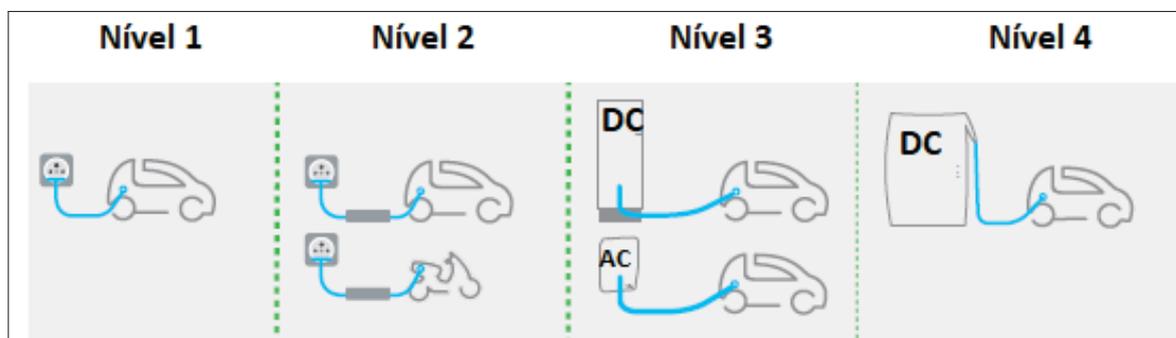
Em termos de formatos de cabos e conexões possíveis de serem encontrados nos VE tem-se três casos. São eles:

- Caso A- Conexão entre VE e a rede de recarga usando um cabo e plugue permanentemente ligado ao VE. Encontrados em carregadores nível 1 e 2.
- Caso B- Ligação entre VE e a rede de recarga se utiliza de um cabo destacável equipado com plugue e conector que podem ser desacoplados em ambos os lados. Tanto estação de recarga quanto o VE tem conectores tipo fêmea. Pode ser encontrado em alguns carregadores nível 3, quando CA.
- Caso C- Ligação VE à rede de alimentação se utiliza um cabo e um conector permanentemente ligados à estação de carregamento. Normalmente aplicado aos carregadores nível 3 e 4.

Cabe um comentário: O caso “C” se aplica predominantemente aos carregadores externos nível 4. Já o caso “B” pode ser encontrado em carregadores nível 3 assim como para o caso “A”, o cenário mais comum seriam os níveis 1 e 2.

A Figura 55 mostra os casos A, B e C.

FIGURA 55 – Disposição dos cabos em função do nível de carregador



FONTE: Adaptado de SCHNEIDER Electric (2019)

A.2 Comunicação entre veículo e estação de recarga

A comunicação básica serve para verificar a segurança, limitação de corrente de recarga e travamento dos conectores, etc. Antes do processo de recarga começar nos níveis 2, 3 e 4, a comunicação PWM com o VE ocorre através de um canal de controle. Vários parâmetros são trocados e gerenciados. Caso todos os parâmetros de segurança forem atendidos, a recarga se inicia em carga máxima de corrente. Normalmente os passos a seguir são executados:

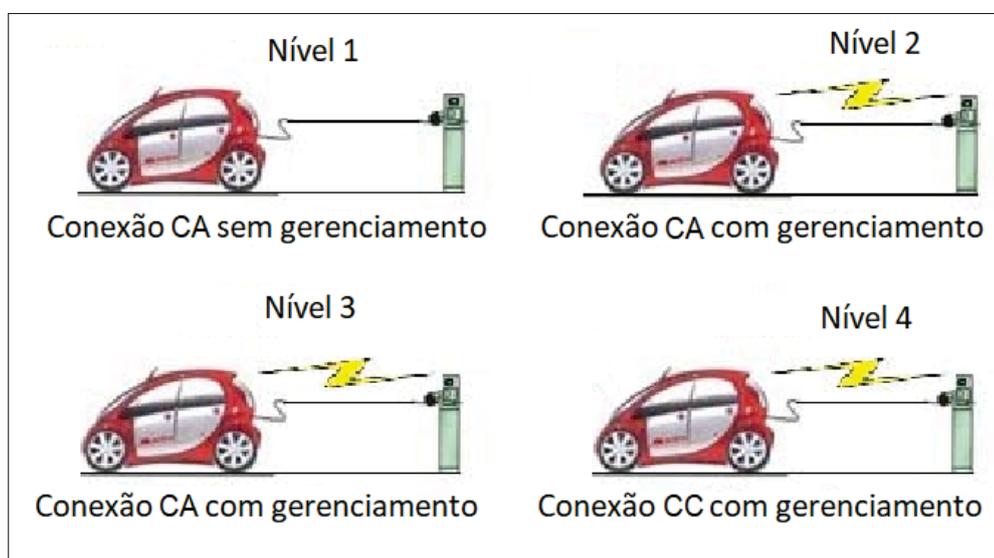
1. A estação de recarga trava o cabo (no lado da estação de carregamento).
2. O veículo recebe um comando de forma similar e trava o seu conector, impedindo assim a desconexão acidental. Em seguida há a confirmação e inicia-se a recarga.

3. A estação de carga monitora o valor resistivo do cabo e informa a corrente adequada para cada caso.
4. Um dispositivo de recarga do próprio VE define o processo. Para evitar uma sobrecarga, os dados como a capacidade da estação e resistência do cabo são ajustados conforme o modelo de carro em processo de carga.
5. Com essa informação acima, o VE informa a estação que se ajusta conforme o protocolo de segurança para corrente (ou CA ou CC).

Dessa forma, o protocolo de carga, preserva o seu elo mais fraco e a partir dele se ajusta para carga. A corrente de carga em um equipamento é limitada pela potência da estação e pelo valor resistivo do cabo e/ou plugue instalado nesse elo.

Havendo atendimento dos protocolos acima, a estação energiza seu plugue e começa a monitorar a recarga do VE. Durante o processo, a estação mantém o controle sobre os valores resistivos do cabo observando uma possível interrupção - por corte, por exemplo. Ao final, as travas de ambos os lados são recolhidas e a linha do cabo desenergizada, possibilitando assim, a desconexão física entre estação de carga e VE. A Figura 56 mostra os tipos de carregadores classificados por nível, segundo padrão IEC 61851-1.

FIGURA 56 – Comunicação entre estação de carga e VE. Padrão IEC 61851-1

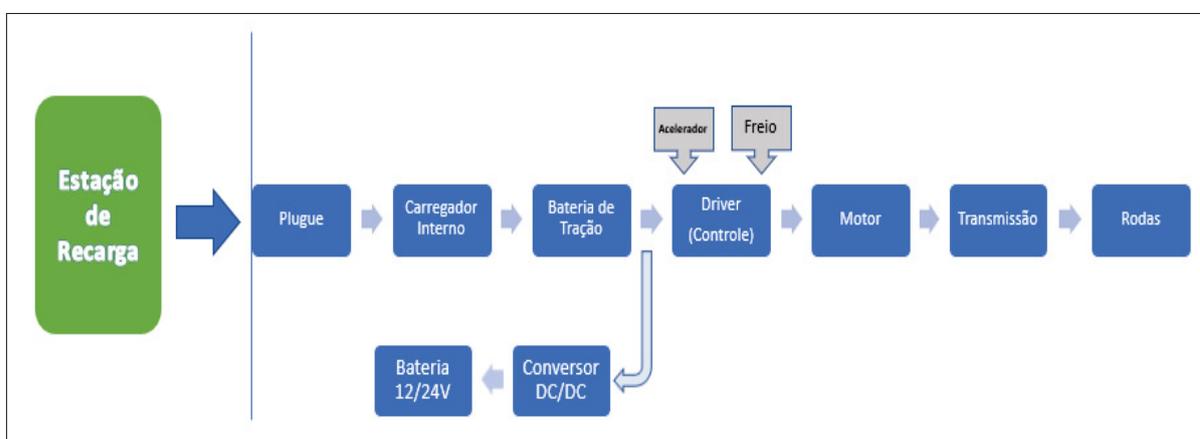


FONTE: Adaptado de IEC (2019)

ANEXO B – O trem de força, motores mais utilizados, baterias de um veículo elétrico e seu gerenciamento de carga

Um esquema do trem de força (powertrain) é apresentado pela Figura 57 para um veículo elétrico genérico. Percebe-se que como a bateria de tração ter capacidade de centenas de volts, então há a necessidade de uma unidade conversora CC/CC para recarga da bateria convencional que alimenta sistemas auxiliares, como vidros elétricos, iluminação, etc.

FIGURA 57 – Diagrama genérico de um veículo elétrico



FONTE: Adaptado de Denton (2016)

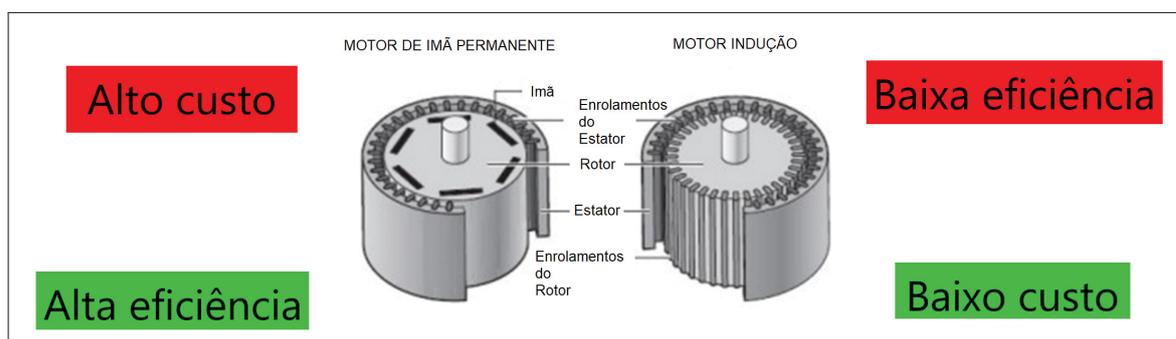
B.1 Tipos de motores elétricos mais utilizados

Atualmente a maioria dos veículos elétricos adota a característica de motores eletronicamente comutados entre CA e CC. As máquinas elétricas mais utilizadas no momento atual, são:

- Motores de Indução (MI)
 - O estator depois de excitado eletricamente, gera - por indução magnética - um campo no rotor.
 - Fácil operação em plataformas paralelo PHEV
- Motores síncronos (MS)
 - O campo do rotor é frequentemente gerado por ímãs permanentes.
 - Forças repulsivas e atrativas movem o rotor na mesma taxa que a velocidade do campo do estator, daí o nome de máquina síncrona.
 - Para aplicações VE, materiais de terras raras são necessários por motivos de densidade de potência.

A Figura 58 traz um pequeno comparativo entre essas duas máquina/motores adotados atualmente pela indústria automotiva.

FIGURA 58 – Comparativo entre tipos de motores elétricos atuais



FONTE: Adaptado de pumps (2017)

Segundo o trabalho de Gieras (2016), os motores são frequentemente instalados com drives de frequência variável (VFD), ou chamada de ECM, ou *electronically commutated motor*, em sistemas automotivos, em um esforço para melhorar a eficiência do sistema. O seu rotor atua sobre um sensor que, retorna o sinal de controle para a central. Faixas de frequência criam um campo girante que determina qual será a velocidade do motor, a partir da informação dessa ECM.

Quando aplicado em tração, passa a ser importante a inserção de uma caixa de transmissão para se obter uma faixa de torque controlada. São descritos como motores operando sem escovas e são praticamente de comportamento CA, porque a corrente que circula pode também ser alternada. Porém como a frequência de alimentação é variável, ela precisa ser fornecida através de uma fonte CC e desta forma esse motor passa a se comportar como um CC com escovas.

Comparado com um motor de indução, o motor de ímãs permanentes tem muitas vantagens:

- Maior eficiência e confiabilidade
- Baixo ruído acústico
- Menor e mais leve
- Maior resposta dinâmica
- Melhor velocidade versus características de torque
- Maior faixa de velocidade
- Durabilidade

O funcionamento do motor de ímãs permanentes, baseia-se na atração ou repulsão entre polos magnéticos. O processo começa quando a corrente flui através de um dos três enrolamentos do estator e gera um polo magnético que atrai o ímã permanente mais próximo do polo oposto (Larminie (2012)).

O rotor se moverá se a corrente mudar para um enrolamento adjacente. Carregar sequencialmente cada enrolamento fará com que o rotor siga em um campo rotativo. O torque,

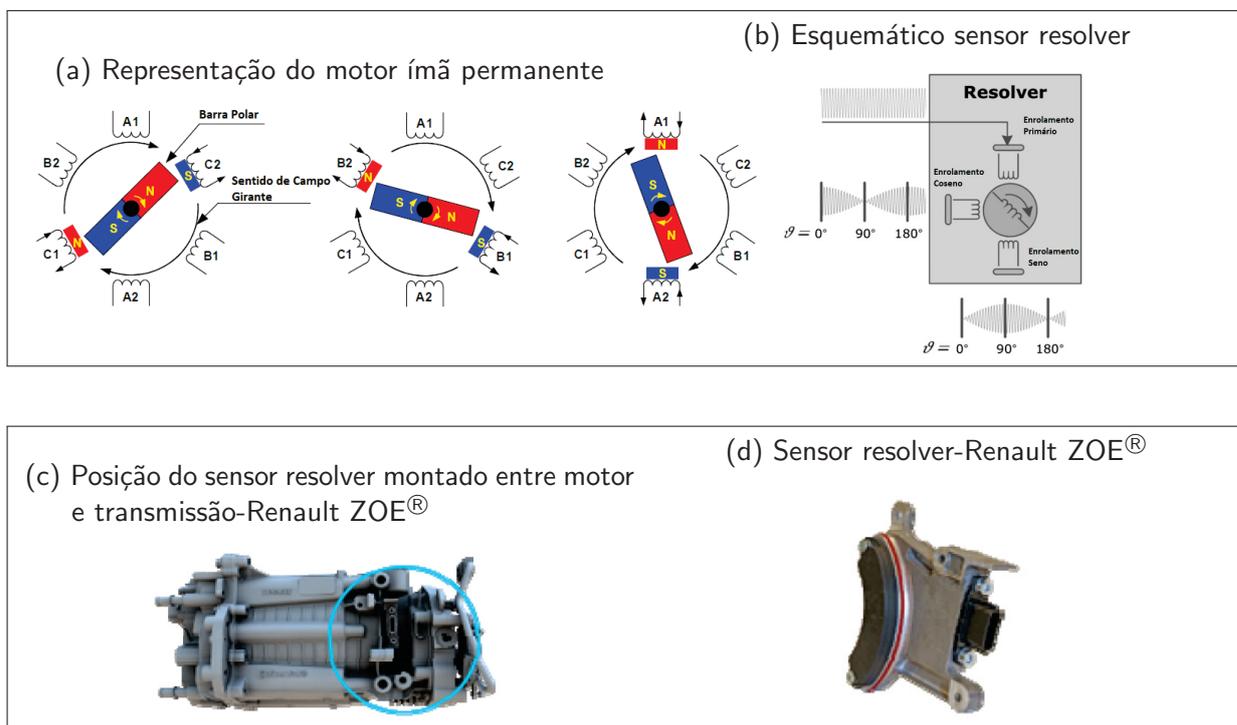
neste caso, depende da amplitude da corrente e do número de voltas nos enrolamentos do estator, a força e o tamanho dos ímãs permanentes, o entreferro entre o rotor e os enrolamentos e o comprimento do braço rotativo.

A comutação apresentada na Figura 59a deve ser sincronizada com a posição do rotor. Isso ocorre pelo posicionamento de sensores tipo resolver para determinar a velocidade e posições. O sensor resolver não está sob risco de interferência magnética e sujeira, ou sujeito a perdas por atrito durante a detecção de ângulo ou posição.

Ele pode ser considerado um “transformador” rotativo de alta frequência. Consiste em um enrolamento primário e dois enrolamentos secundários (bobina de seno e co-seno), onde o enrolamento primário atua como o rotor do resolver e os dois enrolamentos secundários representam o estator, onde são fisicamente deslocados uns dos outros por 90° como mostrado na Figura 59b.

Nas Figuras 59c e 59d, observa-se a posição de montagem do sensor resolver e sua aparência para o caso particular do Renault ZOE[®].

FIGURA 59 – Motor ímã permanente e sensor resolver



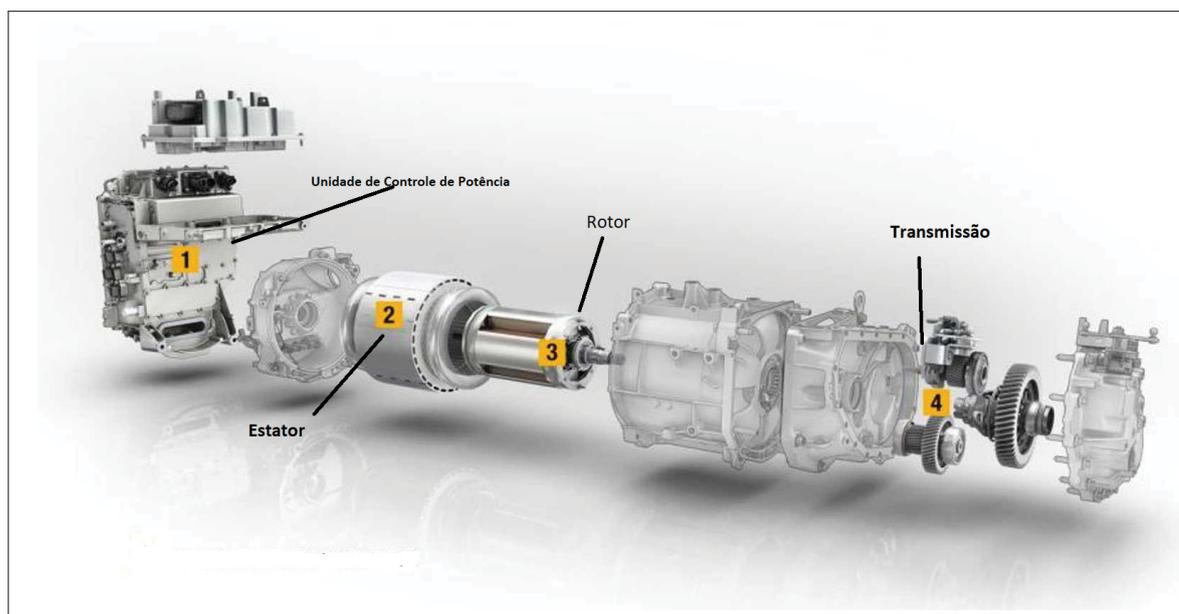
FONTE: (a) Adaptado de monolithicpower.com (2019), (b) Adaptado de Datlinger e Hirz (2019), (c) Adaptado de Renault (2019)[®] e (d) Adaptado de Renault (2019)[®]

Como se adota como característica construtiva deste tipo de motor, exatamente o trifásico como na Figura 59a, então se obtêm maior controle e precisão, assim como velocidades maiores e uma operação mais suave e aumento do torque. A velocidade de rotação é proporcional à frequência da alimentação de três fases.

Uma unidade de excitação assegura a excitação do rotor do motor elétrico. Essa excitação aciona a alta tensão em corrente contínua para alimentar a bobina do rotor.

A Figura 60 ilustra os componentes de um trem de força de um veículo puramente elétrico.

FIGURA 60 – Trem de força - Renault ZOE®



FONTE: Adaptado de Renault (2019)®

B.2 Baterias do VE

As baterias de íons de lítio regem as tecnologias de armazenamento de energia recarregável devido à sua alta densidade de energia e excelente desempenho. Essas baterias são recarregáveis e são usadas em muitas aplicações da vida diária, como telefones celulares, computadores e veículos elétricos.

Em um veículo elétrico temos basicamente 2 conjuntos de baterias com princípios e capacidades diferentes. A tradicional bateria chumbo-ácido, que fica responsável pelas mesmas funções de um veículo ICE convencional e um “*pack*” de baterias tracionárias que estão para o veículo elétrico assim como o tanque de combustível está para o ICE. São responsáveis por acumular a energia necessária para alimentar o motor elétrico do veículo, o que tem grandes consequências para o design e desempenho do veículo, além de suprir as demais necessidades.

A maioria das arquiteturas atuais de BEV ou HEV possui o trem de força no eixo dianteiro e a bateria de alta tensão localizada na parte inferior do veículo, entre o eixo dianteiro e o traseiro. Essa configuração privilegia o aumento de volume para a área de passageiros e o bagageiro / porta-malas, também melhorando o centro de gravidade (Renault (2019)).

Esse *pack* de baterias de alta tensão, sendo o componente elétrico mais pesado do

veículo, está posicionada no piso da carroceria ou monobloco. Isso dá uma vantagem; um centro de gravidade muito baixo, o que melhora a estabilidade geral do veículo e a rigidez torcional do monobloco. A Figura 61 ilustra um *pack* de baterias montadas em um monobloco veicular.

FIGURA 61 – Conjunto (*pack*) de baterias - Renault ZOE[®]



FONTE: Adaptado de Renault (2019)[®]

O *pack* de bateria é o componente principal dos VE porque dele depende o alcance máximo do veículo e é o componente elétrico mais caro presente no projeto.

Existem diferentes tipos de baterias de alta tensão, sendo a parte química o principal fator de diferenciação. As baterias de alta capacidade mais comuns atualmente para o VE são as baterias de íons de lítio. Estas também têm “famílias” diferentes:

- A família de baterias com base química de óxidos metálicos (por exemplo, lítio-óxido de manganês, LiMn_2O_2)
- A família de baterias com base em fosfatos (por exemplo, fosfato de ferro e lítio, LiFePO_4)

Em aplicações automotivas, as baterias de fosfato de íons-lítio são mais adequadas porque são mais seguras em termos de risco químico e térmico.

A Tabela 14 mostra um comparativo entre a famílias químicas de baterias em relação ao tipo de veículo híbrido e também seu estado de carga das baterias, ou em inglês, *state of charge (SOC)*.

TABELA 14 – Percentual SOC mínimo da bateria em relação ao tipo de veículo elétrico híbrido

Tipo de veículo elétrico híbrido	SOC mínimo da bateria (%)	Tensão da bateria (V)	Tipo químico da bateria
Micro	80 - 90	12	chumbo ácido
Médio (Mid)	40 - 60	48 - 160	íons de lítio / níquel - hidreto metálico
Completo (full) Plug-in	30 - 50	200 - 300	íons de lítio
	10 - 20	300 - 400	íons de lítio

FONTE: Adaptado de WLTP (2019)

Em qualquer banco de baterias (VE ou BESS), a informação de SOC pode ser interpretada em quatro níveis de carga da bateria como:

- Carga esgotada
- Carga em flutuação
- Em carga ou recarregando
- Carga completa

Quando a bateria está totalmente carregada, a energia está 100% disponível para uso, diz-se que seu SOC está em carga completa. Quando o veículo está freando, parte da energia cinética do veículo é convertida em energia elétrica pelo processo de regeneração e armazenada na bateria. Nesse caso, a bateria está no modo de sustentação de carga. Quando o SOC da bateria atinge o nível mínimo, o mecanismo de combustão interna é responsável por carregar a bateria para que o SOC não fique abaixo do nível mínimo a bateria está no modo de carga esgotada.

O sistema é completamente funcional e inclui módulos ou células de bateria, sistemas de suporte para temperatura das baterias e controles específicos célula a célula. Também pode ser uma combinação de um ou mais módulos de bateria, considerando um sistema de refrigeração adicional e com um sistema de controle adicional.

O alcance, em milhas ou quilômetros de um veículo convencional depende de quanto combustível líquido o tanque de combustível pode comportar além da economia de combustível do veículo. Da mesma forma, o alcance elétrico de um VE depende da quantidade de energia elétrica - expressa em quilowatt-hora (kWh) - que a bateria pode acumular.

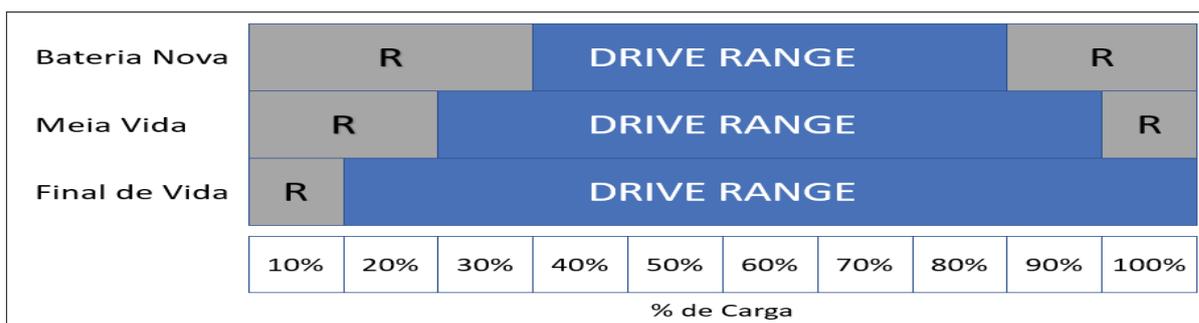
É importante notar que o alcance elétrico real de um veículo depende de fatores como o peso e idade do veículo, quão agressivamente o veículo é conduzido, a temperatura ambiente, a condição do pavimento da pista, etc.

Estimar o estado de carga das baterias (SOC) é uma atividade não trivial e a precisão na obtenção do SOC de uma bateria não é tão simples como o calculado para combustível fóssil. Os fabricantes de veículos elétricos projetam uma bateria nova como sendo o nível de 80% considerada carregada e abaixo de 30%, descarregada. De forma estratégica, superdimensionam a capacidade do *pack* de baterias e se apresenta apenas - o que é conhecido como *drive range*, em português, o alcance total do veículo. Tomando a Figura 62 como uma referencia, no caso de um VE com baterias novas, ele terá a recomendação dada pelo fabricante de proceder a recarga no intervalo marcado em verde, ou entre 40% e 90%. Assim a vida útil ou estado de saúde da bateria (ou em inglês, *state of health (SOH)*) desse *pack* pode ser preservado por mais tempo. As demais faixas em cinza se tornam como áreas de segurança.

Conforme o tempo de uso deste VE passa, o *pack* se desgasta por processos normais ao que foi projetado e os valores percentuais acima se alteram e novos valores totais previamente dimensionados se ajustam para outros percentuais, conforme ilustra a Figura 62, para manter o

mesmo range proposto no momento da venda do veículo. Com isso altera-se os valores para o máximo da capacidade de carga e haverá uma diminuição dos intervalos para recarga. A letra “R” significa Reserva. Assim, no estágio chamado de final de vida, o pack terá seu SOC entre 10% e 100% e exigirá mais tempo para recarregar-se e mais vezes recarga em comparação com o estágio bateria nova.

FIGURA 62 – Escala percentual de envelhecimento vs estágio de vida do *pack* de baterias



FONTE: Adaptado de Buchmann (2016)

B.3 Sistema de gerenciamento de carga de baterias

As baterias de íons de lítio provaram ser a tecnologia de interesse dos fabricantes de veículos elétricos devido à sua alta densidade de carga e baixo peso, relativo a outras tecnologias. Embora essas baterias tenham uma eficiência alta comparativamente ao seu tamanho, elas são altamente instáveis por natureza. É muito importante que essas baterias nunca sejam sobrecarregadas ou descarregadas em nenhuma circunstância que implique a necessidade de monitorar sua tensão e corrente (Florea e Taralunga (2020)).

Esse processo fica um pouco mais difícil, pois há muitas células reunidas para formar uma bateria em VE ou PHEV e cada célula deve ser monitorada individualmente quanto à sua segurança e operação eficiente, o que requer um sistema dedicado especial chamado sistema de gerenciamento de bateria, ou em inglês *Battery Management System (BMS)*.

Assim, para obter a máxima eficiência de uma bateria, deve-se carregar e descarregar completamente todas as células ao mesmo tempo e na mesma tensão, o que comprova a exigência de um sistema de gerenciamento. Além disso, o BMS é responsável por muitas outras funções que serão mostradas aqui.

- Controle de descarga.
- Controle de recarga.
- Determinação do estado da carga (SOC).
- Determinação do estado de saúde (SOH).
- Balanceamento de células.
- Controle térmico.

- O BMS é energizado a partir da própria bateria.
- Isolamento galvânico.
- Registro de dados.
- Precisão.
- Velocidade de Processamento.

A função principal de um BMS é manter as células de lítio dentro da região de operação segura. Por exemplo, uma célula típica de lítio tem uma tensão próxima de 3V. É de responsabilidade do BMS garantir que nenhuma das células do *pack* seja descarregada abaixo desse nível de tensão. Além da descarga, o processo de carregamento também deve ser monitorado pelo BMS. A maioria das baterias tende a reduzir a vida útil quando carregada / descarregada de forma incorreta (Buchmann (2016)).

No processo de carga da bateria de lítio, é usado um modelo de 2 estágios. O primeiro estágio é chamado de corrente constante (CC), durante o qual o carregador gera uma corrente constante para carregar a bateria. Quando a bateria fica próximo do valor máximo; o segundo estágio chamado tensão constante (CV) entra em ação. Nesse estágio uma tensão constante é fornecida à bateria com uma corrente muito baixa. O BMS deve garantir que esta tensão e a corrente durante o carregamento não excedam os limites máximos, para não sobrecarregar ou carregar rapidamente as baterias. A tensão de carga máxima permitida e a corrente de carga podem ser encontradas no *datasheet* de cada fabricante de bateria.

Pode-se adotar o valor SOC assim como o indicador de combustível do ICE. Na verdade, ele nos diz a capacidade do *pack* de bateria em porcentagem. Idêntico ao informado em um aparelho celular, porém de forma mais elaborada. A tensão e a corrente de carga / descarga do *pack* devem sempre ser monitoradas para prever a capacidade da bateria. Uma vez que a tensão e a corrente são medidas, existem muitos algoritmos que podem ser usados para calcular o SOC da bateria. O método mais comum utilizado é o método de contagem de corrente ou Ampère e é baseado na relação entre a entrada de carga total e a capacidade máxima da bateria, que nos fornecerá o SOC. A fórmula para o mesmo é dada abaixo. Medir os valores e calcular o SOC também é responsabilidade do BMS (Buchmann (2016)).

$$\text{SOC} = \text{entrada de carga total} / \text{capacidade máxima}$$

A entrada de carga total é o produto da corrente em função do tempo, mas como o valor da corrente varia no tempo, portanto, é necessário utilizar o método de integração para determinar a entrada de carga total. Valores discretos de corrente são calculados internamente e a integral desses valores nos fornecerá o valor de entrada de carga total.

A capacidade da bateria depende não apenas do perfil de tensão e corrente, mas também da idade e temperatura de operação. A medição de SOH informa sobre a idade e o ciclo de vida esperado da bateria, com base em seu histórico de uso. Dessa forma, pode-se

saber em relação a distância percorrida após cada carga completa do VE e assim, reduzindo à medida que a bateria envelhece e também saber quando a bateria deverá ser substituída.

Outra função importante de um BMS é manter o balanceamento de células. Por exemplo, em um *pack* de quatro células conectadas em série, a tensão de todas as quatro células devem sempre serem iguais. Se uma célula tiver uma tensão menor ou maior que a outra, ela afetará o *pack* inteiro. Por exemplo, uma célula tenha 3,5V enquanto as demais três tenham 4V. Durante o carregamento, essas três células últimas atingirão 4,2V, enquanto a primeira teria atingido apenas 3,7V. Da mesma forma, essa célula será a primeira a descarregar para 3V antes das outras três. Dessa forma, devido a essa única célula com tensão abaixo das demais, todas as outras células do *pack* não podem ser usadas em seu potencial máximo, comprometendo a eficiência geral (Han *et al.* (2019)).

A vida e a eficiência de uma bateria de lítio depende muito da temperatura de operação. A bateria tende a descarregar mais rapidamente em climas quentes em comparação com a temperatura ambiente normal. Além disso, o consumo de alta corrente aumentaria ainda mais a temperatura. Isso exige um sistema de controle térmico. Este sistema deve ser capaz de diminuir não só a temperatura, mas também ser capaz de aumentar a temperatura em climas frios, se necessário. O BMS é responsável por medir a temperatura individual da célula e controlar o sistema térmico de acordo com a manutenção da temperatura geral da bateria.

A única fonte de energia disponível no VE é a própria bateria tracionária. Portanto, um BMS deve ser projetado para ser alimentado pela mesma bateria que deve gerenciar e manter.

Um BMS deve estar ativo e funcionando, mesmo que o carro esteja carregando ou no modo *stand-by*. Isso faz com que o circuito do BMS seja alimentado continuamente e, portanto, é obrigatório que o BMS consuma menos energia para não acelerar o desgaste da bateria. Quando um VE fica sem carga por semanas ou meses, o BMS e outros circuitos tendem a drenar a bateria sozinhos e, eventualmente, precisam ser acionados ou carregados antes do próximo uso. Esse problema ainda permanece comum em carros como o Tesla.

O BMS atua como uma ponte entre a bateria e a ECU do VE. Todas as informações coletadas pelo BMS devem ser enviadas à ECU para serem exibidas no painel de instrumentos. Portanto, o BMS e a ECU devem se comunicar continuamente através do protocolo padrão, como rede de dados local chamada de CAN (*Controller Area Network*). O design do BMS deve ser capaz de fornecer um isolamento galvânico entre a bateria e a ECU para evitar assim, danos a rede CAN, que trabalha com baixa impedância (Buchmann (2016)). Logo, é importante que o BMS tenha um grande banco de memória, pois precisa armazenar muitos dados. Valores como o SOH, só podem ser calculados se o histórico de carregamento da bateria for conhecido. Portanto, o BMS deve rastrear os ciclos de carga e o tempo de carga da bateria a partir da data da instalação e interromper esses dados quando necessário. Isso também ajuda no fornecimento de serviço pós-venda ou na análise de um problema com o VE para a engenharia do fabricante.

Quando uma célula está sendo carregada ou descarregada, a tensão através dela aumenta ou diminui gradualmente. Infelizmente, a curva de descarga (tensão vs. tempo) de uma bateria de lítio possui regiões planas, portanto, a mudança de tensão é muito menor. Essa alteração deve ser medida com precisão para calcular o valor do SOC ou usá-lo para o balanceamento de células. Um BMS bem projetado pode apresentar uma precisão próxima a 0,2mV. Normalmente, um processador de 16 bits de palavra é usado no processo. O BMS de um VE precisa fazer muitos cálculos para atingir o valor de SOC, SOH etc. Existem muitos algoritmos para fazer isso, e alguns até usam aprendizado de máquina para realizar a tarefa. Isso faz com que um BMS seja um dispositivo de alto volume de processamento. Além disso, ele também precisa medir a tensão das centenas de células e observar as mudanças sutis em tempo real (Han *et al.* (2019)).

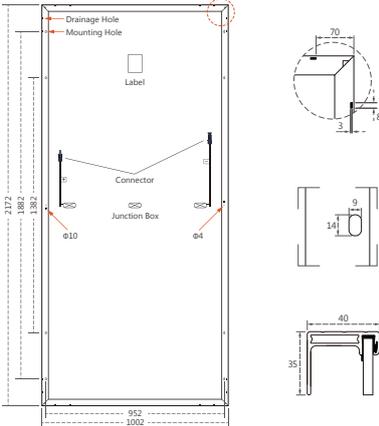
ANEXO C – Painel DAHSOLAR

FIGURA 63 – Dados técnicos dos painéis modelo HCP78X9-400W utilizados na projeto



Half-Cell High Efficiency PV Module **HCP78X9 395~400W**

Design



Mechanical Specification

Cells Type	Poly 158.75×79.375mm
Weight	24.8kg
Dimension (L×W×T)	2172×1002×40mm
Cable	4.0mm ² ; Portrait: N 400mm/P 300mm, (Cable length can be customized)
No.of Cells	156(6×26)
Glass	3.2 mm High Transmission, Antireflection Coating
Junction box	IP68, 3 Bypass Diodes
Connector	QC4 or MC4 Compatible
Packing	27pcs/pallet, 270pcs/20GP, 580pcs/40HQ

Operating Parameters

Maximum system voltage	1000V/1500V DC
Operating Temperature	-40 ~ +85°C
Maximum series fuse rating	20A
Snow load, frontside	5400Pa
Wind load, backside	2400Pa
Nominal operating cell temperature	45°C±2°C
Application level	Class A

Electrical Characteristics(STC)

Module Type	HCP78X9-395W	HCP78X9-400W
Maximum Power (Pmax)	395W	400W
Open-circuit Voltage (Voc)	51.3V	51.6V
Maximum Power Voltage (Vmp)	41.8V	42.0V
Short-circuit Current (Isc)	9.87A	9.95A
Maximum Power Current (Imp)	9.45A	9.53A
Module Efficiency (%)	18.15%	18.38%

Power Tolerance	0~+5W
Temperature Coefficient of Isc	0.05%/°C
Temperature Coefficient of Voc	-0.31%/°C
Temperature Coefficient of Pmax	-0.38%/°C
Standard Test Environment	Irradiance 1000w/m ² , Cell temperature 25°C, Spectrum AM1.5

Electrical Characteristics(NOCT)

Module Type	HCP78X9-395W	HCP78X9-400W
Maximum Power (Pmax)	298W	302W
Open-circuit Voltage (Voc)	48.3V	48.5V
Maximum Power Voltage (Vmp)	39.5V	39.7V
Short-circuit Current (Isc)	8.03A	8.11A
Maximum Power Current (Imp)	7.55A	7.61A
Standard Test Environment	Irradiance 800w/m ² , Cell temperature 20°C, Spectrum AM1.5, Wind speed 1m/s	



— Top Runner of Smart PV Module —

Factory: No.358 Tianhe Road, Luyang Industrial Park, Hefei City, Anhui, China
 Office: Floor 1-3, 6#A, Gongtuo Xinglu Industrial Park, Hefei City, Anhui, China
 Email: sales@dlh-solar.cn
 Tel: +86-551-65655842

www.DAHSOLARPV.com

FONTE: www.dahsolarpv.com

ANEXO D – SSR Fotek

FIGURA 64 – Dados técnicos do SSR-40DA utilizado no projeto



Single phase AC to AC Solid State Module

■ Specification [Rated current corresponding to Resistive load]

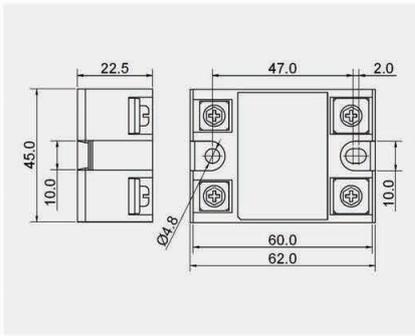
		Standard type / 標準型				
Type	型式	SSR – 10AA	SSR – 25AA	SSR – 40AA	SSR – 50AA	SSR – 75AA
Rated current	額定電流	10A max.	25A max.	40A max.	50A max.	75A max.
I _t for fuse	熔斷電流	144A ² S	259A ² S	664A ² S	518A ² S	1328A ² S
Surge current	耐突波電流	135A	275A	410A	550A	820A
Peak voltage	耐突波電壓	1200VAC min.				
Output voltage	輸出電壓	24 ~ 380VAC				

		High voltage type / 高壓型				
Type	型式	SSR – 10AA-H	SSR – 25AA-H	SSR – 40AA-H	SSR – 50AA-H	SSR – 75AA-H
Rated current	額定電流	10A max.	25A max.	40A max.	50A max.	75A max.
I _t for fuse	熔斷電流	144A ² S	259A ² S	664A ² S	518A ² S	1328A ² S
Surge current	耐突波電流	135A	275A	410A	550A	820A
Peak voltage	耐突波電壓	1200VAC min.				
Output voltage	輸出電壓	90 ~ 480VAC				

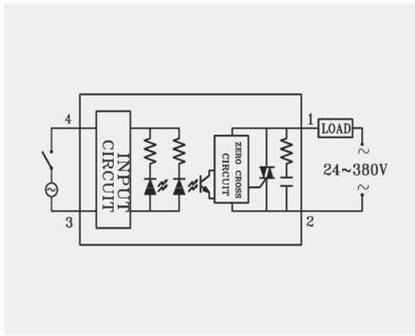
General specification / 共同規格		
Input voltage	輸入電壓	80 ~ 250 VAC 50/60Hz
Turn off voltage	關閉電壓	< 35 VAC
Trigger current	觸發電流	1.0VA max.
Control method	控制方式	Zero cross switching
Leakage current	洩漏電流	5 mA max.
Response time	反應時間	8.3 ms (60Hz) max.
Input immunity	輸入耐突波	2 KV (EN61000-4-4)
Isolation strength	電介強度	4 KVrms (EN60950/VDE0805)
Insulation strength	絕緣強度	100MΩ / 500VDC (EN60950/VDE0805)
Housing material	外殼材質	防火ABS (UL: 94V0)
Circumstance	工作環境	-40°C ~ +80°C ; 35 ~ 85%RH

SSR-AA series
 CE, RoHS, UL

■ Outline dimension / 外形尺寸



■ Connection / 接線圖



www.fotek.com.tw

06