



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

CAIO SUAN GOMES DE ALMEIDA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE GERENCIAMENTO PARA SISTEMA DE
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA: implementação da função *time shifting***

Recife
2025

CAIO SUAN GOMES DE ALMEIDA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE GERENCIAMENTO PARA SISTEMA
DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA: implementação da função *time shifting***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do grau de
Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador(a): Prof. Dr. Douglas Contente Pimentel Barbosa

Recife
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Almeida, Caio Suan Gomes de.

Desenvolvimento de um sistema de gerenciamento para sistema de armazenamento de energia: implementação da função time shifting / Caio Suan Gomes de Almeida. - Recife, 2025.

95 p : il., tab.

Orientador(a): Douglas Contente Pimentel Barbosa

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Controle e Automação - Bacharelado, 2025.

Inclui referências, apêndices.

1. BESS. 2. EMS. 3. Bateria. 4. Energia. 5. Armazenamento. 6. Gerenciamento. I. Barbosa, Douglas Contente Pimentel. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

CAIO SUAN GOMES DE ALMEIDA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE GERENCIAMENTO PARA SISTEMA
DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA: implementação da função *time shifting***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do grau de
Engenheiro de Controle e Automação.

Aprovado em: 10/04/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Douglas Contente Pimentel Barbosa
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Rafael Cavalcanti Neto
Universidade Federal de Pernambuco

Eng. M. Sc. Néstor Iván Medina Giraldo
Universidade Federal de Pernambuco

Este trabalho é dedicado aos meus pais, que sempre me apoiaram e acreditaram no meu potencial, aos meus amigos, que estiveram ao meu lado nos momentos mais difíceis dessa caminhada, e principalmente a minha mãe, que apesar de falecida, ainda vive em meu coração.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais: ao meu pai, por todo o apoio emocional e financeiro, e à minha falecida mãe, por ter me educado a ser a pessoa dedicada e esforçada que sou hoje. Agradeço também aos amigos que conquistei ao longo do caminho, que, além do auxílio nos estudos, compartilharam comigo bons momentos e risadas. Ao professor orientador, pelo apoio e companheirismo durante a realização deste trabalho e ao longo de toda a jornada. A todos os professores, pela troca de conhecimentos ao longo de toda a caminhada. À universidade, por todo o suporte técnico e pelo acesso às informações necessárias para o desenvolvimento deste estudo. A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, deixo aqui minha sincera gratidão

RESUMO

A matriz energética atual exige sincronia entre geração e consumo de energia elétrica, o que reduz a estabilidade e confiabilidade da rede, além de acentuar o desafio de integrar fontes renováveis. Nesse cenário, os Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias (*Battery Energy Storage Systems - BESS*) surgem como soluções viáveis para desacoplar geração e consumo, pois permitem estocar energia elétrica para utilização posterior. Esse deslocamento temporal de energia, conhecido como *time shifting*, viabiliza aplicações como arbitragem de energia, *peak shaving*, integração de fontes renováveis, *backup* e suavização de potência. Para viabilizar tais aplicações, o *BESS* dispõe de um Sistema de Gerenciamento de Energia (*Energy Management System - EMS*), plataforma de controle centralizado que coordena a operação do armazenamento, monitorando dados da planta e enviando comandos. O *EMS* é normalmente constituído por um controlador e um sistema de supervisão. Este estudo foca no desenvolvimento do controlador do *EMS* capaz de realizar a arbitragem de energia, que consiste em carregar as baterias durante horários fora de ponta e descarregá-las nos horários de ponta. Essa estratégia é especialmente relevante para consumidores sujeitos a tarifas horo sazonais, como indústrias, edifícios comerciais, hospitais e escolas. Além da redução de custos operacionais, o *time shifting* contribui, através das demais aplicações mencionadas, para aliviar a rede em horários críticos, para integrar fontes renováveis intermitentes como solar e eólica, para garantir alimentação elétrica durante interrupções prolongadas e para mitigar quedas abruptas de potência. Para exercer seu papel, o *EMS* integra dados de medidores, conversores e baterias, aplicando lógicas de decisão programadas, missão compatível com um Controlador Lógico Programável (CLP), plataforma mais que capaz de realizar comunicação, monitoramento, e execução das estratégias de operação. Os resultados obtidos evidenciaram não apenas a correta execução das lógicas de controle implementadas, mas também a significativa redução nos custos energéticos, validando assim o potencial do *time shifting*. Além disso, a solução desenvolvida também se mostrou escalável, permitindo futuras aplicações além do *time shifting*, como controle de fator de potência e regulação de rede.

Palavras-chave: *BESS*; *EMS*; bateria; energia; armazenamento; gerenciamento.

ABSTRACT

The current energy matrix requires synchronization between power generation and consumption, which reduces grid stability and reliability while exacerbating the challenge of integrating renewable sources. In this scenario, Battery Energy Storage Systems (BESS) emerge as viable solutions to decouple generation from consumption by enabling electricity storage for later use. This temporal energy displacement, known as time shifting, facilitates applications such as energy arbitrage, peak shaving, renewable integration, backup power, and power smoothing. To enable these applications, BESS employs an Energy Management System (EMS), a centralized control platform that coordinates storage operations by monitoring plant data and issuing commands. The EMS typically consists of a controller and a supervisory system. This study focuses on developing the EMS controller specifically for energy arbitrage, which involves charging batteries during off-peak hours and discharging them during peak periods. This strategy is particularly relevant for consumers subject to time-of-use tariffs, such as industries, commercial buildings, hospitals, and schools. Beyond operational cost reduction, time shifting contributes to relieving grid stress during critical periods, integrating intermittent renewables like solar and wind, ensuring power supply during prolonged outages, and mitigating sudden power drops. To fulfill its role, the EMS integrates data from meters, converters, and batteries while implementing programmed decision logics, tasks well-suited for a Programmable Logic Controller (PLC), a platform fully capable of handling communication, monitoring, and operational strategy execution. The results demonstrated not only proper implementation of control logics but also significant energy cost reductions, thereby validating time shifting's potential. Furthermore, the developed solution proved scalable, allowing for future applications beyond time shifting, such as power factor correction and grid regulation.

Keywords: BESS; EMS; battery; energy; storage; management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Arbitragem de energia.....	16
Figura 2 – <i>Peak shaving</i>	17
Figura 3 – Conceito do <i>PCS</i>	21
Figura 4 – Diagrama funcional de um <i>PCS</i>	22
Figura 5 – Conversor <i>full-bridge</i>	23
Figura 6 – Fasores genéricos do conversor <i>full-bridge</i>	24
Figura 7 – Fasores do conversor <i>full-bridge</i> com fator de potência unitário.	25
Figura 8 – Ondas de resultantes do conversor <i>full-bridge</i>	26
Figura 9 – Carga e descarga de uma bateria.	28
Figura 10 – Capacidade da bateria e o ciclo de vida.....	29
Figura 11 – Gráficos de tensão e corrente durante o carregamento.	33
Figura 12 – Tempo de carregamento em função da corrente <i>ICC</i>	34
Figura 13 – Circuito simplificado de pré-carga.	36
Figura 14 – Cabo RS-485.	38
Figura 15 – Pacote de requisição de leitura Modbus.	41
Figura 16 – Pacote de resposta de leitura Modbus.	41
Figura 17 – Pacote de requisição de escrita Modbus.....	42
Figura 18 – Pacote de resposta de escrita Modbus.	42
Figura 19 – Cabeçalho TCP/IP.....	44
Figura 20 – Frame Modbus TCP.	45
Figura 21 – Requisição de leitura de memória Modbus.	45
Figura 22 – <i>Hardware</i> do CLP.....	46
Figura 23 – Circuito elétrico do <i>rack</i> de lítio.	49
Figura 24 – Topologia de comunicação.	50
Figura 25 – Topologia <i>BMS</i>	51
Figura 26 – Diagrama de programação 01.....	58
Figura 27 – Diagrama de programação 02.....	58
Figura 28 – Diagrama de programação 03.....	59
Figura 29 – Diagrama de programação 04.....	59
Figura 30 – Bloco MB_CLIENT.	60
Figura 31 – Bloco MB_MASTER.	61

Figura 32 – <i>Grafcet</i> de comunicação.	63
Figura 33 – Linha de <i>Ladder</i> de Comunicação.....	65
Figura 34 – Controle <i>time shifting</i>	68
Figura 35 – Programação <i>time shifting</i>	69
Figura 36 – Pseudocódigo <i>time shifting</i>	69
Figura 37 – Escala de proteção lógica.	71
Figura 38 – Controle de tensão.	73
Figura 39 – Comunicação com o <i>PCS 02</i>	81
Figura 40 – Comunicação com o relé de proteção.....	82
Figura 41 – Comunicação com o medidor auxiliar.	82
Figura 42 – Comunicação com o disjuntor PNCA.	82
Figura 43 – Comunicação com o <i>rack</i> de lítio 01.	83
Figura 44 – Comunicação com o medidor do transformador.....	83
Figura 45 – Comunicação com o medidor de rede.....	83
Figura 46 – Comportamento da carga.....	84
Figura 47 – <i>Time shifting</i> atuando, <i>setpoint</i> em 900kW.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Funções do protocolo Modbus.	39
Tabela 2 – Descrição do pacote de leitura de <i>holding registers</i>	40
Tabela 3 – Características gerais do <i>PCS</i>	53
Tabela 4 – Características gerais do <i>Rack</i> de Baterias.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>BESS</i>	<i>Battery Energy Storage System</i>
<i>BMS</i>	<i>Battery Management System</i>
<i>CA</i>	Corrente Alternada
<i>CC</i>	Corrente Contínua
<i>CLP</i>	Controlador Lógico Programável
<i>CSC</i>	<i>Cell Supervision Circuit</i>
<i>CSU</i>	<i>Current Sample Unit</i>
<i>EMS</i>	<i>Energy Management System</i>
<i>ESS</i>	<i>Energy Storage System</i>
<i>ETH</i>	<i>Ethernet Module</i>
<i>FP</i>	Fator de Potência
<i>MBAP</i>	<i>Modbus Application Protocol</i>
<i>MBMU</i>	<i>Master battery management unit</i>
<i>MGE</i>	Medidor de Grandezas Elétricas
<i>OB</i>	<i>Organization Block</i>
<i>PCS</i>	<i>Power Conversion System</i>
<i>PDU</i>	<i>Protocol Data Unit</i>
<i>RTU</i>	<i>Remote Terminal Unit</i>
<i>SBMU</i>	<i>Slave Battery Management Unit</i>
<i>SCADA</i>	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
<i>SOC</i>	<i>State of Charge</i>
<i>SOH</i>	<i>State of Health</i>
<i>TCP</i>	<i>Transmission Control Protocol</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

V	Volt
kV	Quilovolt
A	Ampere
W	Watt
kW	Quilowatt
Var	Volt Ampere Reativo
kVAr	Quilo Volt Ampere Reativo
VA	Volt Ampere
kVA	Quilo Volt Ampere
Wh	Watt-hora
kWh	Quilowatt-hora
MWh	Megawatt-hora
Hz	Hertz
R\$	Reais

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Geral.....	18
1.1.2	Específicos	18
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	19
1.3	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO.....	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	SISTEMA DE CONVERSÃO DE POTÊNCIA.....	20
2.1.1	Conversores Estáticos de Potência.....	22
2.2	BATERIAS.....	26
2.2.1	Segurança e Ciclo de Vida	28
2.2.2	Capacidade e Energia da Bateria.....	30
2.2.3	SOC e SOH	31
2.2.4	Algoritmos de Carregamento.....	32
2.3	SISTEMA DE GERENCIAMENTO DA BATERIA	34
2.3.1	Pré-Carga	35
2.3.2	Equalização	36
2.4	COMUNICAÇÃO MODBUS.....	37
2.4.1	Modbus RTU	37
2.4.1.1	<i>Pacotes Modbus.....</i>	<i>39</i>
2.4.1.2	<i>Funções Modbus</i>	<i>41</i>
2.4.2	Modbus TCP.....	43
2.4.2.1	<i>Pacotes.....</i>	<i>43</i>
3	DESCRIÇÃO TÉCNICA DO SISTEMA E DOS CENÁRIOS AVALIADOS ..	45
3.1	ESCOPO	46
3.1.1	Diagrama Unifilar	47
3.1.1.1	<i>Elementos Chave</i>	<i>47</i>
3.1.1.2	<i>Rack de Lítio e PCS</i>	<i>47</i>
3.1.1.3	<i>Painel PNCLP e Cargas Auxiliares.....</i>	<i>48</i>
3.1.2	Topologia de Comunicação	49
3.1.2.1	<i>Demais Equipamentos: Motivação e Importância.....</i>	<i>51</i>
3.1.3	Detalhamento de Entradas e Saídas	52
3.2	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS	53
3.1	CASOS AVALIADOS.....	54
3.1.1	Caso 1: Arbitragem de Energia	55
3.1.2	Caso 2: Redução de Picos de Demanda.....	56
4	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA	57

4.1	COMUNICAÇÃO	59
4.2	APLICAÇÕES.....	66
4.2.1	Aplicação Manual	66
4.2.2	Aplicação Time Shifting	66
4.3	PROTEÇÃO	69
4.4	CONTROLE DE TENSÃO	72
4.5	EQUALIZAÇÃO DOS RACKS DE LÍTIO	73
4.6	POTÊNCIA DO PCS.....	75
4.7	ROTINAS SECUNDÁRIAS.....	76
4.7.1	Comando Disjuntor BESS	76
4.7.2	Comando Racks de Lítio	76
4.7.3	Espelhamento de Entradas, Saídas e Comandos	77
4.7.4	Status de Potências.....	77
4.7.5	Mudança e Priorização da Aplicação.....	78
4.7.6	Sincronismo de Data e Hora.....	78
5	RESULTADOS E ANÁLISES	79
5.1	COMUNICAÇÃO	79
5.2	TIME SHIFTING	84
6	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	86
6.1	PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	86
	REFERÊNCIAS	88
	APÊNDICES.....	90

1 INTRODUÇÃO

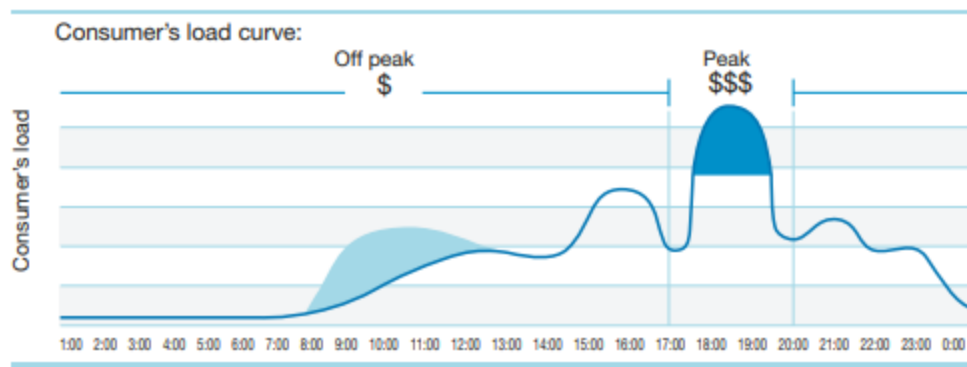
A transição energética global tem impulsionado a adoção de fontes renováveis de geração, como a solar e a eólica, que apresentam grande variabilidade em sua produção. Essa característica impõe novos desafios à operação dos sistemas elétricos, tradicionalmente baseados em fontes despacháveis e controláveis. A necessidade de manter o equilíbrio instantâneo entre geração e consumo torna-se mais complexa, exigindo soluções que promovam maior flexibilidade e estabilidade à rede (LUND et al., 2015).

Nesse cenário, os Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias (*Battery Energy Storage Systems – BESS*) têm se destacado como uma alternativa estratégica para mitigar a intermitência das fontes renováveis e viabilizar uma gestão energética mais eficiente. O armazenamento permite que a energia gerada em momentos de baixa demanda seja retida e utilizada posteriormente, conforme a conveniência técnica ou econômica do consumidor, essa abordagem é conhecida como *time shifting* (IBRAHIM et al., 2008).

Dentre as aplicações possíveis com o uso do *BESS* e da estratégia *time shifting*, destaca-se a arbitragem de energia, técnica que consiste em carregar o sistema de armazenamento durante períodos em que a energia elétrica apresenta menor custo – geralmente fora dos horários de ponta – e descarregá-lo quando a tarifa é mais elevada. Essa prática tem ganhado relevância entre consumidores que operam sob regimes tarifários diferenciados, como o horo-sazonal, em que o preço da energia varia ao longo do dia e do ano. Ao utilizar essa estratégia, consumidores como indústrias, hospitais e edifícios comerciais conseguem reduzir significativamente seus custos com energia elétrica, além de aliviar a pressão sobre a rede durante os horários de pico (MOHAMMADI et al., 2014). Por exemplo, para consumidores do tipo A4, consumidores em média tensão maiores de 2,3kV e menores do que 44kV, a tarifa de energia em Pernambuco em horários fora de ponta, é de R\$ 0,404/kWh, enquanto em horários de ponta atinge R\$ 1,926/kWh (NEOENERGIA PERNAMBUCO, 2024, p. 3). Um sistema de armazenamento com capacidade de 100 kWh poderia ser carregado durante o período de tarifa reduzida, com um custo total de R\$ 40, e descarregado durante o horário de ponta, gerando uma economia de R\$ 152, ao evitar o consumo

direto da rede nesse momento mais caro. Um exemplo gráfico de arbitragem pode ser visto na Figura 1.

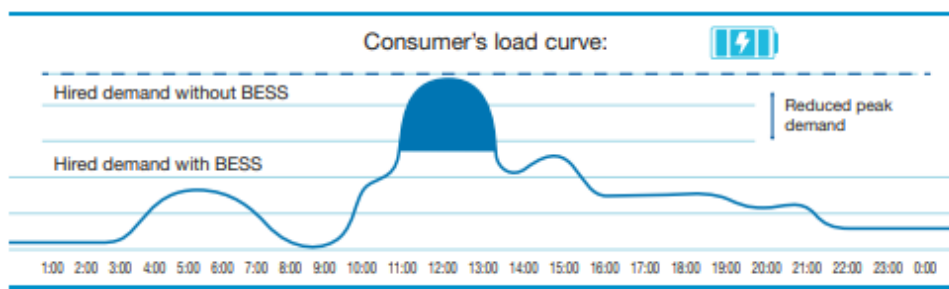
Figura 1 – Arbitragem de energia.



Fonte: WEG, (2025)

Outra aplicação relevante dos *BESS* é o *peak shaving*, ou corte de pico, que consiste na redução da demanda de energia elétrica durante os períodos de maior consumo. Essa estratégia visa minimizar o efeito do acionamento de cargas que ultrapassem determinado limite pré-estabelecido de demanda, diminuindo assim os custos associados à demanda contratada ou a tarifas elevadas em horários de ponta. O *BESS* atua como uma fonte auxiliar, fornecendo energia armazenada nos momentos em que a carga ultrapassaria o limiar definido, reduzindo os encargos tarifários, como mostra a Figura 2. Essa técnica é especialmente útil em ambientes industriais e comerciais com cargas altas, permitindo uma gestão energética mais eficiente, previsível e econômica. Além disso, o *peak shaving* contribui para a estabilidade da rede ao mitigar picos de demanda, que poderiam comprometer a operação segura do sistema elétrico (MOHAMMADI et al., 2014).

Figura 2 – Peak shaving.



Fonte: WEG, (2025)

Para que a arbitragem de energia e/ou *peak shaving* ocorram de forma eficiente, é necessário o uso de um Sistema de Gerenciamento de Energia (*Energy Management System – EMS*). Esse sistema atua como o cérebro do *BESS*, processando informações em tempo real sobre consumo, geração local, tarifas aplicáveis e estado de carga das baterias. Com base nessas variáveis, o *EMS* decide, de forma automatizada, os momentos ideais para carregar ou descarregar o sistema de armazenamento (LUO et al., 2015).

O desenvolvimento de lógicas de controle eficientes para *EMS* tem sido tema recorrente na literatura, com ênfase na integração com fontes renováveis, resposta à demanda e arbitragem de energia (ZAKERI; SYRI, 2015). Entretanto, o uso de Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) como plataforma para essa gestão ainda é um campo com potencial de expansão, especialmente em soluções de baixo custo e alta confiabilidade. A utilização de CLPs permite que o sistema se comunique com diversos dispositivos, como conversores, baterias e medidores, realizando as ações necessárias de forma autônoma e precisa.

Dessa forma, o presente trabalho se propõe a contribuir com a área ao desenvolver a lógica de controle de um *EMS* voltado especificamente para a arbitragem de energia em sistemas sujeitos à tarifação horo-sazonal. A proposta visa demonstrar, por meio da operação controlada de um *BESS*, como é possível obter ganhos econômicos e operacionais com a gestão estratégica do armazenamento de energia.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Desenvolver o código de um Controlador Lógico Programável (CLP) afim de que o mesmo atue como um Sistema de Gerenciamento de Energia (EMS) de um BESS, cuja função principal é o deslocamento temporal de energia com ênfase na arbitragem de energia.

1.1.2 Específicos

- Elaborar documentação adequada para correto entendimento do projeto: topologia de comunicação, diagrama unifilar, detalhamento de entradas e saídas e diagrama de programação;
- Estabelecer comunicação Modbus TCP e Modbus RTU entre o CLP os dispositivos condizentes com esses tipos de rede;
- Criar rotinas de controles referentes a operação de um EMS;
- Comissionar e testar o sistema afim de garantir seu correto funcionamento e operabilidade;
- Garantir que o controle responsável por realizar o *time shifting* siga o *setpoint* quando degraus são aplicados;
- Garantir que o controle responsável por realizar o *time shifting* siga o *setpoint* apesar do distúrbio na malha de controle causado pela variação da potência consumida pela carga;
- Garantir que o controle responsável por realizar o *time shifting* tenha um tempo de resposta pequeno o suficiente de forma que oscilações em torno do *setpoint* não ultrapassem uma margem de segurança de 50kW;
- Evitar injeção de potência na rede elétrica durante o descarregamento do sistema de armazenamento considerando uma margem de segurança de 50kW;
- Garantir que a comunicação e o tratamento de dados foram realizados corretamente para cada equipamento.

1.2 Organização do Trabalho

O capítulo 1 traz uma introdução sobre o assunto de Sistemas de Armazenamento de Energia (*BESS*) com ênfase no uso do mesmo para redução de custo com energia elétrica, também são expostos os objetivos gerais e específicos do trabalho realizado. No capítulo 2, é apresentado toda a parte teórica do trabalho, trazendo explanações sobre conversores de eletrônica de potência, baterias e tudo que abrange sua operação e monitoramento, os sistemas responsáveis por gerenciar as baterias e comunicações Modbus. No capítulo 3, é apresentada a metodologia do projeto, a base na qual ele será construído, seu escopo, todos os equipamentos que serão usados e como eles interagem entre si, além disso, traz os casos que serão abordados no projeto. No capítulo 4, é mostrado todo o desenvolvimento do projeto, os códigos que são usados, a maneira como as malhas de controle serão estruturadas, um descritivo de todas as funções do sistema e como as mesmas devem atuar, todos os comandos existentes e sua motivação. O capítulo 5 demonstra os principais resultados obtidos, analisa se os mesmos condizem com o que era esperado, avalia a performance e reforça a justificativa do projeto. O capítulo 5 conclui todo o trabalho, apresentando a aplicabilidade e as limitações do sistema, mostrando algumas problemáticas encontradas e também sugerindo algumas melhorias como propostas de continuidade.

1.3 Delimitação do Trabalho

A elaboração do presente trabalho foi baseada em um projeto externo realizado em ambiente corporativo. Devido a questões de sigilo industrial, algumas informações – como os códigos fonte – foram omitidas para evitar complicações burocráticas. Dessa forma, as rotinas de programação serão apenas descritas, sem o fornecimento dos códigos fonte originais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

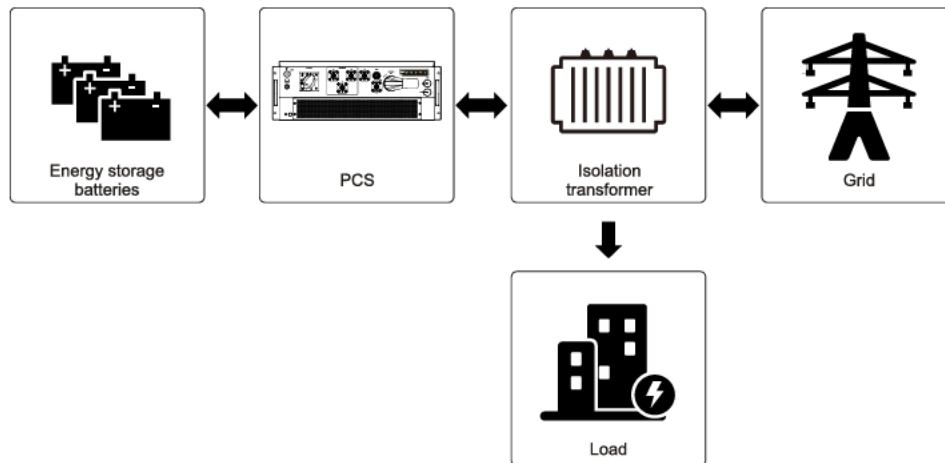
Um *BESS* é uma solução mundialmente utilizada para estocar energia, com uma ampla gama de aplicações. Um *BESS* é composto por quatro componentes principais: as baterias, o Sistema de Gerenciamento das Baterias (*Battery Management System* - *BMS*), o Sistema de Conversão de Energia (*Power Conversion System* - *PCS*) e o Sistema de Gerenciamento de Energia (*Energy Management System* - *EMS*). As baterias armazenam a energia; o *BMS* monitora as grandezas elétricas e controla a operação das baterias; o *PCS*, por meio de conversores de eletrônica de potência, converte a energia, transformando corrente alternada em corrente contínua e vice-versa, permitindo a carga e descarga das baterias; e o *EMS*, é responsável pela inteligência do sistema, coordenando a operação de todos os componentes, responsável por gerenciar o carregamento e descarregamento das baterias, para alcançar os objetivos desejados. Com o intuito de entender toda a programação do *EMS*, é necessário levantar alguns conceitos básicos e também pontos primordiais sobre a operação de todos os equipamentos envolvidos.

2.1 Sistema de Conversão de Potência

O Sistema de Conversão de Potência (*Power Conversion System* – *PCS*) é um equipamento essencial no contexto de sistemas de armazenamento de energia (*BESS*), responsável por realizar a conversão bidirecional entre corrente contínua (CC), utilizada pelas baterias, e corrente alternada (CA), empregada na rede elétrica (SCIENCE DIRECT, 2022).

Embora o *PCS* se baseie em conversores estáticos de potência, sua principal distinção está na presença de circuitos auxiliares e sistemas de controle adicionais, que permitem sua atuação otimizada em aplicações específicas do *BESS*. Esses circuitos suplementares viabilizam funções como controle dinâmico de potência, gerenciamento de fluxo de energia, proteção integrada, e suporte à operação em diferentes modos, conectado à rede ou ilhado, adaptando-se às demandas da rede e do sistema de baterias (TLS ENERGY, 2023). Um diagrama simplificado do uso do *PCS* é ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Conceito do PCS.



Fonte: Kehua Tech, (2024)

No modo conectado à rede, o *PCS* opera sincronizado com a rede elétrica, injetando ou absorvendo energia de acordo com comandos definidos pelo sistema de gerenciamento de energia (*EMS*). Essa operação permite realizar estratégias como *peak shaving*, arbitragem de energia, controle de fator de potência e suporte à rede durante eventos de variação de frequência ou tensão. Neste modo, a rede atua como referência de tensão e frequência, e o *PCS* segue suas condições operacionais (YAN; ZHANG; WANG, 2021).

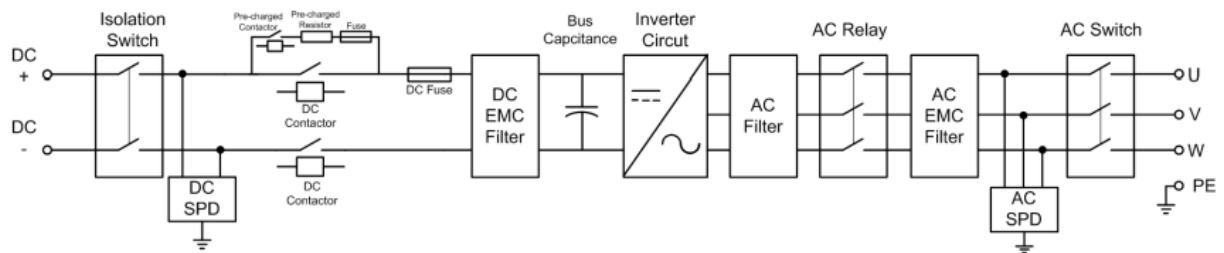
Por outro lado, no modo ilhado (ou modo isolado), o *PCS* atua de forma autônoma, suprindo diretamente as cargas locais sem o apoio da rede elétrica. Esse modo é ativado, por exemplo, em situações de falha ou desligamento da rede pública, funcionando como fonte principal de alimentação (aplicação *backup*). Nesse cenário, o *PCS* deve assumir o controle da frequência e da tensão, comportando-se como um gerador de referência para os demais dispositivos do sistema, o que exige uma lógica de controle mais complexa e robusta para manter a estabilidade e confiabilidade da energia fornecida (YAN; ZHANG; WANG, 2021).

Um diagrama funcional do *PCS* é exibido na Figura 4. Nele, além do conversor, é mostrado alguns outros elementos auxiliares importantes: dispositivos protetores de surtos, filtros, chaves, e um circuito de pré-carga. A pré-carga será abordada em detalhes posteriormente na Seção 2.3.1.

Além do circuito elétrico, o *PCS* possui um sistema embarcado inteligente que além de fazer o controle, é responsável pela medição das grandezas internas ao *PCS*,

como: tensão, corrente, potência CC, potência CA, temperatura, frequência, etc. É responsável também pela identificação de erros e alarmes, e além de tudo, proteção do equipamento, como por exemplo, limitação de potência em caso de superaquecimento. Todos os *status*, alarmes e medições, são disponibilizados via comunicação para o *EMS*.

Figura 4 – Diagrama funcional de um PCS.

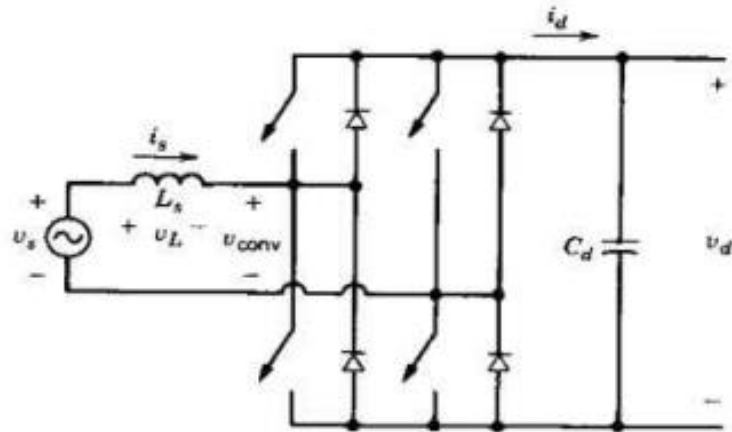


Fonte: Kehua Tech, (2024)

2.1.1 Conversores Estáticos de Potência

Para uso de baterias conectadas a rede elétrica, surge a necessidade de equipamentos capazes de transformar corrente alternada (CA) para corrente contínua (CC), em caso de carregamento das baterias, e também de CC para CA, em caso de descarregamento. Sobre a conversão CA-CC, pode-se mencionar os retificadores (chamados também de conversores CA-CC), dispositivos de eletrônica de potência utilizados para converter corrente alternada em corrente contínua. Esse processo de conversão é conhecido como retificação. Sobre a conversão CC-CA, pode-se mencionar os inversores (chamados também de conversores CC-CA), dispositivos de eletrônica de potência utilizados para converter CC em CA. Esse processo é chamado de inversão.

Dentre todos os conversores que podem ser usados nessa aplicação, um deles chama a atenção pela versatilidade: o conversor *full-bridge*. Esse conversor consegue operar em dois modos, pode atuar como retificador ou como inversor, conseguindo fazer um fluxo de potência bidirecional (MOHAN, TORE e WILLIAM, 2002), um circuito exemplo é mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Conversor *full-bridge*.

Fonte: Ned Mohan, (2002)

Analisando o circuito, por Lei de Kirchhoff, obtém-se (2.1) (MOHAN, TORE e WILLIAM, 2002, p. 495) :

$$v_s = v_{conv} + v_L , \quad (2.1)$$

onde:

$$v_L = L_s \frac{di_s}{dt} . \quad (2.2)$$

Assumindo que v_s é senoidal, então i_s e v_{conv} também serão, e podem ser expressos como fasores. Escolhendo arbitrariamente v_s como referência, e considerando $\omega = 2\pi f$, a Equação (2.1) pode em escrita da forma (2.3) (MOHAN, TORE e WILLIAM, 2002, p. 495):

$$\mathbf{V}_s = \mathbf{V}_{conv} + \mathbf{V}_L , \quad (2.3)$$

onde:

$$\mathbf{V}_L = j\omega L_s \mathbf{I}_s . \quad (2.4)$$

Um diagrama de fasores correspondendo as Equações (2.3) e (2.4) é mostrado na Figura 6, onde $\mathbf{I}_s$ está atrasado em relação a $\mathbf{V}_s$ por um ângulo arbitrário θ . A potência ativa fornecida do lado CA para o conversor é dada por (2.5) (MOHAN, TORE e WILLIAM, 2002, p. 496):

$$P = V_s I_s \cos \theta = \frac{V_s^2}{\omega L_s} \left(\frac{V_{conv}}{V_s} \sin \delta \right), \quad (2.5)$$

pois.

$$V_L \cos \theta = \omega L_s I_s \cos \theta = V_{conv} \sin \delta. \quad (2.6)$$

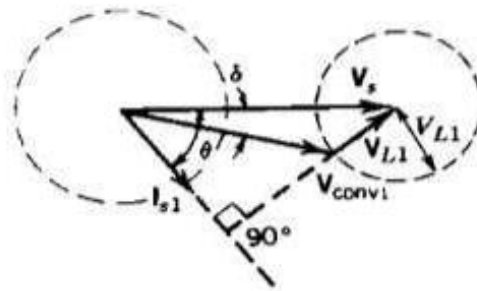
Considerando o diagrama de fasores, a potência reativa fornecida do lado CA para o conversor é (MOHAN, TORE e WILLIAM, 2002, p. 496):

$$Q = V_s I_s \sin \theta = \frac{V_s^2}{\omega L_s} \left(1 - \frac{V_{conv}}{V_s} \cos \delta \right), \quad (2.7)$$

pois

$$V_s - \omega L_s I_s \sin \theta = V_{conv} \cos \delta. \quad (2.8)$$

Figura 6 – Fasores genéricos do conversor *full-bridge*.



Fonte: Ned Mohan, (2002)

É notório que a potência reativa obtida é a soma da potência absorvida pelo indutor e da consumida pelo conversor. Contudo, em altas frequências de chaveamento, é possível diminuir bastante a indutância, tornando Q aproximadamente igual a potência reativa absorvida apenas pelo conversor. (MOHAN, TORE e WILLIAM, 2002, p. 496) define uma importante equação:

$$I_s = \frac{V_s - V_{conv}}{j\omega L_s}. \quad (2.9)$$

A partir dessas equações é claro que, para uma dada tensão v_s e uma indutância L_s , é possível obter variados valores de P e Q controlando apenas a magnitude e a fase de v_{conv} .

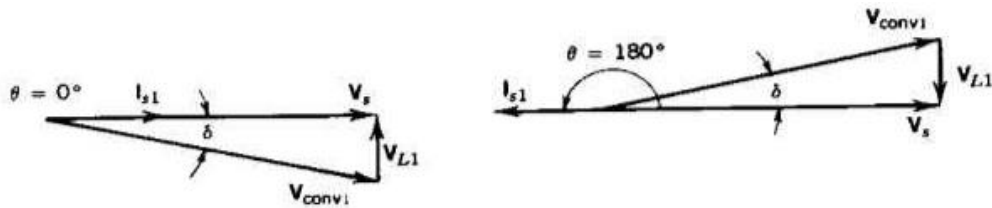
Após uma análise geral, pode-se avaliar os casos específicos de interesse: a retificação e a inversão com fator de potência unitário (importante para realizar a arbitragem de energia). Ambos os casos são mostrados na Figura 7, em ambos:

$$V_{conv} = [V_s^2 - (\omega L_s I_s)^2]^{1/2}. \quad (2.10)$$

Se considerar o chaveamento em alta frequência e uma baixa indutância então:

$$V_{conv} \approx V_s. \quad (2.11)$$

Figura 7 – Fasores do conversor *full-bridge* com fator de potência unitário.

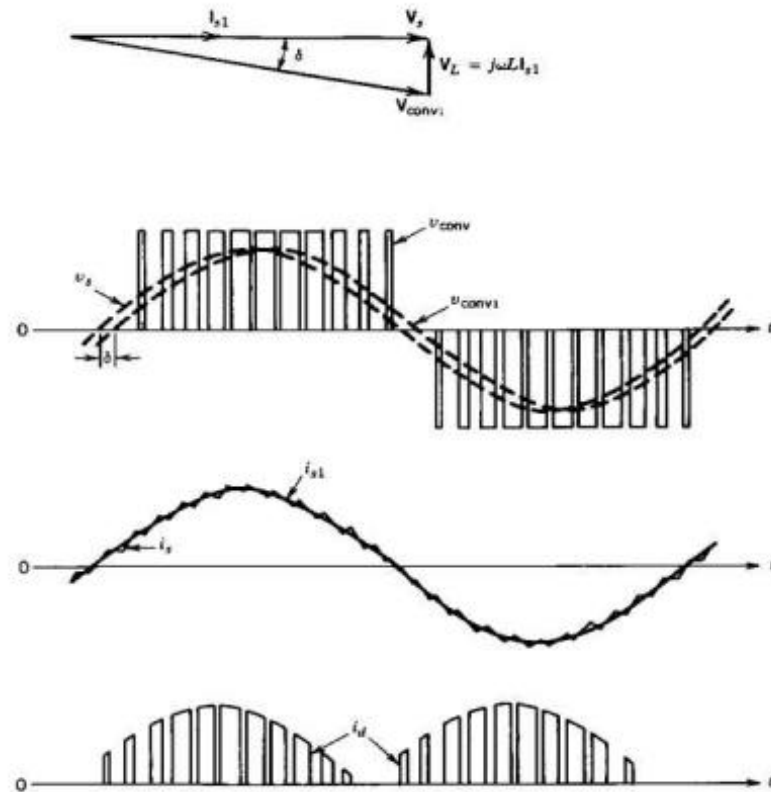


Fonte: Ned Mohan, (2002)

Para o fluxo de potência e sua magnitude atingirem o patamar esperado, é ideal controlar magnitude e fase δ de V_{conv} . O sistema de controle do conversor é responsável por isso.

Analisando a Figura 8, é possível notar que, os sinais de corrente e de tensão, tanto do lado CC quando o lado CA, são distorcidos e carregam harmônicos. Afim de obter grandezas livres de harmônicos, filtros são usados para medir as correntes e tensões do circuito.

Figura 8 – Ondas de resultantes do conversor *full-bridge*.



Fonte: Ned Mohan, (2002)

2.2 Baterias

A função básica de uma bateria é armazenar energia obtida da rede elétrica ou de alguma outra fonte de energia externa e liberá-la para a carga quando necessário. Diferentes sistemas de baterias com diferentes químicas e características existem. Exemplos de alguns sistemas de baterias comumente encontrados são as baterias de níquel-cádmio (NiCd), níquel-hidreto metálico (NiMH) e íon-lítio (Li-ion). As características dos diversos sistemas de baterias variam consideravelmente, mesmo para baterias com a mesma química, mas com, por exemplo, um design diferente ou diferentes aditivos (H.J. BERGVELD, 2005).

Uma distinção importante que pode ser feita em relação às baterias é entre baterias primárias e secundárias. As baterias primárias são não recarregáveis, como pilhas alcalinas, enquanto as baterias secundárias são recarregáveis, como baterias de lítio ferro fosfato. Diferentes sistemas de bateria estão disponíveis para ambos os

tipos, sendo cada sistema caracterizado por sua composição química (KATO, OGUMI e MANUEL, 2019).

Algumas definições gerais:

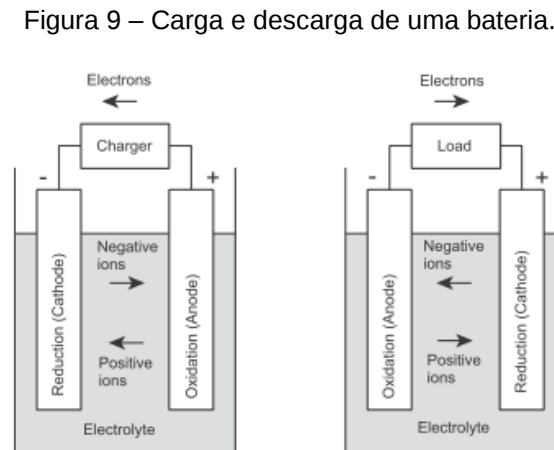
- Célula: A unidade eletroquímica básica utilizada para armazenar energia elétrica na forma de energia química. Uma célula consiste em dois eletrodos em um recipiente preenchido com um eletrólito.
- Bateria: Duas ou mais células conectadas em uma configuração série/paralelo apropriada para obter a tensão e capacidade operacionais necessárias para uma determinada carga. O termo "bateria" também é frequentemente usado para células individuais. Essa terminologia também será adotada neste trabalho, exceto quando for necessário distinguir entre células e baterias. Um bom exemplo é um "pacote de baterias" (*battery pack*), que consiste em várias células conectadas em série e/ou paralelo.

As baterias de íon-lítio, foco desse trabalho, são dispositivos eletroquímicos amplamente utilizados em dispositivos eletrônicos portáteis, veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia devido à sua alta densidade de energia, longa vida útil e eficiência. O funcionamento dessas baterias baseia-se em reações de oxirredução que ocorrem entre os eletrodos durante os processos de carga e descarga. Uma bateria de íon-lítio é composta, fundamentalmente, por quatro componentes principais (KATO, OGUMI e MANUEL, 2019):

- Ânodo: Geralmente feito de grafite, é o eletrodo onde ocorre a oxidação do lítio durante a descarga e a redução durante a carga.
- Cátodo: É tipicamente composto por materiais contendo óxidos de metais de transição, como LiCoO_2 (óxido de lítio e cobalto), onde ocorre a redução do lítio na descarga e a oxidação na carga.
- Eletrólito: Uma solução condutora, normalmente composta por um sal de lítio, como LiPF_6 , dissolvido em solventes orgânicos, que permite o transporte dos íons de lítio entre os eletrodos.

- Separador: Um material poroso que impede o contato direto entre os eletrodos, prevenindo curtos-circuitos, mas permitindo o fluxo de íons de lítio.

Figura 9 Ilustra os processos de carga e descarga de uma bateria.



Fonte: H. J. Bergveld, (2005)

2.2.1 Segurança e Ciclo de Vida

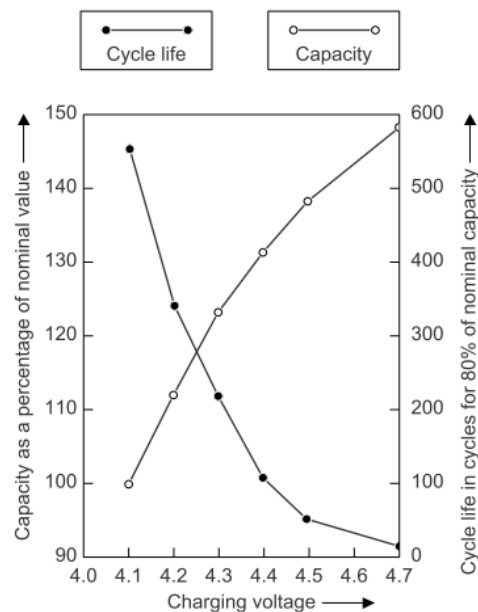
No caso das baterias de íon-lítio, um interruptor de segurança eletrônico deve ser integrado à bateria. A tensão, a corrente e a temperatura da bateria devem ser monitoradas, e o interruptor de segurança deve ser controlado para garantir que a bateria nunca opere em uma região insegura. Isso ocorre porque os fornecedores de baterias estão particularmente preocupados com questões de segurança devido aos riscos de responsabilidade (H.J. BERGVELD, 2005).

Uma faixa de tensão, uma corrente máxima e uma temperatura máxima determinam a região na qual o uso da bateria é considerado seguro. Esses limites são estabelecidos pelo fabricante da bateria. Fora dessa região segura, processos destrutivos podem começar a ocorrer. De modo geral, em faixas de tensão mais altas, esses processos podem eventualmente levar a um incêndio ou explosão, enquanto em faixas de tensão mais baixas, resultam em perda irreversível da capacidade da bateria.

A tensão máxima é determinada por dois fatores: a capacidade máxima da bateria e sua vida útil em ciclos. A vida útil em ciclos refere-se ao número de ciclos de carga e descarga que a bateria pode suportar antes de ser considerada no fim de sua vida útil. O fim da vida útil da bateria ocorre quando sua capacidade cai abaixo de um certo nível, geralmente 80% da capacidade nominal.

Isso é ilustrado na Figura 10, que mostra a relação entre a capacidade máxima da bateria e a vida útil em ciclos em função da tensão aplicada à bateria durante o carregamento. A figura demonstra que, quanto maior essa tensão, maior será a capacidade máxima da bateria, mas menor será sua vida útil em ciclos. Na faixa de 4,1 a 4,2 V, um aumento de 100 mV na tensão da bateria resulta em um aumento de 12% na capacidade, mas também em uma queda acentuada de 200 ciclos na vida útil (H.J. BERGVELD, 2005).

Figura 10 – Capacidade da bateria e o ciclo de vida.



Fonte: H. J. Bergveld, (2005)

A especificação de corrente máxima se assemelha à especificação de um fusível. Abaixo do nível máximo de corrente, cujo valor está relacionado à capacidade máxima da bateria, o interruptor de segurança deve sempre conduzir. Acima desse nível de corrente, correntes são permitidas apenas por um determinado período de tempo. A duração desse tempo dependerá da resistência térmica da bateria em

relação ao ambiente e da sua capacidade térmica. Quanto maior a corrente, menor será o tempo permitido para evitar o risco de a temperatura da bateria se tornar excessivamente alta (ANDREA, 2010).

2.2.2 Capacidade e Energia da Bateria

A capacidade de uma bateria mostra a quantidade de carga elétrica que pode ser extraída de uma bateria. A capacidade é geralmente expressa em coulombs (C), mas ampere-horas (Ah) é a unidade comumente usada para avaliar as características de baterias e eletrodos. Para obter a capacidade da bateria, basta isolar a carga na definição de corrente, então obtém-se (JOHNSON, 1978, p. 5):

$$C = \int_{t_0}^t i(t) dt . \quad (2.12)$$

Em baterias, a taxa C (*C-rate*) é uma definição importante. Ela representa a corrente de carga ou descarga, em Amperes, numericamente igual à capacidade nominal em Ah. Múltiplos maiores ou menores da taxa C são usados para expressar correntes maiores ou menores. Por exemplo, a taxa C para uma bateria de 2 Ah é de 2 A, enquanto as taxas C/2 e 2C correspondem a 1 A e 4 A, respectivamente (H.J. BERGVELD, 2005).

Outra definição importante é a tensão de corte. Em baterias de lítio é o valor mínimo de tensão permitido por célula durante o processo de descarga. Abaixo dessa tensão, a descarga deve ser interrompida para evitar danos à bateria, perda de capacidade ou riscos de segurança. Esse valor varia conforme o tipo de célula, mas geralmente está entre 2,5 V e 3,0 V (H.J. BERGVELD, 2005).

A capacidade nominal é fortemente dependente da corrente de descarga, da temperatura da bateria e da tensão de corte. Em geral, a capacidade obtida de uma bateria será menor em correntes de descarga mais altas, temperaturas mais baixas e tensões de corte mais elevadas. Normalmente, a capacidade nominal é especificada para uma corrente de C/10 e temperatura ambiente em baterias secundárias. A tensão de corte especificada depende fortemente da química da bateria (H.J. BERGVELD, 2005).

Com a capacidade, é possível estimar o tempo que uma bateria consegue fornecer uma determinada corrente, como exemplo, considerando uma bateria de capacidade nominal de 100Ah descarregando com sua corrente nominal de 10A, estima-se que a bateria durará 10h. Vale salientar que isso é válido apenas considerando grandezas nominais, em caso de um tempo de descarga menor, ou seja, uma corrente maior do que a nominal, a capacidade decai. Curvas que relacionam a capacidade e corrente de descarga, são fornecidas pelos fabricantes das baterias (ANDREA, 2010).

A energia, é expressa em Wh, e relaciona quanto de potência poderá ser entregue e durante um intervalo de tempo, sendo calculada por:

$$E = C \cdot V . \quad (2.13)$$

2.2.3 SOC e SOH

Estado de Carga (*State of Charge – SOC*) é uma grandeza importante ao se trabalhar com baterias, sua unidade é porcentagem e indica, em relação ao estado nominal, quanto de capacidade resta na bateria. Para cálculo do SOC, é comum usar o método *Coulomb Counting*, que envolve medir a corrente entrando ou saindo da bateria e integrar a medição ao longo do tempo, expressado na equação (BARSUKOV; QIAN, 2013):

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \frac{1}{C_{nom}} \int_{t_0}^t i(t) dt . \quad (2.14)$$

Apesar de fornecer uma estimativa do SOC, a Equação (2.14) possui limitações. Variáveis como temperatura, tensão e impedância, influenciam a capacidade armazenada da bateria, devido a isso, o método *Coulomb Counting* pode fornecer valores de SOC diferentes do real.

A capacidade máxima possível da bateria, em Ah, diminui à medida que a bateria envelhece. A perda de capacidade depende de vários fatores. Em geral, quanto mais a bateria for mal utilizada, por exemplo, sobrecarregada ou excessivamente descarregada de forma regular, maior será a perda. Alguns tipos de baterias foram otimizados para máxima vida útil, o que significa que sua capacidade diminui mais

lentamente em função do número de ciclos de carga/descarga (BARSUKOV; QIAN, 2013).

Uma forma de quantificar a deterioração da bateria é através do seu Estado de Saúde (State of *SOH*). É uma grandeza em porcentagem e indica até quanto da capacidade nominal a bateria ainda consegue ser carregada. É um indicador importante da vida útil da bateria, informando quando é necessária sua troca. O *SOH* pode ser calculado por (PRADHAN; CHAKRABORTY, 2022):

$$SOH = \frac{C_{max,atual}}{C_{nominal}} \quad (2.15)$$

2.2.4 Algoritmos de Carregamento

O processo de carregamento de baterias é uma etapa fundamental para garantir o funcionamento eficiente e a durabilidade de sistemas de armazenamento de energia. Diferentes tipos de baterias, como chumbo-ácido, níquel-cádmio e íon-lítio, apresentam comportamentos distintos durante o carregamento, o que exige técnicas específicas adaptadas a cada tecnologia.

As baterias de íon-lítio, destacam-se por sua alta densidade de energia, baixa taxa de autodescarga e eficiência energética elevada. No entanto, devido à sua sensibilidade térmica e química, o carregamento das baterias de íon-lítio requer controle rigoroso para evitar sobrecarga, superaquecimento e outros problemas que podem comprometer sua segurança e desempenho (H.J. BERGVELD, 2005).

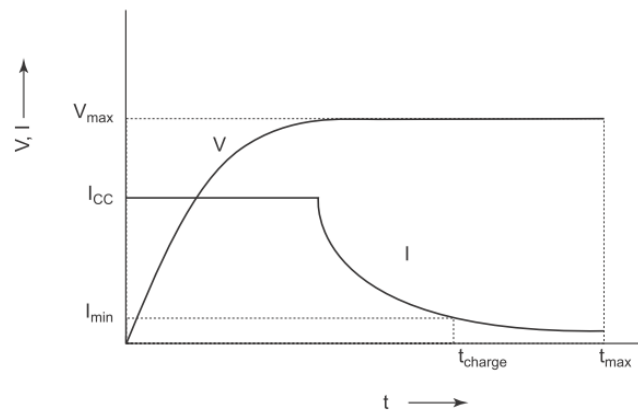
O carregamento de uma bateria de íon-lítio, deve obedecer a dois estágios importantes, o estágio de corrente constante e o estágio de tensão constante:

- Corrente constante: Estágio de carregamento rápido, a bateria carrega até em torno de 70% a 80%. Nesse estágio a corrente é mantida constante em I_{CC} enquanto a tensão da bateria cresce gradualmente, até atingir o nível limite especificado pelo fabricante V_{max} .
- Tensão constante: Após atingir a tensão limite V_{max} , começa-se a manter a tensão da bateria constante no nível especificado, enquanto a corrente

cai exponencialmente. Esse estágio é mais lento, mas é responsável por garantir a carga final da bateria de 20% a 30% de maneira eficiente e segura.

Um gráfico ilustrando os estágios de carregamento está na Figura 11.

Figura 11 – Gráficos de tensão e corrente durante o carregamento.

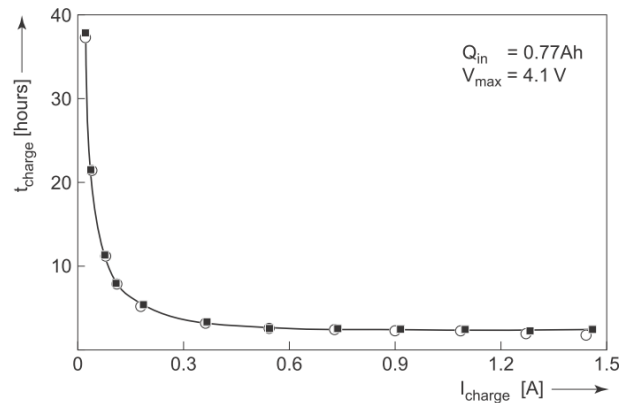


Fonte: H. J. Bergveld, (2005)

O uso de um valor mais alto de corrente I_{cc} levaria, intuitivamente, a um tempo de carga menor. No entanto, o modo de tensão constante será ativado mais cedo durante o processo de carregamento, pois o sobrepotencial total da bateria e a queda de tensão ôhmica dentro da bateria são maiores com uma corrente de carga mais alta.

No modo de tensão constante, o tempo de carga não depende da corrente de carga, mas sim do comportamento do potencial de equilíbrio da bateria. Esse efeito foi ilustrado pelos resultados de uma simulação e por um exemplo de medição na Figura 12. O tempo total de carga praticamente não diminui quando a corrente é maior que uma taxa de 1C (H.J. BERGVELD, 2005).

Figura 12 – Tempo de carregamento em função da corrente I_{CC} .



Fonte: H. J. Bergveld, (2005)

Um aumento na corrente do estágio de corrente constante, não leva a uma redução no tempo de carga, mas tem uma influência negativa na vida útil do ciclo. Isso ocorre porque a bateria mantém uma tensão relativamente alta, durante o estágio de tensão constante, por um período prolongado. Isso facilita a geração de produtos de decomposição.

Por outro lado, o valor de tensão no modo de tensão constante é extremamente importante para determinar a capacidade carregada e também o ciclo de vida. Uma tensão maior leva a uma capacidade carregada maior, porém consequentemente, diminui a vida útil da bateria. Como fabricantes querem manter uma vida útil bem determinada, a exatidão do valor de tensão máxima é mais ou menos 1% (H.J. BERGVELD, 2005).

2.3 Sistema de Gerenciamento da Bateria

A tarefa básica de um Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS) é garantir o uso otimizado da energia armazenada na bateria que alimenta o produto portátil e minimizar o risco de danos à bateria. Isso é alcançado por meio do monitoramento e controle dos processos de carga e descarga da bateria (H.J. BERGVELD, 2005).

Um Sistema de Gerenciamento de Baterias (Battery Management System – BMS, é capaz de realizar medições de grandezas analógicas, como: tensão das células, tensão global, temperatura das células, corrente global, potência, etc. É

responsável também por realizar os cálculos de outras grandezas da bateria, como: capacidade, *SOC*, *SOH*, energia, capacidade total carregada, capacidade total descarrega, etc. Além disso, o *BMS* fornece *status* e alarmes das baterias e realiza proteções simples, como proteção contra superaquecimento e também sobrecarga.

O *BMS* também realiza algumas operações das baterias, como por exemplo a pré-carga e a equalização. A rotina de pré-carga é um procedimento aplicado ao conectar uma bateria a um circuito elétrico, especialmente em sistemas de alta potência ou onde o circuito contém capacitores de grande valor. Esse processo é necessário para evitar picos de corrente excessivos no momento da conexão, que poderiam causar danos aos componentes do circuito ou à própria bateria (ANDREA, 2010).

A equalização de baterias é uma técnica usada para garantir que todas as células de uma bateria ou todas as baterias em um banco estejam carregadas no mesmo nível de tensão. Esse procedimento é fundamental para prolongar a vida útil do sistema, melhorar o desempenho e evitar problemas relacionados ao desequilíbrio entre as células ou baterias.

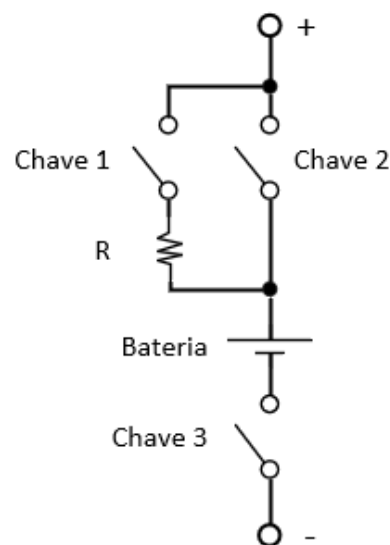
2.3.1 Pré-Carga

Quando uma bateria é conectada diretamente a um circuito, a diferença de potencial entre a bateria e os componentes do circuito (como capacitores) pode gerar um pico de corrente. Esse pico ocorre devido à alta corrente necessária para carregar rapidamente os capacitores do circuito. Consequências de não realizar a pré-carga incluem: danos a componentes sensíveis (capacitores, resistores, ou MOSFETs), aparição de arco elétrico e aquecimento excessivo (ANDREA, 2010).

A pré-carga consiste em limitar a corrente inicial que flui da bateria para o circuito, permitindo que os componentes se estabilizem antes de a conexão plena ser realizada. Isso é feito utilizando um elemento resistivo. Um circuito simplificado de pré-carga é mostrado em Figura 13. A operação consiste em primeiro fechar as chaves 3 e 1, dessa forma a bateria é conectada ao circuito em série com o elemento resistivo *R*, impedendo o surgimento de correntes com altas amplitudes, até os elementos reativos do circuito carregarem. Em seguida a tensão após a chave 1 é monitorada,

quando essa tensão se torna muito próxima da tensão da bateria, indica que o transitório foi sessado, e que é seguro fechar a chave 2, que curto-circuita a resistência, realizando a conexão plena da bateria e finalizando a pré-carga. A rotina de pré-carga, além de ser coordenada pelo *BMS*, também é feita pelo *PCS* (ANDREA, 2010).

Figura 13 – Circuito simplificado de pré-carga.



Fonte: elaborado pelo próprio autor, (2025)

2.3.2 Equalização

Em um banco de baterias ou em um sistema multicelular, algumas células podem descarregar ou carregar mais rapidamente que outras, resultando em tensões diferentes entre elas. Se o desbalanceamento não for corrigido, pode ocorrer: sobrecarga em células com maior tensão, subcarga em células com menor tensão, degradação acelerada das células mais fracas.

Em sistemas de baterias em série, o desempenho global é limitado pela célula com menor capacidade ou tensão. Por exemplo, em uma bateria de íon-lítio, uma única célula desbalanceada pode fazer com que o sistema inteiro pare de funcionar para proteger as outras células.

Nesse contexto, a equalização pode ser feita por dois métodos principais: passivo e ativo. Ambos têm o mesmo objetivo: igualar as tensões ou SOC das células,

mas empregam abordagens diferentes. Esses dois métodos são brevemente descritos a seguir:

No método passivo, a energia das células com maior tensão é dissipada como calor, usando resistores. Esse método é simples e amplamente utilizado em sistemas pela simplicidade e o custo baixo. Para realizar equalização passiva, o *BMS*, monitora a tensão de cada célula individualmente, quando uma célula atinge a tensão máxima permitida, a depender do *datasheet*, o circuito redireciona o excesso de energia para um resistor, dissipando-a como calor, o que reduz a tensão da célula, permitindo que outras células "alcancem" o mesmo nível (ANDREA, 2010).

O método ativo transfere a energia das células com maior tensão para as células com menor tensão, em vez de dissipá-la como calor. Isso é feito com o uso de conversores CC-CC ou outros dispositivos eletrônicos. Para realizar equalização ativa, um circuito monitorador detecta o desbalanceamento entre as tensões das células, a energia é retirada das células com maior tensão e transferida para as células com menor tensão, esse processo continua até que todas as células atinjam o mesmo nível de tensão. Essa técnica pode ser usada célula a célula ou também por barramento, onde as células com maiores tensões se conectam a um barramento e transferem energia para outras células com tensões menores (ANDREA, 2010).

2.4 Comunicação Modbus

O Modbus é um protocolo de comunicação aberto, amplamente utilizado na indústria para comunicação entre dispositivos como CLPs, sensores, medidores de energia, inversores, entre outros. Ele permite a troca de dados de forma padronizada, simples e eficiente. Dentro do universo Modbus, dois dos modos mais comuns de implementação são o Modbus RTU e o Modbus TCP, que diferem na camada física e no método de transmissão (JAEGER; MENDES, 2013).

2.4.1 Modbus RTU

O Modbus RTU (*Remote Terminal Unit*) é protocolo de comunicação serial, ou seja, os bits são enviados em uma sequência, um após o outro. A camada física usada

pelo protocolo, podem ser de três diferentes tipos: RS-232, RS-422, RS-485. Nesse trabalho, é enfatizado o uso do RS-485, devido ao seu amplo uso na indústria. O RS-485, Figura 14, é constituído de um par trançado e através dele é enviado um sinal diferencial, o que diminui a sensibilidade a ruído e aumenta bastante a distância possível de comunicação, além da malha de blindagem do cabo, que atua como uma gaiola de Faraday e evita ainda mais interferência eletromagnética. Essa malha deve ser aterrada (MODBUS ORGANIZATION, 2002).

Figura 14 – Cabo RS-485.



Fonte: Belden, (2024)

Algumas regras de ouro devem ser respeitadas nas comunicações Modbus RTU, são elas (SCHNEIDER, 2011):

- A comunicação baseia no modelo mestre/escravo, onde as informações e dados trafegam entre o mestre e até 32 escravos;
- O mestre sempre inicia e controla todo o tráfego de informações na rede;
- Um escravo nunca inicia uma comunicação;
- Toda comunicação deve ocorrer através de pacotes, um pacote é uma cadeia de *bytes*, a quantidade máxima permitida são 255 *bytes*;
- Todos os pacotes enviados pelo mestre são requisições, enquanto os pacotes enviados pelos escravos são respostas;
- Um escravo é capaz de ter apenas um mestre.

2.4.1.1 Pacotes Modbus

Todo pacote Modbus consiste de quatro campos, são eles: endereço do escravo, função, dados e checagem de erro. Esses quatro campos são brevemente descritos a seguir (MODBUS ORGANIZATION, 2002).

O campo de endereço do escravo em um pacote Modbus tem um comprimento de um byte e identifica, de forma única, o dispositivo escravo envolvido na transação. Os endereços válidos variam entre 1 e 255. Um dispositivo escravo executa o comando especificado no pacote quando recebe um pacote de solicitação com o campo de endereço do escravo correspondente ao seu próprio endereço. Um pacote de resposta gerado pelo escravo terá o mesmo valor no campo de endereço do escravo (MODBUS ORGANIZATION, 2002).

O campo de função de um pacote de solicitação Modbus tem um comprimento de um *byte* e informa ao escravo endereçado qual função deve ser executada. Da mesma forma, o campo de função de um pacote de resposta informa ao mestre qual função o escravo endereçado acabou de executar. As funções principais do protocolo Modbus estão presente na Tabela 1.

Tabela 1 – Funções do protocolo Modbus.

Funções Modbus	
1	Leitura de saídas digitais (bobinas)
2	Leitura de entradas digitais
3	Leitura de saídas analógicas (memórias)
4	Leitura de entradas analógicas
5	Escrita de uma única bobina
6	Escrita de uma única memória
15	Escrita de múltiplas bobinas
16	Escrita de múltiplas memórias

Fonte: elaborado pelo próprio autor, (2025)

O campo de dados de uma solicitação Modbus tem comprimento variável e depende da função. Esse campo contém as informações necessárias para que o dispositivo escravo execute o comando especificado em um pacote de solicitação ou os dados retornados pelo dispositivo escravo em um pacote de resposta. Os dados nesse campo são armazenados em registradores de 16 bits. Os registradores são

transmitidos na ordem: byte mais significativo primeiro, byte menos significativo depois.

O campo de verificação de erros permite que o dispositivo receptor determine se um pacote está corrompido por erros de transmissão. No modo Modbus RTU, é utilizado um Código de Redundância Cíclica de 16 bits (CRC-16). O dispositivo de envio calcula um valor de 16 bits, baseado em cada byte do pacote, utilizando o algoritmo CRC-16. O valor calculado é inserido no campo de verificação de erros. O dispositivo receptor realiza o mesmo cálculo, sem incluir o campo de verificação de erros, em todo o pacote recebido. O valor resultante é comparado ao campo de verificação de erros. Erros de transmissão são indicados quando o *checksum* calculado não corresponde ao *checksum* armazenado no pacote recebido. Nesse caso, o dispositivo receptor ignora o pacote inválido (MODBUS ORGANIZATION, 2002).

Levando em conta a função 03, leitura de memória (*holding register*), um exemplo de pacote de requisição, enviado pelo mestre é mostrado na Figura 15. Na Figura 16 é apresentado um pacote de resposta, enviado pelo escravo. Nos pacotes, o que está em branco é referente ao campo de dados. A estrutura do pacote de leitura de memória (*holding register*) é descrito na Tabela 2.

Tabela 2 – Descrição do pacote de leitura de *holding registers*.

Pacote de requisição de leitura de memória (mestre pra escravo)	Pacote de resposta de leitura de memória (escravo para mestre)
64 Hex – Endereço do escravo (1 byte) (<i>slave address</i>)	64 Hex – Endereço do escravo (1 byte) (<i>slave address</i>)
03 Hex – Código da função (1 byte) (<i>function code</i>)	03 Hex – Código da função (1 byte) (<i>function code</i>)
A Hex – Registro inicial (2 bytes) (<i>start register</i>)	6 Hex – Contagem de bytes (1 byte) (<i>byte count</i>)
3 Hex – Quantidade de registros para leitura (2 bytes) (<i># of register</i>)	Primeiro registro do intervalo (2 bytes)
CRC <i>checksum</i> (2 bytes)	Segundo registro do intervalo (2 bytes)
	...
	CRC <i>checksum</i> (2 bytes)

Fonte: Schneider, (2011)

Figura 15 – Pacote de requisição de leitura Modbus.

Slave	Function	Start register (40011)		# of registers (3)		CRC checksum	
64	03	◆ 00	◆ 0A	◆ 00	◆ 03	◆ 2C	◆ 3C

Fonte: Schneider, (2011)

Figura 16 – Pacote de resposta de leitura Modbus.

Slave	Function	Byte count	Register 1		Register 2		Register 3		CRC checksum	
64	03	◆ 06	◆ 2E	◆ CE	◆ 2E	◆ E8	◆ 2F	◆ 13	◆ 0D	◆ 58

Fonte: Schneider, (2011)

2.4.1.2 Funções Modbus

As principais funções Modbus foram citadas na Tabela 1. Porém não houve detalhamento de cada uma delas. Para entender as funções é necessário compreender os tipos de dados Modbus existentes, são eles (MODBUS ORGANIZATION, 2002):

- Bobinas (*Coils*): As bobinas, são memória booleanas, ou seja, armazenam apenas um bit de informação, um ou zero. Por serem saídas digitais, além da leitura, também permitem a atuação/escrita;
- Entradas digitais (*Discrete inputs*): Assim como as bobinas, são variáveis booleanas, porém, por serem entradas, não permitem escrita de valores;
- Memórias (*Holding Registers*): São variáveis de 16 bits, que guardam valores de 0 a 65535. Por serem memórias, permitem também a escrita de valores;
- Entradas Analógicas (*Input Registers*): São semelhantes às memórias, também armazenam valores analógicos, porém, por serem entradas, a escrita de dados não é permitida.

Em entendimento com os tipos de dados presentes no protocolo Modbus, fica fácil compreender as funções, as quais são (MODBUS ORGANIZATION, 2002):

- 01 – Leitura de bobinas: Responsável por solicitar do escravo um ou mais bobinas. Pacote semelhante ao da Figura 15;
- 02 – Leitura de entradas digitais: Responsável por solicitar do escravo um ou mais entradas digitais. Pacote semelhante ao da Figura 15.
- 03 – Leitura de memórias: Responsável por solicitar do escravo um ou mais memórias. Pacote idêntico ao da Figura 15.
- 04 – Leitura de entrada analógicas: Responsável por solicitar do escravo um ou mais entradas analógicas. Pacote idêntico ao da Figura 15.
- 05 – Escrita de uma bobina: Responsável por escrever no escravo uma bobina. Pacote semelhante ao da Figura 17.
- 06 – Escrita de uma memória: Responsável por escrever no escravo uma memória. Pacote semelhante ao da Figura 17.
- 15 – Escrita de múltiplas bobinas: Responsável por escrever no escravo várias bobinas. Pacote semelhante ao da Figura 17.
- 16 – Escrita de múltiplas memórias: Responsável por escrever no escravo várias memórias. Pacote semelhante ao da Figura 17.

Para requisição de escrita da Figura 17, um exemplo de resposta do escravo é mostrado na Figura 18.

Figura 17 – Pacote de requisição de escrita Modbus.

Slave	Function	Start register (46001)		# of registers (4)		Byte count	Register 1		Register 2		Register 3		Register 4		CRC checksum	
C8	10	17	70	00	04	08	00	00	04	B0	00	00	00	78	8B	F8

Fonte: Schneider, (2011)

Figura 18 – Pacote de resposta de escrita Modbus.

Slave	Function	Start register (46001)		# of registers (4)		CRC checksum	
C8	10	17	70	00	04	D4	3C

Fonte: Schneider, (2011)

2.4.2 Modbus TCP

O Modbus TCP (ou Modbus TCP/IP) é uma variação do protocolo Modbus que utiliza a pilha de protocolos TCP/IP como meio de comunicação. Ele foi projetado para ser executado em redes Ethernet, aproveitando a infraestrutura de redes modernas e permitindo a integração com sistemas baseados em IP (MODBUS ORGANIZATION, 2006).

As regras de ouro para o protocolo Modbus TCP são diferentes daquelas para o RTU (SCHNEIDER, 2011):

- A comunicação baseia no modelo cliente/servidor, onde as informações e dados trafegam entre o servidor e seus clientes;
- O cliente sempre inicia a comunicação, já o controle de tráfego é realizado por *switches*;
- Um servidor nunca inicia uma comunicação;
- Toda comunicação deve ocorrer através de pacotes. Os pacotes são iguais aos pacotes do RTU, porém com um cabeçalho TCP;
- Todos os pacotes enviados pelo cliente são requisições, enquanto os pacotes enviados pelo servidor são respostas;
- Um servidor é capaz de ter vários clientes.

2.4.2.1 Pacotes

Para envio de dados via ethernet utilizando um protocolo TCP/IP é necessário ter um cabeçalho TCP, mostrado na Figura 19. Sendo assim, depois de um dispositivo receber um dado via ethernet, irá remover o cabeçalho TCP e restará um frame semelhante ao frame já abordado na Seção 2.4.1.1. Portanto, o pacote ainda possuirá: endereço do dispositivo, comprimento do dado, código da função e dados. Porém, exclusivamente para o Modbus TCP aparecem mais dois campos: Identificador da transação e Identificador de protocolo (MODBUS ORGANIZATION, 2006).

Figura 19 – Cabeçalho TCP/IP.

0~15								16~31							
Source port								Destination port							
Sequence number (32bits)															
Acknowledgement number (32bits)															
Header Length (4bits)	Reserve (4bits)	U R G	A C K	P S H	R S T	S Y N	F I N	Window (16bits)							
Checksum (16bits)								Urgent pointers (16bits)							
Options(variable)															

Fonte: CATL, (2023)

O frame Modbus TCP é dividido em duas partes, *MBAP (Modbus Application Protocol)* e *PDU (Protocol Data Unit)*, apenas com o intuito de organização. Uma imagem do frame Modbus TCP está na Figura 20. Além dos campos já conhecidos, há dois novos campos: o campo identificador da transação e o campo identificador de protocolo.

O campo identificador da transação serve para associar uma resposta do servidor à solicitação correspondente do cliente. Cada solicitação enviada pelo cliente tem um identificador único, que é incluído na resposta gerada pelo servidor, permitindo que o cliente saiba a qual solicitação a resposta pertence. Em aplicações onde há múltiplas transações sendo executadas em paralelo (por exemplo, em sistemas multitarefa ou com múltiplos dispositivos), o identificador da transação garante que cada transação seja tratada separadamente (MODBUS ORGANIZATION, 2006).

O campo Identificador de Protocolo é um componente importante do *MBAP*, que é utilizado para identificar o protocolo sendo usado na comunicação. Esse cabeçalho é adicionado no início de cada mensagem Modbus TCP para garantir a compatibilidade com os protocolos baseados em redes TCP/IP. O valor 0x0000 é reservado para identificar o protocolo Modbus. Outros valores podem ser usados em implementações específicas para identificar protocolos diferentes ou extensões personalizadas, embora isso seja raro (MODBUS ORGANIZATION, 2006).

A funções usadas no Modbus TCP são idênticas aquelas usadas no Modbus RTU. Portanto, com exceção desses dois campos novos, todo o resto é igual. Um exemplo de uma requisição de leitura de memória é exibido na Figura 21.

Figura 20 – Frame Modbus TCP.

MBAP				PDU	
Transaction process identifier	Protocol identifier	Data length	Address	Function code	Data
2byte	2byte	2byte	1byte	1byte	Nbyte

Fonte: CATL, (2023)

Figura 21 – Requisição de leitura de memória Modbus.

MBAP				PDU				
Transaction process identifier	Protocol identifier	Data length	System address	Function code	Starting register's address high byte	Starting register's address low byte	Register amount high byte	Register amount low byte
0x0000	0x0000	0x0006	0x64	0x03	0x04	0x20	0x00	0x13

Fonte: CATL, (2023)

3 DESCRIÇÃO TÉCNICA DO SISTEMA E DOS CENÁRIOS AVALIADOS

O foco deste trabalho é o desenvolvimento de um *EMS* para um *BESS*, cuja principal aplicação é o *time shifting*. No entanto, o *EMS* é um conceito que se refere ao sistema responsável pelo gerenciamento do *BESS*, sendo assim, o *hardware* utilizado fica a escolha do projetista.

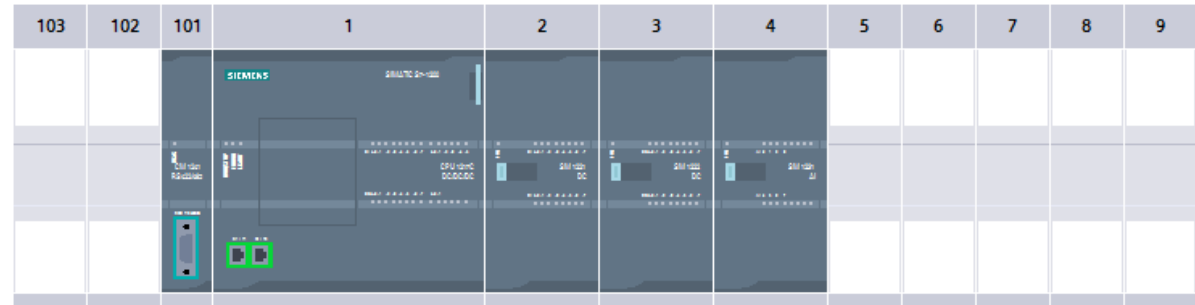
O *hardware* escolhido para hospedar o *EMS* é um CLP Siemens, pois é um equipamento amplamente utilizado na indústria, capaz de atender a todas as necessidades do projeto. A seguir, apresenta-se a especificação do *hardware* utilizado:

- 1 x CPU 1217C DC/DC/DC | 6ES7 217-1AG40-0XB0 | Firmware V4.6 – Unidade central de processamento com alimentação 24Vcc, saídas digitais transistorizadas (CC) e entradas/saídas *onboard*;
- 1 x CM 1241 | 6ES7 241-1CH32-0XB0 | Firmware V2.2 – Módulo de comunicação serial para protocolos como Modbus RTU, USS ou comunicação ponto a ponto;

- 1 x SM 1221 DI16 x 24VDC | 6ES7 221-1BH32-0XB0 | Firmware V2.0 – Módulo com 16 entradas digitais isoladas (24Vcc), com filtro de ruído ajustável (0.1ms a 20ms);
- 1 x SM 1222 DQ16 x 24VDC | 6ES7 222-1BH32-0XB0 | Firmware 2.0 - Módulo com 16 saídas digitais transistorizadas (24Vcc/0.5A), protegidas contra curto-circuito;
- 1 x SM 1231 AI8 | 6ES7 231-4HF32-0XB0 | Firmware V2.1 – Módulo com 8 entradas analógicas configuráveis (0-10V, 0-20mA ou $\pm 10V$), com resolução de 13 bits + sinal.

A plataforma utilizada para criação do código interno ao CLP foi o TIA Portal V18, plataforma proprietária da Siemens para programação dos seus controladores. Na Figura 22 está representando o *hardware* utilizado no *EMS*.

Figura 22 – *Hardware* do CLP.



Fonte: elaborado pelo próprio autor, (2025)

Antes de dissertar sobre o código do CLP e cada rotina criada. Primeiro é necessário entender o projeto num contexto mais amplo, entender seu escopo.

3.1 Escopo

Antes de efetivamente entrar na programação do *EMS*, é necessário compreender o escopo do projeto. Para isso, é necessário o desenvolvimento de alguns documentos do projeto, para auxiliar o leitor, são eles: diagrama unifilar, topologia de comunicação, detalhamento de entradas e saídas.

3.1.1 Diagrama Unifilar

O diagrama unifilar é uma representação gráfica simplificada de um sistema elétrico, utilizando símbolos padronizados para os componentes e linhas para as conexões elétricas. Ele facilita a visualização da distribuição de energia, a identificação de equipamentos e a compreensão da instalação elétrica.

O diagrama do sistema em estudo do está no Apêndice A. Este documento mostra que o estabelecimento possui quatro alimentadores de energia. A partir do barramento central de média tensão (11,4 kV), quatro disjuntores alimentadores fornecem energia para diferentes setores, cada um com seu próprio transformador que reduz a tensão para 380 V, alimentando quadros de baixa tensão. O foco deste trabalho será o quadro de baixa tensão um, onde será conectado o *BESS*.

3.1.1.1 Elementos Chave

Alguns equipamentos possuem maior relevância devido à interação com o *BESS*, no unifilar esses equipamentos são destacados e são listados a seguir:

- *Racks* de lítio;
- *PCS*;
- Medidor de entrada da rede;
- Medidor do transformador do alimentador;
- Disjuntor (com medidor integrado) do *BESS*;
- Relé de proteção do transformador do *BESS*.

3.1.1.2 Rack de Lítio e PCS

O *rack* de lítio detalhado no diagrama do Apêndice A contém nove *packs* de baterias, cada um com 52 células de íons de lítio conectadas em série para somar as tensões. Cada módulo possui uma chave de conexão que o liga ao módulo seguinte. Cada *rack* conta com um circuito de pré-carga localizado na *control box* e também

com um disjuntor CC, que o conecta ao circuito externo. Uma apresentação mais detalhada está na Figura 23.

Da mesma forma, também é detalhado o *PCS*, que é composto por um conversor de eletrônica de potência, já mencionado na Seção 2.1.1 e por um circuito de pré-carga similar ao presente no *rack* de lítio. Para proteção e seccionamento, o *PCS* conta com chaves tanto do lado CC quanto do lado CA.

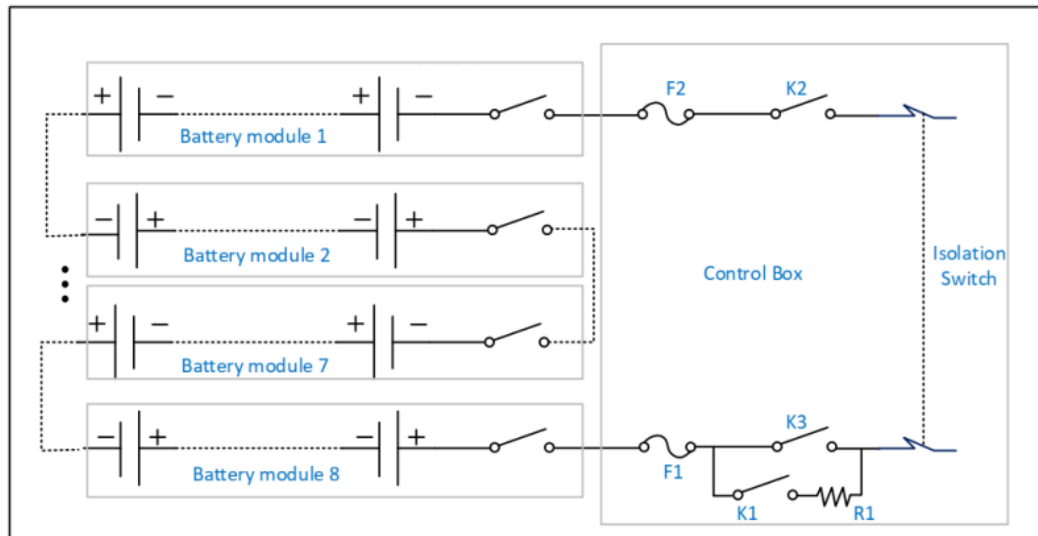
Na saída do *BESS*, há um disjuntor (com medidor integrado) que conecta o *BESS* a todo o circuito do estabelecimento. Após esse disjuntor, um transformador reduz a tensão de 690 V para 380V, níveis adequados ao estabelecimento, contando com um relé de proteção térmica.

3.1.1.3 Painel PNCLP e Cargas Auxiliares

No unifilar, o painel PNCLP é referente exclusivamente ao *BESS*, nele estará o CLP foco desse trabalho. Todas as cargas auxiliares do *BESS* são alimentadas a partir desse painel. Alguns exemplos de cargas auxiliares são:

- Circuitos auxiliares dos *racks* de lítio;
- Sensores e relés de proteção;
- Iluminação;
- Exaustores e disjuntores.

Figura 23 – Circuito elétrico do rack de lítio.



Fonte: CATL, (2023)

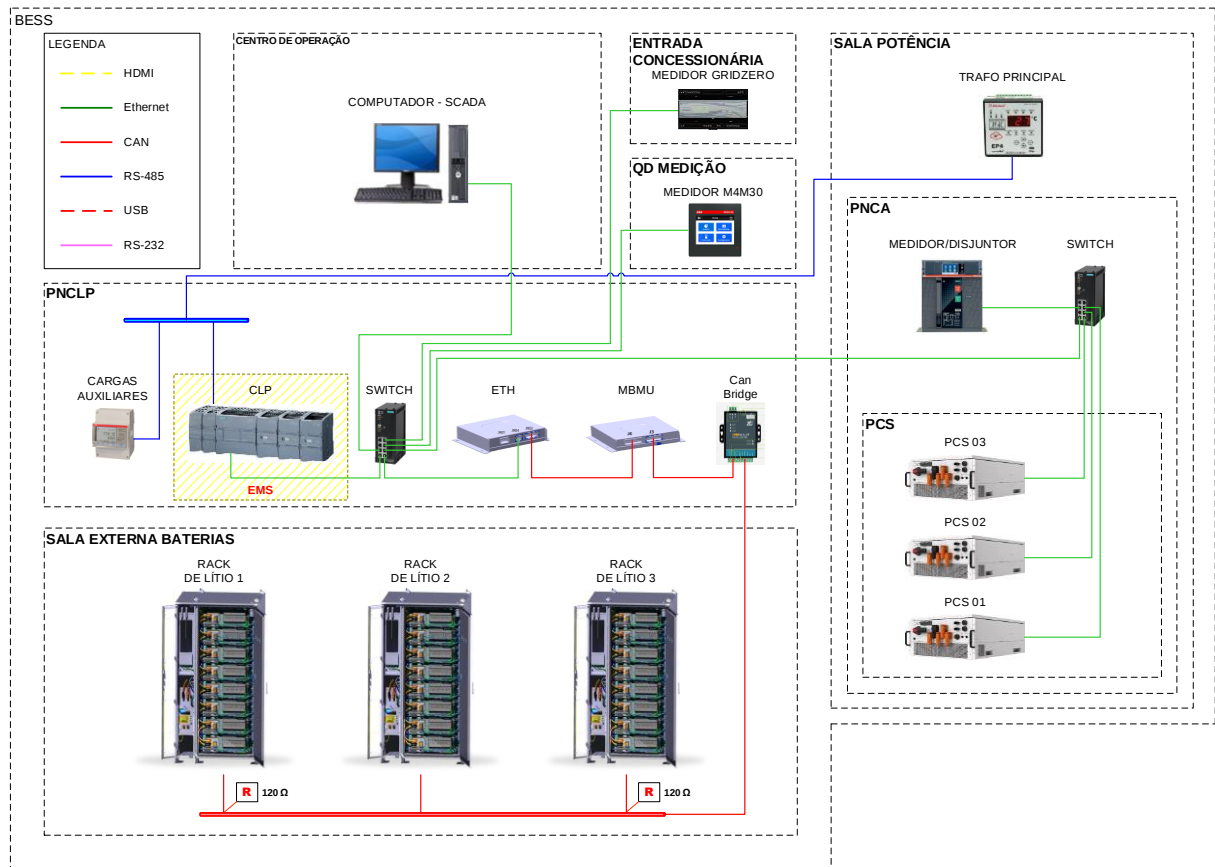
3.1.2 Topologia de Comunicação

A topologia de comunicação refere-se à forma como os dispositivos estão organizados e interconectados em uma rede de comunicação. Ela define como os dados fluem entre os dispositivos. Mostra ao leitor o tipo de rede usado, identificando o meio físico, protocolo de comunicação, arquitetura de rede e parâmetros de comunicação.

A topologia utilizada neste projeto está representada na Figura 24. Nela, observa-se que o CLP, foco do trabalho, estabelece comunicação com os seguintes dispositivos:

- Racks de lítio (BMS);
- PCS;
- Medidor de entrada da rede;
- Medidor do transformador do alimentador;
- Medidor de cargas auxiliares;
- Disjuntor (com medidor integrado);
- Relé de proteção do transformador;

Figura 24 – Topologia de comunicação.



Fonte: elaborado pelo próprio autor, (2025)

É importante frisar que a motivação do sistema supervisório estar presente na topologia de comunicação, é apenas ilustrativo, o mesmo não faz parte do escopo do presente trabalho e não será desenvolvido.

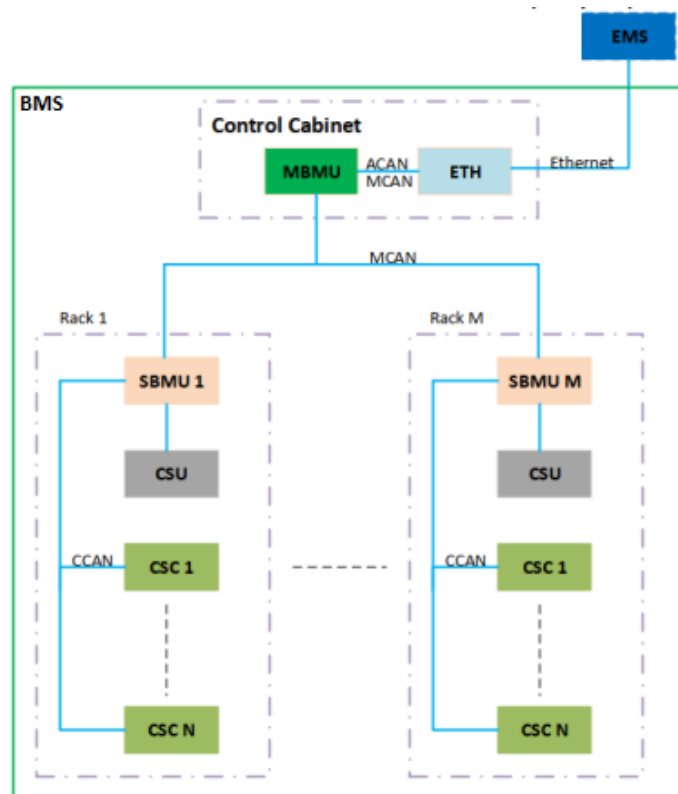
A comunicação com o medidor de cargas auxiliares e o relé de proteção é realizada via Modbus RTU (abordado na Seção 2.4.1). No entanto, os dados obtidos via comunicação desses dispositivos, são utilizados apenas para supervisão, sem participação direta na lógica de controle do CLP.

Já a comunicação com os demais equipamentos é feita via Modbus TCP (abordado na Seção 2.4.2), utilizando uma topologia em estrela, onde um *switch* atua como elemento centralizador. Através dessa rede, o *BMS* transmite dados dos *racks* de lítio e recebe comandos para fecha-los (realizando a pré-carga e conectando os racks aos *PCS*) ou abri-los (seccionando o sistema). Além disso, via comunicação

Modbus TCP, o CLP envia comandos aos PCS, comandando seu acionamento/desligamento e a definição dos *setpoints* de potência ativa.

O BMS é composto por vários equipamentos, onde cada um deles é responsável por um nível específico dentro do rack de lítio. Esses equipamentos se comunicam entre si através de rede CAN, não abordada neste trabalho. A topologia do BMS é mostrada na Figura 25. O detalhamento dessas comunicações não é foco do presente trabalho.

Figura 25 – Topologia BMS.



Fonte: CATL, (2023)

3.1.2.1 Demais Equipamentos: Motivação e Importância

Para justificar a presença de cada equipamento no projeto, é fundamental compreender sua importância. Além dos PCS e dos racks de lítio, que são indispensáveis para o funcionamento do BESS, os demais dispositivos ainda não tiveram sua necessidade devidamente justificada. A seguir, detalha-se a função de cada um:

- Medidor de entrada da rede: No *BESS* atual, os casos de *time shifting* que serão implementados, apresentados nas Seções 3.1.1 e 3.1.2, exigem o monitoramento da entrada da rede/concessionária. Esse monitoramento é essencial para evitar injeção indesejada de potência na rede e picos de demanda;
- Medidor do transformador do alimentador: Todo transformador possui um limite de potência aparente nominal. Como o *BESS*, durante o carregamento, pode consumir altas potências, existe o risco de exceder a capacidade nominal do transformador. Para evitar sobrecargas, um medidor dedicado monitora o transformador e auxilia no controle da potência, garantindo que o limite nominal não seja ultrapassado;
- Relé de proteção: Como o *BESS* está conectado ao sistema elétrico através de um transformador, um relé de proteção é indispensável para garantir sua integridade. O transformador utilizado é a seco, e a única proteção implementada é o relé de temperatura (função 49). Esse relé enviará ao CLP, via entradas digitais, sinais de alarme e *trip*, que serão utilizados na lógica de proteção do sistema. Além disso, permite a comunicação para supervisão da temperatura dos enrolamentos.
- Disjuntor/Medidor: Além de suas funções primárias de seccionamento e supervisão, o medidor acoplado ao disjuntor será utilizado futuramente para implementar lógicas de controle, contribuindo para a operação do sistema;
- Medidor de cargas auxiliares: As cargas auxiliares são fundamentais para o funcionamento do *BESS*. Para seu monitoramento, utiliza-se um medidor dedicado, cuja função é exclusivamente supervisão, permitindo a análise do consumo.

3.1.3 Detalhamento de Entradas e Saídas

O detalhamento de entradas e saídas em um projeto de automação é um documento essencial que especifica todos os sinais que interagem com o CLP. Ele descreve de forma organizada as entradas (sensores, botões, medidores) e saídas

(atuadores, relés, válvulas) do sistema, permitindo um mapeamento preciso da relação entre o CLP e os dispositivos de campo. O detalhamento referente ao projeto atual está no Apêndice B.

3.2 Especificações Técnicas

Na Tabela 3 e Tabela 4 são apresentadas as características gerais do *PCS* e do banco de baterias (*rack* de baterias), respectivamente. Nelas, destacam-se as seguintes informações de interesse direto no contexto deste trabalho:

Tabela 3 – Características gerais do *PCS*.

PCS - Especificações Técnicas	
Fabricante	Kehua Tech
Modelo	BCS125K-B-HM Series
Lado CC	
Máxima Tensão CC	1500 Vcc
Range de Tensão CC	1040 - 1500 Vcc
Máxima Corrente CC	134A
Lado CA	
Potência nominal	125 kW
Máxima potência	137,5 kVA
Tensão nominal	690 Vac
Range de tensão	-15% ~ 10% (configurável)
Frequência	50Hz/60Hz (configurável)
Máxima corrente	115A
Fator de potência	>0.99 (na potência nominal)
Fator de potência ajustável	1 (atrasado) ~ 1 (adiantado)
THDi	<3% (na potência nominal)
Eficiência	
Máxima eficiência	98.7%
Dados gerais	
Nível de IP	IP65
Temperatura de operação	-30°C ~ 60°C
Umidade relativa de operação	0 ~ 100%
Tipo de resfriamento	Ventilação forçada inteligente
Dimensões (largura x altura x profundidade)	700mm x 267mm x 960mm
Peso	95kg
Protocolo de comunicação	Modbus-RTU, Modbus-TCP, CAN2.0B, Bluetooth
Interface de comunicação	RS485, Ethernet, CAN
Instalação	Sobrepor

Fonte: Kehua Tech, (2024)

Tabela 4 – Características gerais do Rack de Baterias.

Especificações Técnicas	
Célula	
Tipo de Célula	LFP (<i>Lithium Iron Phosphate</i>)
Capacidade da célula	306 Ah
Tensão nominal	3,2 V
Range de tensão	2,5 - 3,65 V
Energia nominal	979,2 Wh
Sistema	
Configuração	1P416S
Quantidade de <i>packs</i>	8
Quantidade de célula por <i>pack</i>	52
Energia nominal	407,34 kWh
Tensão nominal	1331,2 Vcc
Range de tensão	1164,8 – 1497,6 Vcc
Corrente nominal de recarga	153A
Corrente máxima de recarga	195,8 A < 1min
Potência nominal de recarga	203,67 kW
Corrente nominal de descarga	153A
Corrente máxima de descarga	195,8 A < 1min
Potência nominal de descarga	203,67 kW
Equalização	Passiva
Protocolo de comunicação	CAN, Modbus/TCP
Dimensões (largura x altura x profundidade)	1390mm x 2348mm x 1344, 1mm
Peso	3600±100kg
Range de temperatura de recarga	-25°C - +55°C
Range de temperatura de descarga	-25°C - +55°C
Range de temperatura de armazenamento	-25°C - +55°C
Umidade relativa de operação	0 ~ 95% (sem condensado)
Resfriamento	Resfriamento líquido

Fonte: CATL, (2023)

3.1 Casos Avaliados

O deslocamento temporal de energia, também conhecido como *time shifting*, é uma das principais funções de um *BESS*. Essa técnica permite armazenar energia elétrica em momentos de menor demanda e liberá-la quando a necessidade de consumo aumenta ou quando as tarifas são mais elevadas. Essa estratégia é dedicada ao uso do consumidor final da eletricidade, com ênfase nos consumidores de grande porte, como indústrias, prédios empresariais, pontos comerciais, hospitais, etc (DUNN et al., 2011).

O *time shifting* pode ser utilizado com finalidades diferentes, onde dois casos são implementados nesse estudo: arbitragem de energia e *peak shaving*. Não

necessariamente a intercessão desses casos deve ser vazia, a depender da situação pode haver a união de dois em um mesmo *BESS* (IBRAHIM et al., 2008).

Um cenário específico, é a aplicação do *time shifting* com proibição de injeção na rede, denominado também como *grid zero*. Ocorre quando a concessionária não permite a injeção de potência na rede, pois os conversores de energia, distorcem o sinal com harmônicos de corrente e tensão, que resultariam em uma queda na qualidade de energia da rede. Nessa circunstância, é necessário controlar a potência de descarga do *BESS* com intuito manter a energia consumida da rede o menor possível (na intenção economizar o máximo possível) mas ainda positiva.

3.1.1 Caso 1: Arbitragem de Energia

A arbitragem de energia consiste em comprar energia elétrica quando os preços são mais baixos e armazená-la para uso posterior, quando os preços aumentam. Essa estratégia é particularmente útil em cenários em que a distribuição de energia possui tarifação variável, onde o custo da energia muda ao longo do dia.

Nesse cenário, a bateria é carregada durante períodos de baixo custo (normalmente de madrugada) e descarregada em horários de pico, quando os preços da eletricidade são mais altos. Essa abordagem, além de beneficiar grandes consumidores industriais e comerciais, ajuda concessionárias que desejam maximizar a eficiência do sistema elétrico, visto que diminui o uso da rede durante dos horários de ponta. Além da economia direta, essa técnica pode auxiliar no equilíbrio da rede elétrica, reduzindo a necessidade de geração térmica adicional em momentos de alta demanda (LI et al., 2020)

Na Equação (3.1), é mostrado a economia que pode ser obtida por dia, caso aplicada a arbitragem.

$$Economia = (Tarifa_{ponta} - Tarifa_{fora-ponta}) * Energia_{bateria} \quad (3.1)$$

3.1.2 Caso 2: Redução de Picos de Demanda

A redução de picos de demanda, ou *Peak Shaving*, é um dos usos mais estratégicos do *time shifting*, especialmente para consumidores industriais e comerciais. Esse método permite evitar picos de consumo, que podem resultar em multas ou sobrecarga da rede elétrica.

Quando uma instalação atinge um alto consumo instantâneo de energia, a bateria pode ser descarregada para suprir parte dessa demanda, evitando que a rede forneça toda a energia necessária. Isso resulta em uma redução dos custos de demanda para empresas e também melhora a estabilidade da rede elétrica ao diminuir cargas excessivas em momentos críticos.

Esse tipo de aplicação é muito utilizado em indústrias, *data centers* e grandes complexos comerciais, onde a redução da demanda máxima pode gerar economias significativas e evitar penalizações por consumo elevado (DEJWISES, 2015; CHUA; LIM; MORRIS, 2016; SHI et al., 2017).

4 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

Com o entendimento mais claro sobre o sistema em geral, pode-se partir para a programação do CLP. Para facilitar o entendimento e a implementação, o código do CLP foi separado em rotinas. Algumas rotinas desempenham papel fundamental na operação do *BESS*, enquanto outras são auxiliares. Para facilitar o entendimento do leitor, é apresentado nas Figura 26, Figura 27, Figura 28 e Figura 29, o diagrama de programação do CLP. Nele, visualiza-se de maneira clara as rotinas mencionadas e a maneira como estão organizadas.

Os diagramas de programação, possuem um código de cores, onde:

- Cor preta: O bloco apenas agrupa outras rotinas, usado como organização;
- Cor cinza: Rotina de papel secundário, apenas auxilia no fluxo e no funcionamento do código;
- Cor verde: Rotina de papel primário, usada para executar ações no sistema.

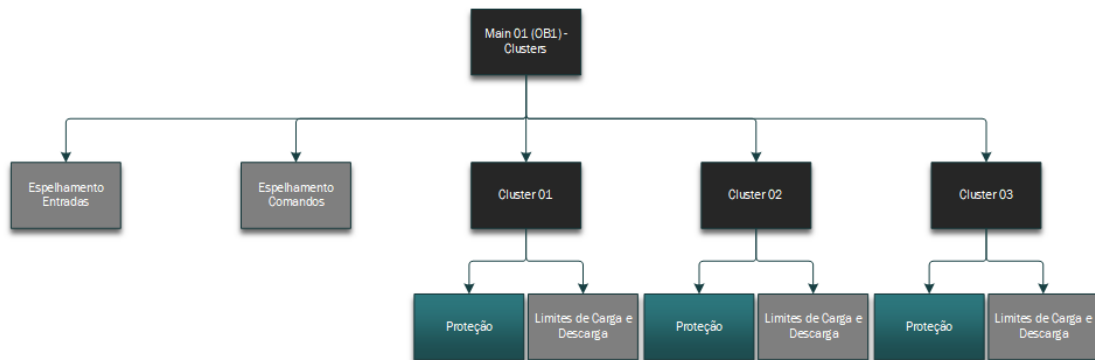
Neste trabalho, será dada ênfase nas rotinas principais, de cor verde, enquanto rotinas em cinza apenas serão brevemente descritas, rotinas em preto não são detalhadas.

O código é estruturado em quatro blocos de organização (*Organization Blocks – OBs*). Os *OBs* 1, 123 e 124 são de execução cíclica e são executados sequencialmente durante cada ciclo de varredura (*scan cycle*) – O ciclo consiste na leitura das entradas, execução lógica do programa e atualização das saídas, repetindo-se continuamente para garantir o controle em tempo real do sistema – do CLP, respeitando a seguinte ordem: primeiro o *OB1*, seguido pelo *OB123* e, por fim, o *OB124*. Já o *OB30* é acionado por uma interrupção cíclica, executada periodicamente com base em um tempo pré-definido, independentemente da ordem dos ciclos principais.

- *OB1* (Figura 26): Responsável pela execução das rotinas associadas aos *clusters*, que consistem em um *PCS* e seus respectivos *racks* de lítio. As rotinas incluem funções de proteção e limitação de potência do *cluster*.

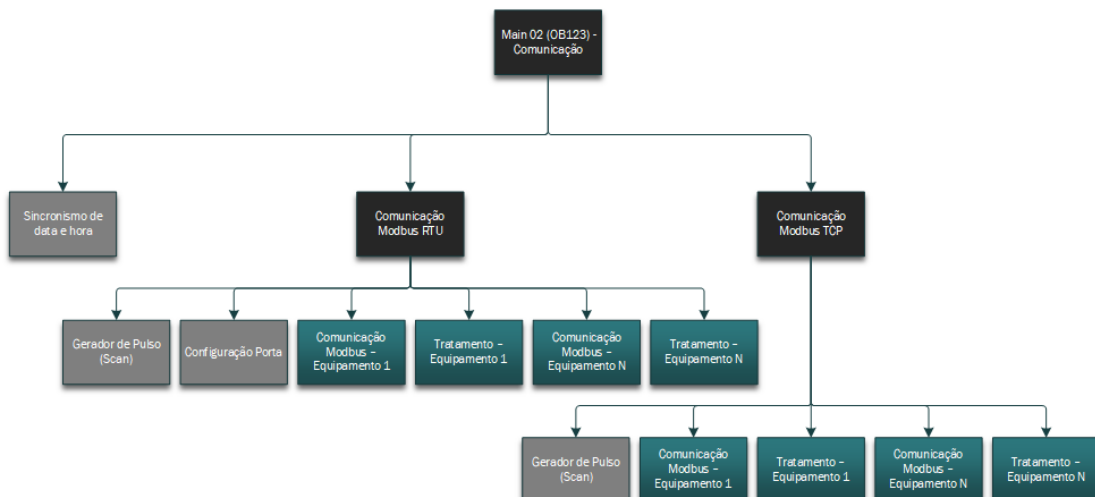
- **OB123** (Figura 27): Executa toda a comunicação Modbus do sistema. É responsável por estabelecer a comunicação com os dispositivos, gerenciar as requisições e realizar o sincronismo de data e hora.
- **OB124** (Figura 28): Trata das lógicas relacionadas às aplicações do *BESS*, como o *time shifting* e a distribuição de potência entre os *PCS*. Também controla os comandos de abertura e fechamento dos *racks* de lítio e disjuntores.
- **OB30** (Figura 29): Executa o controle de tensão associado ao algoritmo de carregamento das baterias para cada *PCS*. O tempo da interrupção deve ser igual ao período de amostragem do controle.

Figura 26 – Diagrama de programação 01.



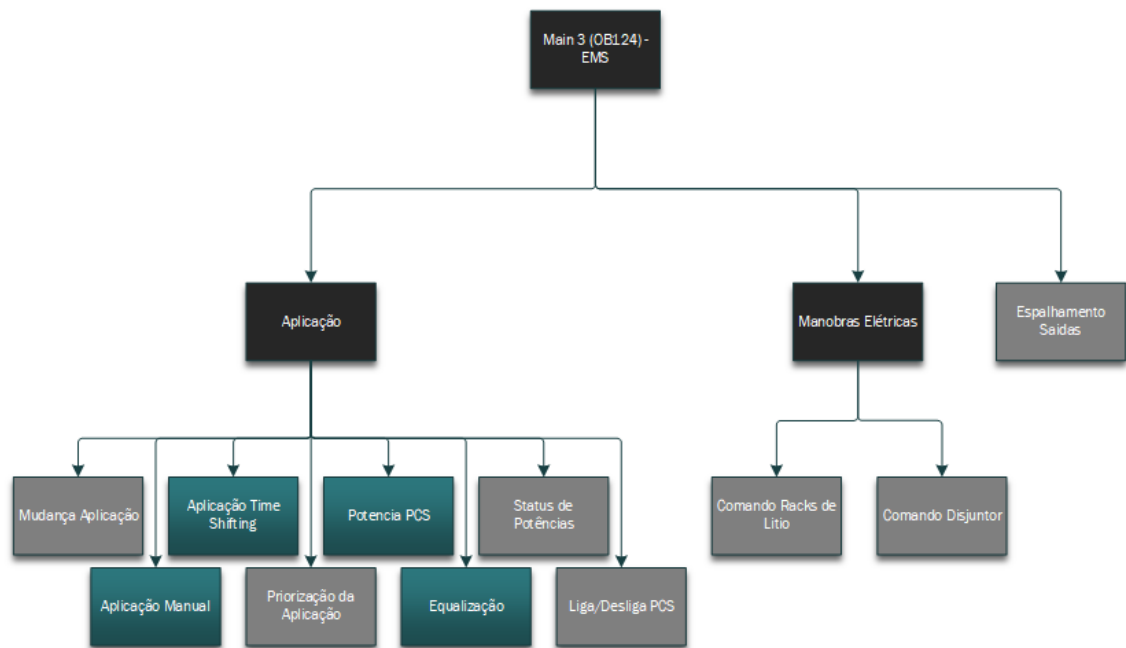
Fonte: elaborado pelo próprio autor, (2025)

Figura 27 – Diagrama de programação 02.



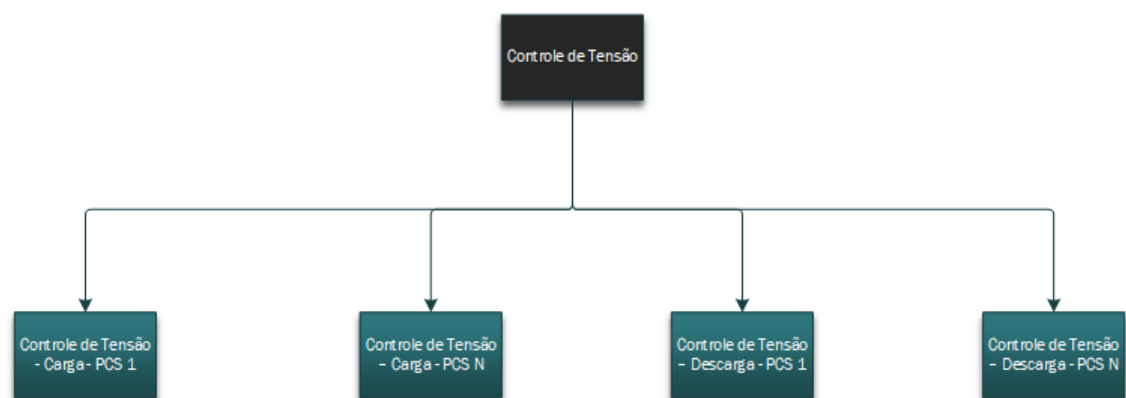
Fonte: elabora pelo próprio autor, (2025)

Figura 28 – Diagrama de programação 03.



Fonte: elaborado pelo próprio autor, (2025)

Figura 29 – Diagrama de programação 04.



Fonte: elabora pelo próprio autor, (2025)

4.1 Comunicação

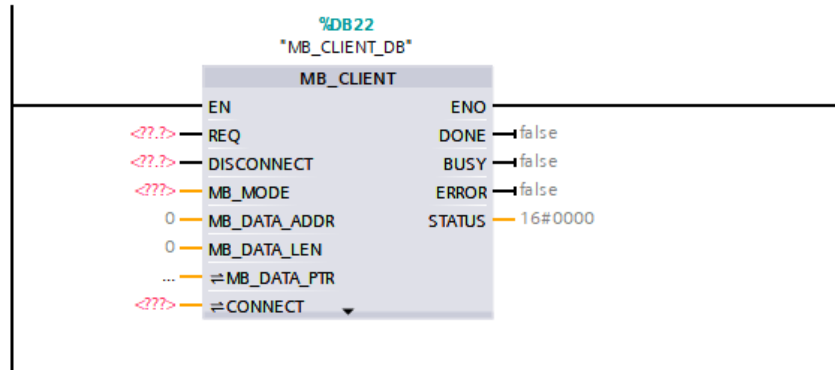
Antes de qualquer rotina de controle interna, primeiro é de suma importância estabelecer a comunicação Modbus com cada equipamento visto na topologia de comunicação (Figura 24). A realização da comunicação no CLP da Siemens, S7-1200, é feita no ciclo de *scan* do CLP, e gerenciado pelo usuário. Portanto, para sua realização de maneira assertiva, capaz de realizar as requisições não só de um, mas de vários servidores/escravos, é de suma importância a realização de um código que

atua de maneira sequencial. Realizar essa tarefa se torna simples ao se utilizar um *grafcet*.

Para estabelecer comunicação com os escravos/servidores, é necessário utilizar os blocos de função nativos do TIA Portal: o bloco “MB_CLIENT” para comunicação via Modbus TCP e o bloco “MB_MASTER” para comunicação via Modbus RTU, conforme ilustrado na Figura 30 e Figura 31, respectivamente. O código do usuário deve ser responsável por utilizar esses blocos de forma a realizar todas as requisições necessárias aos escravos/servidores.

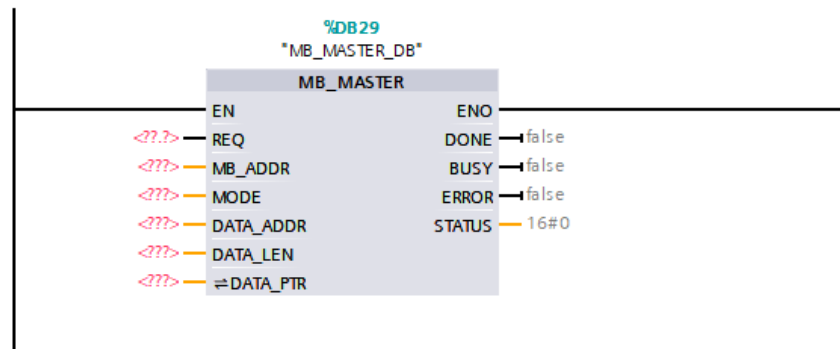
Essa tarefa é coordenada por meio de um pulso de *polling*, que atua como um sinal periódico disparado em intervalos regulares com o objetivo de iniciar uma nova consulta aos dispositivos. Esse pulso garante que a comunicação aconteça de forma contínua e sincronizada, permitindo que o controlador mantenha os dados atualizados.

Figura 30 – Bloco MB_CLIENT.



Fonte: elabora pelo próprio autor, (2025)

Figura 31 – Bloco MB_MASTER.



Fonte: elabora pelo próprio autor, (2025)

As entradas do bloco “MB_CLIENT” são:

- REQ: Quando acionado, o CLP enviará a requisição Modbus;
- DISCONNECT: Cortar a conexão com o servidor. No código, foi usada para desconectar sempre que houvesse um erro;
- MODE: Configura a função Modbus. No código atual, foi usado o valor 03, que indica leitura de memórias
- MB_DATA_ADDR: Endereço inicial da requisição;
- MB_DATA_LEN: Quantidade de registros solicitados na requisição;
- CONNECT: Variável de configuração TCP, internamente a ela, há configuração do IP.

Suas saídas são:

- DONE: Indica o recebimento correto da resposta do servidor
- BUSY: Indica quando a troca de dados está ocorrendo
- STATUS: Indica a condição atual do bloco
- ERROR: Indica quando a troca de dados não foi bem sucedida
- MB_DATA_PTR: Local onde os registros recebidos serão guardados, seus dados.

As entradas do bloco “MB_MASTER” são:

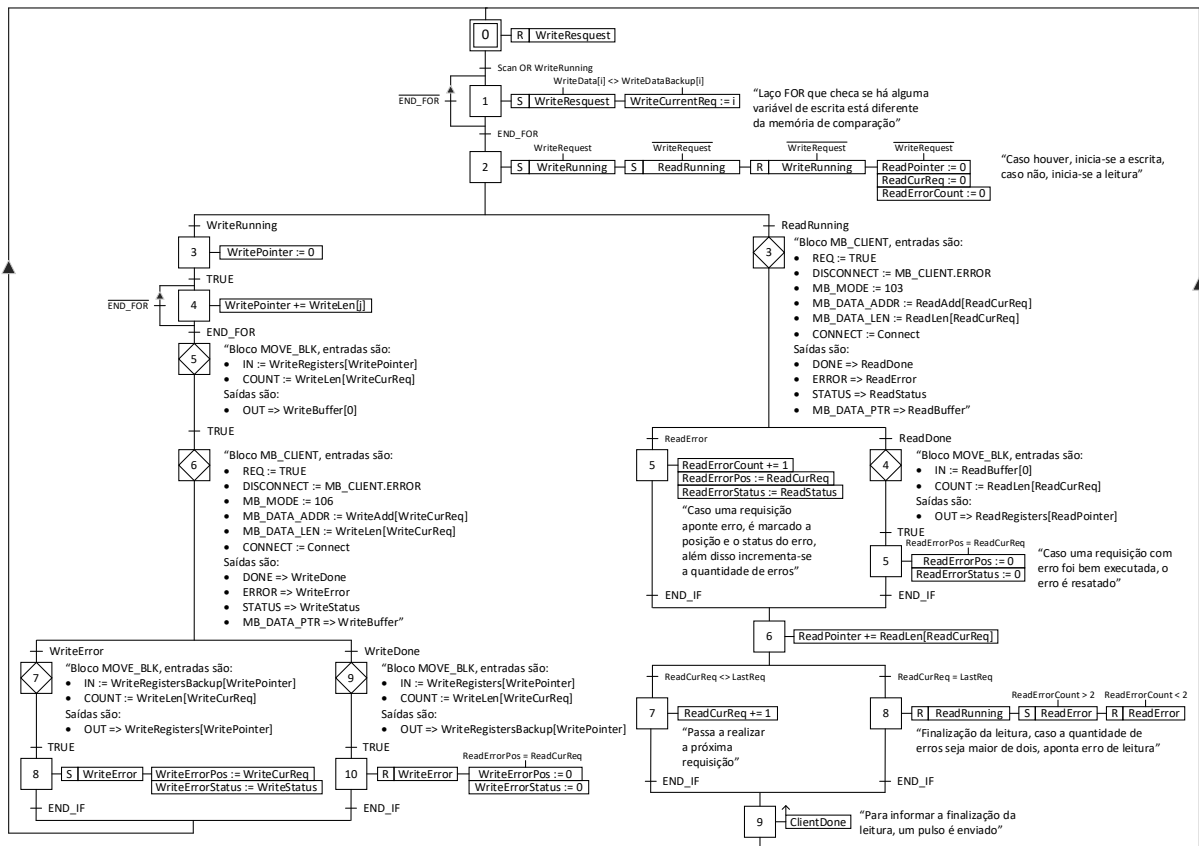
- REQ: Quando acionado, o CLP enviará a requisição Modbus;
- MB_ADDR: Endereço do escravo com se deseja comunicar;
- MODE: Configura a função Modbus. No código atual, foi usado o valor 00, que indica leitura em geral;
- MB_DATA_ADDR: Endereço inicial da requisição;
- MB_DATA_LEN: Quantidade de registros solicitados na requisição;

Suas saídas são:

- DONE: Indica o recebimento correto da resposta do servidor
- BUSY: Indica quando a troca de dados está ocorrendo
- STATUS: Indica a condição atual do bloco
- ERROR: Indica quando a troca de dados não foi bem sucedida
- MB_DATA_PTR: Local onde os registros recebidos serão guardados, seus dados.

Na Figura 32, é mostrado o *grafcet* tomado como base para o desenvolvimento do código de comunicação, o código é feito em texto estruturado e construído de maneira genérica de maneira a funcionar com qualquer equipamento, bastando apenas escolher a quantidade de requisições, endereços e comprimento das requisições. A Figura 33 é representado o bloco genérico de comunicação.

Figura 32 – Grafcet de comunicação.



Fonte: elabora pelo próprio autor, (2025)

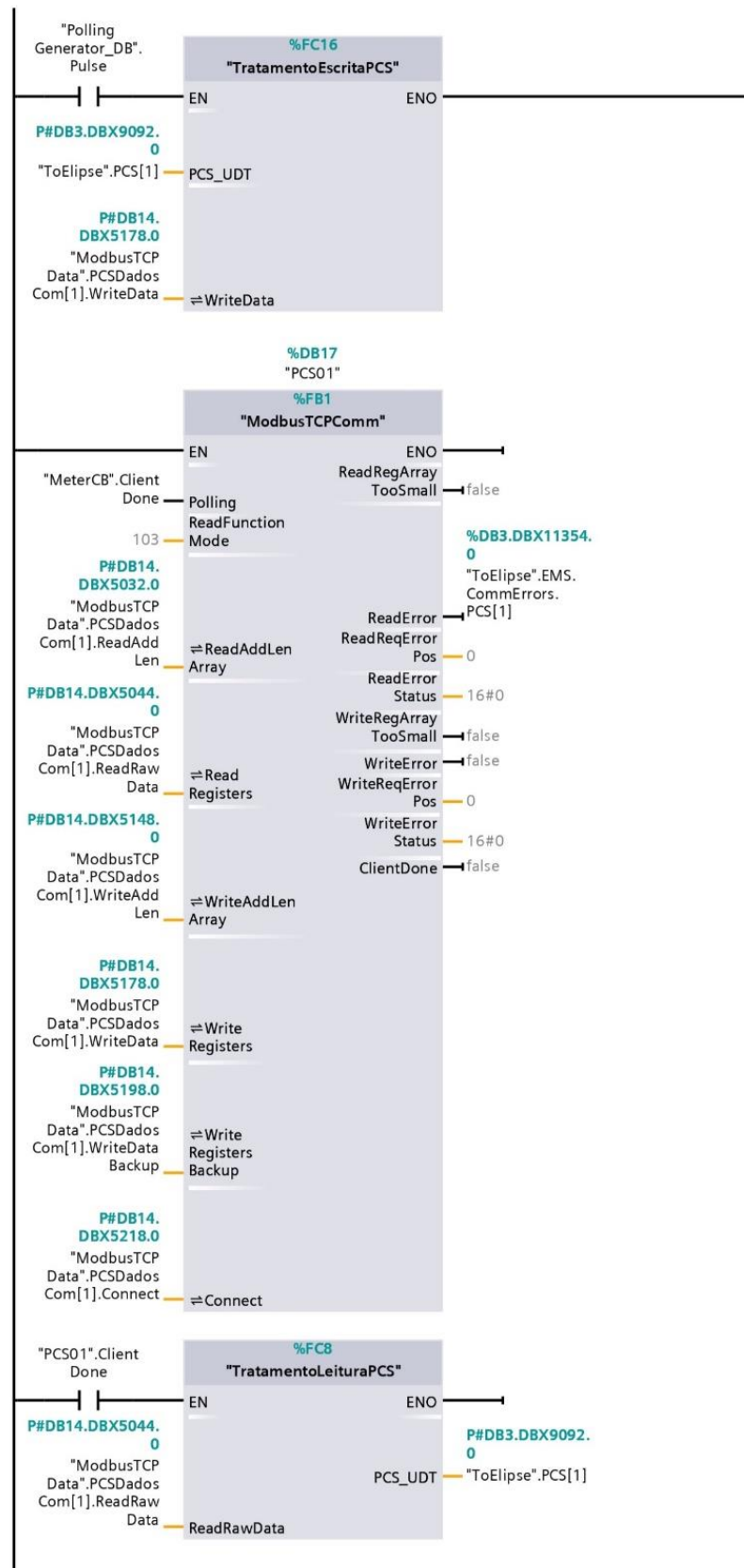
Após a leitura, o bloco elaborado tem como saída um vetor contendo todos os registros lidos, na sequência na qual foram lidos. Para uso desses dados é necessário trata-los. O tratamento dos dados ocorre devido a alguns motivos:

- **Escala:** Os registros obtidos via comunicação Modbus são do tipo *word* e, por isso, não possuem casas decimais. Para contornar essa limitação, os equipamentos fornecem os dados fora de escala. Por exemplo, um valor de temperatura de 32,1°C pode ser transmitido como 321, exigindo uma divisão por 10 durante o tratamento dos dados.
- **Composição de registros:** Em alguns casos, um único registrador pode não ser suficiente para armazenar um dado, o que pode levar a um *overflow*. Para evitar esse problema, os equipamentos dividem o valor em dois ou mais registros, que precisam ser concatenados para obter o dado completo. Esse dado pode assumir diferentes formatos, como INT32, UINT32, INT64, UINT64 e real

- Extração de bits: Para otimizar o uso dos registradores, alguns equipamentos armazenam bits de status ou alarmes dentro de uma única *word*, onde cada bit representa uma informação diferente. Dessa forma, para interpretar esses alarmes, é necessário extrair e analisar os bits individualmente.
- Offset: Para permitir a representação de valores negativos, alguns equipamentos aplicam um *offset* aos dados. Por exemplo, uma corrente de -32 A pode ser fornecida como 68, considerando um *offset* de -100.
- Sequência de bytes: Quando um dado ocupa dois ou mais registros, a ordem dos bytes pode variar. Por exemplo, assumindo dois registradores, um valor pode ser transmitido na sequência W3|W2|W1|W0, onde W3 é a *word* mais significativa, seguindo o padrão *Big-endian*. Outras variações incluem W0|W1|W2|W3 (*Little-endian*), W2|W3|W0|W1 (*Big-endian byte swap*) e W1|W0|W3|W2 (*Little-endian byte swap*).

O tratamento de leitura deve ser feito somente após as leituras dos registros, enquanto o tratamento de escrita deve ser feito antes da escrita dos registros. Na Figura 33 é mostrado uma linha de *Ladder*, contendo os blocos responsáveis pelo tratamento de escrita, comunicação e tratamento de leitura.

Figura 33 – Linha de Ladder de Comunicação.



Fonte: elaborado pelo próprio autor, (2025)

4.2 Aplicações

As aplicações são a parte mais importante do *BESS*. São elas que moldam sua operação, ou seja, são os objetivos que o *BESS* deve realizar. Neste trabalho, a aplicação principal a ser executada é o *time shifting*. Contudo, há uma outra aplicação que estará presente, a função “manual”.

4.2.1 Aplicação Manual

Na aplicação manual, o operador escolhe manualmente o valor de potência que será solicitado ao *PCS*. Essa função desempenha maior importância durante testes e comissionamentos, serve para aplicar valores de potência constante e checar a operação do sistema. Em uma operação dia-a-dia, essa aplicação dificilmente será usada.

Além de enviar ao *PCS* valores de potência solicitados, a aplicação manual também é responsável por enviar comandos de ligar e desligar para os *PCS*. Na necessidade de parar, ou colocar o *BESS* de volta em operação, o comando liga/desliga *PCS* é feito via aplicação manual.

4.2.2 Aplicação Time Shifting

A aplicação do *time shifting* deve atender a dois objetivos principais:

- Arbitragem de energia: O *BESS* deve absorver energia durante o horário fora de ponta, quando a tarifa é mais baixa, e fornecê-la no horário de ponta, quando a energia é mais cara. No entanto, durante a descarga, é proibido injetar energia na rede.
- *Peak shaving*: O sistema deve evitar picos de demanda que ultrapassem o limite contratado, fornecendo potência quando necessário para evitar multas por excesso de consumo.

Para atender a esses requisitos, é usada uma estratégia de controle em malha fechada, onde a variável controlada é a potência medida na entrada da rede. O diagrama de blocos do controle é apresentado na Figura 34.

Para que o sistema funcione adequadamente, o *setpoint* da potência da rede deve variar ao longo do dia. Durante o horário fora de ponta, o *setpoint* será mantido em um valor próximo (mas inferior) à demanda contratada. Isso faz com que o *BESS* absorva potência, elevando a leitura do medidor de entrada até o ponto de operação desejado. Durante o horário de ponta, o *setpoint* será reduzido para um valor próximo de zero (mas superior), levando o *BESS* a fornecer potência para reduzir o consumo da rede.

Um exemplo de uma programação para o *setpoint* do *time shift* é mostrado na Figura 35. Nela é possível ver que entre 17h30min e 20h30min o *setpoint* é baixo, assume o valor de 50kW, fora desse intervalo, o valor é alto, assume valor de 700kW. As linhas vermelha e verde indicam as potências máxima com que o *BESS* pode, respectivamente, carregar e descarregar, elas representam a saturação superior do controle.

Para melhor entendimento, suponha que o estabelecimento tenha uma demanda contratada de 750kW e uma carga média constante de 450 kW. Se os *setpoints* forem definidos iguais a Figura 35:

- Fora ponta: 700kW
- Ponta: 50kW

A operação se daria da seguinte maneira:

- No horário fora de ponta, o controle atuará para manter a potência da rede em 700 kW, fazendo com que o *BESS* absorva 250 kW, carregando suas baterias.
- No horário de ponta, o controle buscará manter a rede em 50 kW, fazendo com que o *BESS* forneça 400 kW, descarregando suas baterias.

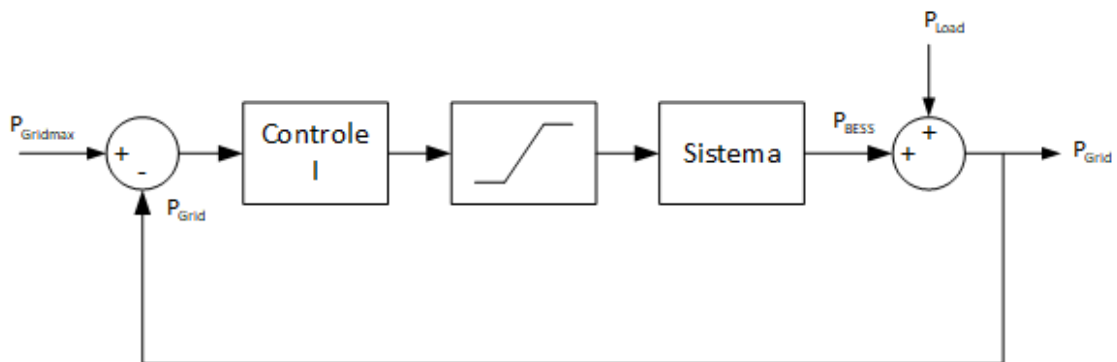
A carga do estabelecimento não é constante, o que representa um distúrbio na malha de controle. Alterações na carga, causam oscilações indesejadas que podem comprometer a operação, como resposta, o *BESS* deve dinamicamente ajustar sua potência para manter a potência da rede o mais próximo possível do *setpoint*.

Para evitar problemas causados pelas oscilações prejudiciais, os *setpoints* da rede são sempre definidos abaixo da demanda contratada durante a recarga e acima de zero durante a descarga, garantindo uma margem operacional segura. A magnitude da margem depende do tempo de resposta sistema, um tempo de reposta menor, resulta em uma margem menor. A margem usada para esse projeto é de 50kW, o tempo de resposta deve ser rápido o suficiente para garantir uma operação segura para esse valor de margem.

Além disso, o *peak shaving* ocorre automaticamente durante a descarga, pois o *BESS* reduz o consumo da rede. Já durante a recarga, caso a carga do estabelecimento aumente inesperadamente, tendendo a ultrapassar a demanda contratada, o *BESS* irá interromper a recarga e fornecer potência para evitar a ultrapassagem, garantindo conformidade com o contrato.

Para um entendimento mais aprofundado, a Figura 36 apresenta um pseudocódigo do *time shifting*. Esse pseudocódigo não se trata de um código-fonte real nem segue a sintaxe de uma linguagem de programação específica; ele apenas descreve, em linguagem natural, a estrutura e a lógica do algoritmo.

Figura 34 – Controle *time shifting*.



Fonte: elaborado pelo próprio autor, (2025)

Figura 35 – Programação *time shifting*.

Fonte: elaborado pelo próprio autor, (2025)

Figura 36 – Pseudocódigo *time shifting*.

SE Pulso de 2s ENTÃO

Erro = *setpoint* - Potência ativa da rede

Saída do controle = Potência do BESS + $K_i \cdot \text{Erro}$

Potência ativa da carga = Potência ativa da rede - Potência ativa do BESS

SE Potência ativa da carga < *setpoint* ENTÃO

// ESS carregando

Potência do PCS = Mínimo (Potência recarga máxima, Saída do controle, Potência permitida para o trafo alimentador)

SE NÃO

// ESS descarregando

Potência do PCS = Mínimo (Potência descarga máxima, Saída do controle)

FIM

FIM

Fonte: elaborado pelo próprio autor, (2025)

4.3 Proteção

Para uma operação segura e eficiente do BESS, é necessário existir rotinas de proteção do sistema que evitará acidentes e maiores danos ao estabelecimento e às baterias em caso de algum sinistro. As proteções são divididas em duas classificações: proteções lógicas e proteções físicas.

As proteções físicas são originadas de elementos externos ao sistema, como *trip* do transformador, sensor de fumaça, botão de emergência, entre outros (ver Apêndice

B). Quando acionadas, essas proteções colocam o sistema em "desligamento geral", desconecta-se os *racks* de lítio, desligam-se os *PCS* e abre-se o disjuntor do *BESS*, interrompendo completamente a operação e exigindo a intervenção de um operador local para diagnóstico e restabelecimento. O sistema não poderá ser reestabelecido remotamente via *SCADA*.

Em uma escala de criticidade de 0 a 4, onde 0 indica funcionamento normal e 4 representa máxima criticidade, o "desligamento geral" corresponde ao nível 4, sendo a condição mais severa de proteção.

As proteções lógicas são acionadas internamente no programa do *EMS*, possuindo três níveis de atuação: *derate*, *stop*, *protect*. Cada nível possui atuações diferentes. A Figura 37, apresenta uma escala genérica de proteção lógica. Para exemplificar, suponha que a escala seja referente a tensão do *rack* de lítio e considere $x_0 = 1200V$ e $x_1 = 1400V$. Um *rack* de baterias de lítio, onde a tensão nominal é 1300V e os limites de sobretensão são definidos da seguinte forma:

- *Derate*: 1360V
- *Stop*: 1380V
- *Protect*: 1400V

Se a tensão do *rack* ultrapassar 1360V, o sistema entra no estado *derate*, reduzindo a potência fornecida ao *rack* pelo *PCS* (via comando do *EMS*) em 50% para tentar estabilizar a operação. Caso a tensão ultrapasse 1380V, o sistema entra no estado *stop*, limitando a potência fornecida ao *rack* em 100%, interrompendo a carga/descarga. Se, mesmo assim, a tensão atingir 1400V, o sistema entra no estado *protect*, indicando falha grave. Nesse caso, os *PCS* devem ser desligados e os *racks* de baterias desconectados para evitar danos. Na escala de criticidade mencionada anteriormente, *protect* é nível 3, *stop* nível 2 e *derate* nível 1.

Além da tensão, outras grandezas da bateria são monitoradas para proteção, incluindo:

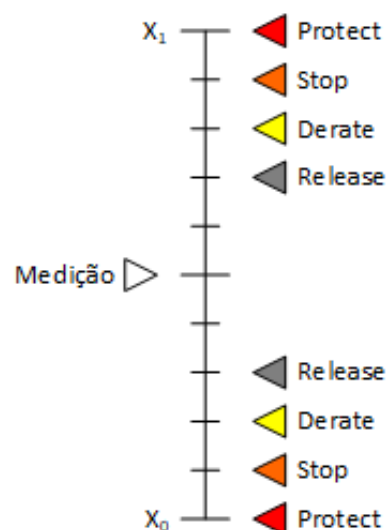
- *SOC*;
- Corrente de carga e descarga;
- Tensão das células;

- Temperatura das células;
- Variação de tensão entre células;
- Variação de temperatura entre células.

Além disso, algumas outras falhas também acionam proteções específicas: *protect* é acionado por falha de comunicação com os PCS ou falha de comunicação com o BMS; *stop* é acionado pela falha de comunicação com o medidor de entrada da rede; e por fim, *derate* é acionado pelo alarme do transformador do BESS, originado no relé de proteção.

Caso acionado uma proteção lógica, o sistema consegue voltar a operar normalmente sem a necessidade de intervenção local, utilizando apenas o SCADA. Em caso de *derate* ou *stop*, para o sistema voltar a operar basta os níveis estabilizarem em situação normal, e o sistema voltará automaticamente, é considerado situação normal quando a grandeza diminui abaixo no nível de *release*. Porém, em *protect*, há o seccionamento das partes, que não fecham automaticamente, portanto um operador é necessário para, após estabilizarem os níveis, dar um *reset* no sistema e colocá-lo em operação novamente.

Figura 37 – Escala de proteção lógica.



Fonte: elaborado pelo próprio autor, (2025)

4.4 Controle de Tensão

Como abordado na Seção 2.2.4, existe um método para realizar o carregamento de baterias, com intuito de obter a carga completa de maneira eficiente e segura. Toda potência entregue ou drenada da bateria é devido ao PCS, portanto para realizar os estágios, é necessário atuar nos PCS (via comunicação), ao mesmo tempo que a tensão da bateria é monitorada (via comunicação).

O estágio de corrente constante, é realizado apenas permitindo que um *setpoint* de potência solicitada ao PCS seja atendido. O valor da potência solicitada, depende da função ativa no momento: manual ou *time shifting*. Assumindo que a tensão do lado CA seja constante, esse valor de potência, faz com a corrente entregue também seja constante, pois as três grandezas devem obedecer a seguinte relação:

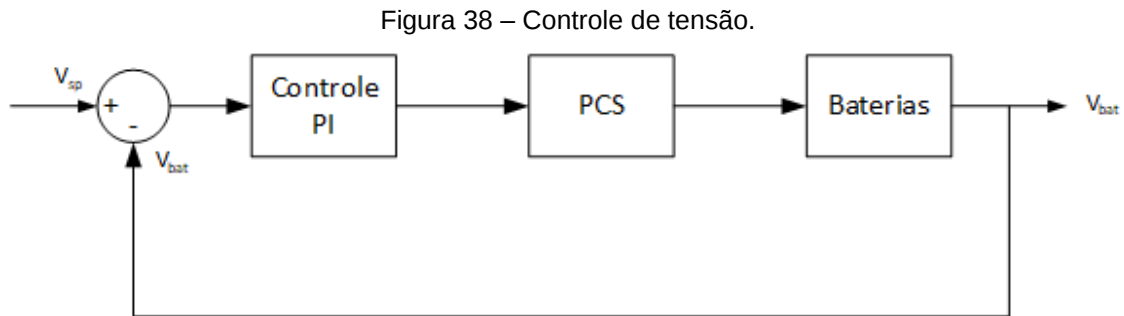
$$P = VI \quad (4.1)$$

A magnitude da potência entregue a bateria, é relevante apenas na velocidade com que a bateria carregará, sendo assim, o ideal seria que fosse o valor nominal informado, pelo fabricante da bateria, porém a depender da aplicação ativa no momento, esse cenário não será possível, pois o valor da potência solicitada varia frequentemente. Essa alteração frequente na potência solicitada, não impactará na qualidade do carregamento, apenas em sua velocidade.

No estágio de tensão constante o código começa a limitar potência entregue ao PCS, ou seja, o valor solicitado de potência não será mais atendido, ao invés disso, será enviado ao PCS uma fração da potência solicitada, com o intuito de manter a tensão da bateria constante.

Para realizar o que foi descrito nos parágrafos anteriores, é utilizado um controle em malha fechada com controlador PI, o diagrama de blocos está na Figura 38, O *setpoint* de tensão usado no controle será o valor de *release* apresentado na Figura 37. A saída do controle é um valor percentual entre 0% a 100%. Caso a entrada (tensão do rack de lítio) seja menor do que o *setpoint*, o elemento integrativo tenderá a saturar a saída do controle, sendo assim aplicado 100% da potência solicitada, esse é o estágio de corrente constante, quando a tensão do rack de lítio, se torna levemente maior do que a tensão de *release* ou *setpoint* do controle, o mesmo começa a atuar diminuindo a saída, com intenção de manter tensão constante, esse é o estado de

tensão constante. O controle tem o mesmo tempo de amostragem da comunicação, dois segundos e seus parâmetros foram encontrados usando sintonia manual: $K_p = 0,6$; $T_i = 1,2$



Fonte: elaborado pelo próprio autor, (2025)

4.5 Equalização dos Racks de Lítio

Como mostrado no diagrama unifilar (Apêndice A), os racks de lítio não compartilham nenhum barramento CC, cada *rack* possui individualmente seu *PCS*. Devido a esse arranjo, é crível a existência de desbalanceamento entre os *racks*, ou seja, os *racks* possuírem SOC diferentes. fenômeno indesejado, pois, pode: sobrecarregar alguns racks e subutilizar outros, causar desgaste desigual nos *racks*, limitar a potência total do *BESS*, etc.

Com finalidade de evitar desbalanceamento, há a rotina de equalização, que atua mudando a potência enviada a cada *PCS* baseado no SOC do *rack* de lítio equivalente aquele *PCS*. Por exemplo, supondo que os racks possuam os seguintes SOC:

- Rack de lítio: 45%;
- Rack de lítio: 55%;
- Rack de lítio: 50%.

Se o *BESS* estiver carregando, a função fará que com o *PCS* 1 (referente ao *rack* de lítio 1) receba uma potência maior, afim de carregar mais rápido, enquanto o *PCS* 2 receberá uma potência menor, com o intuito que carregue mais devagar, dessa forma fazendo que com que os *racks* convirjam para o mesmo SOC.

No cenário oposto, descarga do *BESS*, a função atuará de forma que com o *PCS* 1 (referente ao *rack* de lítio 1) receba uma potência menor, afim de descarregar mais devagar, enquanto o *PCS* 2 receberá uma potência maior, com o intuito que descarregue mais rápido, tendendo novamente a convergir os *SOC* dos *racks*.

Para realizar essa distribuição de potência, assume-se uma distribuição de potência desigual, originada a partir de uma distribuição fundamentada em pesos:

$$P_{PCS,i} = \frac{peso_i}{\sum_{i=1}^n peso_i} \cdot P_{ESS} \quad (4.2)$$

Onde:

n = Quantidade de *racks* de lítio

$P_{PCS,i}$ = Potência do *i*-ésimo *PCS*

$peso_i$ = Peso do *i*-ésimo *PCS*

P_{ESS} = Potência total solicitada para o *BESS*

Os pesos são definidos a critério do projetista. Neste caso são definidos da seguinte forma:

$$peso_i = \frac{1}{n} \pm K(SOC_i - \overline{SOC}) \quad (4.3)$$

Onde:

$\overline{SOC}$ = Média dos *SOC*;

SOC_i = *SOC* do *i*-ésimo *rack*;

n = Quantidade de *racks* de lítio;

K = Velocidade de equalização.

Em caso de descarga o sinal será positivo, já recarga o sinal será negativo. Isso fará com que na recarga os pesos sejam maiores para os *SOC* abaixo da média e o oposto na descarga.

4.6 Potência do PCS

Na programação do *EMS*, todas as rotinas atuam na potência do *PCS*, porém, no fim, será enviado ao *PCS* apenas um valor único de potência. Dito isso, é importante abordar a relação entre as potências geradas internamente no código e o valor único de potência que será enviado ao *PCS*.

Até então foi citado algumas rotinas presentes no *EMS* que atuam e/ou limitam a potência do *PCS*: proteção, controle de tensão, aplicações e equalização. Para auxiliar no entendimento, é mostrado no Apêndice C um fluxo de dados do código.

A rotinas de proteção e controle de tensão tem como saída uma limitação de potência numa escala de 0 a 1, ou 0 a 100%. Esses valores são enviado para a rotina “Limites Carga e Descarga”. Nela é escolhido o menor valor dos dois, ou seja, o mais restritivo. Por exemplo, supondo que não haja nenhuma proteção atuada e a tensão da bateria não alcançou o nível de *release* (nível em que o controle de tensão começa a atuar) tanto a proteção quanto o controle de tensão enviarão 100% de saída, não havendo limitação. Agora supondo que alguma proteção nível *derate* atue, a rotina de “Limites Carga e Descarga” terá como saída o mínimo da proteção e do controle de tensão, ou seja a saída será o mínimo entre 100% e 50%. Tendo como saída o valor de 50%.

A rotina “Limitações de Carga e Descarga” também é responsável por limitar a potência caso o *PCS* esteja desligado, ou caso os *racks* de lítio estejam abertos, ou seja, com o disjuntor que o liga ao *PCS*, aberto. Além disso, a rotina gera um *status*, um valor numérico que indica caso haja uma limitação ativa e qual é a limitação

As aplicações, como já dito em 4.2, são responsáveis por ditar a potência solicitada para o *BESS*, porém nem sempre a potência solicitada será a potência real, devido às limitações. A potência solicitada pelas aplicações, passará pela rotina de equalização, onde essa potência será dividido entre os *PCS* seguindo uma distribuição ponderada. Após essa distribuição há as limitações, isso é feito na rotina “Potência *PCS*”. Nela recebe-se os valores de potências dos *PCS* e também se recebe as limitações vinda da rotina “Limites de Carga e Descarga”, em posse do valor solicitado para cada *PCS* e das limitações. A rotina “Potência *PCS*” terá como saída para cada *PCS*:

$$P_{PCS,i} = \text{Min}(P_{solicitada} \cdot \text{Limitação}, P_{nominal}) \quad (4.4)$$

Caso não haja limitações, o valor de limitação será 100%, ou seja 1, e o valor enviado será o solicitado. Se houver limitação, a saída será menor do que a solicitada. O valor de potência nominal está apenas como segurança para evitar enviar valores maiores do que o PCS suporta.

4.7 Rotinas Secundárias

Como mencionado, no código há rotinas secundárias, que apenas auxiliam no funcionamento do código ou possuem funcionalidades de menor importância. Suas finalidades são brevemente citadas a seguir.

4.7.1 Comando Disjuntor BESS

É desejável, que o disjuntor que liga o BESS ao circuito do estabelecimento possa ser remotamente operado, através de comandos no supervísório. Isso é feito pela rotina de “Comando Disjuntor”, mencionada em Figura 28. A rotina apenas checa se os permissivos de fechamento ou abertura são atendidos (abertura não há permissivos, já fechamento é não estar em “desligamento total”), caso sim, envia-se um pulso na saída física, que comanda o disjuntor.

4.7.2 Comando Racks de Lítio

Foi mostrado, no Apêndice A, que há um contactores que ligam os racks aos PCS. O equipamento responsável por operar esses contactores, realizando em conjunto a pré-carga, é a BMS. Portanto, é necessário enviar esse comando, via comunicação, para a BMS. O comando é um valor numérico, ao enviar o valor dois, é interpretado como solicitação de fechamento, já o valor três, como solicitação de abertura. O valor numérico é enviado e retido por trinta segundos, após esse tempo, o comando é retirado. Nesse comando também há permissivos, para o fechamento é

tido como permissivo o estado de “desligamento total” ou *protect*. Para abertura não há permissivos.

4.7.3 Espelhamento de Entradas, Saídas e Comandos

Durante o comissionamento de qualquer sistema, o projeto é passível de mudanças. Afim de facilitar manutenções no código, é usado o espelhamento de entradas e saídas. Nele a entrada física do CLP é espelhada em uma memória interna do CLP, e essa memória será usada internamente no programa. Isso é feito para realizar qualquer mudança da lógica das entradas e saídas digitais sem alterações mais profundas no código, por exemplo, supondo que em campo um sensor que deveria ser normalmente fechado, na verdade é normalmente aberto, basta trocar no espelhamento, de um contato aberto, para um contato normalmente fechado, alterando a lógica de funcionamento, sem necessidade de maiores mudanças internas no código.

Em relação ao espelhamento de comandos, funciona de maneira semelhante, porém os comandos via supervisório que serão espelhados, nesse caso é feito com intuito de organização e segregação, onde os comandos oriundos do supervisório, não são usados diretamente no código.

4.7.4 Status de Potências

Para o operador do sistema, é importante saber qual o valor de potência enviado ao PCS, e além disso, saber a motivação desse valor.

Foi visto em itens anteriores, que há alguns limitadores de potência no código do BESS. É importante que o operador tenha conhecimento sobre o motivo da limitação, se houver, ou também caso não haja limitação, saber qual a aplicação está enviando o valor de potência.

4.7.5 Mudança e Priorização da Aplicação

Todas as aplicações geram valores de potência a ser enviado ao PCS, isso pode ser conflitante. Para resolver esse problema há as funções “Mudança da Aplicação” e “Priorização da Aplicação” mostradas em Figura 28.

A função “Mudança da Aplicação” evitar que funções conflitantes estejam ativas ao mesmo tempo. Quando uma aplicação é acionada, a função “Mudança da aplicação” garante que todas as outras que estavam ativas são desativadas. Isso é mais útil em projetos maiores, com várias aplicações. Porém no projeto atual, com duas aplicações, a função apenas ativa a última aplicação que foi solicitada e desativa a outra.

“Priorização da Aplicação” atua como um código multiplexador que receberá a potência de todas as aplicações do código e envia pra saída o valor de potência da aplicação ativa.

4.7.6 Sincronismo de Data e Hora

A aplicação *time shifting* é uma aplicação que requer o horário atual para funcionar, afinal, o CLP deve saber o horário de maneira a alterar o *setpoint* de potência da rede utilizada na aplicação no horário correto. Para realizar isso, é enviado pelo supervisor, o horário e comando de sincronizar. É importante a hora do computador que hospeda o SCADA estar correta.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Apesar de não abordado nesse trabalho, há um sistema supervisor do *BESS*. Para uma melhor apresentação dos resultados, serão usadas telas do supervisor para expor os dados de comportamento do sistema.

Serão mostrados os resultados das comunicações com os equipamentos e também gráficos de comportamento da função ênfase do *BESS*, o *time shifting*.

5.1 Comunicação

Todos os equipamentos, no supervisor, possuem uma tela *popup*, onde são mostrados alguns dados de interesse para o operador, obtidos via comunicação. Afim de melhorar a apresentação dos resultados, será mostrado a tela de *popup* de cada equipamento presente no projeto.

Na Figura 39 é mostrado os dados de um dos *PCS*, mais precisamente o 02. A partir da figura, é fácil deduzir que nesse momento, o *rack* de lítio referente a esse *PCS*, estava carregando com uma potência de 2,5kW. É visto também que a potência reativa é zero, indicando, segundo a Figura 7, que o ângulo entre os fasores de tensão e corrente da rede é 0°, isso também é mostrado pelo fator de potência unitário. É possível notar também que o *setpoint* de potência solicitado pelo *EMS* é 2,5kW, enviado pela função manual. Além disso é visível também uma queda de potência entre o lado CA e o lado CC, devido ao consumo e perdas internas do conversor. As tensões estão próximas de 690V e a frequência próxima de 60Hz, como esperado.

Na Figura 40 é exibido os dados de temperatura do relé de proteção do transformador do *BESS*, além disso, suas configurações de alarme e *trip*. A partir dessa tela é possível saber a condição atual do transformador, o quão distante dos estados de alarme e *trip* o transformador está. Caso a temperatura medida seja maior do que a configurada como alarme ou *trip*, o *EMS* deve executar as funções de proteção mencionadas em 4.3. As medições de temperatura ambiente estão zeradas devido à ausência do sensor.

Figura 41 é apresentado os dados do medidor auxiliar, responsável por ler o circuito auxiliar do *BESS*. Com isso é evidente de que as cargas auxiliares são

alimentadas em baixa tensão de 380V. São cargas pequenas, que necessitam de uma baixa potência pois a potência ativa lida é de 2,9kW enquanto reativa é de 1kVAr. Como já mencionado, os dados desse medidor servem apenas para supervisão.

Na Figura 42 é apresentado os dados do disjuntor, com medidor acoplado, do painel PNCA. Esse disjuntor é responsável pela medição e seccionamento de todo o *BESS*. No momento do registro, o *BESS* estava consumindo/carregando com uma potência de 6,1kW, enquanto a potência reativa estava nula. Nas medições de tensão de fase é visto o valor 65535, o valor máximo que pode ser armazenado em um registro, esse *overflow* indica alguma falta de medição ou falha, no caso atual, o medidor estava configurado para uma ligação sem neutro, ou seja, um circuito trifásico ligado em delta, sendo assim, o medidor não fornece tensão de fase gerando o *overflow*. Porém as tensões de linha estão corretas de acordo com o valor esperado. É visto também que o *BESS* operou por pouco tempo, pois os valores de energia acumulada estão baixos.

Figura 43 é mostrado os dados do *rack* de lítio 01, as informações principais são o SOC e a tensão, nesse momento o *rack* possui menos da metade de carga e opera com uma tensão próximo a nominal. É fornecido também o *SOH* da bateria, que está em 100%, indicando que a bateria está nova. Com o uso, o valor *SOH* tende a baixar, representando o desgaste e indicando quando é necessário a troca da bateria. Há algumas outras informações menos críticas como temperatura e tensão das células, seus valores mínimos e máximos, além da posição da célula que possui esses valores. O *status* indica se a bateria está conectada ou não ao *PCS*, ou seja, quando realizado o comando de fechamento, ocorrerá a pré-carga e o *rack* se conectará ao *PCS*, a partir daí o *status* indicará ligado, caso receba comando de abertura, ocorrerá abertura das chaves e o *status* indicará desligado.

Figura 44 é exibido os dados do medidor do transformador do alimentador onde está ligado o *BESS*. Devido ao um problema no bloco de aferição, equipamento de interface entre o medidor e os transformadores de correntes (TC), os valores de corrente estão muito abaixo do esperado, mas apesar desse problema elétrico (resolvido posteriormente), ainda pode-se visualizar os dados, indicando que a comunicação realizada está em funcionamento. Nesse equipamento os dados de maior interesse são as potências, necessários para realizar o cálculo da máxima

potência permitida para o BESS durante a recarga afim de evitar sobrecarga no transformador.

Na Figura 45, dados do medidor de rede. Esse medidor é o de entrada do estabelecimento, usado para faturar o consumo. As tensões de linha e de fase lidas pelo medidor estão próximo dos valores esperados de 11,4kV e 6,6kV, respectivamente. As potências nesse momento são 956kW e 437kVAr, originando um fator de potência de 0,91 indutivo, valor abaixo do permitido pela concessionária de 0,92. Os valores de energia exportada estão zerados, indicando que toda a potência é consumida e nenhuma é fornecida, como esperado, visto que o *time shifting* implementado deve ter a limitação de grid zero, ou seja, evitar injetar na rede. A frequência de 60Hz está dentro do esperado. O valor mais importante desse equipamento é a potência ativa que será usado para realizar o controle do *time shifting*.

Figura 39 – Comunicação com o PCS 02.

PCS2					
Sistema de Conversão de Potência					
Potência Ativa	-2,5 kW	Potência Reativa	0,0 kVAr	Potência Aparente	2,5 kVA
Tensão Saida AB	714,6 V	Tensão Saida BC	708,8 V	Tensão Saida CA	713,4 V
Corrente Saida A	2,6 A	Corrente Saida B	2,4 A	Corrente Saida C	2,3 A
Potencia CC	-2,1 W	Tensão CC	1361,8 V	Corrente CC	-1,5 A
Temperatura	47,1 °C	Recarga Total	0,0 MWh	Descarga Total	0,0 MWh
Set Point Potência Ativa Solicitado	-2,5 kW	Origem da Potência Ativa Solicitado	Aplicações - Manual		
Set Point Potência Reativa Solicitado	0,0 kW	Origem da Potência Reativa Solicitado	Aplicações - Manual		
Frequência OnGrid	59,98 Hz	Frequência OffGrid	0,00 Hz	Fator de Potência	-0,99
Status	Carregando		Estado de Operação	Ligado	

Fonte: elaborado pelo próprio autor, (2025)

Figura 40 – Comunicação com o relé de proteção.

Rele do Trafo					
RELE DE PROTEÇÃO TERMICA					
Temperatura S1	43,0 °C	Temperatura S2	49,0 °C	Temperatura S3	45,0 °C
Temperatura Alarme S1	145,0 °C	Temperatura Alarme S2	145,0 °C	Temperatura Alarme S3	145,0 °C
Temperatura Trip S1	155,0 °C	Temperatura Trip S2	155,0 °C	Temperatura Trip S3	155,0 °C
Temperatura Maxima S1	44,0 °C	Temperatura Maxima S2	49,0 °C	Temperatura Maxima S3	45,0 °C
Temperatura TAmb	0,0 °C	Temperatura Maxima TAmb	0,0 °C		
Temperatura Alarme TAmb	115,0 °C	Temperatura Trip TAmb	140,0 °C		

Fonte: elaborado pelo próprio autor, (2025)

Figura 41 – Comunicação com o medidor auxiliar.

Carga Aux					
Medidor Auxiliar					
Potência Ativa	-2,9 kW	Potência Reativa	1,0 kVAr	Potência Aparente	3,3 kVA
Tensão Saida A	220,6 V	Tensão Saida B	218,3 V	Tensão Saida C	219,6 V
Tensão Saida AB	379,8 V	Tensão Saida BC	378,1 V	Tensão Saida CA	382,5 V
Corrente Saida A	6,6 A	Corrente Saida B	3,6 A	Corrente Saida C	4,9 A
Fator de Potência	0,89	Energia Ativa Resultante	-0,27 MVarh	Energia Reativa Resultante	0,04 MVarh
Energia Ativa Exportada	0,00 MVarh	Energia Ativa Importada	-0,27 MVarh	Frequência	60,1 Hz
Energia Reativa Exportada	0,04 MVarh	Energia Reativa Importada	0,00 MVarh		

Fonte: elaborado pelo próprio autor, (2025)

Figura 42 – Comunicação com o disjuntor PNCA.

PNCA					
Medidor/Disjuntor PNCA					
Potência Ativa	-6,1 kW	Potência Reativa	0,0 kVAr	Potência Aparente	6,9 kVA
Tensão Saida A	6553,5 V	Tensão Saida B	6553,5 V	Tensão Saida C	6553,5 V
Tensão Saida AB	690,7 V	Tensão Saida BC	686,8 V	Tensão Saida CA	695,4 V
Corrente Saida A	4,1 A	Corrente Saida B	5,8 A	Corrente Saida C	7,7 A
Fator de Potência	64,66	Energia Ativa Resultante	0,13 MVarh	Energia Reativa Resultante	-0,01 MVarh
Energia Ativa Exportada	0,14 MVarh	Energia Ativa Importada	-0,01 MVarh	Frequência	60,0 Hz
Energia Reativa Exportada	0,00 MVarh	Energia Reativa Importada	-0,01 MVarh		

Fonte: elaborado pelo próprio autor, (2025)

Figura 43 – Comunicação com o rack de lítio 01.

SBMS1			
String1			
Tensão Global	1368,0 V	Corrente Global	0,0 A
Estado de Carga (SoC)	40,7 %	Estado de Saúde (SoH)	100,0 %
Tensão Máxima Célula 2 Pack 1	3,292 V	Tensão Mínima Célula 8 Pack 1	3,290 V
Temperatura Máxima Pack 5	24,0 °C	Temperatura Mínima Pack 1	22,0 °C
Tensão Média Células	3,3 V	Temperatura Média Células	22,0 °C
Status	Desligado		

Fonte: elaborado pelo próprio autor, (2025)

Figura 44 – Comunicação com o medidor do transformador.

M4M30			
Medidor M4M30			
Potência Ativa	-13,1 kW	Potência Reativa	15,8 kVAr
Potência Aparente	20,6 kVA		
Tensão Saida A	223,4 V	Tensão Saida B	223,9 V
Tensão Saida C	224,1 V		
Tensão Saida AB	387,4 V	Tensão Saida BC	388,4 V
Tensão Saida CA	387,3 V		
Corrente Saida A	50,3 A	Corrente Saida B	22,0 A
Corrente Saida C	20,0 A		
Fator de Potência	-0,63	Energia Ativa Resultante	-1,30 MVArh
Energia Ativa Exportada	0,00 MVArh	Energia Ativa Importada	-1,30 MVArh
Energia Reativa Exportada	1,63 MVArh	Energia Reativa Importada	0,00 MVArh
Frequência	60,1 Hz		

Fonte: elaborado pelo próprio autor, (2025)

Figura 45 – Comunicação com o medidor de rede.

Grid Zero			
Medidor ION 8650			
Potência Ativa	-955,9 kW	Potência Reativa	-437,4 kVAr
Potência Aparente	1051,2 kVA		
Tensão Saida A	6661,0 V	Tensão Saida B	6698,0 V
Tensão Saida C	6597,0 V		
Tensão Saida AB	11599,0 V	Tensão Saida BC	11522,0 V
Tensão Saida CA	11444,0 V		
Corrente Saida A	53,1 A	Corrente Saida B	53,3 A
Corrente Saida C	51,8 A		
Fator de Potência	-0,91	Energia Ativa Resultante	-3,76 MVArh
Energia Ativa Exportada	0,00 MVArh	Energia Ativa Importada	-3,76 MVArh
Energia Reativa Exportada	0,00 MVArh	Energia Reativa Importada	-1,71 MVArh
Frequência	60,0 Hz		

Fonte: elaborado pelo próprio autor, (2025)

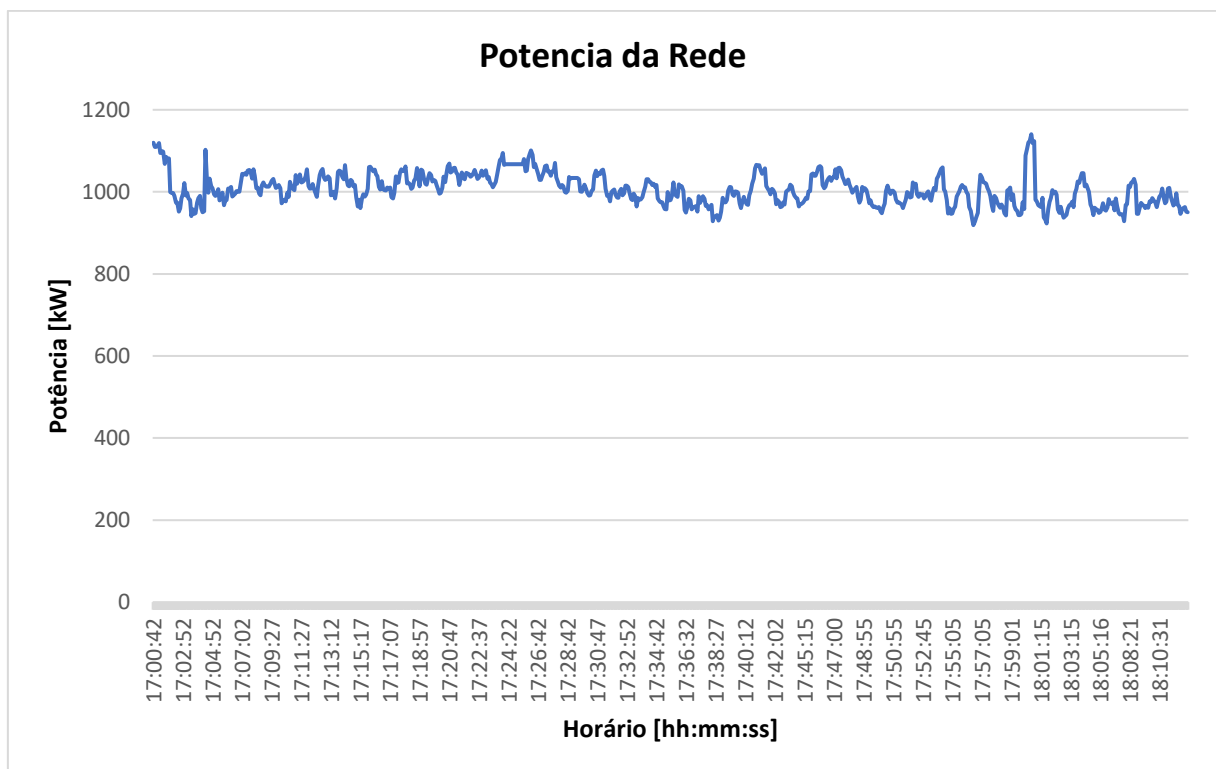
5.2 Time Shifting

Em um intervalo de mais de uma hora, a potência da rede foi amostrada, afim de identificar seu comportamento e compara-lo posteriormente com o controle, os dados obtidos estão dispostos no Figura 46. Ao analisar o gráfico, é visível altas oscilações da carga, apesar de ser manter próximo aos 1000kW.

Com a ativação do controle, escolhendo o *setpoint* em 900kW, o objetivo é o *BESS* descarregar e a alimentar a carga com excedente de potência acima do *setpoint*. Ao visualizar o Figura 47. É notório uma oscilação muito menor da potência, devido a atuação *BESS*. No gráfico também é possível ver a potência total o *BESS* variando, na tentativa de manter a potência da rede em cima do *setpoint*.

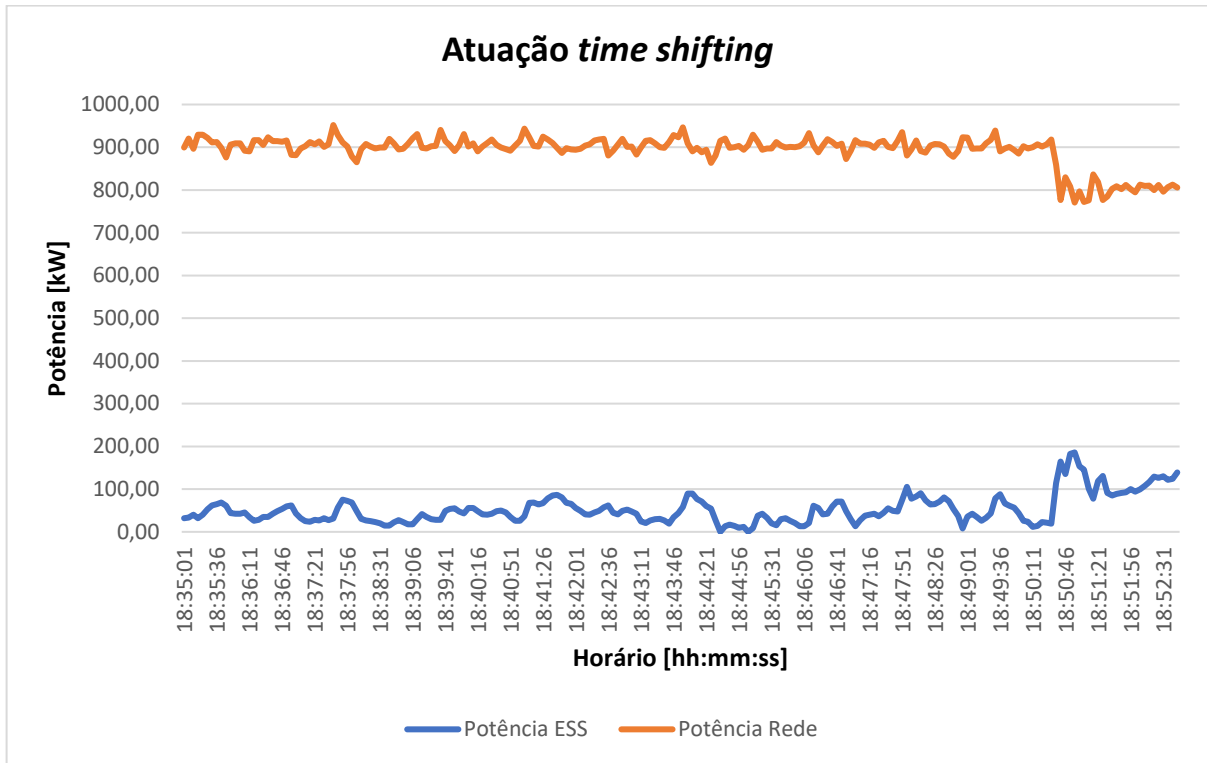
Visto o funcionamento do controle, a atuação precisa do *time shifting*, será feito ao alterar o *setpoint* no horário fora de ponta e no horário de ponta.

Figura 46 – Comportamento da carga.



Fonte: elabora do pelo próprio autor, (2025)

Figura 47 – *Time shifting* atuando, setpoint em 900kW.



Fonte: elabora do pelo próprio autor, (2025)

Diante dos resultados expostos, foi constatado o funcionamento da aplicação *time shifting*. Sendo assim o estabelecimento mencionado terá o custo de operação reduzido. Para quantificar a diferença basta usar a equação (3.1). A energia de cada *rack* de baterias, como visto na Tabela 4, é 407,34kWh. Como no projeto existem três *racks* de lítio, então a energia total armazenada no *BESS*, é 1222kWh. Portanto, o valor economizado por dia é:

$$Economia = (1,926 - 0,404) * 1222e06 = R\$1860,00.$$

Como a tarifa variável só funciona em dias úteis, ao multiplicar o valor obtido acima por 22 dias úteis presentes em um mês, tem-se a economia mensal:

$$Economia = 22 * 1860 = R\$40.920,00.$$

Esse cálculo simples, reafirma a importância do *BESS* com implementação da função *time shifting*.

6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Como demonstrado, um *BESS* com implementação da função *time shifting* pode reduzir significativamente o custo de energia elétrica de um estabelecimento genérico. Esse sistema pode ser adotado em praticamente qualquer local que possua tarifa variável, como fábricas, condomínios, prédios empresariais, lojas, *shopping centers*, hospitais e escolas. No entanto, trata-se de uma solução ainda em estágio inicial, com custos elevados e que exige mão de obra especializada em engenharia para seu desenvolvimento.

Para uma implementação eficaz, é recomendável que o estabelecimento-alvo tenha uma carga relativamente estável, pois o controle do *BESS* precisa de tempo para ajustar a potência ativa e evitar a injeção de energia na rede. Em casos onde a carga apresenta grandes variações súbitas, torna-se necessário manter uma margem de segurança (*setpoint* do controle da aplicação no horário de ponta) maior, reduzindo a eficiência do projeto e limitando a economia na conta de energia elétrica.

6.1 Propostas de Continuidade

O projeto da função *time shifting* com *grid zero* utiliza exclusivamente a potência trifásica do medidor de entrada para realizar seu controle. Para que o sistema opere corretamente, é fundamental que a carga trifásica esteja balanceada, ou pelo menos próxima disso, pois o *PCS* é trifásico e injeta potência de forma igual nas três fases. Caso a carga esteja muito desbalanceada, pode ocorrer uma distribuição desigual da potência ativa entre as fases do estabelecimento, resultando na injeção de energia na rede.

Por exemplo, supondo que as fases A, B e C apresentem, respectivamente, cargas de 10 kW, 45 kW e 45 kW de potência ativa, totalizando 100 kW. Com uma margem de segurança de 10 kW, o *PCS* injetaria 90 kW, distribuindo 30 kW por fase. Nesse cenário, o medidor de entrada registraria uma potência trifásica de 10 kW, mas, por fase, os valores seriam -20 kW, 15 kW e 15 kW para as fases A, B e C, respectivamente. Isso indicaria injeção de potência na fase A, um problema que não

seria percebido ao considerar apenas a potência trifásica. A solução para essa questão representa uma proposta de continuidade para o projeto.

Durante a análise dos resultados, o medidor de entrada identificou que o fator de potência do estabelecimento estava abaixo do limite exigido pela concessionária, o que resultaria em multa. Para evitar essa penalização, o *PCS* deve ser capaz de injetar potência reativa na quantidade necessária para elevar o fator de potência ao intervalo permitido. Essa aplicação, conhecida como correção do fator de potência, pode ser realizado pelo *BESS* e também representa uma possível proposta de continuidade.

Além disso, para operar o *BESS* de maneira eficiente, é necessário um sistema *SCADA*, que permita ao operador supervisionar, controlar e enviar comandos ao sistema. O desenvolvimento dessa interface de controle representa mais uma relevante proposta de continuidade.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento. **ABNT NBR 15749**, p. 49, set. 2009.
- CATL. **Energy storage system of CATL battery Modbus TCP/IP communication protocol with Outdoor Liquid Cooling**. CATL. [S.l.], p. 28. 2023.
- ELALFY, Dina A. et al. Comprehensive review of energy storage systems technologies, objectives, challenges, and future trends. **Energy Strategy Reviews**, Egito, 12 Julho 2024. 54.
- H.J. BERGVELD, W.S. K. P. H. L. N. **Battery Management Systems: Design by Modelling**. JOHNSON, David E. **Fundamentos de Análise de Circuitos Elétricos**. 4^a. ed.
- KATO, Yoshiaki; OGUMI, Zempachi; MANUEL, José. **Lithium-Ion Batteries: Overview, Simulation, and Diagnostics**. 1^a. ed.
- KEHUA TECH. **Power Conversion System BCS-B-HM Series (75K-125K) User Manual**. [S.l.], p. 67. 2024.
- LIPTÁK, Béla G. **Instrument Engineers' Handbook**. 4^a. ed.
- MOHAN, Ned; TORE, M U.; WILLIAM, P R. **Eletrônica de Potência**. 2^a. ed.
- NEOENERGIA PERNAMBUCO. **TARIFAS DE ENERGIA ELÉTRICA GRUPO A**. Recife, p. 4. 2024.
- SCHNEIDER. **Modbus protocol and register map for ION devices**. Schneider. [S.l.], p. 86. 2011.
- LUND, H. et al. Smart energy and smart energy systems. *Energy*, v. 137, p. 556, 2015.
- IBRAHIM, H.; ILINCA, A.; PERRON, J. **Energy storage systems – Characteristics and comparisons**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 12, n. 5, p. 1221, 2008
- MOHAMMADI, M. et al. **Optimal management of energy hubs and smart energy systems - A review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 89, p. 50, 2014.
- LUO, X. et al. **Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation**. *Applied Energy*, v. 137, p. 511, 2015.
- ZAKERI, B.; SYRI, S. **Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 42, p. 569–596, 2015.
- SCIENCE DIRECT. **Power Conversion System – an overview**. Elsevier. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/power-conversion-system>.
- TLS ENERGY. **Understanding Power Conversion Systems (PCS) in Battery Energy Storage Systems (BESS)**. 2023. Disponível em: <https://www.tls-containers.com/tls-blog/understanding-power-conversion-systems-pcs-in-battery-energy-storage-systems-bess>.
- YAN, X.; ZHANG, L.; WANG, Y. (Org.). **Energy Storage and Conversion Systems**. Basel: MDPI, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/books/reprint/8243-energy-storage-and-conversion-systems>.
- ANDREA, David. **Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs**. Norwood: Artech House, 2010.

BARSUKOV, Yevgen; QIAN, Jinrong. **Battery Power Management for Portable Devices**. Norwood: Artech House, 2013.

PRADHAN, S. K.; CHAKRABORTY, B. **Battery management strategies: An essential review for battery state of health monitoring techniques**. Journal of Energy Storage, [S.l.], v. 47, p. 103640, 2022.

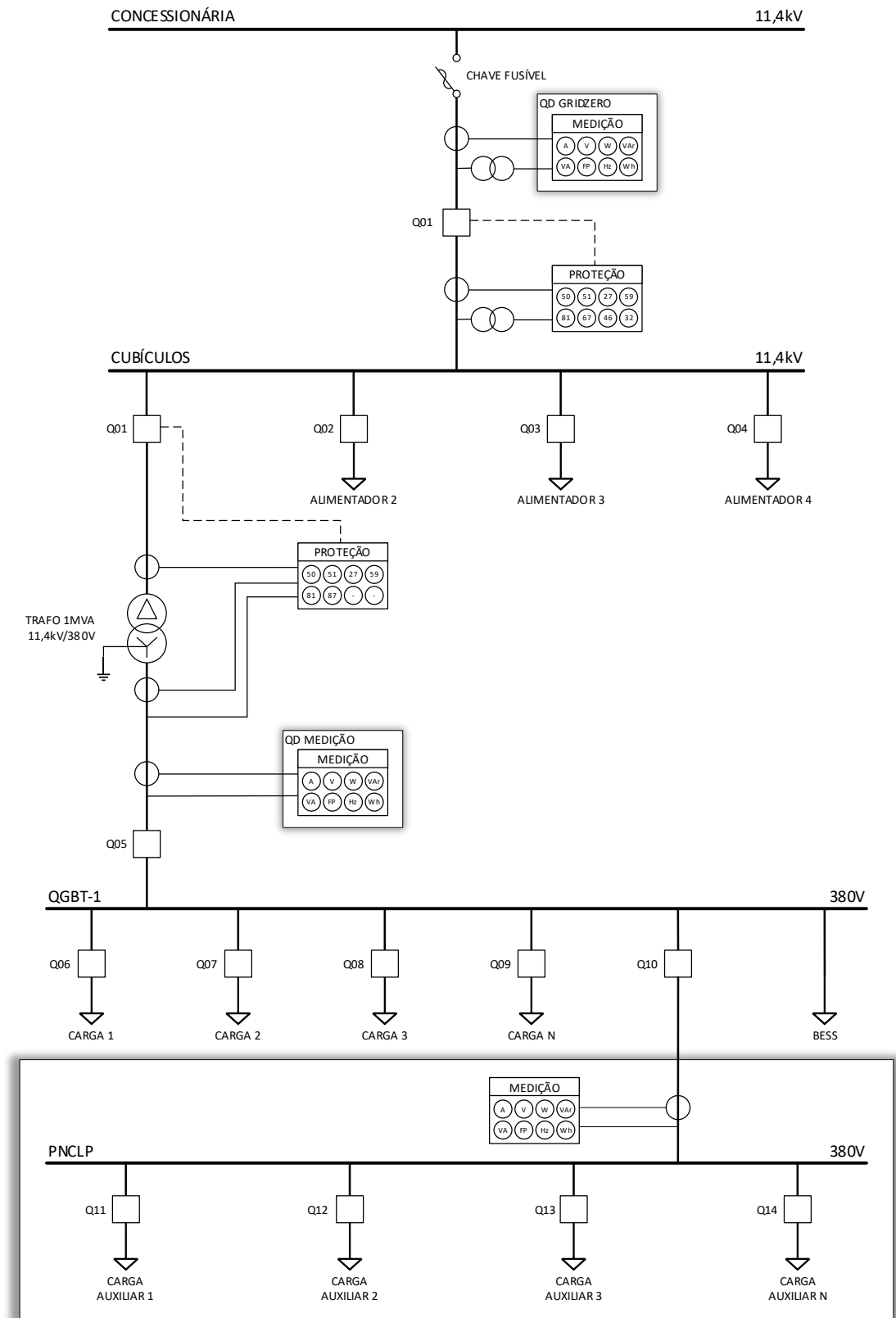
JAEGER, Ricardo Simas; MENDES, Adolfo de Abreu. **Automação industrial: redes de comunicação industriais**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

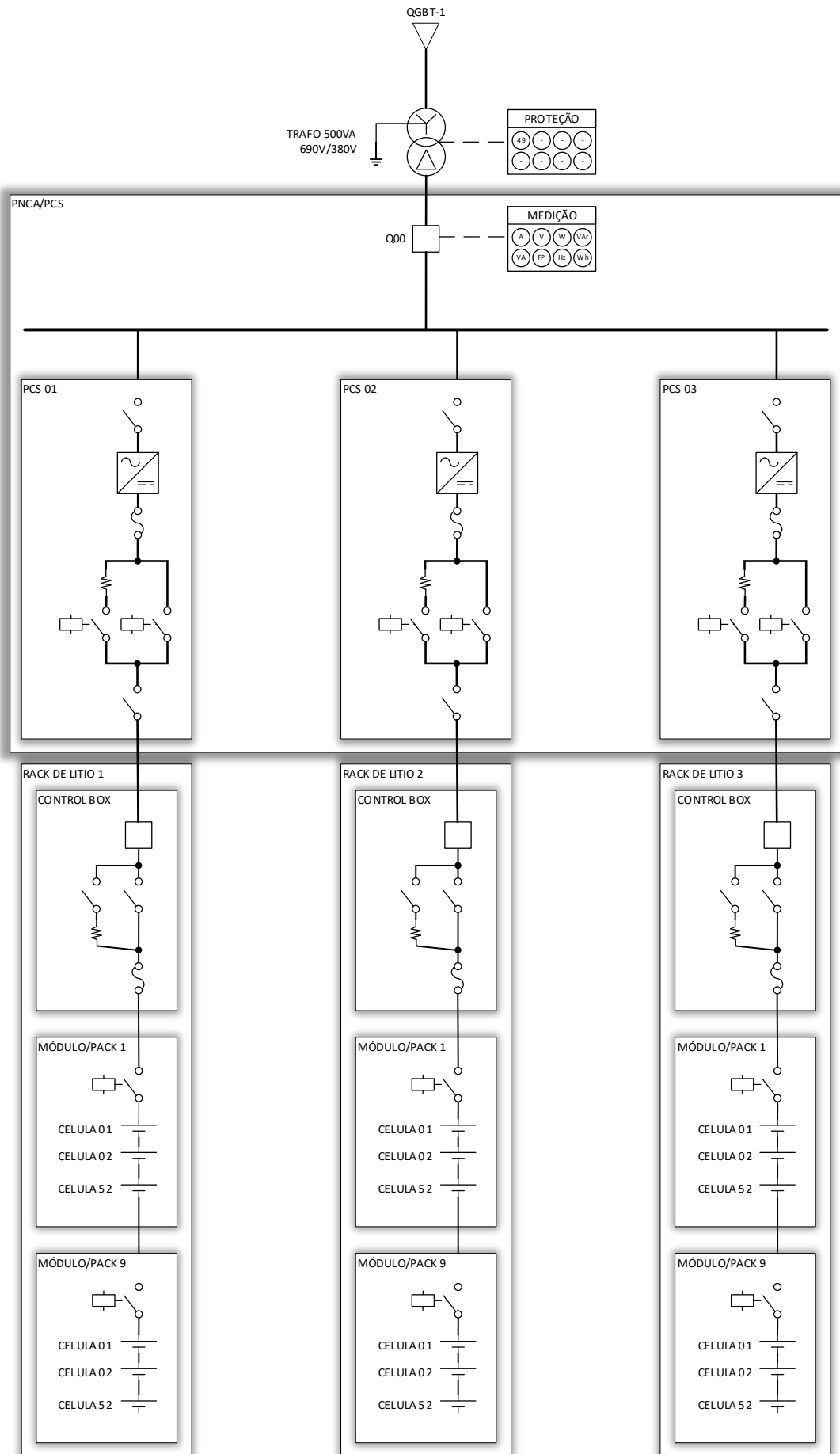
MODBUS Organization. MODBUS over Serial Line Specification and Implementation Guide V1.02. North Grafton: Modbus-IDA, 2002. Disponível em: https://modbus.org/docs/Modbus_over_serial_line_V1_02.pdf.

MODBUS Organization. MODBUS Messaging on TCP/IP Implementation Guide V1.0b. North Grafton: Modbus-IDA, 2006. Disponível em: https://modbus.org/docs/Modbus_Messaging_Implementation_Guide_V1_0b.pdf.

APÊNDICES

APÊNDICE A – DIAGRAMA UNIFILAR SIMPLIFICADO





APÊNDICE B – DETALHAMENTO DE ENTRADAS E SAÍDAS CLP

DETALHAMENTO ENTRADAS E SAÍDAS - PNCLP						
		TAG	DESCRIÇÃO	ORIGEM/ DESTINO	TIPO	OBSERVAÇÕES
TIPO:	CPU		POSIÇÃO: 1	CARTÃO:	1212C	
DI a.0	ED		Sensor de Fumaça 1 - status		Contato NA (24Vcc)	SALA DE POTÊNCIA
DI a.1	ED		Sensor de Fumaça 2 - status		Contato NA (24Vcc)	SALA DE POTÊNCIA
DI a.2	ED		Botão de Emergência - Atuado		Contato NF (24Vcc)	
DI a.3	ED		Fault Relay		Contato NF (24Vcc)	CENTRAL DE COMBATE A INCÊNDIO
DI a.4	ED		Local Fire		Contato NA (24Vcc)	CENTRAL DE COMBATE A INCÊNDIO
DI a.5	ED		Fire Relay		Contato NA (24Vcc)	CENTRAL DE COMBATE A INCÊNDIO
DI a.6	ED		Trafo 1 - Alarme		Contato NA (24Vcc)	BESS 690V/380V
DI a.7	ED		Trafo 1 - Trip		Contato NA (24Vcc)	BESS 690V/380V
DI b.0	ED		Fonte de Alimentação G01/G02 - CLP		Contato NA (24Vcc)	PNCLP
DI b.1	ED		Fonte de Alimentação G03/G04 - SENSORES		Contato NA (24Vcc)	PNCLP
DO a.4	SD		Silencia Sirene		Contato NF (24Vcc)	
DO a.5	SD		Falha CLP		Contato NF (24Vcc)	
DO a.6	SD		Parada PCS - Via CLP		Contato NA (24Vcc)	
DO a.7	SD		Disjuntor PCS/PNCA - Fecha		Contato NA (24Vcc)	Q00
DO b.0	SD		Disjuntor PCS/PNCA - Abre		Contato NA (24Vcc)	Q00
DO b.1	SD		RESERVA		Contato NA (24Vcc)	
TIPO:	ED		POSIÇÃO: 2	CARTÃO:	SM 1221 DI16 x 24VDC	
DI a.0	1		Disjuntor QGBT Existente - Aberto		Contato NA (24Vcc)	QGBT EXISTENTE
DI a.1	2		Disjuntor QGBT Existente - Fechado		Contato NA (24Vcc)	QGBT EXISTENTE

DI a.2	3		Switch RS940G- Alarme		Contato NA (24Vcc)	
DI a.3	4		RSERVA		Contato NA (24Vcc)	
DI a.4	5		RSERVA		Contato NA (24Vcc)	
DI a.5	6		RSERVA		Contato NA (24Vcc)	
DI a.6	7		RSERVA		Contato NA (24Vcc)	
DI a.7	8		RSERVA		Contato NA (24Vcc)	
DI b.0	9		RSERVA		Contato NA (24Vcc)	
DI b.1	10		RSERVA		Contato NA (24Vcc)	
DI b.2	11		RSERVA		Contato NA (24Vcc)	
DI b.3	12		RSERVA		Contato NA (24Vcc)	
DI b.4	13		RSERVA		Contato NA (24Vcc)	
DI b.5	14		RSERVA		Contato NA (24Vcc)	
DI b.6	15		RSERVA		Contato NA (24Vcc)	
DI b.7	16		RSERVA		Contato NA (24Vcc)	
TIPO:	SD		POSIÇÃO: 3	CARTÃO:	SM 1222 DQ16 x 24VDC	
DO a.0	1		RESERVA		Contato NA (24Vcc)	
DO a.1	2		RESERVA		Contato NA (24Vcc)	
DO a.2	3		RESERVA		Contato NA (24Vcc)	
DO a.3	4		RESERVA		Contato NA (24Vcc)	
DO a.4	5		RESERVA		Contato NA (24Vcc)	
DO a.5	6		RESERVA		Contato NA (24Vcc)	
DO a.6	7		RESERVA		Contato NA (24Vcc)	
DO a.7	8		RESERVA		Contato NA (24Vcc)	

DO b.0	9		RESERVA		Contato NA (24Vcc)	
DO b.1	10		RESERVA		Contato NA (24Vcc)	
DO b.2	11		RESERVA		ContatoNA (24Vcc)	
DO b.3	12		RESERVA		Contato NA (24Vcc)	
DO b.4	13		RESERVA		Contato NA (24Vcc)	
DO b.5	14		RESERVA		Contato NA (24Vcc)	
DO b.6	15		RESERVA		Contato NA (24Vcc)	
DO b.7	16		RESERVA		Contato NA (24Vcc)	
TIPO:	EA		POSIÇÃO:	4	CARTÃO:	SM 1231 AI8
IWX	1		Sala de Potência - Temperatura			4mA=0°C 20mA=100°C - Sensor Sala Potência
IWX+2	2		Sala de Potência - Umidade			4mA=0% 20mA=100% - Sensor Sala Potência
IWX+4	3		Reserva			
IWX+6	4		Reserva			
IWX+8	5		Reserva			
IWX+10	6		Reserva			
IWX+12	7		Reserva			
IWX+14	8		Reserva			

