



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

Mateus Longo Martins de Lima

**ANÁLISE COMPARATIVA DE OPERAÇÃO EM SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE
ENERGIA COM BATERIAS PbC E LFP**

Recife
2025

MATEUS LONGO MARTINS DE LIMA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE OPERAÇÃO EM SISTEMAS DE
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA COM BATERIAS PbC E LFP**

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 Eletricista.

Orientador(a): Prof. Dr. José Filho da Costa Castro

Recife
2025

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

Lima, Mateus Longo Martins de .

Análise comparativa em sistemas de armazenamento de
energia com baterias PbC e LFP / Mateus Longo Martins de Lima.
- Recife, 2025.

88 p. : il., tab.

Orientador(a): José Filho da Costa Castro
Coorientador(a): Pablo Luiz Tabosa da Silva

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

Inclui referências.

1. BESS. 2. Arbitragem de Energia . 3. Eficiência roundtrip. 4.
Cargas Auxiliares. I. da Costa Castro, José Filho. (Orientação). II.
Tabosa da Silva, Pablo Luiz . (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

MATEUS LONGO MARTINS DE LIMA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE OPERAÇÃO EM SISTEMAS DE
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA COM BATERIAS PbC E LFP**

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 Eletricista.

Aprovado em: 16/12/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr José Filho da Costa Castro
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Marcio Evaristo da Cruz Brito
Universidade Federal de Pernambuco

Eng. M.Sc. Davidson da Costa Marques
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Dedico esta parte do trabalho em agradecer a diversas pessoas que tiveram influência na minha vida acadêmica e profissional.

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais, Cassia e Albério, por sempre terem tido confiança em mim enquanto filho e enquanto estudante, sobretudo a minha mãe, que sempre me deu o apoio para que eu pudesse trilhar a carreira profissional que eu escolhi para mim.

Quero agradecer também à minha esposa e parceira, Tali, não só no desenvolvimento deste trabalho, mas também em toda nossa trilha de vida, me apoiou e me deu suporte emocional e temporal, e que sem ela eu não estaria onde eu estou hoje, tendo me motivado desde o momento que nos conhecemos. Sem o amor dela, que foi concretizado na nossa linda Ada, eu seria menos do que sou hoje.

Quero agradecer a todos meus amigos de curso e de vida, que estiveram comigo nos bons e maus momentos da minha trajetória estudantil, e que até o presente momento me ajudaram até neste trabalho. Pela grande lista das pessoas que me ajudaram até hoje, não farei nomeação individual. Em especial, os amigos da graduação, do Maracatronics, do Sociedade, do colégio Equipe, do meu intercâmbio em Toulouse na N7, do Yalu, e todos que levo até hoje na minha vida e trajetória e que me fizeram ser quem sou hoje.

Ao meu professor orientador, Dr. José Castro, que teve muita paciência ao longo dos períodos para me orientar e acreditou nas minhas propostas e premissas de trabalho desde a primeira vez que conversei com ele, e ao meu coorientador Dr. Pablo Luiz, que me apoiou desde a primeira reunião e tem sido entusiasta do presente trabalho.

Ao Grupo Moura, na figura de Felipe Ramos, que me permitiu embasar meu trabalho em dados fornecidos pela organização da qual hoje faço parte, e que me mentora enquanto gestor. E ainda aos meus colegas de trabalho que sempre me ajudam nos problemas no dia a dia, e que sem eles o trabalho seria bem menos leve!

RESUMO

O avanço das fontes renováveis intermitentes e a necessidade de flexibilidade operacional têm impulsionado o uso de sistemas de armazenamento de energia em baterias (BESS) em aplicações comerciais e industriais. A problemática principal por trás do trabalho fundamenta-se no impacto de cargas auxiliares presentes neste tipo de sistema e que dão suporte ao seu funcionamento. Para este fim, o presente trabalho analisa e compara o desempenho de dois BESS com tecnologias distintas empregados na arbitragem de energia, sendo elas chamadas genericamente de Lítio e de Chumbo. No sistema de baterias de lítio, contabiliza-se diretamente o consumo energético das cargas auxiliares; no sistema chumbo-carbono, o consumo, e por consequência, o efeito deste consumo, é estimado por simulação para obtenção de uma eficiência global comparável. A metodologia baseia-se em dados reais de operação, coletados ao longo de cinco meses, com medições em diferentes pontos de medição do circuito e no cálculo de eficiência do sistema. Os resultados mostram que a inclusão das cargas auxiliares reduz de modo significativo a eficiência global quando comparada à eficiência baseada apenas em conversão e armazenamento, evidenciando a necessidade de avaliações energéticas abrangentes em contextos de aplicação de BESS, e dentro do contexto do trabalho, o BESS com tecnologia de Lítio apresentou resultados mais favoráveis. Conclui-se que a contabilização explícita das cargas auxiliares e a definição clara dos pontos de medição são determinantes para indicadores de desempenho representativos e para decisões de projeto, como a própria contabilização do consumo de forma a gerar um cálculo de eficiência mais preciso.

Palavras-chave: BESS; Arbitragem de Energia; Eficiência *roundtrip* (RTE); Cargas Auxiliares.

ABSTRACT

The advancement of intermittent renewable energy sources and the increasing demand for operational flexibility have driven the adoption of Battery Energy Storage Systems (BESS) in commercial and industrial applications. The main issue addressed in this work concerns the impact of auxiliary loads inherent to this type of system, which are essential for its operation but directly affect its overall energy performance. In this context, the present study analyzes and compares the operational performance of two BESS employing different storage technologies, generically referred to as Lithium and Lead-based systems, both applied to energy arbitrage. In the lithium-based system, the energy consumption of auxiliary loads is directly measured; in the lead–carbon system, this consumption, and consequently its impact on the system's overall efficiency, is estimated through simulation in order to obtain a comparable global efficiency metric. The methodology is based on real operational data collected over a five-month period, including measurements at different points of the electrical circuit and the calculation of system efficiency. The results indicate that the inclusion of auxiliary loads significantly reduces the global efficiency when compared to an evaluation based solely on conversion and storage processes, highlighting the need for comprehensive energy assessments in BESS applications. Within the scope of this study, the lithium-based BESS exhibited more favorable performance indicators. It is concluded that the explicit accounting of auxiliary loads and the clear definition of measurement points are essential to obtain representative performance metrics and to support sound design decisions, particularly regarding the accurate calculation of system efficiency.

Keywords: BESS; energy arbitrage; round-trip efficiency (RTE); auxiliary loads.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Variação Histórica e estimativa para o futuro do preço de baterias de lítio	14
Figura 2 - Preço do sistema de Baterias de Lítio e do Pack - Estimativa mundial em USD/kWh.....	15
Figura 3 - Subsistemas constituintes do BESS	19
Figura 4 - Estrutura interna geral de um BESS	20
Figura 5 – Diagrama Simplificado do PCS	21
Figura 6 - Curva Aproximada da eficiência do PCS	22
Figura 7 - Estrutura simplificada do EMS	24
Figura 8 - Estruturas do sistema de baterias.....	28
Figura 9 - Representação dos níveis do BMS	30
Figura 10 - Componentes do SCI.....	33
Figura 11 - Representação da Aplicação de Arbitragem de Energia.....	39
Figura 12 - Curva aproximada de eficiência de baterias LFP com relação à taxa de carga/descarga.....	43
Figura 13 - Estrutura genérica do BESS	45
Figura 14 - Arquiteturas de BESS	46
Figura 15 - Exemplo de Unidade Consumidora onde o BESS está conectado	47
Figura 16 - Arquitetura do Sistema 1.....	49
Figura 17 - Arquitetura do Sistema 2.....	50
Figura 18 - Dados gráficos da Tabela 5	66
Figura 19 - Dados gráficos da Tabela 6	67
Figura 20 - Exemplo de Operação - <i>Sistema 2</i>	69
Figura 21 - Representação da RTE e RTE global usando unifilar do <i>Sistema 2</i>	70
Figura 22 - Dados gráficos da Tabela 22	81
Figura 23 - Comparações de eficiência ponto a ponto	83
Figura 24 - Resultados percentuais dos cenários de simulação das cargas auxiliares para o Sistema 1	83
Figura 25 - Comparação dos valores de RTE global.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo dos pontos de medição representados na Figura 13	45
Tabela 2 - Diferenças no salvamento dos dados	52
Tabela 3 - Parâmetros e modos de operação do BESS.....	54
Tabela 4 – Comparação dos métodos de integração.....	61
Tabela 5 - Dados de Eficiência por Componente - <i>Sistema 1</i>	65
Tabela 6 - Dados de Eficiência por Componente - <i>Sistema 2</i>	66
Tabela 7 - Dados de RTE - comparativo dos dois sistemas.....	68
Tabela 8 - Dados de RTE e RTE global do <i>Sistema 2</i>	70
Tabela 9 - Dados de RTE e RTE global - comparativo dos dois sistemas	71
Tabela 10 - Dados Despacho e Consumo do <i>Sistema 1</i> a partir do PCS	71
Tabela 11 - Dados de consumo de Cargas Auxiliares do <i>Sistema 2</i>	72
Tabela 12 - Dados Temporais para análise – Cenário 1	74
Tabela 13 - Estimativa média mensal de consumo com base na simulação horária – Cenário 1.....	74
Tabela 14 - RTE global recalculado - Cenário 1.....	75
Tabela 15 - Dados de base para cálculo de proporção de consumo - Cenário 2.....	75
Tabela 16 - Estimativa média mensal de consumo com base na simulação horária – Cenário 2.....	76
Tabela 17 - RTE global recalculado - Cenário 2.....	77
Tabela 18 - Dados de potência dos dispositivos auxiliares do BESS -1	78
Tabela 19 - Potência do HVAC	78
Tabela 20 - Estimativa média mensal de consumo com base na simulação horária – Cenário 3.....	79
Tabela 21 - RTE global recalculado - Cenário 3.....	79
Tabela 22 - Dados de Operação do período analisado - <i>Sistema 1</i>	80
Tabela 23 - Estimativa média mensal de consumo com base na simulação horária – Cenário 4	82
Tabela 24 - RTE global recalculado - Cenário 4.....	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BESS	<i>Battery Energy Storage System</i>
BMS	<i>Battery Management System</i>
BMU	<i>Battery Monitoring Units</i>
BTM	<i>Behind the meter</i>
C&I	Comercial e Industrial
CA	Corrente alternada
CAPEX	Despesas de Capital
CC	Corrente contínua
CFTV	Círculo Fechado de Televisão
CLP	Controlador Lógico Programável
CSC	<i>Cell Supervising Circuits</i>
DoD	<i>Depth of Discharge</i>
DPS	Dispositivo protetor de Surto
EMS	<i>Energy Management System</i>
EoL	<i>End of Life</i>
FTM	<i>Front of the Meter</i>
FV	Fotovoltaico
GD	Geração Distribuída
HVAC	<i>Heating, ventilation, and air conditioning</i>
IHM	Interface Homem Máquina
LFP	Lítio Ferro Fosfato
MBMU	<i>Master Battery Management Unit</i>
O&M	Operação e Manutenção
PbC	Chumbo Carbono
PCS	<i>Power Conversion System</i>
RTE	<i>Roundtrip Efficiency</i>
SBMU	<i>String Battery Management Unit</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SCI	Sistema de combate a incêndio
SIN	Sistema Interligado Nacional
SoC	<i>State of Charge</i>
SoH	<i>State of Health</i>

TMS	<i>Thermal Management System</i>
UC	Unidade Consumidora
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>

SUMÁRIO

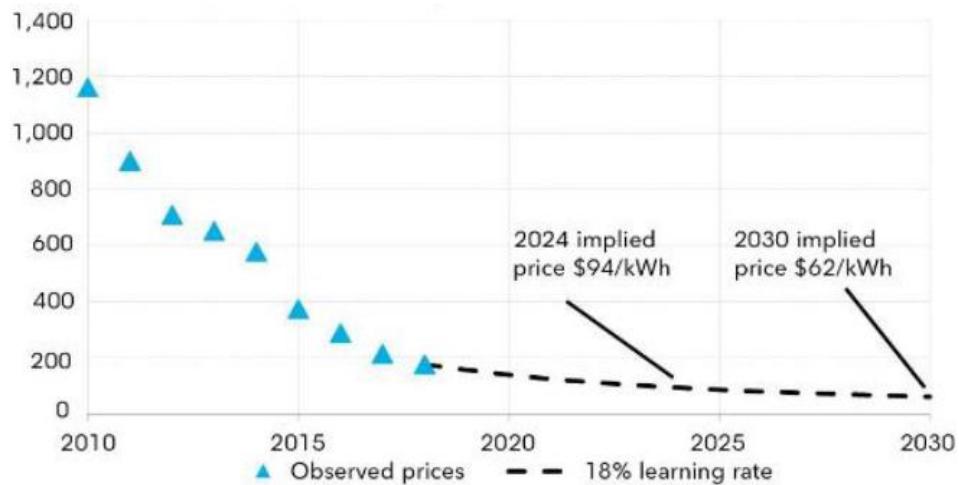
1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Geral.....	17
1.1.2	Específicos	17
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	ARQUITETURA E SUBSISTEMAS DO BESS	19
2.1.1	PCS	20
2.1.2	Sistema de Gestão de Energia – EMS	23
•	Controlador Lógico Programável (CLP)	25
•	Computador	25
•	Interfaces de Comunicação	26
•	Aplicações de Dados.....	26
2.1.3	Baterias	27
2.1.4	BMS	29
2.1.4.1	<i>Estrutura de níveis e funcionamento</i>	<i>30</i>
2.1.5	Serviços e Sistemas Auxiliares.....	32
2.1.5.1	<i>SCI - Sistema de combate a incêndio.....</i>	<i>32</i>
2.1.5.2	<i>Sistema de resfriamento / TMS</i>	<i>34</i>
2.1.5.3	<i>Alimentação dos outros subsistemas</i>	<i>34</i>
2.1.5.4	<i>Sensores</i>	<i>35</i>
2.1.5.5	<i>Painéis.....</i>	<i>35</i>
2.2	APLICAÇÕES DO BESS	36
2.2.1	Perspectiva C&I.....	37
2.2.2	Foco em Arbitragem de Energia	38
2.3	TECNOLOGIAS DE BATERIAS APLICADAS AO BESS	40
2.3.1	Chumbo Carbono (PbC)	40
2.3.2	Lítio (LFP).....	41
3	MODELO CONCEITUAL: ARQUITETURAS PARA SISTEMAS BTM.....	44
4	DESCRITIVO DOS SISTEMAS ANALISADOS	48
4.1	<i>SISTEMA 1 – BATERIAS DE CHUMBO-CARBONO</i>	<i>48</i>
4.2	<i>SISTEMA 2 – BATERIAS DE LÍTIO</i>	<i>49</i>
5	DESENVOLVIMENTO.....	51
5.1	COLETA E TRATAMENTO DE DADOS.....	51
5.1.1	Formato e Armazenamento dos dados.....	51
5.2	CÁLCULOS USADOS	53

5.2.1	Definições e considerações	53
5.2.1.1	<i>Análise do circuito pela Potência e pela Energia</i>	54
5.2.2	Cálculo da Energia	57
5.2.2.1	<i>Método da Janela Temporal</i>	58
5.2.2.2	<i>Método de Integração Discreta</i>	59
5.2.2.3	<i>Relação entre os métodos e justificativa da equivalência</i>	60
5.2.3	Cálculo das Eficiências	61
5.2.3.1	<i>Eficiências em pontos do circuito</i>	63
6	RESULTADOS	65
6.1	DADOS GERAIS DE EFICIÊNCIA DOS SISTEMAS	65
6.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE O SISTEMA 2	68
6.2.1	Comparativos entre RTE e RTE global	69
6.3	COMPARAÇÕES SIMULADAS	71
6.3.1	Primeiro Cenário Simulado	72
6.3.2	Segundo Cenário Simulado	75
6.3.3	Terceiro Cenário Simulado	77
6.3.3.1	<i>Influência das cargas auxiliares</i>	77
6.3.3.2	<i>Desenvolvimento do Cenário</i>	78
6.3.4	Quarto Cenário Simulado	80
6.4	RESUMO COMPARATIVO DOS RESULTADOS	82
7	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	84
	REFERÊNCIAS	86

1 INTRODUÇÃO

A difusão de sistemas de armazenamento em baterias (BESS) ganhou tração no mundo por uma combinação de três vetores: (i) queda consistente de custos, puxada pelo avanço industrial das cadeias de íons de lítio e pela escala induzida pela mobilidade elétrica; (ii) necessidade de flexibilidade operativa em redes com mais fontes renováveis; e (iii) evolução de modelos de negócio que monetizam serviços de rede, desde arbitragem até regulação rápida. A Figura 1 expõe de maneira histórica e estimada o esperado e exposto no tópico (i) (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), 2019).

Figura 1 - Variação Histórica e estimativa para o futuro do preço de baterias de lítio

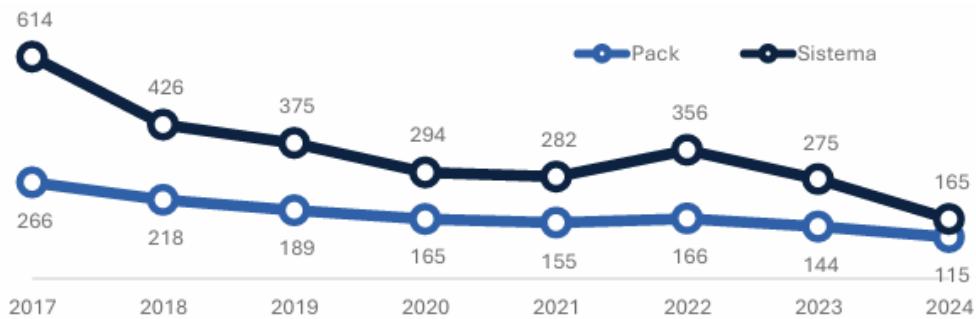


Fonte: (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), 2019).

Relatórios internacionais convergem na mesma direção: a curva de custo dos sistemas de bateria em escala de rede e seus componentes de O&M segue declinante em cenários conservadores a agressivos, com reduções relevantes projetadas até 2035–2050. Isto sustenta a expansão de casos de uso antes marginais (por custo) e hoje tecnicamente e economicamente defensáveis. De forma geral, a Figura 2 ilustra mais precisamente essa queda com dados históricos recentes. Tanto a nível celular, insumo base na cadeira mundial para uma gama grande de aplicações e projetos de diferentes magnitudes, estruturas e arquiteturas, explicitado na imagem por pack, quanto a nível de constituição de sistema, que muitas vezes é uma solução de baterias

comercializada associada com sistemas de medição, monitoramento, seccionamento e outros que constituem um produto final completo, foi visto uma queda histórica, e a tendência é de continuar em baixa (EPE, 2025).

Figura 2 - Preço do sistema de Baterias de Lítio e do Pack - Estimativa mundial em USD/kWh



Fonte: (EPE, 2025)

Do ponto de vista de aplicação, a fotografia mundial mostra um portfólio diversificado, mas com pesos claros: arbitragem de energia desponta como a aplicação individual mais frequente em bases de projetos consolidadas; na sequência aparecem serviços voltados a firmar potência de fontes renováveis (*capacity firming*), suporte à tensão e outros serviços anciliares (regulação, black-start, confiabilidade/qualidade), que juntos respondem por parcela significativa das implantações. Essa distribuição reforça o papel do BESS tanto como ativo de mercado (gestão de preços e deslocamento temporal de energia) quanto de sistema (estabilidade e qualidade).

Quanto às tecnologias, a participação de íons de lítio domina os sistemas em operação, enquanto chumbo-ácido permanece relevante em nichos específicos, inclusive onde requisitos de custo inicial, robustez e logística de reciclagem pesam mais (SILVA, 2022). A base de dados citada indica participação majoritária de lítio-íon e uma fração ainda representativa de chumbo-ácido, com demais tecnologias (fluxo, sódio, supercapacitores) compondo o restante do portfólio. Em paralelo, as projeções de custo e desempenho indicam que a tendência de queda em CAPEX e O&M para lítio deve manter essa liderança no curto e médio prazos.

Essa moldura global interessa diretamente ao contexto C&I (Comercial e Industrial): a viabilidade do BESS para consumidores médios e grandes, estes sobretudo no Brasil caracterizados pelos modais tarifários binomiais (divisão de consumo entre ponta e fora-ponta) depende menos de “apenas” converter e armazenar energia com boa eficiência nominal e mais de como o projeto performa no ponto de medição contratado, com todas as perdas e consumos internos adequadamente incluídos. Em outras palavras, para que a métrica operacional que orienta a decisão (custo evitado, arbitragem efetiva, redução de demanda, indicadores de eficiência) seja representativa, é indispensável medir/estimar também o que não passa pelo “bloco de potência” e que impacta a energia líquida vista pela concessionária; ou seja, as cargas e serviços auxiliares do sistema.

No espectro de serviços, a arbitragem permanece a âncora natural para C&I por combinar lógica simples de operação (carregar em momentos de maior conveniência, descarregar em momentos de maior necessidade) com efeitos colaterais positivos. Mas a experiência internacional demonstra que o “como medir” e o “onde medir” são tão importantes quanto o “quanto descarregar”: arbitragens bem-sucedidas partem de fronteiras de medição claras, intervalos de amostragem compatíveis com as dinâmicas do sistema e contabilização explícita de cargas auxiliares. Sem isso, a eficiência *roundtrip* (RTE) de conversão/armazenamento, medida apenas no ponto de conexão do inversor bidirecional, tende a superestimar o benefício líquido para a unidade consumidora, distorcendo *paybacks* e comparações entre tecnologias.

É nesse ponto que este trabalho se posiciona. Opta-se por comparar, em operação real, dois BESS com a mesma aplicação-foco (arbitragem), porém com tecnologias distintas de armazenamento e arquiteturas ligeiramente diferentes de medição. O recorte é feito como segue: cinco meses de dados, com medições em CA e CC nos pontos disponíveis, permitindo decompor eficiência do PCS (retificação/inversão) e eficiência do bloco de armazenamento, além de estabelecer uma RTE “global” comparável entre sistemas. Para o LFP, o consumo auxiliar é medido diretamente; para o PbC, esse consumo é estimado por simulação para compor uma RTE que espelhe a energia líquida efetivamente transacionada na fronteira da UC.

A motivação é pragmática: em ambientes C&I, a fronteira tarifária e os contratos comerciais cobram a realidade elétrica, e não apenas a eficiência nominal do inversor

ou do pack de baterias. Ao incorporar sistemas de resfriamento e cargas de sensoriamento, monitoramento e controle, aproxima-se a análise da performance que sustenta a decisão de investimento: o que o cliente efetivamente deixa de comprar na ponta (ou desloca no tempo) versus o que gasta para manter o sistema operando. Essa é, inclusive, a direção apontada por levantamentos institucionais: múltiplas aplicações, tecnologias distintas e métricas coerentes com o serviço prestado, sob pena de conclusões enviesadas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

O objetivo geral do presente trabalho consiste em estudar, para um período de duração similar, o funcionamento de dois BESS com tecnologias de baterias distintas e comparar a operação dos dois sistemas no âmbito da arbitragem de energia.

1.1.2 Específicos

Com base no objetivo geral, os objetivos específicos podem ser estruturados como segue:

- Determinar, de acordo com o estipulado dentro das definições do trabalho, valores de eficiência no quesito armazenamento, considerando perdas dentro do sistema;
- Estimar, de forma simulada, o impacto das cargas auxiliares no desempenho energético do sistema de chumbo-carbono;
- Calcular e estimar as eficiências parciais dos componentes do sistema a fim de comparar os sistemas ponto a ponto.

1.2 Organização do Trabalho

O texto do presente trabalho foi organizado em 6 capítulos, além da presente introdução:

- Capítulo 2: Apresentação da fundamentação teórica, percorrendo conceitos, apresentando equipamentos presentes no BESS e expondo aplicações que este sistema pode realizar;
- Capítulo 3: Apresentação de Modelo Conceitual: Arquiteturas de Medição para Sistemas BTM;
- Capítulo 4: Apresentação dos dois BESS para estudo comparativo;
- Capítulo 5: Apresentação da metodologia de cálculo para obter os resultados;
- Capítulo 6: Apresentação dos resultados comparativos dos dois sistemas
- Capítulo 7: Apresentação das conclusões.

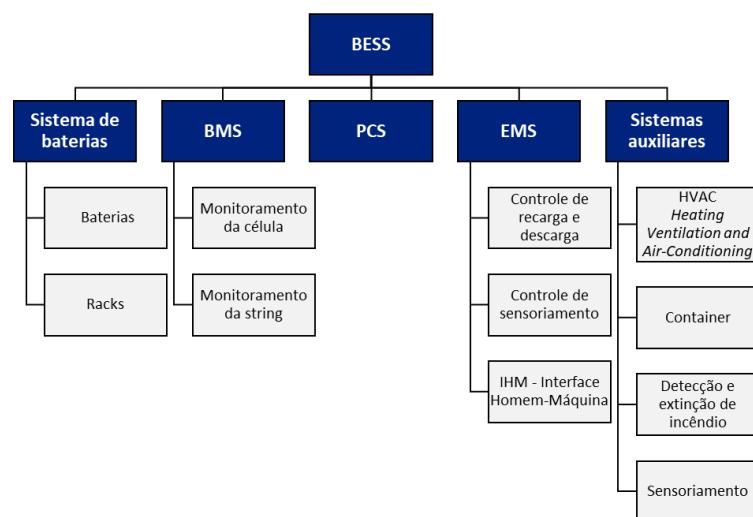
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Arquitetura e Subsistemas do BESS

Os Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS – *Battery Energy Storage Systems*) são sistemas versáteis que podem realizar diversas funções em sistemas elétricos (ADB, 2018). Conforme ilustrado na Figura 3, o sistema é composto por cinco subsistemas principais: i. Sistema de baterias; ii. Sistema de gerenciamento de baterias (BMS – *Battery Management System*); iii. Conversor de potência (PCS – *Power Converter System*); iv. Sistema de gerenciamento de energia (EMS – *Energy Management System*); v. Sistemas auxiliares.

No presente subcapítulo, é apresentada a subdivisão das partes que compõem o BESS como sistema, detalhando um pouco dos componentes presentes dessas partes e suas importâncias para o funcionamento conforme desse.

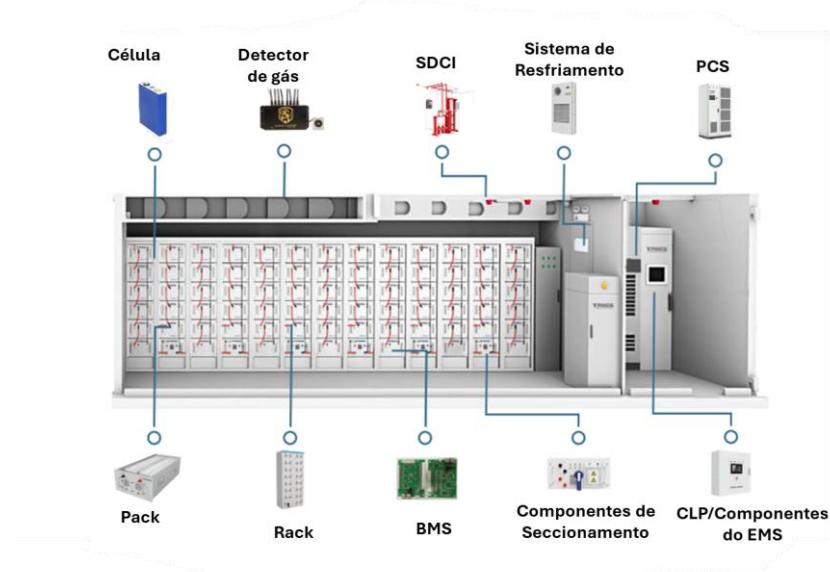
Figura 3 - Subsistemas constituintes do BESS



Fonte: Acervo interno Moura

De forma geral, O BESS é caracterizado por um conjunto de baterias organizadas em série e/ou paralelo, que em conjunto, formam uma estrutura destinada a atender, a nível de potência e energia, determinados agentes (consumidores/transmissores/geradores) dos sistemas elétricos. Normalmente esse tipo de sistema é usado para sustentar e suprir carências de redes em corrente alternada, sendo o modelo amplamente utilizado nos sistemas de potência a nível nacional e global. A Figura 4 representa alguns dos componentes físicos deste sistema. A maior parte desses equipamentos são descritas nas seções que se seguem.

Figura 4 - Estrutura interna geral de um BESS



Fonte: (TROES CORP, 2025)

2.1.1 PCS

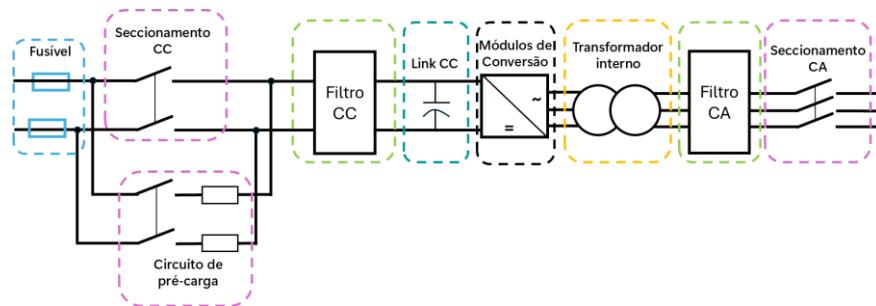
O Sistema de Conversão de Potência (*Power Conversion System – PCS*) é o componente elétrico mais crítico do BESS, juntamente com o conjunto de baterias. Sua função principal é realizar a conversão de energia entre corrente contínua (CC), forma em que a energia é armazenada, e corrente alternada (CA), forma em que a maior parte das cargas e redes elétricas operam. Assim, o PCS é responsável tanto por viabilizar o carregamento das baterias a partir da rede ou de geração local, quanto

pela entrega da energia armazenada para consumo ou injeção na rede elétrica. (EYER e COREY, 2010)

Devido à sua função bidirecional, o PCS atua em duas frentes principais: conversão CA/CC durante o processo de recarga (retificador), usada neste sentido para carregar as baterias, e conversão CC/CA durante a descarga (inversor), usado neste sentido para descarregar a energia das baterias. Essa característica garante flexibilidade operacional, permitindo que o sistema atue em diferentes cenários de uso, como arbitragem de energia, serviços anciliares ou fornecimento de backup.

O PCS é formado não somente pela parte que converte a energia, para diversos outros subequipamentos que influem para o bom funcionamento deste grande sistema. Uma representação simplificada do que está presente dentro do equipamento é apresentado na Figura 5. Para além dos módulos de conversão, principal componente do sistema para a conversão de energia, outros componentes são extremamente relevantes para o funcionamento deste equipamento, como os dispositivos de proteção e seccionamento, tanto do lado CA quanto do lado CC, filtros para redução da taxa de harmônicos produzidos na conversão e transformadores internos, quando aplicáveis.

Figura 5 – Diagrama Simplificado do PCS



Fonte: Autoria Própria

Do ponto de vista de controle, os PCS comerciais operam em dois modos distintos:

- Modo seguidor de rede (grid-following): funciona como uma fonte de corrente, em que os pontos de operação controlados são potência ativa e reativa (P-Q), ajustando-se às condições de tensão e frequência do barramento ao qual está

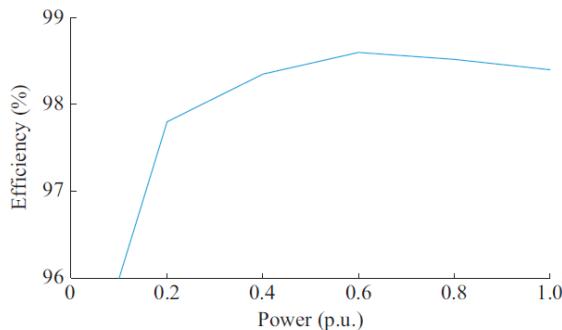
conectado. É o modo mais comum em aplicações comerciais e industriais, sobretudo para arbitragem de energia e suporte à rede.

- Modo formador de rede (grid-forming): funciona como uma fonte de tensão (V-F), capaz de estabelecer suas próprias referências de tensão e frequência, operando de forma isolada em situações de ausência da rede elétrica (modo off-grid).

Nos projetos analisados neste trabalho, os PCS operam no modo seguidor de rede, recebendo comandos externos e a partir do Sistema de Gestão de Energia (*Energy Management System – EMS*) para a regulação da potência ativa e reativa. O conceito de EMS é explicado em 2.1.2.

No que tange à eficiência desse equipamento, que possui perdas na conversão e na condução pelos dispositivos semicondutores, é possível encontrar curvas com um comportamento padrão para a maior parte dos fornecedores desse tipo de equipamento; essa eficiência representa o quanto de energia útil pode ser aproveitada na conversão, tanto no sentido inversor quanto no sentido retificador. A Figura 6 mostra o comportamento esperado, modelado para um inversor, de forma simplificada, tanto para inversão quanto retificação. Naturalmente, o ponto ótimo esperado na maior parte dos PCS vai ser encontrado entre 0,4p.u. e 0,8p.u., com valores de eficiência idealmente na faixa entre 98 e 99%. Apesar de apresentar apenas uma curva, o comportamento em modo retificador é similar.

Figura 6 - Curva Aproximada da eficiência do PCS



Fonte: (WU, GE, et al., 2022)

2.1.2 Sistema de Gestão de Energia – EMS

O EMS é um dos principais subsistemas de um BESS. Ele pode ser entendido como o elo entre a operação das baterias, as necessidades da rede elétrica e os demais recursos energéticos conectados, como por exemplo, a carga da UC (Unidade Consumidora) ao qual o BESS pode estar integrado. De forma prática, é o EMS que garante o controle, a otimização e a proteção do sistema, englobando desde o envio de comandos de potência até a supervisão em IHM (Interface Homem-Máquina), integração com plataformas de operação e registro de dados para análise.

Esse subsistema não se limita apenas a executar comandos básicos. Ele também é responsável por observar continuamente o estado de carga (SoC – *State of Charge*) das baterias e a demanda da rede, tomando decisões sobre quando carregar ou descarregar o sistema. Em cenários mais complexos, como na associação com geração fotovoltaica, o EMS pode coordenar o uso da energia solar para carregar as baterias em momentos de excedente de geração ou, em situações específicas, optar pela recarga diretamente da rede. Em outras palavras, ele permite aplicar premissas técnicas e econômicas na operação, alinhando a utilização das baterias à realidade de consumo, geração e contratos vigentes. (STANGER, 2025)

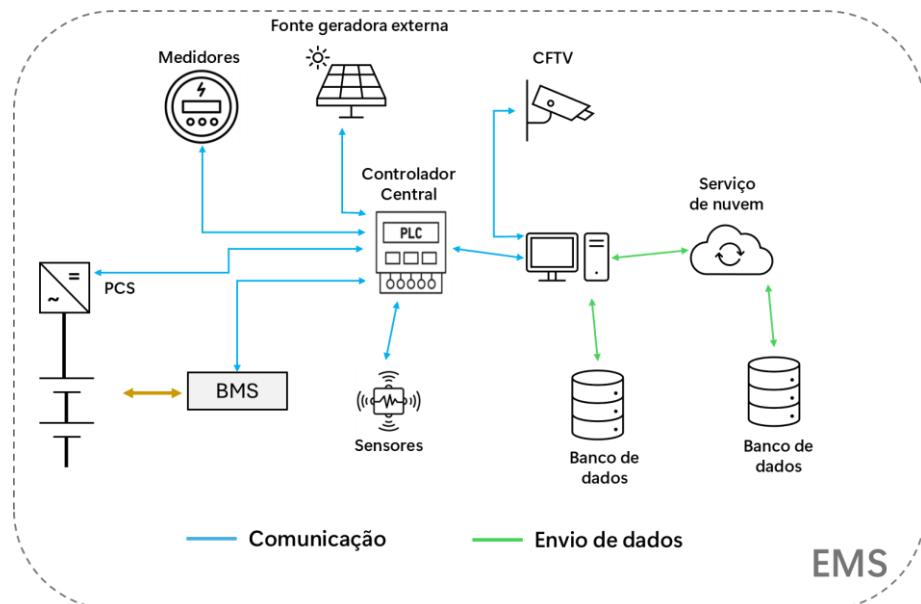
Na prática, o EMS é uma combinação de hardware e software. Do lado físico, estão equipamentos como CLP (Controlador Lógico Programável), também chamado pela sigla em inglês (PLC - *Programmable Logic Controller*), computadores, gateways e interfaces de comunicação. Do lado lógico, estão os algoritmos e rotinas que organizam o fluxo de dados, estruturam os comandos de operação e aplicam as estratégias de controle. Assim, o EMS centraliza o monitoramento em tempo real e a execução de funções como:

- Acompanhar a demanda da rede e controlar o fluxo de potência do BESS;
- Integrar-se a sistemas supervisórios de aquisição de dado (SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*), permitindo a coleta de informações críticas; (temperatura, tensão, corrente, potência etc.) e a emissão de alertas para os operadores;

- Aplicar estratégias de controle, como arbitragem de energia (carregar em horários de baixo custo e descarregar em horários de maior valor), além de serviços de resposta de frequência e suporte à rede;
- Manter a disponibilidade do sistema em momentos críticos, auxiliando na integração de fontes renováveis intermitentes;
- Registrar dados históricos e fornecer informações que subsidiam manutenção preditiva e tomada de decisão.

De modo geral, o EMS pode ser visto como o “cérebro” do BESS: ele organiza as informações, conecta os diferentes equipamentos e garante que o sistema atue de maneira segura, eficiente e sustentável. A fim de ilustrar esse subsistema de forma simplificada, segue a Figura 7. Nela estão representadas algumas interfaces que são feitas entre dispositivos.

Figura 7 - Estrutura simplificada do EMS



Em seguida, são detalhados alguns dos principais componentes presentes no EMS.

- ***Controlador Lógico Programável (CLP)***

O Controlador Lógico Programável, é o elemento central de automação do BESS, funcionando como o “cérebro operacional” do sistema. Sua principal função é processar informações provenientes dos diversos equipamentos conectados, consolidando entradas e saídas digitais, sinais analógicos e informações e dados advindos de equipamentos diversos por meio de protocolos de comunicação em um núcleo de decisão único. Através dele, são executadas as lógicas de automação necessárias para a operação segura e otimizada do sistema.

- ***Computador***

O computador, nesse contexto, atua como a base para rodar aplicações que não são nativamente executadas no CLP, ou que são melhor projetadas fora deste. Enquanto o CLP é otimizado para lógica determinística e resposta em tempo real, além de ser mais robusto para integração industrial, recebimentos de entradas e saídas digitais e integração de sistemas por protocolos de comunicação, o computador é dedicado a funções de processamento mais pesado, armazenamento em bancos de dados e execução de softwares de interface gráfica (IHM/SCADA).

É nele que são instalados sistemas supervisórios capazes de consolidar dados históricos, gerar relatórios e apresentar a operação de forma intuitiva para os operadores. Essa separação de funções (CLP para controle determinístico e computador para supervisão/análise) é comum em arquiteturas modernas, pois distribui as cargas de processamento conforme a vocação de cada equipamento.

Além disso, o computador permite a implementação de algoritmos de otimização ou previsão (por exemplo, despacho ótimo de carga/descarga baseado em modelos preditivos), que exigem maior poder computacional. Com isso, o computador torna-se o elo entre o controle em tempo real e a aplicação de estratégias de mais alto nível. Entretanto, em sistemas com um enfoque em integração, a sua presença pode tornar-se menos necessária, sobretudo se o BESS for integrado a um sistema externo, com, por exemplo, um EMS externo ao BESS. Essa perspectiva de projeto ocorre quando o BESS não é o principal elemento do sistema ou quando ele é integrado a posteriori.

- **Interfaces de Comunicação**

As interfaces de comunicação englobam desde cabos (Cat5, Cat6, cabos industriais Belden) até dispositivos como switches, gateways IoT (*Internet of things*) e dispositivos protetores contra surtos (DPS), para proteção desses meios. Esses elementos, ainda que muitas vezes invisíveis na análise de arquitetura, são fundamentais para garantir a integridade dos sinais e a confiabilidade da rede de dados.

No contexto do BESS, a comunicação precisa conciliar robustez industrial com interoperabilidade. Por isso, são comuns arquiteturas em barramento Ethernet com redundância, que permitem que a perda de um ponto não comprometa toda a rede. O gateway, por sua vez, possibilita a interface do sistema local com plataformas remotas, seja para monitoramento em nuvem, seja para integração em sistemas de despacho centralizado de energia.

Em termos práticos, uma rede de comunicação bem estruturada não apenas conecta equipamentos, mas viabiliza a implementação das estratégias de aplicação dentro do EMS, permitindo que comandos e dados fluam de forma rápida e confiável.

- **Aplicações de Dados**

As aplicações de dados constituem a camada em que as informações coletadas pelo CLP e processadas pelo computador são transformadas em valor agregado. Essa camada pode incluir softwares de supervisão, bancos de dados históricos, painéis de análise gráfica e algoritmos de otimização.

No âmbito do EMS, essas aplicações são responsáveis por:

- Armazenar registros históricos para análise de desempenho e manutenção preditiva;
- Gerar relatórios de operação e indicadores técnicos (eficiência, perdas, ciclos de carga/descarga, etc.);
- Implementar algoritmos de previsão de demanda ou de geração renovável, usados para melhorar a tomada de decisão;

- Disponibilizar dados em tempo real para operadores ou sistemas externos, por meio de dashboards ou integrações em nuvem.

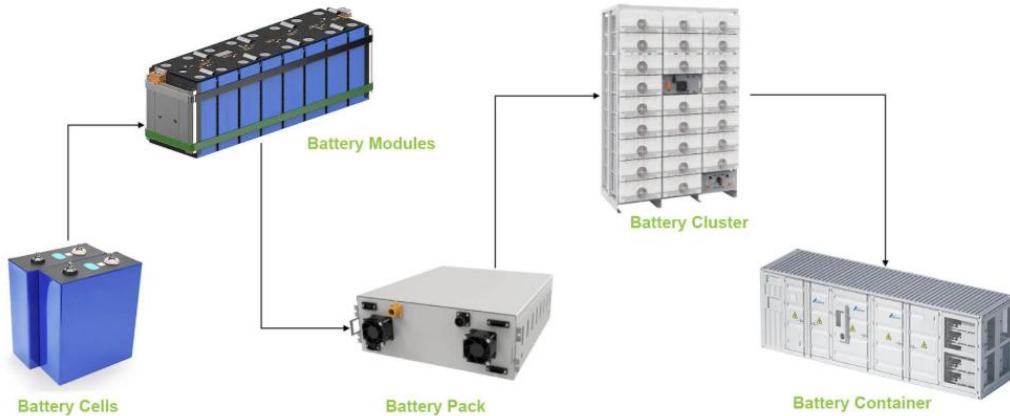
2.1.3 Baterias

O sistema de baterias é o subsistema responsável por armazenar e disponibilizar energia conforme a demanda operacional do BESS. Sua estrutura apresenta montagem modular e escalável, o que permite adequação a diferentes potências e capacidades de armazenamento. As conexões elétricas entre os módulos podem ser realizadas em série ou paralelo, de acordo com a tensão e energia requeridas pela aplicação (AKHIL et al., 2015).

A arquitetura segue uma hierarquia típica, iniciando nas células, unidades eletroquímicas fundamentais onde ocorre a conversão de energia. As células agrupadas formam módulos, que reúnem um conjunto de unidades conectadas normalmente em série para atingir a tensão e a capacidade necessárias; para aplicações de armazenamento de energia de maior porte, como para o BESS, necessariamente os módulos precisam de células em série para alcançar níveis de tensão mais altos. Esses módulos, por sua vez, integram packs, estruturas físicas padronizadas que facilitam o manuseio, a instalação e o gerenciamento térmico e de sensoriamento. Em seguida, os packs são organizados em racks, agrupamentos montados em gabinetes, e estes se unem em strings, conectadas em paralelo até compor *clusters*. A partir disto, conjuntos de *clusters* compõem o banco de baterias, sendo o nível mais alto da hierarquia do sistema.

A fim de exemplificar o exposto, a Figura 8 a seguir ilustra esses níveis de hierarquia.

Figura 8 - Estruturas do sistema de baterias



Fonte: (POWER-SONIC, 2025)

O desempenho e a operação segura do sistema dependem do monitoramento contínuo de parâmetros elétricos e térmicos das baterias (ENERGYBASES, 2025). Além disso, para caracterizar o banco de bateria, pode-se elencar os seguintes parâmetros:

- Energia(kWh): quantidade total de energia armazenada no banco como um todo. Esta pode ser apresentada de duas formas, que são a Energia nominal, representando tudo que está presente no banco, e a Energia útil, sendo a que pode ser utilizada do banco.
- Tensão (V): Pode ser dividida entre
 - Tensão de célula: Representa a tensão de operação de uma célula
 - Tensão Nominal: Do conjunto de células
- Capacidade (Ah): indicam a quantidade de carga disponível na bateria, normalmente a nível de célula.
- Estado de Carga (SoC): representa o nível atual de carga.
- Estado de Saúde (SoH – *State of Health*): avalia a condição geral da bateria em relação ao seu desempenho original.
- Taxa C (C-rate): Representa a taxa de recarga ou descarga da bateria projetada com relação à sua capacidade nominal. Em outras palavras, a nível de BESS, é a fração da potência de uso projetada do sistema pela energia total

do banco de baterias. Para exemplificar, o valor de 0,5C usualmente usado em BESS, representa que o sistema foi projetado para descarregar toda sua energia em duas horas; logo que a potência nominal do sistema representa metade da energia associada. Por outro lado, e de forma análoga, se um sistema foi projetado em C4, significa dizer que o sistema possui energia instalada 4 vezes maior que a potência nominal; sendo assim o banco de baterias carregado ou descarregado completamente em 4 horas.

- Profundidade de Descarga (DoD – *Depth of Discharge*): Indica, dentro de uma janela, quanto de SoC é “perdido” para efetuar uma descarga. Este varia de acordo com a aplicação, tendo um valor estabelecido pelo fabricante.
- Tempo de vida: Representado normalmente em anos, para um determinado DoD, trata-se da estimativa de funcionamento fornecida pelo fabricante antes do fim da sua vida útil.
- Fim da Vida útil (EoL – *End of Life*): Define o percentual da capacidade inicial em que, a partir de um limiar determinado, a bateria é considerada fora de operação eficiente.

Esses parâmetros permitem otimizar o desempenho, aumentar a vida útil e assegurar a operação segura do sistema de armazenamento, garantindo que a entrega de energia ocorra dentro dos limites técnicos previstos

2.1.4 BMS

O Sistema de Gerenciamento de Baterias (*Battery Management System* – BMS) é o núcleo de controle e proteção a nível de baterias para o BESS. Trata-se de um sistema eletrônico responsável por monitorar, gerenciar e proteger, em conjunto com o EMS, os conjuntos de células que compõem o banco de baterias, garantindo segurança operacional, prolongando a vida útil e assegurando o desempenho adequado do sistema.

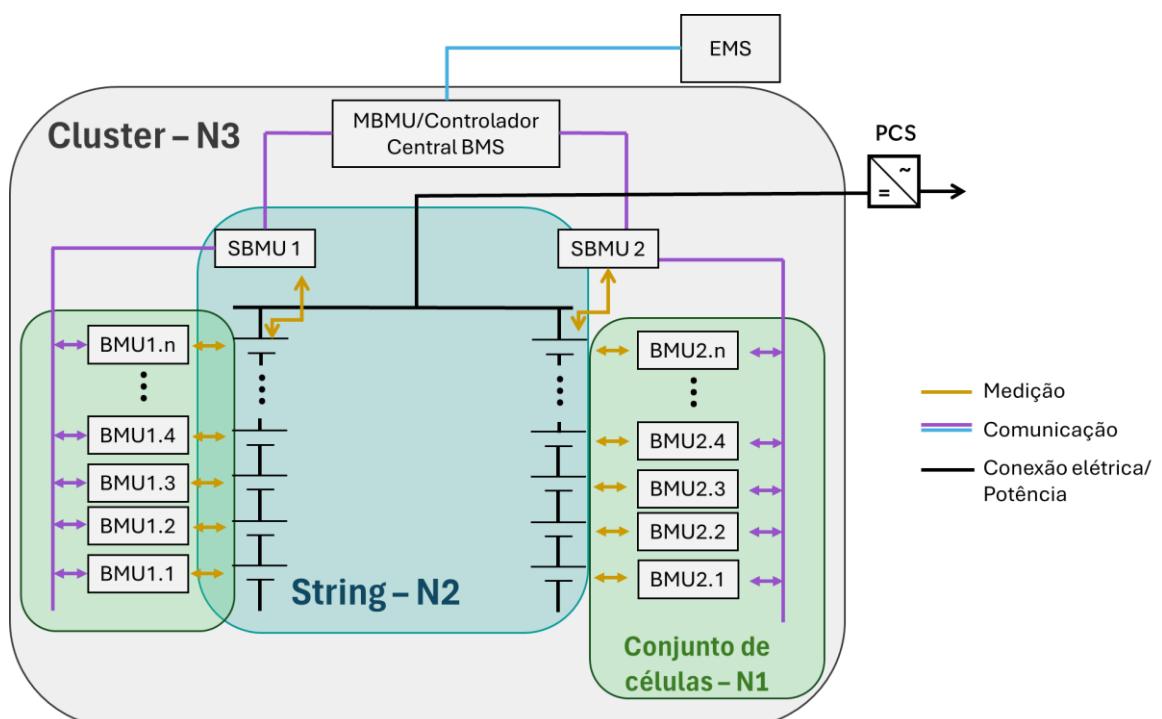
De forma geral, o BMS coleta, processa e armazena informações sobre o estado das células em tempo real, tomando decisões para evitar condições críticas, como sobrecarga, sobretensão/subtensão, sobreaquecimento, fuga de corrente em

decorrência de decaimento isolamento ou descargas profundas, que são representadas por baixas tensões a nível de célula e a nível de agrupamento de células. Nessas situações, pode atuar fazendo o seccionamento do conjunto de baterias, reduzindo a taxa de carga/descarga ou sinalizando ao EMS a necessidade de intervenção para manutenção preventiva, ou em casos mais graves, manutenção corretiva. Dessa maneira, constitui uma barreira de proteção contra falhas que poderiam resultar em degradação acelerada, perda de capacidade, incêndios ou até explosões.

2.1.4.1 Estrutura de níveis e funcionamento

A arquitetura de um BMS para aplicações em BESS é geralmente modular e hierarquizada, estruturada em três níveis principais de monitoramento e controle. Para melhor visualização, a Figura 9 a seguir representa de forma simplificada a estrutura de um BMS. É relevante notar que este subsistema é estruturado em Medição e Comunicação, para repassar os valores medidos. Aqui a parte de conexão física entre baterias é ilustrativa, não fazendo parte constituinte do BMS em si.

Figura 9 - Representação dos níveis do BMS



Fonte: Autoria própria

Nível 1 – Monitoramento em nível celular

No primeiro nível, encontram-se os *Battery Monitoring Units* (BMUs) ou *Cell Supervising Circuits* (CSC); a forma de nomear tal equipamento varia de acordo com cada fabricante. Estes equipamentos são responsáveis por fazer a medição de tensão e temperatura a nível de célula.

- Sensores dedicados permitem acompanhar a operação individual, detectando desvios que possam comprometer a integridade do conjunto;
- É também neste nível que ocorre a equalização das células (balancing), processo essencial para manter o equilíbrio de carga entre as células, reduzindo desequilíbrios internos que impactariam diretamente a vida útil e a capacidade disponível.

As informações coletadas são transmitidas em tempo real para o nível imediatamente superior.

Nível 2 – Monitoramento em nível de string

No segundo nível encontra-se o *String Battery Management Unit* (SBMU), que agrupa os dados vindos das BMUs/CSCs. Além de agregar a tensão e temperatura das células individuais advindas do nível inferior, o Nível 2 é responsável por:

- Medir a corrente total da string;
- Medir ou calcular a tensão total (pela soma das medidas ou por meio de transdutor dedicado);
- Monitorar a resistência de isolamento da string;
- Calcular indicadores globais de operação, como State of Charge (SoC) e State of Health (SoH);
- Executar a proteção da string, podendo atuar de forma independente em caso de falhas críticas.

Nível 3 – Monitoramento a nível de cluster

No terceiro nível encontra-se a Master Battery Management Unit (MBMU). Esse módulo centraliza o monitoramento de múltiplas strings de baterias, formando um cluster.

- O Nível 3 realiza a integração das informações fornecidas pelos diversos SBMUs, fornecendo uma visão global do banco de baterias.
- A partir dele, são tomadas decisões de coordenação entre strings, garantindo operação balanceada e segura do conjunto completo.

Atua também como ponto central de comunicação com o EMS, consolidando as informações do banco de baterias como um todo. Para uma parte dos fabricantes, entretanto, é possível fazer a comunicação diretamente a partir do N2, sendo o EMS responsável por executar a função do N3.

2.1.5 Serviços e Sistemas Auxiliares

Os serviços auxiliares de um BESS englobam todos os sistemas que, embora não estejam diretamente envolvidos na conversão ou no armazenamento de energia, são indispensáveis para a operação segura, eficiente e confiável do conjunto. Estes sistemas incluem proteção contra incêndio, climatização e gerenciamento térmico, pequenas cargas auxiliares de alimentação de componentes do EMS e sensores de monitoramento. Cada um desempenha papel fundamental na preservação da integridade do BESS e na mitigação de riscos associados ao uso de baterias como um todo.

2.1.5.1 SCI - Sistema de combate a incêndio

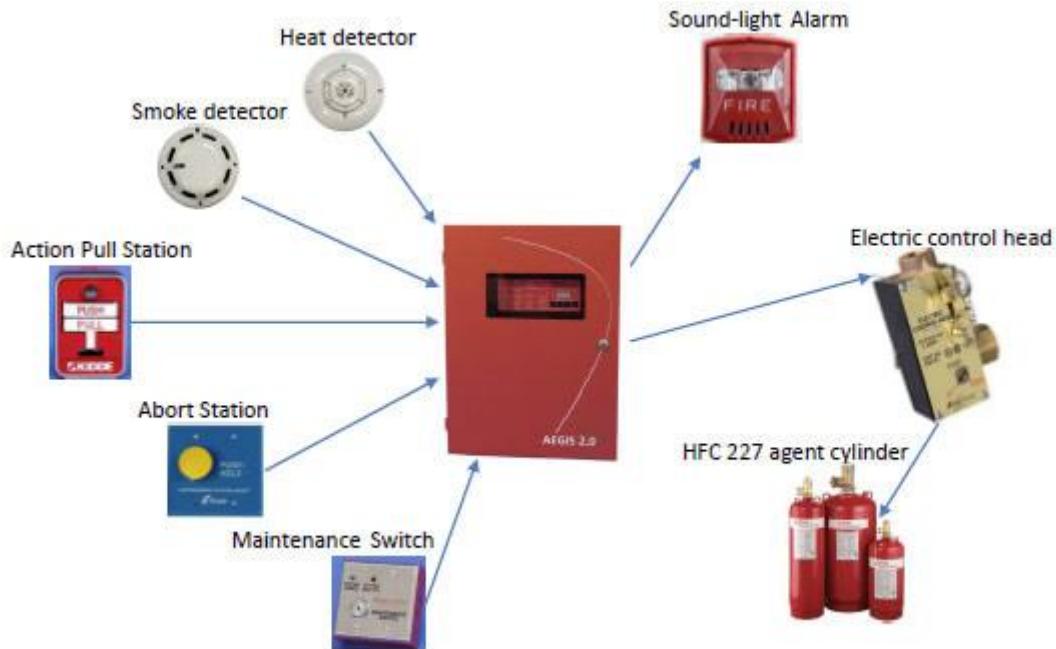
A segurança contra incêndio é um dos pontos mais críticos em sistemas BESS, em razão do risco de *thermal runaway*. Esse fenômeno ocorre quando uma célula sofre aumento descontrolado de temperatura, podendo desencadear propagação térmica para outras células e resultar em incêndio ou explosão. Para mitigar esse risco, o BESS conta com sistemas de detecção e supressão. A detecção pode incluir sensores de fumaça, temperatura e gases, capazes de identificar rapidamente

anomalias, estes representados na Figura 10. Quanto à supressão, diferentes tecnologias são aplicadas conforme o projeto:

- Agentes de aerossol condensado, eficazes para extinguir incêndios em células e impedir a propagação do *thermal runaway*, com vantagem de não exigir infraestrutura robusta.
- Névoa de água, utilizada em alguns casos como solução complementar, resfriando o ambiente e retardando a propagação do fogo.
- Agentes gasosos (CO_2 , gases inertes ou heptafluorpropano), comuns em salas de controle e eletrocentros, que atuam reduzindo a concentração de oxigênio para inibir a combustão, sem danificar os equipamentos.

O funcionamento eficiente desses sistemas é determinante para garantir a segurança do conjunto e a confiabilidade da instalação.

Figura 10 - Componentes do SCI



Fonte: (TLS OFFSHORE CONTAINERS & TLS ENERGY, 2021)

2.1.5.2 Sistema de resfriamento / TMS

O sistema de gerenciamento térmico (*Thermal Management System – TMS*), também chamado de sistema de resfriamento, sistema de ar-condicionado ou HVAC (*Heating, ventilation, and air conditioning*) em sistemas de refrigeração a ar, garante que as baterias e demais equipamentos operem em faixa adequada de temperatura. O controle térmico é fundamental não apenas para evitar falhas imediatas, mas também para preservar a vida útil das baterias, já que variações extremas de temperatura aceleram o processo de degradação.

As soluções mais utilizadas incluem:

- Ar-condicionado e ventilação forçada, comuns em aplicações comerciais e industriais, responsáveis por manter o ambiente em condições controladas. Esta solução é mais comum para sistemas com baterias de chumbo-carbono ventiladas.
- Sistemas de resfriamento líquido, empregados em projetos de maior potência ou ambientes extremos, permitindo dissipação de calor mais eficiente.

A integração do TMS ao EMS possibilita otimizar o consumo de energia destinado ao condicionamento térmico, equilibrando eficiência e segurança operacional.

2.1.5.3 Alimentação dos outros subsistemas

A alimentação auxiliar fornece energia elétrica para os sistemas de suporte do BESS, como iluminação, ventilação, sistemas de proteção, automação e comunicação.

A estrutura normalmente é dividida para alimentação de cargas tanto com alimentação em tensão alternada quanto em tensão contínua. A nível explicativo, os componentes do sistema de resfriamento são máquinas de resfriamento alimentadas em corrente alternada. Por outro lado, o CLP, os sensores e o BMS são componentes eletrônicos de tensão usual de alimentação 24Vcc, necessitando uma fonte retificadora para tal aplicação.

Em sistemas onde há prioridade manter o funcionamento do sensoriamento do sistema, é possível associar unidades de Armazenamento e estabilização às cargas mais essenciais do BESS; utiliza-se, para tal atividade, uma UPS. (*Uninterruptible Power Supply*).

2.1.5.4 Sensores

Sensores distribuídos no BESS monitoram variáveis críticas de operação, funcionando como a “linha de frente” da detecção de anomalias. São comumente empregados sensores de:

- Temperatura, para acompanhar as condições térmicas das baterias e do ambiente;
- Gás, para identificar emissões resultantes de falhas internas nas células;
- Fumaça e chama, como parte do sistema de detecção de incêndio;
- Tensão e corrente, para monitoramento elétrico e integração com BMS e EMS.

O monitoramento contínuo dessas variáveis não apenas viabiliza a operação segura, mas também permite estratégias de manutenção preditiva, reduzindo custos e prevenindo falhas.

2.1.5.5 Painéis

Para agrupar a maior parte dos equipamentos constituintes dos subsistemas, é uso comum os painéis, que, para cada projeto, são divididos de acordo com os equipamentos que o constituem, sendo separados por agrupar componentes de automação, de seccionamento de baixa corrente, seccionamento de alta corrente, agrupamento de PCS etc. É de comum prática existirem painéis dedicados a depender do regime da corrente em que os dispositivos de sensoriamento a eles associados monitoram:

- Painéis CC: concentram proteções e dispositivos de medição no barramento CC, em caso de conexão em barramento comum das strings de baterias;

- Painéis CA: atuam na interface entre o PCS e a rede elétrica, permitindo o paralelismo e a proteção dos circuitos em corrente alternada, além de agruparem dispositivos de seccionamento após o PCS.

Essa estrutura é de vital relevância para assegurar a disponibilidade do sistema como um todo, oferecendo redundância e confiabilidade à operação.

2.2 Aplicações do BESS

Os sistemas de armazenamento de energia em baterias apresentam uma ampla gama de aplicações no setor elétrico. De modo geral, essas aplicações podem ser classificadas em três categorias: atrás do medidor (*Behind the Meter* – BTM), associadas ao consumidor final, sobretudo Comercial e Industrial (C&I); após o medidor (*Front of the Meter* – FTM), voltadas para suporte à rede elétrica de maior porte; e off-grid, para sistemas isolados (EYER e COREY, 2010).

No caso dos sistemas *utility scale* (FTM), conectados diretamente à rede de transmissão ou distribuição, o BESS atua como recurso sistêmico de grande porte. Essas aplicações incluem regulação de frequência, controle de tensão, suporte à integração de renováveis intermitentes (como solar e eólica) e até o postergamento de investimentos em infraestrutura elétrica, evitando ou adiando a necessidade de expansão de linhas e subestações, atuando em situações de contingência. Além disso, em cenários críticos, o BESS pode ser empregado em processos de *black start*, fornecendo energia inicial para religar geradores convencionais e restaurar a rede após apagões.

Já em aplicações *off-grid*, os sistemas são empregados em locais isolados, sem acesso a redes de distribuição, desconectados parcial ou completamente do Sistema Interligado Nacional (SIN). Nesses contextos, o BESS garante independência energética, normalmente associado a fontes renováveis locais, como sistemas fotovoltaicos e turbinas eólicas, e outras fontes, sobretudo máquinas girantes como geradores a diesel e a gás. As funções típicas incluem a operação de microrredes, o aumento do autoconsumo e a substituição parcial de geradores a diesel como auxílio na reserva girante, reduzindo custos operacionais de combustível e emissões de carbono. Essa modalidade é particularmente relevante em comunidades remotas,

ilhas e empreendimentos industriais de difícil acesso, onde a confiabilidade e a redução de custos logísticos de combustível são determinantes (CUMMINS INC, 2025).

2.2.1 Perspectiva C&I

O uso do BESS em aplicações comerciais e industriais (C&I) tem crescido de forma consistente, impulsionado tanto por fatores regulatórios quanto pela redução dos custos da tecnologia de baterias (SILVA, 2022). No Brasil, consumidores do Grupo A (média e alta tensão) estão sujeitos a tarifas horrossazonais, com diferenciação entre horários de ponta e fora de ponta (ANEEL,2021). Nesse cenário, o armazenamento se mostra estratégico para compensar variações de preço e mitigar custos adicionais com demanda contratada e consumo de energia reativa.

De forma geral, as aplicações energéticas do BESS funcionam baseadas em algoritmos derivados do conceito de Deslocamento de Energia. Este conceito baseia-se na evidente capacidade de armazenar energia nas baterias, de forma regida e pré-definida pelo EMS, a fim de efetuar a descarga quando for mais conveniente ou quando for necessário. Nisto, no que difere, visto que este é um conceito mais geral, das outras aplicações, é que o Deslocamento de Energia engloba aplicações como Controle de Demanda e Armazenamento de Energia; do ponto de vista energético, a aplicação de Backup também pode ser alocada para dentro desse grupo de aplicações. Logo, suas principais funções nesse contexto incluem:

- Controle de demanda: reduzir picos de consumo de carga armazenando energia em períodos de baixo consumo e descarregando em momentos de maior demanda, evitando penalidades por ultrapassagem de demanda contratada. Apesar de ser considerada uma aplicação a nível de potência (por ser de menor duração, e depender muito mais da injeção pontual de potência), pode ser agrupada dentro das aplicações de Deslocamento.
- Arbitragem de energia: Alocar energia para ser armazenada nas baterias em momentos de maior conveniência, usualmente de menor custo de compra, e utilizar a mesma energia em momentos onde a compra é notoriamente mais cara.

- Qualidade e confiabilidade: fornecer suporte para momentos de variações de tensão e em algumas aplicações de maior porte, frequência, e com isso aumentando a estabilidade do fornecimento elétrico local. Estas aplicações cabem sobretudo para clientes em final de linha.
- Backup de energia: garantir a continuidade de cargas críticas em caso de falhas da rede, reduzindo riscos de paralisações produtivas.

Esses benefícios tornam o BESS um recurso cada vez mais relevante em setores industriais e comerciais intensivos em energia. Estudos recentes mostram que, em aplicações BTM, os ganhos econômicos e operacionais podem reduzir significativamente o tempo de retorno sobre o investimento, sobretudo em mercados com estrutura tarifária diferenciada (EYER e COREY, 2010).

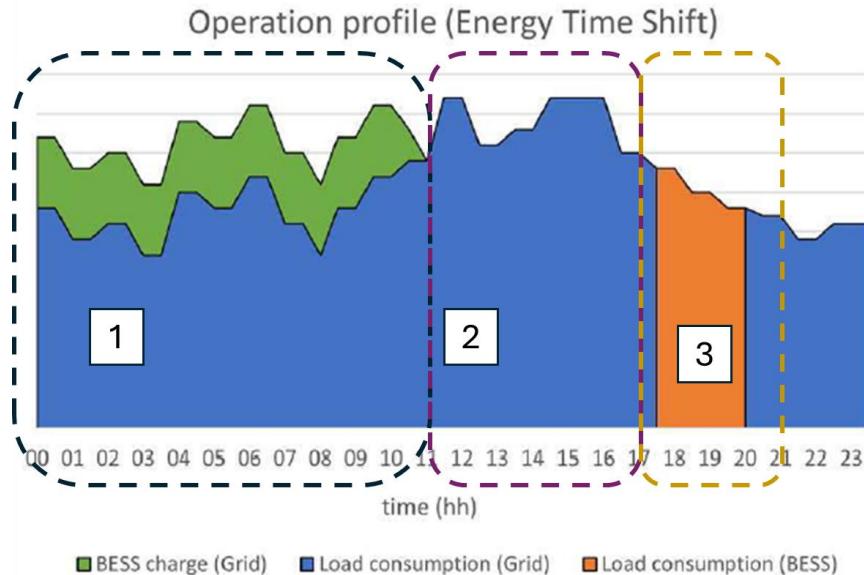
2.2.2 Foco em Arbitragem de Energia

A arbitragem de energia, também conhecida como *Energy time-shift*, é uma das aplicações mais relevantes e consolidadas do BESS. O conceito consiste em armazenar energia em períodos de menor custo e utilizá-la em períodos de maior valor, permitindo ao consumidor reduzir despesas com eletricidade (RAMOS et al, 2021).

A aplicação funciona como mostrado na Figura 11, e pode ser reduzida ou particionada em momentos de funcionamento. No primeiro intervalo, caracterizado pelo período em que, além da curva azul, há uma curva verde, e esta representa o período de recarga do BESS, em que ele armazena energia, consumindo diretamente da rede, conjuntamente com a carga da UC; A potência consumida da rede, ou vista pelo medidor, pode ser representada pela soma dos valores em verde (BESS) e azul (Carga). O segundo intervalo representa o momento posterior à recarga, em que o BESS está parado, ou seja, em stand-by por uma boa parte do dia; logo nesse momento, apenas há o funcionamento esperado da carga, e a medição em azul representa a medição de carga da UC. O terceiro intervalo representa o momento de descarga, onde há a sobreposição da curva laranja, e que para tal aplicação, é feita durante o horário de ponta. É evidente que, durante este intervalo, o objetivo da aplicação é de reduzir o fornecimento de energia por parte da rede; nisso percebe-se

a “ausência” da curva azul devida à sobreposição, representando que a energia fornecida à carga advém do BESS.

Figura 11 - Representação da Aplicação de Arbitragem de Energia



Fonte: Adaptado de (RAMOS, PINHEIRO, et al., 2021)

No setor elétrico brasileiro, esse mecanismo é especialmente atrativo para consumidores de média e alta tensão, sujeitos à tarifa horrossazonal estabelecida pela ANEEL. Nesses casos, o BESS é carregado no período fora de ponta, quando a tarifa é reduzida, e descarregado no horário de ponta, quando o custo da energia é mais elevado. Essa estratégia resulta não apenas em economia financeira, mas também em menor sobrecarga da rede nos momentos críticos, contribuindo indiretamente para a estabilidade do sistema elétrico.

Outro aspecto importante é a integração com geração fotovoltaica. Em unidades consumidoras com sistemas FV, o excedente de geração durante o dia pode ser armazenado no BESS e utilizado no horário de ponta. Essa prática aumenta o autoconsumo e reduz a dependência da rede, evitando a venda de excedente em horário de baixo valor e posterior recompra em horário de tarifa elevada.

Por fim, além dos ganhos econômicos diretos, a arbitragem também desempenha papel sistêmico. Ao reduzir a demanda nos horários de maior estresse

da rede, o BESS ajuda a mitigar riscos de sobrecarga, oscilações de frequência e necessidade de despacho de usinas termelétricas, frequentemente mais caras e poluentes. Para clientes que possuem cargas localizadas em locais mais distantes, como em fim de linha ou longe de centros urbanos, esse momento de descarga contribui também para melhoria no nível da tensão no ponto de conexão da UC (WELINK, 2025).

2.3 Tecnologias de baterias aplicadas ao BESS

Os sistemas de armazenamento de energia em baterias (BESS) podem empregar diferentes tecnologias eletroquímicas, cada uma com características próprias de desempenho, custo, vida útil e impacto ambiental. Entre as mais relevantes para aplicações estacionárias destacam-se as baterias de chumbo-carbono (*lead-acid* - PbC) e as de lítio-ferro-fosfato (LFP), ambas amplamente utilizadas em contextos distintos, de acordo com os requisitos técnicos e econômicos do projeto.

2.3.1 Chumbo Carbono (PbC)

As baterias de chumbo-ácido, historicamente consolidadas no mercado, operam a partir da reação eletroquímica entre placas de chumbo (ânodo) e dióxido de chumbo (cátodo), imersas em eletrólito de ácido sulfúrico. Durante a descarga, o chumbo metálico reage com íons sulfato, formando sulfato de chumbo e liberando elétrons, enquanto o dióxido de chumbo sofre redução no cátodo. O processo é reversível, possibilitando o armazenamento e a liberação de energia elétrica conforme a necessidade.

As principais vantagens dessa tecnologia incluem:

- Baixo custo inicial em comparação com outras baterias comerciais;
- Alta confiabilidade em diferentes condições de operação;
- Elevada reciclagem, com taxas de recuperação de materiais próximas a 99%;

- Capacidade de fornecer correntes elevadas, sendo adequadas para aplicações de partida e sistemas de emergência.

Por outro lado, apresentam desvantagens importantes:

- Vida útil reduzida em ciclos profundos, quando comparada às tecnologias mais modernas;
- Baixa densidade de energia, resultando em maior peso e volume para a mesma capacidade de armazenamento;
- Emissão de quantidades consideráveis de gases em operação normal, sobretudo gases explosivos (H_2).

No contexto de BESS, as baterias chumbo-carbono têm sido empregadas principalmente em sistemas off-grid e aplicações de backup energético, além de instalações em telecomunicações e hospitais, para aplicações de menor porte, onde a confiabilidade e o baixo custo são determinantes. Apesar de sua participação no mercado estar em declínio frente ao avanço das baterias de íon-lítio, ainda são uma solução relevante para aplicações de menor porte ou em regiões com restrições de custo.

No que tange à eficiência para a aplicação em sistemas de armazenamento de energia, uma eficiência *roundtrip* padrão e esperada que varia de 75% a 90% (CBI, 2021). A fonte em questão estipula tais valores para C-rate igual a C10 (descarga que possui 10h de duração) e 80% de DoD; para regimes com taxas de descarga e recarga mais rápidas que o previsto em questão, é natural que haja mais perdas internas e a eficiência tenda a cair.

2.3.2 Lítio (LFP)

As baterias de íon-lítio se consolidaram como a principal tecnologia em sistemas de armazenamento de energia estacionários, em especial a química lítio-ferro-fosfato ($LiFePO_4$, ou LFP). Seu funcionamento baseia-se na movimentação de íons de lítio entre o cátodo (composto de fosfato de ferro-lítio) e o ânodo (tipicamente grafite), durante os processos de carga e descarga.

As baterias LFP apresentam vantagens significativas:

- Maior densidade de energia em comparação às chumbo-ácido, permitindo armazenamento mais compacto;
- Maior vida útil em ciclos, com durabilidade típica entre 4.000 e 8.000 ciclos de carga e descarga;
- Segurança superior em relação a outras químicas de lítio, pois o fosfato de ferro apresenta maior estabilidade térmica e reduz risco de *thermal runaway*;

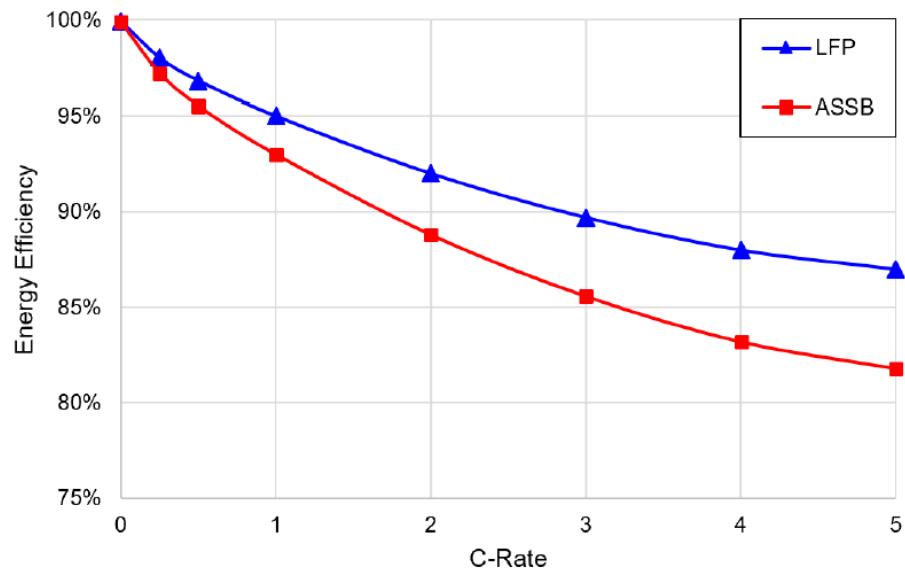
Entre as limitações destacam-se:

- Maior custo inicial, embora em queda nos últimos anos devido ao avanço da produção em escala;
- Impactos ambientais relacionados à extração de lítio e outros materiais, além da ausência de uma cadeia global de reciclagem tão consolidada quanto a das baterias de chumbo.

A versatilidade da tecnologia LFP permitiu sua ampla adoção tanto em dispositivos móveis e veículos elétricos quanto em BESS de larga escala. Nas aplicações estacionárias, destaca-se em projetos *utility scale*, microrredes e aplicações comerciais/industriais, graças à combinação de eficiência energética, confiabilidade e custo nivelado decrescente.

Em se tratando da eficiência das baterias, quanto maior a taxa de carga ou descarga nas baterias, menor tende a ser seu valor de eficiência em operação normal. Naturalmente, segundo o que pode ser visto na curva azul, referente às baterias LFP na Figura 12, é esperado valores entre 100 a 95% para sistemas projetados com C-rate igual a 0,33, que normalmente é usado para arbitragem de energia.

Figura 12 - Curva aproximada de eficiência de baterias LFP com relação à taxa de carga/descarga



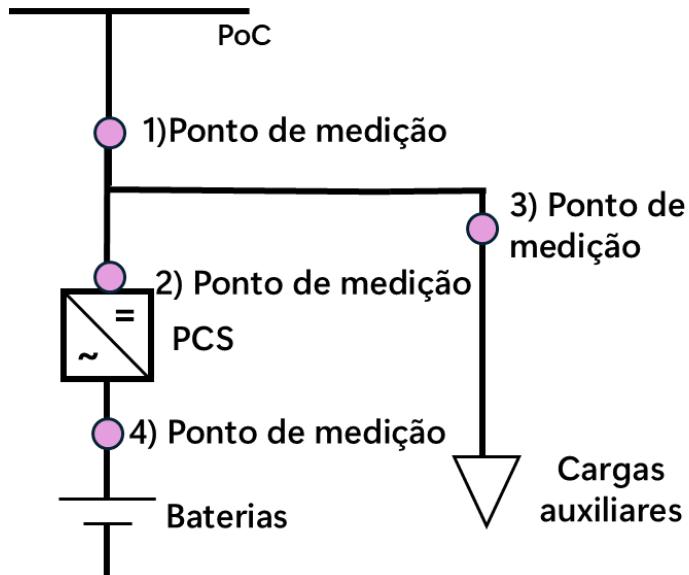
Fonte: (HUGHES e VAGG, 2022)

3 MODELO CONCEITUAL: ARQUITETURAS PARA SISTEMAS BTM

A forma como o BESS é estruturado, ou seja, como é projetada sua arquitetura elétrica, pode influenciar em como a eficiência pode acabar sendo calculada para o sistema. Nesse sentido, a depender dos parâmetros dos equipamentos, como tensão de saída do PCS e tensão do barramento de conexão do BESS à UC, o BESS pode conter mais ou menos elementos inclusos dentro do projeto, visto o caso de transformadores para conexão do BESS em baixa tensão, transformadores para alimentação de cargas auxiliares etc.

De forma geral, considera-se 4 pontos de medição mais criteriosos e esperados para projetos em BESS: 1) Ponto de medição associado ao ponto de conexão do BESS; 2) Medições feitas e registradas pelo PCS; 3) Medições relativa ao consumo das cargas auxiliares do BESS; o ponto 4) representa a medição do lado CC, a nível das baterias. A Figura 13 é um unifilar simplificado que representa estes pontos de medição. O primeiro representa tudo que entra e tudo que sai do BESS, englobando também quaisquer perdas de condução de cabos de conexão. O segundo tem um foco maior apenas na conversão da energia que realmente é utilizada no armazenamento e no seu eventual despacho. O terceiro contabiliza apenas o que é armazenado pelas baterias. O quarto, não menos importante, contabiliza o consumo energético que é relevante para o funcionamento do BESS, que apesar de não influir na energia armazenada, impacta na sua eficiência a longo prazo. A Tabela 1 resume esta representação; no presente trabalho, as grandezas mais relevantes de análise são a energia ativa, e, por consequência, a potência ativa que é registrada nos pontos de medição.

Figura 13 - Estrutura genérica do BESS



Fonte: Autoria Própria

Tabela 1 - Resumo dos pontos de medição representados na Figura 13

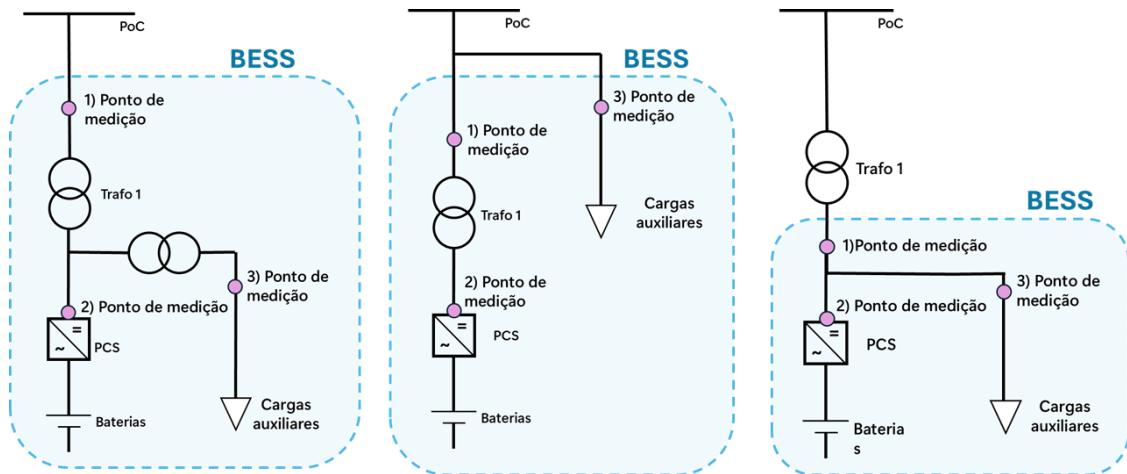
Medição	Significado
$P_1)$	Potência ativa do BESS
$P_2)$	Potência ativa do PCS
$P_3)$	Potência ativa das cargas auxiliares
$P_4)$	Potência do lado CC, representando as baterias

Fonte: Autoria Própria

Para exemplificar algumas dentre as diversas arquiteturas que um BESS pode ter, a nível de projeto, a Figura 14 representa três arquiteturas possíveis, cada qual explicitando os pontos de medição de relevância no BESS. Cada projeto de BESS tem sua peculiaridade e sua particularidade, comportando mais ou menos equipamentos e, com isso, influenciando em como é estruturada a medição do sistema. A título de exemplo, a terceira imagem da figura a seguir possui um BESS conectado, porém o transformador não é englobado dentro de sua estrutura de medição.

É importante ressaltar que essas diferentes arquiteturas do BESS são ilustrativas para o presente trabalho, de forma a evidenciar que, apesar de diferentes, seguem de forma geral um mesmo padrão: O BESS, de forma simplificada, é constituído da parte de armazenamento e conversão (PCS e Baterias), a parte auxiliar (Cargas auxiliares) e normalmente associado com um transformador para acoplamento no ponto de conexão.

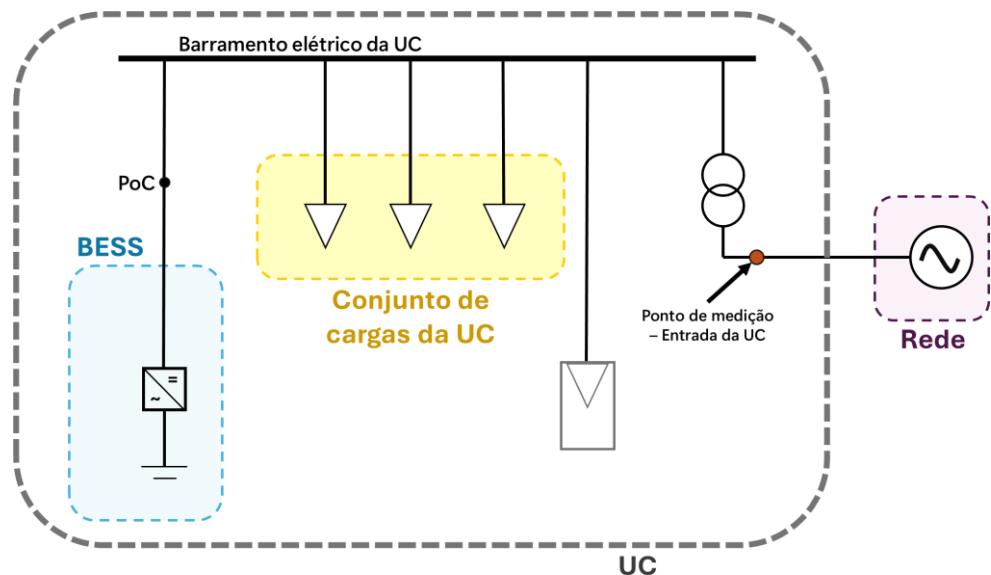
Figura 14 - Arquiteturas de BESS



Fonte: Autoria Própria

No que tange as aplicações BTM, apresentar como é uma arquitetura padrão onde o BESS se localiza é necessário para uma melhor contextualização do sistema. Como exemplo simplificado, a Figura 15 ilustra essa estrutura. A UC é composta sobretudo das cargas do sistema onde o BESS está instalado; é costumeiro referir-se de forma genérica como “cliente”, “sítio do cliente” ou “cargas do cliente”, podendo ser todo tipo de carga elétrica: Industrial, Hospitalar, Laboratorial, Prédios administrativos ou Casas de Máquinas. Além das cargas, se aplicável, há uma pequena planta fotovoltaica projetada para redução de custos durante o dia; e se o projeto previr sistema como GD, a planta pode fazer injeção na rede (ANEEL, 2007). Além disso, é natural que uma parte majoritária das cargas internas da unidade sejam alimentadas em baixa tensão, porém para clientes que possuem diferença no posto tarifário de consumo energético, são normalmente conectados à rede da distribuidora em média tensão, com transformador presente dentro da UC.

Figura 15 - Exemplo de Unidade Consumidora onde o BESS está conectado



Fonte: Autoria Própria

4 DESCRIPTIVO DOS SISTEMAS ANALISADOS

Para o presente trabalho, de forma a simplificar a escrita e a referência aos sistemas estudados, adota-se a seguinte convenção: denomina-se como *Sistema 1* aquele constituído por baterias de chumbo-carbono, e como *Sistema 2* aquele constituído por baterias de lítio-ferro-fosfato. Ambos foram concebidos para a mesma finalidade já descrita na seção 2.2.2, isto é, a aplicação de deslocamento de energia com foco no horário de ponta, ainda que possuam diferenças de porte e de arquitetura em função do contexto de instalação e das filosofias de projeto adotadas em momentos distintos.

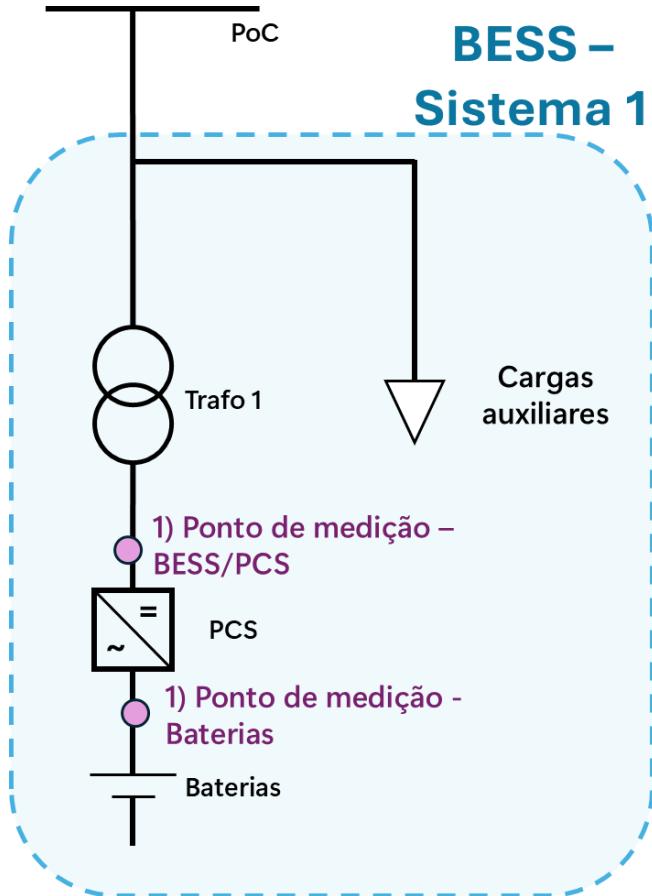
4.1 *Sistema 1* – Baterias de Chumbo-Carbono

O *Sistema 1* apresenta capacidade nominal de 560 kWh associado a um PCS de 250 kW. Sua configuração baseia-se em duas strings de baterias interligadas por um barramento em corrente contínua, que converge para um PCS central responsável pela conversão da energia e pelo controle da operação. Trata-se de uma solução compacta, representativa de sistemas de média escala voltados para aplicações comerciais e industriais, com operação ajustada ao perfil de arbitragem energética e outros aspectos de deslocamento de energia.

Este sistema foi concebido para ser utilizado em múltiplas funções diferentes, sobretudo a de arbitragem de energia. Entretanto, como é um BESS que foi usado para estudo e pesquisa, durante o período analisado, a energia descarregada, e por consequência, a recarregada relativa a esse uso, não foram integralmente usadas para descarga em horário de ponta, também sendo usada em outros fins. Na parte de resultados, no capítulo 6, é explicado como esse detalhe impacta na análise entre os dois sistemas.

A arquitetura de medição do sistema, como apresentado em 3, pode ser resumida como mostrada na Figura 16. Logo, há medição na conexão CC do PCS e na saída CA dele. O PCS usado nesse sistema possui um transformador interno, o que acarreta naturalmente perdas de conversão um pouco mais acentuadas.

Figura 16 - Arquitetura do Sistema 1



Fonte: Autoria Própria

4.2 Sistema 2 – Baterias de Lítio

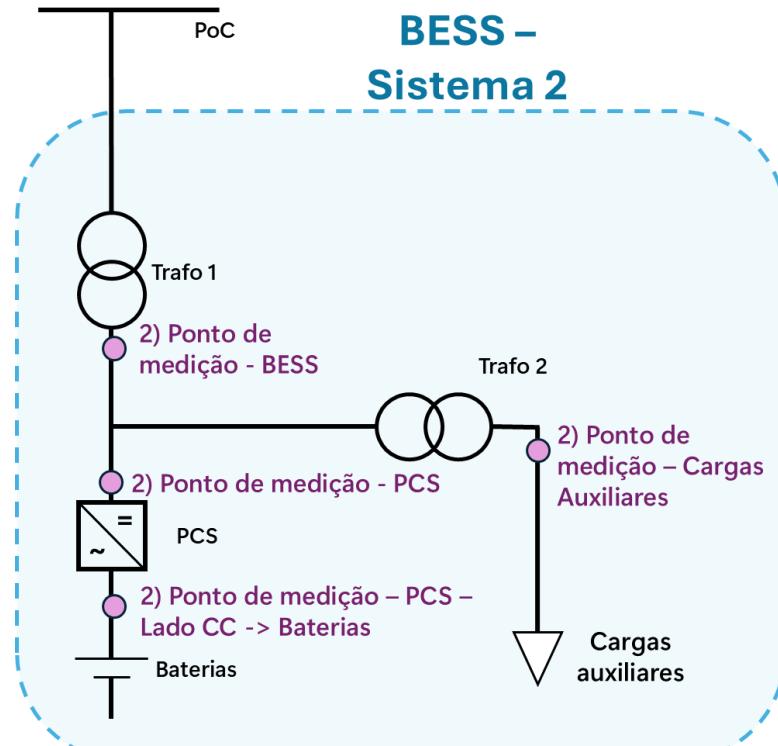
O Sistema 2 possui capacidade nominal de 1.979 kWh, com PCS total de 750 kW. Sua arquitetura é do tipo PCS-String, em que cada strings de baterias é conectada individualmente a um PCS dedicado, sendo a interligação para entrega total da energia realizada no barramento em corrente alternada. Essa configuração garante maior modularidade e flexibilidade de operação, permitindo que cada módulo atue de forma independente e assegurando maior robustez para a aplicação proposta.

Diferentemente do Sistema 1, este BESS foi projetado e vendido como um sistema comercial em que o foco majoritário era a descarga em horário de ponta.

A arquitetura de medição do sistema pode ser resumida como mostrada na Figura 17. Logo, há medição na conexão CC do PCS e na saída CA do mesmo. Os PCS usados nesse sistema não usam transformador integrado sendo necessário o

uso de um externo para transformações de tensão. Uma diferença crucial e extremamente importante para o cálculo da eficiência do sistema é a presença do Ponto de Medição – Cargas auxiliares, ou seja, nesse sistema é disponível um medidor dedicado para aferir o funcionamento das cargas auxiliares.

Figura 17 - Arquitetura do Sistema 2



Fonte: Autoria Própria

5 DESENVOLVIMENTO

No presente capítulo serão detalhadas algumas informações pertinentes para obtenção dos resultados. Para além isso, é descrita de forma breve a perspectiva da análise de dados e como ela se insere nos dois sistemas comparados, além dos cálculos realizados.

5.1 Coleta e tratamento de dados

Parte relevante do presente trabalho, a forma como a medição foi feita é de extrema importância principalmente no que tange à fidelidade da medição para com a realidade. Nisto, a medição deve ser precisa, e, em termos energéticos, possuir um intervalo suficientemente baixo para garantir uma integração que represente bem a realidade.

Ambos os sistemas trabalhados em questão possuíam a mesma finalidade técnica, isto é, desempenham a mesma aplicação para com uma unidade consumidora, porém com foco financeiro diferente. Nisto, o sistema 1 possui um viés majoritário do estudo das aplicações energéticas de BESS. Ao passo que o sistema 2, este voltado para comercialização e venda do projeto/produto a um cliente externo com único intuito de comercialização, não possui o enfoque de estudo mais profundo em termos de medições. Não obstante, a forma como é estruturada a medição satisfaz os critérios de análise de ambos os sistemas.

5.1.1 Formato e Armazenamento dos dados

Os dois sistemas analisados apresentam características distintas quanto à forma de aquisição e registro de dados, reflexo direto de suas concepções e propósitos de instalação.

No que tange o *Sistema 1*, durante a fase inicial de operação, o monitoramento foi realizado por meio de um qualímetro, responsável pela aquisição dos principais parâmetros de tensão, corrente e potência ativa e reativa. Esses dados foram coletados em intervalos curtos de tempo, de modo a permitir uma análise detalhada

da resposta dinâmica do sistema sob diferentes condições de operação. Após o período de medição, o equipamento foi removido, permanecendo apenas o registro pontual de dados relevantes para acompanhamento operacional.

No que se refere ao *Sistema 2*, por se tratar de um sistema voltado à aplicação final comercial e não à pesquisa, o armazenamento de dados é realizado por meio do banco de dados integrado ao sistema supervisório, responsável pela coleta periódica de informações de operação. Nesse caso, o intervalo de amostragem é mais espaçado, atendendo à rotina de monitoramento do sistema, mas limitando a resolução temporal das análises. Apesar dessa restrição, a base de dados proveniente do supervisório permite a avaliação consolidada do desempenho energético e a verificação de padrões operacionais ao longo do tempo. Os dados são coletados via comunicação, e a depender de como o sistema está estruturado, a atualização dos dados em um banco de dados pode variar de segundos até minutos para salvamento.

Em síntese, as diferenças dos dois sistemas são mostradas na Tabela 2. O conjunto de dados obtidos reflete dois enfoques distintos: enquanto o primeiro sistema oferece maior profundidade de observação experimental, o segundo apresenta uma visão consolidada e representativa do comportamento de um sistema BESS em operação comercial.

Tabela 2 - Diferenças no salvamento dos dados

	Sistema 1	Sistema 2
Método de requisição de dado	Obtenção via qualímetro	Comunicação com dispositivos e salvamento em banco de dados
Intervalo de salvamento de dados	Janela de 15 minutos	Entre 5s ou até no máximo 3 minutos

Fonte: Autoria Própria

5.2 Cálculos usados

5.2.1 Definições e considerações

No contexto apresentado no capítulo 4, a eficiência do *Sistema 2* é um parâmetro crítico, e devido a isso ela foi acompanhada e ajustada ao longo dos meses de operação, visto que o possível mal funcionamento do BESS impacta diretamente a viabilidade econômica do empreendimento. Para isso, adotou-se um método de cálculo energético diferente, que engloba outros aspectos não antes considerados, sobretudo, por tendências de mercado e em acordo com o cliente, como o consumo auxiliar, que pode ser elevado (OLIS, 2023). A principal diferença entre as duas abordagens está na consideração do consumo dos sistemas e cargas auxiliares. Embora esses não acumulem energia para uso posterior em operação de descarga, eles são essenciais para o funcionamento global do BESS, como detalhado na seção 2.1.5.

Os sistemas de controle, supervisão e sensoriamento, por exemplo, apresentam consumo reduzido de forma individual, mas, somados, podem influenciar significativamente o balanço energético total em uma escala temporal de meses a anos, sobretudo em avaliações de eficiência. Já o sistema de resfriamento, que opera continuamente para manter as condições térmicas adequadas das baterias, representa uma parcela mais relevante do consumo interno do BESS. Esses subsistemas consomem energia tanto durante a operação (Ope), em períodos de carga e descarga das baterias, quanto em estado de espera (Stdby), quando o PCS está inativo, mas o monitoramento e o controle térmico permanecem ativos. Toda essa estrutura de contabilização tem um propósito prático: evitar distorções na análise de consumo e, consequentemente, ônus indevido ao cliente. A desconsideração das parcelas de energia consumidas internamente pelo BESS pode resultar em um acréscimo de consumo na unidade consumidora, perceptível pelos medidores, mas que não representa aumento real da carga útil. Para projetos de maior precisão, esse mapeamento energético se torna indispensável.

Nas definições adotadas neste trabalho, utiliza-se o referencial de carga: valores positivos de potência ($P > 0$) indicam absorção de energia, enquanto valores negativos ($P < 0$) representam fornecimento. O mesmo raciocínio aplica-se à energia

acumulada: o consumo de energia ativa será representado por valores positivos, e o despacho, por valores negativos.

A operação do BESS de forma geral e para o presente trabalho pode ser dividida entre três momentos, expostos na Tabela 3. De maneira prática, na Recarga, o BESS consome para recarregar as baterias, logo há potência consumida pelo PCS para armazenar energia e consumo das cargas auxiliares. Em stand-by, o PCS está parado, sem realizar conversão, mas as cargas auxiliares continuam em funcionamento e consumindo energia, por esta razão a potência do BESS como um todo não é igual a zero. No período da Descarga, a potência do BESS é negativa, despachando a energia que foi armazenada no período de recarga.

Tabela 3 - Parâmetros e modos de operação do BESS

Modo de operação	Potência BESS
Em operação - Recarga	P>0
Stand-by	P>0
Em operação - Descarga	P<0

Fonte: Autoria Própria

5.2.1.1 Análise do circuito pela Potência e pela Energia

Com base na Figura 13 e nas informações da Tabela 3, é possível estruturar as equações que regem o funcionamento do BESS, do ponto de vista instantâneo, em termos de potência. De forma geral, a potência ativa do BESS é representada pelo que é medido no ponto de medição 1), e é dada por:

$$P_{1)} = P_{2)} + P_{3)} + P_{perdas} \quad (5.1)$$

Apesar das perdas serem importantes, a nível de simplificação da explicação, elas serão desconsideradas dessa primeira análise.

Essa equação é verdadeira para os três modos de operação.

- Recarga

$$P_{1)} = P_{2)} + P_{3)}; \quad (5.2)$$

Sendo $P_{2)}$ e $P_{3)}$ ambos maiores que zero, o que resulta em $P_{1)}$ maior que zero.

- Stand-by

$$P_{1)} = P_{3)}; \quad (5.3)$$

Sendo $P_{2)}$ igual a zero, pois o sistema não está fazendo conversão e $P_{3)}$ maior que zero, o que resulta em $P_{1)}$ maior que zero.

- Descarga

$$P_{1)} = P_{2)} + P_{3)}; \quad (5.4)$$

$$|P_{2)}| > |P_{3)}| \quad (5.5)$$

Sendo $P_{2)}$ menor que zero e $P_{3)}$ maior que zero o que resulta em $P_{1)}$ menor que zero. É relevante pontuar que a potência de descarga do PCS é maior, de forma geral, que a potência consumida pelas cargas auxiliares.

Logo, é possível dividir a operação do sistema em dois momentos distintos: Em que há consumo, ou seja, que a potência no ponto de medição 1) é maior que zero e em que ela é menor que zero. Aqui, generaliza-se os momentos menores que zero como Consumo e os momentos maior que zero como Despacho ou Descarga.

A seguir, usando como base essa divisão entre Consumo e Despacho, é apresentada a formulação empregada para o cálculo energético dos sistemas analisados, de forma simplificada.

$$E_{BESS_{Consumo}}(0) = E_{sis_{aux(Stdby)}}(1) + E_{sis_{aux(Ope-Rec)}}(2) + E_{Poc_{Recarga}} \quad (5.6)$$

$$E_{Poc_{Recarga}} = E_{perdas}(3) + E_{PCS_{Recarga}} \quad (5.7)$$

$$E_{PCS_{Recarga}}(4) = E_{Baterias_{Recarga}}(5) / \eta_{PCS}(6) \quad (5.8)$$

Em que tudo que é relacionado ao BESS, do ponto de vista energético, entra dentro da equação. Todas as variáveis representam energia ativa, logo são dadas em kWh, exceto o valor de eficiência representado aqui por (6), que é adimensional. A descrição de cada ponto da equação é feita a seguir:

- $E_{BESS_{Consumo}}(0)$ – Toda energia **consumida** pelo BESS;

- $E_{sis_{aux(Standby)}}(1)$ – A energia consumida pelos sistemas auxiliares enquanto o sistema está parado, sem realizar conversão de energia.
- $E_{sis_{aux(Operação-Recarga)}}(2)$ – A energia consumida pelos sistemas auxiliares enquanto o sistema está realizando conversão de energia durante o período de recarga.
- $E_{perdas}(3)$ – A energia resultante das perdas ôhmicas pelo cabeamento desde o sistema de conversão até o ponto de conexão.
- $E_{PCS_{Recarga}}(4)$ – A energia, vista da entrada do inversor, do lado CA, usada para carregar as baterias.
- $E_{Baterias_{Recarga}}(5)$ – A energia que chega até as baterias e que pode ser utilizada no armazenamento.
- $\eta_{PCS}(6)$ – A eficiência do PCS, número que representa tanto a eficiência de conversão quanto de condução interna do dispositivo.

Para fins práticos e de simplificação, também é possível que ao longo do presente trabalho a soma entre (1) e (2) seja representada da forma como segue abaixo. Também é possível chamar essa variável de Energia consumida pelas cargas auxiliares no fora ponta ou fora do período de descarga:

$$E_{sis_{aux(FP)}} = E_{sis_{aux(Standby)}}(1) + E_{sis_{aux(Operação-Recarga)}}(2) \quad (5.9)$$

Do caminho contrário, temos também a energia descarregada, ou também dita despachada, é definida como segue:

$$E_{BESS_{Despachada}}(7) = +E_{sis_{aux(Operação-descarga)}}(8) + E_{PoC_{Despachada}} \quad (5.10)$$

$$E_{PoC_{Despachada}} = E_{perdas} + E_{PCS_{Despachada}} \quad (5.11)$$

$$E_{PCS_{Despachada}}(9) = E_{Bateria_{Recarga}} * \eta_{Bateria}(10) * \eta_{PCS} \quad (5.12)$$

E de forma análoga, definimos:

- $E_{BESS_{Despachada}}(7)$ – Toda a energia útil **entregue**, no ponto de conexão do BESS.

- $E_{sis_{aux}(Ope-desc)}$ (8) – A energia consumida pelos sistemas auxiliares enquanto o sistema está realizando conversão de energia durante o período de descarga.
- $E_{PCS_{Despachada}}$ (9) – A energia, vista da entrada do sistema de conversão, do lado CA, usada a partir das baterias para alimentar as cargas da UC.
- $\eta_{Bateria}$ (10) – A eficiência das baterias. Aqui faz-se necessário uma ênfase: As baterias possuem perdas internas que fazem em sorte que nem toda energia carregada seja usada para a descarga.

Importante ressaltar que os dados 7 e 9 naturalmente vão possuir valores negativos, pelo referencial admitido para o presente trabalho.

5.2.2 Cálculo da Energia

Ponto relevante da análise, o cálculo da energia pode apresentar desafios quando se consideram diferentes métodos adotados em distintos sistemas. Dentre as metodologias, destacam-se aqui o aqui chamado método de janela de integração temporal, em que a potência medida é agrupada em intervalos fixos de tempo (por exemplo, 1, 15 ou 30 minutos). Nesse caso, calcula-se a média das potências registradas dentro da janela e multiplica-se pelo respectivo intervalo de duração, obtendo-se assim a energia correspondente do período. Trata-se de um método normatizado e amplamente utilizado em sistemas de monitoramento e avaliação de desempenho energético, conforme descrito em guias internacionais (GOULART, NETO e RÜTHER, 2024).

Além dele, pode-se adotar, também aqui nomeado, o método da integração discreta de potência, no qual se considera a integral numérica do sinal de potência ao longo do tempo, a partir de medições em intervalos curtos (por exemplo, a cada 5 segundos). Conceitualmente, cada valor discreto de potência é multiplicado pelo intervalo de tempo decorrido desde a medição anterior, e a soma desses produtos fornece a energia total. Esse procedimento é matematicamente equivalente à aplicação de métodos clássicos de integração numérica, como a soma de Riemann e

a regra do trapézio, amplamente empregadas para estimar integrais definidas em sistemas de medição e processamento digital de sinais.

Ambos os métodos são considerados válidos por normas e guias de boas práticas, sendo a escolha dependente do objetivo da análise e da resolução temporal requerida (HANSEN, STEIN e RILEY, 2012). No presente trabalho, o primeiro método (nomeado de método da Janela) foi empregado no *Sistema 1*, enquanto o segundo (nomeado de método de integração discreta) foi aplicado no *Sistema 2*. É importante ressaltar que o perfil de operação dos dois sistemas é bastante semelhante e caracteriza-se por apresentar variações percentuais muito baixas em relação ao valor médio em um determinado intervalo. Assim, ainda que os procedimentos de cálculo sejam distintos, o resultado energético final torna-se comparável, pois a baixa variabilidade intra-intervalo garante que as médias em janelas longas e as integrais em intervalos curtos convirjam para valores equivalentes, principalmente se amostragem dos dados forem parecidas.

5.2.2.1 Método da Janela Temporal

Neste método, usado comumente medidores e analisadores de energia, faz-se uma média aritmética do valor da variável observada em um intervalo pré-definido ΔT . A variável observada, então para o cálculo da energia ativa, é a potência ativa. Em outros termos, usa-se o cálculo da demanda no intervalo pré-definido para contabilizar a energia do período. Assume-se que a quantidade N de medições contabilizadas da variável no intervalo é suficientemente grande, e que tal representa o valor da variável observada no intervalo; considera-se que o erro é proporcional ao inverso da quantidade de dados (EURACHEM / CITAC, 2019), logo quanto maior a amostragem, menor o erro associado. A energia, dependente da contabilização da potência, associada à janela é dada como segue:

$$E_{janela} = \bar{P} * \Delta T \quad (5.13)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \quad (5.14)$$

$$E_{janela} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \right) * \Delta T \quad (5.15)$$

Sendo ΔT , na vasta maioria dos sistemas de medição, um intervalo de 15 minutos.

Este método de cálculo de energia em janelas de tempo equivale a fazer uma aproximação de integral contínua da variável analisada, que neste caso é a potência, no tempo por meio de uma regra do trapézio composta. Ou seja, se a potência é registrada ou contabilizada em intervalos pré-definidos e regulares, temos:

$$E_{trapézio} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(P_i + P_{i+1})}{2} * \Delta t \quad (5.16)$$

Para a vasta maioria das aplicações em sistemas de potência, sobretudo em aplicações energéticas (medição de energia em clientes para faturamento energético, análise de desempenho energético e geração de usinas fotovoltaicas, e em outros casos, uso de BESS em aplicações C&I) a aproximação apresentada é satisfatória devido à variação de forma suficientemente suave da potência entre medições sucessivas.

5.2.2.2 Método de Integração Discreta

Neste método, é feito o cálculo de um valor discreto da energia a cada iteração de medição. Ou seja, a cada valor de potência, temos um valor de energia associado ao intervalo de medição discreto.

$$E_i = P_i * \Delta t_i \quad (5.17)$$

Sendo aqui definido o intervalo de tempo, em que a variação do tempo representa a diferença entre o intervalo medido da iteração atual com o intervalo da medição anterior:

$$\Delta t_i = t_i - t_{i-1} \quad (5.18)$$

Logo, para um intervalo maior de análise, como um dia ou um mês, a energia total do dito intervalo pode ser representada pelas somas das energias discretas.

$$E_{x, \text{discreto}} = \sum E_i \quad (5.19)$$

O subscrito x representa, de forma genérica, o intervalo de filtro temporal aplicado à soma já mencionado.

Matematicamente, este método é o equivalente à soma de Riemann à direita (WIKIPEDIA, 2025).

5.2.2.3 Relação entre os métodos e justificativa da equivalência

A regra do trapézio pode ser vista, de forma geral, como uma média ponderada entre as somas de Riemann à esquerda e à direita (WIKIPEDIA, 2025):

$$E_{\text{trapézio}} = \frac{1}{2} (E_{\text{Riemann,esquerda}} + E_{\text{Riemann,direita}}) \quad (5.20)$$

Quando a função que representa a potência é aproximadamente constante, ou que não possui variações significativas, os métodos da soma à direita, à esquerda e trapézio se aproximam. Em caso de medições discretas que em conjunto representariam uma função quase constante, ou uma reta de inclinação muito baixa, os resultados são basicamente idênticos, pois se:

$$P_i \approx P_{i+1} \quad (5.21)$$

Logo, teremos a seguinte aproximação:

$$\frac{(P_i + P_{i+1})}{2} \approx P_i \approx P_{i+1} \quad (5.22)$$

Assim, para sinais de potência com variação pequena, como é o caso dos sistemas analisados neste trabalho, o método da janela de potência (baseado na regra do trapézio) e o método da integração discreta (baseado na soma de Riemann) tornam-se equivalentes em termos de resultado energético. Essa equivalência justifica a comparação direta entre sistemas que utilizam diferentes frequências de amostragem ou abordagens de cálculo.

Para além disso, a justificativa de uso um método mais simples como o da integração discreta pode-se justificar no que tange o esforço computacional para o tratamento do dado. A Tabela 4 a seguir faz um pequeno comparativo entre os dois.

Tabela 4 – Comparação dos métodos de integração

Método	Número médio de operações	Utilização
Método de integração discreta - Riemann à direita	2 operações (multiplicação + soma)	<i>Sistema 2</i>
Método da janela de Potência (Demanda) - Trapézio	4 operações (2 somas, uma multiplicação, uma divisão)	<i>Sistema 1</i>

Fonte: Próprio Autor

Logo, devido à baixa variação entre medições e ao mais reduzido exigência computacional, para o presente caso, o método de Riemann representa uma acurácia e desempenho suficientes em caso de necessidade.

5.2.3 Cálculo das Eficiências

Um dos indicadores mais relevantes para a avaliação de desempenho em sistemas de armazenamento de energia é a eficiência *roundtrip* (*Roundtrip Efficiency* – *RTE*). Esse índice expressa, em termos percentuais, a relação entre a energia elétrica efetivamente despachada em um ponto do sistema e a energia consumida em um período de análise pré-definido (mensal, semestral, anual ou outro de interesse). Em termos conceituais, a RTE representa a razão entre a energia de saída e a energia de entrada do sistema, constituindo-se em um parâmetro essencial para quantificar a qualidade do processo de armazenamento.

Sua importância reside no fato de refletir, de maneira indireta, as perdas internas e de conversão que ocorrem durante os ciclos de carga e descarga. Essas perdas englobam desde limitações eletroquímicas da bateria até perdas por conversão de potência no PCS, além de consumo do sistema não associado ao armazenamento, esse sendo associado ao consumo das cargas auxiliares do BESS; estas foram descritas na seção 2.1.5. Assim, a RTE é utilizada em relatórios técnicos, em estudos

comparativos e como prerrogativa comercial na venda de sistemas, permitindo avaliar a eficiência energética global do sistema em condições reais de operação.

A expressão matemática genérica para o cálculo da eficiência *roundtrip* pode ser representada por:

$$RTE(\%) = \frac{E_{y_{Despachada}, x}}{E_{y_{Consumida}, x}} * 100 \quad (5.23)$$

Em que:

- $E_{y,despachada}$ é a energia entregue em determinado ponto do sistema, ao longo do período analisado;
- $E_{y,consumida}$ é a energia consumida no mesmo ponto do sistema;
- x corresponde ao intervalo de tempo para o dado determinado.
- y corresponde ao ponto de medição em que se está sendo feita a análise.

É importante destacar que o valor da RTE pode variar dependendo do ponto y do sistema em que as medições são consideradas. Por exemplo, medições realizadas diretamente nos terminais da bateria tendem a fornecer valores superiores do que em outros pontos do sistema, pois desconsideram perdas do PCS e perdas em cabos, ou seja, estariam representando quase que unicamente a eficiência de armazenamento da bateria. Já medições realizadas no ponto de conexão à rede são mais representativas do desempenho real percebido pela instalação consumidora, embora apresentem valores percentualmente menores.

O cálculo da RTE no ponto de acoplamento ou ponto de conexão faz mais sentido prático, principalmente pela ampla aplicação de sistemas de armazenamento de energia com acoplamento em barramentos de corrente alternada. Para o presente trabalho, apesar da RTE ser um conceito abrangente, para fins práticos e de simplificação da terminologia, é feita a seguinte separação:

- RTE: Representa a eficiência calculada a partir da medição na saída CA do PCS. É calculada da seguinte forma:

$$RTE(\%) = \frac{E_{PCS_{Despachada}, x}}{E_{PCS_{Consumida}, x}} * 100 \quad (5.24)$$

- RTE Global: Representa a eficiência considerando outras medições, como o consumo de energia pelos sistemas e cargas auxiliares do BESS.

$$RTE\ global(\%) = \frac{E_{BESS\ Despachada, \ x}}{E_{BESS\ Consumida, \ x}} * 100 \quad (5.25)$$

No que tange a periodicidade da análise, é imperioso que o intervalo para o cálculo das duas energias supracitadas seja o mesmo. Para fins comerciais, normalmente apresenta-se o dado em intervalos mensais ou anuais.

5.2.3.1 Eficiências em pontos do circuito

Além da análise efetuada tomando como base a RTE, para fins de caracterização de componentes, é possível fazer análise de eficiência em determinados pontos do circuito (IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2020). Esta perspectiva de cálculo é utilizada, por exemplo, para o cálculo da eficiência de conversão do PCS. O horizonte de medição e condensação dos dados considerado para formulação dos dados aqui consideram o mesmo intervalo que usado para cálculo de eficiência *roundtrip*, isto é, mensal e acumulado do período (para um total de 5 meses de operação).

Os pontos de medição de potência usados, aqui retomados o que é exposto Figura 13, são os pontos 2 e 4; estes representam o lado CA do PCS e o lado CC também deste equipamento, assim como o ponto de conexão das baterias.

Esse, como dito em 2.1, pode funcionar em modo retificador ou inversor. Nisto, o modo retificador vai agregar perdas do lado CA para o lado CC: Naturalmente, a energia medida no período no lado CA, para esta operação, será maior do que a medida do lado CC, e esta diferença é admitida como sendo as perdas na retificação. Logo, a eficiência de retificação do PCS é:

$$\eta_{ret-PCS}(\%) = \frac{E_{recarga-CC}}{E_{recarga-CA}} \quad (5.26)$$

De forma análoga, o PCS enquanto inversor, contrariamente ao modo retificador, vai agregar perdas na conversão do CC para o CA. Logo, a diferença entre o acumulado despachado no lado CC que é aproveitado no lado CA representam as perdas do PCS no modo inversor. Com isso, a eficiência neste tipo de conversão é:

$$\eta_{inv-PCS}(\%) = \frac{E_{descarga-CA}}{E_{descarga-CC}} \quad (5.27)$$

Por fim, usando como base a filosofia do cálculo da RTE, também é possível calcular a eficiência das baterias. Ela é considera unicamente a entrada e saída de energia das baterias:

$$\eta_{bateria}(\%) = \frac{E_{descarga-CC}}{E_{descarga-CC}} \quad (5.28)$$

6 RESULTADOS

O presente capítulo é focado em apresentar os resultados de operação dos sistemas e fazer um breve comparativo entre os dados. O foco maior gira em torno de mostrar análises de dados das eficiências RTE e RTE global nos dois sistemas.

Este capítulo é divido entre duas partes majoritárias: A primeira parte mostra os resultados gerais do *Sistema 1* e do *Sistema 2*, apenas somente baseado nos resultados brutos de energia medidores e suas eficiências calculadas em cima dos resultados brutos, assim como comparativos de eficiência de operação. Logo, faz-se a comparação usando a métrica do RTE para os dois sistemas e a eficiência por componente, além de considerações quanto ao resultado calculado desses dados. A segunda parte se propõe a fazer uma comparação em termos da RTE global, em cenários simulados, para garantir uma métrica mais próxima entre os dois sistemas, no que tange à influência do consumo das cargas auxiliares na eficiência do sistema.

6.1 Dados Gerais de Eficiência dos Sistemas

Como pontuado no capítulo 4, ambos os sistemas possuem um ponto de medição comum, este sendo o Ponto de Medição – PCS; localizado na saída CA do PCS. Para o cálculo da RTE, essa é a referência utilizada nos resultados expostos nesta parte do trabalho.

A fim de caracterizar os equipamentos nos dois sistemas, os resultados obtidos a partir dos cálculos descritos na seção 5.2.3 são descritos aqui. A Tabela 5 e a Tabela 6 expõem os dados de eficiência do PCS, em modo Inversor e Retificador, e a Bateria, assim como o RTE. A fim de ilustrar de forma visual os dados das tabelas, são expostas as Figura 18 e Figura 19, mostrando os dados também mês a mês.

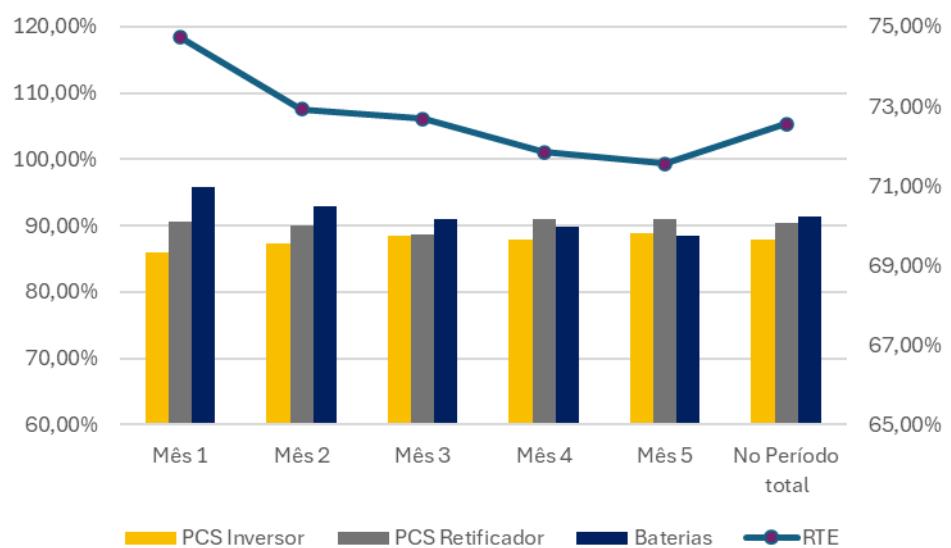
Tabela 5 - Dados de Eficiência por Componente - *Sistema 1*

Período	PCS Retificador (%)	Bateria (%)	PCS Inversor (%)	RTE (%)
Mês 1	90,69	95,83	85,99	74,73

Mês 2	90,05	92,83	87,25	72,93
Mês 3	88,74	90,96	88,54	72,68
Mês 4	90,96	89,91	87,84	71,84
Mês 5	90,95	88,45	88,95	71,56
No período	90,33	91,43	87,87	72,56

Fonte: Autoria Própria

Figura 18 - Dados gráficos da Tabela 5



Fonte: Autoria Própria

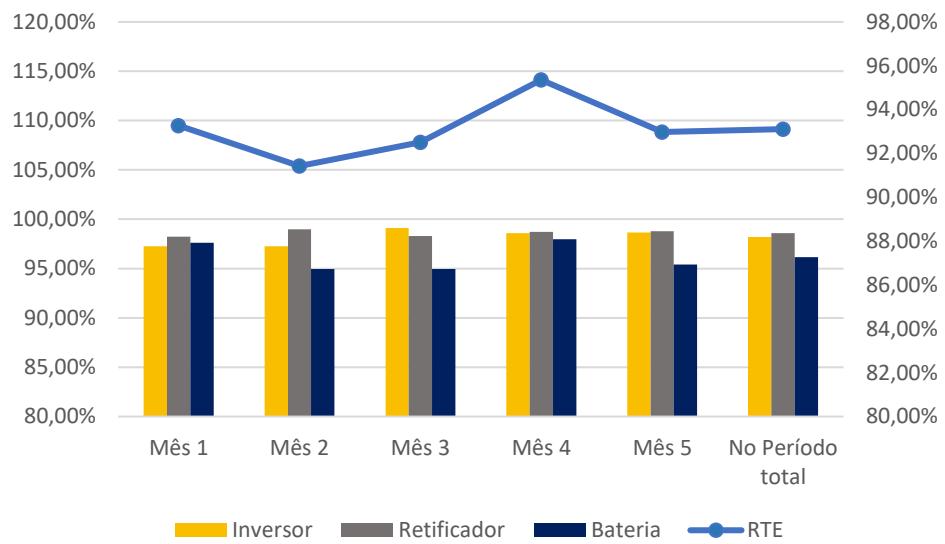
Tabela 6 - Dados de Eficiência por Componente - *Sistema 2*

Período	PCS Retificador (%)	Bateria (%)	PCS Inversor (%)	RTE (%)
Mês 1	98,22	97,62	97,27	93,27
Mês 2	98,98	94,97	97,26	91,43
Mês 3	98,31	94,97	99,09	92,51
Mês 4	98,73	97,97	98,59	95,36

Mês 5	98,80	95,39	98,66	92,98
No período	98,59	96,16	98,20	93,11

Fonte: Autoria Própria

Figura 19 - Dados gráficos da Tabela 6



Fonte: Autoria Própria

Fica evidente, com os dados apresentados na Tabela 6, a diferença das eficiências no nível PCS. Além da evidente disparidade de eficiência que ter mais um elemento de conversão no sistema aporta, como é o caso de possuir um transformador interno associado, sistemas mais recentes e mais modernos, como é o caso do *Sistema 2*, constituem-se de equipamentos que usam tensões mais altas, o que naturalmente abaixa o nível de perdas.

Em contrapartida, é possível notar a nível de dados uma eficiência no ponto de PCS inversor um ponto de operação extremamente otimizado. Em comparação com valores esperados, que podem atingir níveis de eficiência bem elevados (>98%), valores como os analisados são ainda assim muito altos. Acredita-se que a granularidade dos dados, que em certos momentos não é tão alta, pode gerar erros percentuais que acabam elevando a eficiência de um ponto de medição do circuito. Apesar disto, a premissa do dado continua verdadeira: Pela caracterização de como

o sistema opera e como ele foi parametrizado, os valores de eficiência com relação à teoria são esperados ser altos e próximos de pontos de maior eficiência teóricos.

Para fins de comparação, a Tabela 7 mostra os dois dados de RTE para os dois sistemas analisados. É evidente a diferença, que é associada sobretudo à tecnologia das baterias, possíveis diferenças nos pontos de operação e altas perdas internas no PCS, sobretudo do *Sistema 1*.

Tabela 7 - Dados de RTE - comparativo dos dois sistemas

RTE - Sistema 1(%)	RTE - Sistema 2 (%)
72,56	93,11

Fonte: Autoria Própria

6.2 Considerações sobre o *Sistema 2*

A

Figura 20 mostra uma operação média do *Sistema 2*, em que na zona 1 o BESS está recarregando, na zona 2 ele está em stand-by e na zona três, que representa o momento de descarga. É possível, de forma visual, identificar os *setpoints* da potência de operação tanto na descarga quanto na recarga. Disto, é possível estimar o valor de eficiência esperada para estes pontos de operação, usando a Figura 6 como base.

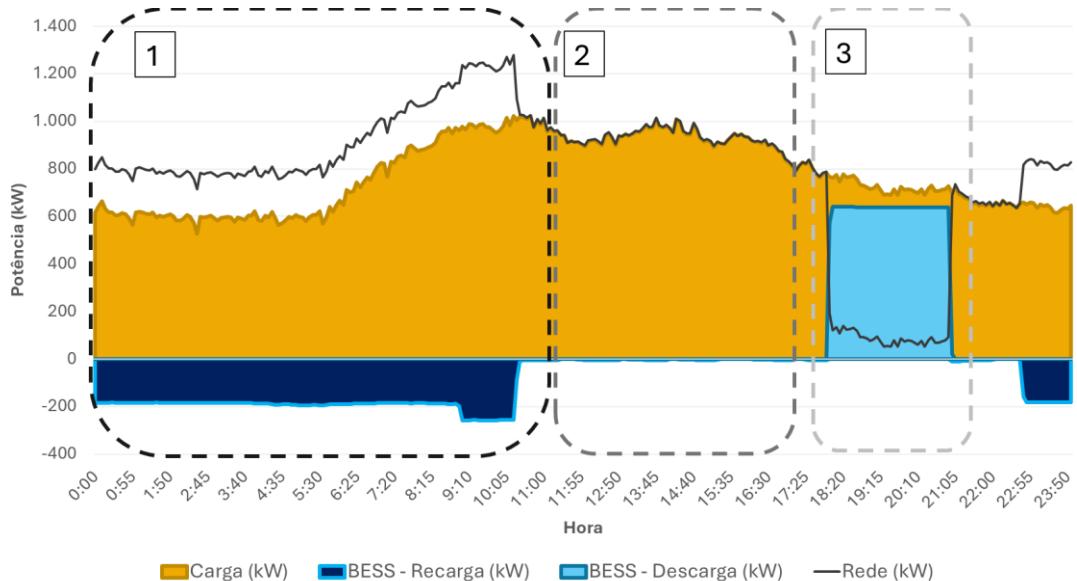
Os valores encontrados e mostrados na Tabela 6 são pertinentes e demonstram que o BESS está operando próximo ou certamente em pontos de maior eficiência.

$$P_{recarga} = 200kW; P_{descarga} = 600kW \quad (6.1)$$

$$Proporção_{recarga} = \frac{200kW}{750kW} = 0,26; \quad Proporção_{descarga} = \frac{600kW}{750kW} = 0,81 \quad (6.2)$$

$$\eta_{recarga} \cong 97,5\%; \quad \eta_{descarga} \cong 98,5\% \quad (6.3)$$

Figura 20 - Exemplo de Operação - Sistema 2

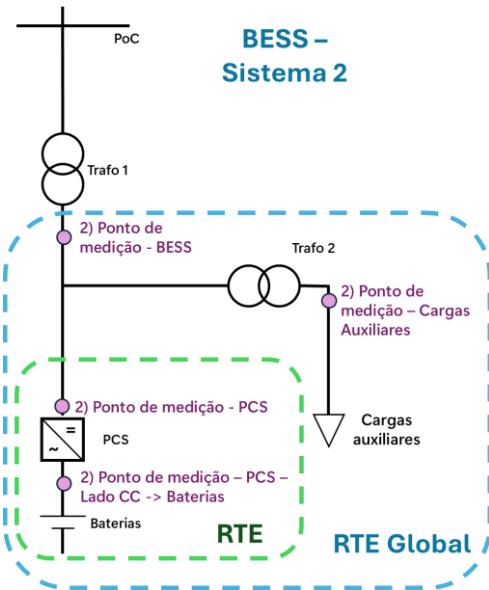


Fonte: Autoria Própria

6.2.1 Comparativos entre RTE e RTE global

Para o próximo passo do trabalho, é vital fazer a comparação entre as duas métricas apresentadas, tanto para o *Sistema 1* quanto para o *Sistema 2*. A Tabela 8 apresenta os dados por mês e o médio do período analisado. A principal diferença aqui encontrada consiste na influência que as cargas auxiliares podem ter para o desempenho energético do sistema.

Para fins de esclarecimento, a Figura 21, que é uma ilustração análoga à Figura 17, porém pondo em destaque o que é considerado na conta do cálculo tanto da RTE quanto da RTE global, serve para ilustrar a diferenciação dos dados encontrados na Tabela 8.

Figura 21 - Representação da RTE e RTE global usando unifilar do *Sistema 2*

Fonte: Autoria Própria

Tabela 8 - Dados de RTE e RTE global do *Sistema 2*

Período	RTE (%)	RTE Global (%)
Mês 1	93,27	84,95
Mês 2	91,43	84,45
Mês 3	92,51	85,13
Mês 4	95,36	86,98
Mês 5	92,98	87,01
No período	93,11	85,69

Fonte: Autoria própria

Esta informação torna-se relevante para o que será apresentado no próximo subcapítulo 6.3. A eficiência RTE global do *Sistema 2*, comparada à eficiência RTE do *Sistema 1*, é consideravelmente maior. O que se espera, ao olhar para o caso da RTE global do *Sistema 1* é que esta seja ainda menor. A Tabela 9 evidencia essa diferença.

Tabela 9 - Dados de RTE e RTE global - comparativo dos dois sistemas

RTE - Sistema 1(%)	RTE global - Sistema 2 (%)
72,56	85,69

Fonte: Autoria Própria

6.3 Comparações Simuladas

Para chegar num comparativo de RTE global entre os dois sistemas, o trabalho lança mão, devido à ausência de medição para o ponto de cargas auxiliares no *Sistema 1*, de alguns cenários de simulação a fim de chegar em valores de consumo pertinentes para comparação. Os dados base para alcançar os resultados de RTE global nos cenários simulados tomam como base os dados de consumo e despacho a partir do PCS para os meses de operação, mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 - Dados Despacho e Consumo do *Sistema 1* a partir do PCS

$E_{PCS_{Consumo}}$	$E_{PCS_{Despachada}}$
78.075,40kWh	56.654,64 kWh

Fonte: Autoria Própria

Os presentes cenários de simulação apresentados neste trabalho podem ser divididos em dois grupos distintos, totalizando 4 cenários no total, aumentando o nível de complexidade da análise ao passar dos cenários. O primeiro grupo de cenários agrupa métodos de análise que usam um comparativo direto entre os dois sistemas como métrica para sua própria comparação: O primeiro e o segundo cenário usam a premissa de que as cargas auxiliares se comportariam de forma parecida para o *Sistema 1* e o *Sistema 2*. O segundo grupo parte para uma análise um pouco mais refinada, porém usando dados médios.

6.3.1 Primeiro Cenário Simulado

Neste primeiro cenário, a proposição a ser feita é usar uma mesma métrica para simular as cargas auxiliares no *Sistema 1* usando dados do *Sistema 2* como base. No capítulo 4, é apresentado o valor de Energia nominal dos dois sistemas. Na Tabela 11 são expostos dados de consumo dos sistemas auxiliares em todo o período de análise.

Tabela 11 - Dados de consumo de Cargas Auxiliares do *Sistema 2*

Período	Consumo auxiliar (kWh)
Mês 1	3.657,92
Mês 2	3.626,44
Mês 3	3.655,64
Mês 4	3.008,19
Mês 5	2.642,02
Média no período	3.318,04

Fonte: Autoria Própria

Além disso, é necessário estipular os momentos de recarga e descarga. A partir dos dados de operação do *Sistema 2*, tem-se uma média diária de descarga de 3 horas. Usando a divisão horária explicada em 5.2.1.1, tudo que não é considerado descarga, entra dentro do bloco de recarga e stand-by. Com isso é possível determinar uma proporção dos dois intervalos temporais.

Para calcular o consumo estimado das cargas auxiliares do *Sistema 1*, serve-se da equação (6.4). Ela usa um fator de energia auxiliar normalizada, multiplicado pela capacidade nominal o sistema.

$$E_{sis_{aux\ total}} = F_{aux\ normalizado} * E_{capacidade\ nominal} \quad (6.4)$$

A base de cálculo do fator explicitado como parâmetro na equação (6.4) usa o consumo médio mensal dos meses de operação exposto na última linha da Tabela

11. Desse modo, tem-se o fator de consumo das cargas auxiliares descrita pela equação (6.5):

$$F_{aux\ normalized} = \frac{E_{consumo\ auxiliar\ médio\ (kWh)}}{E_{capacidade\ nominal\ (kWh)}} \quad (6.5)$$

Em que o fator calculado na equação (6.5) é adimensional e representa uma estimativa simulada do consumo auxiliar, podendo ser expandida para outros sistemas de diferentes tamanhos. Tendo os valores do *Sistema 2* para comparativo, chega-se a:

$$F_{aux\ normalized} = \frac{3.318\ kWh}{1.979\ kWh} = 1,67 \quad (6.6)$$

Usando o valor da capacidade nominal do sistema 1, pode-se chegar a um valor estimado de consumo auxiliar do sistema médio para o período de 5 meses analisados, normalizado.

$$E_{sis_{aux\ total}} = 1,67 * 560kWh = 938,91kWh \quad (6.7)$$

Com este valor, calculado e mostrado na equação (6.7), é possível calcular o valor da eficiência RTE global estimada para o primeiro cenário. A primeira tarefa nessa etapa é separar o quanto deste consumo estimado representa no momento da descarga e o quanto representa no momento da recarga e stand-by.

Para tal análise, neste primeiro cenário, faz-se uma estimativa média de dias úteis por mês, normalizada para os dois sistemas, usando um ano de 365 dias. Além disso, a duração de descarga na aplicação deste cenário dura 3 horas. Para obter a quantidade de horas de descarga, é necessário apenas multiplicar a quantidade de horas por descarga vezes a quantidade de dias úteis médios estipulados. O dado a ser destacado é a Proporção de horas em descarga no mês, que é calculado nas equações (6.8) e (6.9).

$$Horas\ em\ descarga = 3 * Dias\ úteis\ no\ mês \quad (6.8)$$

$$Proporção\ de\ descarga\ no\ mês = \frac{Horas\ em\ descarga}{Horas\ totais\ no\ mês} \quad (6.9)$$

$$Proporção\ de\ descarga\ no\ mês = \frac{65,10}{729,60} = 8,92\% \quad (6.10)$$

Com isso, a Tabela 12 é construída, que representa os valores supracitados.

Tabela 12 - Dados Temporais para análise – Cenário 1

Dias por mês	30,40 dias
Dias úteis no mês	21,70 dias
Horas totais no mês	729,60h
Horas de descarga no mês	65,10h
Proporção de horas em descarga no mês	8,92%

Fonte: Autoria Própria

Tendo sido calculada a proporção de horas em descargas no mês, é possível usar esta base horária para estimar o quanto de Consumo auxiliar em cada um dos momentos (descarga e não descarga) representa. A equação (6.11) expõe como o cálculo da energia do consumo auxiliar durante a descarga é feito; enquanto a equação (6.12) apresentada mostra a separação entre o consumo nos dois modos de operação.

$$E_{sis_{aux}(Ope-desc)} = \text{Proporção} * E_{sis_{aux} \text{ total}} \quad (6.11)$$

$$E_{sis_{aux}(FP)} = E_{sis_{aux} \text{ total}} - E_{sis_{aux}(Ope-desc)} \quad (6.12)$$

Esse dado é apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 - Estimativa média mensal de consumo com base na simulação horária – Cenário 1

Energia das cargas auxiliares consumida durante a descarga	83,78kWh
Energia das cargas auxiliares consumida durante a recarga ou em Stand-by	855,13kWh
Energia total média mensal	938,91kWh

Fonte: Autoria Própria

Em seguida, é possível calcular a RTE global, com base nas fórmulas na subseção 5.2.1.1, que relacionam a energia do BESS com a energia do PCS e cargas auxiliares, para a janela de operação de 5 meses, no primeiro cenário, dados que são mostrados na Tabela 14.

Tabela 14 - RTE global recalculado - Cenário 1

$E_{sis_{aux(Ope-desc)}}$	$E_{sis_{aux(FP)}}$	$E_{BESS_{Consumo}}$	$E_{BESS_{Despachada}}$	RTE global
418,88kWh	4.275,67kWh	82.351,07kWh	56.235,76kWh	68,29%

Fonte: Autoria Própria

6.3.2 Segundo Cenário Simulado

Para o segundo cenário, usa-se uma ponderação estatística com base em dados de operação do *Sistema 2*, ainda para construir o consumo auxiliar do *Sistema 1*. Entretanto, em contraposição ao método temporal adotado, o cálculo utilizado aqui usa uma proporção do quantitativo energético consumido no *Sistema 2*. Foi observado, durante os meses de operação, e separado o consumo auxiliar entre os momentos de descarga e os momentos de recarga e stand-by para o *Sistema 2*. Esta nova métrica leva não só em conta a perspectiva horária média, mas também o aspecto de que em momentos de descarga, a corrente de operação do sistema tende a ser maior, devido a uma maior potência de operação, e consequentemente o sistema de resfriamento do BESS tende a operar com mais intensidade. A Tabela 15 mostra um comparativo dos dados medidos durante o período em descarga e a estimativa horária considerada no cenário 1. A quarta coluna expõe os resultados usando a proporção exposta na equação (6.10) para chegar no valor estimado.

Tabela 15 - Dados de base para cálculo de proporção de consumo - Cenário 2

Mês	Consumo Auxiliar Total	Consumo Auxiliar em Descarga medida em operação	Consumo Auxiliar em Descarga estimada horária

Mês 1	3657,92	420,47	326,39
Mês 2	3626,44	454,00	323,54
Mês 3	3665,64	449,00	327,02
Mês 4	3008,19	414,00	268,39
Mês 5	2642,02	408,82	235,74
Média	3318,04	429,25	296,21

Fonte: Autoria Própria

O cálculo é feito como segue, usando os valores médios do período expostos na Tabela 15:

$$Proporção\ de\ consumo = \frac{Consumo\ Auxiliar\ em\ Descarga\ médio}{Consumo\ Auxiliar\ médio} \quad (6.13)$$

$$Proporção\ de\ consumo\ em\ descarga = \frac{429,25}{3318,04} = 12,90\% \quad (6.14)$$

Logo, a análise é refeita usando a nova proporção exposta na equação (6.14), e tendo como base a equação (6.11), chegando nos resultados apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Estimativa média mensal de consumo com base na simulação horária – Cenário 2

Energia das cargas auxiliares consumida durante a descarga	121,40kWh
Energia das cargas auxiliares consumida durante a recarga ou em Stand-by	817,51kWh
Energia total média mensal	938,91kWh

Fonte: Autoria própria

Finalmente, é possível estipular o valor da RTE global para o segundo cenário, de forma análoga a como foi feito em 6.3.1, em que os dados são expostos na Tabela 17.

Tabela 17 - RTE global recalculado - Cenário 2

$E_{Sis_{aux(Ope-Desc)}}$	$E_{Sis_{aux(FP)}}$	$E_{BESS_{Consumo}}$	$E_{BESS_{Despachada}}$	RTE global
607,02kWh	4.087,53kWh	82.162,94kWh	56.047,62kWh	68,21%

Fonte: Autoria Própria

6.3.3 Terceiro Cenário Simulado

No terceiro cenário, foi adotada uma análise estimativa usando dados de consumo de equipamentos costumeiramente utilizados em BESS como os do *Sistema 1*. É importante ressaltar que os dois cenários anteriores e este presente são simulados, adotando diferentes abordagens.

6.3.3.1 Influência das cargas auxiliares

Como foi exposto ao longo do capítulo 2, o BESS é composto de diferentes subsistemas, e estes subsistemas são compostos de equipamentos diferentes. Do ponto de vista energético, para fins de simplificação, o que é chamado de Cargas auxiliares engloba todo tipo de equipamento que não armazena nem converte energia a ser utilizada nas suas principais aplicações, apenas para fazer o sistema funcionar.

Com isto, a simplificação aqui adotada é que o consumo das cargas auxiliares agrupa equipamentos do TMS/HVAC, do EMS e do BMS. A fim de chegar em um valor que represente o consumo desses equipamentos, a Tabela 18 possui dados de potência de equipamentos selecionados que representam uma grande parte do consumo dos auxiliares.

Tabela 18 - Dados de potência dos dispositivos auxiliares do BESS -1

Equipamento	Consumo/Potência (kW)
Monitor/IHM	0,05
Computador	0,20
Central de Incêndio	0,10
Medidores e Sensores Diversos	0,10
Gateway	0,025
BMS	0,125
Total	0,60

Fonte: Catálogos de Fornecedores/Acervo Moura

Além disso, não exposto na Tabela 18, também devem ser incluídos os componentes do HVAC; os valores para este subsistema estão expostos na Tabela 19. Aqui assume-se uma premissa de projeto nos valores de potência deste componente. Nota-se aqui que ele representa uma parcela majoritária do consumo auxiliar (OLIS, 2023).

Tabela 19 - Potência do HVAC

Equipamento	Potência Unitária	Quantidade	Consumo/Potência total (kW)
HVAC	0,85	2	1,70

Fonte: Catálogos de Fornecedores/Acervo Moura

6.3.3.2 Desenvolvimento do Cenário

Com base na estimativa de potência apresentada nas Tabela 18 e Tabela 19, a estimativa feita para estimar o quantitativo de energia pela capacidade nominal no primeiro cenário é deixada de lado.

Ainda, entretanto, a proporção admitida no primeiro cenário, baseada na estimativa horária de funcionamento das cargas auxiliares, servirá como base para a diferenciação horária de consumo energético. Logo, é admitido que o período de descarga diária é de 3h, usando os dados da Tabela 12. Então, o dado de proporção apresentado em (6.10) é considerado.

Outra simplificação admitida, que é transpassada com base nos dados apresentados, é que o dado de potência consumida é constante, representando uma média da potência consumida pelo equipamento.

Portanto, o consumo total auxiliar estimado no mês é representado pelo produto das horas médias mensais pela soma da potência média de todas as cargas auxiliares.

$$E_{sis_{aux\ mensal}} = Horas\ médias\ no\ mês * P_{sis_{aux\ mensal}} \quad (6.15)$$

$$E_{sis_{aux\ mensal}} = 729,60 * (0,60 + 1,70) = 1678,08\text{ kWh} \quad (6.16)$$

Assim sendo, Tabela 20 representa a distinção para os modos de operação do consumo para o terceiro cenário. A Tabela 21 enfim apresenta o resultado da RTE global estimada para o terceiro cenário de forma similar ao apresentado até agora.

Tabela 20 - Estimativa média mensal de consumo com base na simulação horária – Cenário 3

Energia das cargas auxiliares consumida durante a descarga	149,73kWh
Energia das cargas auxiliares consumida durante a recarga ou em Stand-by	1528,35kWh
Energia total média mensal	1678,08kWh

Fonte: Autoria Própria

Tabela 21 - RTE global recalculado - Cenário 3

$E_{sis_{aux(Ope-Desc)}}$	$E_{sis_{aux(FP)}}$	$E_{BESS_{Consumo}}$	$E_{BESS_{Despachada}}$	RTE global
748,65kWh	7.641,75kWh	85.717,15kWh	55.905,90kWh	65,22%

Fonte: Autoria Própria

6.3.4 Quarto Cenário Simulado.

Até a presente etapa, foi assumido que exclusivamente a operação do *Sistema 1* girou entorno de uma operação em que a descarga durava 3 horas, similar ao funcionamento do *Sistema 2*. Tendo em vista essa consideração, usando a premissa da aplicação em questão, toda energia utilizada no sistema seria usada durante um período de três horas e exclusivamente em três horas.

Entretanto, como foi explicado capítulo 4, o *Sistema 1* foi um sistema feito com uma perspectiva de uma tecnologia em desenvolvimento e usado para a aplicação de deslocamento de energia, de forma geral, ou seja, tanto para a descarga em horário de ponta (que é seu principal foco), quando para descargas em outros momentos. Ao longo dos meses de operação analisados, a proporção entre descarga durante o período de ponta e fora ponta é variável, mas optou-se por usar a média para a presente análise.

Logo, o cenário admite algumas simplificações para análise:

- As descargas em momentos fora ponta ainda ocorrem em dias úteis;
- A energia do consumo auxiliar médio mensal permanece o mesmo do calculado para o terceiro cenário, isto é, de 1678,08kWh;
- Existe uma proporção entre as descargas fora ponta e ponta.

Com isto, o que muda do terceiro cenário para o quarto é:

- O quantitativo de horas que são consideradas de operação em descarga.

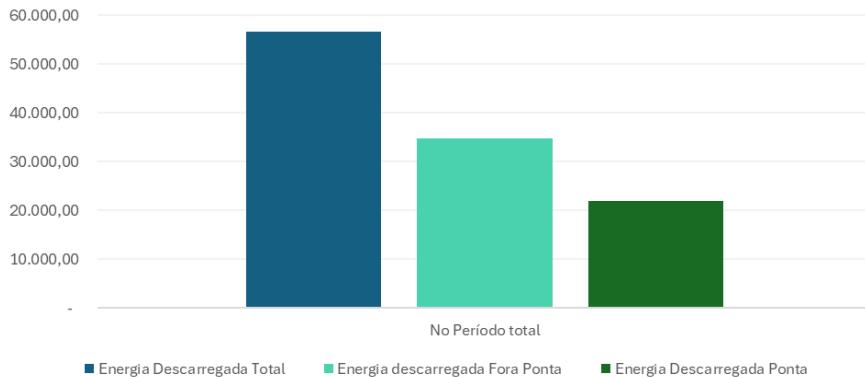
Para o período de 5 meses de operação, os valores totais de descarga fora ponta e descarga em ponta são apresentados de forma geral na Tabela 22. A Figura 22 apresenta os dados em formato gráfico.

Tabela 22 - Dados de Operação do período analisado - *Sistema 1*

Energia Descarregada total	Energia descarregada Fora Ponta	Energia Descarregada Ponta
56.654,64kWh	34.727,45kWh	21.927,20kWh

Fonte: Autoria Própria

Figura 22 - Dados gráficos da Tabela 22



Fonte: Autoria Própria

Para estimar o quantitativo de horas adicionais em descarga, a equação (6.18) apresenta a proporção entre a energia descarregada na ponta pela fora ponta.

$$\text{Proporção de horas} = \frac{\text{Energia descarregada Fora Ponta}}{\text{Energia descarregada Ponta}} \quad (6.17)$$

$$\text{Proporção de horas} = \frac{34.727,45 \text{ kWh}}{21.927,20 \text{ kWh}} = 158,37\% \quad (6.18)$$

Ou seja, esse resultado numérico representa para o *Sistema 1* o quanto a mais, além das 3h de descarga previstas e consideradas até o momento, é possível presumir de tempo de descarga. Levando isto em conta, o valor em horas a mais, e após esse cálculo, de horas totais é dada como segue, para um intervalo mensal:

$$\text{Horas de descarga total} = \text{Horas em ponta} + \text{Horas Fora Ponta} \quad (6.19)$$

$$\text{Horas Fora Ponta} = 1,5837 * \text{Horas em ponta} \quad (6.20)$$

$$\text{Horas de descarga total} = (3h + 3h * 1,5837) * 21,7 \quad (6.21)$$

$$\text{Horas de descarga total} = 168,20h \quad (6.22)$$

Por fim, assim como no primeiro cenário, usando (6.9) é possível encontrar quanto fica a proporção do consumo auxiliar entre momentos de descarga e o restante do tempo nos outros estados de operação (stand-by e recarga), mostrada na equação (6.23). A Tabela 23 mostra a separação.

$$\text{Proporção de descarga no mês} = \frac{\text{Horas em descarga}}{\text{Horas totais no mês}} = 23,05\% \quad (6.23)$$

Tabela 23 - Estimativa média mensal de consumo com base na simulação horária – Cenário 4

Energia das cargas auxiliares consumida durante a descarga	386,87kWh
Energia das cargas auxiliares consumida durante a recarga ou em Stand-by	1291,21kWh
Energia total média mensal	1678,08kWh

Fonte: Autoria Própria

Finalmente, é possível estipular o valor da RTE global para o último cenário, como tem sido feito até o presente cenário, sendo os dados apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - RTE global recalculado - Cenário 4

$E_{sis_{aux}(Ope-Desc)}$	$E_{sis_{aux}(FP)}$	$E_{BESS_{Consumo}}$	$E_{BESS_{Despachada}}$	RTE global
1.934,33kWh	6.456,07kWh	84.531,47kWh	54.720,31kWh	64,73%

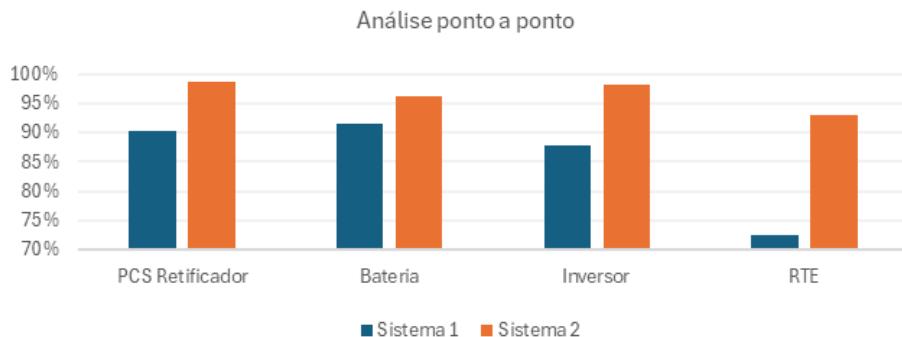
Fonte: Autoria Própria

6.4 Resumo Comparativo dos Resultados

De forma a consolidar e facilitar a interpretação dos resultados obtidos, o presente subcapítulo apresenta os dados dos cenários estudados em formato gráfico. A representação visual permite observar com maior clareza os comportamentos energéticos ao longo dos intervalos de operação, destacando tendências, variações de eficiência e correlações entre os cenários. As Figura 23, Figura 24 e Figura 25 resumem os resultados já apresentados nos subcapítulos anteriores. Além disso, os gráficos auxiliam na comparação direta entre os sistemas analisados, evidenciando suas diferenças.

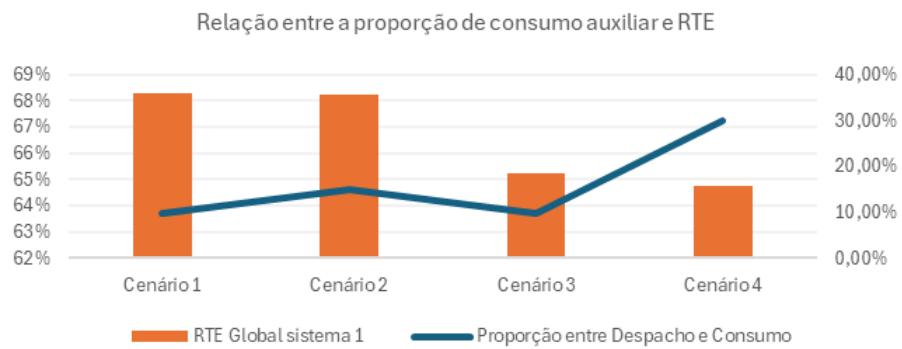
Enquanto a seção anterior apresentou os resultados, de forma geral, em formato tabular e descritivo, nesta parte busca-se evidenciar, por meio de representações gráficas, e para o período total, os dados médios em formato gráfico.

Figura 23 - Comparações de eficiência ponto a ponto



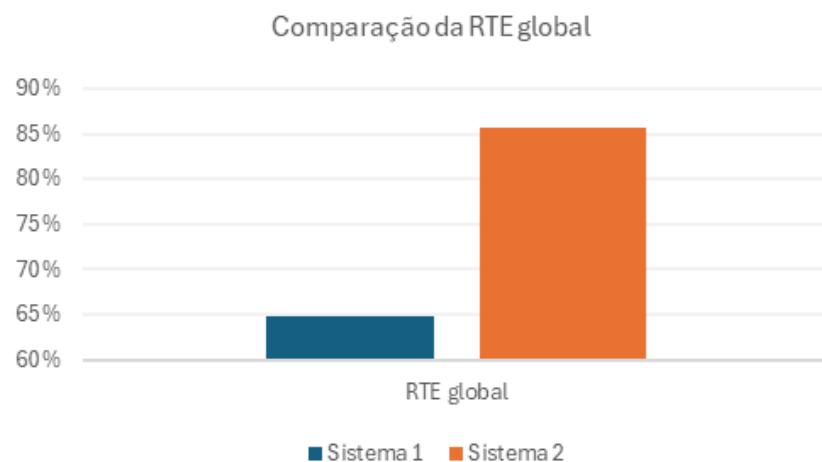
Fonte: Autoria Própria

Figura 24 - Resultados percentuais dos cenários de simulação das cargas auxiliares para o Sistema 1



Fonte: Autoria Própria

Figura 25 - Comparaçāo dos valores de RTE global



Fonte: Autoria Própria

7 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

O presente trabalho teve como propósito analisar o funcionamento em operação de dois sistemas de armazenamento de energia em baterias (BESS) de tecnologias distintas, aplicados a uma mesma função de controle: a arbitragem de energia, e comparar seus valores de eficiência em operação. Apesar da semelhança conceitual e estrutural entre os sistemas, as diferenças sutis nas suas arquiteturas, sobretudo no que tange à medição e contabilização de perdas, motivaram a análise comparativa proposta.

A medição e a consideração das cargas auxiliares em um sistema BESS, muitas vezes negligenciadas quando o foco se restringe à conversão e ao armazenamento de energia, revelam-se de importância significativa quando analisadas sob a ótica de aplicações comerciais e industriais (C&I). Em consumidores finais, essas cargas podem representar custos adicionais diretos, e, portanto, devem ser tratadas como parte integrante do desempenho energético global. Além disso, a eficiência *roundtrip* (RTE), amplamente utilizada como parâmetro comercial de projeto, deve englobar o consumo de todos os subsistemas, de forma a não transferir perdas ao usuário final nem distorcer a percepção de desempenho; assim, recai-se no conceito da RTE global, também mostrado ao longo do trabalho.

Os resultados obtidos demonstraram que a RTE calculada apenas a partir da conversão e do armazenamento, esta chamada simplesmente de RTE, não representa integralmente a realidade operacional do sistema. Ao se incluir o consumo das cargas auxiliares, seja por medição direta, como no sistema de lítio, ou por simulação estimada, como no sistema de chumbo, uma diferença significativa é verificada entre a nomeada RTE e a também nomeada eficiência global (RTE global). Essa diferença evidencia que o desempenho real do sistema é fortemente influenciado pelos elementos de suporte e infraestrutura, e não apenas pelos blocos de potência e de baterias principais, sobretudo para aplicações C&I. Por exemplo, ao usar a comparação dos valores de eficiência do sistema com baterias de lítio, a eficiência vai de 93,11% para 85,69%, uma redução de 8% em valores percentuais.

Outro ponto relevante da análise refere-se à tecnologia dos equipamentos, especialmente das baterias e do PCS. Observou-se que as perdas associadas à conversão de energia e ao processo de armazenamento, bem como o consumo dos

sistemas auxiliares, têm impacto direto no resultado energético global, o que é naturalmente esperado. A constante evolução tecnológica, tanto dos conversores quanto dos acumuladores eletroquímicos, tem contribuído para reduzir essas perdas e elevar a eficiência dos sistemas mais recentes. Além disso, ao fazer a comparação dos dois sistemas no contexto deste trabalho, é notória um melhor desempenho do sistema com baterias de lítio. Retomando valores da RTE contextual para fins de comparação, o Sistema 2 (baterias de lítio), com 93,11%, teve um desempenho significativo melhor que o Sistema 1 (baterias de chumbo) com 72,56%.

Ainda que o comparativo realizado seja pertinente e coerente, há espaço para aprimoramentos futuros. Do ponto de vista instrumental, pode-se lançar mão de equipamentos com intervalos de coleta mais curtos. O uso de equipamentos de medição dedicados, como qualímetros, poderia permitir uma coleta de dados mais precisa e contínua, garantindo maior uniformidade aos resultados. Para outros tipos de projetos, que inclusive possuem outras aplicações, sobretudo aplicações a nível de potência, em que o perfil de carga e descarga é muito mais dinâmico, essa premissa é bem mais pertinente.

Como continuidade, estudos futuros baseados na premissa exposta neste trabalho podem se concentrar em períodos operacionais mais longos, incorporando variáveis adicionais que influenciam o desempenho energético ao longo do tempo. Considerar a degradação dos componentes, esta sendo refletida na perda de eficiência eletrônica e na redução do *State of Health* (SoH) das baterias, bem como o comportamento das cargas auxiliares sob diferentes condições operativas, pode fornecer uma visão mais completa sobre o desempenho do sistema. Além disso, análises comparativas em sistemas de mesma aplicação, porém com maior ordem de grandeza, podem contribuir para consolidar parâmetros de eficiência mais representativos e escaláveis para o setor de armazenamento de energia.

REFERÊNCIAS

- ADB. **Handbook on Battery Energy Storage System**. Manilla. 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 7 – Perdas Técnicas Regulatórias**. Brasília. 2007.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 1000**. [S.I.]. 2021.
- AHMED, M. H. et al. Power Loss Model and Efficiency Analysis of Three-Phase Inverter Based on SiC MOSFETs for PV Applications. **IEEE Access**, 2019. 75768-75781.
- AKHIL, A. A. et al. **DOE/EPRI Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA**. Albuquerque, NM; Livermore, CA. 2015.
- ALNES, P. K. E. A. Battery energy storage systems in the Nordic grid: Characteristics and ancillary service provision. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 2023. 110403.
- AMARAL, D. H. D.; SINOHARA, R. Y. **Estudo de caso do banco de baterias LiFePO4 250 kW/500 kWh instalada na UHE Sérgio Motta Rosana-SP**. Rosana: Universidade Estadual Paulista, Campus de Rosana, 2022.
- BECKERS, C. et al. **Round-Trip Energy Efficiency and Energy-Efficiency Fade Estimation for Battery Passport**. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). [S.I.]: [s.n.]. 2023.
- BERRINGER, K.; MARVIN, J.; PERRUCHOUD, P. **Semiconductor power losses in AC inverters**. IEEE Industry Applications Conference. Phoenix, Arizona: IEEE. 1995.
- CONSORTIUM FOR BATTERY INNOVATION (CBI). **Technical Roadmap – Research and Innovation Pathways for Next-Generation Advanced Lead Batteries**. [S.I.]. 2021.
- COOPERATION, A.-P. E. **Handbook on electricity meters**. Singapura: Singapore: APEC Secretariat, 2007.
- COSTA, D. D. S. **Modelagem e implementação de lógicas de controle para sistemas de armazenamento de energia em baterias com aplicações atrás do medidor**. Campina Grande. 2025.
- CUMMINS INC. Types of applications for BESS and the benefits of incorporating BESS into your solutions, 14 nov 2025. Disponível em: <<https://www.cummins.com/pt/news/2024/08/15/types-applications-bess-and-benefits-incorporating-bess-your-solutions>>. Acesso em: 21 dez. 2025.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Sistemas de Armazenamento em Baterias – Aplicações e Questões Relevantes para o Planejamento**. [S.I.]. 2019.
- ENERGYBASES. Parâmetros de baterias de armazenamento de energia, 14 nov 2025. Disponível em: <<https://energybases.com/pt/blog/energy-storage-battery-parameters/>>. Acesso em: 21 dez. 2025.
- EPE. **Caderno de micro e minigeração distribuída e baterias atrás do medidor – PDE 2035**. Rio de Janeiro. 2025.
- EURACHEM / CITAC. **Measurement Uncertainty Arising from Sampling: A Guide to Methods and Approaches**. [S.I.]. 2019.
- EYER, J.; COREY, G. **Energy Storage for the Electricity Grid: Benefits and Market Potential Assessment Guide**. Albuquerque. 2010.

- FREDERIKSEN, F. et al. Battery energy storage for grid services and renewable integration: A Danish case study. **Applied Energy**, 2021. 1-14.
- GATTA, F. M. E. A. **Battery energy storage efficiency calculation including auxiliary losses**: Technology comparison and operating strategies. IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). Piscataway: [s.n.]. 2015. p. 1-6.
- GOULART, V. V.; NETO, J. A. R.; RÜTHER, R. Method of techno-economic analysis of Battery Energy Storage System (BESS) function-stacking for medium voltage connected consumers. **Journal of Energy Storage**, Fevereiro 2024.
- GREENWOOD, D. M. E. A. Integration of storage with high penetrations of intermittent renewable generation. In: **Future energy**: improved, sustainable and clean options for our planet. [S.I.]: Elsevier, 2020. p. 649-669.
- HANSEN, C. W.; STEIN, J. S.; RILEY, D. M. **Effect of Time Scale on Analysis of PV System Performance**. Albuquerque. 2012.
- HUGHES, R.; VAGG, C. Assessing the feasibility of a cold start procedure for solid state batteries in automotive applications. **Batteries**, 2022. 1-19.
- IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY. **IEEE Recommended Practice for the Characterization and Evaluation of Energy Storage Technologies in Stationary Applications**. [S.I.]. 2020.
- INSTITUTE, E. E. **Handbook for electricity metering**. 10. ed. Washington, DC: Edison Electric Institute, 2002.
- KOECH, A. K. et al. Lithium-ion battery fundamentals and exploration of cathode materials: a review. **South African Journal of Chemical Engineering**, 2024. p. 321-339.
- LAWDER, M. T. E. A. Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications. **Proceedings of the IEEE**, v. 102, 2014. 1014-1030.
- LINDEN, D.; REDDY, T. B. **Handbook of batteries**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2002.
- MOHAMMED, N. A. A. **Control and monitoring of battery energy storage system using PLC**. Johor Bahru. 2017.
- OLIS, W. Impact of heating and cooling loads on battery energy storage system sizing in extreme cold climates. **Energy**, Maio 2023.
- PANAGIOTOU, K.; KLUMPNER, C.; SUMNER, M. **The effect of including power converter losses when modelling energy storage systems**: a UK domestic study. Nottingham: University of Nottingham. 2016.
- POWER-SONIC. Battery energy storage system components, 14 nov 2025. Disponível em: <<https://www.power-sonic.com/battery-energy-storage-system-components/>>. Acesso em: 21 dez. 2025.
- PRETA POWER. 2MW lithium-ion BESS container, 14 nov 2025. Disponível em: <<https://www.pretapower.com/2mw-lithium-ion-bess-container/>>. Acesso em: 21 dez. 2025.
- RAMOS, F. O. et al. A real case analysis of a battery energy storage system for energy time shift, demand management, and reactive control. **IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference – Latin America (ISGT Latin America)**, 2021. 1-5.
- SAFOUTIN, M. et al. **Effect of current and SOC on round-trip energy efficiency of a Lithium-Iron Phosphate (LiFePO₄) battery pack**. SAE Technical Paper 2015-01-1186. Warrendale: SAE International. 2015.
- SILVA, R. D. D. S. E. **Novas Tecnologias e Infraestrutura do Setor Elétrico Brasileiro – Armazenamento de Energia em Baterias**. [S.I.]. 2022.

- SOUZA E SILVA, R. D. D. **Novas tecnologias e infraestrutura do setor elétrico brasileiro – armazenamento de energia em baterias**. Rio de Janeiro. 2022.
- STANGER, H. **The Role of Battery Energy Storage in Large-Scale Solar Integration: A Business Case and Policy Analysis for Kosovo**. Viena. 2025.
- SULLIVAN, J. L.; GAINES, L. **A review of battery life-cycle analysis: state of knowledge and critical needs**. [S.I.]. 2010.
- TLS OFFSHORE CONTAINERS & TLS ENERGY. Fire Suppression System in BESS Containers. **TLS Containers**, Abril 2021. Disponivel em: <<https://www.tls-containers.com/tls-blog/fire-suppression-system-in-bess-containers>>. Acesso em: 21 dez. 2025.
- TROES CORP. What is battery energy storage? Inside the system structure, 14 nov 2025. Disponivel em: <<https://troescorp.com/what-is-battery-energy-storage/>>. Acesso em: 21 dez. 2025.
- TURGEL, R. S. **Sampling techniques for electric power measurement**. National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce. 1975.
- WELINK. How battery energy storage systems enhance grid stability, 14 nov 2025. Disponivel em: <<https://welink.eu/how-battery-energy-storage-systems-enhance-grid-stability/>>. Acesso em: 21 dez. 2025.
- WIKIPEDIA. Trapezoidal rule, 14 nov 2025. Disponivel em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Trapezoidal_rule>. Acesso em: 21 dez. 2025.
- WIKIPÉDIA. Integração numérica, 14 nov 2025. Disponivel em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Integra%C3%A7%C3%A3o_num%C3%A9rica>. Acesso em: 21 dez. 2025.
- WU, Y. et al. Adaptive Power Control Based on Double-layer Q-learning Algorithm for Multi-parallel Power Conversion Systems in Energy Storage Station. **Journal of Modern Power Systems and Clean Energy**, nov 2022. 1714–1724.