



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAS

IASMIN BENVINDA PEREIRA ALVES

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA
ETAPA DE FORMAÇÃO DA BATERIA AUTOMOTIVA**

RECIFE
2025

IASMIN BENVINDA PEREIRA ALVES

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA
ETAPA DA FORMAÇÃO DA BATERIA AUTOMOTIVA**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Janaina Moreira de Meneses

RECIFE

2025

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

Alves, Iasmin Benvinda Pereira.

Avaliação do processo de transferência de calor na etapa de formação da bateria automotiva / Iasmin Benvinda Pereira Alves. - Recife, 2025.
57p. : il., tab.

Orientador(a): Janaina Moreira de Meneses

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

Inclui referências.

1. Eficiência industrial. 2. Recirculação de água. 3. Processo de formação. 4. Baterias chumbo-ácido. 5. Ferramentas da qualidade. I. Meneses, Janaina Moreira de. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

IASMIN BENVINDA PEREIRA ALVES

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA
ETAPA DA FORMAÇÃO DA BATERIA AUTOMOTIVA**

Trabalho de Conclusão apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de
Mecânica da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 11/08/2025.

BANCA EXAMINADORA

Participação via Videoconferência

Prof. Dr. Janaina Moreira de Meneses (Orientadora)

Universidade Federal de Pernambuco

Participação via Videoconferência

Prof. Dr. Marcele Elisa Fontana (Examinadora Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Participação via Videoconferência

Prof. Dr. Armando Dias Duarte (Examinador Externo)

Universidade Federal do Oeste da Bahia

Dedico este trabalho aos meus falecidos avós, por sempre terem acompanhado de perto os meus estudos e serem meus principais exemplos de união, bondade e resiliência, infelizmente não estão entre nós para observarem o término desta caminhada.

Dedico também a Deus, por acalmar meus pensamentos nos momentos de incerteza e por iluminar cada passo da minha caminhada. É Nele que encontro a força necessária para enfrentar os desafios da vida e seguir firme nesta jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha família, base de tudo o que sou. Em especial, aos meus amados avós, Arnaldo Pereira da Silva e Ivane Pereira da Silva, que, mesmo tendo concluído sua jornada nesta terra, permanecem vivos em minhas lembranças e em meu coração. Seus exemplos de união, bondade e resiliência sempre me acompanharam e continuam a me guiar como luzes silenciosas no meu caminho. Foram pilares fundamentais na minha formação, e sei que, agora como anjos, seguem me inspirando e torcendo por mim.

Aos meus pais, Maria de Fátima Pereira da Silva e Iraquitan Belizário Alves, pelo amor e suporte em cada etapa da minha vida, transmitindo valores essenciais como determinação, trabalho, garra, honestidade, humildade e ética. Aos meus padrastos, José Carlos elias e Teila Giovanetti Tenório, pela dedicação, incentivo e pelo conhecimento compartilhado ao longo dessa trajetória. Aos meus irmãos, com um carinho especial para Maria Ingrid Pereira Alves e Pedro Henrique Giovanetti Tenório Alves, pela parceria e pelo apoio constantes.

À República Mexicanas, em Belo Jardim, onde construí laços de amizade e vivi experiências enriquecedoras que ampliaram minha visão de futuro profissional. Ao Colégio Visão, onde dei meus primeiros passos na jornada acadêmica, cercada de grandes amigos e professores exemplares, e onde nasceu minha paixão por cálculos e soluções engenhosas.

À Universidade Federal de Pernambuco, onde estou concluindo minha graduação em Engenharia Mecânica. Foi nesse ambiente que aprimorei minhas habilidades técnicas, desenvolvi resiliência e aprofundei meu conhecimento. Agradeço, em especial, à EIXO Consultoria, projeto de extensão no qual atuei por dois anos e meio, vivenciando aprendizados fundamentais e construindo amizades valiosas.

Sou imensamente grata a todos os profissionais que contribuíram para minha formação, transmitindo não apenas conhecimento técnico, mas também lições de vida. Em especial, à professora Janaina Moreira de Meneses, uma mulher inspiradora, de energia única, cuja dedicação e competência como educadora me

marcaram profundamente. Foi uma honra ter sido orientada por uma profissional tão excepcional.

Por fim, aos amigos e colegas, pelo incentivo, apoio e companheirismo ao longo dessa jornada. A todos, meu sincero agradecimento.

“A verdadeira motivação vem de realização, desenvolvimento pessoal, satisfação no trabalho e reconhecimento.”

Frederick Herzberg

“Cada instante da existência representa uma valiosa oportunidade de aprendizado e crescimento interior. Aproveitar os momentos mais simples com consciência é parte essencial da jornada evolutiva do Espírito.”

Emmanuel, psicografado por Chico Xavier

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo propor melhorias no sistema de recirculação de água utilizado na etapa de carga das baterias chumbo-ácido, conhecida como etapa de formação, em uma indústria de acumuladores elétricos. Essa fase é crítica devido à longa duração e à necessidade de controle rigoroso de variáveis como tempo e temperatura. A pesquisa concentrou-se na temperatura da água de resfriamento, identificada como fator relevante para a produtividade, por impactar diretamente o tempo de carga. Foram aplicadas ferramentas como análise de tempos, brainstorming, método de tentativa e erro e matriz de priorização, com o intuito de identificar as principais causas do problema. A coleta de dados ocorreu por meio de medições com termômetro industrial, observações diretas no processo e análise de registros do sistema de monitoramento da empresa. A partir das informações levantadas, elaborou-se um plano de ação que incluiu a reprogramação do tempo de recirculação da água e a prototipagem das melhorias. Como resultado, obteve-se uma redução de uma hora no tempo total do ciclo de formação, passando de 23h13 para 22h13, o que resultou em um aumento de produtividade de 357 baterias por mês no banco de testes. A projeção para toda a seção indica um ganho de 9.286 baterias mensais, com impacto financeiro estimado em R\$ 98.636,00 por mês. Conclui-se que a aplicação estruturada de ferramentas da qualidade contribuiu significativamente para a melhoria do processo, promovendo eficiência operacional e ganhos econômicos para a empresa.

Palavras-chave: Eficiência industrial. Recirculação de água. Processo de formação. Baterias chumbo-ácido. Ferramentas da qualidade.

ABSTRACT

This study aimed to propose improvements to the water recirculation system used during the charging stage of lead-acid batteries, specifically the formation stage, in an electric battery manufacturing industry. This phase is critical due to its long duration and the need for strict control of variables such as time and temperature. The research focused on the cooling water temperature, identified as a key factor for productivity due to its direct impact on charging time. Tools such as time analysis, brainstorming, trial-and-error method, and prioritization matrix were applied to identify the main causes of the problem. Data collection was carried out through measurements using an industrial thermometer, direct observation of the process, and analysis of records from the company's monitoring system. Based on the gathered information, an action plan was developed, which included reprogramming the water recirculation time and prototyping the proposed improvements. As a result, there was a one-hour reduction in the total formation cycle time, from 23h13 to 22h13, leading to an increase in productivity of 357 batteries per month in the test bench. The projection for implementation across the entire section indicates a potential gain of 9,286 batteries per month, with an estimated financial impact of R\$ 98,636.00 per month. It is concluded that the structured application of quality tools significantly contributed to process improvement, promoting operational efficiency and economic gains for the company.

Keywords: Industrial efficiency; Water recirculation; Formation process; Lead-acid batteries; Quality tools.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-Primeira bateria chumbo-ácido recarregável, constituída de nove células conectadas em paralelo.	18
Figura 2- Célula de um acumulador chumbo-ácido.....	20
Figura 3 - Componentes básicos de uma bateria chumbo-ácido.	22
Figura 4- Fluxograma do processo de fabricação de baterias de chumbo-ácido.	23
Figura 5- Representação da grade de chumbo utilizada nas placas de bateria.	24
Figura 6- Representação dos componentes da placa da bateria de chumbo-ácido..	25
Figura 7- Fluxograma das etapas do processo de formação da bateria de chumbo-ácido.	26
Figura 8- Representação de uma bateria preenchida com ácido sulfúrico.....	26
Figura 9 - Banco de formação O.M Impianti.....	27
Figura 10 - Representação do layout da primeira etapa de enchimento do banco. ..	27
Figura 11 - Representação de uma vista lateral de um banco de formação com água.	28
Figura 12 - Representação de uma vista lateral de um banco de formação com água na etapa de troca de água.	29
Figura 13 - Fluxograma das etapas do trabalho.....	32
Figura 14 - Estratificação do custo das perdas no setor da formação.....	35
Figura 15 - Gráfico do impacto de perda por bateria (h).	37
Figura 16 - Análise do tempo (h) de formação por banco Bateria 4.	38
Figura 17 - Perdas do banco 132 (SEC 07).	38
Figura 18 - Gráfico do acompanhamento do processo de carga de um circuito.	40
Figura 19 - Gráfico da variação da temperatura da água ao longo do tempo.	41
Figura 20 - Esquema comparativo dos tempos de recirculação do sistema antes e durante o teste.	46
Figura 21 - Resultado da prototipagem inversa.....	47
Figura 22 - Comparativo do tempo de formação da Bateria 4.....	50
Figura 23 - Análise da capacidade produtiva mensal no banco 132.	51
Figura 24 - Estimativa de aumento de capacidade com a implementação do novo ciclo de formação.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados das perdas em horas das baterias analisadas.....	36
Tabela 2 - Matriz de priorização dos parâmetros com critérios técnicos.....	43
Tabela 3 - Parâmetros antes da prototipagem inversa.....	45
Tabela 4 - Resultados dos testes.....	49

LISTA DE SÍMBOLOS

V	Volts
PbO_2	Dióxido de chumbo
Pb	Chumbo
PbSO_4	Sulfato de chumbo
H_2SO_4	Ácido sulfúrico
H	Hidrogênio
e	Elétron
H_2O	Água
g	Grama
cm^3	Centímetros cúbicos
°C	Grau celsius
A	Amper
Ah	Ampere-hora
T. O	Temperatura de Operação
$t_{teorico.}$	Tempo teórico
Ah_{acu}	Ampére hora acumulado
$Corr_{max}$	Corrente máxima
h	Hora
kg	Quilograma
s	Segundo
K	Kelven
Min	Minuto
s	Segundo
mm	Milímetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivos Específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	ACUMULADORES ELÉTRICOS	17
2.2	BATERIA DE CHUMBO – ÁCIDO	19
2.2.1.	Conceitos químicos da bateria	19
2.2.2.	Principais componentes de um acumulador	21
2.2.3.	Processo produtivo da bateria	22
3	METODOLOGIA	31
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO	31
3.2	DESCRIÇÃO DAS ETAPAS METODOLÓGICAS UTILIZADAS NO ESTUDO	
	31	
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1	ANÁLISE DO BANCO DE DADOS DE CUSTO DE PRODUÇÃO NA FORMAÇÃO	35
4.2	SELEÇÃO DO MODELO DA BATERIA E BANCO DE FORMAÇÃO DO ESTUDO	36
4.2.1.	Seleção do modelo da bateria	36
4.2.2.	Seleção do banco de formação	37
4.3	IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA	38
4.3.1.	Estudo da origem do problema.	39
4.4	IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS E VARIÁVEIS NO PROCESSO	42
4.4.1.	Impacto do tempo fixo de recirculação na eficiência da troca de calor durante a formação	43
4.5	ESTUDO DO TEMPO IDEAL DE PROCESSO	44
4.5.1.	Parâmetros da prototipagem	45
4.5.2.	Resultado da prototipagem inversa	46
4.6	LISTA DE TAREFAS	48
4.6.1.	Análise e revisão do código de programação do sistema	48
4.6.2.	Análise e alteração do tempo de recirculação	49
4.7	ANÁLISE DOS RESULTADOS	49
5	CONCLUSÃO	53
	REFERÊNCIAS	55

1. INTRODUÇÃO

O estudo do processo de produção de determinado produto é muito importante para evitar desperdícios e visualizar oportunidades de melhoria na produtividade e custo (Slack et al., 2020).

Na área de acumuladores elétricos, a bateria de chumbo-ácido tem um papel relevante no cenário da indústria automotiva, pois produz a energia necessária para a partida do carro e funcionamento da maior parte dos componentes eletrônicos (Basso, 2017). De acordo com o relatório sobre baterias automotivas da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2019), a bateria é um aparato eletroquímico onde a energia sob a forma química é convertida em energia elétrica, tornando-se possível a utilização dessa energia.

O processo produtivo da bateria automotiva é composto por três etapas distintas. A primeira é a montagem dos componentes da bateria. Em seguida, ocorre a etapa de formação, considerada a mais longa, na qual as reações eletroquímicas convertem o sulfato de chumbo das placas em óxidos ativos, armazenando energia elétrica de forma eficiente. Durante essa fase, o controle da temperatura é crucial: a reação é fortemente exotérmica, e temperaturas elevadas podem comprometer aditivos e reduzir o desempenho da bateria, enquanto temperaturas mais amenas favorecem uma formação mais rápida e eficiente. A aplicação de água em contato com a superfície externa da bateria facilita a troca térmica e mantém as condições ideais durante a formação. Por fim, são realizados os testes finais de qualidade, simulando condições reais de uso para assegurar o desempenho operacional. (Walkowiak et al., 2025).

Todas essas fases impactam no custo de produção do produto, porém a etapa da formação da bateria é uma das etapas de maior impacto financeiro. Com isso, este trabalho tem como objetivo avaliar o processo de transferência de calor durante a etapa de formação das baterias, a fim de propor melhorias no sistema de recirculação de água, com foco no aumento da produtividade e, consequentemente, na redução de custos operacionais.

A pesquisa foi conduzida por meio de uma sequência estruturada de etapas aplicadas à análise do sistema de recirculação de água durante a formação

das baterias. Como resultado, a otimização do tempo de recirculação permitiu reduzir em uma hora o ciclo de formação, elevando a produtividade em 357 baterias por mês em um único banco de testes, com potencial de crescimento superior a 9 mil unidades mensais quando aplicado em toda a seção analisada.

A justificativa para a realização deste estudo está relacionada à sua relevância tanto acadêmica quanto prática. Para a formação de um engenheiro mecânico, compreender e propor soluções voltadas à eficiência térmica de processos industriais é fundamental, pois esses conhecimentos são amplamente aplicáveis em ambientes produtivos reais. Do ponto de vista empresarial, o estudo contribui com ganhos econômicos expressivos e potencial redução de impactos ambientais, especialmente pelo uso mais racional de recursos como a energia elétrica. Além disso, o tema está diretamente associado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial ao ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura) e ao ODS 12 (Consumo e produção responsáveis), fortalecendo o compromisso com a sustentabilidade e a melhoria contínua dos processos industriais.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o tempo e a temperatura do banho das baterias durante a etapa de formação e propor mudanças no sistema de recirculação da água usada neste processo.

1.2.1 Objetivos Específicos

Este trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- Acompanhar a variação de temperatura da água do banho ao longo do tempo de formação das baterias;
- Avaliar a curva do tempo de troca de água do banho ao longo do tempo de formação das baterias;
- Definir os parâmetros que influenciam na eficiência do sistema de formação;
- Propor melhoria no sistema estudado.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 ACUMULADORES ELÉTRICOS

A conversão de energia química em energia elétrica por meio de processos eletroquímicos, como ocorre em acumuladores, apresenta eficiências superiores à conversão termoquímica realizada por motores térmicos. Isso se deve ao fato de que sistemas eletroquímicos não estão sujeitos aos limites impostos pelo ciclo de Carnot. Estudos recentes mostram que motores de calor eletroquímicos em ciclo quase-Carnot podem operar com eficiências térmicas próximas ao limite teórico, mantendo viabilidade operacional (Chen et al., 2023).

Esse princípio, presente nas baterias chumbo-ácido, tem origem nas descobertas do cientista italiano Alessandro Volta. Em 1800, Volta demonstrou que a combinação de metais diferentes imersos em soluções químicas podia gerar eletricidade (Michelini, 2017). Essa descoberta foi o marco inicial para o desenvolvimento das tecnologias eletroquímicas amplamente utilizadas hoje na indústria.

Em 1802, Willian Cruickshank projetou a primeira bateria para produção em massa. Ele cortou várias chapas quadradas de zinco e cobre de igual tamanho. Essas chapas foram colocadas dentro de uma caixa selada de madeira e foram soldadas entre si. Depois a caixa de madeira era preenchida com uma solução ácida.

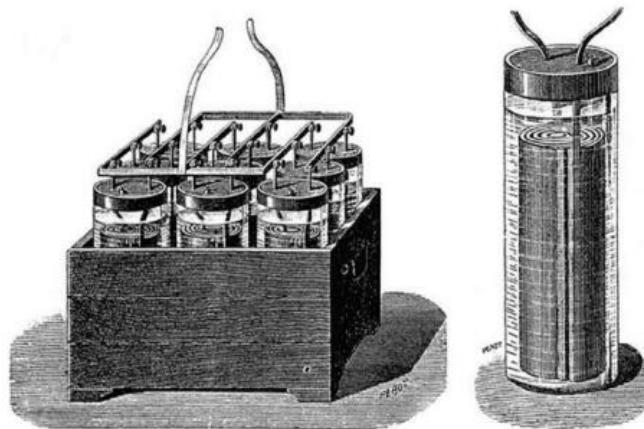
Em 1836, John F. Daniell, um químico inglês, inventou uma bateria capaz de produzir eletricidade de forma mais estável que as anteriores. O funcionamento da pilha de Daniell é semelhante a pilha de Volta já que possui eletrodos feitos de cobre e zinco. Porém, na pilha de Daniell os eletrodos estão em compartimentos separados e se utiliza uma ponte salina para fechamento do circuito elétrico. Os eletrodos de cobre e zinco são imersos numa solução de sulfato de cobre e sulfato de zinco, respectivamente. A pilha de Daniell foi uma das baterias antigas mais bem-sucedidas, sendo usada para alimentar dispositivos de comunicação.

Em 1865, o engenheiro francês Georges Leclanché inventou uma bateria que pode ser considerada a precursora das pilhas comuns que são usadas hoje em

dia. A pilha de Leclanché não é recarregável, pois a reação química que ocorre em seu interior é irreversível.

Em 1859, o físico francês Gaston Planté inventou a primeira bateria recarregável à base de chumbo e ácido, que se tornou o primeiro tipo de bateria recarregável a ser comercializado, sendo constituída de dois eletrodos, um de chumbo e o outro de dióxido de chumbo, ambos mergulhados em uma solução de ácido sulfúrico (Pavlov, 2011). Esta célula é capaz de produzir 2 volts. Associando-se várias células em série conseguem-se tensões maiores, como por exemplo, 12V que é a tensão mais comum nas baterias de carros.

Figura 1-Primeira bateria chumbo-ácido recarregável, constituída de nove células conectadas em paralelo.



Fonte: Pavlov (2011).

Com o passar do tempo a bateria de chumbo ácido evoluiu e hoje é observado as baterias de chumbo seladas - VRLA (valve-regulated lead acid – bateria de chumbo-ácido regulada por válvula) ou bateria de gel que é um tipo de bateria de chumbo-ácido livre de manutenção.

Por ser selada pode estar em ambientes fechados, pois não libera gases nocivos. A partir disso, os acumuladores elétricos têm diversas aplicações no cotidiano e pode-se citar algumas de suas aplicações:

- Dispositivos móveis tais como notebooks, celulares, câmeras digitais;
- Veículos elétricos e híbridos;

- Energia de reserva para aplicações críticas tais como nobreaks, centrais telefônicas e sistemas de iluminação de emergência;
- Energia de partida, normalmente utilizada em veículos automotores. (Perger, 2018)

O princípio de funcionamento de uma bateria de chumbo-ácido envolve uma reação química que ocorre entre o chumbo e o ácido sulfúrico em uma solução eletrolítica. A bateria é composta por células individuais, cada uma das quais contém um conjunto de placas de chumbo e ácido sulfúrico.

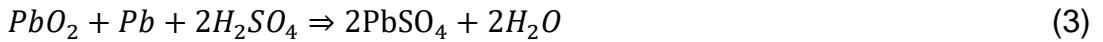
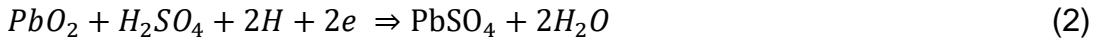
Quando a bateria é carregada, uma corrente elétrica é aplicada às placas de chumbo, o que provoca uma reação química que converte o ácido sulfúrico em água e produz chumbo e chumbo peróxido nas placas. Essa reação química é reversível e, quando a bateria é descarregada, os íons de chumbo se movem entre as placas, produzindo eletricidade (Michelini, 2017).

Dessa forma, por sua capacidade de armazenar e fornecer energia elétrica de maneira eficiente e confiável, a principal aplicação da bateria chumbo-ácido se concentra na indústria automotiva (Carneiro et al., 2017). Nessa área, o acumulador é responsável por dar partida ao motor do veículo, além de alimentar o sistema de iluminação e diversos componentes eletrônicos auxiliares.

1.2 BATERIA DE CHUMBO – ÁCIDO

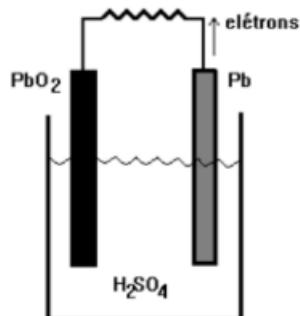
1.2.1. CONCEITOS QUÍMICOS DA BATERIA

As placas que compõem a bateria possuem diferentes substâncias: dióxido de chumbo (PbO_2) em uma placa e chumbo metálico (Pb) na outra. Quando essas placas são colocadas em um meio que favorece a troca de elétrons, ocorre uma transferência eficiente de elétrons entre elas. No acumulador chumbo-ácido, utiliza-se uma solução aquosa de ácido sulfúrico, conhecida como eletrólito. Nesse processo, o chumbo metálico perde elétrons, enquanto o dióxido de chumbo os recebe, resultando na formação de sulfato de chumbo ($PbSO_4$), conforme demonstrado nas reações descritas nas equações 1, 2 e 3 (Sciencedirect, 2023).



O processo de recarga da bateria envolve a transferência reversa de elétrons por meio de uma corrente elétrica externa, que regenera o chumbo e o dióxido de chumbo consumidos durante a descarga (Figura 2). A eficiência e o controle rigoroso desse mecanismo são essenciais para garantir a durabilidade e o desempenho da bateria ao longo de sua vida útil (Silva et al., 2022).

Figura 2- Célula de um acumulador chumbo-ácido.



Fonte: Adaptado da empresa (2020).

Os elétrons, sendo partículas de carga negativa, são atraídos por regiões de potencial elétrico positivo e repelidos por regiões de potencial elétrico negativo. Em um acumulador, o chumbo atua como o polo negativo e o dióxido de chumbo como o polo positivo. Ambos são utilizados na forma de placas (grades de chumbo revestidas por material ativo), de modo que a placa positiva é composta de dióxido de chumbo, e a placa negativa, de chumbo (Mendes, 2014).

A configuração básica de um acumulador consiste em uma placa positiva e uma placa negativa, separadas por um material poroso e imersas em uma solução eletrolítica de ácido sulfúrico. Quando carregadas, as placas são predominantemente formadas por dióxido de chumbo e chumbo metálico, respectivamente. Durante a descarga, ocorre a conversão das placas em sulfato de

chumbo, reduzindo a concentração do ácido sulfúrico na solução. Esse sistema gera uma diferença de potencial em torno de 2 volts, valor influenciado principalmente pela densidade do eletrólito absorvido nas placas.

A capacidade de carga depende da quantidade de material ativo presente nas placas. Para aumentar essa capacidade, podem ser adicionadas placas positivas e negativas adicionais em paralelo, formando um elemento. Para elevar a tensão do acumulador, múltiplos elementos são conectados em série, ligando as placas positivas de um elemento às placas negativas do seguinte, mantidas em compartimentos separados.

A garantia da eficiência na transferência de carga está diretamente relacionada ao controle preciso dos parâmetros durante a etapa de formação da bateria, sendo esse controle fundamental para o desempenho operacional do acumulador (almeida et al., 2021).

1.2.2. PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM ACUMULADOR

Segundo Ferreira et al. (2021), as baterias automotivas possuem basicamente os mesmos componentes independente do fabricante. Os acumuladores de chumbo ácido são compostos por:

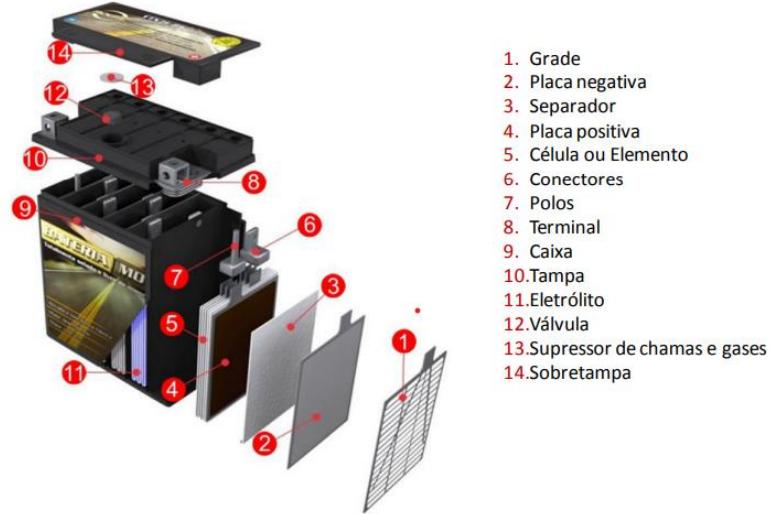
- Placas: são os materiais ativos das baterias. Para ocorrer a reação eletroquímica inversa e condução da corrente elétrica, é necessário que tenha o cátodo que é a placa positiva com o dióxido de chumbo (PbO_2) e a placa negativa com o chumbo esponjoso (Pb).
- Separadores: são envelopes constituídos de polietileno, cuja principal função é separar a placa positiva da placa negativa evitando a geração do curto-circuito por contato ou misturas das massas.
- Célula ou elemento: são as células básicas de uma bateria de chumbo ácido. Eles são aglomerados de placas positivas e negativas unidos por um *strap*.
- Straps ou conectores: peças de chumbo responsáveis por interligar todas as placas positivas e as placas negativas.
- Caixas: as caixas são de polipropileno (PP) com compartimento para seis células e o eletrólito. Cada compartimento possui um elemento individual e

são separados por uma parede plástica unidos apenas por uma solda no conector/strap.

- Terminais: possibilitam a interligação da bateria ao circuito externo, do automóvel.
- Tampa: tem como objetivo assegurar a vedação da bateria. As tampas são fabricadas com o mesmo material da caixa (polipropileno - PP) e incluem orifícios para inspeção visual do interior da bateria, bem como para os postes.
- Eletrólito: solução de ácido sulfúrico diluído (H_2SO_4) indispensável para que ocorra as reações eletroquímicas.
- Sobretampa: tem como objetivo assegurar a vedação final da bateria. As sobretampas também são fabricadas com o mesmo material da caixa e tampa (polipropileno – PP) incluindo uma saída de gás.

A Figura 3 representa os componentes básicos de uma bateria chumbo-ácido EFB (Carneiro et al., 2017).

Figura 3 - Componentes básicos de uma bateria chumbo-ácido.



Fonte: (Carneiro et al., 2017).

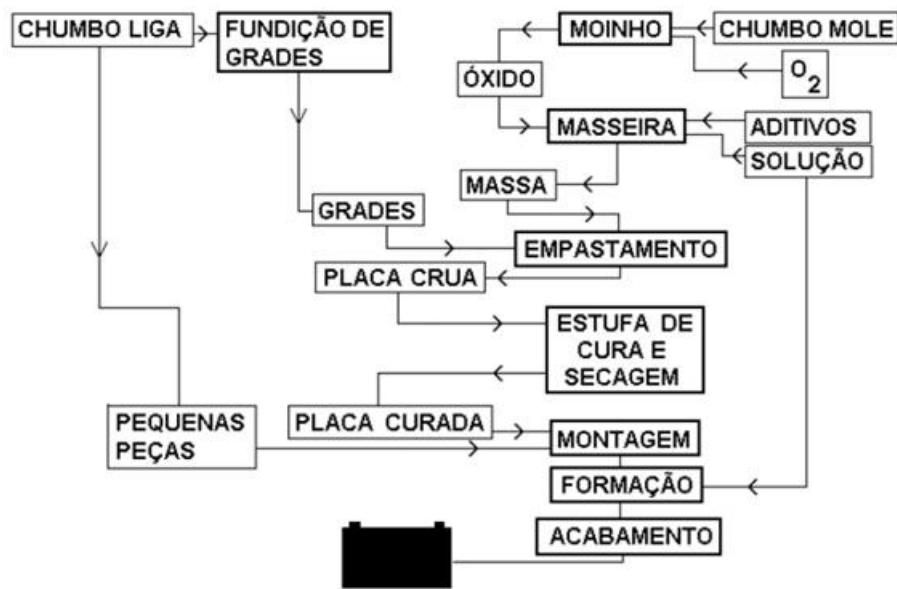
1.2.3. PROCESSO PRODUTIVO DA BATERIA

Uma das primeiras baterias produzidas em escala industrial foi a bateria de chumbo-ácido, desenvolvida por Gaston Planté em 1860. Essa tecnologia permanece amplamente utilizada até hoje, sendo considerada madura e consolidada após mais de um século de produção contínua (Pavlov, 2011; Ferreira et al., 2021).

No contexto automotivo, sua principal função é fornecer uma corrente elétrica elevada durante um curto intervalo de tempo, necessária para acionar o motor de partida e permitir o funcionamento inicial do motor de combustão interna. Além disso, a bateria também supre energia aos sistemas elétricos do veículo, mesmo quando o motor está desligado. Para atender a essas exigências, a bateria automotiva deve ser capaz de operar sob uma ampla faixa de temperaturas e, preferencialmente, apresentar baixa exigência de manutenção ao longo de sua vida útil (Silva et al., 2022).

Diante desses requisitos de aplicação, o processo de fabricação da bateria automotiva torna-se fundamental para assegurar seu desempenho e confiabilidade. Seu processo produtivo é descrito pela figura abaixo.

Figura 4- Fluxograma do processo de fabricação de baterias de chumbo-ácido.



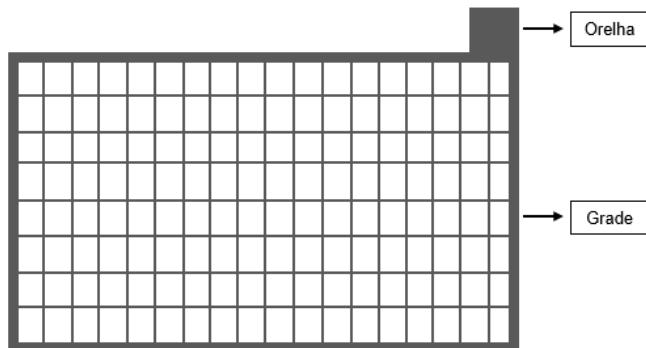
Fonte: Adaptado da empresa (2020).

A fabricação das placas de baterias chumbo-ácido inicia-se com a produção do óxido de chumbo, que é obtido a partir do chumbo mole processado em moinhos. Existem dois métodos principais para essa produção: o processo de Barton e o moinho de atrito. No primeiro, o chumbo fundido é continuamente oxidado em um reator; no segundo, pedaços sólidos de chumbo são triturados por atrito, gerando calor e promovendo a oxidação. Ambos os processos resultam em uma

mistura de óxido de chumbo (PbO) com uma fração de chumbo metálico livre, que pode variar entre 20% e 30% em massa (Palmer, 2008; Bastos, 2022).

A próxima etapa consiste na produção das grades, que servem de suporte para a massa ativa. Utiliza-se o chumbo de liga, pois sua composição confere melhor processabilidade, resistência mecânica e maior resistência à corrosão, em comparação ao chumbo puro (Flamarion, 1993). As grades podem ser fabricadas por fundição por gravidade, onde o metal líquido é vertido em moldes aquecidos, ou por métodos contínuos, como a fundição sobre tambor rotativo ou o uso de chumbo expandido (Pavlov, 2011).

Figura 5- Representação da grade de chumbo utilizada nas placas de bateria.

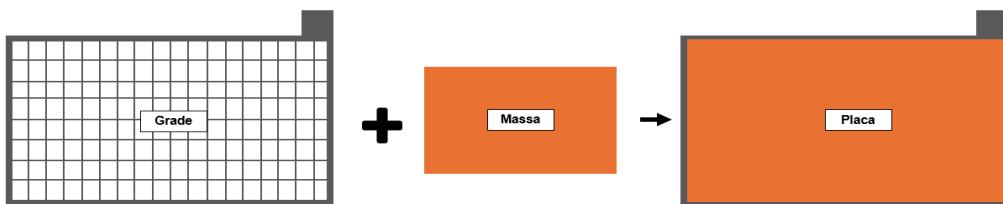


Fonte: Adaptado da empresa, (2025).

Em seguida, é realizada a produção da massa, processo no qual o óxido de chumbo é misturado com água, ácido sulfúrico e aditivos específicos em masseiras. Essa mistura forma uma pasta que será aplicada às grades. A fibra é adicionada para melhorar a consistência mecânica, enquanto a água e o ácido reagem com o óxido, formando compostos sulfatados. A formulação da massa varia entre os polos positivo e negativo, principalmente nos aditivos utilizados (Flamarion, 1993).

Após o empastamento, as placas são submetidas ao processo de cura, que ocorre em câmaras com controle de temperatura e umidade. Essa etapa é fundamental para promover a aderência da massa à grade, por meio da oxidação superficial, crescimento de cristais e coesão entre partículas (Pavlov, 2011). Por fim, as placas passam pela etapa de secagem, cuja função é remover a umidade residual, garantindo estabilidade e qualidade antes da montagem do acumulador.

Figura 6- Representação dos componentes da placa da bateria de chumbo-ácido.



Fonte: Adaptado da empresa, (2025).

Na etapa de montagem, ocorre o primeiro processo da produção no qual a união de insumos resulta na bateria ainda em seu estado seco ou cru. Com as placas previamente curadas e secas, elas seguem para o setor de montagem. Essa fase consiste no agrupamento das placas positivas e negativas, com a inserção dos separadores entre elas. Os separadores têm a função de evitar o contato direto entre placas de polaridades distintas, prevenindo curtos-circuitos e garantindo a integridade do sistema eletroquímico (Ferreira et al., 2021).

A junção dos elementos forma o conjunto básico que será inserido na caixa da bateria. Após o posicionamento dos seis elementos, realiza-se a conexão elétrica por meio da solda intercell, que assegura a passagem uniforme da corrente elétrica entre as células. Em seguida, ocorre a selagem da tampa e a formação dos terminais, responsáveis pela ligação elétrica da bateria com o circuito externo do veículo (Silva et al., 2022).

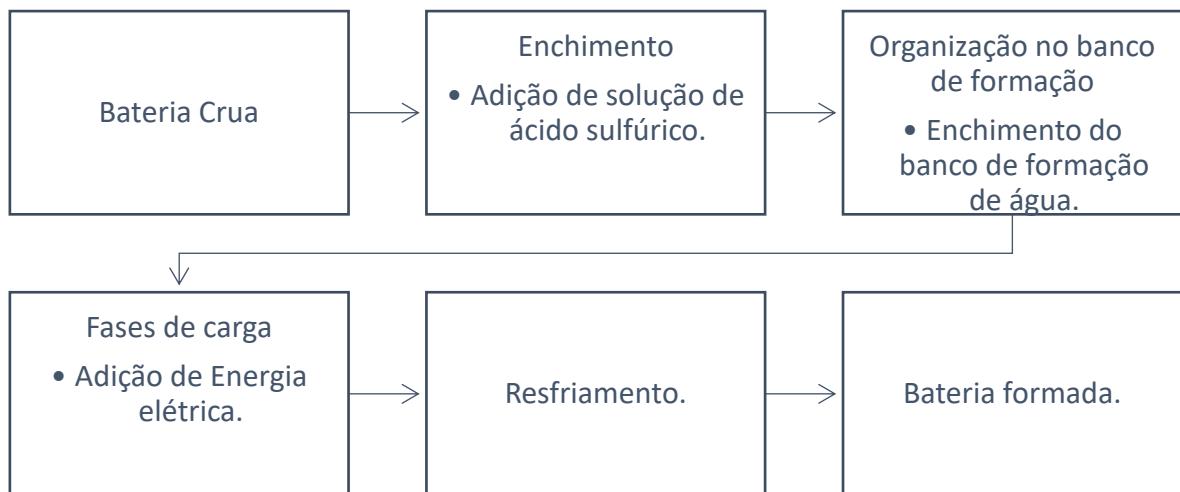
Nesse estágio, as placas estão prontas para a montagem estrutural. Essa etapa envolve a soldagem das orelhas das placas, a inserção dos elementos nas caixas, a realização das conexões elétricas entre os elementos por meio da solda intercell e, por fim, a selagem da tampa, assegurando a vedação e o alinhamento mecânico do conjunto (Pavlov, 2011).

Em seguida, as baterias secas são submetidas ao processo de formação, etapa na qual os componentes eletroquímicos são ativados: a placa positiva converte-se em dióxido de chumbo (PbO_2) e a negativa, em chumbo esponjoso (Pb). Essa transformação é essencial para garantir a funcionalidade elétrica e a

reversibilidade do ciclo de carga e descarga (Advances and challenges in improvement of the electrochemical performance for lead-acid batteries, 2022).

O processo de formação é ilustrado nas etapas do fluxograma mostrado na Figura 7. Durante essa fase, ocorre uma significativa liberação de energia na forma de calor, devido à natureza exotérmica das reações durante a etapa de formação da bateria. Portanto, é essencial monitorar e controlar a temperatura ao longo de todas as fases de carga para evitar danos aos componentes internos da bateria.

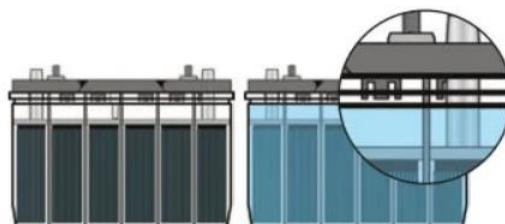
Figura 7- Fluxograma das etapas do processo de formação da bateria de chumbo-ácido.



Fonte: Adaptado da empresa, (2025).

A primeira fase do processo de formação de bateria é o enchimento das baterias com eletrólito a base ácido sulfúrico e água, em concentrações que variam de 1,050g/cm³ até 1,250g/cm³ (Pavlov, 2011).

Figura 8- Representação de uma bateria preenchida com ácido sulfúrico..



Fonte: Adaptado de Crown Battery, (2024).

Nessa fase, as baterias cruas são transportadas por uma esteira até uma máquina de enchimento, que preenche as células das baterias até o nível especificado. Após o enchimento, as baterias são encaminhadas para organização manualmente dentro do banco de formação.

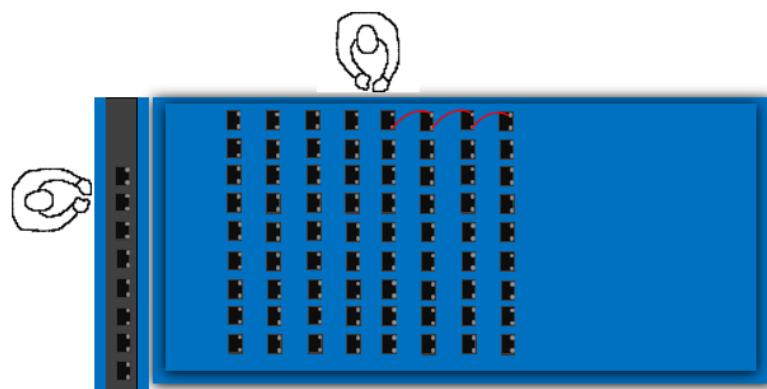
Figura 9 - Banco de formação O.M Impianti.



Fonte: OMI-NBE,(2024).

Na etapa de organização das baterias nos bancos de formação é necessário posicionar corretamente as baterias em fileiras realizar a ligação das baterias em série através de um cabo de ligação de cobre, conforme ilustrado na figura 10.

Figura 10 - Representação do layout da primeira etapa de enchimento do banco.

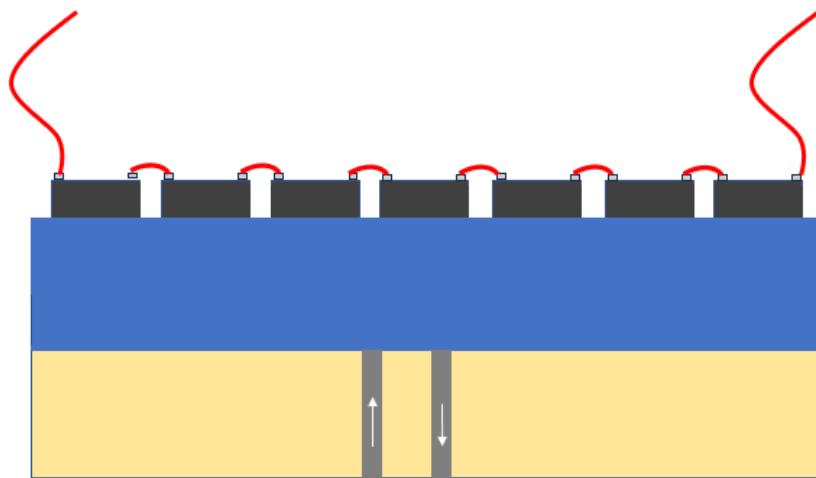


Fonte: Adaptado da empresa, (2025).

O banco de formação tem a capacidade para duzentos e cinquenta e seis baterias, organizadas em dezesseis circuitos. Cada circuito é composto por dezesseis baterias ligadas em série.

Após essa organização, o operador fecha a porta de entrada do banco e aciona o sistema automático para preencher o banco com água, imergindo as baterias até uma altura específica. Em seguida, inicia-se a fase de carregamento.

Figura 11 - Representação de uma vista lateral de um banco de formação com água.



Fonte: Adaptado da empresa, (2025).

Segundo Pavlov (2011), antes do início da formação elétrica, é comum mergulhar as placas em solução de ácido sulfúrico por 0,5 a 2 horas, processo conhecido como *soaking time*, para garantir a formação de sulfato de chumbo. O carregamento subsequente ocorre em cinco fases, com limites de corrente ajustados conforme a temperatura, e duração proporcional à quantidade de ampere-hora acumulada e à temperatura da bateria.

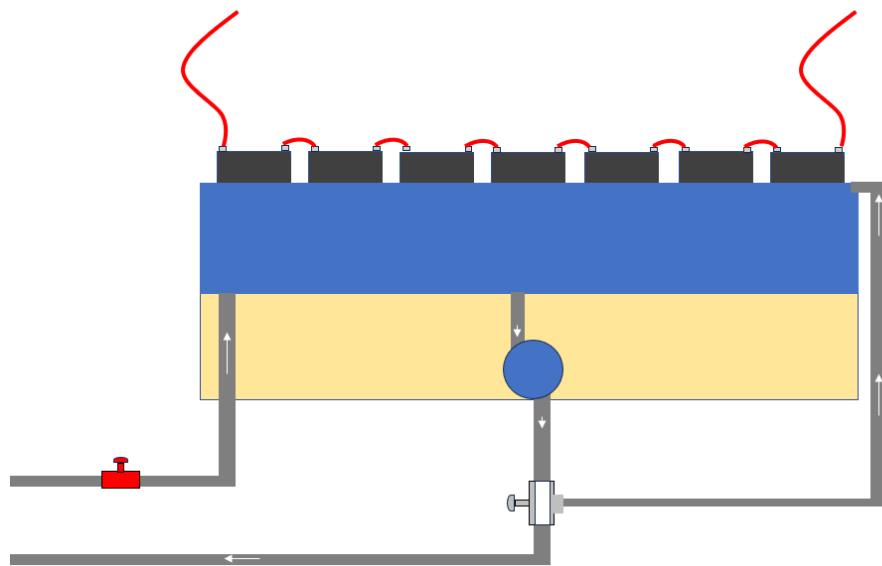
Nesse contexto, o tempo de formação do banco que processa até 256 baterias simultaneamente, é diretamente influenciado pelas correntes aplicadas em cada fase, as quais são moduladas de acordo com a temperatura interna da bateria: temperaturas elevadas reduzem a corrente e, consequentemente, prolongam o ciclo. Kiessling (n.d.) reforça que o principal desafio no tempo de formação está no controle térmico, já que temperaturas elevadas podem limitar a eficiência do processo.

Como alternativas para reduzir esse tempo, destaca-se o uso de ácido refrigerado no enchimento ($<10^{\circ}\text{C}$), aplicação de múltiplas taxas de carga em horários programados e adição de ar forçado para resfriamento, o que possibilita o uso de correntes mais elevadas e encurta significativamente o ciclo de formação.

Para garantir a manutenção da temperatura ideal durante o carregamento, o sistema de formação adota a água como fluido térmico, o que favorece uma troca de calor mais eficiente. Ao fechar as portas do banco e acionar o enchimento automático, as baterias são imersas em água, permitindo que o sistema supervisório monitore e controle automaticamente variáveis críticas, mantendo as temperaturas dentro da faixa especificada (Montalvo, 2020).

A utilização de água como meio de resfriamento é amplamente reconhecida por sua eficácia em otimizar processos térmicos em sistemas de energia (Smith; Zhang, 2019). A Figura 12 ilustra o banco de formação após o processo de enchimento com água.

Figura 12 - Representação de uma vista lateral de um banco de formação com água na etapa de troca de água.



Fonte: Adaptado da empresa, (2025).

O sistema efetua a troca de um pequeno volume de água sempre que a temperatura ultrapassa o limite especificado. Após a remoção desse volume, ele é substituído por água proveniente de um sistema de torre de refrigeração. Em

seguida, o sistema inicia o processo de recirculação, transportando a água da parte inferior do banco para a parte superior. Esse ciclo se repete durante todo o processo de formação da bateria.

Após a etapa de carga da bateria é necessário aguardar o seu resfriamento até uma temperatura abaixo de 40°C. Essa etapa é necessária para ajudar a equilibrar a temperatura entre as células da bateria, assegurando que todas operem dentro das faixas ideais. Isso é crucial para a saúde da bateria a longo prazo, prevenindo problemas que possam surgir devido a discrepâncias de temperatura (Pavlov, 2011).

Após a formação, o acumulador de energia já está carregado e tem a capacidade de dar partida em um carro. Entretanto, antes de entregar a bateria ao cliente, é necessário passar pelo processo de acabamento.

Nesta fase, são realizados os seguintes procedimentos: nivelamento do ácido, verificação do nível da solução, lavagem da superfície da bateria, testes de alta descarga, selagem da sobretampa e inspeção da vedação da sobretampa e da tampa da bateria. Esses testes finais visam assegurar a qualidade do produto e garantir sua durabilidade.

2 METODOLOGIA

A presente pesquisa adota uma abordagem aplicada, orientada para a melhoria contínua do processo produtivo, buscando otimizar a eficiência térmica e operacional durante a etapa de formação das baterias de chumbo-ácido. Segundo Slack et al. (2020), pesquisas aplicadas são essenciais para identificar e implementar melhorias que aumentam a produtividade e reduzem custos em ambientes industriais reais, proporcionando ganhos econômicos e ambientais significativos.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

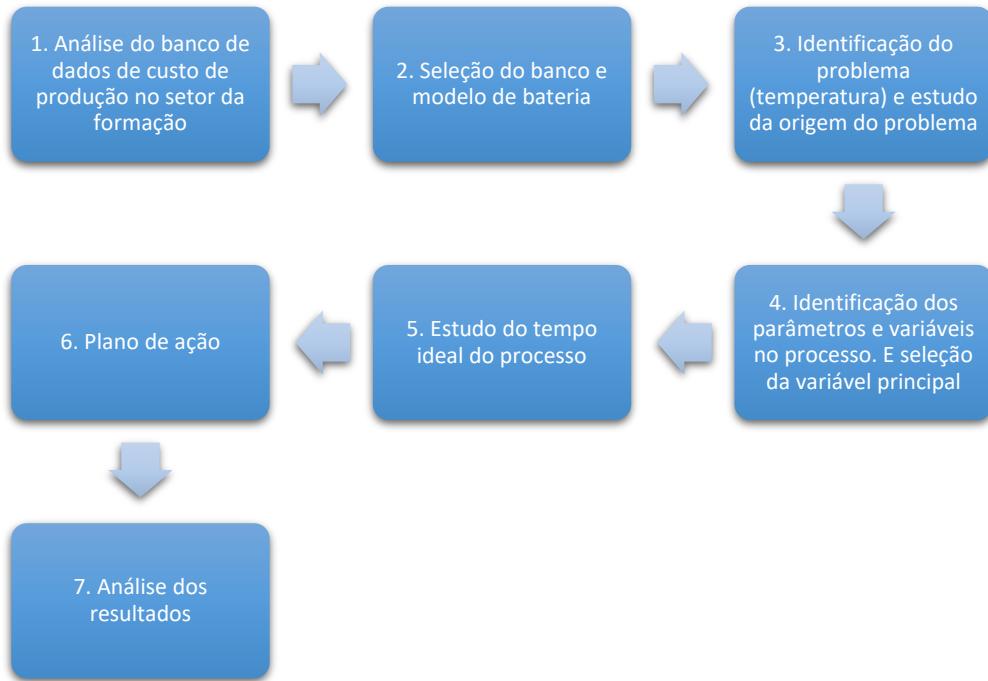
O estudo foi realizado em uma indústria fabricante de baterias de chumbo-ácido, focando na etapa de formação, denominada seção 07, que conta com 26 bancos de formação. O processo produtivo abrange diversas fases, desde a fabricação das placas até a montagem final, seguindo um fluxo operacional estruturado e sequencial.

A presença da indústria contribui significativamente para a economia local, promovendo a geração de empregos e renda para a comunidade. Contudo, a indústria também enfrenta desafios importantes de produtividade, especialmente na etapa de formação das baterias, fase em que ocorrem as cargas elétricas. Conforme evidenciado na revisão bibliográfica, essa etapa representa um ponto crítico da cadeia produtiva, devido à sua longa duração e à necessidade de controle preciso de variáveis como temperatura e tempo. Tais fatores influenciam diretamente a qualidade final do produto e afetam de maneira expressiva a produtividade do processo industrial.

2.2 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS METODOLÓGICAS UTILIZADAS NO ESTUDO

A Figura 13 apresenta, em formato de fluxograma, a sequência detalhada das etapas metodológicas adotadas para a execução desta pesquisa.

Figura 13 - Fluxograma das etapas do trabalho.



Fonte: Autora, (2025).

Na primeira etapa, foram coletados dados de custo e operação da seção 07, diretamente do sistema interno da empresa. Esses dados foram organizados e tratados em planilhas Excel, aplicando filtros para identificar as principais perdas, com foco nas paradas de equipamentos.

Para a seleção do modelo de bateria e do banco de formação a serem analisados, foi inicialmente realizada uma comparação entre o tempo teórico e o tempo real de formação de cada modelo. Os dados de tempo real foram obtidos por meio do sistema supervisório da empresa, enquanto os tempos teóricos foram calculados com base nos parâmetros internos de corrente aplicada e capacidade acumulada por fase. Após a coleta, os dados foram organizados e tratados em planilhas eletrônicas, possibilitando a análise comparativa entre os modelos. A partir dessa avaliação, foram definidos o modelo de bateria e o banco de formação com maior relevância operacional para as etapas subsequentes do estudo.

Na fase de identificação do problema, dados históricos de temperatura foram extraídos do sistema supervisório e complementados com medições manuais realizadas com termômetro digital em intervalos regulares durante o ciclo de recirculação. Esses dados foram tratados em Excel e confrontados com os limites

operacionais da empresa, evidenciando a temperatura elevada como causa principal das paradas.

Para identificar os fatores determinantes na elevação da temperatura durante o processo de formação, foi conduzida uma sessão de brainstorming com a equipe técnica da empresa, visando reunir e consolidar as variáveis críticas observadas na operação. As informações obtidas foram organizadas e tratadas em planilhas eletrônicas para análise sistemática. Em seguida, aplicou-se uma matriz de priorização, desenvolvida com base em critérios técnicos específicos (impacto na eficiência do processo, facilidade de monitoramento e viabilidade de intervenção) com o objetivo de hierarquizar as causas potenciais. Como resultado, o parâmetro “tempo fixo de recirculação” foi identificado como a variável de maior relevância e, portanto, selecionado para investigação aprofundada nesta pesquisa. A análise termodinâmica foi fundamentada na segunda lei da termodinâmica a qual estabelece os princípios que regem a direção dos processos energéticos e a irreversibilidade das trocas térmicas (Çengel & Boles, 2015). Para avaliar a transferência de calor no sistema de recirculação, utilizou-se a equação do calor sensível, expressa como:

$$Q = c \cdot \dot{m} \cdot \Delta T \quad (4)$$

Onde:

- Q é a quantidade de calor transferida (em joules, J);
- \dot{m} é a taxa de fluxo de massa (kg/s), que representa a quantidade de fluido que passa pelo sistema por unidade de tempo;
- c é o calor específico da substância ($J/kg \cdot ^\circ C$ ou $J/kg \cdot K$), uma propriedade que indica a quantidade de calor necessária para variar a temperatura de 1 kg da substância em $1^\circ C$;
- ΔT é a variação de temperatura ($T_f - T_i$, em $^\circ C$ ou K), ou seja, a diferença entre as temperaturas final e inicial do fluido.

A compreensão dessa teoria foi necessária para avaliar a relação da eficiência da troca térmica com o fluxo de massa.

Com base nesse embasamento, foram aplicadas ferramentas de prototipagem inversa para definição do tempo ideal de recirculação. Essa

prototipagem foi realizada no banco 132, ajustando-se o parâmetro de temperatura máxima, onde determina o tempo fixo de recirculação, com dados coletados e organizados em Excel.

Após a validação da prototipagem, elaborou-se um plano de ação que envolveu a alteração do código em linguagem Statement List (STL), no ambiente Siemens TIA Portal, com o suporte da equipe de automação. Para determinar o tempo ideal, aplicou-se o método de tentativa e erro, devido a viabilidade prática e baixo custo, testando tempos de recirculação de 2 minutos, 1 minuto e 1 minuto e 30 segundos, monitorando o impacto no tempo total de formação da bateria. Os resultados obtidos foram analisados para orientar as recomendações finais do projeto.

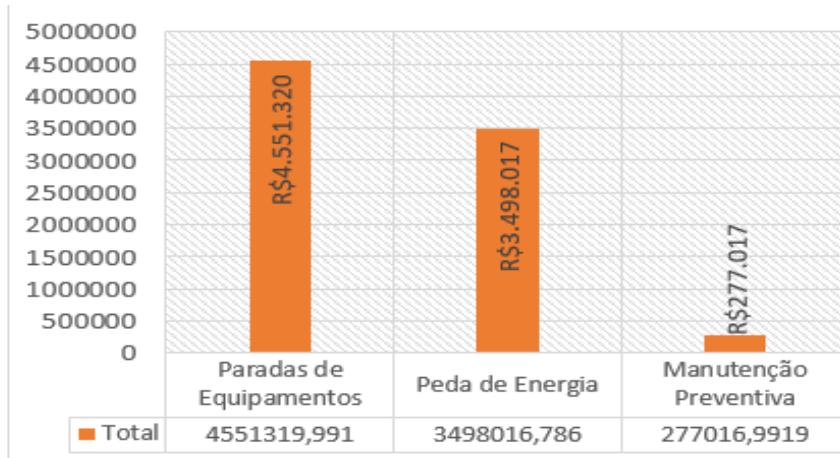
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta etapa do trabalho, são apresentados os principais resultados obtidos a partir da investigação realizada. A análise foi conduzida com base nos dados fornecidos pela empresa, buscando identificar as causas das perdas no setor de formação de baterias e propor soluções que contribuam para a melhoria da eficiência do processo produtivo.

3.1 ANÁLISE DO BANCO DE DADOS DE CUSTO DE PRODUÇÃO NA FORMAÇÃO

Com base nos dados extraídos das bases de dados da empresa, foi realizada uma análise detalhada na seção 07 do setor de formação de baterias, com foco na estratificação dos custos relacionados às perdas nesse estágio do processo produtivo. Conforme demonstrado na Figura 14, os dados evidenciam que a maior parcela dos custos está associada às paradas de equipamentos durante a etapa de formação.

Figura 14 - Estratificação do custo das perdas no setor da formação.



Fonte: Autora, (2025).

Diante da identificação de que as paradas de equipamentos representam a principal fonte de perdas, torna-se necessária uma investigação mais aprofundada para identificação da causa raiz. Para isso, será definida uma amostra específica, por meio da seleção de um modelo de bateria e de um banco de formação,

permitindo o aprofundamento da análise e a posterior validação das ações propostas.

3.2 SELEÇÃO DO MODELO DA BATERIA E BANCO DE FORMAÇÃO DO ESTUDO

3.2.1. Seleção do modelo da bateria

Para a análise do modelo de bateria em estudo, foi considerado o parâmetro comparativo entre o tempo teórico e o tempo real da etapa de formação, ambos obtidos a partir da base de dados interna da empresa. O tempo teórico representa o tempo ideal calculado para a formação, enquanto o tempo real corresponde ao registro efetivo do processo produtivo. A diferença entre os tempos teórico e real permite identificar perdas operacionais e ineficiências associadas à etapa de formação de uma batelada composta por 256 unidades, referente a um ciclo completo de um banco de formação, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados das perdas em horas das baterias analisadas.

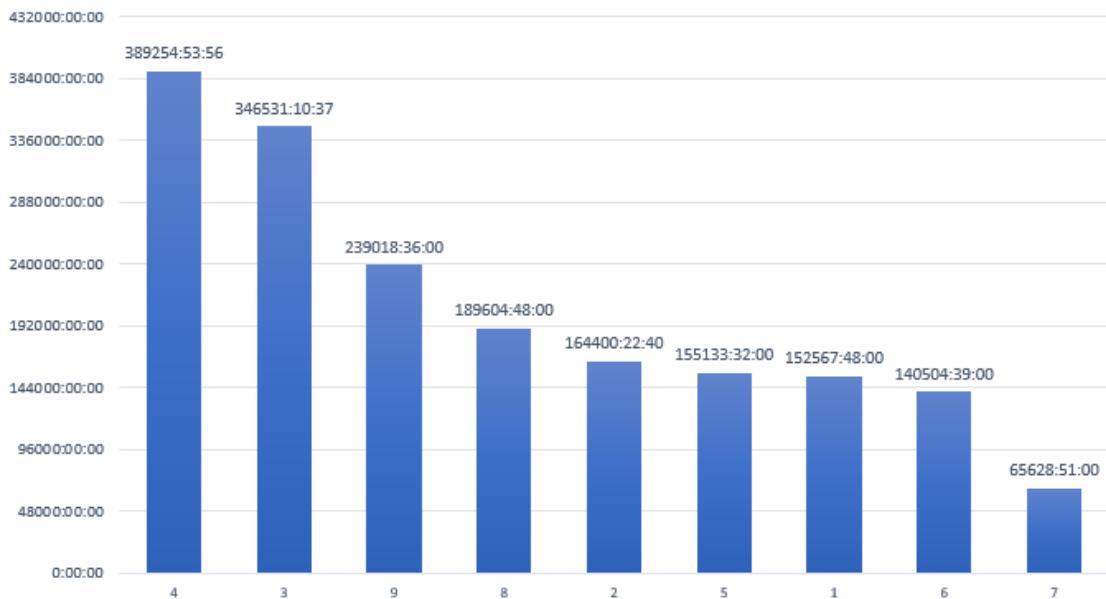
Modelo de Bateria	Tempo Teórico (h)	Tempo Real (h)	Perda (h)
1	17:50:00	25:32:00	7:42:00
2	12:46:00	20:26:20	7:40:20
3	18:08:00	30:35:11	12:27:11
4	14:49:00	19:42:13	4:53:13
5	13:51:00	20:32:00	6:41:00
6	13:30:00	21:07:00	7:37:00
7	14:23:00	21:20:00	6:57:00
8	14:40:00	22:46:00	8:06:00
9	10:27:00	15:08:00	4:41:00

Fonte: Autor, (2025).

Por fim, para definir qual modelo de bateria seria o foco do estudo, foi avaliado o volume de produção de cada um ao longo de três meses. A partir disso,

multiplicou-se o valor da perda individual pela frequência de produção no período, obtendo-se a perda total acumulada, conforme ilustrado no gráfico da Figura 15.

Figura 15 - Gráfico do impacto de perda por bateria (h).



Fonte: Autora, (2025).

Com base nesses resultados, conclui-se que o modelo 4 será a bateria escolhida para o estudo.

3.2.2. Seleção do banco de formação

Com a bateria do estudo avaliada, é preciso examinar o banco onde serão realizadas todas as análises e investigações para a prototipagem e identificação de melhorias. No gráfico da figura 16, foi observado que o de número 132 apresenta o maior tempo de formação da bateria 4 selecionada, que, portanto, estará associado a todo o estudo de caso.

Figura 16 - Análise do tempo (h) de formação por banco | Bateria 4.

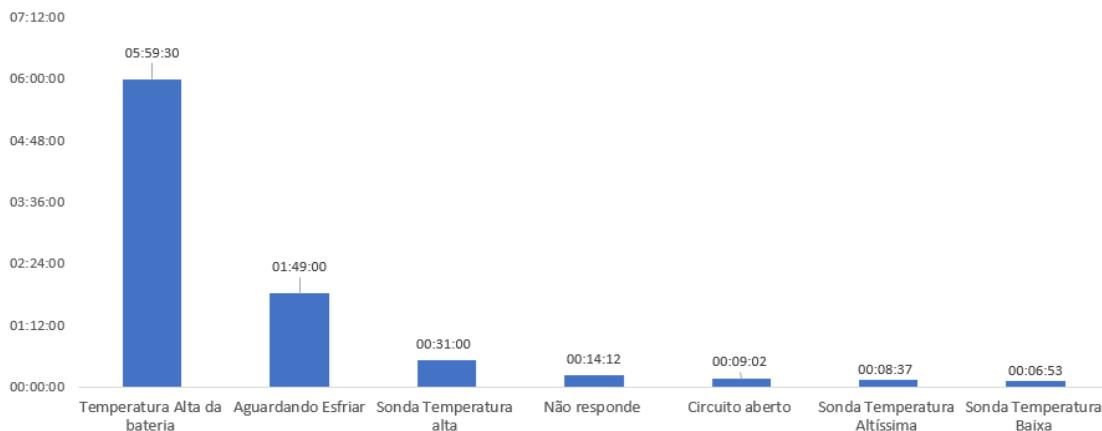


Fonte: Autora, (2025).

3.3 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

Diante dos gráficos analisados, a bateria do modelo 4 e o banco 132 se destacam como elementos-chave na avaliação do problema. Aprofundando a investigação sobre as perdas relacionadas às paradas de equipamento, observam-se interrupções significativas durante a etapa de formação das baterias. Com base nos dados coletados no sistema, o gráfico da Figura 17 indica que a principal causa dessas paradas é a elevação da temperatura da bateria, o que aciona automaticamente a interrupção do processo.

Figura 17 - Perdas do banco 132 (SEC 07).



Fonte: Autora, (2025).

As paradas por alta temperatura correspondem a cerca de 83% das perdas totais do banco 132, o que representa aproximadamente 108 baterias não produzidas em um único dia.

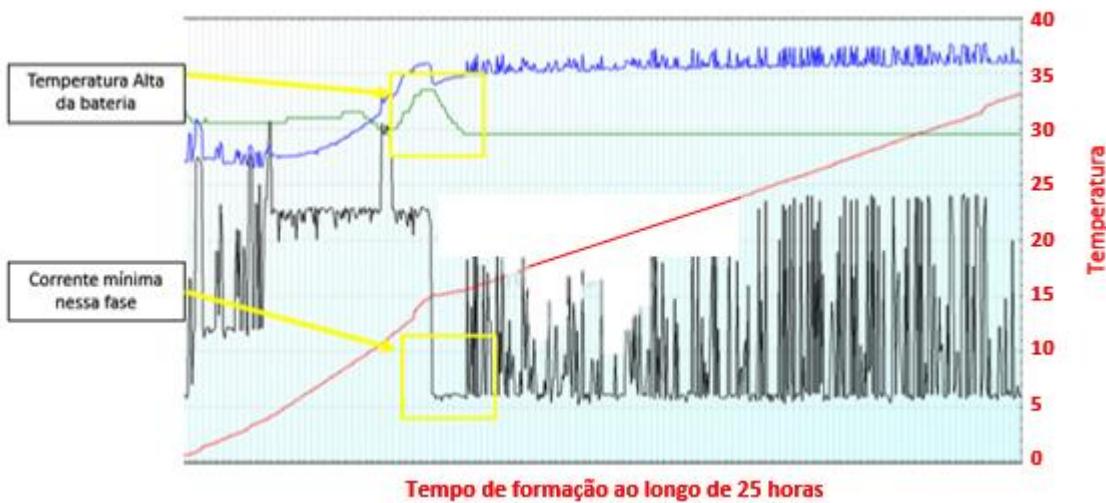
3.3.1. Estudo da origem do problema.

O controle preciso de variáveis críticas, como corrente elétrica e temperatura, é fundamental para preservar a integridade dos componentes e garantir a eficiência energética durante o processo de formação da bateria. Esse controle é realizado por meio de uma placa eletrônica que regula a corrente fornecida a cada circuito com base na temperatura individual de cada bateria. Em temperaturas mais baixas, o sistema permite o envio de correntes mais elevadas, reduzindo o tempo necessário para completar a formação. A supervisão desse processo ocorre em tempo real por meio de um software supervisório, o qual, em conjunto com o sistema de troca de água, representa um dos principais mecanismos de controle para a otimização da etapa de formação.

Com base no funcionamento do sistema, cada banco é composto por dezesseis circuitos, os quais operam de forma independente, porém simultânea. Durante a formação, variações de desempenho entre os circuitos podem ocorrer, principalmente devido ao controle térmico. A elevação da temperatura em determinado circuito aciona automaticamente o sistema de controle, reduzindo a corrente elétrica aplicada para evitar danos ao produto e ao equipamento. Essa redução de corrente, por sua vez, prolonga o tempo necessário para completar a carga, impactando diretamente a produtividade do processo.

O controle térmico e de corrente, portanto, é essencial para garantir uniformidade no tempo de formação entre os circuitos e eficiência operacional da batelada. Para compreender melhor o impacto da temperatura sobre esses circuitos, observa-se no gráfico apresentado na Figura 18 que, à medida que a temperatura do circuito aumenta, ocorre uma redução da corrente elétrica, resultando no aumento do tempo final de carga desse circuito.

Figura 18 - Gráfico do acompanhamento do processo de carga de um circuito.



Fonte: Adaptado da empresa, (2025).

Ao observar que a eficiência da bateria depende da temperatura durante o processo, é importante destacar um ponto crítico na etapa de formação. Na adição do eletrólito, iniciam-se as primeiras reações químicas de sulfatação nas placas de chumbo, que geram uma quantidade significativa de calor. Para evitar a elevação excessiva da temperatura, utiliza-se eletrólito resfriado para essa primeira fase.

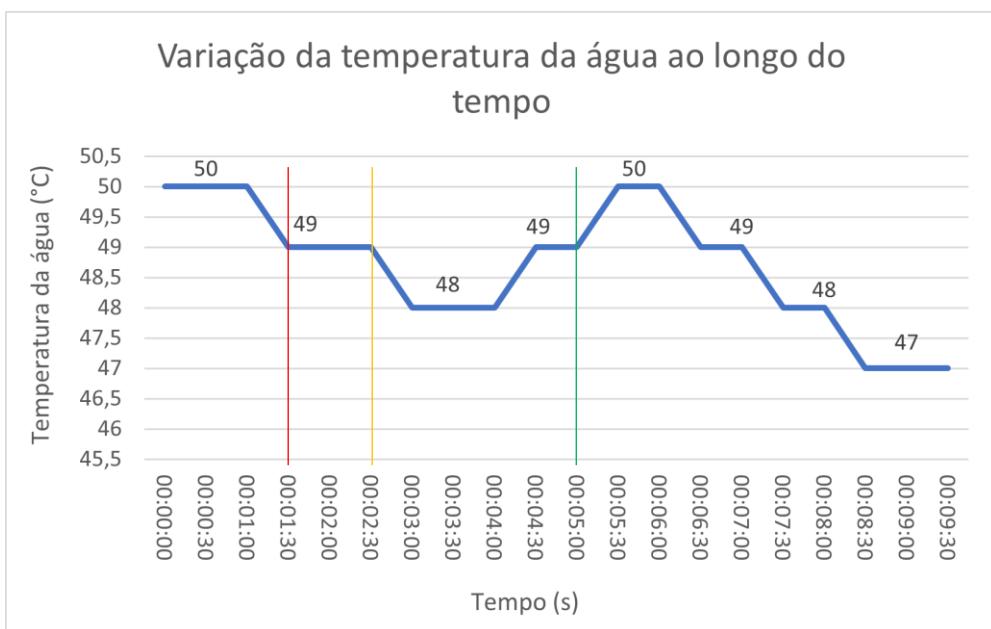
Durante o processo de carga, a temperatura tende a aumentar progressivamente em função do incremento da corrente elétrica aplicada. Para mitigar esse efeito e permitir a manutenção da corrente máxima pelo maior tempo possível, é utilizado um sistema automático de recirculação de água nos bancos de formação, ativado sempre que a temperatura do meio ultrapassa o limite operacional de 30 °C. Ressalta-se que este sistema foi parametrizado previamente por empresa terceirizada durante a implementação do projeto no passado.

No entanto, a avaliação técnica do desempenho desse sistema evidenciou limitações na eficiência da troca térmica, comprometendo o controle térmico ideal. Para analisar o comportamento térmico da água durante o ciclo de recirculação, foram realizadas medições com um termômetro na água do banho do banco de formação ao longo de um período específico.

Os dados foram coletados em intervalos regulares de 30 segundos ao longo de um período de nove minutos, registrando a temperatura da água do banho.

Esse intervalo foi adotado em função da frequência de leitura do sistema supervisório, que realiza registros automáticos a cada 60 segundos. O tempo total para a avaliação foi definido considerando a observação completa dos processos de recirculação e troca da lâmina de água. A análise dos dados indica que a temperatura da água permaneceu acima do limite mínimo estabelecido durante o período analisado.

Figura 19 - Gráfico da variação da temperatura da água ao longo do tempo.



Fonte: Autora, (2025).

Para compreender a variação da temperatura nos intervalos de queda, foi possível correlacioná-la com os períodos de recirculação, retirada da lâmina de água e enchimento. A partir do gráfico, é possível evidenciar as etapas do ciclo de controle térmico no banco de formação:

1. Recirculação da água: duração de 2 minutos.
2. Retirada da lâmina de água aquecida: duração de 1 minuto.
3. Enchimento com água fresca: duração de 2 minutos e 30 segundos.
4. Reinício do ciclo: O processo é repetido para manter a temperatura da água dentro dos limites operacionais.

Ao repetir as medições e análises três vezes, observou-se que, quando a temperatura da água está acima do limite especificado logo após a troca de lâmina, o sistema só permite uma nova troca após um intervalo de tempo fixo de

recirculação. Como a altura da lâmina de água se mantém constante entre os ciclos, o tempo de enchimento e esvaziamento desse volume de água é sempre o mesmo.

3.4 IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS E VARIÁVEIS NO PROCESSO

Após detalhamento do sistema, foi realizado um *brainstorm* com a equipe da produção, manutenção e automação para verificar quais parâmetros e variáveis poderiam influenciar no problema, como ilustrado no quadro 1. Após o *brainstorm*, foi possível verificar que inúmeros fatores no ciclo de refrigeração do banco poderiam influenciar para que acontecesse a elevação da temperatura da bateria.

Quadro 1- Brainstorm das possíveis causas do problema de temperatura alta da bateria durante a etapa de formação.

Item	Causa
1.	Localização da tubulação de entrada da água
2.	Vazão de entrada e saída
3.	Vazão da água nas tubulações de recirculação
4.	Altura da lâmina de troca da água
5.	Altura máxima do banho
6.	Circulação de ar dentro do banco
7.	Tempo fixo da recirculação

Fonte: Autora, (2025).

Para a definição do parâmetro a ser aprofundado no estudo, optou-se pela utilização de uma matriz de priorização com critérios técnicos personalizados avaliados em conjunto com a equipe do processo, manutenção e desenvolvimento de projetos. Conforme a tabela 2.

Tabela 2 - Matriz de priorização dos parâmetros com critérios técnicos.

Item	Parâmetro	Impacto na eficiência	Facilidade de Medição	Viabilidade de Intervenção	Total
1	Localização da tubulação de entrada da água	5	3	2	30
2	Vazão de entrada e saída	5	4	2	40
3	Vazão da água nas tubulações de recirculação	4	3	3	36
4	Altura da lâmina de troca da água	5	5	3	75
5	Altura máxima do banho	5	5	3	75
6	Circulação de ar dentro do banco	4	3	2	24
7	Tempo fixo da recirculação	5	5	5	125

Fonte: Autora, (2025).

A partir dos resultados obtidos na matriz de priorização, o parâmetro tempo fixo da recirculação foi identificado como o mais relevante para este projeto, apresentando a maior pontuação total.

3.4.1. Impacto do tempo fixo de recirculação na eficiência da troca de calor durante a formação

O banco de formação conta com tubulações laterais responsáveis por promover a mistura da água no reservatório após a entrada da nova lâmina. Esse mecanismo possibilita que o fluxo de água fria se misture adequadamente com a

água localizada na parte superior do reservatório, favorecendo uma troca térmica mais eficiente.

Esse processo se baseia no princípio de condução e convecção térmica, que regula a transferência de calor entre fluidos de diferentes temperaturas, buscando o equilíbrio térmico, conforme descrito pela segunda lei da termodinâmica (Çengel e Boles, 2015). Dessa forma, a água por estar em uma temperatura mais fria em comparação com a parede da caixa da bateria, absorve calor do processo, melhorando a eficiência geral do sistema.

A eficiência da troca térmica está diretamente relacionada à taxa de fluxo de massa, ao calor específico do fluido e à variação de temperatura. No contexto do sistema de recirculação de água, o tempo de recirculação desempenha um papel crucial, pois ele determina a quantidade de calor removida do sistema. Quando a água na parte inferior do banco atinge a mesma temperatura da água na parte superior, a diferença de temperatura (ΔT) diminui, interrompendo a troca de calor e tornando o sistema termicamente ineficiente. Isso destaca a importância de manter uma diferença significativa de temperatura para garantir uma troca térmica contínua e eficaz, conforme abordado nos princípios de equilíbrio térmico da segunda lei da termodinâmica (Çengel & Boles, 2015).

Para determinar o tempo ideal de recirculação da água e minimizar a ineficiência do sistema durante essa etapa, será realizada uma prototipagem inversa.

3.5 ESTUDO DO TEMPO IDEAL DE PROCESSO

Para a avaliação do tempo ideal de recirculação, foi aplicada uma abordagem de prototipagem inversa no banco 132. Nesse processo, realizou-se o ajuste do tempo de recirculação por meio da alteração do parâmetro de temperatura máxima da água. Esse parâmetro foi escolhido porque, ao ser aumentado, acarreta automaticamente um aumento no tempo fixo de recirculação. Com isso, foi possível simular o efeito inverso, ou seja, compreender o comportamento do sistema diante do aumento do tempo de recirculação. Permitindo, a partir dessa análise, estipular um valor adequado para o tempo mínimo necessário.

Essa abordagem foi escolhida por ser uma alternativa viável, evitando a necessidade de reconfiguração do código de programação e permitindo ajustes operacionais de forma prática e com menor risco de retrabalho.

3.5.1. Parâmetros da prototipagem

Atualmente, o sistema utiliza uma temperatura máxima de 30°C e um tempo de recirculação fixo de dois minutos definidos pelos projetistas do sistema. Os parâmetros de enchimento, retirada da lâmina e altura da lâmina permanecerão inalterados e para o teste proposto será modificado a temperatura máxima e consequentemente o tempo fixo de recirculação do sistema, conforme indicado na Tabela 3.

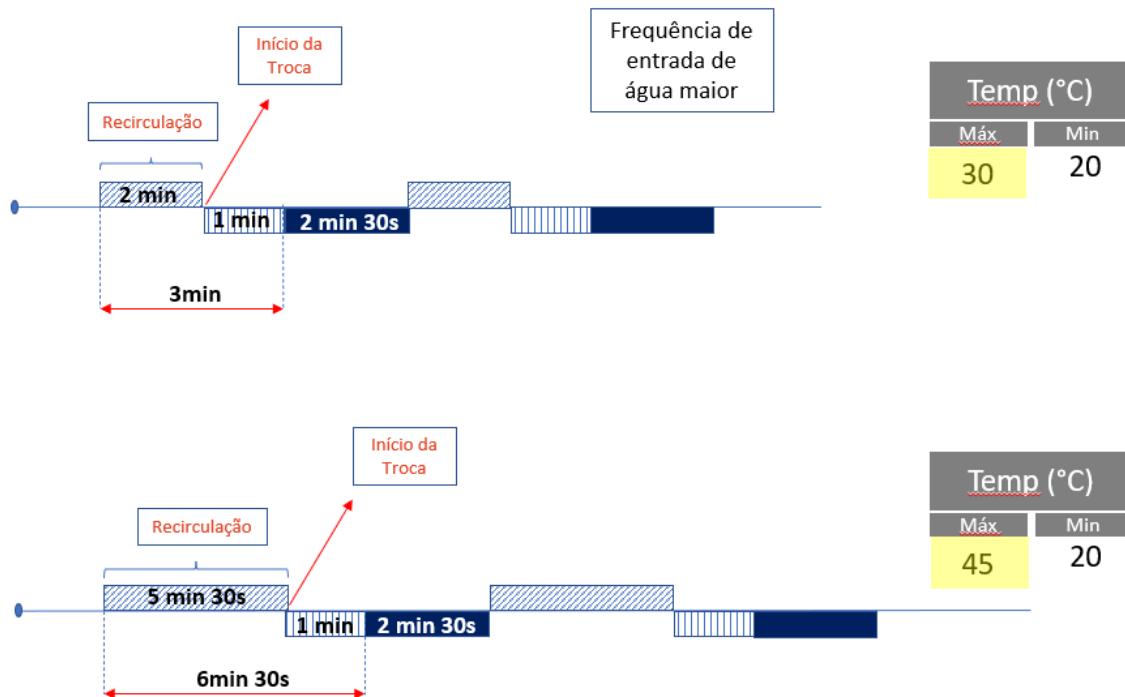
Tabela 3 - Parâmetros antes da prototipagem inversa.

Variáveis	Parâmetros iniciais	Parâmetros do teste
Temperatura máxima	30 °C	45 °C
Tempo de recirculação	2 min	5 min e 30s
Tempo de enchimento	2 min e 30s	2 min e 30s
Tempo de remoção da lâmina	1 min	1 min
Altura da lâmina	50 mm	50 mm
	Parâmetros iniciais	Parâmetros do teste

Fonte: Autora, (2025).

A principal diferença entre os dois sistemas está na temperatura máxima da água e no tempo de recirculação. Esse tempo impacta diretamente o período em que a água nova, alimentada ao sistema após a troca da lâmina, é utilizada no processo. Na figura 20, é possível visualizar essa comparação entre os cenários antes e depois do teste.

Figura 20 - Esquema comparativo dos tempos de recirculação do sistema antes e durante o teste.

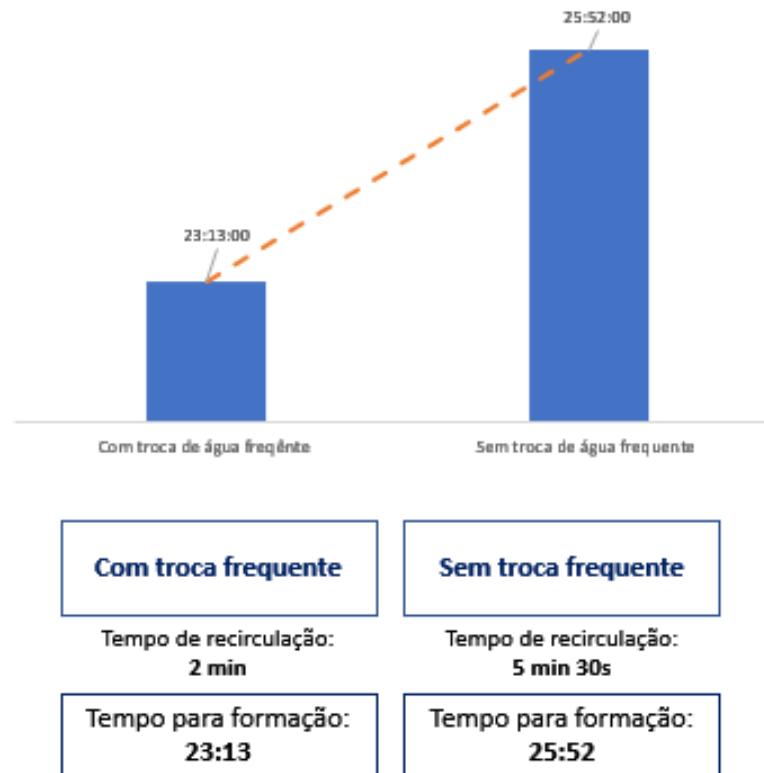


Fonte: Autora, (2025).

3.5.2. Resultado da prototipagem inversa

Após a implementação das alterações nos parâmetros do banco de formação, foram coletados os resultados relativos ao tempo de formação final, tanto no banco de testes quanto na bateria de estudo, conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Resultado da prototipagem inversa.



Fonte: Autora, (2025).

Com os dados obtidos, foi possível realizar uma análise comparativa entre o tempo de recirculação e o tempo final de formação da bateria. Observou-se a validação da teoria previamente apresentada, referente à equalização térmica da água nas regiões inferior e superior do banco. Esse fenômeno evidencia que, enquanto houver uma diferença de temperatura entre a água presente no banco de formação e a utilizada no sistema de recirculação, a eficiência do sistema será otimizada. A manutenção dessa diferença térmica contribui para a melhoria do desempenho global do sistema, uma vez que promove um controle térmico mais eficaz e uma maior uniformidade térmica durante o processo de formação.

3.6 LISTA DE TAREFAS

Com a confirmação da teoria que correlaciona o tempo da fase de recirculação com o tempo de formação final da bateria, foi possível listar um conjunto de tarefas necessária elaborar a modificação do tempo de recirculação no sistema. É possível listar conforme as tarefas abaixo:

1. Análise e revisão do código de programação do sistema;
2. Modificação do tempo fixo de recirculação e avaliação da viabilidade do novo tempo para implementação no sistema;
3. Implementação da alteração de tempo em todos os bancos de formação;
4. Análise e validação dos resultados obtidos após a modificação.

Estas ações visam garantir a implementação eficaz das modificações, com uma avaliação contínua dos impactos no desempenho do sistema.

3.6.1. Análise e revisão do código de programação do sistema

A modificação do tempo fixo de recirculação exige uma análise detalhada do código de programação responsável pela definição desse parâmetro. Inicialmente, foi necessário identificar a linguagem de programação utilizada no sistema. Após essa identificação, foi realizada uma busca minuciosa para localizar o parâmetro específico dentro do código, a fim de possibilitar a alteração do valor do tempo fixo de recirculação de maneira eficiente e integrada ao processo de controle do sistema.

A programação do sistema de troca de água foi desenvolvida utilizando a linguagem Statement List (STL), uma das linguagens disponíveis para Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) Siemens. Para a análise e edição do código, utilizou-s

O código-fonte está redigido em italiano e, ao examinar uma das abas do programa, identificou-se um trecho de código responsável pelo controle do tempo de atraso para substituição da água. Durante essa análise, verificou-se que o tempo de atraso está parametrizado em 120 segundos.

Com base nessa identificação, foi possível em conjunto com a equipe da automação ajustar o tempo fixo de recirculação da água antes da troca com a torre, garantindo maior flexibilidade na operação do sistema.

3.6.2. Análise e alteração do tempo de recirculação

Na etapa de análise e ajuste do tempo de recirculação, foi fundamental determinar o tempo ideal para maximizar a eficiência no tempo final de formação da bateria. Para isso, utilizamos o método de tentativa e erro, foram testados dois pontos adicionais ao tempo fixo de dois minutos.

Com os tempos de recirculação definidos, foi possível realizar a alteração no banco 139 utilizando a bateria 4. A única modificação realizada nos parâmetros do banco foi no tempo de recirculação, mantendo-se constantes os demais parâmetros. A partir da implementação dessa estratégia experimental, foi possível coletar e analisar os resultados dos três testes realizados, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados dos testes.

Teste	Tempo de recirculação	Tempo total de formação
1	2 minutos	23 horas e 13 minutos
2	1 minutos 30 segundos	22 horas 13 minutos
3	1 minuto	22 horas e 35 minutos

Fonte: Autora, (2025).

Com base nos resultados obtidos por meio da aplicação do método de tentativa e erro, verificou-se que o tempo de recirculação ideal para otimizar o processo de formação da bateria foi de **1 minuto e 30 segundos**, reduzindo o tempo total de formação sem comprometer a eficiência do processo.

3.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

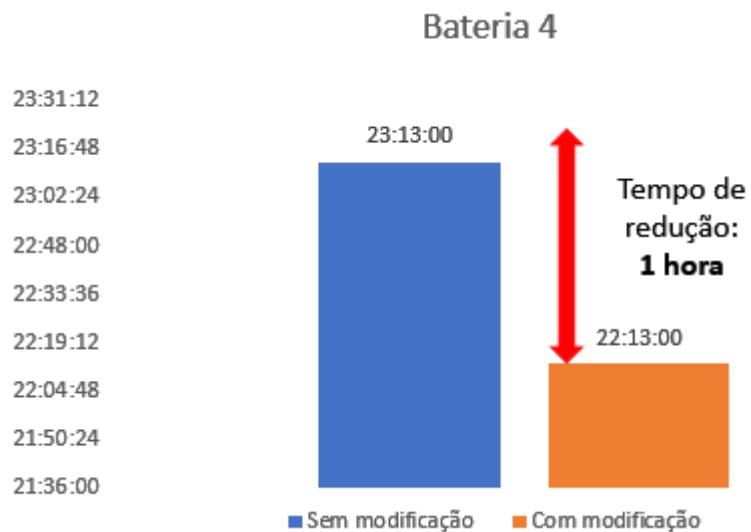
A partir das análises realizadas e das modificações implementadas, foi possível avaliar os impactos da otimização do tempo de recirculação no processo de formação das baterias. Os ajustes aplicados buscaram atender ao objetivo do projeto, garantindo maior eficiência sem comprometer a qualidade do processo.

Com a avaliação do código-fonte e a implementação do método de tentativa e erro, foi possível determinar o parâmetro ideal para o tempo de

recirculação nos bancos de formação. A partir dessa definição, o tempo otimizado foi replicado para todos os bancos da seção estudada, promovendo maior uniformidade e eficiência ao processo produtivo.

Essa alteração resultou em melhorias significativas, alinhadas ao objetivo inicial do projeto. O tempo total do ciclo de formação da bateria, que anteriormente era de **23 horas e 13 minutos**, foi reduzido para **22 horas e 13 minutos**, conforme ilustrado no gráfico a seguir.

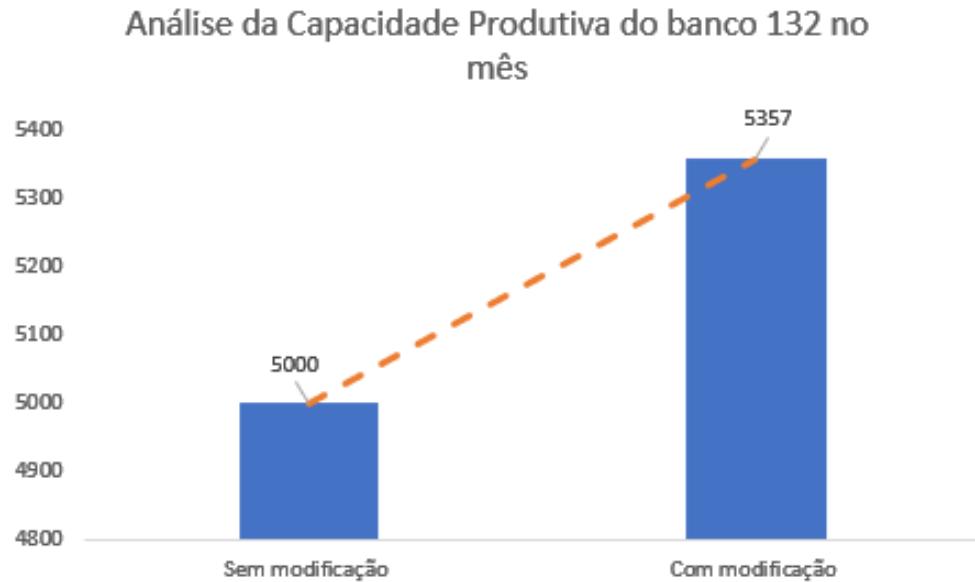
Figura 22 - Comparativo do tempo de formação da Bateria 4.



Fonte: Autora, (2025).

Essa redução de uma hora no tempo de ciclo representa uma melhoria significativa para permitir a liberação mais rápida do equipamento e possibilitando maior rotatividade no processo. Como resultado direto, observou-se um aumento de produtividade de **357 baterias por mês no banco 132**, conforme demonstrado na Figura 23.

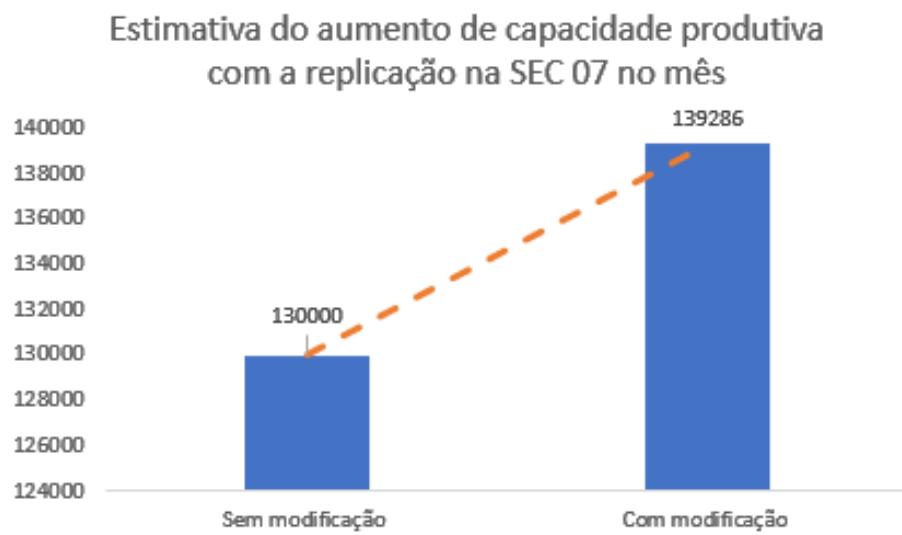
Figura 23 - Análise da capacidade produtiva mensal no banco 132.



Fonte: Autora, (2025).

Considerando o efeito dessa melhoria em escala maior, é possível estimar o impacto da modificação na **seção 07** presente no estudo do projeto. Essa projeção é apresentada na Figura 24, que contempla o ganho total potencial de produtividade a partir da replicação da melhoria nos demais bancos de formação.

Figura 24 - Estimativa de aumento de capacidade com a implementação do novo ciclo de formação.



Fonte: Autora, (2025).

Com base nas análises, o projeto resultou em um aumento estimado de **9.286 baterias por mês**, considerando a capacidade ampliada em toda a seção. Ao converter esse ganho em termos financeiros, e adotando-se o valor médio de venda unitária de R\$ 10,62 por bateria, obteve-se um **acréscimo de R\$ 98.636,00 na receita mensal** da empresa. Esse ganho financeiro destaca a relevância da melhoria não apenas do ponto de vista técnico, mas também do ponto de vista econômico, reforçando a importância de práticas de engenharia voltadas à otimização contínua dos processos produtivos.

A redução do tempo de ciclo, além de aumentar a produtividade, também contribui para a melhoria da eficiência energética e da ocupação dos recursos fabris, aspectos frequentemente discutidos na literatura de engenharia industrial e lean manufacturing (Womack; Jones, 2004). A adoção de estratégias de projetos mostra-se, portanto, fundamental para ganhos sustentáveis em ambientes industriais altamente competitivos.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal analisar e propor melhorias no processo de formação de baterias chumbo-ácido em uma indústria localizada no interior de Pernambuco, com foco na etapa de recirculação de água utilizada para o controle térmico. A pesquisa partiu da identificação de perdas significativas causadas por paradas no processo, associadas ao aumento excessivo da temperatura das baterias durante a formação, o que compromete a eficiência e a produtividade do setor.

Com a realização de testes práticos e ajustes no sistema, foram obtidos uma redução de uma hora no tempo total de formação, promovendo um aumento significativo na produtividade da linha. A alteração do tempo de recirculação de dois minutos para um minuto e trinta segundos resultou em ganhos estimados de mais de nove mil baterias por mês, além de um impacto positivo na eficiência energética e na capacidade produtiva da empresa.

Como proposta para estudos futuros, sugere-se a análise de outros parâmetros do sistema de controle térmico, como a vazão de entrada e saída da água, a disposição das tubulações de recirculação e o uso de sensores inteligentes para controle adaptativo. Esses aspectos podem ampliar ainda mais a eficiência do sistema e abrir caminhos para novas inovações no processo de formação de baterias.

A realização deste estudo proporcionou ao autor uma valiosa experiência acadêmica e profissional. A oportunidade de aplicar ferramentas da engenharia em um ambiente real fortaleceu a compreensão dos desafios industriais e das possibilidades de atuação por meio de metodologias estruturadas de melhoria. Este trabalho, portanto, representa uma contribuição relevante tanto para a empresa estudada quanto para a formação do autor, reforçando a importância da integração entre teoria e prática na busca por processos mais eficientes, econômicos e sustentáveis.

4.1 LIMITAÇÕES E FUTUROS TRABALHOS

Apesar dos desafios enfrentados, como a resistência inicial das equipes envolvidas, a complexidade do sistema automatizado e a necessidade de interrupção temporária do processo produtivo, as soluções adotadas — baseadas em colaboração, estudo técnico e validação cuidadosa das alterações — permitiram a implementação segura da melhoria proposta. A superação dessas barreiras evidenciou o potencial de ganhos operacionais por meio da otimização do controle térmico na formação de baterias.

Como desdobramento desse trabalho, recomenda-se, para estudos futuros, a análise de outros parâmetros do sistema de controle térmico. A investigação de variáveis como a vazão de entrada e saída da água, o arranjo físico das tubulações de recirculação e a integração de sensores inteligentes para controle adaptativo pode ampliar ainda mais a eficiência operacional e promover novas oportunidades de inovação no processo de formação de baterias.

REFERÊNCIAS

BASTOS, Maria. Redução do índice de orelha oxidada em placas de baterias automotivas: um estudo de caso em uma estufa industrial sem controle. João Pessoa: [s.n.], 2022. (TCC ou Relatório – especificar).

CENGEL, Yunus; GHAJAR, Afshin. Mecânica dos fluidos. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2012. (Livro técnico)

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Baterias automotivas: boas práticas no uso e na destinação. Brasília: CNT; SEST; SENAT, 2019. Cartilha (Despoluir – Programa Ambiental do Transporte), 28 p. Disponível em: <<http://repositorio.itl.org.br/jspui/handle/123456789/300>>. Acesso em: 10 jan. 2023. (Relatório institucional digital)

CROWN BATTERY. Watering your lead-acid battery made easy. 2024. Disponível em: <<https://www.crownbattery.com/news/watering-your-lead-acid-battery-made-easy>>. Acesso em: 20 mar. 2024. (Documento institucional online)

DINIZ, F. B. Manual sobre acumuladores de chumbo-ácido automotivos. 2. ed. [S.I.]: [s.n.], 1994. (Manual técnico)

DUARTE, Renan Cézar de Oliveira. Estudo eletroquímico a partir de traços de íons metálicos encontrados em soluções recicladas de baterias chumbo-ácido. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

IMAI, Masaaki. The key to Japan's competitive success. New York: Random House, 1986. (Livro de gestão estratégica)

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. Fundamentals of heat and mass transfer. 6th ed. São Paulo: LTC, 2008. (Livro técnico)

KIESSLING, R. Lead Acid Battery Formation Techniques. Disponível em: <https://mathscinotes.com/wp-content/uploads/2012/12/lead_acid.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2024. (Documento técnico online)

MENDES, Raphael. Eficiência energética no setor de formação de baterias industriais. Campina Grande: [s.n.], 2014. (Relatório ou TCC – especificar)

MICHELINI, A. Baterias recarregáveis para equipamentos portáteis. [S.I.]: S.T.A. – Sistemas e Tecnologia Aplicada Ind. Com. LTDA., 2017. (Relatório técnico ou informe industrial)

MONTGOMERY, D. C. Design and analysis of experiments. 9th ed. [S.I.]: John Wiley, 2017. (Livro acadêmico)

MONTALVO, A. E. Efeitos da temperatura na eficiência de baterias. Energy Reports, v. 6, p. 145–150, 2020. (Artigo científico)

PALMER, R. V. Estudo da sulfatação durante a formação de placas positivas empastadas de bateria de chumbo-ácido. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

PAVLOV, D. Lead-Acid Batteries Science and Technology: a handbook of lead-acid battery technology and its influence on the product. Amsterdam: Elsevier, 2011. (Livro técnico)

PERGHER, Rafael. Estimativa do estado de saúde de baterias chumbo-ácido seladas aplicadas em sistemas de emergência de elevadores. 2008. (TCC ou Relatório – especificar)

QUEIROZ, M. B. Estudo comparativo da corrosão em grades utilizadas em baterias de chumbo-ácido, formadas em processos de fundição e laminação. 2014. Tese

(Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

SLACK, N.; LEWIS, M. Operations Strategy. 6. ed. Londres: Pearson, 2020. (Livro de estratégia de operações)

SMITH, L.; ZHANG, Y. Fluidos de resfriamento em sistemas de energia: uma revisão. *Renewable Energy*, v. 132, p. 420–430, 2019. (Artigo científico)

TOWNSEND, A.; GOUWS, R. A comparative review of lead-acid, lithium-ion and ultra-capacitor technologies and their degradation mechanisms. *Energies*, [S.I.], v. 15, n. 13, art. 4930, 2022. DOI: 10.3390/en15134930. (Artigo científico)

WALKOWIAK, S.; BARANIAK, M.; WACHSMANN, M.; LOTA, G. Influence of temperature during formation of lead acid AGM batteries on chemical and electrical performance. *Journal of Solid State Electrochemistry*, [S.I.], 1 abr. 2025. DOI: 10.1007/s10008-025-06270-9. (Artigo científico)

WOMACK, J. P.; JONES, D. T. A mentalidade enxuta nas empresas: elimine o desperdício e crie riqueza. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004. (Livro de gestão)