

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM SISTEMAS DE ENERGIA**

ÉVERTON ROSA LINDNER

**ANÁLISE DE PILHAS E BATERIAS:
estudo, procedimentos e resultados experimentais**

**FLORIANÓPOLIS
2026**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM SISTEMAS DE ENERGIA**

ÉVERTON ROSA LINDNER

**ANÁLISE DE PILHAS E BATERIAS:
estudo, procedimentos e resultados experimentais**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador:
Prof. Rafael Henrique de Azevedo Eckstein,
Dr. Eng.

Coorientador:
Prof. Juliano Bitencourt Padilha, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS

20

FICHA DE IDENTIFICAÇÃO DA OBRA ELABORADA PELO AUTOR

Lindner, Everton Rosa

Análise de pilhas e baterias: estudo, procedimentos e resultados experimentais /

Everton Rosa Lindner;

Orientador(a): Rafael Henrique de Azevedo Eckstein; Coorientador(a): Juliano Bitencourt Padilha. - Florianópolis, SC, 2026.

63 p.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis. Curso de Bacharelado Em Engenharia Elétrica.

Inclui referências.

1. Baterias. 2. Análise de Pilhas. 3. Qualidade de Pilhas. 4. Procedimentos de Teste. 5. Curvas de Descarga. I. Eckstein, Rafael Henrique de Azevedo. II. Padilha, Juliano Bitencourt. III. Instituto Federal de Santa Catarina. Curso de Bacharelado Em Engenharia Elétrica. IV. Análise de pilhas e baterias: estudo, procedimentos e resultados experimentais.

ANÁLISE DE PILHAS E BATERIAS: estudo, procedimentos e resultados experimentais

ÉVERTON ROSA LINDNER


Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro(a) Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 13 de fevereiro, 2026.


Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **RAFAEL HENRIQUE DE AZEVEDO ECKSTEIN**
Data: 26/02/2026 12:59:20-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Rafael Henrique de Azevedo Eckstein, Dr. Eng.

Documento assinado digitalmente
 **JULIANO BITENCOURT PADILHA**
Data: 26/02/2026 09:56:31-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Juliano Bitencourt Padilha, Dr. Eng.

Documento assinado digitalmente
 **GABRIEL BEU NOGUEIRA DE MACEDO**
Data: 26/02/2026 09:51:23-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Gabriel Beu Nogueira de Macedo, M. Eng.

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ CARLOS BARON**
Data: 26/02/2026 11:28:11-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Luiz Carlos Baron, M. Eng.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, pelo apoio, incentivo e por sempre acreditarem em mim durante essa caminhada.

À minha esposa, que esteve ao meu lado em todos os momentos, com paciência, apoio e incentivo, não me deixando desistir diante das dificuldades. Sua presença foi fundamental nessa caminhada.

Ao meu filho, que é minha maior motivação. Que esta conquista sirva de exemplo para ele, mostrando que com dedicação e perseverança é possível alcançar nossos objetivos.

Aos professores orientadores, que contribuíram com seu tempo, conhecimento e orientação para a elaboração deste trabalho, auxiliando de forma fundamental no desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim, agradeço aos amigos e colegas da faculdade que, direta ou indiretamente, fizeram parte dessa trajetória e contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional.

RESUMO

Este trabalho faz uma análise das características técnicas de pilhas e baterias, um tema crítico em um cenário onde a confiabilidade e a eficiência dos dispositivos de armazenamento de energia são fundamentais para diversos setores, incluindo o industrial e o doméstico. Diante do crescimento contínuo do mercado de dispositivos eletrônicos e das demandas por maior durabilidade e desempenho das fontes de energia, torna-se essencial compreender e avaliar a qualidade desses produtos por meio de análises e testes experimentais adequados. Essas avaliações permitem verificar se as pilhas e baterias apresentam desempenho e segurança compatíveis com o uso proposto, seguindo referências técnicas baseadas em normas internacionais como a IEC 60086 e regulamentações nacionais do INMETRO, proporcionando aos consumidores maior confiança na qualidade e na segurança de suas escolhas. O foco principal, no presente trabalho, é analisar diferentes tipos de pilhas e baterias, considerando suas especificações técnicas e seu comportamento em condições variadas. É realizada uma comparação de desempenho entre diferentes fabricantes e entre lotes de produção do mesmo fabricante. O estudo visa avaliar variáveis críticas, como temperatura, resistência interna e corrente de descarga, que podem influenciar significativamente o desempenho e a vida útil das baterias. Além disso, investiga-se como esses fatores impactam a qualidade e a conformidade dos produtos em relação aos parâmetros técnicos de referência. A abordagem metodológica inclui a realização de testes padronizados de descarga e medição de resistência interna com pilhas alcalinas AA de três fabricantes distintos, utilizando instrumentos de precisão, o que possibilita uma análise detalhada das características de cada tipo de bateria. Os dados coletados são utilizados para identificar possíveis deficiências nos processos de fabricação e avaliar a coerência com os dados nominais, além de propor melhorias baseadas nos resultados obtidos. Este estudo contribui para o entendimento do desempenho e da qualidade das pilhas e baterias disponíveis no mercado, fornecendo subsídios técnicos que podem auxiliar em futuras pesquisas e no aprimoramento desses produtos.

Palavras-chave: Baterias. Análise de Pilhas. Qualidade de Pilhas. Procedimentos de Teste. Curvas de Descarga.

ABSTRACT

This work presents an analysis of the technical characteristics of primary batteries, a critical topic in a context where the reliability and efficiency of energy-storage devices are essential for both industrial and domestic applications. With the continuous growth of the electronic devices market and increasing demand for longer-lasting and higher-performance power sources, it becomes fundamental to understand and evaluate battery quality through proper experimental analyses. Such assessments make it possible to verify whether batteries deliver performance and safety compatible with their intended use, following technical references based on international standards such as IEC 60086 and national regulations from INMETRO, thereby providing consumers with greater confidence in the quality and safety of these products. The main focus of this study is to analyze different types of alkaline batteries, considering their technical specifications and behavior under varying operating conditions. A performance comparison is carried out between different manufacturers and between production batches of the same brand. The study evaluates critical variables such as temperature, internal resistance, and discharge current, which can significantly influence battery performance and service life. Furthermore, it investigates how these factors affect product quality and compliance with technical reference parameters. The methodological approach includes standardized discharge tests and internal-resistance measurements performed on AA alkaline batteries from three different manufacturers, using precision instruments that enable a detailed assessment of each battery's characteristics. The collected data are used to identify possible manufacturing deficiencies and evaluate consistency with nominal specifications, as well as to propose improvements based on the experimental findings. This study contributes to a better understanding of the performance and quality of commercially available batteries, providing technical insights that may support future research and product development in the field of portable energy storage.

Keywords: Batteries. Cell Analysis. Battery Quality. Testing Procedures. Discharge Curves.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema da pilha de Daniell.....	17
Figura 2 – Pilha de zinco/dióxido de manganês (leclanché)	19
Figura 3 – Pilha de zinco/dióxido de manganês (alcalina)	19
Figura 4 – Pilha de lítio/dióxido de manganês.....	19
Figura 5– Bateria chumbo/óxido de chumbo (chumbo/ácido)	21
Figura 6 – Fonte simétrica (modelo POL-16E).....	30
Figura 7 – Fonte de tensão contínua (Vaxun PS-1502DD+).....	30
Figura 8 – Multímetro digital Tectronix (DDM 4050).....	30
Figura 9 – Multímetro digital Minipa (ET 1400).....	30
Figura 10 – Layout do circuito.	32
Figura 11 – Montagem experimental do ensaio de descarga em 250 mA.	35
Figura 12 – Curva de tensão do Fabricante A no ensaio de 250 mA.	37
Figura 13 – Curva de tensão do Fabricante B no ensaio de 250 mA.....	38
Figura 14 – Curva de tensão do Fabricante C no ensaio de 250 mA.....	38
Figura 15 – Montagem experimental do ensaio de 500 mA.	39
Figura 16 – Curva de tensão das pilhas do Fabricante A no ensaio de 500 mA.	41
Figura 17 – Curva de tensão das pilhas do Fabricante B no ensaio de 500 mA.	41
Figura 18 – Curva de tensão das pilhas do Fabricante C no ensaio de 500 mA.....	42
Figura 19 – Curvas de tensão das melhores pilhas no ensaio de 250 mA.....	44
Figura 20 – Curvas de tensão das melhores pilhas no ensaio de 500 mA.....	44
Figura 21 – Montagem experimental para os testes de resistência constante.	46
Figura 22 – Curvas de tensão das pilhas sob carga resistiva de 1,1 Ω	47
Figura 23 – Curvas de tensão das pilhas sob carga resistiva de 2,2 Ω	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações da pilha AA alcalina.	25
Tabela 2 – Especificações da pilha AAA alcalina.....	26
Tabela 3 – Energia fornecida pelas pilhas no ensaio de 250 mA.....	36
Tabela 4 – Resistência interna das pilhas no ensaio de 250 mA.....	36
Tabela 5 – Energia fornecida pelas pilhas no ensaio de 500 mA.....	40
Tabela 6 – Resistência interna das pilhas no ensaio de 500 mA.....	40
Tabela 7 – Energia fornecida pelas melhores pilhas em 250 mA e 500 mA.	43
Tabela 8 – Tensão sem carga (SC) e após repouso (AR) em corrente constante	50
Tabela 9 – Tensão sem carga (SC) e após repouso (AR) em resistência constante	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampère
ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
AR	Após o repouso
Ah	Ampère hora
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
°C	Graus Celsius
Cu	Cobre
CuSO ₄	Sulfato de Cobre
e ⁻	Elétron
FEM	Força Eletromotiz
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
Ipulso	Corrente de pulso
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
mAh	Miliampère hora
OC	Circuito aberto
R(int)	Resistência interna
V	Volt
Vdescarga	Tensão de descarga
Vpulso	Tensão de pulso
Zn	Zinco
ZnSO ₄	Sulfato de Zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativa	12
1.2	Definição do Problema	13
1.3	Objetivo Geral.....	13
1.4	Objetivos Específicos.....	14
1.5	Estrutura do Trabalho.....	14
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	Definição de Pilhas	16
2.2	Aspectos Construtivos das Pilhas	18
2.2.1	Pilhas Primárias	18
2.2.2	Pilhas Secundárias	20
2.3	Parâmetros de Pilhas.....	21
2.4	Testes de Pilhas	22
2.5	Características entre Pilhas AA e AAA	25
3	DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA	27
4	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	29
4.1	Instrumentos Utilizados nos Ensaios	29
4.2	Montagem e Funcionamento do Circuito.....	32
5	RESULTADO DOS ENSAIOS	34
5.1	Ensaios com Corrente Constante.....	34
5.1.1	Teste com Corrente Constante – 250mA.....	35
5.1.2	Teste com Corrente Constante – 500mA.....	39
5.1.3	Comparação entre os Ensaios de 250 mA e 500 mA	42
5.2	Ensaios com Resistência Constante.....	45
5.2.1	Teste com Resistência de 1,1 Ω	46
5.2.2	Teste com Resistência de 2,2 Ω	48
5.3	Recuperação de Tensão após os Ensaios.....	49
5.3.1	Recuperação de Tensão nos Ensaios de Corrente Constante	49
5.3.2	Recuperação de Tensão nos Ensaios de Resistência Constante.....	51
6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	53
6.1	Desempenho em Corrente Constante	53
6.2	Desempenho em Resistência Constante	53
6.3	Recuperação de Tensão	54
6.4	Síntese Comparativa Geral.....	54
7	CONCLUSÕES	56
	REFERÊNCIAS	58
	APÊNDICES	60
	APÊNDICE A – VALORES DE TENSÃO AO LONGO DO TESTE DE CORRENTE CONSTANTE	61
	APÊNDICE B – VALORES DE TENSÃO AO LONGO DO TESTE DE RESISTÊNCIA CONSTANTE	62

1 INTRODUÇÃO

Desde o século XIX, quando houve a criação das primeiras baterias e pilhas (Costa; Porto, 2021), até os dias de hoje, esses dispositivos desempenham um papel essencial no avanço da sociedade moderna. Inicialmente desenvolvidas como soluções simples para armazenar e fornecer energia em pequena escala, as baterias e pilhas evoluíram para se tornar elementos essenciais para uma variedade extensa de dispositivos eletrônicos e industriais.

No mundo atual, sua importância como fonte de energia portátil é inegável, impulsionando a inovação e a mobilidade em diversas áreas. Estamos cercados de produtos tecnológicos em nossas casas e todos eles precisam de energia para funcionar. É comum vermos cada vez mais produtos com baterias internas, facilitando nossa vida de diversas formas. Nesse contexto, dois produtos se destacam por ser a forma mais acessível de manter funcionando diversos aparelhos em nossas casas: são as pilhas e baterias (Proteste, 2022).

Pilhas e baterias de pequeno porte, comumente utilizadas na vida cotidiana, têm como principal função armazenar energia química e convertê-la em energia elétrica. Esses dispositivos compreendem diferentes formatos, como pilhas AA, AAA e outras, sejam recarregáveis ou não, sendo amplamente empregados em dispositivos como controles remotos, *mouses* de computador, brinquedos e uma variedade de aparelhos domésticos. Segundo o relatório do Departamento de Pesquisa Statista (2024), o mercado global de pilhas e baterias alcalinas não recarregáveis predominam no uso doméstico, e movimentou aproximadamente 7,25 bilhões de dólares em 2021.

Além disso, ao longo das últimas décadas, houve avanços significativos no desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de energia, resultando em baterias mais eficientes e duradouras. A demanda crescente por dispositivos portáteis e eletrônicos cada vez mais sofisticados tem impulsionado pesquisas e investimentos na área de baterias recarregáveis e de longa duração.

1.1 Justificativa

A dependência crescente da sociedade moderna por dispositivos alimentados por baterias evidencia a importância crítica de garantir não apenas a disponibilidade contínua de energia, mas também a qualidade, a segurança e a sustentabilidade desses sistemas de armazenamento. No Brasil, dados da Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE) mostram que, em maio de 2024, a produção de pilhas, baterias e acumuladores elétricos registrou crescimento de 2,6% em relação ao mesmo mês do ano anterior (ABINEE, 2024). Em âmbito global, a *International Energy Agency* (IEA) projeta que a demanda por baterias para veículos elétricos poderá quadruplicar até 2030, impulsionada pela transição energética e pela eletrificação dos transportes (IEA, 2024). Nesse contexto, a garantia da confiabilidade e da eficiência desses sistemas de armazenamento de energia torna-se uma preocupação de primeira ordem.

No entanto, o uso de pilhas e baterias domésticas apresenta um desafio significativo: a dificuldade em determinar se uma pilha ou bateria ainda é utilizável e quanto de carga ainda possui. Em grande parte, esses dispositivos são 'caixas pretas' que não fornecem informações sobre seu estado interno ou nível de carga. Os usuários muitas vezes precisam confiar em testes práticos para avaliar sua funcionalidade, o que pode gerar incerteza sobre a confiabilidade desses dispositivos no longo prazo e contribuir para o desperdício (Eleutério, 2021).

A qualidade das baterias não apenas influencia diretamente o desempenho dos dispositivos, mas também afeta sua durabilidade e vida útil. Investir em baterias de alta qualidade não só proporciona uma experiência de usuário mais satisfatória, mas também reduz a necessidade de substituição frequente de dispositivos, o que por sua vez contribui para a redução do desperdício eletrônico e para a sustentabilidade ambiental. Além disso, a segurança dos sistemas de armazenamento de energia é uma preocupação crítica, especialmente devido à incidentes passados envolvendo superaquecimento e até mesmo explosões de baterias.

1.2 Definição do Problema

Diversos tipos de pilhas e baterias estão disponíveis no mercado, cada qual com suas especificações para atender diferentes necessidades. As pilhas de zinco-mangânês são adequadas para equipamentos que requerem descargas de energia leves e contínuas; as alcalinas são recomendadas para dispositivos que demandam uma descarga rápida e intensa de energia; enquanto as pilhas recarregáveis são ideais para aparelhos que requerem uma grande quantidade de energia em um curto período de tempo (INMETRO, 2011).

A análise de pilhas e baterias é um processo essencial para garantir a qualidade, segurança e conformidade desses dispositivos no mercado. Esse tipo de regulamentação visa promover a segurança dos consumidores, prevenindo acidentes e assegurando o desempenho adequado dos produtos. O processo envolve diversas etapas, desde aspectos burocráticos até avaliações laboratoriais, garantindo que as baterias atendam aos padrões estabelecidos (Revista O Mecânico, 2015).

Esta pesquisa se propõe a analisar o desempenho e conformidade de pilhas, examinando os métodos e critérios utilizados para avaliar a qualidade e a conformidade desses dispositivos. A importância desse estudo reside na necessidade de garantir que as pilhas disponíveis no mercado atendam aos mais altos padrões de desempenho, segurança e impacto ambiental, enfrentando os desafios decorrentes da evolução dos padrões regulatórios e das demandas crescentes por inovação e sustentabilidade no setor de energia.

1.3 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho é analisar o desempenho de pilhas de diferentes fabricantes por meio de testes experimentais sob condições de corrente constante e resistência constante, comparando sua eficiência, durabilidade e comportamento elétrico desses dispositivos de armazenamento de energia.

1.4 Objetivos Específicos

Para conduzir a análise de maneira precisa e eficiente, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- a) caracterizar diferentes modelos e marcas de pilhas, identificando suas principais especificações e aplicações;
- b) montar um protótipo de circuito para ensaios de descarga elétrica com corrente constante;
- c) realizar testes experimentais de descarga sob corrente constante e resistência constante, avaliando o comportamento elétrico e o tempo de descarga de cada amostra;
- d) comparar o desempenho das pilhas de diferentes fabricantes e de lotes de um mesmo fabricante, verificando a qualidade e a consistência dos produtos disponíveis no mercado;
- e) avaliar variáveis críticas, como resistência interna e corrente de descarga, compreendendo o impacto desses fatores no desempenho e na durabilidade das pilhas e baterias.

1.5 Estrutura do Trabalho

O primeiro capítulo é dedicado à introdução, onde são apresentadas as bases do estudo sobre a análise de pilhas e baterias. Este capítulo inclui a contextualização do tema, a justificativa da pesquisa, a definição do problema, o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho, além de delimitar o escopo da investigação desenvolvida.

O Capítulo 2 corresponde à revisão da literatura, na qual são abordados os conceitos fundamentais relacionados às pilhas e baterias, incluindo sua definição, aspectos construtivos, parâmetros elétricos relevantes e principais tipos de testes aplicáveis conforme normas técnicas. Também são discutidas as características das

pilhas AA e AAA, fornecendo embasamento teórico para a análise experimental desenvolvida nos capítulos seguintes.

O terceiro capítulo apresenta a descrição da metodologia empregada no estudo, detalhando os critérios adotados para seleção das amostras, os parâmetros analisados e os procedimentos utilizados para a coleta e tratamento dos dados experimentais.

O quarto capítulo descreve os procedimentos experimentais, incluindo os instrumentos utilizados nos ensaios, a montagem e o funcionamento do circuito desenvolvido para os testes de descarga em corrente constante, bem como a estrutura adotada para a realização dos experimentos.

O Capítulo 5 expõe os resultados obtidos nos ensaios experimentais, abrangendo os testes em corrente constante (250 mA e 500 mA), os testes com resistência constante (1,1 Ω e 2,2 Ω) e a análise da recuperação de tensão após o período de repouso. São apresentadas as tabelas, curvas de descarga e comparações entre fabricantes.

O Capítulo 6 é dedicado à discussão dos resultados, na qual é realizada uma análise integrada dos dados experimentais, relacionando o comportamento observado nas diferentes condições de ensaio e avaliando o desempenho elétrico das pilhas de forma comparativa.

Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões do trabalho, sintetizando os principais achados da pesquisa e destacando as contribuições do estudo para a compreensão do desempenho elétrico de pilhas alcalinas em diferentes regimes de descarga, além de apresentar recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Para oferecer uma visão abrangente sobre este estudo de pilhas e baterias e ter uma fundamentação teórica consistente, esta revisão da literatura abordará diversos tópicos fundamentais. Primeiramente, será definida a estrutura básica das pilhas, incluindo a composição química dos materiais utilizados no ânodo, cátodo e eletrólito, além do processo de fabricação. Serão discutidos também os principais parâmetros das pilhas, como tensão de circuito aberto, capacidade, taxa de descarga, resistência interna, temperatura, densidade energética, energia específica e potência específica.

Em seguida, serão exploradas as diferenças entre pilhas normais e alcalinas, destacando suas aplicações e características específicas. As particularidades das pilhas AA e AAA serão também analisadas, considerando seus usos comuns e vantagens. Por fim, a revisão abrangerá os diferentes tipos de testes de descarregamento das pilhas, conforme as normas aplicáveis e o material técnico de catálogos de fabricantes, proporcionando um entendimento detalhado e prático do desempenho e eficiência das pilhas.

2.1 Definição de Pilhas

O termo “pilha” deriva do dispositivo criado por Alessandro Volta em 1800, que consistia em um empilhamento vertical de lâminas de zinco e cobre, separadas por um tecido umedecido com ácido. Esse arranjo, quando múltiplas pilhas são conectadas em série, forma o que atualmente chamamos de baterias. O termo “bateria”, por sua vez, origina-se da associação com os primeiros condensadores, conhecidos como garrafas de Leyden, e não com as células eletroquímicas como as pilhas. Apesar das distinções técnicas, os dois termos são frequentemente usados de forma intercambiável para descrever sistemas eletroquímicos que armazenam energia (Dell; Rand, 2001). Idealmente, “pilha” refere-se a um dispositivo com dois eletrodos e um eletrólito dispostos de forma a gerar energia elétrica. O eletrólito pode estar em estado líquido, sólido ou pastoso, mas deve sempre ser um condutor iônico. Quando os eletrodos são conectados a um circuito elétrico, uma corrente é estabelecida. Isso ocorre porque o material de um dos eletrodos passa por um processo de oxidação,

liberando elétrons (ânodo ou eletrodo negativo), enquanto o material do outro eletrodo sofre uma reação de redução, utilizando esses elétrons (cátodo ou eletrodo positivo) (Bocchi; Ferracin; Biaggio, 2000).

A Figura 1 exemplifica o funcionamento de uma das primeiras pilhas construídas, a pilha de Daniell. Esta pilha é composta por dois eletrodos distintos em soluções eletrolíticas separadas. O eletrodo negativo, conhecido como ânodo, é geralmente feito de zinco, enquanto o eletrodo positivo, ou cátodo, é feito de cobre. A pilha é estruturada com dois compartimentos separados, cada um contendo uma solução eletrolítica específica: sulfato de zinco (ZnSO_4) no compartimento do ânodo e sulfato de cobre (CuSO_4) no compartimento do cátodo. Um tubo poroso (Ponte de salina) separa as duas soluções, permitindo a troca de íons entre elas e evitando o contato direto dos eletrodos, o que previne curtos-circuitos (Manual da química, 2024).

Figura 1 – Esquema da pilha de Daniell.



Fonte: Manual da química (2024).

No funcionamento da pilha de Daniell, o zinco no ânodo sofre uma reação de oxidação, onde o zinco metálico (Zn) perde dois elétrons e se transforma em íons Zn^{2+} que entram na solução. A equação para esta reação é: $\text{Zn (s)} \rightarrow \text{Zn}^{2+} (\text{aq}) + 2 \text{e}^-$. Esses elétrons são então conduzidos através de um fio condutor até o cátodo, onde ocorre a reação de redução. No cátodo, os íons Cu^{2+} da solução são reduzidos ao

aceitar os elétrons que vêm do ânodo, depositando-se como cobre metálico no eletrodo. A equação para essa reação é: $\text{Cu}^{2+} (\text{aq}) + 2 \text{e}^{-} \rightarrow \text{Cu} (\text{s})$.

A diferença de potencial elétrico entre o ânodo e o cátodo cria uma força eletromotriz (FEM), que impulsiona o fluxo de elétrons através do circuito externo, gerando corrente elétrica. No circuito interno, os íons Zn^{2+} se movem da solução do ânodo para a solução do cátodo através da ponte de salina para manter o equilíbrio de carga (Manual da química, 2024).

2.2 Aspectos Construtivos das Pilhas

As pilhas mais utilizadas são compostas por vários componentes essenciais, incluindo eletrodos, eletrólito e separador. O eletrólito é uma substância que permite a condução de íons entre os eletrodos, podendo ser líquido, sólido ou pastoso. O separador é um material poroso que impede o contato direto entre os eletrodos, prevenindo curtos-circuitos enquanto permite a passagem de íons. A combinação desses componentes determina a eficiência, a capacidade e a segurança das pilhas (Dell; Rand, 2001). A seguir, serão abordados os aspectos construtivos específicos das pilhas primárias e secundárias.

2.2.1 Pilhas Primárias

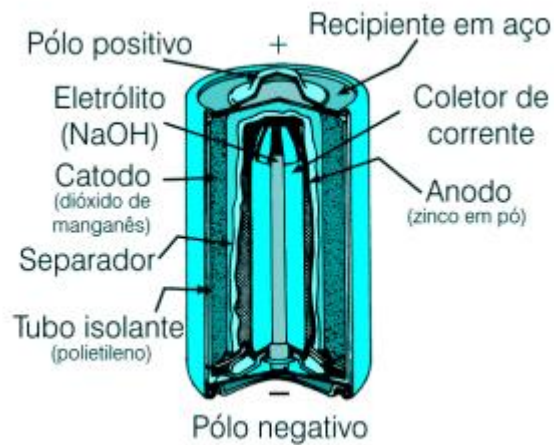
As pilhas primárias são projetadas para uso único e não são recarregáveis. Entre as mais comuns no mercado nacional estão aquelas compostas por diferentes materiais, como zinco/dióxido de manganês (Leclanché), zinco/dióxido de manganês (alcalinas) e lítio/dióxido de manganês. Esses materiais formam os componentes principais das pilhas e determinam suas características e aplicações podendo ser observados nas Figuras 2, 3 e 4. Elas são fabricadas de maneira hermética em formatos padronizados internacionalmente, como cilíndricos (AA, AAA, etc.), tipo botão e tipo moeda. A forma cilíndrica é preferida pela facilidade de fabricação, embora a forma prismática também seja utilizada para aplicações específicas.

Figura 2 – Pilha de zinco/dióxido de manganês (leclanché)



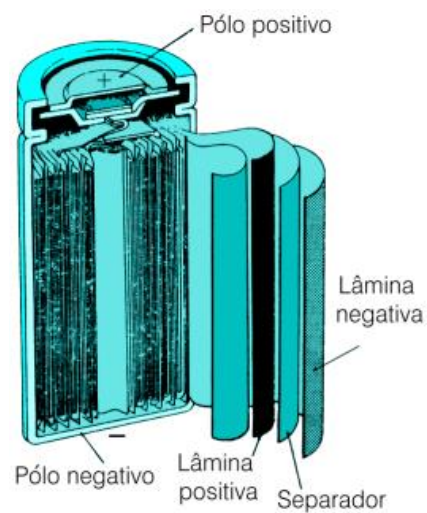
Fonte: Bocchi, Ferracin e Biaggio (2000).

Figura 3 – Pilha de zinco/dióxido de manganês (alcalina)



Fonte: Bocchi, Ferracin e Biaggio (2000).

Figura 4 – Pilha de lítio/dióxido de manganês



Fonte: Bocchi, Ferracin e Biaggio (2000).

A pilha de zinco/dióxido de manganês, desenvolvida por George Leclanché em 1860, permanece como uma das mais usadas entre as pilhas primárias. Esta pilha utiliza um eletrólito pastoso, composto por cloreto de amônio e cloreto de zinco, com o ânodo sendo feito de zinco metálico e o cátodo constituído por uma mistura de dióxido de manganês e grafite. As pilhas de zinco/dióxido de manganês oferecem um potencial de circuito aberto que varia de 1,55 V a 1,74 V em condições normais, sendo especialmente adequadas para dispositivos que exigem correntes elétricas correntes elétricas de frequência mediana. Melhorias na qualidade do dióxido de manganês e a troca do cloreto de amônio por cloreto de zinco no eletrólito podem aumentar consideravelmente o desempenho das pilhas em aplicações com demandas maiores de corrente (Kotz; Treichel jr, 2005).

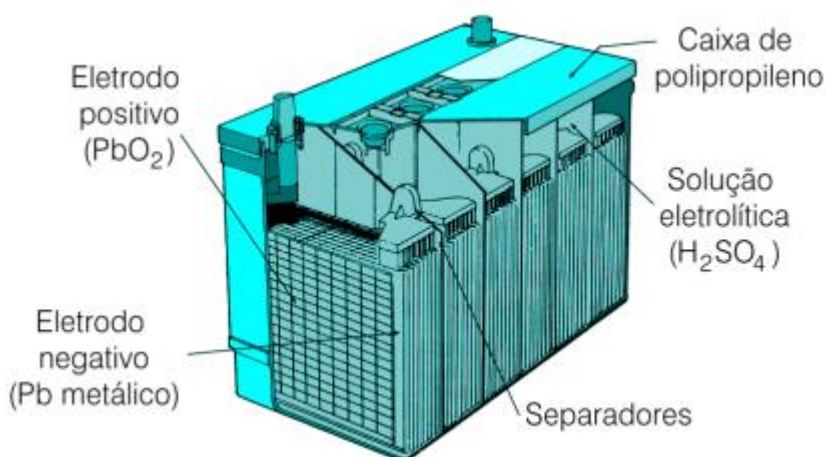
2.2.2 Pilhas Secundárias

As pilhas secundárias são conhecidas por serem recarregáveis e projetadas para uso repetido, o que as torna ideais para dispositivos que necessitam de um fornecimento constante de energia, como *smartphones*, *laptops* e veículos elétricos. Estas pilhas utilizam componentes como ânodos de grafite, cátodos de óxido de metal de lítio e eletrólitos de sal de lítio, e são equipadas com separadores e circuitos de proteção para garantir segurança e eficiência durante a recarga.

As baterias secundárias englobam não apenas pilhas individuais, mas também conjuntos de pilhas conectadas em série ou paralelo, o que proporciona uma maior capacidade e potencial total de armazenamento de energia. Entre as mais comuns no mercado nacional estão as baterias de chumbo/ácido, níquel/cádmio, hidreto metálico/óxido de níquel e íons lítio. Na Figura 5 está representada uma bateria de chumbo/óxido de chumbo (chumbo/ácido). A bateria de chumbo/ácido, por exemplo, utiliza chumbo e óxido de chumbo nos eletrodos e ácido sulfúrico como eletrólito. Durante a descarga, o ácido sulfúrico é consumido e a água é produzida, reduzindo a concentração de ácido no eletrólito. A medição da densidade do eletrólito ajuda a verificar o estado de carga da bateria, enquanto no processo de carga o sulfato de chumbo é reconvertido em chumbo e dióxido de chumbo. Essas baterias são essenciais nas aplicações em veículos, onde fornecem energia para sistemas de

partida, iluminação e ignição, e são configuradas para oferecer um potencial elétrico total de cerca de 12 V quando conectadas em série (Bocchi; Ferracin; Biaggio, 2000).

Figura 5– Bateria chumbo/óxido de chumbo (chumbo/ácido)



Fonte: Bocchi, Ferracin e Biaggio (2000).

2.3 Parâmetros de Pilhas

Os parâmetros elétricos pré-definidos pelas agências reguladoras para pilhas e baterias são fundamentais para assegurar seu desempenho e segurança durante o uso. A tensão nominal é o padrão que uma célula ou bateria fornece quando está completamente carregada e em condições normais de operação. Por exemplo, pilhas AA de alcalina têm uma tensão nominal de 1,5 V, enquanto as baterias de veículos geralmente operam com uma tensão nominal de 12 V (IEC, 2015). Esta tensão é um indicador fundamental do potencial elétrico disponível da bateria.

A capacidade, medida em ampère-hora (Ah) ou miliampère-hora (mAh), define a quantidade total de carga elétrica que uma bateria pode armazenar e fornecer até que sua tensão caia abaixo de um valor específico. Por exemplo, uma bateria de *smartphone* pode ter uma capacidade de 3000 mAh, o que significa que pode fornecer 3000 miliamperes por uma hora antes de precisar ser recarregada. As baterias automotivas, por sua vez, frequentemente têm capacidades na faixa de 60 Ah, adequadas para fornecer grandes quantidades de corrente em um curto período de tempo (IEC, 2017).

A corrente de carga e descarga refere-se à corrente máxima que a bateria pode operar sem causar danos. Pilhas AA têm uma corrente de descarga típica de cerca

de 0,5 A a 1 A, dependendo do tipo e da aplicação. As baterias projetadas para aplicações de alta potência, como as de veículos elétricos, podem ter correntes de descarga mais elevadas (ANSI, 2020). Esse parâmetro é essencial para garantir que a bateria funcione corretamente sem sobrecarregar seus componentes internos.

A resistência interna da bateria, expressa em ohms (Ω), é a resistência ao fluxo de corrente dentro da célula. Esta resistência afeta a eficiência da bateria e a quantidade de calor gerado durante a operação. Pilhas alcalinas costumam ter resistências internas que variam entre 0,1 e 0,2 Ω . Uma resistência interna mais baixa geralmente indica melhor desempenho e menor perda de energia na forma de calor (IEC, 2015).

O tempo de carga é o período necessário para carregar completamente uma bateria a partir de um estado totalmente descarregado. Uma bateria de *laptop* pode levar entre 2 a 4 horas para alcançar uma carga completa, dependendo da capacidade da bateria e da potência do carregador (ANSI, 2021). O tempo de carga é um fator importante para usuários que precisam de um ciclo de carga rápido e eficiente.

Finalmente, a temperatura de operação é a faixa de temperatura em que a bateria pode funcionar com segurança e eficiência. Muitas baterias de íon de lítio são projetadas para operar bem em uma faixa de temperatura de 0°C a 45°C. Operar fora dessa faixa pode afetar a performance e a vida útil da bateria, bem como aumentar o risco de falhas (IEC, 2017).

2.4 Testes de Pilhas

Os testes realizados em pilhas, conforme normas como IEC 60086 e ANSI C18, são fundamentais para garantir a segurança, eficiência e durabilidade das pilhas. Um dos testes principais é o Teste de Capacidade, que tem como objetivo verificar a quantidade de carga que a pilha pode fornecer. No procedimento, a pilha é descarregada até um ponto ótimo previamente definido, através de uma corrente constante, e a capacidade é calculada com base no tempo de descarga e na corrente fornecida (IEC, 2015). A Capacidade da pilha é calculada conforme mostra a Equação 1.

$$Capacidade(mAh) = \frac{\text{Tempo de descarga(h)} \times \text{Corrente(A)}}{1000} \quad (1)$$

De acordo com a IEC 60086-1, recomenda-se que a capacidade medida não seja inferior a aproximadamente 80 % da capacidade nominal declarada pelo fabricante quando o ensaio é realizado nas condições especificadas de corrente e temperatura (geralmente 20 °C ± 2 °C). Esse parâmetro serve como referência de desempenho, permitindo comparar a eficiência entre diferentes marcas e lotes.

Outro teste essencial é o Teste de Descarga, que avalia o desempenho da pilha em diferentes condições de descarga. Durante este teste, a pilha é submetida a várias taxas de corrente e temperaturas, e mede-se a tensão e o tempo até atingir o ponto de corte (IEC, 2015). Este teste ajuda a determinar como a pilha se comporta sob diferentes demandas de energia e condições ambientais. A norma IEC especifica que a tensão mínima aceitável para a maioria das pilhas é de 0,8V a 1,0V durante o teste de descarga.

O Teste de Ciclo de Vida é realizado para determinar a durabilidade da pilha sob uso cíclico. A pilha é submetida a múltiplos ciclos de carga e descarga para avaliar a capacidade residual após um número definido de ciclos (IEC, 2015). Este teste é vital para pilhas utilizadas em dispositivos que requerem recargas frequentes, como celulares e *laptops*. A pilha deve manter pelo menos 70% de sua capacidade inicial após 500 ciclos de carga e descarga para ser considerada de boa qualidade.

Para garantir a integridade física da pilha, é realizado o Teste de Vazamento. Neste teste, a pilha é armazenada em condições específicas por um período pré-determinado, e depois é inspecionada visualmente para detecção de vazamentos (IEC, 2015). A presença de vazamentos indica falhas na selagem da pilha, o que pode comprometer a segurança do dispositivo. A norma estabelece que qualquer sinal de vazamento é inaceitável e a pilha é reprovada no teste.

O Teste de Resistência Interna mede a resistência interna da pilha, que afeta a eficiência e a geração de calor durante a descarga. A resistência interna é medida usando um método de descarga por pulso de corrente de curta duração, com tempo e intensidade definidos conforme a norma IEC 60086 (IEC, 2015). A norma estabelece o procedimento de ensaio para essa determinação, não fixando um valor máximo

universal de aceitação, uma vez que a resistência interna pode variar conforme o tipo de pilha, fabricante e condições de medição. A Equação 2 apresenta este cálculo (adaptado de IEC, 2015).

$$R(\text{interna}) = \frac{V_{\text{pulso}} - V_{\text{descarga}}}{I_{\text{pulso}}} \quad (2)$$

Onde:

V_{pulso} = Tensão medida durante o pulso (V);

V_{descarga} = Tensão da pilha antes de iniciar o pulso de descarga (V);

I_{pulso} = Corrente aplicada durante o pulso de descarga (A).

O Teste de Segurança garante que a pilha não apresente riscos sob condições extremas. Este teste inclui verificações de curto-circuito, impacto, vibração, choque térmico e sobrecarga para avaliar a resistência da pilha a condições adversas (IEC, 2015). Por exemplo, no teste de curto-circuito, a pilha é exposta a um curto-circuito externo e monitorada para garantir que não haja explosões ou vazamentos perigosos. As pilhas devem suportar um curto-circuito sem explodir ou vazar, demonstrando que são seguras para uso.

Os testes de temperatura, conhecidos como Teste de Temperatura, avaliam o desempenho da pilha em diferentes temperaturas. A pilha é testada em temperaturas extremas, tanto altas quanto baixas, para verificar a capacidade e a resistência interna nessas condições (IEC, 2015). Este teste é importante para aplicações em ambientes com variações significativas de temperatura. As pilhas devem manter pelo menos 90% de sua capacidade nominal em temperaturas que variam de -20°C a 55°C.

Finalmente, o Teste de Retenção de Carga verifica a capacidade da pilha de manter a carga ao longo do tempo sem uso. A pilha é carregada completamente e posteriormente sua capacidade residual é medida (IEC, 2015). Este teste é fundamental para pilhas destinadas a dispositivos de emergência, que precisam manter a carga por longos períodos sem uso. A norma geralmente exige que a pilha retenha pelo menos 85% de sua capacidade inicial após 12 meses de armazenamento.

2.5 Características entre Pilhas AA e AAA

As pilhas AA e AAA são amplamente utilizadas em dispositivos eletrônicos, cada uma atendendo a diferentes necessidades de energia e espaço. As pilhas AA, também conhecidas como pilhas LR6, têm dimensões de 50,5 mm de comprimento e 14,5 mm de diâmetro. Elas oferecem uma capacidade típica de 2.700 a 3.000 mAh para versões alcalinas e pesam cerca de 23 gramas (Panasonic, 2021). Devido à sua maior capacidade e peso, as pilhas AA são ideais para dispositivos que demandam mais energia e uso contínuo, como câmeras digitais, brinquedos, lanternas e controles remotos. A tabela 1 indica as características referentes as pilhas AA alcalinas do Fabricante B.

Tabela 1 – Especificações da pilha AA alcalina.

Especificações	Valores
LR6 / M / AA / AM3 / Mignon / MN1500 / 15A / 15AC	
Fabricado em	Bélgica
Tipo	Folha Alcalina
Tensão nominal (V)	1,5
Eletrólito	Hidróxido de Potássio
Peso médio (g)	22,0
Temperatura de armazenamento	+10°C (50°F) ~ +25°C (77°F)
Temperatura de operação	-20°C (-4°F) ~ +55°C (131°F)
Impedância média	±105 mOhm @ 1 kHz
Metais pesados	Sem adição de Hg, Cd ou Pb
Conformidade	IEC 60086-1; IEC 60086-2; IEC 60086-5; Diretiva UE 2006/66/EC; Nordic Ecolabel
Tensão mínima de corte	0,8 V/célula (0,9 V em série múltipla)

Fonte: PANASONIC (2021). Traduzida pelo autor.

Em contraste, as pilhas AAA, ou pilhas LR03, são menores, com 44,5 mm de comprimento e 10,5 mm de diâmetro. Sua capacidade típica varia de 1.000 a 1.200 mAh para versões alcalinas e seu peso é de aproximadamente 11 gramas (PANASONIC, 2021). As pilhas AAA são frequentemente usadas em dispositivos que exigem menos energia e possuem espaço limitado, como controles remotos, relógios e calculadoras. A menor capacidade e peso das pilhas AAA tornam-nas mais apropriadas para dispositivos pequenos e portáteis que não necessitam de uma alta demanda de energia contínua. Na tabela 2 é mostrado as especificações das pilhas AAA alcalinas do PANASONIC.

Tabela 2 – Especificações da pilha AAA alcalina

Especificações	Valores
LR03 / S / AAA / AM4 / MICRO / MN2400 / 24A / 24AC	
Fabricado em	Bélgica
Tipo	Folha Alcalina
Tensão nominal (V)	1,5
Eletrólito	Hidróxido de Potássio
Peso médio (g)	11,0
Temperatura de armazenamento	+10°C (50°F) ~ +25°C (77°F)
Temperatura de operação	-20°C (-4°F) ~ +55°C (131°F)
Impedância média	±180 mOhm @ 1 kHz (nova)
Metais pesados	Sem adição de Hg, Cd ou Pb
Conformidade	IEC 60086-1; IEC 60086-2; IEC 60086-5; Diretiva UE 2006/66/EC; Nordic Ecolabel
Tensão mínima de corte	0,8 V por célula (0,9 V em série múltipla)

Fonte: PANASONIC (2021). Traduzida pelo autor.

Ambas as pilhas AA e AAA são fabricadas em formatos padrão internacionalmente reconhecidos, garantindo sua compatibilidade com dispositivos compatíveis. A escolha entre AA e AAA depende das necessidades específicas de energia e do espaço disponível no dispositivo. Pilhas AA oferecem uma descarga de energia mais longa e são recomendadas para aplicações que requerem maior duração da bateria, enquanto pilhas AAA, devido ao seu tamanho compacto, são mais adequadas para dispositivos menores e de menor consumo energético (IEC, 2021).

3 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

O processo de pesquisa focou na análise de diferentes tipos de pilhas, com o objetivo de explorar suas características, desempenho e aplicabilidade em variados cenários. No início, foram conduzidos testes utilizando os instrumentos de medida disponíveis no laboratório de ensaios. Esses testes preliminares tiveram como objetivo coletar dados iniciais que possibilitem a comparação dos resultados de fabricantes distintos, identificando variações de qualidade e desempenho entre os produtos disponíveis no mercado. Além disso, foram examinados os resultados obtidos para pilhas de um mesmo fabricante, analisando diferentes lotes de produção para avaliar a consistência e uniformidade dos produtos ao longo do tempo.

A metodologia empregada no estudo visou à avaliação de variáveis críticas durante os ensaios, especialmente a tensão da pilha, a corrente de descarga aplicada de forma constante e a resistência interna monitorada ao longo do processo. Para isso, foi implementado um protótipo de circuito para ensaios de descarga elétrica com corrente constante. Este dispositivo opera como uma carga eletrônica de corrente constante, essencial para drenar uma corrente estável da pilha sob teste, permitindo a obtenção de curvas de descarga confiáveis e o cálculo preciso da capacidade.

Os parâmetros elétricos de desempenho incluem a tensão nominal (ex: 1,5 V para AA alcalinas), a capacidade (Ah ou mAh), que define a carga total fornecível, e a resistência interna (R_{int}), que influencia a queda de tensão e a dissipação de energia durante a descarga. Normas como a IEC 60086 estabelecem procedimentos para ensaios de capacidade e desempenho de pilhas primárias, incluindo critérios de avaliação baseados na capacidade nominal declarada pelo fabricante. A resistência interna constitui parâmetro relevante de desempenho, estando diretamente associada à estabilidade da tensão sob carga e ao comportamento energético da pilha ao longo do ensaio.

Os ensaios foram conduzidos em pilhas alcalinas AA comerciais, não recarregáveis, com tensão nominal de 1,5 V, pertencentes a três fabricantes distintos, identificados neste trabalho como Fabricante A, Fabricante B e Fabricante C. As pilhas avaliadas foram das marcas Elgin Alcalina, Panasonic Alcalina e Rayovac Alcalina. Ao longo do trabalho, a identificação por letras é utilizada exclusivamente para fins de organização e análise dos resultados, sem estabelecer vinculação direta entre o

desempenho observado e o fabricante específico. Todas as pilhas utilizadas eram novas, provenientes de lotes distintos, não sendo reutilizadas em ensaios subsequentes.

Para garantir a confiabilidade, duas unidades de cada fabricante foram testadas nos ensaios em corrente constante de 250 mA (baixa/média demanda) e 500 mA (alta demanda). Nos testes com resistência constante (1,1 Ω e 2,2 Ω), foi utilizada uma unidade de cada fabricante em cada condição de carga. Em todos os ensaios, as medições de tensão foram realizadas a cada 5 minutos, durante um período total de 2 horas. Ao término do ensaio, a pilha permaneceu sem carga por 24 horas, sendo então registrada a tensão após repouso (AR), com o objetivo de avaliar a recuperação de tensão após a interrupção da descarga. A capacidade elétrica (mAh) foi calculada pelo produto da corrente pelo tempo total de descarga, e a energia entregue (Wh) foi estimada utilizando a regra dos trapézios. A resistência interna inicial foi calculada pela diferença entre a tensão em circuito aberto (OC) e a tensão sob carga, dividida pela corrente aplicada, já resistência interna final foi estimada a partir da diferença entre a tensão medida após o período de repouso (AR) e o último valor de tensão registrado com a pilha sob carga, dividida pela corrente correspondente.

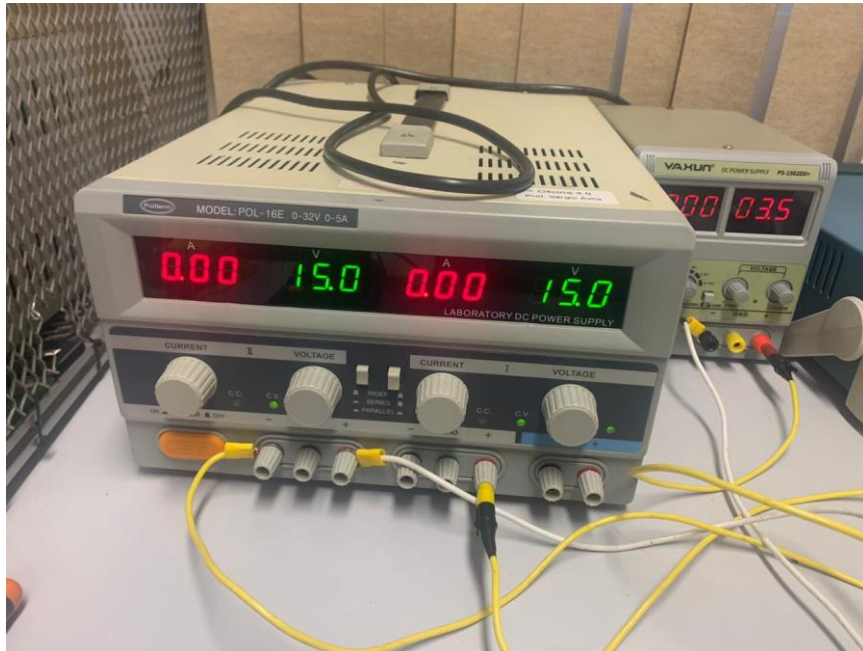
4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O presente capítulo descreve detalhadamente os procedimentos experimentais adotados ao longo do estudo, abrangendo desde os instrumentos utilizados até a montagem dos circuitos empregados nos ensaios de descarga das pilhas. O objetivo desta etapa é apresentar de forma clara a estrutura necessária para a obtenção dos dados experimentais, bem como justificar a escolha das metodologias aplicadas. Para isso, foram conduzidos dois tipos principais de ensaio: testes em corrente constante, que permitem avaliar o desempenho das pilhas sob uma condição controlada e padronizada de descarga, e testes com resistência de carga constante, que simulam de maneira mais realista o funcionamento típico de dispositivos eletrônicos alimentados por pilhas alcalinas.

4.1 Instrumentos Utilizados nos Ensaios

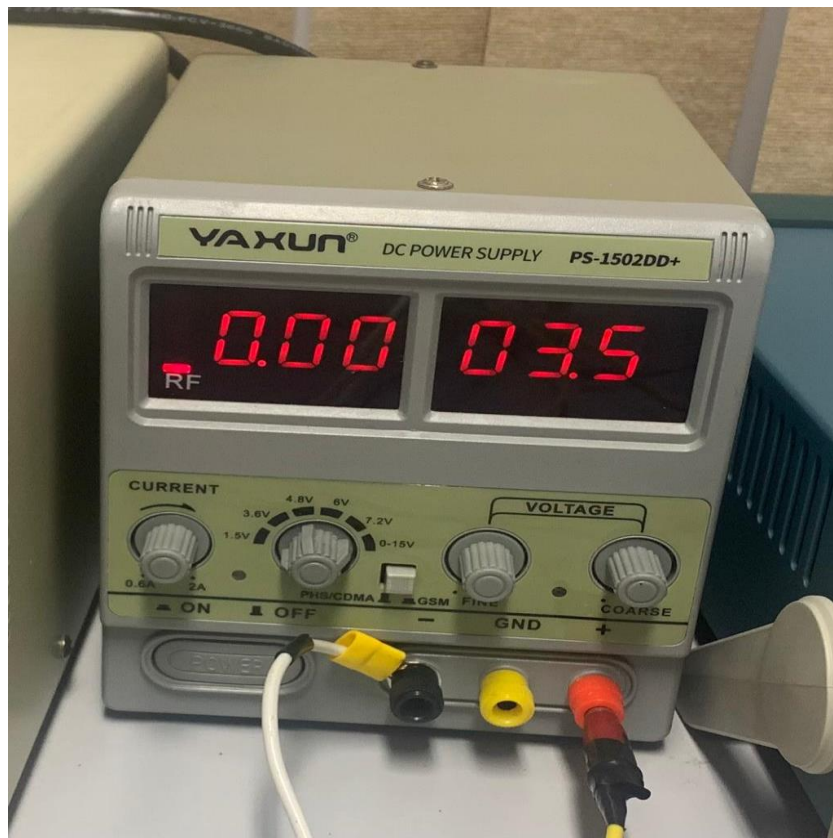
Para a realização dos ensaios experimentais foram utilizados instrumentos de alimentação e medição capazes de garantir precisão e confiabilidade aos resultados obtidos. A Figura 6 apresenta a fonte simétrica modelo POL-16E, utilizada para alimentar o amplificador operacional com tensões de ± 15 V. A Figura 7 mostra a fonte de tensão contínua Vaxun PS-1502DD+, empregada na geração da tensão de referência aplicada ao divisor resistivo do circuito. A Figura 8 ilustra o multímetro digital de precisão Tektronix DMM4050, utilizado na medição da corrente drenada pelas pilhas durante os testes. Por fim, a Figura 9 apresenta o multímetro digital portátil Minipa ET-1400, utilizado para a medição da tensão das pilhas em circuito aberto e sob carga.

Figura 6 – Fonte simétrica (modelo POL-16E)



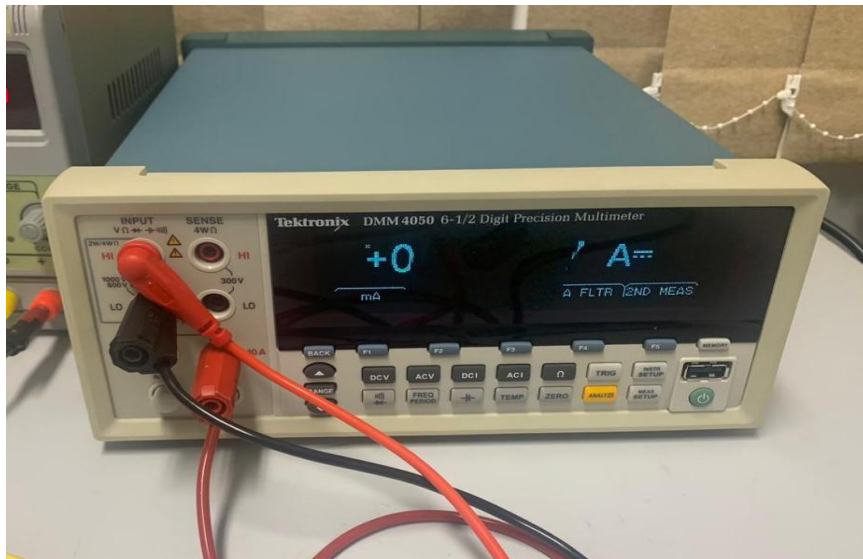
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 7 – Fonte de tensão contínua (Vaxun PS-1502DD+)



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 8 – Multímetro digital Tectronix DDM 4050



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 9 – Multímetro digital Minipa ET-1400.

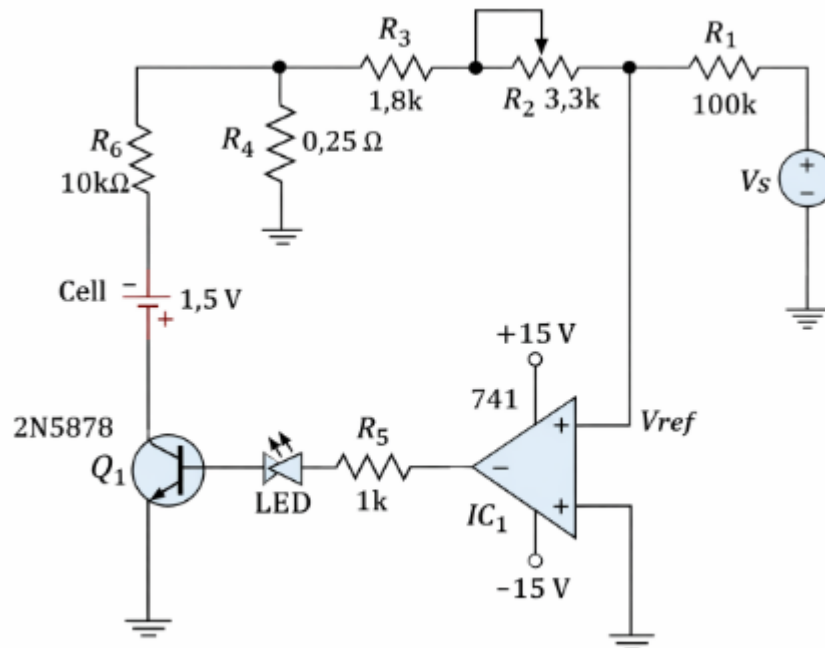


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.2 Montagem e Funcionamento do Circuito

O circuito utilizado para avaliar a descarga das pilhas em regime de corrente constante é apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Layout do circuito.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O circuito apresentado na Figura 10, funciona como uma carga eletrônica de corrente constante. Seu principal objetivo é drenar uma corrente estável e pré-definida da pilha sob teste, independentemente da variação de sua tensão ao longo do processo de descarga. Este método é fundamental para obter curvas de descarga confiáveis e calcular a capacidade real da pilha em ampères-hora (Ah) ou miliampères-hora (mAh).

O funcionamento do circuito se baseia em uma malha de realimentação com um amplificador operacional (AmpOp) e um transistor de potência:

1. **Referência de Tensão:** o amplificador operacional IC1 (LM741) tem sua entrada inversora (-) conectada ao potencial de referência do circuito (GND). A entrada não inversora (+) recebe uma tensão de referência (V_{ref}) estabelecida pelo divisor resistivo formado por R1 e R2, alimentado pela fonte

V1. A diferença de potencial entre as entradas determina o nível de tensão na saída do amplificador operacional, que por sua vez controla o transistor de potência Q1.

2. **Sensor de Corrente:** o resistor de baixo valor ôhmico R4 ($0,25 \Omega$) atua como um sensor de corrente. A corrente de descarga da pilha ($I_{descarga}$), que flui através do transistor Q1, também passa por R4, gerando uma queda de tensão ($V_{R4} = I_{descarga} * R4$).
3. **Ação de Controle:** a saída do LM741 polariza o transistor PNP Q1 (2N5878), regulando sua condução. Operando na região ativa, o transistor estabelece uma corrente aproximadamente constante, definida pela tensão aplicada à sua base e pela queda de tensão desenvolvida sobre o resistor R4.
4. **Corrente Constante:** a corrente de descarga da pilha é determinada pela corrente de base do transistor Q1, estabelecida pela tensão de saída do LM741 e limitada pelos resistores do circuito. A condução do transistor, associada à queda de tensão desenvolvida sobre o resistor shunt R4, resulta em um regime de corrente aproximadamente constante durante o ensaio, ajustado para os valores de 250 mA ou 500 mA.

A pilha é descarregada sob a condição estabelecida, mantendo-se o regime de descarga definido ao longo do ensaio. O resistor R5 limita a corrente que circula pelo LED e pela base do transistor, a intensidade luminosa do LED, aumenta à medida que a pilha se descarrega.

5 RESULTADO DOS ENSAIOS

Este capítulo apresenta os resultados experimentais obtidos durante os ensaios de descarga realizados em pilhas dos Fabricantes A, B e C. Os testes seguiram a metodologia descrita no Capítulo 4, utilizando o circuito de corrente constante, resistência constante e os instrumentos de medição previamente apresentados. O objetivo geral desta etapa é comparar o desempenho das pilhas sob diferentes condições de descarga, com foco na energia fornecida, no comportamento das curvas de tensão e na variação da resistência interna ao longo do ensaio.

5.1 Ensaio com Corrente Constante

Os ensaios em corrente constante têm como objetivo avaliar o desempenho das pilhas sob condições controladas de descarga, comparando a energia fornecida, o comportamento da tensão ao longo do tempo e a variação da resistência interna. Nesta etapa, foram aplicadas duas correntes distintas (250 mA e 500 mA) a fim de analisar a influência da intensidade de descarga no comportamento elétrico de cada fabricante, os valores das tensões ao longo dos testes estão contidos nos apêndices A e B deste documento.

A capacidade elétrica das pilhas submetidas aos ensaios em corrente constante foi estimada com base na Equação (1), considerando o produto entre a corrente aplicada e o tempo total de descarga. Para a condição de 250 mA durante 2 horas, obteve-se uma capacidade de 500 mAh.

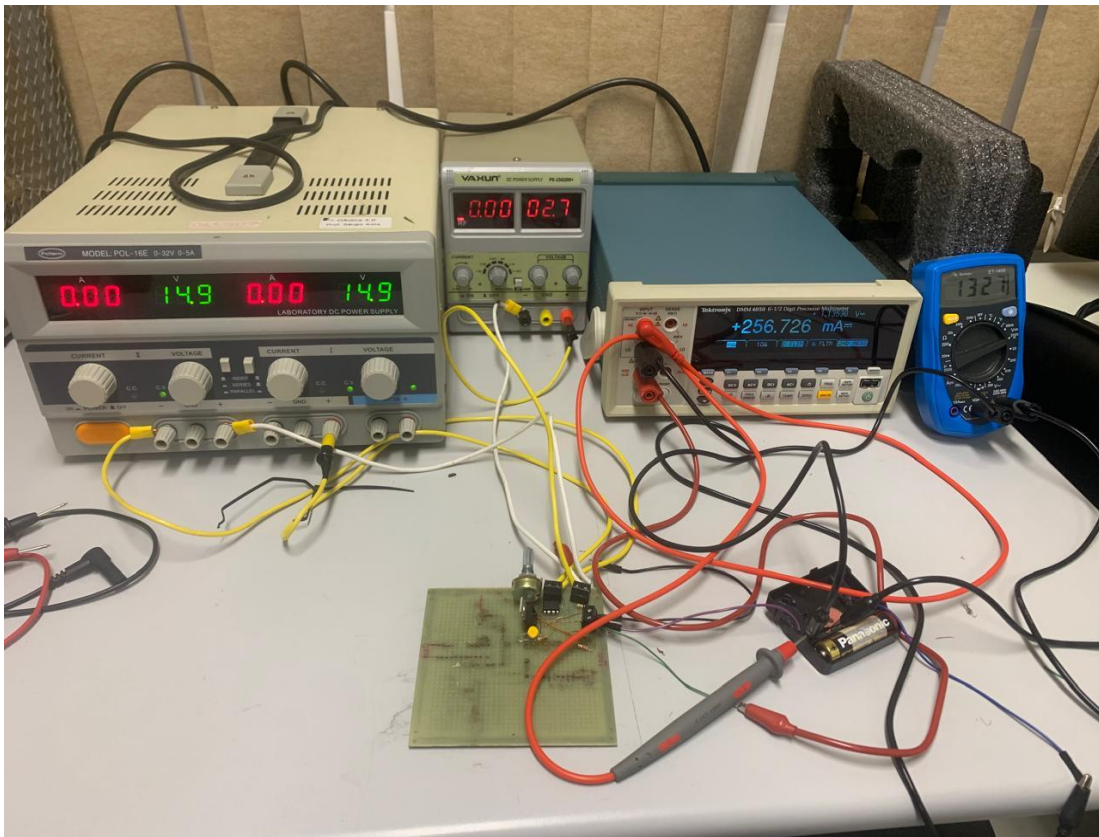
Além da comparação entre fabricantes, esta seção também busca avaliar a homogeneidade entre as amostras de um mesmo fabricante. Para isso, nas subseções 5.1.1 e 5.1.2, as curvas de descarga são analisadas individualmente por marca, com o objetivo de verificar a repetibilidade e a consistência dos resultados dentro de cada lote ensaiado. Posteriormente, na subseção 5.1.3, é realizada a comparação entre as condições de 250 mA e 500 mA, permitindo avaliar a influência da intensidade de descarga no desempenho das pilhas.

5.1.1 Teste com Corrente Constante – 250mA

O ensaio de descarga em corrente constante de 250 mA foi selecionado como uma condição intermediária de esforço elétrico, representativa de aplicações que exigem fornecimento contínuo de energia a uma taxa moderada. Para cada fabricante, foram ensaiadas duas pilhas do mesmo lote, com a finalidade de avaliar não apenas o desempenho médio, mas também a uniformidade entre amostras semelhantes.

A Figura 11 apresenta o arranjo experimental utilizado no ensaio. Durante o teste, as tensões foram registradas ao longo de toda a descarga, possibilitando o cálculo da energia fornecida por integração numérica (regra do trapézio), bem como a estimativa da resistência interna inicial e final, com base na diferença entre a tensão sem carga e a tensão sob carga.

Figura 11 – Montagem experimental do ensaio de descarga em 250 mA.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A energia fornecida pelas pilhas durante o ensaio foi calculada utilizando o método dos trapézios, que fornece uma aproximação mais precisa da integral da curva de tensão ao longo do tempo. A expressão utilizada é apresentada na Equação (3):

$$E \cong I \times \sum_i \frac{(V_i + V_{i+1})}{2} \times \Delta t \quad (3)$$

Onde:

E: energia total fornecida pela pilha (em Wh).

I: corrente elétrica constante durante o teste ($I = 0,250$ A).

V_i, V_{i+1} : tensões consecutivas medidas durante o teste (em volts).

Δt : intervalo de tempo entre medições ($\Delta t = 0,083$ h), equivalente a 5 minutos.

Os valores de energia fornecida pelas pilhas durante o ensaio de 250 mA são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Energia fornecida pelas pilhas no ensaio de 250 mA

Fabricante	Pilha 1 (Wh)	Pilha 2 (Wh)	Energia Média (Wh)
A	0,659	0,677	0,668
B	0,662	0,666	0,664
C	0,646	0,651	0,649

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Conforme apresentado na Tabela 3, os três fabricantes forneceram valores de energia relativamente próximos durante o ensaio de 250 mA. O Fabricante A apresentou a maior energia média (0,668 Wh), seguido pelo Fabricante B (0,664 Wh), enquanto o Fabricante C apresentou a menor energia (0,649 Wh). As diferenças entre as duas pilhas de cada fabricante foram inferiores a 3%, indicando boa uniformidade entre as amostras e confirmando a repetibilidade dos resultados.

A resistência interna média inicial e final das pilhas é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Resistência interna das pilhas no ensaio de 250 mA

Fabricante	R_inicial (mΩ)	R_final (mΩ)	ΔR (mΩ)	ΔR (%)
A	432	848	416	96
B	360	836	476	132
C	400	836	436	109

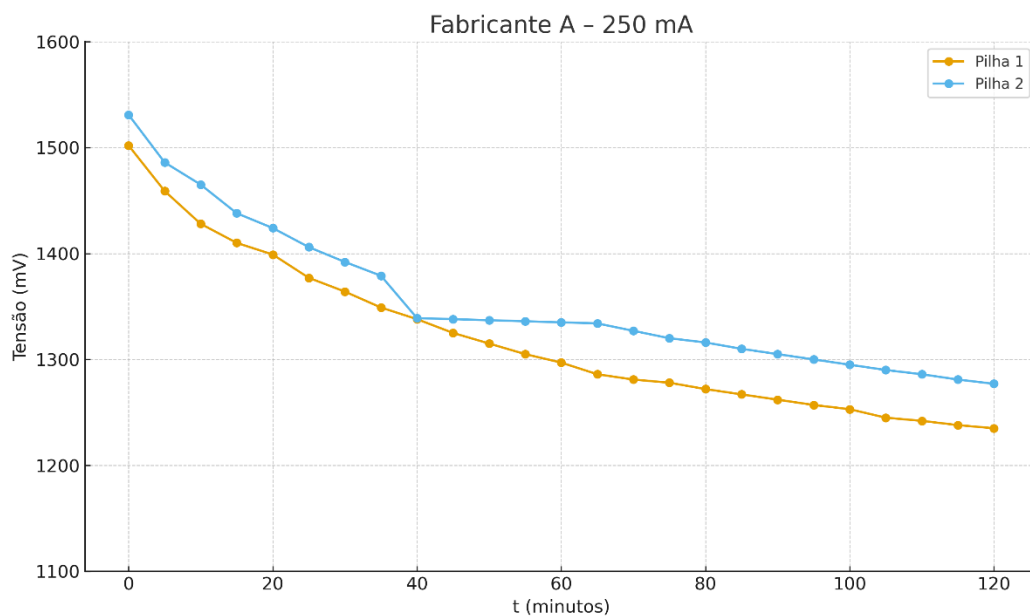
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Tabela 4 mostra que todas as pilhas apresentaram aumento significativo da resistência interna ao longo do ensaio, com variações entre 96% e 132%. O Fabricante

A apresentou o menor acréscimo percentual (+96%), sugerindo maior estabilidade estrutural durante a descarga. O Fabricante B apresentou o maior aumento relativo (+132%), enquanto o Fabricante C ficou em posição intermediária (+109%). Esses resultados reforçam o comportamento esperado de degradação e polarização interna das pilhas à medida que a descarga avança.

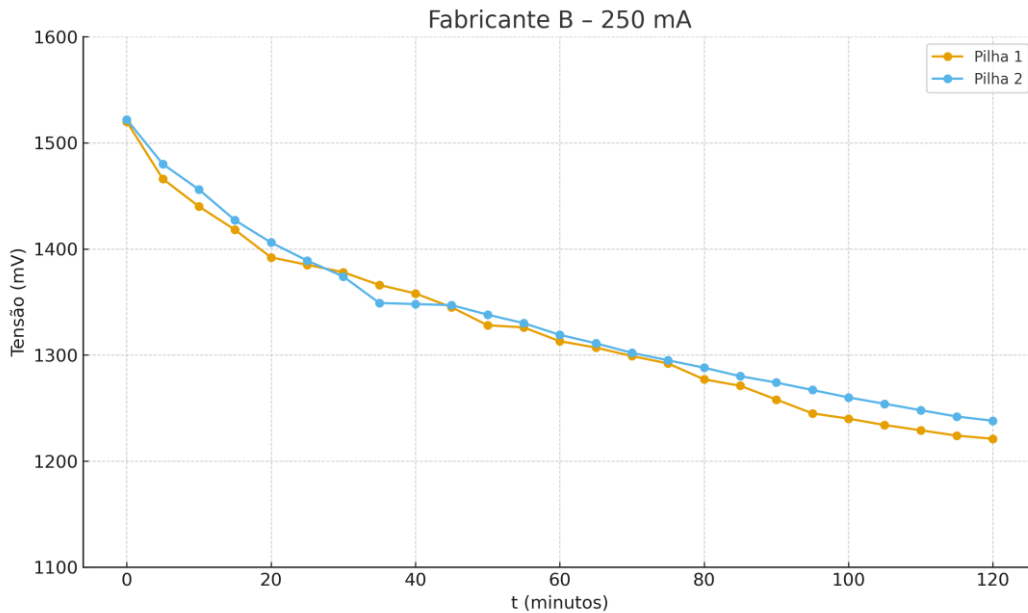
Os valores de tensão registrados ao longo do ensaio são apresentados nos gráficos das figuras 12, 13 e 14.

Figura 12 – Curva de tensão do Fabricante A no ensaio de 250 mA.



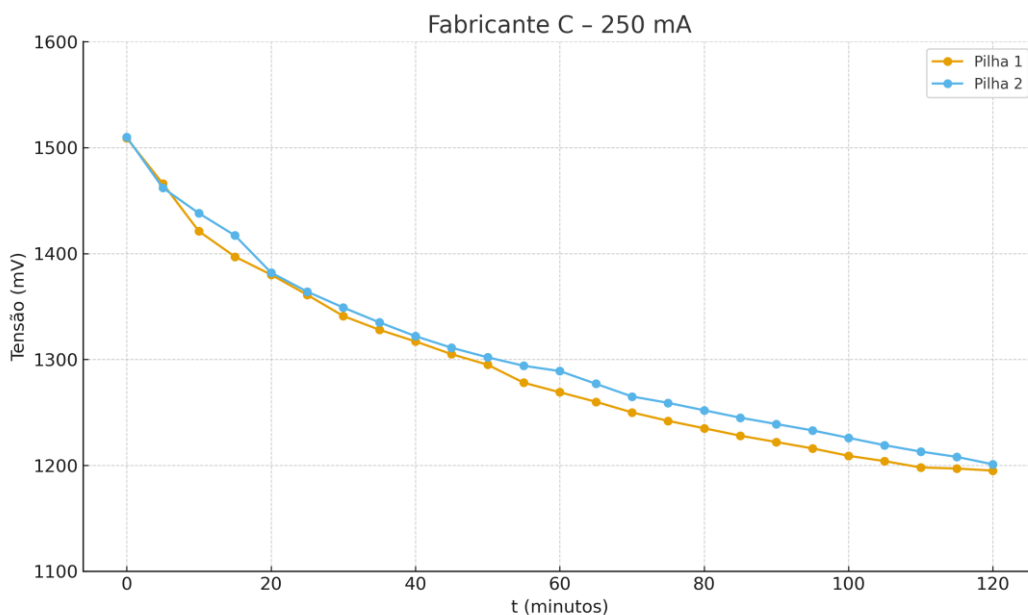
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 13 – Curva de tensão do Fabricante B no ensaio de 250 mA



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 14 – Curva de tensão do Fabricante C no ensaio de 250 mA.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

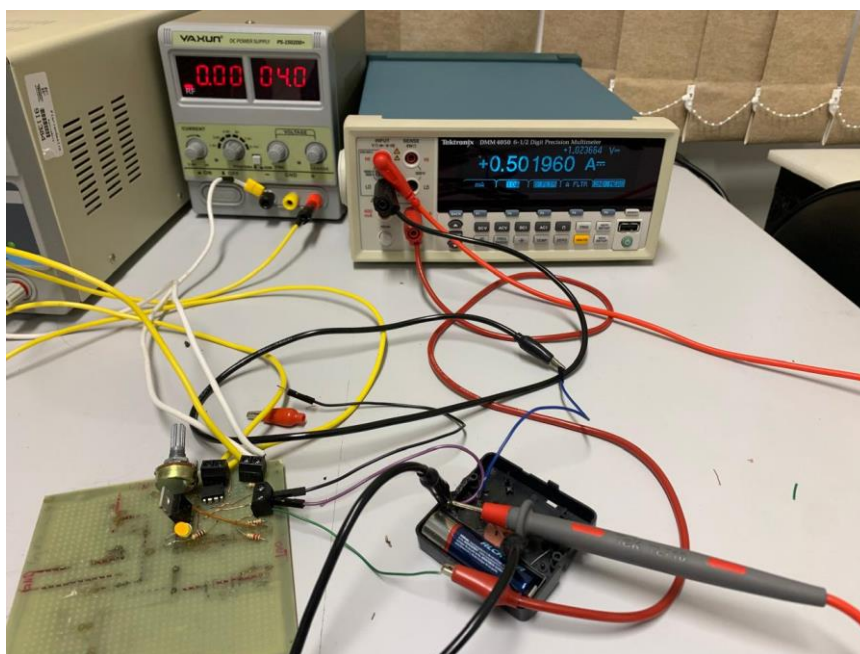
Conforme observado nas Figuras 12, 13 e 14, todas as pilhas apresentaram queda gradual de tensão ao longo do ensaio, sem oscilações acentuadas, refletindo o comportamento esperado para uma descarga controlada em corrente constante. As pilhas dos três fabricantes mantiveram comportamento semelhante ao longo da descarga, com pequenas variações nos níveis médios de tensão.

Os resultados do ensaio indicam que, sob descarga de 250 mA, os três fabricantes apresentaram desempenho energético bastante próximo, com diferenças inferiores a 3% entre os valores médios obtidos. Embora o Fabricante A tenha apresentado a maior energia média, essa diferença pode estar dentro da margem de incerteza experimental, não sendo possível afirmar superioridade inequívoca entre as marcas apenas com base neste ensaio. A análise da resistência interna confirma o comportamento esperado de aumento progressivo ao longo da descarga para todas as amostras.

5.1.2 Teste com Corrente Constante – 500mA

O teste em corrente constante de 500 mA foi conduzido com o objetivo de avaliar o comportamento das pilhas sob uma condição mais severa de descarga, permitindo analisar sua tensão, energia fornecida e resistência interna. Assim como no ensaio de 250 mA, duas pilhas de cada fabricante foram submetidas ao mesmo procedimento experimental, e a montagem utilizada no ensaio é apresentada na Figura 15.

Figura 15 – Montagem experimental do ensaio de 500 mA.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Tabela 5 apresenta os valores de energia calculados pelo método dos trapézios para cada pilha ensaiada, além da média por fabricante.

Tabela 5 – Energia fornecida pelas pilhas no ensaio de 500 mA.

Fabricante	Pilha 1 (Wh)	Pilha 2 (Wh)	Energia Média (Wh)
A	1,150	1,168	1,159
B	1,159	1,179	1,169
C	1,088	0,959	1,024

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os resultados da Tabela 5 mostram que o Fabricante B apresentou a maior energia média sob descarga de 500 mA, seguido pelo Fabricante A. O Fabricante C apresentou a menor energia fornecida, evidenciando maior sensibilidade ao aumento da corrente de descarga. As duas pilhas de cada fabricante apresentaram valores próximos, indicando boa uniformidade entre as amostras.

A Tabela 6 apresenta os valores médios de resistência interna inicial e final, bem como a variação ΔR e $\Delta R\%$, calculadas a partir da diferença entre as tensões sem carga e sob carga ao início e término do ensaio.

Tabela 6 – Resistência interna das pilhas no ensaio de 500 mA

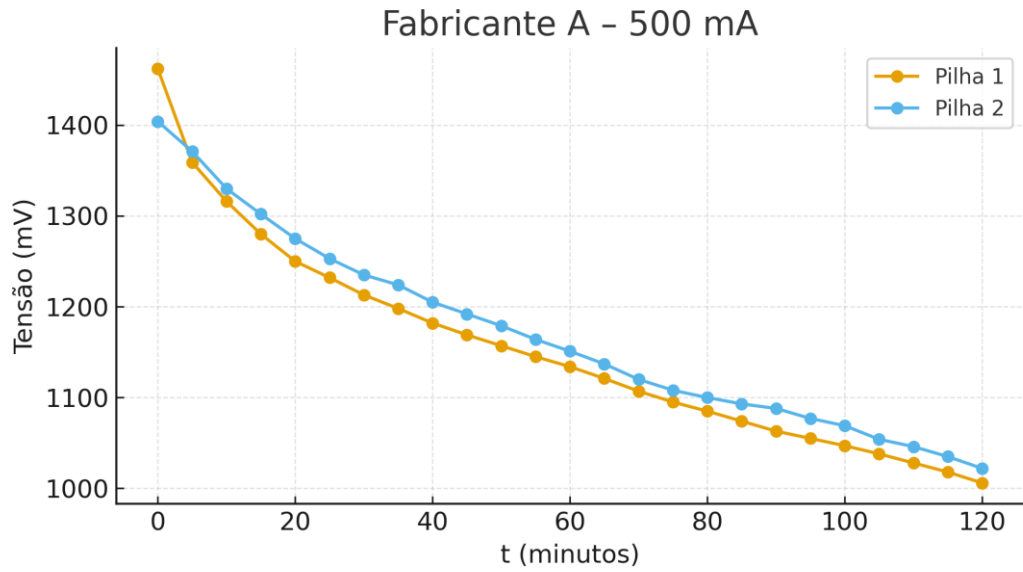
Fabricante	R_inicial (mΩ)	R_final (mΩ)	ΔR (mΩ)	ΔR (%)
A	381	782	401	105
B	261	761	500	191
C	503	1012	509	101

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Tabela 6 evidencia que todos os fabricantes apresentaram aumento de resistência interna ao longo do ensaio, como esperado em condições de descarga mais severas. O maior $\Delta R\%$ foi observado no Fabricante B, seguido pelo Fabricante A e, por último, pelo Fabricante C. Esse aumento está relacionado a efeitos de polarização e degradação dos materiais ativos durante a descarga.

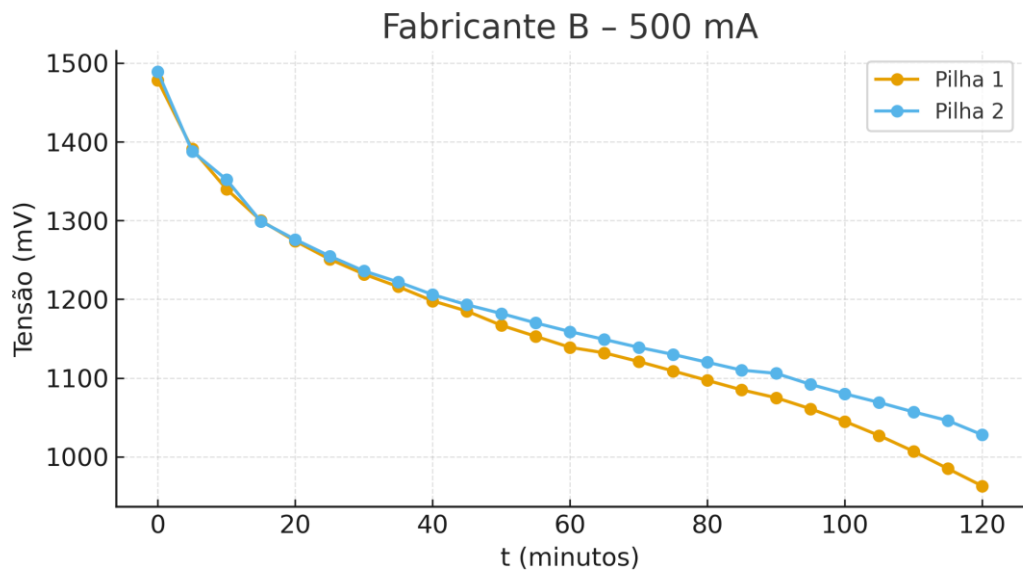
As curvas de tensão obtidas no ensaio de 500 mA para cada fabricante são apresentadas nas Figuras 16, 17 e 18, permitindo comparar o comportamento das pilhas ao longo do tempo.

Figura 16 – Curva de tensão das pilhas do Fabricante A no ensaio de 500 mA.



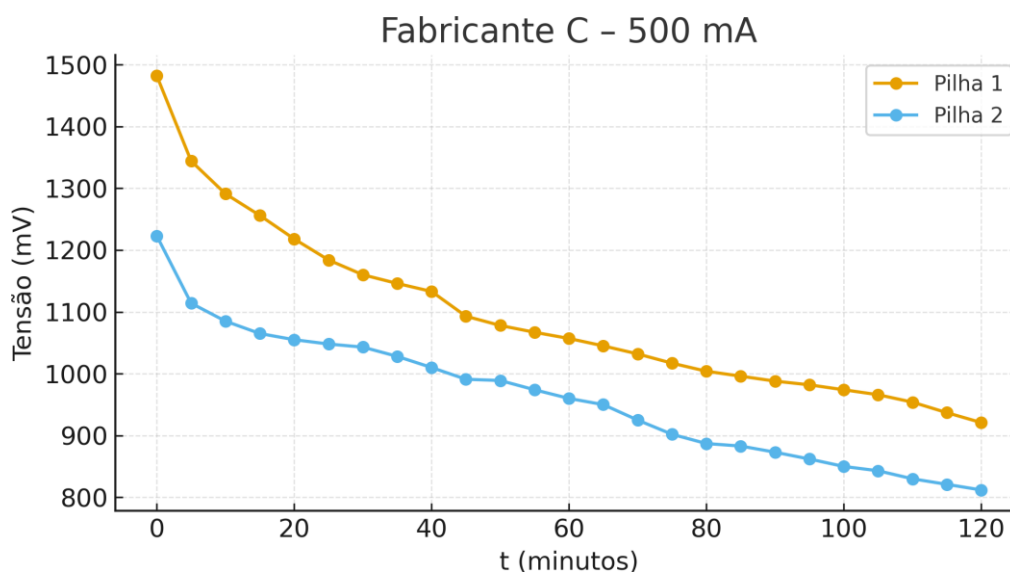
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 17 – Curva de tensão das pilhas do Fabricante B no ensaio de 500 mA.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 18 – Curva de tensão das pilhas do Fabricante C no ensaio de 500 mA.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A análise das curvas mostra que o Fabricante B mantém valores de tensão superiores durante boa parte do ensaio, coerentes com os maiores valores de energia observados. O Fabricante A apresenta comportamento intermediário, enquanto o Fabricante C exibe as menores tensões ao longo da descarga.

Com base nos resultados, conclui-se que o Fabricante B apresenta o melhor desempenho no ensaio de 500 mA, conciliando maior energia fornecida e menor queda de tensão ao longo do tempo. O Fabricante A demonstra desempenho consistente, porém inferior ao Fabricante B. Já o Fabricante C apresenta maior sensibilidade ao aumento da corrente de descarga.

5.1.3 Comparação entre os Ensaios de 250 mA e 500 mA

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de descarga em corrente constante de 250 mA (Item 5.1.1) e 500 mA (Item 5.1.2), torna-se possível comparar o desempenho das pilhas dos três fabricantes em condições de carga distintas. Nesta subseção, a análise é concentrada apenas nas melhores pilhas de cada fabricante, isto é, naquelas que apresentaram maior energia fornecida em cada ensaio, de forma a representar o melhor desempenho possível de cada marca dentro do conjunto de amostras testadas.

Para o ensaio de 250 mA, as melhores pilhas foram: Pilha 2 do Fabricante A, Pilha 2 do Fabricante B e Pilha 2 do Fabricante C, uma vez que apresentaram valores de energia ligeiramente superiores em relação às demais. Já no ensaio de 500 mA, as melhores pilhas corresponderam à Pilha 2 do Fabricante A, à Pilha 2 do Fabricante B e à Pilha 1 do Fabricante C. A Tabela 7 sintetiza os valores de energia fornecida por essas pilhas em ambos os ensaios, bem como a variação percentual entre as duas condições de corrente.

Tabela 7 – Energia fornecida pelas melhores pilhas em 250 mA e 500 mA.

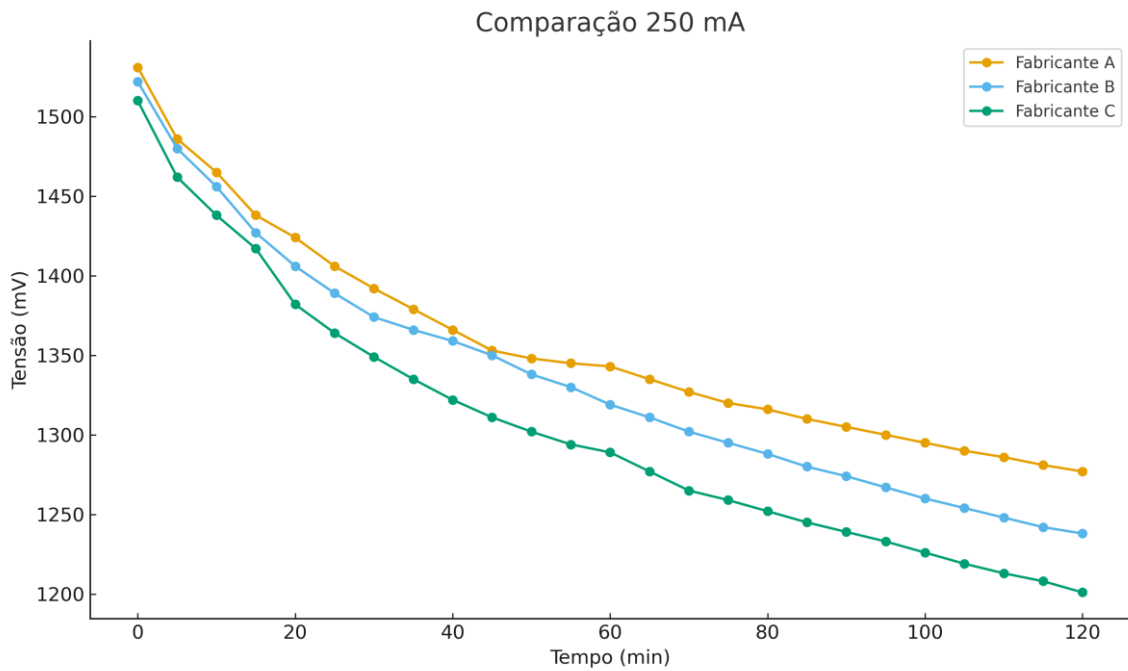
Fabricante	Energia 250 mA (Wh)	Energia 500 mA (Wh)	Variação (%)
A	0,677	1,168	72,5
B	0,667	1,179	76,8
C	0,651	1,088	67,1

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Observa-se na Tabela 7 que, para as melhores pilhas de cada fabricante, a energia fornecida no ensaio de 500 mA é significativamente superior à obtida em 250 mA, com incremento da ordem de 67 % a 77 %. Esse comportamento era esperado, uma vez que, mantendo-se o mesmo intervalo de tempo de descarga, correntes mais elevadas resultam em maiores potências instantâneas e, conseqüentemente, em maior energia transferida à carga. Ainda assim, a comparação entre fabricantes revela que o Fabricante B apresenta os maiores valores de energia em ambas as condições de corrente, seguido de perto pelo Fabricante A, enquanto o Fabricante C fica sistematicamente em posição inferior.

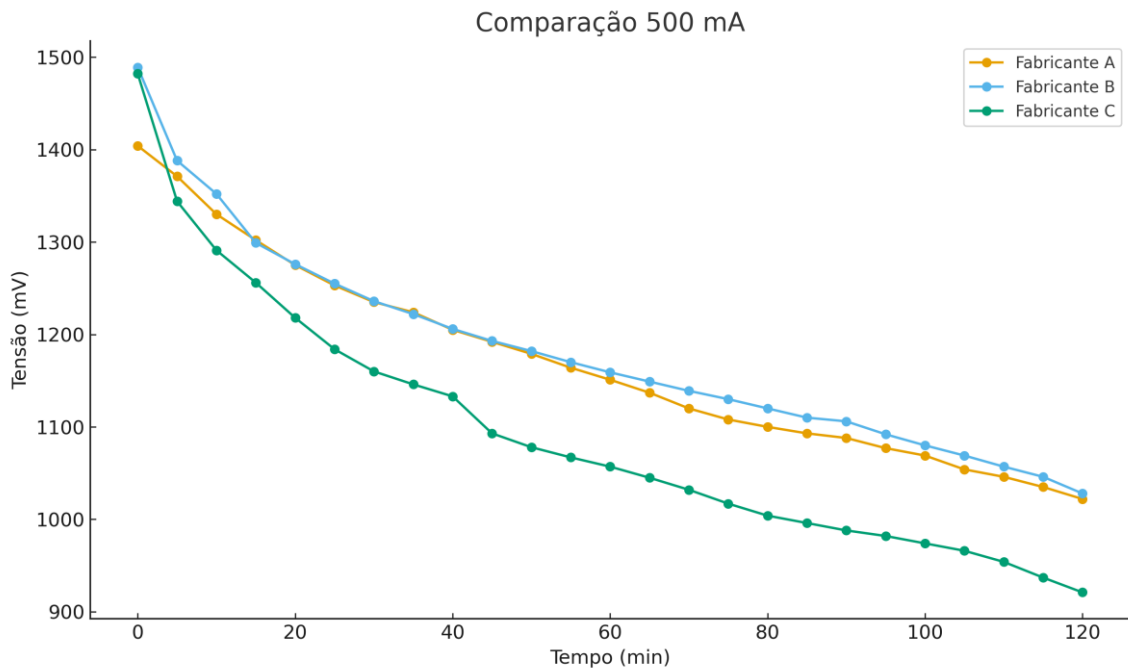
A Figura 19 apresenta as curvas de tensão ao longo do tempo para as melhores pilhas de cada fabricante no ensaio de 250 mA, permitindo comparar diretamente o comportamento de descarga em corrente moderada. Já a Figura 20 mostra as curvas equivalentes para o ensaio de 500 mA, evidenciando a influência do aumento de corrente sobre a queda de tensão e o perfil de descarga das pilhas.

Figura 19 – Curvas de tensão das melhores pilhas no ensaio de 250 mA.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 20 – Curvas de tensão das melhores pilhas no ensaio de 500 mA.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Nas curvas de 250 mA, observa-se que as melhores pilhas dos Fabricantes A e B mantêm níveis de tensão ligeiramente superiores ao longo da maior parte da

descarga, quando comparadas à melhor pilha do Fabricante C. As diferenças de desempenho são relativamente discretas nessa condição de corrente mais baixa, o que indica que, em aplicações de menor demanda, as três marcas conseguem fornecer energia de forma razoavelmente semelhante, com vantagem moderada para os Fabricantes A e B.

No ensaio de 500 mA, as diferenças entre os fabricantes tornam-se mais evidentes. As curvas das melhores pilhas dos Fabricantes A e, principalmente, B apresentam valores de tensão mais elevados durante quase todo o período de descarga, enquanto a melhor pilha do Fabricante C sofre uma queda de tensão mais acentuada. Esse comportamento está coerente com os valores de energia apresentados na Tabela 7, em que o Fabricante B se destaca como aquele que melhor suporta a elevação da corrente de descarga, seguido pelo Fabricante A. O Fabricante C, por sua vez, mostra-se mais sensível ao aumento da corrente, com menor energia fornecida e tensão média mais baixa ao longo do ensaio.

De forma geral, a análise combinada da Tabela 7 e das figuras 19 e 20 permite concluir que, considerando-se apenas as melhores pilhas de cada fabricante, o Fabricante B apresenta o melhor desempenho global nos dois ensaios, tanto em termos de energia fornecida quanto de manutenção da tensão sob carga. O Fabricante A ocupa uma posição intermediária, com desempenho próximo ao do Fabricante B, especialmente em 250 mA, mas ligeiramente inferior em 500 mA. Já o Fabricante C apresenta os resultados menos favoráveis, sobretudo na condição de 500 mA, o que pode limitar sua aplicação em dispositivos que exigem correntes mais elevadas e maior robustez em regime de descarga intensa.

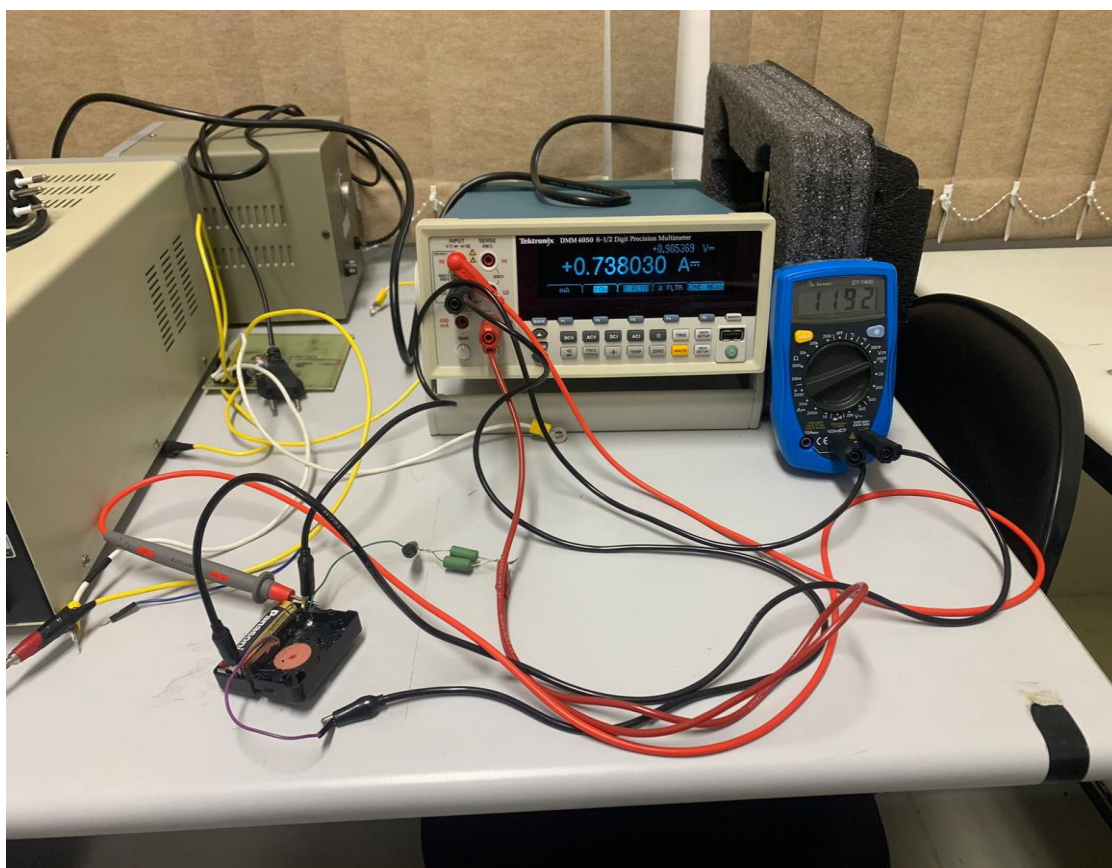
5.2 Ensaio com Resistência Constante

Os ensaios em resistência constante têm como objetivo avaliar o comportamento das pilhas dos Fabricantes A, B e C em condições semelhantes às encontradas em dispositivos reais, como lanternas, brinquedos, controles remotos e equipamentos eletrônicos de baixa potência. Diferentemente dos testes em corrente constante, nos quais a descarga ocorre sob um fluxo fixo de corrente, nos ensaios com carga resistiva a corrente varia ao longo do tempo conforme a queda de tensão da pilha, refletindo de forma mais fiel a operação prática desses dispositivos.

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para duas condições de carga: $1,1 \Omega$ e $2,2 \Omega$. Cada fabricante foi representado por apenas uma pilha, de modo que a análise é focada nas curvas de descarga individuais e na comparação direta entre as três marcas. Com isso é possível obter conclusões importantes a partir das curvas de tensão e da duração total de cada descarga.

A Figura 21 apresenta o *setup* experimental utilizado nos ensaios em resistência constante, o qual segue a mesma configuração descrita no Capítulo 4, alterando-se apenas o resistor de carga. Os valores de tensão ao longo do tempo e os gráficos correspondentes são discutidos nas próximas seções.

Figura 21 – Montagem experimental para os testes de resistência constante.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

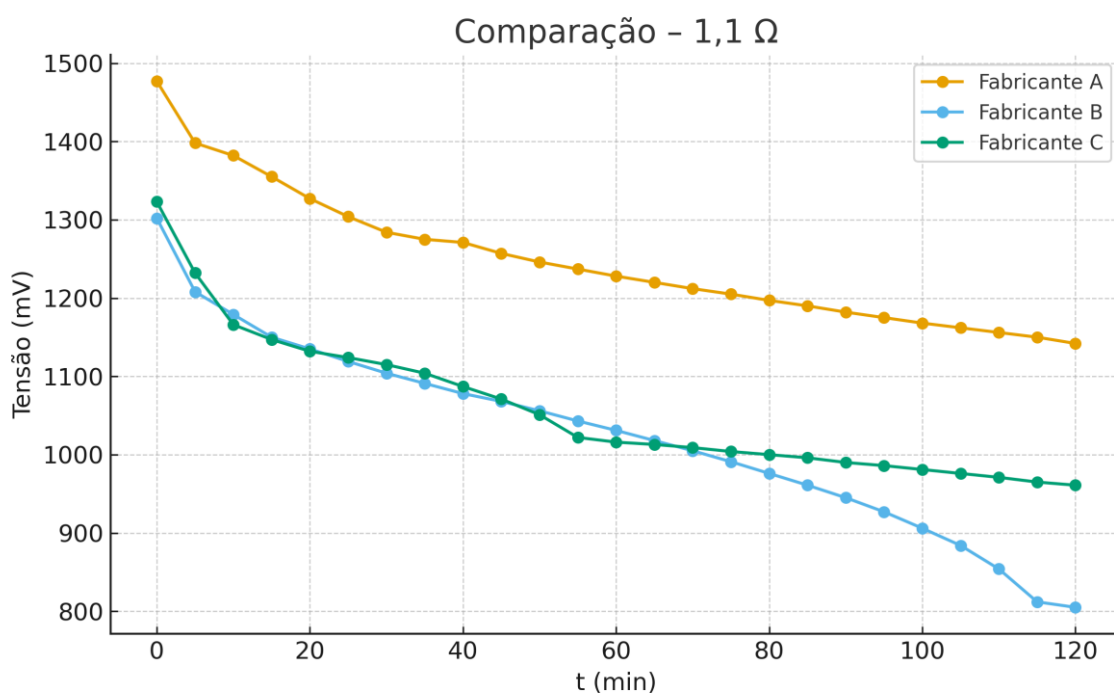
5.2.1 Teste com Resistência de $1,1\Omega$

Neste ensaio, as pilhas foram submetidas à maior demanda de corrente entre os testes de carga fixa, uma vez que a resistência de $1,1 \Omega$ impõe maior esforço elétrico logo no início da descarga. Os valores medidos mostram que todas as pilhas

apresentaram queda de tensão relativamente rápida nos primeiros minutos, comportamento esperado em condições de elevado consumo.

As curvas completas de descarga para os Fabricantes A, B e C podem ser observadas na Figura 22, onde é possível comparar de forma direta o desempenho individual de cada uma.

Figura 22 – Curvas de tensão das pilhas sob carga resistiva de 1,1 Ω



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A análise das curvas de tensão no ensaio com carga de 1,1 Ω mostra um comportamento bem definido entre os três fabricantes. O Fabricante A apresentou a maior sustentação de tensão ao longo de praticamente todo o teste, mantendo valores mais elevados desde os primeiros minutos e demonstrando menor inclinação de queda ao longo do tempo. O Fabricante C apresentou desempenho intermediário, mantendo uma curva estável e relativamente próxima à do Fabricante A durante a fase inicial do ensaio, mas com declínio mais acentuado a partir da metade do período de descarga. O Fabricante B, por sua vez, mostrou a queda mais rápida entre os três, alcançando tensões mais baixas nos primeiros 30 minutos e mantendo o pior desempenho durante grande parte do teste.

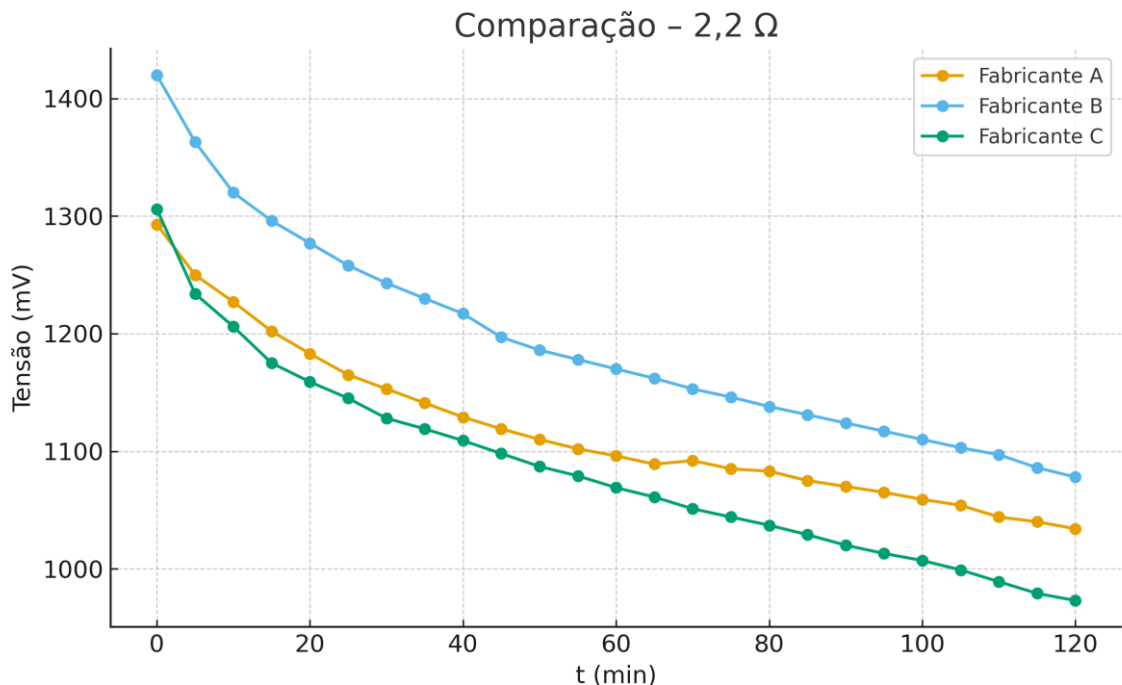
Esse resultado indica que o Fabricante A possui maior capacidade de manter tensão sob cargas mais exigentes, sendo potencialmente mais adequado para dispositivos que exigem fornecimento contínuo de potência relativamente elevada. Já o Fabricante C, embora apresente desempenho aceitável, tende a perder eficiência mais cedo, enquanto o Fabricante B demonstrou menor estabilidade e menor capacidade de fornecimento sob essa condição de carga.

5.2.2 Teste com Resistência de $2,2\Omega$

No ensaio com maior resistência $2,2\Omega$ observa-se uma demanda elétrica menor, o que resulta em curvas de descarga visualmente mais suaves quando comparadas ao teste com $1,1\Omega$. Nessa condição, a variação de corrente é mais branda, permitindo que as pilhas ofereçam maior duração ao longo do ensaio.

A figura 23 apresenta as curvas de tensão registradas para os três fabricantes sob resistência de $2,2\Omega$.

Figura 23 – Curvas de tensão das pilhas sob carga resistiva de $2,2\Omega$



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Ao comparar as curvas para a carga de $2,2\Omega$, observa-se que o Fabricante B apresenta o melhor desempenho, mantendo a tensão mais elevada ao longo da maior

parte do intervalo de descarga. O Fabricante A apresenta comportamento intermediário, enquanto o Fabricante C exibe a queda de tensão mais acentuada, indicando menor capacidade de sustentação sob essa condição de carga.

Esses resultados sugerem que, sob condições de corrente mais moderada, o Fabricante B apresenta melhor estabilidade de tensão ao longo do período de descarga.

5.3 Recuperação de Tensão após os Ensaio

A recuperação de tensão é um fenômeno típico de sistemas eletroquímicos, ocorrendo quando a pilha retorna ao estado de repouso após ser submetida a um período de descarga. Durante a aplicação de carga, a resistência interna aumenta e a tensão terminal diminui progressivamente; contudo, ao cessar o fluxo de corrente, processos de difusão iônica e reorganização química dentro da célula restauram parcialmente o equilíbrio eletroquímico. Esse efeito faz com que a tensão medida alguns minutos após o término do teste seja superior ao valor registrado no instante final da descarga. Assim, a análise da recuperação de tensão fornece indícios da saúde eletroquímica da pilha, do grau de estresse provocado pelo ensaio e da capacidade de cada fabricante em manter estabilidade estrutural durante ciclos de descarga.

Nesta seção, são avaliados os valores de tensão em circuito aberto (OC, do inglês *Open Circuit*) obtidos antes do início de cada ensaio, bem como os valores de tensão após repouso (AR), registrados ao final dos testes de corrente constante. O objetivo é verificar o quanto cada pilha conseguiu recuperar de tensão após os ensaios de corrente e resistência constante, permitindo comparar o comportamento dos três fabricantes e compreender a robustez eletroquímica de cada tecnologia.

5.3.1 Recuperação de Tensão nos Ensaio de Corrente Constante

A Tabela 8 apresenta os valores medidos antes e após os ensaios para as pilhas alcalinas dos Fabricantes A, B e C, submetidas aos testes de 250 mA e 500 mA. Observa-se que, em todos os casos, a tensão após repouso é inferior à tensão inicial em circuito aberto, o que confirma a ocorrência de estresse eletroquímico

durante o ensaio. Entretanto, o grau dessa queda varia entre fabricantes e entre as duas correntes aplicadas.

Tabela 8 – Tensão em circuito aberto (OC) e após repouso (AR) em corrente constante

Pilha / Condição	OC (mV)	AR (mV)	ΔV(mV)
Fabricante A – 500 mA	1623 / 1624	1403 / 1407	220/217
Fabricante A – 250 mA	1625 / 1624	1463 / 1473	162/151
Fabricante B – 500 mA	1616 / 1612	1375 / 1377	241/235
Fabricante B – 250 mA	1607 / 1615	1439 / 1438	168/177
Fabricante C – 500 mA	1605 / 1603	1387 / 1358	218/245
Fabricante C – 250 mA	1611 / 1608	1412 / 1402	199/206

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

De modo geral, quanto menor a diferença entre OC e AR, maior a capacidade da pilha de recuperar seu equilíbrio interno após a descarga, indicando menor degradação momentânea dos eletrodos. Nos testes de 500 mA, todos os fabricantes apresentaram perdas mais acentuadas em comparação ao ensaio de 250 mA, o que era esperado, já que correntes mais elevadas intensificam os efeitos de polarização e aumentam as perdas internas. Entre os fabricantes analisados, o Fabricante A apresentou as menores diferenças entre OC e AR em ambos os regimes de corrente, sugerindo melhor capacidade de recuperação após a descarga. No ensaio de 250 mA, o Fabricante B apresentou desempenho intermediário e o Fabricante C registrou as maiores diferenças entre OC e AR. Já em 500 mA, o Fabricante C apresentou recuperação intermediária, enquanto o Fabricante B apresentou os maiores valores de ΔV nessa condição.

Esses resultados corroboram parcialmente as análises das curvas de descarga apresentadas nas seções anteriores, evidenciando que o desempenho durante a descarga não se reflete de forma idêntica na etapa de recuperação. Enquanto o Fabricante C apresentou queda de tensão mais acentuada ao longo dos dois ensaios, sua recuperação não foi proporcionalmente a pior em todas as condições. Além disso, a comparação entre os dois níveis de corrente demonstra que o aumento da intensidade de descarga impacta diretamente a capacidade de recuperação das pilhas, constituindo um indicativo relevante do comportamento eletroquímico sob diferentes regimes de carga.

5.3.2 Recuperação de Tensão nos Ensaio de Resistência Constante

A recuperação de tensão após os ensaios com resistência constante fornece informações importantes sobre o comportamento eletroquímico das pilhas em condições que simulam o uso típico em equipamentos eletrônicos. Diferentemente dos testes em corrente constante, em que a solicitação elétrica é fixa e mais agressiva, a descarga por resistência impõe uma demanda variável ao longo do tempo. A Tabela 9 apresenta os valores utilizados nesta etapa, contendo para cada fabricante as tensões medidas após a conclusão dos ensaios com resistências de 1,1 Ω e 2,2 Ω , bem como os valores registrados após o período de repouso.

Tabela 9 – Tensão em circuito aberto (OC) e após repouso (AR) em resistência constante

Pilha / Condição	OC (mV)	AR (mV)	ΔV(mV)
Fabricante A – 1,1 Ω	1623	1450	173
Fabricante A – 2,2 Ω	1624	1449	175
Fabricante B – 1,1 Ω	1617	1353	264
Fabricante B – 2,2 Ω	1626	1429	197
Fabricante C – 1,1 Ω	1606	1373	233
Fabricante C – 2,2 Ω	1582	1422	160

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Nos ensaios realizados com 1,1 Ω e 2,2 Ω , observou-se que o desempenho variou conforme a condição de carga aplicada. No ensaio com 1,1 Ω , o Fabricante A apresentou a menor diferença entre OC e AR, indicando melhor capacidade de recuperação após a descarga sob condição mais severa. O Fabricante C apresentou desempenho intermediário, enquanto o Fabricante B apresentou a maior diferença entre OC e AR nessa condição. Já no ensaio com 2,2 Ω , o Fabricante C apresentou a menor diferença entre OC e AR, seguido pelo Fabricante A, enquanto o Fabricante B apresentou valores superiores de ΔV .

Esses resultados indicam que a capacidade de recuperação de tensão não reproduz exatamente a mesma ordem observada nas curvas de descarga. No ensaio de 2,2 Ω , por exemplo, embora o Fabricante C tenha apresentado menor sustentação de tensão durante a descarga, foi o que demonstrou melhor recuperação após 24 horas, evidenciada pelo menor ΔV . Esse comportamento reforça que o desempenho sob carga e a capacidade de restabelecimento do potencial eletroquímico são fenômenos relacionados, porém não necessariamente proporcionais. Entretanto,

deve-se considerar que, nos ensaios com resistência constante, foi utilizada apenas uma unidade de cada fabricante, o que limita a generalização dos resultados. Além disso, possíveis incertezas de medição e variações inerentes ao processo experimental podem influenciar os valores observados, não sendo possível estabelecer conclusões definitivas quanto à superioridade de um fabricante com base exclusivamente nesses ensaios.

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta uma análise integrada dos resultados obtidos nos ensaios realizados, contemplando as descargas em corrente constante (250 mA e 500 mA), os testes com cargas resistivas de 1,1 Ω e 2,2 Ω , bem como a recuperação de tensão após o período de repouso. O objetivo é relacionar os comportamentos observados, identificar padrões consistentes entre os fabricantes e interpretar o desempenho elétrico das pilhas sob diferentes condições de operação.

A análise é organizada em quatro dimensões principais: comportamento em corrente constante, desempenho sob cargas resistivas, recuperação de tensão e uma síntese comparativa geral.

6.1 Desempenho em Corrente Constante

Nos ensaios em corrente constante, verificou-se que o aumento da corrente aplicada tornou as diferenças entre os fabricantes mais evidentes. Em 250 mA, os desempenhos foram próximos, indicando comportamento semelhante sob condição moderada. Entretanto, em 500 mA, as discrepâncias se ampliaram, evidenciando diferenças na capacidade de sustentação de tensão e na estabilidade sob maior solicitação elétrica.

Esse resultado demonstra que correntes mais elevadas impõem maior esforço ao sistema, aumentando a queda de tensão e evidenciando o impacto da resistência interna ao longo da descarga. Assim, o ensaio em 500 mA mostrou-se mais sensível para distinguir o desempenho entre os fabricantes.

Observou-se também aumento significativo da resistência interna durante a descarga, especialmente na condição de maior corrente, o que contribui diretamente para a redução da tensão disponível sob carga.

6.2 Desempenho em Resistência Constante

Nos testes com cargas resistivas, o comportamento variou conforme o valor da resistência aplicada. Como a corrente depende da tensão instantânea da pilha, esse tipo de ensaio se aproxima mais das condições reais de utilização.

Verificou-se que a ordem de desempenho não foi idêntica nas resistências de $1,1 \Omega$ e $2,2 \Omega$, indicando que cada fabricante responde de maneira distinta conforme a intensidade da solicitação elétrica. Em cargas mais severas, destacou-se a capacidade de manter tensão sob maior corrente, enquanto em cargas moderadas observou-se melhor estabilidade em outros fabricantes.

Esse comportamento reforça que o desempenho elétrico das pilhas depende diretamente do perfil de consumo da aplicação, não sendo possível estabelecer uma hierarquia única válida para todas as condições.

6.3 Recuperação de Tensão

A análise da recuperação de tensão após 24 horas complementa os ensaios de descarga, permitindo avaliar a diferença entre a tensão inicial e a tensão medida após o período sem carga.

Observou-se que a capacidade de recuperação não segue necessariamente a mesma ordem verificada durante a descarga. Em algumas condições, pilhas que apresentaram maior queda de tensão sob carga demonstraram recuperação relativamente melhor após o repouso.

Esse resultado indica que o comportamento durante a descarga e a variação da tensão após interrupção da carga não são fenômenos diretamente proporcionais, devendo ser analisados de forma complementar na avaliação do desempenho elétrico.

6.4 Síntese Comparativa Geral

A análise integrada dos ensaios demonstra que o desempenho das pilhas varia conforme o regime de descarga aplicado. Não foi observado um fabricante superior em todas as condições, mas sim desempenhos específicos associados a determinados níveis de corrente e tipos de carga.

De modo geral, correntes mais elevadas evidenciam diferenças mais marcantes entre os fabricantes, enquanto cargas moderadas tendem a aproximar os

resultados. A recuperação de tensão, por sua vez, complementa a análise ao indicar o comportamento da pilha após o término da descarga.

Dessa forma, observa-se que a avaliação do desempenho elétrico das pilhas envolve a análise conjunta da energia fornecida, da estabilidade de tensão, da variação da resistência interna e do comportamento após o repouso, sobretudo quando os resultados são associados a aplicações reais.

7 CONCLUSÕES

Os resultados experimentais permitiram uma avaliação clara e comparativa entre os fabricantes estudados, fornecendo uma visão abrangente sobre o comportamento eletroquímico das pilhas em cenários que simulam aplicações reais. A metodologia adotada foi capaz de identificar diferenças de desempenho entre marcas, bem como para compreender como variáveis como corrente de descarga, resistência interna e recuperação de tensão influenciam a autonomia e a estabilidade das pilhas.

O trabalho evidenciou que o desempenho das pilhas não é uniforme entre fabricantes e depende fortemente do regime de uso. Nos ensaios com resistência constante, observou-se que não existe uma única pilha com melhor desempenho absoluto para todas as situações: no teste de $1,1 \Omega$, o Fabricante A apresentou melhor sustentação de tensão sob condição de maior demanda, enquanto no teste de $2,2 \Omega$ o Fabricante B apresentou desempenho superior em regime mais moderado. Nos ensaios de corrente constante, as diferenças entre marcas tornaram-se mais acentuadas conforme a severidade da descarga aumentou, especialmente a 500 mA , condição na qual o Fabricante C apresentou queda de desempenho mais significativa. Esses resultados reforçam que a escolha da pilha mais adequada depende diretamente do tipo de aplicação e do perfil de consumo do dispositivo.

Outro aspecto importante revelado pelos experimentos foi o comportamento de recuperação de tensão após o repouso. Essa análise permitiu observar o estresse eletroquímico causado pelos ensaios e a capacidade de cada pilha em restabelecer parcialmente seu potencial após a descarga. Verificou-se que a recuperação variou conforme o regime de descarga aplicado, evidenciando diferenças no comportamento interno das pilhas após esforços elétricos distintos. Esses resultados reforçam a importância de considerar não apenas o desempenho durante a descarga, mas também a resposta após o término do ensaio na avaliação global das pilhas.

Apesar dos resultados consistentes, o estudo apresenta limitações importantes. O número reduzido de amostras restringe a capacidade de generalização estatística, e as medições foram realizadas em condições ambientais controladas, sem explorar variáveis como temperatura ou umidade, que podem alterar significativamente o comportamento eletroquímico das pilhas. O protótipo de carga

eletrônica utilizado, ainda que funcional, pode ser aprimorado em robustez, automação e precisão na coleta de dados, permitindo análises mais detalhadas e com menor intervenção manual.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a expansão da amostragem para incluir um número maior de lotes e marcas, além de outros tipos de pilhas, como as recarregáveis (NiMH, Lítio-íon). Propõe-se também a automação completa do processo de teste, integrando os circuitos a um microcontrolador (como Arduino ou ESP32) para registrar automaticamente os dados e gerar curvas de descarga sem intervenção manual. A incorporação de um sistema de controle de temperatura permitiria uma análise ainda mais completa e alinhada com os rigorosos procedimentos de teste normatizados, elevando a complexidade e a relevância de futuras investigações na área.

REFERÊNCIAS

- ABINEE. **Produção Física IBGE – Maio de 2024**. São Paulo: Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica, 2024. Disponível em: <https://www.abinee.org.br/wp-content/uploads/2024/07/prodmai24.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2025.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **American National Standard for Portable Primary Cells and Batteries – General and Specifications**. ANSI C18.1. Washington, DC: ANSI, 2020.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **American National Standard for Portable Rechargeable Cells and Batteries – General and Specifications**. ANSI C18.2. Washington, DC: ANSI, 2021.
- BOCCHI, N.; FERRACIN, L. C.; BIAGGIO, S. R. **Pilhas e baterias: funcionamento e impacto ambiental**. Química Nova na Escola, n. 11, p. 3-9, maio 2000.
- COSTA, Mayra Cristina da Silva; PORTO, Paulo Alves. A pilha de Daniell: um estudo de caso histórico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, [S.L.], v. 38, n. 3, p. 1650-1673, 15 dez. 2021. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/82360/47908>. Acesso em: 11 abr. 2024.
- DELL, R. M.; RAND, D. **Understanding batteries**. London: Royal Society of Chemistry, 2001.
- ELEUTÉRIO, Manoel. **TESTAGEM DE PILHAS: SUGESTÃO DE UM DISPOSITIVO BASEADO EM ARDUINO**. 2021. 18 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Unisul, Tubarão, 2021. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/items/fc44bc62-5b66-48bd-873a-484fe623ce06/full>. Acesso em: 26 abr. 2024.
- IEA. **Outlook for Battery and Energy Demand – Global EV Outlook 2024**. Paris: International Energy Agency, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/outlook-for-battery-and-energy-demand>. Acesso em: 13 nov. 2025.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Primary batteries – Part 1: General**. IEC 60086-1. Geneva: IEC, 2015.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Primary batteries – Part 2: Physical and electrical specifications**. IEC 60086-2. Geneva: IEC, 2015.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes – Safety requirements for portable sealed secondary cells, and for batteries made from them, for use in portable applications – Part 2: Lithium systems**. IEC 62133-2. Geneva: IEC, 2017.

INMETRO. **Relatório sobre análise em pilhas alcalinas e zinco - manganês.**

2011. Disponível em:

http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/pilhas_sem_marcas.pdf. Acesso em: 08 abr. 2024.

KOTZ, J. C.; TREICHEL JR, P. **Química geral e reações químicas.** Tradução de Flávio Maron Vichi. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2005.

MANUAL DA QUÍMICA. **Pilhas.** Disponível em:

<https://www.manualdaquimica.com/fisico-quimica/pilhas.htm>. Acesso em: 20 jul. 2024.

O MECÂNICO. **Qualidade em série:** baterias certificadas pelo Inmetro. *Revista O Mecânico*, 2015. Disponível em: <https://omecanico.com.br/baterias-certificadas-pelo-inmetro/>. Acesso em: 26 abr. 2024.

PANASONIC. **Panasonic Alkaline Handbook for Professionals.** Osaka: Panasonic, 2021.

PROTESTE, Redação (ed.). **Energia de sobra:** pilhas da Fabricante C se destacam em comparativo e conquistam Selo de Melhor do Teste. 2022. Disponível em:

[https://conectaja.proteste.org.br/energia-de-sobra-pilhas-da-Fabricante C-se-destacam-em-comparativo-e-conquistam-selo-de-melhor-do-teste/#Custo-beneficio](https://conectaja.proteste.org.br/energia-de-sobra-pilhas-da-Fabricante-C-se-destacam-em-comparativo-e-conquistam-selo-de-melhor-do-teste/#Custo-beneficio). Acesso em: 10 abr. 2024.

STATISTA RESEARCH DEPARTMENT (ed.). **Global market value of alkaline batteries in 2013, 2016, and 2021.** Available at:

<https://www.statista.com/statistics/881135/alkaline-battery-market-size-worldwide/>. Acesso em: 18 abr. 2024.

APÊNDICES

APÊNDICE A – VALORES DE TENSÃO AO LONGO DO TESTE DE CORRENTE CONSTANTE

	Fabricante A (500 mA)		Fabricante A (250 mA)		Fabricante B (500mA)		Fabricante B (250mA)		Fabricante C (500 mA)		Fabricante C (250 mA)	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
SC	1623	1624	1625	1624	1616	1612	1607	1615	1605	1603	1611	1608
t (min)	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
0	1462	1404	1502	1531	1478	1489	1520	1522	1482	1223	1509	1510
5	1359	1371	1459	1488	1391	1388	1466	1480	1344	1114	1466	1462
10	1316	1330	1428	1495	1340	1352	1440	1456	1291	1085	1421	1438
15	1280	1302	1410	1438	1300	1299	1418	1427	1256	1065	1397	1417
20	1250	1275	1399	1424	1274	1276	1392	1406	1218	1055	1380	1382
25	1232	1253	1377	1406	1251	1255	1385	1389	1184	1048	1361	1364
30	1213	1235	1364	1392	1232	1236	1378	1374	1160	1043	1341	1349
35	1198	1224	1349	1379	1216	1222	1366	1366	1146	1028	1328	1335
40	1182	1205	1338	1366	1198	1206	1358	1359	1133	1010	1317	1322
45	1169	1192	1325	1353	1185	1193	1345	1350	1093	991	1305	1311
50	1157	1179	1315	1348	1167	1182	1328	1338	1078	989	1295	1302
55	1145	1164	1305	1345	1153	1170	1326	1330	1067	974	1278	1294
60	1134	1151	1297	1343	1139	1159	1313	1319	1057	960	1269	1289
65	1121	1137	1286	1335	1132	1149	1307	1311	1045	950	1260	1277
70	1107	1120	1281	1327	1121	1139	1299	1302	1032	925	1250	1265
75	1095	1108	1278	1320	1109	1130	1292	1295	1017	902	1242	1259
80	1085	1100	1272	1316	1097	1120	1277	1288	1004	887	1235	1252
85	1074	1093	1267	1310	1085	1110	1271	1280	996	883	1228	1245
90	1063	1088	1262	1305	1075	1106	1258	1274	988	873	1222	1239
95	1055	1077	1257	1300	1061	1092	1245	1267	982	862	1216	1233
100	1047	1069	1253	1295	1045	1080	1240	1260	974	850	1209	1226
105	1038	1054	1245	1290	1027	1069	1234	1254	966	843	1204	1219
110	1028	1046	1242	1286	1007	1057	1229	1248	954	830	1198	1213
115	1018	1035	1238	1281	985	1046	1224	1242	937	821	1192	1208
120	1006	1022	1235	1277	963	1028	1221	1238	921	812	1185	1201
AR	1403	1407	1483	1473	1375	1377	1439	1438	1387	1358	1412	1402
I	0,5	0,5	0,25	0,25	0,5	0,5	0,25	0,25	0,5	0,5	0,25	0,25
dt	0,0833	0,0833	0,0833	0,0833	0,0833	0,0833	0,0833	0,0833	0,0833	0,0833	0,0833	0,0833
S	27600,0	28021,0	31615,5	32514,0	27810,5	28294,5	31761,5	31995,0	26123,5	23005,5	30961,0	31256,5
E (Wh)	1,150	1,168	0,659	0,677	1,159	1,179	0,662	0,667	1,088	0,959	0,645	0,651
Rint_I(W)	322	440	492	372	276	246	348	372	246	760	408	392
Rint_F(W)	794	770	912	784	824	698	872	800	932	1092	908	804

APÊNDICE B – VALORES DE TENSÃO AO LONGO DO TESTE DE RESISTÊNCIA CONSTANTE

t (min)	Fabricante A		Fabricante B		Fabricante C	
	1,1 ohms	2,2 ohms	1,1 ohms	2,2 ohms	1,1 ohms	2,2 ohms
0	1477	1293	1302	1420	1323	1306
5	1398	1250	1208	1363	1232	1234
10	1382	1227	1179	1320	1166	1206
15	1355	1202	1150	1296	1147	1175
20	1327	1183	1135	1277	1132	1159
25	1304	1165	1119	1258	1124	1145
30	1284	1153	1104	1243	1115	1128
35	1275	1141	1091	1230	1104	1119
40	1271	1129	1078	1217	1087	1109
45	1257	1119	1068	1197	1071	1098
50	1246	1110	1056	1186	1051	1087
55	1237	1102	1043	1178	1022	1079
60	1228	1096	1031	1170	1016	1069
65	1220	1089	1018	1162	1013	1061
70	1212	1092	1005	1153	1009	1051
75	1205	1085	991	1146	1004	1044
80	1197	1083	976	1138	1000	1037
85	1190	1075	961	1131	996	1029
90	1182	1070	945	1124	990	1020
95	1175	1065	927	1117	986	1013
100	1168	1059	906	1110	981	1007
105	1162	1054	884	1103	976	999
110	1156	1044	854	1097	971	989
115	1150	1040	812	1086	965	979
120	1142	1034	805	1078	961	973
SC	1623	1624	1617	1626	1606	1582
AR	1450	1449	1353	1429	1373	1422