



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO - CTC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO ENGENHARIA DE MATERIAIS

Henrique Bogomolof Celestino da Silva

**Desenvolvimento de um Produto Mínimo Viável de um ignífugo de uso pessoal para
contenção de incêndios de baterias de íons de lítio validado por usuários**

Florianópolis

2026

Henrique Bogomolof Celestino da Silva

**Desenvolvimento de um Produto Mínimo Viável de um ignífugo de uso pessoal para
contenção de incêndios de baterias de íons de lítio validado por usuários**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Materiais do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador(a): Prof. Dr. Fernando Antônio Forcellini

Florianópolis

2026

RESUMO

O crescimento acelerado do uso de dispositivos eletrônicos portáteis alimentados por baterias de íons de lítio tem ampliado a exposição dos usuários a riscos associados ao fenômeno de fuga térmica, caracterizado por reações exotérmicas autossustentadas capazes de resultar em incêndios de rápida propagação, liberação de gases tóxicos e danos ao ambiente circundante. Apesar do crescente número de incidentes envolvendo baterias de pequeno porte, as soluções de contenção disponíveis concentram-se predominantemente em aplicações industriais, automotivas ou em sistemas de armazenamento de energia, apresentando limitações de portabilidade, custo e adequação ao uso cotidiano. Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo desenvolver um Produto Mínimo Viável (MVP) de um dispositivo ignífugo de uso pessoal destinado à contenção de eventos de fuga térmica em baterias de íons de lítio, validado por usuários finais por meios de instrumentos de coleta de dados em formato de questionários estruturados. A metodologia adotada caracteriza-se como pesquisa aplicada, exploratória e de abordagens quantitativas, estruturada em três etapas principais: (i) caracterização do estado da arte sobre baterias de íons de lítio e o fenômeno de fuga térmica; (ii) análise de normas técnicas e tecnologias existentes de contenção de incêndios; e (iii) aplicação de um Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP), com foco nas fases de projeto informacional e conceitual, para segmentação do público, validação de necessidades e priorização dos atributos mais relevantes para o desenvolvimento do MVP. A validação da versão mínima do produto foi conduzida por meio de instrumentos de coleta de dados junto aos usuários, seguindo uma lógica iterativa de desenvolvimento. Os resultados permitem identificar as características prioritárias para dispositivos de contenção voltados ao consumidor final, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais seguras, acessíveis e alinhadas às práticas reais de uso de dispositivos eletrônicos portáteis.

Palavras-chave: Baterias de íons de lítio. Fuga térmica. Segurança contra incêndios. Produto mínimo viável. Desenvolvimento de produto. Dispositivo ignífugo. Validação com usuários.

ABSTRACT

The accelerated growth in the use of portable electronic devices powered by lithium-ion batteries has increased user exposure to risks associated with the thermal runaway phenomenon, characterized by self-sustained exothermic reactions capable of resulting in fast-propagating fires, the release of toxic gases, and damage to the surrounding environment. Despite the growing number of incidents involving small-scale batteries, available containment solutions focus predominantly on industrial, automotive, or energy storage applications, presenting limitations in portability, cost, and suitability for daily use. Given this scenario, this work aims to develop a Minimum Viable Product (MVP) of a fireproof personal-use device intended for the containment of thermal runaway events in lithium-ion batteries, validated by end-users. The methodology adopted is characterized as applied, exploratory research with quantitative approaches, structured in three main stages: (i) characterization of the state of the art on lithium-ion batteries and the thermal runaway phenomenon; (ii) analysis of technical standards and existing fire containment technologies; and (iii) application of a Product Development Process (PDP), focusing on the informational and conceptual design phases, for audience segmentation, validation of needs, and prioritization of the most relevant attributes for the development of the MVP. The validation of the minimum product version was conducted through data collection instruments with users, following an iterative development logic. The results allow for the identification of priority characteristics for containment devices aimed at the final consumer, contributing to the development of safer, more accessible solutions aligned with the actual usage practices of portable electronic devices.

Keywords: Lithium-ion batteries. Thermal runaway. Fire safety. Minimum viable product. Product development. Fire-resistant device. User validation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática dos componentes fundamentais de uma célula eletroquímica.

Figura 2: Representação dos componentes de uma célula LIB com fluxo de íons e elétrons.

Figura 3: Diferentes formatos de células de LIBs, respectivamente pouch, cilíndricas e prismáticas.

Figura 4: Processo de fuga térmica em relação à temperatura e tempo.

Figura 5: Visão geral do Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP).

Figura 6: Fase de projeto informacional do PDP.

Figura 7: Fases de projeto informacional e conceitual do PDP.

Figura 8: Respostas obtidas na Pergunta 1 do Q1.

Figura 9: Respostas obtidas na Pergunta 2 do Q1.

Figura 10: Respostas obtidas na Pergunta 3 do Q1.

Figura 11: Respostas obtidas na Pergunta 4 do Q1.

Figura 12: Respostas obtidas na Pergunta 5 do Q1.

Figura 13: Respostas obtidas na Pergunta 6 do Q1.

Figura 14: Respostas obtidas na Pergunta 7 do Q1.

Figura 15: Respostas obtidas na Pergunta 8 do Q1.

Figura 16: Designs apresentados junto ao Primeiro candidato à MVP no Q4.

Figura 17: Designs apresentados junto ao Segundo candidato à MVP no Q5.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparativo entre diferentes tecnologias de baterias.

Tabela 2: Faixas de Temperatura Típicas e Consequências durante a Fuga Térmica.

Tabela 3: Comparativo entre diferentes composições químicas de LIBs durante TR.

Tabela 4: Normas técnicas e parâmetros críticos aplicáveis ao projeto do dispositivo ignífugo.

Tabela 5: Comparativo de tecnologias de contenção de TR em LIBs.

Tabela 6: Síntese dos instrumentos de coleta de dados.

Tabela 7: Necessidades apresentadas pelos clientes via Q2.

Tabela 8: Necessidades priorizadas pelos clientes via Q3.

Tabela 9: Necessidades priorizadas e Features propostas.

Tabela 10: Primeiro candidato à MVP via Q4.

Tabela 11: Substituições do primeiro candidato à MVP para o segundo candidato.

Tabela 12: Segundo candidato à MVP via Q5.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Protocolo metodológico do instrumento Q1.

Quadro 2: Protocolo metodológico do instrumento Q2.

Quadro 3: Protocolo metodológico do instrumento Q3.

Quadro 4: Justificativa da seleção de features para o primeiro candidato a MVP.

Quadro 5: Protocolo metodológico do instrumento Q4.

Quadro 6: Protocolo metodológico do instrumento Q5.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BDTD - Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações

BESS - Battery Energy Storage System; Sistemas de Armazenamento de Energia com Baterias

CAGR - Taxa de Crescimento Anual Composta

CPSC - Consumer Product Safety Commission

EPRI - Electric Power Research Institute; Instituto de Pesquisa de Energia Elétrica

ESS - Sistemas de Armazenamento Estacionário de Energia

EVs - Electric Vehicles; Veículos Elétricos

GDP - Gestão de Desenvolvimento de Produtos

IEC - International Electrotechnical Commission; Comissão Internacional de Eletrotécnica

LIBs - Li-ion-Batteries; Baterias de íons de Lítio

MVP - Minimum Viable Product; Produto Mínimo Viável

NCA - Níquel-Cobalto-Alumínio

NFPA - National Fire Protection Association; Associação Estadunidense de Proteção contra Incêndios

NMC - Níquel-Manganês-Cobalto

PDP - Processo de Desenvolvimento de Produtos

QFD - Quality Function Deployment

SEI - Interface sólido-eletrólito

SOC - State of Charge; Estado da Carga

TR - Thermal runaway; Fuga térmica

TRIP - Thermal Runaway Incident Program

UL - Underwriters Laboratories

ULSE - Underwriters Laboratories Standards & Engagement

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1. Contextualização e Justificativa.....	10
1.2. Definição do Problema.....	12
1.3. Objetivo Geral.....	12
1.4. Objetivos Específicos.....	13
1.5. Metodologia de Pesquisa.....	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1. Baterias de íons de lítio.....	16
2.1.1. Composições catódicas e formatos das células.....	20
2.2. Fenômeno de fuga térmica.....	22
2.2.1. Etapas do fenômeno.....	23
2.2.2. Influência da composição química e riscos.....	28
2.3. Características de um ignífugo e normas associadas.....	30
2.4. Produtos, tecnologias e estratégias de contenção.....	32
2.4.1. Sistemas ativos de contenção.....	33
2.4.2. Sistemas passivos de contenção.....	35
2.5. Processo de desenvolvimento de produtos (PDP).....	38
2.5.1. Estrutura do PDP.....	40
3. FASE DE PROJETO INFORMACIONAL.....	44
3.1. Segmentação dos clientes.....	45
3.2. Necessidades dos clientes.....	54
3.3. Necessidades priorizadas dos clientes.....	58
3.4. Síntese Conclusiva da Fase de Projeto Informacional.....	62
4. FASE DE PROJETO CONCEITUAL.....	65
4.1. Features.....	66
4.2. Produto Mínimo Viável (MVP).....	71
4.2.1. Primeiro candidato à MVP.....	72
4.2.2. Segundo candidato à MVP.....	76
4.3. Síntese Conclusiva da Fase de Projeto Conceitual.....	80
5. CONCLUSÕES E APRENDIZADOS.....	82
5.1. Resultados e Contribuições.....	82
5.2. Aprendizados Metodológicos.....	84
5.3. Limitações do Trabalho.....	85
5.4. Sugestões para trabalhos futuros.....	86
REFERÊNCIAS.....	87
APÊNDICES.....	92

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o tema do trabalho, contextualiza a relevância da pesquisa, delimita o problema investigado, enuncia os objetivos geral e específicos e descreve a metodologia adotada. O foco reside na contenção do fenômeno de fuga térmica em baterias de íons de lítio presentes em dispositivos eletrônicos portáteis e na proposição de uma versão mínima de produto destinado ao usuário final.

1.1. Contextualização e Justificativa

A consolidação das baterias de íons de lítio (LIBs) como principal tecnologia de armazenamento eletroquímico de energia tem ampliado significativamente sua presença na infraestrutura tecnológica contemporânea. A elevada densidade energética, a durabilidade e a redução progressiva de custos contribuíram para a expansão de dispositivos eletrônicos portáteis, viabilizaram o crescimento da mobilidade elétrica e favoreceram a implementação de sistemas estacionários de armazenamento de energia associados a fontes renováveis intermitentes (Goodenough; Park, 2013; Dai; Panahi, 2025). Nesse contexto, projeções de mercado indicam um crescimento expressivo da demanda global por baterias de íons de lítio ao longo das próximas décadas, impulsionado principalmente pela eletrificação do transporte e pela expansão de sistemas de armazenamento energético (McKinsey & Company, 2023; Fortune Business Insights, 2025).

Apesar de seus benefícios tecnológicos, a ampla disseminação das LIBs também impõe desafios significativos relacionados à segurança operacional. Um dos fenômenos mais críticos associados a essa tecnologia é a fuga térmica (thermal runaway, TR), caracterizada por uma sequência de reações exotérmicas autossustentadas no interior da célula eletroquímica. Esse processo pode ser desencadeado por diferentes formas de abuso, incluindo condições mecânicas, térmicas ou elétricas adversas, resultando em aumento abrupto de temperatura, liberação de gases inflamáveis e possível ignição (Doughty; Roth, 2012; Feng et al., 2018). Durante eventos de fuga térmica, diversos compostos gasosos potencialmente tóxicos e inflamáveis podem ser liberados, aumentando significativamente os riscos à segurança em ambientes confinados ou densamente ocupados (Bugryniec et al., 2024; Nilsson et al., 2024).

A crescente adoção dessa tecnologia em diferentes aplicações, incluindo eletrônicos de consumo, dispositivos de micromobilidade, veículos elétricos e sistemas estacionários de

armazenamento de energia, tem ampliado a relevância dos estudos relacionados à prevenção e mitigação de eventos de fuga térmica. Programas internacionais de monitoramento de incidentes e iniciativas regulatórias têm buscado aprimorar a compreensão desses fenômenos e estabelecer diretrizes para o uso seguro de sistemas baseados em baterias de íons de lítio (UL Standards & Engagement, 2025a; OSHA, 2024). Paralelamente, normas técnicas específicas vêm sendo desenvolvidas para orientar o projeto, a instalação e a operação segura desses sistemas energéticos (NFPA, 2023; IEC, 2017).

Entretanto, estratégias convencionais de combate a incêndios apresentam limitações importantes quando aplicadas a eventos envolvendo baterias de íons de lítio. Diferentemente de incêndios convencionais, o processo de fuga térmica pode continuar mesmo após a remoção da fonte externa de oxigênio, uma vez que reações internas da célula podem gerar calor adicional e liberar gases combustíveis provenientes da decomposição de seus materiais constituintes (Zhang et al., 2022; Xu et al., 2021). Como consequência, agentes extintores tradicionalmente utilizados em incêndios estruturais podem apresentar eficácia limitada nesses cenários, exigindo estratégias específicas de supressão e controle térmico (Yuan et al., 2021; Ghiji et al., 2020).

Em aplicações de maior escala, como veículos elétricos e sistemas estacionários de armazenamento de energia, diferentes abordagens tecnológicas vêm sendo investigadas para mitigar os riscos associados a eventos de fuga térmica. Entre elas destacam-se sistemas avançados de resfriamento, estratégias de isolamento térmico e agentes extintores especializados capazes de reduzir a propagação do fenômeno entre células adjacentes (Ineris, 2024; Wang et al., 2023). Contudo, muitas dessas soluções dependem de infraestrutura técnica complexa e apresentam custos elevados, o que limita sua aplicação em contextos de uso cotidiano por consumidores finais.

No caso de dispositivos eletrônicos portáteis, como powerbanks, baterias externas e equipamentos compactos, as alternativas disponíveis no mercado geralmente incluem invólucros de contenção, bolsas resistentes ao fogo ou mantas corta-fogo. Apesar de amplamente comercializadas, tais soluções frequentemente apresentam limitações de desempenho ou carecem de validação experimental robusta em condições representativas de eventos reais de fuga térmica. Além disso, grande parte das normas e metodologias de ensaio existentes foi originalmente desenvolvida para módulos de maior capacidade, sistemas estacionários ou aplicações automotivas, apresentando menor aderência às necessidades específicas de dispositivos portáteis (Underwriters Laboratories, 2020; Underwriters Laboratories, 2025).

Diante desse cenário, observa-se uma lacuna relevante entre o crescimento da utilização de dispositivos alimentados por baterias de íons de lítio e a disponibilidade de soluções eficazes, acessíveis e cientificamente validadas para a mitigação de riscos associados a eventos de fuga térmica em aplicações de pequeno porte. Nesse contexto, a aplicação de metodologias estruturadas de desenvolvimento de produto, aliadas a abordagens centradas no usuário, apresenta-se como uma estratégia promissora para conceber soluções inovadoras que atendam às necessidades reais desse público (Ulrich; Eppinger, 2015; Rozenfeld et al., 2006).

1.2. Definição do Problema

A ampla disseminação de dispositivos eletrônicos portáteis alimentados por LIBs tem ampliado a exposição dos usuários finais a riscos associados ao fenômeno de TR, cuja ocorrência pode resultar em incêndios de rápida propagação e difícil contenção. Contudo, as soluções atualmente disponíveis para a mitigação desse tipo de evento permanecem predominantemente orientadas a contextos industriais, automotivos ou militares. Essa desconexão evidencia uma lacuna entre a crescente indispensabilidade dos dispositivos portáteis e a ausência de alternativas acessíveis, funcionais e específicas para a contenção de incêndios por usuários comuns.

Adicionalmente, observa-se um déficit de conhecimento sobre as necessidades reais, as percepções de risco e as expectativas dos usuários finais frente a possíveis eventos de fuga térmica. As soluções existentes são, em grande medida, concebidas sem considerar diretamente as práticas, limitações e comportamentos do consumidor cotidiano, produzindo um desalinhamento entre as características dos produtos ofertados e o perfil do público mais exposto a tais riscos.

Diante desse cenário, formula-se a seguinte pergunta norteadora de pesquisa: Como podem ser definidos os requisitos e as features de um produto mínimo viável de uso pessoal para a contenção de eventos de fuga térmica em baterias de íons de lítio, com base nas necessidades e percepções dos usuários finais?

1.3. Objetivo Geral

Desenvolver um Produto Mínimo Viável (MVP) de um dispositivo ignífugo destinado ao uso pessoal, validado por usuários finais, para a contenção de eventos de fuga térmica em baterias de íons de lítio.

1.4. Objetivos Específicos

- a) Caracterizar o estado da arte do fenômeno de fuga térmica, dos produtos e técnicas para contenção de incêndios em baterias de íons de lítio.
- b) Estabelecer requisitos funcionais, de segurança, usabilidade e desempenho a serem atendidos.
- c) Segmentar, identificar e priorizar as necessidades dos clientes.
- d) Identificar features compatíveis com os requisitos.
- e) Elaborar um candidato a MVP e validá-lo junto aos usuários finais.

1.5. Metodologia de Pesquisa

Para atingir os objetivos específicos propostos, a metodologia de pesquisa deste trabalho foi estruturada em três fases interdependentes e sequenciais: (i) caracterização do estado da arte sobre fuga térmica em baterias de íons de lítio; (ii) caracterização de produtos ignífugos aplicáveis ao cenário de fuga térmica, com base em normas técnicas e soluções existentes; e (iii) aplicação de um Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) para a síntese de um Produto Mínimo Viável (MVP). Cada fase utiliza os resultados e conhecimentos adquiridos na etapa anterior como insumo, configurando um fluxo metodológico coerente que parte da fundamentação teórica e culmina na elaboração de um produto mínimo a ser validado junto aos usuários finais.

A presente investigação classifica-se como pesquisa aplicada, de natureza exploratória, com abordagem quantitativa. Aplicada, pois visa gerar conhecimento direcionado à solução de um problema prático específico, a concepção de um dispositivo ignífugo para uso pessoal. Exploratória, dado o caráter inovador do produto e a escassez de estudos prévios sobre as necessidades do consumidor final nesse segmento. A abordagem quantitativa justifica-se pela combinação de entrevistas, análise de conteúdo na fase de levantamento de necessidades e técnicas quantitativas (estatística descritiva, análise de médias em escala Likert, critérios de priorização por frequência e importância) na fase de priorização e validação.

A primeira fase dedica-se à caracterização do estado da arte do fenômeno de TR em LIBs. Nessa etapa, são investigados os mecanismos físico-químicos, condições desencadeadoras, parâmetros térmicos, composição dos gases gerados e implicações para a segurança do usuário. Paralelamente, mapeamento de normas técnicas relevantes (critérios de inflamabilidade, diretrizes de segurança para transporte e armazenamento), soluções comerciais existentes e tecnologias emergentes de contenção, visando identificar lacunas de usabilidade e oportunidades de inovação.

A fundamentação foi construída a partir de revisão bibliográfica em bases indexadas (Scopus, Web of Science, Google Acadêmico) e repositórios institucionais (Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), Repositório UFSC), complementada por análise documental de normas técnicas e levantamento exploratório de soluções comerciais. A estratégia de busca combinou descritores em língua inglesa ("thermal runaway", "lithium-ion battery", "battery fire", "fire suppression", "flame retardant", "Li-ion", "LIB", "thermal hazard" e "fire extinguishing") com operadores booleanos, no recorte temporal 2015-2025. As combinações seguiram a lógica de operadores AND para interseção entre conceitos e OR para inclusão de sinônimos e variações terminológicas, com adaptações específicas às sintaxes de cada base de dados. Priorizaram-se publicações em periódicos classificados no terceiro quartil (Q3) ou superior (nas métricas JCR/SJR). Teses e dissertações foram analisadas com base em sua aderência ao tema, independentemente de métricas bibliométricas.

O processo de seleção de documentos seguiu três etapas sequenciais de filtragem progressiva. Na primeira etapa (triagem por título), avaliou-se a aderência temática através da leitura dos títulos dos documentos recuperados, excluindo aqueles manifestamente desalinhados com os objetivos da revisão. Na segunda etapa (triagem por resumo) incluíram-se estudos abordando mecanismos de fuga térmica (TR), caracterização de riscos e estratégias de supressão da TR; excluíram-se estudos focados exclusivamente em prevenção através de melhorias em materiais de eletrodo ou eletrólito sem interface com estratégias de supressão externas. Na terceira etapa (leitura completa), os documentos que passaram pelas triagens anteriores foram lidos integralmente, extraindo-se informações relevantes para fundamentação do trabalho.

A segunda fase concentra-se na identificação das características técnicas e normativas que definem um produto como ignífugo no contexto de fuga térmica em baterias de íons de lítio. O objetivo é compreender os critérios técnicos, de segurança e de usabilidade que devem ser atendidos por produtos dessa categoria. Para tanto, realiza-se o mapeamento de normas e padrões técnicos relevantes, tais como critérios de inflamabilidade e diretrizes de segurança para transporte e armazenamento de baterias. Adicionalmente, são investigadas soluções comerciais e tecnologias emergentes de contenção de incêndios em baterias de íons de lítio, visando identificar lacunas de usabilidade, desempenho e oportunidades de inovação.

Enquanto que a terceira fase refere-se à aplicação de uma abordagem estruturada de um Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) para conduzir a investigação junto aos usuários finais, visando realizar o desenvolvimento de um Produto Mínimo Viável (MVP). Esta fase compreende: (i) tradução das necessidades priorizadas em features, com auxílio de

ferramentas de inteligência artificial generativa para brainstorming estruturado; (ii) seleção e agrupamento das features para composição de candidatos a MVP; e (iii) validação iterativa do MVP junto aos usuários finais, adotando o critério de aprovação superior a 75% de aceitação por feature. O ciclo de validação segue a lógica do ciclo build-measure-learn de Ries, 2011, onde features que não atingem o limiar são substituídas e o conjunto é reavaliado integralmente até a aprovação do arranjo.

O escopo metodológico prático deste trabalho delimita-se às fases iniciais do PDP, Projeto Informacional e Projeto Conceitual. O resultado final não busca comprovar a viabilidade construtiva, mas sim validar quais features são indispensáveis ao produto, assegurando que a definição do MVP esteja alinhada às expectativas de valor do usuário. O conjunto de especificações conceituais validadas servirá de base para desenvolvimentos futuros nas fases subsequentes do PDP.

O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico que dá suporte a essas três fases, aprofundando-se no fenômeno da fuga térmica e nos modelos de engenharia de produto que norteiam as etapas aplicadas do estudo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta o referencial teórico que fundamenta o desenvolvimento do produto proposto, estabelecendo as bases físico-químicas, tecnológicas e normativas necessárias para compreender o fenômeno de fuga térmica. A discussão está organizada em cinco seções articuladas em cadeia lógica: a caracterização das baterias de íons de lítio (Seção 2.1); a análise do fenômeno de fuga térmica (Seção 2.2); a definição das características de um ignífugo e o enquadramento nas normas associadas (Seção 2.3); a exploração de produtos, tecnologias e estratégias de contenção (Seção 2.4); e, por fim, o referencial metodológico de processo de desenvolvimento de produtos (Seção 2.5), que estrutura a concepção e validação da solução proposta.

2.1. Baterias de íons de lítio

A compreensão dos sistemas de armazenamento de energia inicia-se pela distinção de suas tecnologias e princípios operacionais. Esta seção apresenta uma visão abrangente das baterias, classificando-as conforme sua natureza eletroquímica e destacando as características que tornaram as baterias de íons de lítio a solução predominante na eletrônica moderna, bem como os desafios de segurança inerentes a essa escolha tecnológica.

As baterias são dispositivos eletroquímicos que convertem energia química em energia elétrica por meio de reações de oxirredução. Dividem-se em células primárias (não recarregáveis) e células secundárias ou acumuladores (recarregáveis), cujas reações eletroquímicas são reversíveis mediante aplicação de corrente elétrica externa, sendo as secundárias as predominantes em aplicações que exigem uso contínuo e ciclos de carga e descarga (Doughty; Roth, 2012), que podem ser arrançadas em série para elevar a tensão total ou em paralelo para aumentar a capacidade de corrente.

Independentemente do arranjo, cada célula individual é constituída por quatro elementos essenciais, conforme mostrado na Figura 1: Ânodo (eletrodo negativo, onde ocorre oxidação na descarga), Cátodo (eletrodo positivo, onde ocorre redução), Eletrólito (meio de transporte iônico) e Separador (barreira que impede curto-circuito entre eletrodos, mas permite passagem de íons) (Linden; Reddy, 2002).

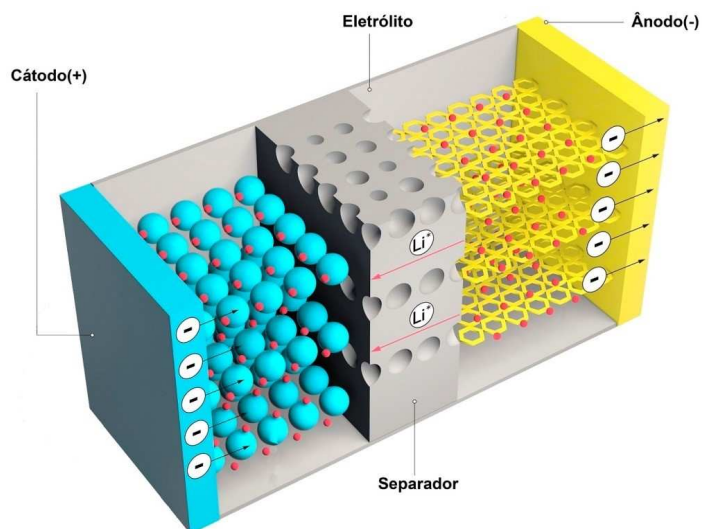


Figura 1: Representação esquemática dos componentes fundamentais de uma célula eletroquímica.
Fonte: STA Eletrônica, 2020.

O princípio de funcionamento de uma bateria baseia-se no fluxo ordenado de portadores de carga. Durante o processo de descarga, a oxidação no ânodo libera elétrons que percorrem o circuito externo em direção ao cátodo, realizando trabalho elétrico; simultaneamente, íons migram através do eletrólito para manter a neutralidade elétrica do sistema. No processo de recarga, uma fonte de energia externa impõe uma diferença de potencial superior à da bateria, forçando a corrente a fluir no sentido oposto. Isso reverte as reações químicas nos eletrodos, regenerando os materiais ativos e restaurando o estado energético da célula. Contudo, perdas termodinâmicas e degradação progressiva dos materiais impedem uma reversibilidade perfeita ao longo dos ciclos (Linden; Reddy, 2002).

Para uma comparação entre tecnologias de armazenamento, a literatura aponta um conjunto de parâmetros de desempenho fundamentais: Tensão Nominal (V); Capacidade (Ah); Densidade de Energia (Wh/kg ou Wh/L); Densidade de Potência (W/kg) e Ciclos de Vida, estes parâmetros são influenciados pela profundidade de descarga, temperatura de operação e taxas de corrente aplicadas (Linden; Reddy, 2002). Dentre as tecnologias de baterias recarregáveis, destacam-se quatro categorias principais, cada uma com características distintas de desempenho e segurança (Doughty; Roth, 2012):

a) Chumbo-ácido: Uma tecnologia madura, de baixo custo e elevada robustez, com ampla infraestrutura de reciclagem estabelecida. No entanto, é limitada por uma baixa densidade de energia (tipicamente da ordem de 30-50 Wh/kg) e vida útil inferior quando comparada a tecnologias modernas. Permanece predominante em aplicações automotivas convencionais (arranque) e em sistemas de backup de energia.

b) Níquel-cádmio (NiCd): Historicamente relevante por sua robustez e capacidade de fornecer altas correntes de descarga. Contudo, apresenta desvantagens significativas como o "efeito memória" e, sobretudo, a elevada toxicidade do cádmio. Tais fatores ambientais restringiram seu uso em aplicações civis e aceleraram sua substituição por tecnologias alternativas.

c) Níquel-metal-hidreto (NiMH): Apresenta densidade de energia moderada e um perfil de segurança térmica mais conservador do que sistemas baseados em eletrólitos orgânicos. Mantém sua aplicação em nichos específicos, como ferramentas elétricas e veículos híbridos, embora sua participação relativa no mercado venha decrescendo frente ao avanço das baterias de lítio.

d) Baterias de íons de lítio (LIBs): Consolidaram-se como a tecnologia dominante em eletrônicos portáteis e expandem-se fortemente para veículos elétricos e armazenamento estacionário. Suas principais vantagens incluem alta tensão por célula, elevada densidade de energia, boa eficiência energética e desempenho superior em diferentes regimes de descarga.

A Tabela 1 apresenta um comparativo entre as principais tecnologias de baterias recarregáveis disponíveis comercialmente.

Tecnologia	Densidade Energética (Wh/kg)	Ciclos (até 80%)	Vantagens Principais	Principais Aplicações
Chumbo-Ácido	30-50	200-500	Baixo custo, reciclável	Backup, automotivo
NiCd	40-60	1.000+	Alta corrente de descarga	Ferramentas (uso restrito)
NiMH	60-120	500-1.000	Perfil térmico conservador	Híbridos, câmeras
LIBs	150-260	1.000-6.000	Alta densidade, sem efeito memória	Portáteis, EVs, ESS

Tabela 1: Comparativo entre diferentes tecnologias de baterias.
Fonte: Adaptado de Doughty e Roth, 2012 e Goodenough e Park, 2013.

Além das diferenças de desempenho, tecnologias distintas apresentam perfis de uso e riscos variados. Dentre as tecnologias apresentadas, as baterias de íons de lítio (LIBs) destacam-se não apenas pelo desempenho superior, mas também pela complexidade de seus mecanismos de segurança (Doughty; Roth, 2012).

O aprofundamento em baterias de íons de lítio (LIBs) justifica-se por sua predominância em dispositivos portáteis de uso cotidiano (smartphones, notebooks, power banks, drones e micromobilidade), ampliando a exposição do usuário final a cenários de falha.

A presença simultânea de materiais com alta reatividade, eletrólitos orgânicos e elevada densidade energética aumenta o potencial de eventos críticos e dificulta a contenção quando ocorre perda do controle térmico (Mei et al., 2023).

As LIBs operam pelo mecanismo de intercalação reversível, no qual íons de lítio (Li^+) inserem-se e removem-se das estruturas cristalinas dos eletrodos sem alterar significativamente sua arquitetura. Em configurações comerciais típicas, utiliza-se: (i) ânodo de grafite (C_6), (ii) cátodo de óxido metálico litiado (LiMO_2 , sendo M um metal de transição), (iii) eletrólito orgânico contendo LiPF_6 e (iv) separador polimérico microporoso (Goodenough; Park, 2013).

O funcionamento de uma LIB, como representado na Figura 2, depende de dois fluxos simultâneos e acoplados: transporte iônico no interior da célula e transporte eletrônico no circuito externo. Durante a descarga, os íons Li^+ deixam o ânodo (desintercalação), atravessam o eletrólito/separador e inserem-se na estrutura do cátodo (intercalação). Em paralelo, os elétrons liberados na reação do ânodo percorrem o circuito externo, fornecendo corrente elétrica para a carga, e são consumidos no cátodo, mantendo a eletroneutralidade global do sistema. No processo de carga, uma fonte externa impõe uma corrente no sentido inverso, revertendo a migração dos íons Li^+ de volta ao ânodo, onde são novamente intercalados na estrutura da grafite, restaurando o estado energético inicial da célula (Goodenough; Park, 2013).

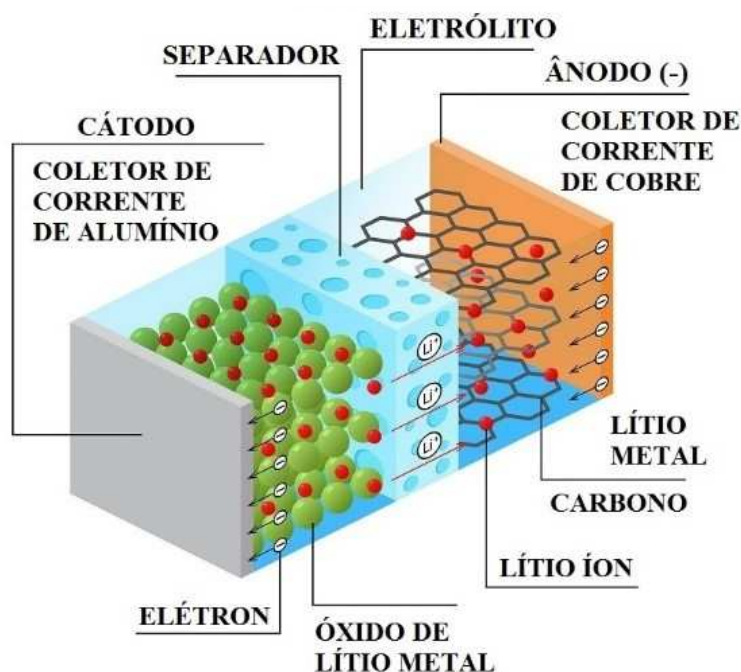


Figura 2: Representação dos componentes de uma célula LIB com fluxo de íons e elétrons.
Fonte: STA Eletrônica, 2020.

2.1.1. Composições catódicas e formatos das células

As LIBs distribuem-se entre diferentes químicas eletroquímicas, cada qual com compromissos específicos entre densidade energética e estabilidade térmica, a estabilidade térmica da célula depende diretamente (i) do estado de carga (SOC), (ii) do balanço entre reações desejadas (reversíveis) e reações indesejadas, (iii) da integridade dos componentes que garantem a separação elétrica e o transporte iônico, (iv) da composição química da célula eletroquímica. Algumas das composições químicas do cátodo mais comuns podem ser observadas abaixo:

LCO (LiCoO_2): alta densidade energética, menor estabilidade térmica; predominante em smartphones.

NMC ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$): equilíbrio entre energia e estabilidade; amplamente empregada em EVs e eletrônicos.

NCA (LiNiCoAlO_2): alta energia, aplicações de maior demanda; presente em EVs de alto desempenho.

LFP (LiFePO_4): maior estabilidade térmica, sem liberação de O_2 ; vida útil prolongada; ESS e micromobilidade.

Quanto aos formatos físicos, predominam células cilíndricas (invólucro metálico rígido, com válvula de alívio), prismáticas e pouch (embalagem laminada flexível), conforme ilustrado na Figura 3. As células pouch, amplamente utilizadas em smartphones, tablets e drones sob a denominação comercial LiPo (Lithium Polymer), empregam eletrólito gelificado e oferecem maior flexibilidade de design, porém apresentam vulnerabilidades específicas de segurança: menor proteção mecânica contra perfurações, suscetibilidade a swelling (inchamento por gases internos) e ausência de mecanismos de alívio de pressão controlado, o que pode resultar em ruptura do laminado e exposição rápida dos componentes internos ao oxigênio (Doughty; Roth, 2012; Bugryniec et al., 2024).



Figura 3: Diferentes formatos de células de LIBs, respectivamente pouch, cilíndricas e prismáticas.
Fonte: Adaptado de Bond et al., 2017 e CM Batteries, 2025

Do ponto de vista de segurança, três aspectos são determinantes para a compreensão da fuga térmica em LIBs (Doughty; Roth, 2012):

Eletrólito orgânico: eletrólito apresenta boa condutividade iônica, mas é volátil e inflamável, podendo gerar gases e espécies reativas sob aquecimento ou degradação. O LiPF_6 está associado a rotas de decomposição que produzem subprodutos corrosivos, incluindo HF na presença de umidade.

Separador como barreira de segurança: componente de segurança passiva cuja função é manter o isolamento elétrico entre eletrodos. Sob temperaturas elevadas ou deformações, pode sofrer retração, fusão parcial ou ruptura, aumentando a probabilidade de curto-circuito interno, um dos gatilhos mais críticos para a escalada térmica.

Interfaces eletrodo/eletrólito (SEI): mesmo em operação normal, ocorrem reações secundárias de baixa intensidade; sob abuso, essas reações intensificam-se, gerando calor e gases, elevando a pressão interna e deteriorando a estabilidade do sistema.

Esses fatores estabelecem que a fuga térmica não é um evento instantâneo, mas a consequência de uma sequência de degradações que eleva a taxa de geração de calor e reduz a capacidade de dissipação térmica. Assim, a Seção 2.2 aprofunda os mecanismos de falha que conectam diretamente estrutura, materiais e condições de abuso às reações em cadeia e aos parâmetros térmicos que caracterizam a fuga térmica, estabelecendo a base para a discussão de riscos e estratégias de mitigação.

2.2. Fenômeno de fuga térmica

A fuga térmica constitui o principal mecanismo de falha no ciclo de vida de LIBs, caracterizando-se por uma sequência de reações exotérmicas auto-sustentadas que, uma vez iniciada, progride de forma espontânea até o esgotamento de toda a matéria prima disponível

na célula, resultando na destruição da bateria e em riscos ao ambiente circundante (Mei et al., 2023). Este fenômeno, ilustrado na Figura 4, emerge como o problema central nas pesquisas sobre segurança de baterias de íons de lítio, especialmente relevante diante do aumento contínuo da densidade energética das células comerciais voltadas para aplicações em sistemas de armazenamento de energia em larga escala (Doughty; Roth, 2012).

A TR ocorre quando a taxa de geração interna de calor supera a taxa de dissipação para o ambiente, levando a um aumento autossustentado de temperatura. Um critério operacional amplamente adotado para identificar o início da fuga térmica consiste na observação da taxa de aquecimento da célula. Quando essa taxa ultrapassa 10 °C/min, o controle térmico passivo torna-se insuficiente e a evolução para temperaturas críticas torna-se inevitável sem intervenção externa (Bugryniec et al., 2024). Embora esse limiar varie conforme a composição química e o estado de carga (SOC) da bateria, em dispositivos eletrônicos de pequeno porte, esse limiar tende a ser atingido mais rapidamente devido à menor inércia térmica das células de pequeno formato e à alta densidade energética das composições químicas utilizadas, o que reduz o tempo de resposta disponível para contenção (Mei et al., 2023).

Segundo os autores de Mei et al., 2023, é importante estabelecer que o aquecimento é produto das reações químicas internas, e estas podem ser iniciadas ou aceleradas por diferentes condições:

- a) Abuso elétrico: sobrecarga, sobrecorrente, curto-circuito externo, todos estes capazes de elevar a densidade de corrente e aumentar o calor gerado por efeito Joule;
- b) Abuso mecânico: impacto, flexão, vibração intensa, deformação ou perfuração, que podem danificar o separador e originar curtos-circuitos internos, mesmo que inicialmente de baixa intensidade;
- c) Abuso térmico: exposição a fontes externas de calor, como elevadas temperaturas ambientais ou falhas nos sistemas de resfriamento;
- d) Defeitos e envelhecimento: degradação do separador, perda da integridade da SEI e aumento da resistência interna, que amplificam a geração de calor resistivo gerado por efeito Joule.

O curto-circuito interno à bateria representa a característica comum a todas as condições de abuso, funcionando como gatilho imediato para o início das reações exotérmicas. Os curtos-circuitos internos podem ocorrer por múltiplos mecanismos, desde contato direto entre ânodo e cátodo, falhas no separador, rebarbas metálicas, defeitos de

fabricação e/ou danos mecânicos, até falhas nos coletores de corrente, constituindo um dos cenários mais perigosos devido à velocidade da reação resultante (Bugryniec et al., 2024; Nilsson et al., 2024).

Sob abuso mecânico, elétrico, térmico ou defeitos, a célula inicialmente desenvolve um aquecimento localizado (hot spot) e um curto interno incipiente, elevando a temperatura e ativando reações exotérmicas secundárias. A presença de um hot spot é crítica porque desencadeia reações que, em condições normais de operação, seriam muito lentas para gerar calor significativo (Sorensen; Utgikar; Belt, 2024).

Quando a temperatura local ultrapassa determinados limiares, reações que antes eram estáveis tornam-se altamente reativas, indicando o início da sequência de fuga térmica. A partir desse ponto, a evolução tende a seguir uma lógica de realimentação positiva: o calor gerado acelera as reações, que geram mais calor, gases e pressão, até que mecanismos de segurança atuem ou a integridade interna seja perdida, culminando no evento de thermal runaway (Wang et al., 2024).

2.2.1. Etapas do fenômeno

A etapa inicial da escalada termoquímica em células comerciais de íons de lítio está associada, em grande medida, à instabilidade térmica progressiva da camada de interface sólido-eletrólito (Solid Electrolyte Interphase, SEI), formada predominantemente sobre o ânodo (tipicamente de $C_{(s)}$). A SEI resulta de reações de redução do eletrólito durante os primeiros ciclos e ao longo do envelhecimento, originando um filme eletricamente isolante, porém condutor de íons Li^+ , cuja função é separar quimicamente o eletrodo negativo do eletrólito, limitando reações parasitas contínuas. Por essa razão, a SEI é um elemento determinante para parâmetros de desempenho e durabilidade, como eficiência coulômica, retenção de capacidade, e para a segurança, pois contribui para manter a reatividade do ânodo sob controle em condições normais de operação.

Sob aquecimento, a SEI começa a ser degradada e passa a não ser interpretada como uma barreira eletricamente isolante pelo sistema. Por ser composta principalmente por espécies metaestáveis, cuja estabilidade depende do estado de carga (SOC) e das condições locais de temperatura, gradientes, pressão e disponibilidade de eletrólito. À medida que a temperatura se eleva, essas espécies passam a se decompor e reagir com o eletrólito sua decomposição é exotérmica e libera gases (CO_2 e hidrocarbonetos leves), iniciando um regime de auto-aquecimento mensurável e reduzindo progressivamente a proteção do ânodo (Wang et al., 2024).

Dentro da faixa de temperatura reportada para a etapa de decomposição da SEI, um composto frequentemente utilizado como marcador representativo de frações orgânicas é o dicarbonato de etileno de lítio (LEDC), de composição química $(\text{CH}_2\text{OCO}_2\text{Li})_2$, cuja decomposição é exotérmica e acompanhada por formação de gases, notadamente CO_2 e hidrocarbonetos leves. Além disso, a decomposição da SEI tende a produzir resíduos sólidos relativamente mais estáveis em temperaturas moderadas, como o carbonato de lítio (Li_2CO_3), e o propionato de lítio ($\text{C}_3\text{H}_5\text{LiO}_2$). Em temperaturas mais elevadas, essas fases sólidas também passam por decomposição adicional: na faixa de $\approx 300\text{-}600\text{ }^\circ\text{C}$, o propionato de lítio pode degradar-se formando compostos carbonílicos como a pentanona ($\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}$), enquanto acima de $\approx 600\text{ }^\circ\text{C}$ o Li_2CO_3 pode decompor-se liberando CO_2 adicional, restando Li_2O como resíduo inorgânico final (Wang et al., 2024).

Embora essas temperaturas superiores frequentemente coincidam com estágios já próximos ou dentro do runaway em ensaios severos, a descrição é útil para enfatizar que a SEI, e seus produtos de reação, compõem uma sequência de degradações que contribuem tanto para liberação de calor quanto para pressurização do sistema ao longo do aquecimento.

Uma representação esquemática das reações presentes em uma bateria de íon de Lítio em suas diferentes fases do processo de fuga térmica estão equivalentes as seguintes reações e resumidamente descritas junto a suas faixas de temperatura típicas e consequências para a cadeia de reações mostradas na Tabela 2:

Etapa	Faixa típica ($^\circ\text{C}$)	Eventos Característicos	Gases / Riscos
(1) Decomposição da SEI	90-120	Degradação da camada passivante do ânodo; início de autoaquecimento; swelling em células pouch	CO_2 , C_2H_4 , hidrocarbonetos leves
(2) Reações ânodo-eletrólito	$\approx 100\text{-}200$	Decomposição do LiPF_6 gera PF_5 que acelera degradação	C_2H_4 , calor crescente
(3) Falha do separador	$\approx 130\text{-}190$	Shutdown de poros \rightarrow fusão/ruptura \rightarrow curto-circuito interno	Transição de regime químico para elétrico
(4) Decomposição do eletrólito	$\approx 200\text{-}300$	Eletrólito orgânico torna-se instável; grande geração de gases; pressurização \rightarrow ventilação ou ruptura do invólucro da célula	CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , HF (reação 4)
(5) Decomposição do cátodo	$> 150\text{-}200$ (dependente da química e SOC)	Cátodos de óxidos lamelares (LCO, NMC, NCA) liberam O_2 na decomposição; LFP não libera O_2	O_2 alimenta combustão interna; amplifica severidade

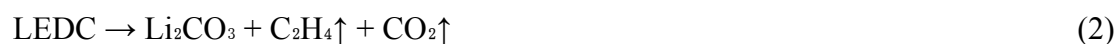
(6) Thermal runaway	> 300-800	Subida abrupta de temperatura; ejeção violenta de gases/partículas/jatos de chama	Atmosfera explosiva (H ₂ , CO); HF; reiguição pós-evento
---------------------	-----------	---	---

Tabela 2: Faixas de Temperatura Típicas e Consequências durante a Fuga Térmica.

Fonte: Compilado de Wang et al. (2024), Bugryniec et al. (2024), Nilsson et al. (2024), Mei et al. (2023) e Gu et al. (2025).

Do ponto de vista diagnóstico, o início da fase de Decomposição da SEI pode ser identificado por marcadores típicos (Gu et al., 2025): (i) surgimento de autoaquecimento desproporcional ao estímulo externo aplicado, (ii) aumento gradual da pressão interna, por geração de gases e vapores, e (iii) sinais de inchamento (swelling), particularmente evidentes em células pouch, onde há deformação do invólucro. Em conjunto, esses sinais indicam que o sistema já não está apenas absorvendo calor de uma fonte externa: ele passa a produzir calor internamente em intensidade crescente, estabelecendo a base para as etapas subsequentes de aceleração reacional.

As reações a seguir são apresentadas em forma simplificada, durante a degradação da SEI (Gu et al., 2025; Wang et al., 2024):



Após a ruptura parcial da SEI ($\approx 100\text{-}200^\circ\text{C}$), o lítio intercalado no grafite (eletrodo negativo) torna-se altamente reativo frente ao eletrólito orgânico. A partir dessa faixa de temperaturas, o sal de lítio (LiPF₆) pode se decompor gerando pentafluoreto de fósforo (PF₅), que atua como ácido de Lewis e intensifica a degradação da SEI, promovendo a formação adicional de gases como o C₂H₄ e calor (Wang et al., 2024).

A degradação progressiva da SEI, descrita nas reações químicas (1),(2) e (3), não apenas reduzem a passivação do ânodo, mas também expõe diretamente o grafite litiado (Li_xC₆) ao eletrólito orgânico. Essa exposição marca uma transição no comportamento termoquímico da célula: enquanto a SEI intacta limita a taxa de reações parasitas, após sua ruptura parcial ou total permite que espécies altamente redutoras, íons Li⁺ intercalados e elétrons disponíveis na estrutura do grafite, reajam vigorosamente com componentes do eletrólito, especialmente solventes orgânicos e o sal condutor, tipicamente hexafluorofosfato de lítio (LiPF₆).

Com a elevação da temperatura, o separador polimérico pode apresentar o chamado fechamento de poros, fenômeno que reduz temporariamente o transporte iônico e pode retardar a progressão da falha térmica. Entretanto, caso o aquecimento persista, ocorre encolhimento e posterior fusão do material, com perda de integridade mecânica, possibilitando a formação de microcontatos entre ânodo e cátodo e a evolução para um curto-circuito interno mais severo, acompanhado de intenso aquecimento por efeito Joule (Sorensen; Utgikar; Belt, 2024; Wang et al., 2024).

O processo de fusão do separador pode iniciar-se em torno de 110 °C. Separadores comerciais produzidos em polietileno (PE) e polipropileno (PP) apresentam temperaturas típicas de fechamento de poros próximas a 130 °C e 170 °C, respectivamente, desempenhando temporariamente uma função protetiva ao bloquear o fluxo iônico. Contudo, se a temperatura continuar a se elevar, o material sofre desintegração completa por encolhimento e fusão, geralmente por volta de 190 °C, resultando em curto-circuito interno. A ruptura do separador elimina a barreira física entre os eletrodos, permitindo contato direto entre ânodo e cátodo. Esse contato gera correntes elevadas e intenso aquecimento por efeito Joule, acelerando de forma significativa o processo de fuga térmica (Sorensen; Utgikar; Belt, 2024; Wang et al., 2024).

Em temperaturas mais elevadas, o eletrólito orgânico torna-se termicamente instável e passa a gerar grandes quantidades de gases (mistura com CO, CO₂, H₂ e hidrocarbonetos leves). A liberação de vapor/aerossol do eletrólito contribui para pressurização interna, favorecendo ventilação (abertura de válvula) e/ou ruptura do invólucro. Revisões recentes ressaltam que a evolução do fogo após a falha depende fortemente do perfil de ventilação e da mistura de gases liberada (Bugryniec et al., 2024; Ali; Ghodrat, 2025).

O eletrólito sofre auto-decomposição entre 200 e 300 °C, com produtos de decomposição principais incluindo fluoreto de etila (C₂H₅F), metano (CH₄), etileno (C₂H₄), etano (C₂H₆), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂), sendo fonte importante dos gases inflamáveis e tóxicos liberados durante a fuga térmica.

A decomposição do eletrólito durante a fuga térmica pode ocorrer por duas vias distintas: em temperaturas mais baixas, o eletrólito transita para moléculas gasosas que sofrem decomposição adicional; em temperaturas elevadas, desintegra-se diretamente em fase líquida antes de vaporizar e entrar em combustão. Na presença de umidade, ocorre ainda a hidrólise do sal, gerando o ácido fluorídrico (HF), altamente tóxico, conforme a reação de decomposição/hidrólise do sal de lítio (Wang et al., 2024):



A decomposição do eletrólito, a liberação de oxigênio do material catódico e reações parasitas entre eletrólito e eletrodos elevam rapidamente a temperatura interna da célula, com registros experimentais superiores a 500 °C, acompanhados da ejeção de gases inflamáveis e tóxicos, incluindo hidrogênio (H₂), hidrocarbonetos leves, monóxido de carbono (CO) e compostos fluorados, com destaque para o ácido fluorídrico (HF), além de jatos de chama e projeção de partículas incandescentes e potencial de reignição (Bugryniec et al., 2024; Mei et al., 2023; Nilsson et al., 2024).

Quando a taxa de geração de calor excede a capacidade de dissipação, a célula entra na fase de runaway propriamente dita: há subida abrupta de temperatura, ejeção violenta de gases/vapores/aerossóis e, com frequência, ignição externa ou autoignição, manifestando-se como jatos de chama e projeção de partículas. Após o pico, observa-se fase de resfriamento, porém com risco de reignição devido a calor residual, material reativo remanescente e atmosferas inflamáveis em ambientes confinados (Bugryniec et al., 2024).

Do ponto de vista temporal, o processo de fuga térmica é descrito em três estágios principais, as etapas podem ser observadas na Figura 4: (i) uma fase inicial de auto aquecimento lento, na qual pequenas reações de decomposição começam a ocorrer e a temperatura da célula se eleva gradualmente; (ii) a fase de runaway (aquecimento acelerado), caracterizada por um aumento abrupto da temperatura e da pressão interna, com liberação intensa de calor e gases; e (iii) uma fase de resfriamento, na qual o sistema perde calor para o ambiente, persistindo riscos de reignição caso fontes de calor residual e material combustível permaneçam presentes (Nilsson et al., 2024; Landini, Leworthy e O'Donovan, 2019).

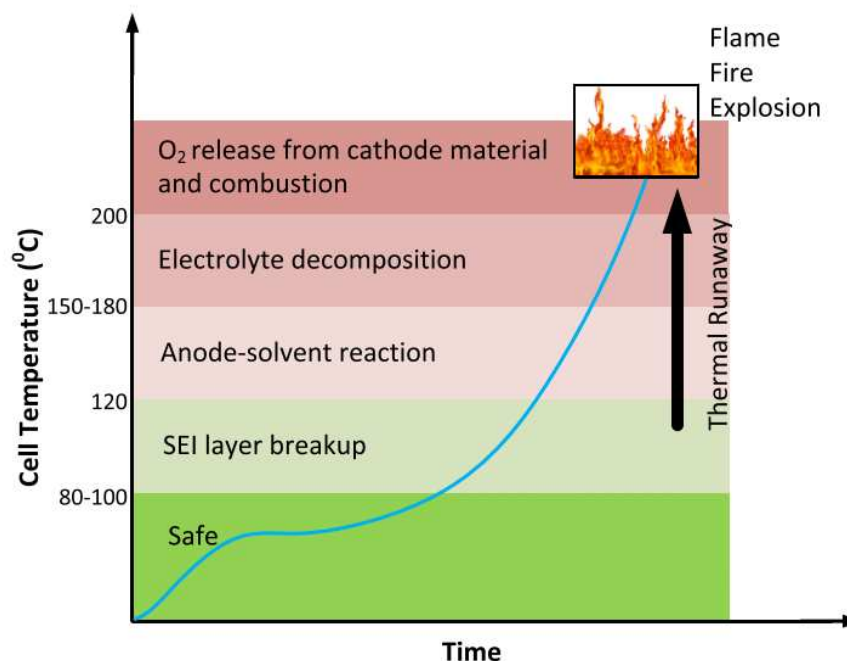


Figura 4: Processo de fuga térmica em relação à temperatura e tempo.
Fonte: Landini, Leworthy e O'Donovan, 2019

2.2.2. Influência da composição química e riscos

A estabilidade térmica das células de íons de lítio varia significativamente em função da composição química do cátodo. Para materiais baseados em óxidos metálicos em camadas, como LCO, NMC e NCA, o aumento da temperatura acima de 150 °C provoca a decomposição estrutural do óxido. Este processo libera oxigênio molecular (O_2), que atua como comburente para o eletrólito e para os gases inflamáveis gerados, exacerbando a severidade da fuga térmica. Cátodos parcialmente deslitiados em alto estado de carga (SOC > 80%) são particularmente instáveis, liberando O_2 e lítio metálico, ambos altamente reativos.

No caso específico dos cátodos NMC, a redução de Ni^{4+} para Ni^{2+} é a reação principal no estágio intermediário da TR. Simulações de dinâmica molecular (Ouyang et al., 2025) elucidam que átomos de oxigênio coordenados a um maior número de átomos de Níquel são instáveis, tendendo a romper ligações com metais de transição e liberar-se como O_2 . Em contrapartida, o material LFP (Fosfato de Ferro Lítio) apresenta desempenho superior em testes de segurança, por ser termicamente mais estável e não liberar oxigênio. A forte ligação fósforo-oxigênio no grupo fosfato impede a liberação de oxigênio, e resulta em calor mínimo de reação durante a TR. A ordem típica de estabilidade térmica é indicada no estudo de Wang et al. (2024) conforme a Tabela 3.

Composição	T_max típica (°C)	Produção de gases	Liberação de O_2
------------	-------------------	-------------------	--------------------

		(mmol)	
LFP	239-404	~50	Não
NMC	462-678	~150	Sim
NCA	~491	~150	Sim
LCO	545-853	~270	Sim

Tabela 3: Comparativo entre diferentes composições químicas de LIBs durante TR.
Fonte: Wang et al., 2024 e Ouyang et al., 2025

Outro aspecto particularmente crítico da fuga térmica em sistemas de baterias é sua capacidade de propagação entre células adjacentes. A propagação da fuga térmica pode disseminar rapidamente falhas através das células da bateria, intensificando ameaças à segurança. O calor radiante constitui mecanismo primário de propagação. Se uma bateria carece de barreiras térmicas, o calor radiado pode elevar a temperatura das células circundantes, aproximando-as de seu próprio limiar de falha térmica; mesmo que células próximas não atinjam fuga térmica completa, exposição prolongada ao calor radiante pode causar decomposição do eletrólito, formação de gases e eventual ruptura do invólucro.

Durante a TR, em temperaturas acima da decomposição do eletrólito, reações parasitas e possíveis contribuições do aglutinante geram grandes volumes de gases, com risco duplo: (i) inflamabilidade/explosividade e (ii) toxicidade/corrosividade. São comumente reportados H₂, CO, CO₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₆ e hidrocarbonetos superiores, além de espécies tóxicas como HF e outros compostos halogenados (Bugryniec et al., 2024; Mei et al., 2023; Nilsson et al., 2024; Ouyang et al., 2025). Em ensaios severos, registram-se temperaturas internas superiores a 500 graus Celsius, acompanhadas de jatos de chama e ejeção de partículas incandescentes podem estender-se significativamente além do volume da célula. Esses elementos podem causar queimaduras graves e iniciar incêndios secundários em materiais inflamáveis circundantes (Nilsson et al., 2024).

A composição gasosa da fuga térmica inclui componentes inflamáveis, como hidrogênio (H₂) e monóxido de carbono (CO), que podem criar atmosferas explosivas em espaços confinados. Todavia, a maior preocupação reside na toxicidade: o fluoreto de hidrogênio (HF), pode ser formado pela decomposição do sal Hexafluorofosfato de Lítio (LiPF₆) (Nilsson et al., 2024).

A compreensão da cinética e reações da fuga térmica revela que a contenção desses eventos exige mais do que a simples extinção de chamas, demandando sistemas capazes de gerenciar fluxos de calor extremos e subprodutos tóxicos em frações de segundo. Diante da

severidade desses parâmetros, a Seção 2.3 identifica as características e normas que definem um produto ignífugo, transpondo os desafios físico-químicos da fuga térmica para critérios de segurança do usuário normalizados.

2.3. Características de um ignífugo e normas associadas

A definição de um material ou sistema como ignífugo refere-se a substâncias que evitam o incêndio ou resistem à ação do fogo. Essa classificação abrange a capacidade de um sistema manter sua integridade estrutural e funcionalidade mecânica sob fluxos térmicos elevados, atuando como uma contenção ativa ou passiva que impede a propagação do fogo para o ambiente adjacente (Beyler, 2016). Para o setor de segurança contra incêndio, um sistema ignífugo é definido como um material, revestimento ou dispositivo projetado para retardar a propagação de chamas e reduzir a densidade óptica e toxicidade da fumaça (NFPA, 2024). No contexto específico das baterias de íons de lítio (LIBs), as características de um produto ignífugo devem ser dimensionadas para enfrentar as particularidades da fuga térmica (thermal runaway), integrando resistência térmica, isolamento e gestão de subprodutos gasosos.

Para este trabalho, a caracterização de um dispositivo ignífugo de uso pessoal foi balizada por um levantamento sistemático de normas técnicas, documentos regulatórios e guias de boas práticas internacionalmente reconhecidos, com enfoque no contexto específico de aplicações relacionadas à segurança de LIBs.

Dispositivos de contenção para fuga térmica situam-se na interseção de múltiplos domínios normativos: segurança de baterias, proteção contra incêndios e equipamentos de emergência. Atualmente, observa-se que a maioria das normas concentra-se em aplicações de grande escala, como sistemas de armazenamento de energia estacionários (ESS) ou veículos elétricos (EVs). A Tabela 4 sintetiza as normas consideradas mais relevantes para um projeto de dispositivos ignífugos e da categoria de incêndio em LIBs.

Norma / Órgão	Escopo	Parâmetros / Requisitos
UL 9540A:2025	Avaliação de propagação de Fuga Térmica em ESS.	Medição de temperaturas de falha, taxa de liberação de calor, composição de gases, avaliação de sobrepressão e verificação da propagação da chama.
UL 1642:2022	Segurança de células individuais de lítio.	Resiliência da célula frente a curtos-circuitos elétricos, exposição ao fogo, choques físicos, esmagamento e sobrecargas térmicas.

IEC 62133-2:2017+A1:2021	Segurança de baterias e células de lítio para aplicações portáteis.	Garantia de ausência de vazamentos, incêndio ou explosão sob condições de uso normais e de falhas previsíveis.
ABNT NBR 16976:2021	Segurança de células e baterias de lítio para aplicações estacionárias.	Requisitos de operação segura em instalações fixas; prevenção de eventos perigosos mediante testes de curto-circuito, impacto físico e confinamento térmico.
ASTM C1055:2020	Avaliação das condições de contato humano com superfícies aquecidas.	Curvas de tempo-temperatura. 60 °C como limite de queimadura de 2º grau em contatos curtos; 43 °C como limite seguro para contato direto e prolongado.
OSHA:2024	Limites de exposição ocupacional a gases e agentes nocivos.	Limites de segurança para gases oriundos de falhas de bateria. HF < 30 ppm: IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health)

Tabela 4: Normas técnicas e parâmetros críticos aplicáveis ao projeto do dispositivo ignífugo.
Fonte: Compilado pelo autor a partir das normas citadas.

O dispositivo ignífugo específico para LIBs deve possuir propriedades de vedação ou filtragem suficientes que minimizem a emissão desses voláteis. Além disso, os próprios materiais constituintes do dispositivo devem ser atóxicos sob aquecimento. A seleção de materiais deve considerar o perfil toxicológico, garantindo que a decomposição térmica do invólucro não adicione novos componentes perigosos à mistura gasosa já letal da bateria. Além de suportar as temperaturas internas extremas, o dispositivo deve prover isolamento térmico suficiente para que sua superfície externa permaneça segura ao contato.

A complexidade da contenção é dada pela natureza dos subprodutos da fuga térmica, como o evento caracteriza-se não apenas pelo calor, mas como também pela projeção de chamas resultantes da combustão do eletrólito e liberação de gases, com a literatura registrando que a ejeção de material incandescente pode se estender além do volume da célula, representando risco de ignição secundária em ambientes domésticos (Nilsson et al., 2024).

A convergência desses marcos normativos aponta para requisitos preliminares do produto: confinamento térmico e físico, não propagação de chamas, temperatura superficial segura ao contato, vedação de gases tóxicos e atoxicidade dos materiais constituintes do próprio dispositivo. Assim, qualquer solução de contenção eficaz deve ser capaz de suportar temperaturas superiores a 500 °C, resistir à projeção de partículas incandescentes, limitar a liberação de gases e impedir a propagação térmica para o ambiente externo.

Entretanto, a eficácia de um dispositivo de emergência não é determinada exclusivamente por seu desempenho físico-químico. A capacidade de um usuário não especializado implantá-lo de forma rápida e correta em situação de crise constitui fator igualmente crítico, frequentemente determinante para o sucesso ou fracasso da intervenção. A literatura sobre usabilidade de dispositivos de emergência elaborada pela OSHA enfatiza que a eficácia em condições reais frequentemente diverge significativamente do desempenho em condições controladas. O pânico, a pressão de tempo, a sobrecarga cognitiva e limitações físicas situacionais (como visibilidade reduzida por fumaça) podem comprometer drasticamente a capacidade de uso de dispositivos que parecem simples em demonstrações ou treinamentos.

O desenvolvimento de um produto fundamentado estritamente em características técnicas de engenharia pode não se traduzir em sucesso de mercado. Conforme postulado por Back et al. (2008), para garantir a viabilidade de um lançamento, a abordagem de projeto deve conectar os requisitos técnicos às necessidades e expectativas dos usuários. No caso de um dispositivo de emergência, a percepção de segurança, a portabilidade e a facilidade de acionamento em situações de estresse são atributos que determinam a intenção de compra e a eficácia prática da solução. Assim, a síntese entre a caracterização do fenômeno de fuga térmica e a aplicação de métodos de Gestão de Desenvolvimento de Produtos (GDP) permite derivar requisitos que equilibram o desempenho material com a usabilidade real.

A consolidação dessas diretrizes normativas e técnicas fornece o balizamento necessário para avaliar a viabilidade das soluções existentes. Uma vez definidos os parâmetros que um sistema deve atender, a Seção 2.4 explora as respostas da literatura científica a esses desafios, apresentando as principais estratégias de contenção, agentes supressores e tecnologias de materiais disponíveis no mercado.

2.4. Produtos, tecnologias e estratégias de contenção

A particularidade dos incêndios envolvendo baterias de íon-lítio, marcada pela ocorrência de fuga térmica, liberação de gases inflamáveis e possibilidade de re-ignição, motiva o desenvolvimento e aprimoramento de agentes extintores específicos para esse tipo de risco. Diferentes abordagens tecnológicas têm sido desenvolvidas para mitigar os riscos da TR, variando de agentes químicos ativos a barreiras físicas passivas. Esta seção apresenta as principais categorias, analisando suas vantagens e limitações para o propósito de um dispositivo de uso pessoal.

Para realização da pesquisa, empregou-se uma abordagem exploratória menos estruturada que uma revisão sistemática acadêmica formal. Realizou-se buscas em plataformas de comércio eletrônico de grande alcance, sites especializados em segurança e equipamentos de combate contra incêndios, e catálogos de fabricantes identificados. Utilizaram-se descritores em português e inglês relacionados à contenção de incêndios em LIBs, incluindo: "anti-chamas para bateria", "battery fire containment", "lithium battery fire", "fire suppression" e "flame retardant".

Uma das soluções existentes para controle de voltagem, temperatura e ciclos de carga de equipamentos eletrônicos são os Sistemas de Gerenciamento de Bateria (Battery Management System, BMS), que se mostram uma alternativa eficiente, entretanto a proliferação de dispositivos de carregamento e de baterias sem certificação ou sem um BMS confiável resulta em uma vulnerabilidade para os sistemas em caso de falha ou abusos. Quando a eletrônica de proteção falha, a contenção física por meio de materiais ignífugos torna-se uma alternativa de defesa para o usuário. Foram excluídas, portanto, soluções embarcadas, como o BMS (Battery Management System), cuja implementação é de responsabilidade do fabricante da bateria, bem como produtos cuja documentação técnica era insuficiente para uma comprovação de desempenho comprovada.

As tecnologias de contenção de incêndios podem ser divididas em duas principais categorias, entre sistemas ativos e sistemas passivos. Sendo os sistemas ativos estratégias de contenção aplicadas por um agente externo e os sistemas passivos como uma contenção realizada diretamente pelo sistema.

2.4.1. Sistemas ativos de contenção

Os sistemas ativos atuam por meio da aplicação deliberada de agentes capazes de interromper a combustão ou reduzir rapidamente a temperatura da célula. Diferentemente dos extintores convencionais de pó químico seco ou dióxido de carbono (CO₂), cuja atuação se concentra na interrupção da reação em cadeia ou na redução da concentração de oxigênio, os agentes dedicados a baterias de íon-lítio priorizam o resfriamento intenso, a penetração no conjunto em combustão e, em muitos casos, o encapsulamento de chamas e vapores inflamáveis.

2.4.1.1. Extintores de água aditivada

Extintores de água aditivada combinam água com aditivos que reduzem a tensão superficial, aumentando a capacidade de infiltração e resfriamento. Formulações

encapsulantes promovem aderência às superfícies em chamas e reduzem a chance de reignição.

Frequentemente são classificados para incêndios das classes A e B, mas formulados para aplicação em LIBs. Nesses equipamentos, a água é combinada a aditivos que reduzem significativamente a tensão superficial, aumentando a capacidade de infiltração em materiais sólidos e cavidades, ao mesmo tempo em que promovem rápida retirada de calor e redução da temperatura abaixo do ponto de ignição. Esse tipo de formulação busca manter características como não toxicidade, biodegradabilidade e ausência de compostos fluorados, alinhando desempenho de extinção a requisitos ambientais e de segurança do usuário.

Destacam-se, nesse contexto, agentes de tecnologia encapsulante, em que a carga d'água é associada a um aditivo concentrado capaz de promover excelente aderência às superfícies em chamas e de reduzir a reação em cadeia da combustão. A ação encapsulante contribui para estabilizar o combustível, minimizar a liberação de vapores inflamáveis e diminuir o risco de re-ignição após o resfriamento inicial.

2.4.1.2. Dispersões aquosas de vermiculita

Outra formulação referenciada na literatura técnica e em aplicações comerciais é a dispersão aquosa de vermiculita (AVD). Nesses agentes, o meio extintor consiste em plaquetas de vermiculita de elevado rácio de aspecto dispersas em água, formando um filme mineral que recobre a superfície do material em combustão. A vermiculita atua encapsulando as células e resfriando o núcleo da bateria, interrompendo a reação em cadeia da fuga térmica. Plaquetas de vermiculita dispersas em água formam um filme mineral isolante, a vermiculita é um silicato lamelar hidratado de alumínio-ferro-magnésio, contribui para a formação de uma camada isolante que promove tanto o resfriamento quanto a barreira física e à transferência de calor e à liberação de vapores.

Extintores com agente AVD são projetados especificamente para LIBs e têm sido relatados como capazes de oferecer desempenho superior aos agentes convencionais nesse tipo de incêndio, sobretudo quando aplicados com bocal de nebulização apropriado para maximizar a cobertura e a eficiência do resfriamento.

2.4.1.3. Materiais intumescentes aerossóis

Em paralelo aos agentes essencialmente líquidos, existem também sistemas de supressão baseados em aerossóis gerados por compostos sólidos que, ao serem ativados, liberam partículas finas e gases inertes capazes de interromper a combustão, com elevada eficiência para incêndios em fase gasosa. Esses sistemas têm sido propostos para proteção de

recintos contendo Sistemas de Armazenamento de Energia com Baterias (BESS), especialmente em situações nas quais extintores tradicionais, baseados apenas na redução de oxigênio, não se mostram suficientes para controlar incêndios de íon-Lítio. Nesses casos, o aerossol atua principalmente na supressão dos gases inflamáveis liberados durante a fuga térmica, podendo ser combinado com outras camadas de proteção, como compartimentação e ventilação de emergência.

2.4.1.4. Sistemas de névoa de água

Conforme apontado por Zhang et al. (2022), a combinação de resfriamento por névoa de água e barreiras físicas intumescentes é uma das rotas mais promissoras para ambientes confinados e domésticos, visando minimizar a emissão de fumaça tóxica. Aerossóis de compostos sólidos interrompem a combustão em fase gasosa, enquanto a névoa de água, combinada com barreiras intumescentes, apresenta-se como rota promissora para ambientes confinados.

Aerossóis de compostos sólidos interrompem a combustão em fase gasosa, enquanto a névoa de água promove resfriamento intensivo. Quando combinada a materiais intumescentes, que se expandem sob ação do calor, selando frestas e criando barreira térmica adicional, essa estratégia apresenta potencial significativo para aplicações em ambientes confinados.

Os dados fornecidos pelos fabricantes indicam ainda parâmetros relevantes para o projeto de segurança, como capacidade nominal (entre 6 e 10 litros para extintores portáteis destinados a baterias de íon-lítio), faixa de descarga em torno de 1,5 a 2,0 metros e tempos de descarga da ordem de 120 a 180 segundos. Tais características reforçam o caráter especializado desses equipamentos, cuja concepção procura conciliar performance extintora, facilidade de uso, segurança ocupacional e requisitos ambientais.

Do ponto de vista deste trabalho, a análise desses agentes extintores específicos é fundamental porque explicita os mecanismos de atuação considerados mais eficazes para incêndios em baterias de LIBs, sobretudo resfriamento intensivo, infiltração e encapsulamento, ao mesmo tempo em que evidencia limitações práticas, como dependência de ação ativa do usuário ou necessidade de infraestrutura dedicada. Esses aspectos orientam a avaliação da viabilidade de adaptação dessas tecnologias para um dispositivo de uso pessoal.

2.4.2. Sistemas passivos de contenção

Os sistemas passivos de contenção diferenciam-se dos sistemas ativos por não dependerem da aplicação de agentes externos ou acionamento manual para atuar. Sua função é conter, retardar ou redirecionar os efeitos da fuga térmica por meio de barreiras físicas e materiais de alto desempenho térmico, operando de forma autônoma e contínua.

Em incêndios envolvendo baterias de íon-lítio, a fuga térmica caracteriza-se por rápida elevação de temperatura, liberação de gases inflamáveis sob alta pressão e possível ejeção de partículas incandescentes. Nesse contexto, os sistemas passivos atuam principalmente por três mecanismos fundamentais: isolamento térmico, reduzindo a transferência de calor por condução, convecção e radiação; confinamento físico da chama e dos fragmentos, limitando a propagação do evento; e vedação adaptativa frente à expansão térmica, compensando deformações e vazamentos durante o aumento de pressão interna.

Diferentemente dos sistemas ativos, que atuam na supressão da reação, os sistemas passivos concentram-se na gestão das consequências do evento, assumindo que a fuga térmica já foi iniciada. Essa característica os torna particularmente relevantes para dispositivos de uso pessoal, nos quais a intervenção imediata do usuário pode não ser viável. Para fins de análise, os sistemas passivos identificados podem ser organizados nas seguintes categorias:

2.4.2.1. Barreiras flexíveis de fibra de vidro

As mantas e sacos de contenção são compostos majoritariamente por tecidos de fibra de vidro revestidos com silicone ou por fibras de sílica de alta pureza. Esses materiais apresentam incomcombustibilidade intrínseca e capacidade de suportar fluxos térmicos constantes superiores a 500 °C sem colapso estrutural significativo.

Do ponto de vista físico, sua atuação baseia-se na redução da transferência de calor por: baixa condutividade térmica do tecido fibroso; formação de bolsões de ar entre as fibras, que funcionam como isolantes adicionais; reflexão parcial da radiação térmica, dependendo do revestimento superficial.

Em situações de fuga térmica, a barreira limita a propagação do fogo para o ambiente externo, reduzindo o risco de ignição secundária de materiais adjacentes. Entretanto, é importante observar que essas soluções não impedem a elevação de temperatura no interior do volume confinado, apenas atrasam sua dissipação para o meio externo.

O mecanismo de atuação baseia-se no isolamento térmico e na contenção física inicial das chamas. Em situações de fuga térmica, a barreira limita a propagação do fogo para o ambiente externo, reduzindo o risco de ignição secundária.

Entretanto, muitas soluções de baixo custo apresentam limitações importantes, especialmente na contenção da pressão gerada, células ricas em níquel podem liberar grande volume de gases inflamáveis. A liberação abrupta de gases pode provocar falhas na vedação ou ruptura das costuras. Por esse motivo, alguns modelos mais robustos incorporam camadas intumescentes, selando frestas e melhorando o desempenho do confinamento.

Modelos mais robustos incorporam: múltiplas camadas de tecido; costuras com fios de alta resistência térmica; camadas intumescentes internas para vedação adaptativa. Apesar disso, ainda há limitação significativa quanto ao controle de sobrepressão, o que restringe sua aplicação a cenários de menor energia liberada ou dispositivos de menor capacidade.

2.4.2.2. Invólucros rígidos

Os invólucros rígidos consistem em caixas metálicas ou compósitos de alta resistência mecânica projetados para oferecer confinamento físico completo da bateria durante um evento de falha térmica. A eficácia desses sistemas depende criticamente do gerenciamento da pressão interna. Caso não haja dispositivos de alívio ou dimensionamento estrutural adequado, pode ocorrer deformação ou ruptura do invólucro. Além disso, o peso e a compatibilidade dimensional podem limitar sua aplicação em produtos portáteis de pequeno porte. Assim, um projeto para implementação de contenção de incêndio de LIBs com invólucro rígido deve levar em consideração: espessura adequada do material; resistência mecânica à tração e à deformação; presença de válvulas de alívio ou painéis de ruptura controlada.

2.4.2.3. Materiais de mudança de fase e aerogéis

O uso de Materiais de Mudança de Fase (PCMs) tem sido explorado para isolamento extremo e controle térmico. Os PCMs absorvem calor latente durante sua transição de fase (sólido-líquido), retardando o aumento de temperatura do sistema. Esse mecanismo é particularmente interessante para atrasar a propagação da fuga térmica entre células adjacentes, funcionando como um amortecedor térmico.

Enquanto o uso de aerogéis a base de sílica tem sido explorado para isolamento extremo devido à sua condutividade térmica extremamente baixa, reduzindo significativamente a transferência de calor por condução. Entretanto, há limitações relevantes: elevado custo de fabricação associados; fragilidade mecânica dos aerogéis; complexidade de integração estrutural; necessidade de encapsulamento adicional para evitar degradação.

Os sistemas passivos oferecem proteção contínua e independência de ação humana, contudo, não promovem resfriamento direto do núcleo da célula, atuando predominantemente

na contenção e no retardamento da propagação. Um comparativo das principais tecnologias de contenção ativas e passivas podem ser resumidamente observadas na Tabela 5.

Tipo de Solução	Modo de Ação	Vantagens	Limitações	Maturidade
Extintor de água aditivada	Resfriamento + encapsulamento	Eficaz em resfriamento; atóxico	Requer ação ativa do usuário; volume/peso	Comercial
AVD (vermiculita)	Resfriamento + barreira mineral	Superior a CO ₂ /pó seco em LIBs	Requer aplicação manual; custo	Comercial
Aerossol de compostos sólidos	Supressão em fase gasosa	Automático; compacto	Projetado para recintos fechados; não resfria núcleo	Comercial
Manta/saco de fibra de vidro	Isolamento térmico	Baixo custo; portátil	Falha em conter pressão de gases	Comercial
Invólucro rígido	Confinamento térmico e físico	Contenção; prevenção de propagação	Peso; compatibilidade dimensional	Comercial
Aerogel / PCMs	Isolamento térmico	Condutividade térmica baixa	Custo; resistência mecânica	Pesquisa
Intumescentes	Expansão térmica → vedação	Vedação adaptativa	Requer aplicação manual; desempenho variável	Comercial
Sistema de Névoa	Resfriamento + vedação	Promissor para ambientes confinados	Requer infraestrutura; não portátil	Pesquisa

Tabela 5: Comparativo de tecnologias de contenção de TR em LIBs.

Fonte: Compilado de Zhang et al., 2022; Wang et al., 2024; Ineris, 2024 e levantamento do autor.

A análise das tecnologias disponíveis evidencia que as soluções atualmente consolidadas apresentam alto desempenho quando aplicadas em contextos industriais, estacionários ou com infraestrutura dedicada. Entretanto, observa-se uma lacuna relevante na adaptação dessas tecnologias para dispositivos de uso pessoal, especialmente no que se refere ao equilíbrio entre portabilidade, custo, simplicidade operacional e capacidade real de contenção térmica e de pressão. Extintores específicos demonstram eficácia no resfriamento e encapsulamento, porém exigem ação ativa do usuário; por outro lado, soluções passivas portáteis frequentemente apresentam limitações na contenção de gases e na dissipação de energia térmica intensa.

Nesse contexto, torna-se necessária uma abordagem estruturada de desenvolvimento que integre os mecanismos de atuação mais promissores identificados, em um produto orientado ao usuário final. Assim, a Seção 2.5 apresenta as metodologias de Processo de

Desenvolvimento de Produtos que fornecerão a estrutura necessária para transformar o conhecimento técnico em um produto focado no usuário.

2.5. Processo de desenvolvimento de produtos (PDP)

O desenvolvimento de um produto inovador, caracterizado por elevados níveis de incerteza técnica e de mercado, exige uma abordagem estruturada que mitigue riscos e assegure o alinhamento com as necessidades dos usuários. O Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) é compreendido como o conjunto de atividades que transformam demandas de mercado e possibilidades tecnológicas em especificações para a fabricação de um item comercializável (Rozenfeld et al., 2006). Esta seção detalha o modelo de referência e a lógica metodológica adotada para a concepção do produto mínimo viável (MVP, Minimum Viable Product) do dispositivo ignífugo.

Para o desenvolvimento do ignífugo proposto neste trabalho, a escolha metodológica considerou não apenas o desempenho técnico do produto, mas também o atendimento às expectativas do usuário, buscando traduzir parâmetros funcionais e construtivos em aspectos de valor percebido. Com esse objetivo, realizou-se um levantamento de referenciais consagrados, incluindo o modelo prescritivo de Rozenfeld et al. (2006), focado na rastreabilidade das decisões; o método sistemático para análise funcional e síntese conceitual de Pahl et al. (2005); e a integração das perspectivas de engenharia e mercado proposta por Ulrich e Eppinger (2015). Foram ainda incorporados referenciais de design centrado no usuário (Norman, 2013) e abordagens contemporâneas de inovação.

A base estrutural deste trabalho reside no Modelo Unificado de Rozenfeld et al. (2006), integrado por Forcellini (2021) à filosofia Lean Startup (Ries, 2011). Essa abordagem, denominada Metodologia Ágil para Desenvolvimento de Produtos, conforme mostrado na Figura 5, organiza o PDP em três macrofases: Pré-Desenvolvimento (planejamento estratégico); Desenvolvimento (planejamento do projeto e fases de projeto informacional, conceitual, detalhado, preparação da produção e lançamento); e Pós-Desenvolvimento (acompanhamento e descontinuidade).

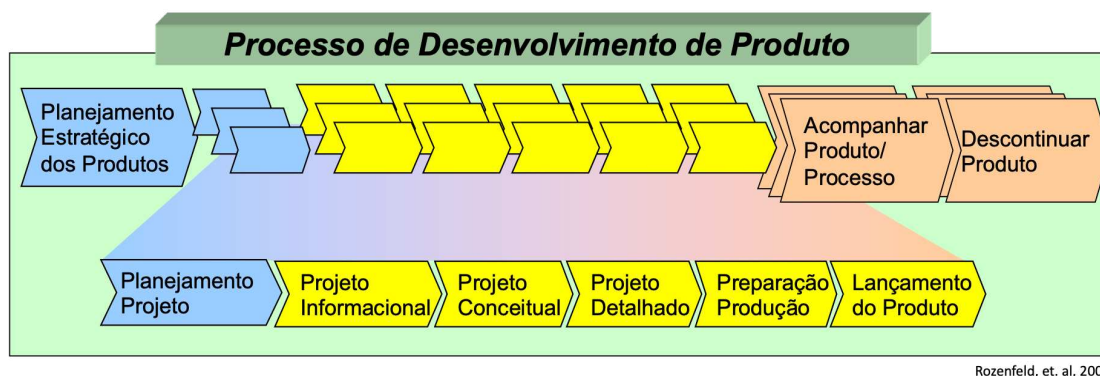


Figura 5: Visão geral do Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP).

Fonte: Rozenfeld, et. al, 2006 adaptado por Forcellini, 2021

O escopo deste trabalho delimita-se às fases de Projeto Informacional e Projeto Conceitual, focado na concepção de um Produto Mínimo Viável (MVP). As especificações decorrentes dessa fase constituem base para possíveis futuros desenvolvimentos nas etapas de Projeto Detalhado e etapas subsequentes, que extrapolam os limites deste estudo. Sendo o Projeto Informacional: Fase focada na identificação do segmento de clientes, levantamento de suas necessidades e conversão destas em especificações meta para o produto. E o Projeto Conceitual: Geração de ideias, definição de funções, criação de arquiteturas de solução e seleção do conceito que melhor atende às necessidades prioritizadas.

A metodologia para desenvolvimento de produtos fundamenta-se no desenvolvimento de versões mínimas funcionalmente representativas do produto, que são posteriormente avaliadas diretamente por usuários, gerando dados empíricos utilizados para readequação do conceito conforme os aspectos valorizados pelos mesmos. Essa lógica de aprendizagem, conforme os autores de Rozenfeld et al. (2006) e Ries (2011), reduz incertezas inerentes ao desenvolvimento de tecnologias emergentes e favorece a eficácia do processo decisório, minimizando as incertezas inerentes ao lançamento de um novo produto.

O método utiliza a estrutura lógica do PDCA (Plan-Do-Check-Act) adaptada para o desenvolvimento de produtos, no formato de Ciclos Curtos de Aprendizagem (Forcellini, 2021). Esta abordagem permite que o escopo do produto seja refinado progressivamente à medida que a incerteza diminui, focando na entrega rápida de valor através do Produto Mínimo Viável (MVP) e estabelece o fundamento metodológico que permitirá a integração entre características desejáveis do ponto de vista do usuário final e características do produto a ser desenvolvido (features).

2.5.1. Estrutura do PDP

O Projeto Informacional constitui a fase inicial do desenvolvimento, onde o problema é delimitado antes da proposição de qualquer solução técnica. Embora a definição das características físico-químicas do ignífugo seja imperativa para a segurança funcional, o desenvolvimento baseado exclusivamente em parâmetros de engenharia pode resultar em soluções robustas, porém desconectadas da realidade de uso.

Por esse motivo, o Projeto Informacional busca compreender profundamente o usuário e suas necessidades antes da definição de soluções tecnológicas. A execução dessa fase organiza-se em três etapas principais, ilustradas na Figura 6: Segmentação; Levantamento e validação das necessidades a partir de hipóteses de necessidades; e Priorização das necessidades.

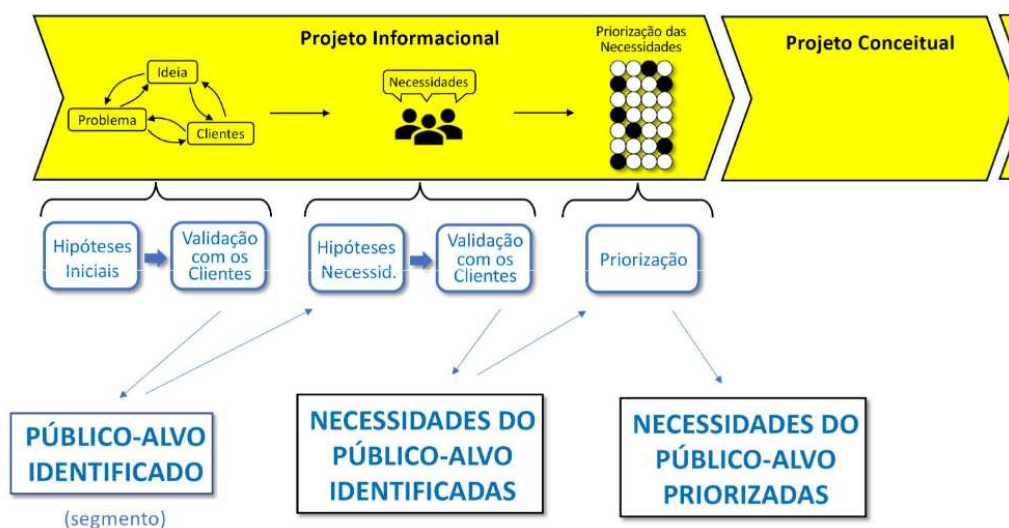


Figura 6: Fase de projeto informacional do PDP.
Fonte: Forcellini, 2021

A segmentação de clientes tem como objetivo definir claramente para quem o produto será desenvolvido e em qual contexto de uso ele deverá operar, reduzindo ambiguidades no direcionamento do projeto. Neste trabalho, foi adotada uma abordagem de segmentação orientada por necessidades (needs-based segmentation), na qual os usuários são agrupados não apenas por características demográficas, mas principalmente por similaridade de contextos de uso, comportamentos e demandas de segurança (Ulrich e Eppinger, 2015).

Com o segmento delimitado, a próxima etapa do Projeto Informacional consiste em identificar o que o usuário precisa (necessidades), evitando formular soluções prematuras. A lista inicial foi construída como um conjunto de hipóteses de necessidade, derivadas de três fontes: (i) literatura e referências técnicas sobre segurança e contenção; (ii) análise do

contexto de uso doméstico; e (iii) critérios/restrições técnicas discutidos na fundamentação (por exemplo, riscos de gases, altas temperaturas, necessidade de atuação rápida).

A partir desses eixos, formularam-se hipóteses iniciais de segmentação, do tipo causa-hipótese. Essas hipóteses orientaram a estruturação da segmentação e serviram como base para as etapas de coleta e validação de informações.

A partir da delimitação do público-alvo, procede-se à identificação do que o usuário precisa, formulando declarações centradas no usuário e independentes de solução tecnológica. A lista inicial de necessidades surge com o formato de hipóteses derivadas da literatura de segurança, análise do contexto de uso e características inerentes ao problema.

Para evitar que tais hipóteses sejam assumidas como verdades definitivas, elas são submetidas a processos de validação com usuários finais. Esse procedimento permite verificar o grau de concordância dos usuários com cada necessidade identificada e garante que o desenvolvimento do produto seja direcionado para aspectos que realmente geram valor.

Uma vez priorizadas as necessidades no Projeto Informacional, concluem-se os requisitos estabelecidos pelo método ágil como entregas obrigatórias. Concluídas essas etapas, o projeto avança para o Projeto Conceitual, conforme ilustrado na Figura 7.

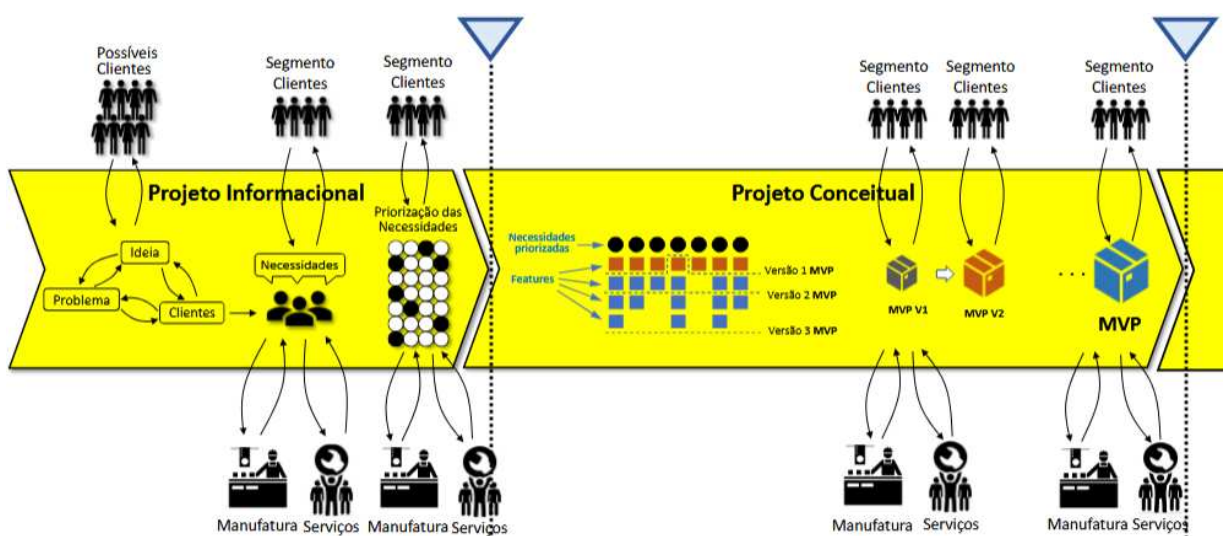


Figura 7: Fases de projeto informacional e conceitual do PDP.
Fonte: Forcellini, 2021

O Projeto Conceitual tem como objetivo estabelecer o princípio de solução do produto. Nessa etapa, as necessidades dos usuários, previamente identificadas e priorizadas, são traduzidas em características concretas e mensuráveis do produto, denominadas features.

Uma feature pode ser definida como um atributo físico, funcional ou de qualidade que entrega um benefício direto ao usuário, respondendo simultaneamente a uma necessidade do

cliente e a um requisito técnico do produto. Essas características constituem os elementos que definem o desempenho, a funcionalidade e a proposta de valor do produto.

Para garantir uma resposta abrangente às necessidades priorizadas dos clientes, as features são tipicamente categorizadas em quatro dimensões:

Estilo: aspectos estéticos e formais do produto;

Função: capacidades técnicas e operacionais;

Experiência: facilidade de uso e interação do usuário com o produto;

Qualidade: confiabilidade, durabilidade e segurança.

A partir de conjuntos de feateures, define-se o Produto Mínimo Viável (MVP). Segundo Ries (2011), o MVP corresponde à versão mais simples de um produto capaz de testar as hipóteses fundamentais do projeto com o menor investimento possível de tempo e recursos. Robinson (2001), criador do termo, define o MVP como um produto dimensionado de forma adequada tanto para a empresa quanto para o cliente.

No contexto deste trabalho, o MVP é obtido por meio da seleção de um subconjunto mínimo de features capaz de atender às necessidades priorizadas dos usuários. Esse conjunto é então submetido a ciclos iterativos de validação com usuários, seguindo a lógica Build-Measure-Learn (Construir-Medir-Aprender). Caso determinadas features não atinjam o nível esperado de aceitação, elas são ajustadas ou substituídas, e o arranjo do produto é novamente avaliado.

Com as bases conceituais e metodológicas estabelecidas, o trabalho prossegue para o Capítulo 3. Nele, a teoria do PDP aqui discutida será aplicada de forma prática na condução da fase de Projeto Informacional, focando na delimitação empírica do segmento de clientes, validação de hipóteses de risco e na identificação e priorização de suas necessidades, gerando os insumos fundamentais para a concepção estrutural do dispositivo ignífugo na fase de Projeto Conceitual.

3. FASE DE PROJETO INFORMACIONAL

Este capítulo apresenta a aplicação da fase de Projeto Informacional do Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) ao desenvolvimento do dispositivo ignífugo proposto. No âmbito do PDP, o Projeto Informacional constitui a etapa responsável por converter incertezas iniciais sobre o mercado e os usuários em informações estruturadas, empiricamente fundamentadas, que orientarão as decisões técnicas nas fases subsequentes do desenvolvimento (Rozenfeld et al., 2006; Ulrich; Eppinger, 2015). A importância desta fase é reforçada por Ulrich e Eppinger (2015), ao destacarem que um produto tecnicamente eficaz, mas desalinhado às práticas e percepções do usuário final, tende a apresentar baixa aceitação e impacto reduzido no mercado.

O problema metodológico central desta fase consiste em identificar, validar e priorizar as necessidades reais dos usuários finais de um dispositivo destinado à contenção de eventos de fuga térmica em baterias de íons de lítio. Tal desafio torna-se particularmente relevante porque o produto proposto não possui similar direto no mercado de consumo doméstico, o público-alvo é majoritariamente composto por usuários sem treinamento especializado em segurança contra incêndios e a percepção subjetiva de risco pode não corresponder à exposição efetiva ao perigo.

O processo de tratamento e aquisição das informações seguiu três etapas progressivas e interdependentes, cada uma com critérios de passagem específicos para assegurar coerência metodológica. A primeira etapa (Seção 3.1) consistiu na segmentação e definição empírica do público-alvo de clientes, concluída com a caracterização do perfil de uso e a delimitação formal do segmento. A segunda etapa (Seção 3.2) envolveu a identificação e validação de hipóteses de necessidades junto aos usuários, aplicando-se o critério de que somente hipóteses com pelo menos 75% de respostas nos níveis 4 ou 5 da escala Likert avançariam para a etapa seguinte. A terceira etapa (Seção 3.3) consistiu na priorização das necessidades validadas segundo critérios de importância percebida, adotando-se o limiar mais restritivo de 87,5% para selecionar as necessidades de maior impacto na percepção de valor do usuário.

A coleta de dados foi operacionalizada por meio de três instrumentos quantitativos sequenciais, na forma de questionários (Q1, Q2 e Q3), aplicados via Google Formulários e distribuídos por redes sociais e correio eletrônico. O entregável final da fase consiste em um conjunto ordenado de necessidades priorizadas e empiricamente validadas, que servirá de insumo para a fase de Projeto Conceitual apresentada no Capítulo 4.

A Tabela 6 sintetiza os instrumentos de coleta de dados aplicados nesta fase, indicando seus objetivos, períodos de aplicação, tamanhos amostrais, escalas utilizadas, critérios de aprovação e formas de análise.

Questionário	Objetivo	Período de Coleta	N (válidos)	Escala	Critério de Aprovação	Forma de Análise
Q1:Segmentação dos clientes	Caracterizar perfil de uso e exposição ao risco	24/10/2025 a 08/11/2025	92	Múltipla escolha + Likert 1-5	Análise descritiva de perfil	Estatística descritiva (frequências, percentuais, distribuições); análise cruzada entre eixos temáticos
Q2:Necessidades dos clientes	Validar hipóteses de necessidades	16/11/2025 a 27/11/2025	52	Likert 1-5	$\geq 75\%$ de respostas 4 ou 5	Cálculo de percentual de concordância por hipótese; seleção das hipóteses validadas ($\geq 75\%$)
Q3:Priorização das necessidades	Priorizar as necessidades validadas	05/12/2025 a 22/12/2025	68	Likert 1-5	$\geq 87,5\%$ de respostas 4 ou 5	Cálculo de percentual de importância por necessidade; seleção das necessidades priorizadas ($\geq 87,5\%$)

Tabela 6: Síntese dos instrumentos de coleta de dados.

Fonte: Autoria própria (2026).

3.1. Segmentação dos clientes

A definição do público-alvo é o ponto de partida para o desenvolvimento da fase de projeto informacional. Esta seção apresenta os critérios utilizados para identificar e agrupar potenciais usuários do dispositivo ignífugo, analisando perfis demográficos, comportamentais e contextos de uso. A segmentação adotada seguiu uma abordagem orientada por necessidades (needs-based segmentation), na qual os usuários são agrupados não apenas por características demográficas, mas principalmente por similaridade de contextos de uso, comportamentos e demandas de segurança (Ulrich; Eppinger, 2015).

O processo de segmentação partiu de três premissas: (i) há indivíduos que utilizam rotineiramente dispositivos eletrônicos portáteis alimentados por baterias de íons de lítio (LIBs) em ambientes internos; (ii) existem indivíduos potencialmente expostos a situações de carregamento prolongado ou sem supervisão; e (iii) a maioria dos indivíduos não dispõe de treinamento técnico específico em segurança contra incêndios, dependendo, portanto, de soluções intuitivas e de rápida compreensão em situações de emergência.

Inicialmente, considerou-se como universo potencial o conjunto de usuários de eletrônicos de pequeno porte (smartphones, notebooks, tablets, power banks, dispositivos vestíveis e equipamentos de micromobilidade leve), o que abrange parcela significativa da população urbana contemporânea. Para refinar esse universo, adotou-se uma segmentação multidimensional baseada em três eixos: (a) intensidade de exposição ao risco (frequência de uso, quantidade de dispositivos, hábitos de carregamento); (b) contexto de uso (ambientes residenciais, profissionais ou em deslocamento, com foco em locais fechados e períodos de menor supervisão); e (c) predisposição e capacidade técnica (atitude frente a tecnologias e medidas de segurança, utilizada como critério complementar de engajamento).

Para a identificação e caracterização empírica do segmento de clientes, foi elaborado um questionário eletrônico estruturado (Q1). O processo de construção do instrumento seguiu as diretrizes de desenvolvimento de questionários para pesquisa de produto propostas por Ulrich e Eppinger (2015). Inicialmente, foram definidos os construtos a serem mensurados, derivados das três premissas de segmentação estabelecidas: (i) perfil demográfico e de posse tecnológica, (ii) intensidade de uso e contextos de exposição ao risco, (iii) percepção declarada de risco e predisposição à colaboração.

Com base nesses construtos, foram elaboradas 8 perguntas organizadas em três blocos sequenciais: Bloco 1 (Perguntas 1 a 3) mapeou a posse de dispositivos, frequência de carregamento sem supervisão e localização de recarga, com o objetivo de caracterizar a densidade de exposição ao risco e o contexto físico de uso; Bloco 2 (Perguntas 4 a 6) investigou a composição domiciliar, histórico de incidentes térmicos e percepção social do risco, destinado a avaliar a magnitude potencial das consequências e a difusão da percepção de perigo; Bloco 3 (Perguntas 7 e 8) avaliou a intensidade da preocupação pessoal com incêndios e o interesse em participar do desenvolvimento do produto, funcionando como filtro de engajamento para as etapas subsequentes. O protocolo metodológico completo do instrumento Q1 é apresentado no Quadro 1.

Elemento	Descrição
Objetivo	Caracterizar perfis de uso de dispositivos com LIBs em ambiente doméstico, mapear comportamentos de risco e identificar o segmento-alvo
Público-alvo	Usuários de dispositivos eletrônicos portáteis com baterias de íons de lítio, sem restrição etária ou geográfica
Período de aplicação	24 de outubro a 08 de novembro de 2025
Número de questões	8 questões

Formato das questões	Múltipla escolha, caixa de seleção e Likert de 5 pontos
Forma de divulgação	Google Formulários, distribuído via redes sociais e correio eletrônico
Meta amostral / Respostas obtidas	Meta mínima: 50 respondentes; obtidas: 92 respostas válidas
Crítérios de validade	Respostas completas em todas as questões obrigatórias; exclusão automática de respostas incompletas pela plataforma
Forma de análise	Estatística descritiva: distribuição de frequências absolutas e relativas por questão; análise cruzada entre eixos temáticos

Quadro 1: Protocolo metodológico do instrumento Q1.

Fonte: Autoria própria (2026).

O questionário Q1, apresentado integralmente no Apêndice A, contemplou cinco dimensões analíticas (tipos de dispositivos utilizados, frequência e contexto de carregamento, composição domiciliar, histórico de incidentes térmicos e percepção de risco), permitindo mapear simultaneamente o perfil de posse tecnológica, os comportamentos de exposição ao risco e o potencial de engajamento dos respondentes nas etapas subsequentes do estudo.

3.1.1. Análise dos Resultados de Segmentação

A análise dos dados obtidos pelo Q1 viabiliza a transição de um cenário de incerteza para constatações fundamentadas no comportamento real dos usuários. Os resultados são examinados sob três eixos analíticos inter-relacionados: o contexto físico de uso dos dispositivos, os padrões comportamentais de recarga e a percepção declarada de risco. O detalhamento das respostas obtidas por meio das oito questões estruturadas fornece a base quantitativa para o direcionamento do projeto.

Pergunta 1: “Quais destes dispositivos eletrônicos você possui e utiliza com frequência em sua rotina pessoal?”

A questão de múltiplas escolhas buscou mapear a posse de equipamentos. Conforme ilustrado na Figura 8, os resultados indicam que 100% dos 92 respondentes utilizam o aparelho celular como dispositivo eletrônico de uso frequente, seguido por fones de ouvido sem fio (63,0%), notebooks (57,6%), power banks (34,8%), tablets (33,7%) e smartwatches (31,5%). Dispositivos de menor utilização mensurada incluem cigarro eletrônico (9,8%), drones (6,5%), patinetes/bicicletas elétricas (5,4%) e aparelhos de saúde com bateria (4,3%). Esses dados confirmam a elevada densidade de dispositivos com LIBs no ambiente doméstico, com média superior a três dispositivos por respondente, o que amplifica a exposição cumulativa ao risco de eventos de fuga térmica.

1. Quais destes dispositivos eletrônicos você possui e utiliza com frequência em sua rotina pessoal?

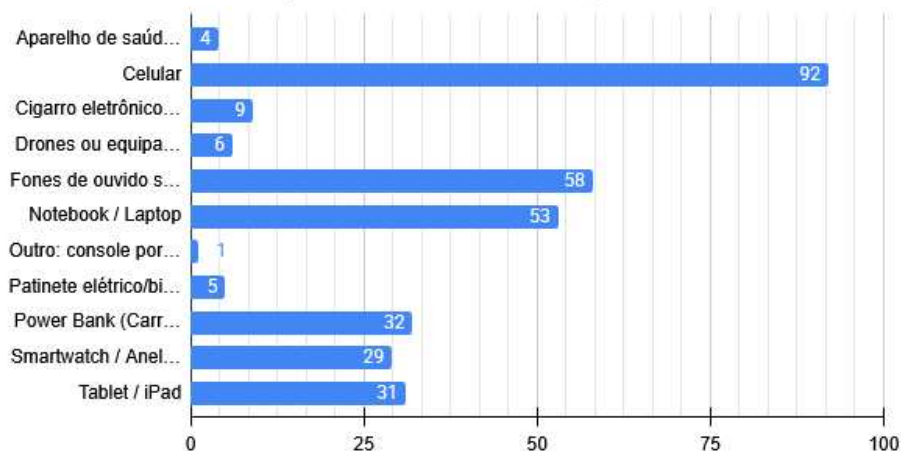


Figura 8: Respostas obtidas na Pergunta 1 do Q1.
Fonte: Autoria própria (2026).

Pergunta 2: “Com que frequência você deixa seus dispositivos carregando sem supervisão (ex: quando sai de casa ou enquanto dorme)?”

Utilizando uma escala de frequência ("Sempre" a "Nunca"), os dados obtidos na Figura 9 demonstram que 68,5% dos respondentes possuem o hábito de deixar seus dispositivos recarregando sem supervisão direta, sendo que 35,9% declararam "Sempre (toda noite/todo dia)" e 32,6% "Frequentemente (algumas vezes por semana)". Apenas 13,0% relataram "Nunca" carregar sem supervisão. Esse dado é particularmente relevante para o projeto do dispositivo, pois indica que a maioria dos potenciais usuários encontra-se em condição de vulnerabilidade durante o período de recarga, exatamente o cenário em que eventos de fuga térmica tendem a se manifestar com maior criticidade em ambientes domésticos.

2. Com que frequência você deixa seus dispositivos carregando sem supervisão (ex: quando sai de casa ou enqu... ;

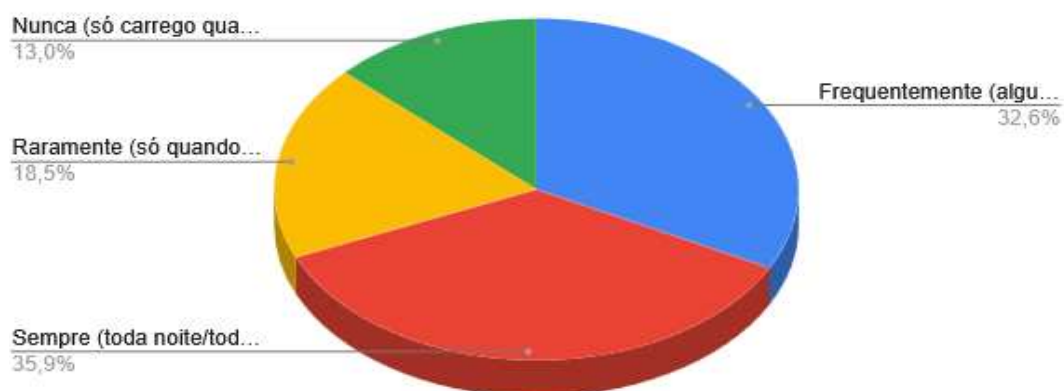


Figura 9: Respostas obtidas na Pergunta 2 do Q1.
Fonte: Autoria própria (2026).

Pergunta 3: “Pensando no dispositivo eletrônico que você mais usa, onde ele costuma ficar enquanto carrega à noite?”

A Figura 10 apresenta a distribuição das respostas, apontando que 34,8% dos respondentes costumam carregar seus dispositivos no quarto (sobre a cama ou mesa de cabeceira) e 27,2% no escritório ou mesa de trabalho. A sala (17,4%), cozinha/área de serviço (9,8%) e banheiro (1,1%) complementam o perfil, enquanto 9,8% relataram não costumar carregar dispositivos à noite. A concentração predominante da recarga em ambientes de repouso (quarto e escritório totalizam 62,0%) configura um cenário de particular gravidade, uma vez que esses ambientes combinam baixa supervisão, presença de materiais inflamáveis (roupas de cama, mobiliário de madeira) e ocupação humana durante o sono, período de máxima vulnerabilidade a eventos de fuga térmica.

3. Pensando no dispositivo eletrônico que você mais usa, onde ele costuma ficar enquanto carrega à noite?

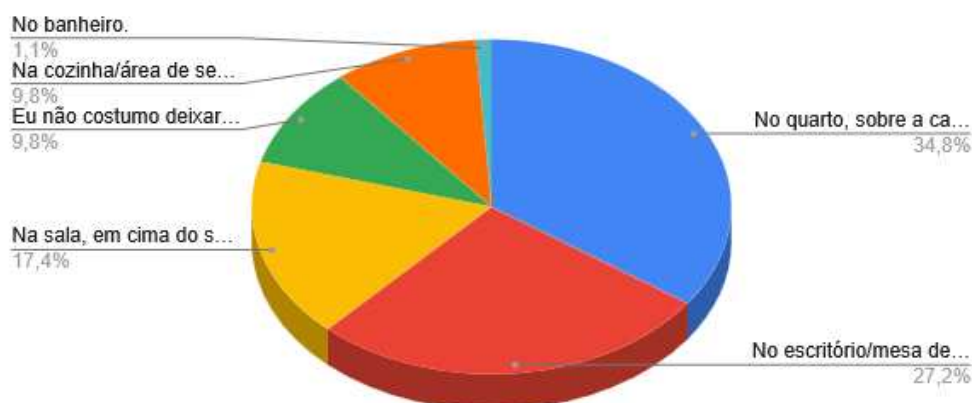


Figura 10: Respostas obtidas na Pergunta 3 do Q1.
Fonte: Autoria própria (2026).

Pergunta 4: “Além de você, quem mais vive na sua residência?”

Os resultados mostrados na Figura 11 indicam que 66 dos 92 respondentes (71,7%) coabitam com outros adultos, 20 (21,7%) residem com crianças de 0 a 12 anos, 19 (20,7%) com animais de estimação, 13 (14,1%) com adolescentes, 10 (10,9%) com idosos e 18 (19,6%) moram sozinhos. A presença de múltiplos indivíduos no mesmo domicílio, especialmente crianças, idosos e animais, amplia a magnitude das consequências potenciais de um incêndio e reforça a necessidade de que o dispositivo seja seguro para ambientes compartilhados, com características de proteção passiva que não dependam de intervenção ativa dos ocupantes.

4. Além de você, quem mais vive na sua residência?

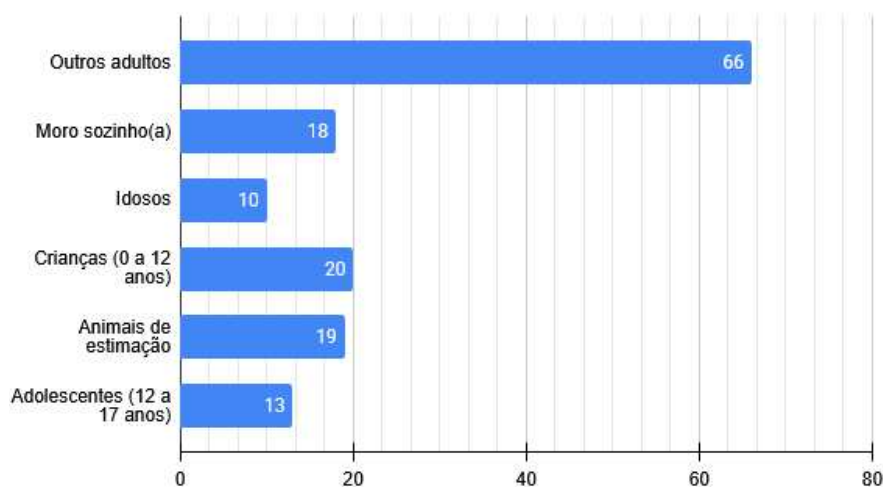


Figura 11: Respostas obtidas na Pergunta 4 do Q1.
Fonte: Autoria própria (2026).

Pergunta 5: “Você já presenciou alguma destas situações com a bateria de um dispositivo eletrônico?”

A Figura 12 ilustra o levantamento do histórico de incidentes térmicos revelando que 35 respondentes (38,0%) relataram já ter presenciado aquecimento excessivo que dificultou o manuseio do dispositivo, 22 (23,9%) conhecem pessoas que passaram por incidentes, 19 (20,7%) presenciaram estufamento de bateria, 10 (10,9%) detectaram fumaça ou cheiro de queimado e 5 (5,4%) presenciaram dispositivos pegando fogo ou soltando faíscas espontaneamente. Apenas 16 respondentes (17,4%) declararam nunca ter presenciado nem ouvido relatos de tais situações. Esses dados evidenciam que eventos precursoros de fuga térmica (aquecimento anormal, estufamento, fumaça) não constituem exceções raras na experiência dos usuários, mas sim ocorrências relativamente frequentes que, em condições adversas, podem evoluir para incidentes de maior severidade.

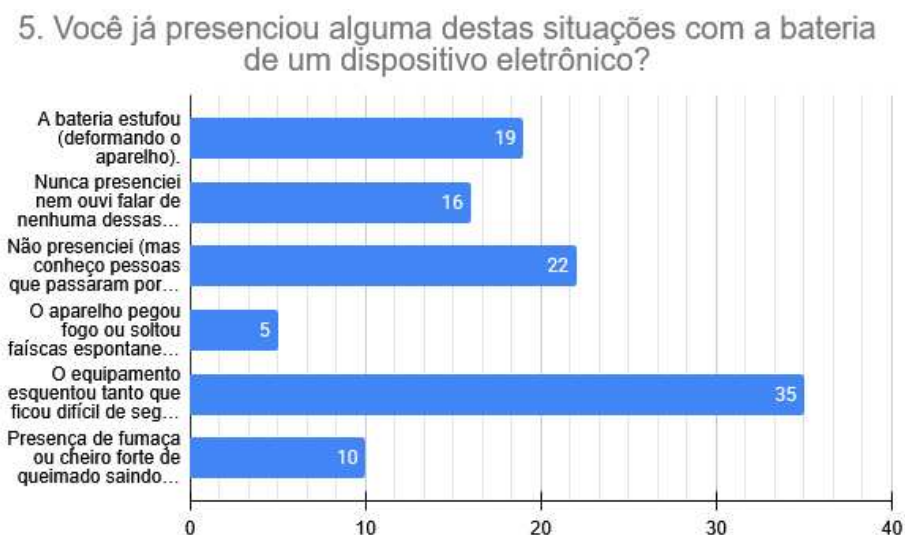


Figura 12: Respostas obtidas na Pergunta 5 do Q1.
Fonte: Autoria própria (2026).

Pergunta 6: “Você conhece pessoas que tem medo de utilizar o dispositivo eletrônico durante o carregamento?”

As respostas obtidas, apresentadas na Figura 13, apontam que 64,1% dos respondentes afirmam conhecer alguém com receio de utilizar dispositivos durante a recarga, sendo que 50,0% conhecem outras pessoas com esse medo e 14,1% incluem a si mesmos nesse grupo, enquanto 35,9% não conhecem pessoas com essa preocupação. Essa distribuição evidencia a presença de uma percepção de risco difusa na população, ainda que nem sempre traduzida em comportamentos preventivos concretos, sugerindo que existe um terreno fértil para a aceitação de soluções de contenção, desde que acessíveis e intuitivas.

6. Você conhece pessoas que tem medo de utilizar o dispositivo eletrônico durante o carregamento?

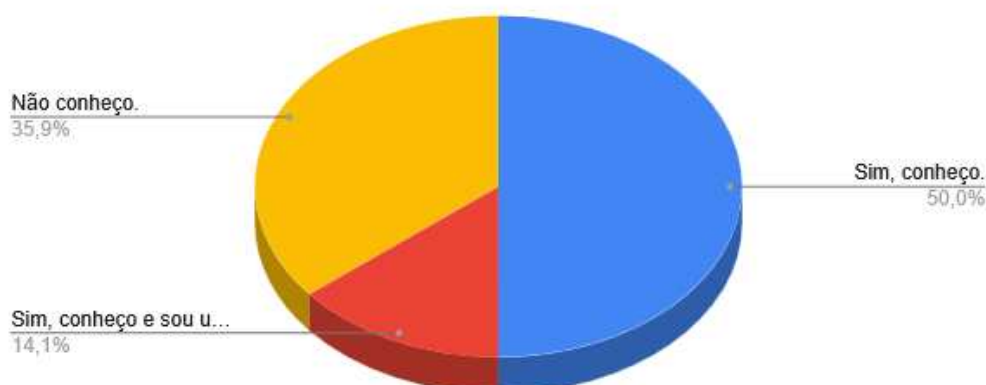


Figura 13: Respostas obtidas na Pergunta 6 do Q1.
Fonte: Autoria própria (2026).

Pergunta 7: “O quanto você se preocupa com a possibilidade de um incêndio começar na sua casa por causa de um dispositivo eletrônico equipado com bateria?”

Utilizando escala Likert de 1 a 5, a distribuição apresentada na Figura 14 demonstra uma fragmentação nas percepções: 36,9% manifestam baixa preocupação (níveis 1 e 2, sendo 15,2% "Não me preocupo nem um pouco" e 21,7% "Me preocupo pouco"); 26,1% apresentam preocupação ocasional (nível 3); e 37,0% declaram alta preocupação (níveis 4 e 5, sendo 20,7% "Tenho medo" e 16,3% "Tenho muito medo"). Essa polarização sugere que, embora o risco seja real e os hábitos potencialmente perigosos sejam generalizados, parcela significativa dos usuários ainda subestima a probabilidade de um evento severo. Sob a ótica do desenvolvimento de produto, isso implica que o dispositivo ignífugo precisará não apenas oferecer proteção eficaz, mas também comunicar valor de forma clara para um público cuja percepção de risco é heterogênea.

7. O quanto você se preocupa com a possibilidade de um incêndio começar na sua casa por causa de um dispositivo e...

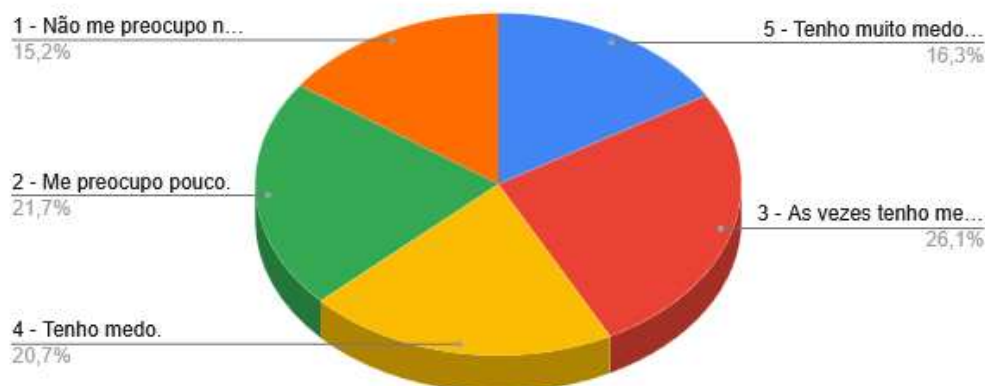


Figura 14: Respostas obtidas na Pergunta 7 do Q1.
Fonte: Autoria própria (2026).

Pergunta 8: “Você estaria interessado(a) em ajudar a desenvolver um novo produto para impedir a propagação de um incêndio em baterias em estado de fuga térmica?”

Conforme ilustrado na Figura 15, os resultados evidenciam que 66,3% dos respondentes manifestaram interesse direto em auxiliar no desenvolvimento da solução (61 pessoas), contra 33,7% sem interesse. Quando o respondente assinalava interesse, era direcionado a uma página para cadastro de e-mail, estabelecendo-se uma rede de comunicação com 61 clientes interessados para as etapas subsequentes. Esse nível de engajamento é expressivo para uma pesquisa exploratória e reforça a viabilidade mercadológica do dispositivo proposto.

8. Você estaria interessado(a) em ajudar a desenvolver um novo produto para impedir a propagação de um incêndio em...

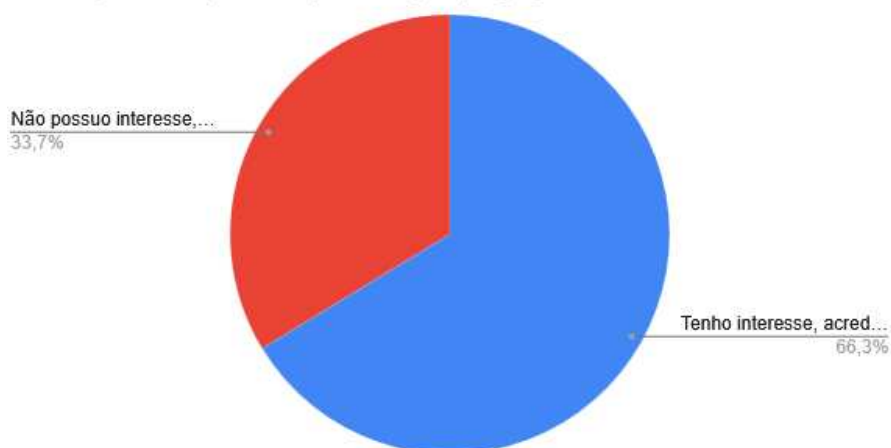


Figura 15: Respostas obtidas na Pergunta 8 do Q1.
Fonte: Autoria própria (2026).

A análise conjunta e sequencial dos resultados do Q1 delinea um cenário de vulnerabilidade latente no ambiente doméstico. Três achados principais sustentam essa conclusão:

(a) Alta densidade de dispositivos com LIBs: com 100% de posse de celulares e média superior a três dispositivos por respondente, a exposição cumulativa ao risco de eventos térmicos é significativa e se concentra no ambiente residencial;

(b) Comportamentos de recarga de alto risco: 68,5% dos respondentes recarregam sem supervisão, predominantemente em ambientes de repouso (62,0% no quarto ou escritório), configurando a confluência entre máxima vulnerabilidade (sono) e máxima proximidade a materiais inflamáveis;

(c) Percepção de risco difusa e heterogênea: embora 64,1% conheçam pessoas com medo de incidentes durante a recarga e 82,6% já tenham presenciado ou ouvido relatos de eventos precursores, apenas 37,0% manifestam alta preocupação, indicando uma desconexão entre a experiência real de risco e a adoção de medidas preventivas. Essa postura reativa pode ser associada à escassez de soluções comerciais específicas e acessíveis para esse nicho.

A análise conjunta dos resultados do Q1 delinea um cenário de vulnerabilidade latente no ambiente doméstico. Três achados principais sustentam essa conclusão: a elevada densidade de dispositivos com baterias de íons de lítio em uso cotidiano, a frequência expressiva de carregamento sem supervisão em ambientes de repouso e a percepção de risco difusa entre os respondentes. Em conjunto, esses resultados indicam um perfil de usuário exposto a situações recorrentes de risco, em contextos de baixa supervisão e alta proximidade com materiais inflamáveis, o que reforça a necessidade de uma solução de contenção passiva, automática e de fácil utilização.

Com base nessas evidências, definiu-se o segmento operacional do estudo como “Usuários domésticos de dispositivos eletrônicos portáteis equipados com baterias de íons de lítio que realizam o carregamento em ambientes internos sem supervisão constante”. Esse segmento corresponde empiricamente aos 68,5% dos respondentes que declararam adotar esse comportamento com frequência e constitui o grupo para o qual as necessidades serão investigadas e o produto será concebido. Delimitado o segmento de referência, a etapa seguinte consiste na identificação e validação das necessidades desses usuários, apresentada na Seção 3.2.

3.2. Necessidades dos clientes

Identificar os atributos valorizados pelos usuários constitui uma etapa fundamental para a aceitação de um produto no mercado, especialmente no caso de soluções de segurança, nas quais a eficácia depende diretamente da correta interação entre o usuário e o sistema proposto. De acordo com Rozenfeld et al. (2006), compreender as necessidades dos clientes implica investigar tanto demandas explicitamente declaradas quanto necessidades latentes, transformando percepções subjetivas em declarações estruturadas de valor que possam orientar o desenvolvimento do produto. No contexto deste trabalho, as necessidades do usuário estão relacionadas a fatores críticos para a adoção e utilização do dispositivo ignífugo proposto, incluindo aspectos como rapidez na contenção do fogo, portabilidade, segurança do operador e viabilidade econômica.

A identificação inicial das necessidades foi realizada por meio da formulação de hipóteses derivadas de três fontes complementares: (i) revisão da literatura especializada sobre segurança de baterias de íons de lítio, apresentada no Capítulo 2, que forneceu requisitos técnicos de contenção, riscos de gases tóxicos, faixas de temperatura críticas e limitações das soluções existentes; (ii) análise do contexto de uso identificado no questionário de segmentação de clientes (Q1), que revelou padrões comportamentais de recarga, ambientes de uso e composição domiciliar; e (iii) princípios de usabilidade e de design centrado no usuário, que orientaram a formulação de necessidades relacionadas à facilidade de instalação, manutenção, comunicação de status e intuitividade de uso em emergências.

A partir dessas fontes, foram inicialmente extraídas 63 hipóteses brutas de necessidades. O processo de depuração seguiu três etapas sequenciais. Na primeira etapa, as 63 hipóteses foram agrupadas por afinidade temática em seis eixos: Segurança e Contenção, Compatibilidade e Instalação, Desempenho Operacional, Usabilidade e Experiência, Durabilidade e Manutenção, e Suporte Pós-Venda. Na segunda etapa, procedeu-se à consolidação semântica dentro de cada eixo: hipóteses que expressavam a mesma expectativa do usuário com formulações distintas foram unificadas em uma única declaração representativa. Esse procedimento eliminou 12 hipóteses redundantes, por exemplo, "o produto deve resistir a altas temperaturas" e "o produto deve funcionar mesmo em condições de calor extremo" foram consolidadas em uma única hipótese sobre confiabilidade em condições adversas de temperatura. Na terceira etapa, as hipóteses remanescentes foram avaliadas quanto à aderência ao escopo do projeto: 5 hipóteses foram excluídas por referirem-se a atributos fora do alcance das fases de Projeto Informacional e Conceitual (por

exemplo, hipóteses sobre preço final de varejo ou canais de distribuição, que pertencem a fases posteriores do PDP). Como resultado, obteve-se um conjunto final de 46 hipóteses de necessidades distintas, organizadas nos eixos temáticos supracitados e estruturadas no formato condicional "Se/então", o que permitiu explicitar a relação entre determinada característica do produto e o benefício esperado pelo usuário. O detalhamento completo das 46 hipóteses encontra-se no Apêndice B.

Para viabilizar a validação quantitativa dessas hipóteses junto a um público predominantemente sem treinamento especializado, as formulações condicionais foram convertidas em perguntas avaliativas compatíveis com escala Likert de cinco pontos. Essa conversão contou com apoio do modelo Gemini Flash, utilizado exclusivamente para reformulação linguística com base em prompt descrito no Apêndice C. Todas as perguntas geradas foram revisadas pelo pesquisador quanto à fidelidade semântica, clareza, adequação ao público-alvo e ausência de formulações tendenciosas.

O resultado deste processo foi um conjunto de 46 hipóteses de necessidades, apresentadas no Apêndice B, organizadas em eixos temáticos que cobrem desde aspectos de segurança e contenção (por exemplo, "Se o produto contiver o foco de incêndio o mais rápido possível, então a chance de a bateria explodir ou o fogo se alastrar será minimizada") até questões de usabilidade (por exemplo, "Se o produto puder ser instalado sem ferramentas especiais nem ajuda técnica, então mais pessoas poderão utilizá-lo corretamente"), compatibilidade (por exemplo, "Se o produto for compatível com a infraestrutura atual de tomadas e extensões, então a adoção pelo usuário será mais fácil e imediata") e suporte pós-venda (por exemplo, "Se o produto tiver garantia e suporte claros do fabricante, então o usuário terá mais confiança na compra").

O instrumento Q2 foi elaborado a partir da conversão das 46 hipóteses de necessidades em perguntas avaliativas de importância. Para isso, adotou-se uma escala Likert de cinco pontos, variando de 1 ("Nem um pouco importante") a 5 ("Extremamente importante"), por permitir captar diferentes níveis de concordância entre os respondentes e identificar as necessidades com maior adesão percebida (Ulrich; Eppinger, 2015).

As 46 perguntas foram organizadas em blocos temáticos correspondentes às categorias das hipóteses, com o objetivo de favorecer a compreensão do respondente e reduzir a fadiga cognitiva ao longo do questionário. Dentro de cada bloco, as questões foram ordenadas de forma a iniciar por atributos mais gerais e avançar gradualmente para aspectos mais específicos, buscando minimizar efeitos de indução e facilitar a continuidade da resposta. O protocolo metodológico do instrumento Q2 é apresentado no Quadro 2.

Elemento	Descrição
Objetivo	Validar empiricamente as 46 hipóteses de necessidades junto aos potenciais usuários do dispositivo ignífugo
Público-alvo	Usuários de dispositivos eletrônicos portáteis com LIBs (base estabelecida no Q1 e ampliada por divulgação adicional)
Período de aplicação	16 de novembro a 27 de novembro de 2025
Número de questões	46 questões (uma por hipótese de necessidade)
Tipo de escala	Likert de 5 pontos (1 = "Nem um pouco importante"; 5 = "Extremamente importante")
Forma de divulgação	Google Formulários, distribuído via redes sociais e correio eletrônico
Meta amostral / Respostas obtidas	Meta mínima: 50 respondentes; obtidas: 52 respostas válidas
CrITÉRIOS de validade	Respostas completas em todas as 46 questões; exclusão automática de formulários incompletos
CrITÉRIO de validação	Hipótese validada quando $\geq 75\%$ das respostas obtiverem valores 4 ou 5 na escala Likert
Forma de análise	Estatística descritiva: proporção de respostas nos níveis 4 e 5 por hipótese; categorização temática das necessidades validadas

Quadro 2: Protocolo metodológico do instrumento Q2.
Fonte: Autoria própria (2026).

O critério de validação adotado neste estudo foi o percentual mínimo de 75% de respostas nos níveis 4 ou 5 da escala Likert. Esse limiar foi definido como decisão metodológica voltada à seleção de necessidades com elevada concordância entre os respondentes, reduzindo a inclusão de itens de relevância marginal e, ao mesmo tempo, preservando um conjunto suficientemente amplo de insumos para a etapa subsequente de priorização. As hipóteses que não atingiram esse percentual foram consideradas não prioritárias para o escopo inicial do projeto e, por essa razão, não avançaram para a etapa seguinte.

Das 46 hipóteses de necessidades submetidas à avaliação, 26 foram validadas (56,5%), enquanto 20 não atingiram o critério mínimo de aprovação estabelecido (43,5%). Com o intuito de facilitar a interpretação e organizar as necessidades identificadas, as hipóteses validadas foram agrupadas em quatro categorias temáticas, definidas com base na natureza funcional e operacional dos requisitos: Segurança e Confiabilidade; Compatibilidade;

Desempenho e Usabilidade; e Suporte. A Tabela 7 apresenta as 26 necessidades validadas, organizadas de acordo com o percentual de concordância obtido.

ID	Necessidade (Q2)	Categoria	% 4-5
01	Reduzir ativamente o risco de incêndio durante a recarga	Desempenho	98,1%
02	Tempo suficiente para evacuação segura ou combate inicial	Desempenho	96,2%
03	Contenção sem liberar gases tóxicos ou resíduos perigosos	Desempenho	96,2%
04	Compatibilidade com tomadas, extensões e carregadores existentes	Compatibilidade	94,2%
05	Contenção rápida do foco de incêndio	Desempenho	92,3%
06	Contenção do fogo sem propagação para móveis/objetos	Desempenho	92,3%
07	Funcionamento mesmo em queda de energia elétrica	Segurança	92,3%
08	Verificação rápida do status (pronto/ativo/manutenção)	Segurança	92,3%
09	Materiais resistentes ao fogo com certificações	Segurança	90,4%
10	Longa durabilidade (evitar trocas frequentes)	Desempenho	90,4%
11	Confiabilidade em diferentes condições (umidade, poeira, calor)	Segurança	88,5%
12	Eficácia em diferentes ambientes (garagem, escritório, quarto)	Compatibilidade	88,5%
13	Alerta sonoro/visual imediato sobre início de incêndio	Segurança	88,5%
14	Manuseio intuitivo em emergência, mesmo sob estresse	Compatibilidade	86,5%
15	Alertas perceptíveis mesmo à distância	Segurança	84,6%
16	Acesso a dados de testes/certificações antes da compra	Suporte	84,6%
17	Indicação clara de vencimento/fim da vida útil	Segurança	82,7%
18	Garantia e suporte do fabricante	Suporte	80,8%
19	Uso intuitivo sem manual longo	Compatibilidade	80,8%
20	Manuseio seguro durante/após incêndio (sem queimaduras)	Segurança	80,8%
21	Instruções em linguagem simples	Compatibilidade	80,8%
22	Silencioso quando inativo (sem ruídos em modo de espera)	Desempenho	78,8%
23	Manutenção simples e rápida	Compatibilidade	78,8%
24	Compatibilidade com diferentes tipos de baterias	Compatibilidade	78,8%
25	Compacto, cabe nos locais de carregamento	Compatibilidade	78,8%
26	Seguro para ambientes com crianças/animais	Segurança	76,9%

Tabela 7: Necessidades apresentadas pelos clientes via Q2.

Fonte: Autoria própria (2026).

A análise dos resultados revela padrões relevantes para o direcionamento do projeto. Em primeiro lugar, as necessidades com maior percentual de concordância concentram-se em atributos de desempenho diretamente relacionados à função primária do dispositivo, como redução ativa do risco de incêndio, tempo para evacuação segura, contenção sem emissão de gases tóxicos, rapidez de resposta e prevenção da propagação do fogo. Esse resultado indica que a percepção de valor do usuário está prioritariamente associada à eficácia funcional da solução.

Em segundo lugar, a elevada concordância em itens como compatibilidade com a infraestrutura existente e funcionamento mesmo em caso de queda de energia demonstra que os usuários valorizam soluções capazes de se integrar à rotina doméstica sem exigir adaptações complexas ou condições especiais de operação. Essa preferência reforça a necessidade de conceber o dispositivo como uma solução acessível e facilmente incorporável ao ambiente de uso.

Em terceiro lugar, a validação de necessidades relacionadas à intuitividade de uso, clareza das instruções e manuseio em situações de emergência converge com o perfil de usuários sem treinamento especializado identificado na Seção 3.1. Isso evidencia que a usabilidade sob estresse deve ser tratada como requisito central de projeto, e não como atributo secundário.

Por fim, embora os percentuais da categoria de suporte tenham sido relativamente inferiores aos das necessidades de desempenho, a validação de itens como garantia, suporte do fabricante e acesso prévio a dados de testes e certificações demonstra que a confiança do usuário depende também da credibilidade institucional e da transparência das informações associadas ao produto. Em um contexto de inovação sem precedente direto no mercado, essa dimensão assume relevância estratégica para a aceitação da solução.

Embora 26 necessidades tenham sido validadas acima do limiar estabelecido, a incorporação simultânea de todas elas poderia comprometer a viabilidade técnica e econômica do produto mínimo. Torna-se necessária, portanto, uma etapa adicional de priorização, destinada a identificar quais necessidades exercem maior impacto na percepção de valor do usuário e devem compor o escopo do MVP.

3.3. Necessidades priorizadas dos clientes

Esta seção descreve a aplicação da etapa de priorização das necessidades, conforme preconizado pelo Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP). A priorização atua como um filtro que define o foco do desenvolvimento, auxiliando na identificação das dores e

necessidades mais latentes na percepção dos clientes e delimitando o conjunto de requisitos que servirá como insumo direto para a fase de Projeto Conceitual.

Para realizar a priorização das 26 necessidades validadas no Q2, foi elaborado o instrumento Q3. A construção deste questionário partiu de uma premissa distinta da adotada no Q2: enquanto o instrumento anterior avaliava a importância absoluta de cada necessidade isoladamente, o Q3 foi desenhado para capturar a importância relativa percebida, induzindo o respondente a ponderar a criticidade de cada necessidade em um cenário de escolha restrita. O processo de construção seguiu quatro etapas: (i) seleção e reformulação dos itens, em que as 26 necessidades validadas no Q2 foram transcritas para o novo instrumento, com ajustes de redação que enfatizaram a dimensão de prioridade (por exemplo, substituindo "Quão importante é..." por "Quanto você considera prioritário que o produto ofereça..."), de modo a direcionar o respondente para uma avaliação comparativa e não meramente confirmativa; (ii) manutenção da estrutura temática, em que as perguntas foram mantidas nos quatro eixos temáticos do Q2 (Segurança, Compatibilidade, Desempenho, Suporte), preservando a consistência cognitiva do respondente; com o objetivo de estimular a discriminação entre necessidades de alta e média importância. O protocolo metodológico final é descrito no Quadro 3.

Elemento	Descrição
Objetivo	Priorizar as 26 necessidades validadas segundo a importância percebida pelos usuários, identificando o subconjunto de maior impacto na percepção de valor
Público-alvo	Base de potenciais usuários estabelecida nas fases anteriores (rede de 61 contatos do Q1 + divulgação adicional)
Período de aplicação	05 de dezembro a 22 de dezembro de 2025
Número de questões	26 questões (uma por necessidade validada)
Tipo de escala	Likert de 5 pontos (1 = "Nem um pouco importante"; 5 = "Extremamente importante")
Forma de divulgação	Google Formulários, distribuído via redes sociais e correio eletrônico
Respostas obtidas	68 respostas válidas
Crítérios de validade	Respostas completas em todas as 26 questões
Crítério de priorização	Necessidade priorizada quando $\geq 87,5\%$ das respostas obtiverem valores 4 ou 5
Forma de análise	Estatística descritiva: proporção de respostas 4 e 5 por necessidade; ranqueamento por percentual

Quadro 3: Protocolo metodológico do instrumento Q3.
Fonte: A autoria própria (2026).

O critério de priorização adotado foi o percentual mínimo de 87,5% de respostas nos níveis 4 ou 5 da escala Likert. Esse limiar foi definido como decisão metodológica voltada à seleção de um conjunto reduzido de necessidades com elevada convergência de percepção entre os respondentes, compatível com a lógica de definição de escopo de um MVP. A utilização de um limiar mais restritivo permite distinguir entre as necessidades já reconhecidas como importantes, e aquelas percebidas como mais críticas para a composição da primeira versão do produto. As necessidades que atingiram esse percentual foram classificadas como priorizadas e utilizadas como insumo direto para a fase de Projeto Conceitual. Ademais, a lógica de priorização por limiares progressivamente mais restritivos é coerente com as práticas de desenvolvimento de produtos ágil, nas quais a composição do MVP privilegia features de máximo valor percebido pelo usuário (Ries, 2011), garantindo que o escopo mínimo do produto concentre os atributos com maior potencial de diferenciação competitiva e aceitação mercadológica.

As questões do Q3 foram organizadas nos mesmos quatro eixos temáticos utilizados na identificação das necessidades (Segurança, Compatibilidade, Desempenho e Suporte) e aplicadas de modo a auxiliar o usuário a ponderar a criticidade das características previamente aprovadas, avaliando-as em um cenário de escolha restrita.

Com base na tabulação dos resultados, 11 das 26 necessidades validadas atingiram o limiar estabelecido, sendo classificadas como priorizadas. A Tabela 8 apresenta essas necessidades, ordenadas segundo o percentual de concordância obtido.

ID	Necessidade (Q3)	Categoria	% 4-5
1	Confiabilidade em diferentes condições (umidade, poeira, calor)	Segurança	95,6%
2	Compatibilidade com tomadas, extensões e carregadores existentes	Compatibilidade	94,8%
3	Tempo suficiente para evacuação segura	Desempenho	91,4%
4	Eficácia em diferentes ambientes da casa	Compatibilidade	91,2%
5	Materiais resistentes ao fogo com certificações	Segurança	90,8%
6	Longa durabilidade (evitar trocas frequentes)	Desempenho	90,6%
7	Garantia e suporte do fabricante	Suporte	90,2%
8	Contenção rápida do foco de incêndio	Desempenho	90,0%
9	Manuseio intuitivo em emergência, sob estresse	Compatibilidade	88,8%

10	Seguro para ambientes com crianças/animais	Segurança	88,0%
11	Silencioso quando inativo (sem ruídos em modo de espera)	Desempenho	87,6%

Tabela 8: Necessidades priorizadas pelos clientes via Q3.
Fonte: Autoria própria (2026).

A análise interpretativa dos resultados da priorização revela aspectos significativos para o direcionamento do Projeto Conceitual. O fato de "Confiabilidade em diferentes condições" (95,6%) ocupar a primeira posição, acima inclusive de "Contenção rápida do foco de incêndio" (90,0%), sugere que o modelo mental do usuário valoriza primordialmente a robustez e a previsibilidade do dispositivo, ou seja, a certeza de que o produto funcionará quando necessário, independentemente das condições ambientais. Para um dispositivo de segurança destinado ao ambiente doméstico, essa priorização é coerente: o usuário não especialista necessita confiar que o produto manterá sua funcionalidade sem intervenção técnica ou monitoramento contínuo.

A presença de "Compatibilidade com a infraestrutura existente" (94,8%) na segunda posição reforça o achado já observado no Q2: a integração transparente à rotina doméstica é um requisito de primeira ordem. O dispositivo não deve exigir adaptações na infraestrutura elétrica ou no layout dos ambientes, sob pena de comprometer a adoção pelo usuário. Essa constatação tem implicações diretas para o projeto físico do produto, que deverá prever conexões compatíveis com padrões existentes e instalação sem ferramentas especializadas.

A concentração de três necessidades nas categorias Desempenho (tempo de evacuação, durabilidade, contenção rápida) e três em Segurança (confiabilidade, certificação de materiais, segurança para crianças/animais) demonstra que o perfil de valor do segmento-alvo equilibra-se entre dois polos complementares: a eficácia funcional sob condições de emergência e a confiabilidade passiva durante o uso cotidiano. Esse equilíbrio deverá orientar o projeto conceitual a combinar features de resposta ativa (contenção térmica, mecanismos de alerta) com atributos de robustez passiva (selamento, certificação de materiais, proteção infantil).

Por fim, a presença de "Silencioso quando inativo" (87,6%) na última posição priorizada, embora com percentual próximo ao limiar, indica que a discricção operacional do dispositivo em modo de espera é uma condição relevante para a convivência doméstica, especialmente em ambientes de repouso, o que é coerente com a concentração de 34,8% dos locais de recarga em quartos, conforme identificado no Q1.

A priorização de 11 das 26 necessidades validadas (42,3%) demonstra que, embora os usuários reconheçam a relevância de um conjunto amplo de características, apenas um subconjunto é percebido como crítico para a aceitação do produto. As necessidades priorizadas concentram-se em quatro dimensões principais: confiabilidade do dispositivo, rapidez de contenção térmica, simplicidade de uso e compatibilidade com objetos domésticos. Esta convergência indica que o MVP deve focar em entregar excelência nessas dimensões, em detrimento de funcionalidades secundárias que, embora validadas, não são percebidas como diferenciais críticos pelos usuários. A concentração das necessidades priorizadas nessas quatro dimensões revela que o modelo mental do usuário frente ao risco é pragmático: valoriza-se a certeza de que o dispositivo funcionará de forma autônoma, rápida e integrada ao ambiente doméstico, sem exigir do usuário competências técnicas ou intervenções complexas em situações de emergência.

A presença simultânea de necessidades de desempenho (tempo para evacuação, contenção rápida, longa durabilidade), segurança (materiais certificados, segurança para crianças/animais) e compatibilidade (eficácia em múltiplos ambientes, manuseio intuitivo sob estresse) indica que o usuário concebe o dispositivo ignífugo ideal como uma solução que combina eficácia técnica, facilidade de uso e durabilidade, sem tolerar fragilidades em nenhuma. Especialmente revelador é o fato de que "silencioso quando inativo" (87,6%) integra o conjunto priorizado: o usuário não aceita que a experiência cotidiana com o produto seja incômoda, sinalizando que a aceitação de longo prazo depende tanto do desempenho em emergência quanto do comportamento em modo de espera. Por fim, é relevante notar que necessidades com altíssima concordância no Q2, como "reduzir ativamente o risco de incêndio" (98,1%), não integraram o conjunto priorizado por não atingirem o limiar de 87,5% no Q3, indicando que o usuário as concebe como pré-requisitos óbvios do produto, e não como diferenciais de valor percebido: sua ausência seria inaceitável, mas sua presença não é suficiente para diferenciar o produto.

3.4. Síntese Conclusiva da Fase de Projeto Informacional

A conclusão da fase de Projeto Informacional marca a transição de um estado inicial de incerteza, caracterizado por hipóteses sobre quem são os usuários, o que necessitam e o que valorizam, para um conjunto estruturado de conhecimento empírico. Esse conhecimento foi construído por meio de três entregas fundamentais, com critérios de validação progressivamente mais restritivos, que passam a balizar a fase de Projeto Conceitual.

Segmentação do público-alvo. O público-alvo foi delimitado como usuários domésticos de dispositivos eletrônicos portáteis equipados com baterias de íons de lítio, que realizam o carregamento em ambientes internos sem supervisão constante. Esse segmento, que abrange empiricamente 68,5% da amostra investigada, caracteriza-se pela alta densidade de dispositivos com LIBs (média superior a três por respondente), pela concentração da recarga em ambientes de repouso (62,0% no quarto ou escritório), pela prevalência de comportamentos de recarga sem supervisão e por uma percepção de risco heterogênea, em que a experiência com eventos precursores de fuga térmica não se traduz necessariamente em medidas preventivas. A elevada presença de coabitantes vulneráveis (crianças, idosos e animais) e a baixa capacidade técnica de resposta a emergências tornam a operação autônoma do dispositivo uma exigência de projeto, e não uma mera preferência.

Necessidades priorizadas. Das 46 hipóteses de necessidades formuladas, 26 foram validadas empiricamente (limiar $\geq 75\%$ de concordância nos níveis 4 e 5 da escala Likert) e, dentre estas, 11 foram priorizadas com o Q3 aplicando-se um limiar mais restritivo ($\geq 87,5\%$). O perfil das necessidades priorizadas organiza-se em quatro eixos de valor: (i) eficácia confiável e verificável; (ii) compatibilidade; (iii) longevidade e custo-benefício percebido; e (iv) experiência de uso. A única necessidade da categoria Suporte priorizada "Garantia e suporte do fabricante" (90,2%), sinaliza que a credibilidade institucional constitui condição necessária para a adoção de um produto inovador sem precedente direto no mercado de consumo.

Eficácia do funil de convergência empírica. A estrutura progressiva de coleta de dados (segmentação \rightarrow validação \rightarrow priorização) demonstrou-se eficaz como mecanismo de redução sistemática de incerteza. O funil Q1 \rightarrow Q2 \rightarrow Q3 operou como um processo de convergência: partiu-se de um universo amplo e indiferenciado de potenciais usuários (Q1, n = 92), extraiu-se desse universo um conjunto de 46 hipóteses de necessidades derivadas de múltiplas fontes, validaram-se 26 dessas hipóteses junto ao público-alvo (Q2, n = 52) e, por fim, priorizaram-se 11 necessidades de alto impacto (Q3, n = 68). A taxa de conversão global de 11 necessidades priorizadas a partir de 46 hipóteses iniciais, ou 23,9% é indicativa de um processo seletivo rigoroso, capaz de distinguir demandas centrais de demandas periféricas.

Três insights emergiram desse processo. Primeiro, a percepção de risco do público é mais heterogênea do que inicialmente previsto: 37,0% manifestaram alta preocupação contra 36,9% com baixa preocupação, polarização que tem implicações diretas para a estratégia de comunicação do produto. Segundo, a taxa de engajamento de 66,3% (Q1, Pergunta 8) para um produto sem precedente direto no mercado doméstico sugere uma demanda latente

significativa. Terceiro, a elevação do número de respondentes ao longo do funil (de 52 no Q2 para 68 no Q3) indica crescente interesse do público-alvo à medida que o conceito do produto se tornava mais definido.

Implicações para o Projeto Conceitual. As 11 necessidades priorizadas constituem o insumo mandatório para a fase seguinte do PDP. O Projeto Conceitual deverá traduzir cada uma dessas necessidades em features, atributos físicos, funcionais ou de qualidade do produto, e compor um Produto Mínimo Viável (MVP) que represente o conceito de menor complexidade capaz de entregar valor percebido ao segmento-alvo. O equilíbrio entre eficácia funcional e robustez passiva, revelado pela priorização, implica que o MVP deverá combinar features de resposta ativa a eventos térmicos com atributos de confiabilidade e integração ao ambiente doméstico, evitando soluções que priorizem exclusivamente um dos eixos em detrimento do outro. Em termos práticos, o produto deve operar de forma autônoma ou semiautônoma, dispensando intervenção ativa do usuário no momento crítico; deve ser fisicamente compatível com os pontos de carregamento domésticos usuais (tomadas padrão, superfícies de mesas e cabeceiras) sem exigir adaptações; deve possuir certificações verificáveis de resistência ao fogo; e deve ser projetado para uma vida útil longa, sem manutenção complexa.

Implicações para fases mais avançadas do PDP. Para além do Projeto Conceitual imediato, os achados desta fase informam decisões em etapas posteriores. Na fase de Projeto Detalhado, a priorização de "Confiabilidade em diferentes condições" (95,6%) e "Materiais resistentes ao fogo com certificações" (90,8%) demandará a seleção de materiais com desempenho comprovado sob variações de temperatura, umidade e poeira, além da obtenção de certificações internacionais (UL, EN, IEC). Na fase de Preparação da Produção, a elevada importância atribuída à "Compatibilidade com a infraestrutura existente" (94,8%) e à "Instalação sem ferramentas especializadas" implica que o projeto de manufatura deverá priorizar tolerâncias dimensionais compatíveis com padrões de tomadas e extensões comerciais, bem como mecanismos de encaixe que dispensem ferramentas. Por fim, a heterogeneidade da percepção de risco identificada no Q1 sugere que a estratégia de lançamento deverá incluir componentes educativos que sensibilizem os usuários de baixa percepção de risco.

4. FASE DE PROJETO CONCEITUAL

Este capítulo apresenta a aplicação da fase de Projeto Conceitual no Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP), configurando-se como o momento de síntese do projeto. É nesta etapa que as informações levantadas na fase informacional ganham forma. Desse modo, as necessidades priorizadas e validadas pelos clientes são traduzidas em estrutura, função e características físicas inerentes às versões preliminares do produto. Segundo Rozenfeld et al. (2006), o objetivo central desta fase é gerar, avaliar e selecionar conceitos de produto que atendam aos requisitos estabelecidos, definindo e viabilizando o princípio de solução.

O problema metodológico central desta fase pode ser enunciado da seguinte forma: como transformar necessidades subjetivas dos usuários, expressas em termos de expectativas, percepções de risco e preferências de uso, em features objetivas e mensuráveis do produto, de modo que o conjunto resultante constitua um conceito mínimo viável, empiricamente validado junto aos clientes? Esse problema envolve três desafios interligados: (a) o critério de transformação de necessidades em features, que exige a definição de um procedimento sistemático para gerar, filtrar e selecionar atributos do produto que respondam às necessidades priorizadas; (b) a formação de candidatos a MVP, que requer a composição de arranjos mínimos de features capazes de representar uma proposta de valor coerente; e (c) o tipo de validação realizado, que deve ser claramente delimitado quanto ao seu escopo e às suas limitações.

É essencial explicitar, desde o início, a natureza da validação conduzida neste capítulo. O termo "validação", conforme empregado neste trabalho, refere-se exclusivamente à validação de aceitação e pertinência percebida do conceito junto aos usuários, isto é, à verificação de que as features propostas são reconhecidas pelos potenciais clientes como atributos relevantes, desejáveis e coerentes com suas necessidades. Não se trata, portanto, de comprovação de desempenho térmico, resistência ao fogo, conformidade normativa ou viabilidade construtiva do dispositivo. Essas dimensões de validação técnica pertencem a fases posteriores do PDP (Projeto Detalhado e Prototipagem) e extrapolam o escopo deste trabalho. A distinção é metodologicamente indispensável para proteger a consistência do estudo e evitar extrapolações indevidas dos resultados.

A relevância desta etapa reside na tradução da "voz do cliente" para a linguagem da engenharia e do design de produtos. Torna-se fundamental estabelecer a distinção metodológica que norteia este processo: enquanto as necessidades priorizadas refletem

expectativas e desejos subjetivos do usuário frente a um cenário de risco, as features representam atributos físicos, operacionais ou de qualidade que o produto deve possuir para satisfazer essas necessidades (Olsen, 2015).

O processo metodológico aplicado seguiu etapas progressivas: (i) tradução das necessidades priorizadas em características reais do produto (features), por meio de brainstorming assistido por IA generativa e filtragem por critérios técnicos (Seção 4.1); e (ii) estruturação e validação iterativa dos candidatos a MVP junto aos clientes, seguindo a lógica Build-Measure-Learn (Seção 4.2).

4.1. Features

A transição do universo das necessidades (o que o cliente deseja) para o universo do produto (como o produto atenderá a esse desejo) ocorre por intermédio da definição de features. Uma feature é uma característica física, funcional ou de qualidade de um produto que entrega um benefício direto e mensurável ao utilizador final, respondendo, em simultâneo, a uma exigência do cliente e a um requisito base de engenharia.

É crucial distinguir, a diferença entre feature e benefício. Enquanto a feature é uma característica técnica ou física, o benefício é o impacto positivo, a vantagem ou a satisfação pessoal que essa característica proporciona ao usuário. O sucesso do Projeto Conceitual depende de formular hipóteses de features que entreguem os benefícios exigidos pelas necessidades priorizadas anteriormente.

Para garantir uma abordagem centrada no usuário, as features propostas foram estruturadas e classificadas em quatro dimensões, conforme fundamentado no Capítulo 2.5: Função (capacidades técnicas e operacionais); Qualidade (confiabilidade, durabilidade e segurança); Experiência (facilidade de uso e interação do usuário); e Estilo (aspectos estéticos e formais).

O processo de geração de features seguiu um protocolo estruturado em três etapas: geração assistida, filtragem humana e classificação dimensional.

Etapa 1, Geração de features assistida: Com base nas 11 necessidades priorizadas (Tabela 8), recorreu-se ao modelo de inteligência artificial generativa Gemini Flash para realizar um brainstorming estruturado de soluções e características que atendam a cada necessidade. O objetivo foi explorar um espaço amplo de alternativas, formulando múltiplas propostas de features por necessidade. O processo de geração assistida seguiu três etapas operacionais: (i) forneceu-se ao modelo o prompt estruturado descrito no Apêndice E, contendo as 11 necessidades priorizadas com suas respectivas descrições, categorias e

percentuais de concordância obtidos no Q3, acompanhadas de instruções para gerar exatamente cinco features por necessidade, classificadas obrigatoriamente nas dimensões Função, Qualidade, Experiência ou Estilo; (ii) o modelo gerou 55 features candidatas (5 x 11 necessidades), cada uma acompanhada de sua classificação dimensional e de uma breve justificativa de aderência à necessidade correspondente; (iii) revisou-se cada uma das 55 features geradas, aplicando os critérios de filtragem descritos na Etapa 2.

Etapa 2, Filtragem e curadoria humana: As 55 sugestões geradas pela IA foram submetidas a uma filtragem criteriosa pelo pesquisador, utilizando quatro critérios de avaliação: (a) aderência à necessidade, ou seja, a feature proposta responde diretamente à necessidade priorizada, sem desvios ou generalizações excessivas; (b) coerência técnica, ou seja, a feature é compatível com o referencial técnico sobre fuga térmica, materiais ignífugos e normas de segurança apresentado no Capítulo 2; (c) clareza de valor para o usuário, ou seja, o benefício entregue pela feature é compreensível por um público sem treinamento especializado, sem necessidade de explicação técnica aprofundada; e (d) viabilidade conceitual para um MVP, ou seja, a feature é passível de representação conceitual e avaliação por usuários, sem exigir prototipagem física ou testes de desempenho nesta fase do desenvolvimento. A revisão resultou nos seguintes ajustes: 8 features foram reformuladas para maior especificidade (substituindo formulações genéricas como "sistema de segurança avançado" por descrições concretas e mensuráveis), 4 features tiveram sua classificação dimensional corrigida pelo pesquisador (por exemplo, uma feature classificada pelo modelo como "Função" foi reclassificada como "Qualidade" por referir-se a um atributo de durabilidade, e não a uma capacidade operacional), e 3 features foram integralmente substituídas por alternativas formuladas pelo pesquisador devido a inconsistências técnicas com o referencial do Capítulo 2, especificamente, propostas que contrariavam princípios de contenção passiva ou que pressupunham mecanismos incompatíveis com as características de fuga térmica em LIBs.

Etapa 3, Classificação dimensional: As features aprovadas foram classificadas nas quatro dimensões (Função, Qualidade, Experiência, Estilo) e organizadas em uma Matriz Morfológica (Tabela 9) que associa cada necessidade priorizada a cinco features candidatas.

A Tabela 9 apresenta matriz morfológica com a correlação direta entre as 11 necessidades priorizadas e as 55 features candidatas (cinco por necessidade), devidamente classificadas de acordo com sua tipologia entre experiência, funcional, estilo ou qualidade.

ID	Necessidade	Feature 1	Feature 2	Feature 3	Feature 4	Feature 5
----	-------------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

1	Confiabilidade em diferentes condições (umidade, poeira, calor)	1.1- Estrutura selada com certificação IP (Qualidade)	2.1- Sensores auto calibráveis (Função)	3.1- Revestimento anticorrosão (Qualidade)	4.1- Componentes internos isolados termicamente (Qualidade)	5.1- Testes registrados no manual (Experiência)
2	Compatibilidade com a infraestrutura existente	1.2- Conexões padrão com encaixes existentes (Função)	2.2- Instalação sem ferramentas especializadas (Experiência)	3.2- Compatibilidade com múltiplas tensões (Função)	4.2- QR Code com opções de instalação equivalentes (Experiência)	5.2- Base modular adaptável a prateleiras, chão ou parede (Estilo)
3	Tempo suficiente para evacuação segura	1.3- Mecanismo rápido de contenção térmica (Função)	2.3- Sinal visual imediato ao detectar risco (Experiência)	3.3- Painel de status com contagem regressiva estimada (Experiência)	4.3- Integração com app para envio de alerta remoto (Função)	5.3- Alça de transporte para mover o dispositivo em emergência (Função)
4	Eficácia em diferentes ambientes da casa	1.4- Design compacto para caber em áreas pequenas (Estilo)	2.4- Resistência a variações de umidade (Qualidade)	3.4- Base antiderrapante para diferentes superfícies (Função)	4.4- Iluminação mínima para ambientes escuros (Experiência)	5.4- Alças integradas (Função)
5	Materiais resistentes ao fogo com certificações	1.5- Certificação internacional de resistência ao fogo (UL/EN) (Qualidade)	2.5- Camadas de barreira térmica multicamadas (Função)	3.5- Etiqueta visível de certificação (Estilo)	4.5- Relatório de conformidade via QR Code (Experiência)	5.5- Mecanismos de dissipação controlada e passivos (Função)
6	Longa durabilidade (evitar trocas frequentes)	1.6- Materiais externos resistentes a impactos e desgaste (Qualidade)	2.6- Garantia estendida contra falhas estruturais (Qualidade)	3.6- Componentes internos projetados para vida útil longa (Qualidade)	4.6- Revestimentos anti-UV (Qualidade)	5.6- Estrutura modulada que permite manutenção simples (Função)
7	Garantia e suporte do fabricante	1.7- QR Code para acesso à documentação (Experiência)	2.7- Manual simplificado com linguagem visual (Experiência)	3.7- App com status da garantia e histórico (Experiência)	4.7- Suporte 24/7 via chat (Experiência)	5.7- Política de troca transparente em etiqueta externa (Estilo)
8	Contenção rápida do foco de incêndio	1.8- Câmara de contenção térmica com ação imediata (Função)	2.8- Sensores rápidos (Função)	3.8- Arquitetura interna que orienta o calor para longe de pontos críticos (Função)	4.8- Monitoramento interno contínuo e autônomo (Função)	5.8- Aberturas projetadas para expansão controlada (Função)
9	Manuseio intuitivo em emergência, sob estresse	1.9- Indicadores visuais (verde/amarelo/vermelho) (Experiência)	2.9- Uma única ação principal em caso de emergência (Função)	3.9- Pontos de interação em cor de destaque ou brilho no escuro (Estilo)	4.9- Instruções em pictogramas gravados na carcaça (Experiência)	5.9- Feedback tátil em botões/partes importantes (Experiência)
10	Seguro para ambientes com crianças/animais	1.10- Sistema de travamento (Função)	2.10- Bordas arredondadas e sem partes expostas (Estilo)	3.10- Alertas quando o equipamento for movido (Função)	4.10- Exterior com temperatura ambiente mesmo em emergência (Qualidade)	5.10- Modo bloqueio infantil para evitar interações (Função)

11	Silencioso quando inativo (sem ruídos em modo de espera)	1.11- Sistema passivo de ventilação (Função)	2.11- Modo ultra-silencioso automático à noite (Função)	3.11- Materiais amortecedores de vibração interna (Experiência)	4.11- Estrutura com isolamento acústico interno (Qualidade)	5.11- Sinalizações luminosas em vez de sonoras (Experiência)
----	---	--	---	---	---	--

Tabela 9: Matriz Morfológica entre Necessidades priorizadas e Features propostas.
 Fonte: Autoria própria (2026) com auxílio da ferramenta Gemini Flash.

A amplitude da Matriz Morfológica (55 features candidatas distribuídas entre 11 necessidades) demonstra a complexidade técnica de um dispositivo ignífugo e evidencia os múltiplos atributos que os clientes percebem como geradores de valor. No entanto, agrupar todas as funcionalidades desejadas num único dispositivo encarece substancialmente o custo de produção, atrasa o desenvolvimento, e lançamento e inviabiliza o seu desenvolvimento inicial. Por conseguinte, a formulação do conceito deve ser submetida à metodologia do Produto Mínimo Viável (MVP), estabelecendo um conjunto restrito e focado de features capaz de atender às necessidades mais críticas dos utilizadores.

Para a composição do primeiro candidato a MVP, foi necessário selecionar uma feature representativa para cada necessidade priorizada. Essa seleção não seguiu um procedimento de otimização matemática ou de triagem exaustiva, mas sim uma lógica de formulação de hipóteses falsificáveis, coerente com a epistemologia do Lean Startup (Ries, 2011).

Segundo essa abordagem, o rigor metodológico não reside na sofisticação do método de seleção inicial, mas na capacidade de submeter as hipóteses formuladas a testes empíricos rigorosos e de ajustá-las iterativamente com base em evidências. Assim, a seleção das 11 features iniciais constitui uma proposta conceitual de carácter exploratório, cuja validade será determinada pela validação junto aos usuários (Seção 4.2), e não por um cálculo prévio de adequação.

A escolha de cada feature foi orientada por cinco princípios qualitativos fundamentados na literatura de design centrado no usuário e desenvolvimento de produtos:

- (a) aderência ao modelo mental do usuário, isto é, a feature deve ser compreensível e valorizada pelo público-alvo sem exigir conhecimento técnico especializado (Norman, 2013);
- (b) coerência técnica com o referencial teórico, garantindo compatibilidade com os princípios de contenção térmica, materiais ignífugos e normas de segurança;
- (c) clareza de valor percebido, de modo que o benefício entregue pela feature seja imediatamente reconhecível pelo usuário, sem necessidade de explicação adicional;

(d) simplicidade de implementação conceitual, permitindo que a feature seja representada visualmente e avaliada pelos usuários nesta fase, sem exigir prototipagem física ou testes de desempenho; e

(e) complementaridade dimensional no conjunto, buscando diversidade entre as dimensões Função, Qualidade, Experiência e Estilo, e evitando redundâncias funcionais entre os itens selecionados.

Esses princípios não foram aplicados como critérios formais de pontuação ou ranqueamento, mas como diretrizes interpretativas para a formulação de uma hipótese inicial de produto mínimo viável. A aplicação desses princípios à Matriz Morfológica (Tabela 9) conduziu à seleção das 11 features que compõem o primeiro candidato a MVP. O Quadro 4 sintetiza, para cada necessidade priorizada, a feature selecionada e a justificativa predominante da escolha.

Necessidade Priorizada	Nº - Feature	Justificativa
Confiabilidade em diferentes condições	1.1 - Estrutura selada com certificação IP	Comunica proteção integral ao usuário sem treinamento especializado (clareza de valor) e possui referencial normativo verificável (coerência técnica)
Compatibilidade com a infraestrutura existente	2.2 - Instalação sem necessidade de ferramentas especializadas	Maximiza a acessibilidade ao público-alvo com baixa competência técnica (aderência ao modelo mental) e viabiliza representação visual direta (simplicidade conceitual)
Tempo suficiente para evacuação segura	1.3 - Mecanismo rápido de contenção térmica	Responde diretamente à necessidade funcional central (aderência) e é coerente com os princípios de contenção passiva do Cap. 2 (coerência técnica)
Eficácia em diferentes ambientes da casa	3.4 - Base antiderrapante para diferentes superfícies	Propõe solução tangível e visualmente representável (simplicidade conceitual)
Materiais resistentes ao fogo com certificações	1.5 - Certificação internacional de resistência ao fogo (UL/EN)	Atende diretamente à demanda por verificabilidade (clareza de valor) e ancora-se em normas reconhecidas (coerência técnica)
Longa durabilidade	1.6 - Materiais externos resistentes a impactos e desgaste	Comunica robustez física perceptível ao toque e à visão (clareza de valor); complementa features de Qualidade interna com atributo de Qualidade externa (complementaridade dimensional)
Garantia e suporte do fabricante	1.7 - QR Code para acesso à documentação	Oferece canal de acesso imediato e autônomo à informação (aderência ao modelo mental); é a feature de Experiência mais simples de representar visualmente
Contenção rápida do foco de incêndio	5.8 - Aberturas projetadas para expansão controlada	Propõe mecanismo de dissipação térmica coerente com o referencial técnico (coerência técnica); a formulação buscou comunicar controle

Manuseio intuitivo em emergência, sob estresse	3.9 - Pontos de interação em cor de destaque ou brilho no escuro	Oferece sinalização visual imediata sem dependência de texto (aderência ao modelo mental); complementa features funcionais com atributo de Estilo (complementaridade dimensional)
Seguro para ambientes com crianças/animais	2.10 - Bordas arredondadas e sem partes expostas	Comunica segurança passiva de forma universalmente compreensível (clareza de valor); é a feature de Estilo com maior aderência à necessidade
Silencioso quando inativo	3.11 - Sinalizações luminosas em vez de sonoras	Resolve diretamente o problema de ruído em modo de espera (aderência) e complementa o conjunto com uma feature de Experiência sensorial (complementaridade dimensional)

Quadro 4: Justificativa da seleção de features para o primeiro candidato a MVP.
Fonte: Autoria própria (2026).

A natureza exploratória dessa seleção é metodologicamente justificada pela lógica de aprendizado validado (Ries, 2011; Blank, 2013). Em contextos de alta incerteza quanto às preferências do usuário, a tentativa de otimizar a seleção de features antes da validação empírica pode conduzir a decisões baseadas em suposições não testadas, aumentando o risco de desenvolvimento de produtos desalinhados às expectativas reais do mercado.

Cabe reiterar que essas justificativas não constituem uma demonstração de otimalidade das primeiras escolhas de features que formam o conjunto, mas sim a explicitação do raciocínio que orientou a formulação da hipótese inicial de MVP. A abordagem adotada inverte essa lógica: em vez de buscar a melhor combinação de features por meio de métodos analíticos prévios, formula-se um conjunto inicial plausível e submete-se essa versão a ciclos rápidos de teste e aprendizado junto aos usuários. Caso uma feature não atinja o limiar de aceitação de 75% na validação empírica, ela é substituída por uma alternativa associada à mesma necessidade priorizada, e o arranjo completo é reavaliado no ciclo seguinte.

Esse procedimento iterativo, fundamentado em evidências empíricas, constitui o principal mecanismo de rigor metodológico do Projeto Conceitual, conforme detalhado na Seção 4.2.

4.2. Produto Mínimo Viável (MVP)

O MVP, segundo Ries (2011), corresponde à versão mais simples de um produto capaz de testar as hipóteses centrais do projeto com o menor investimento possível de tempo e recursos. No contexto deste trabalho, o MVP é materializado por um conjunto mínimo de features capazes de atender às necessidades priorizadas dos usuários, sendo posteriormente submetido à validação empírica de aceitação junto a potenciais clientes.

A estruturação do conceito de produto mínimo segue as diretrizes metodológicas estabelecidas na disciplina EMC 6902 - Processo de Desenvolvimento de Produtos, componente curricular obrigatório do curso de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Conforme essa abordagem, a concepção do MVP baseia-se em uma seleção exploratória de features, que são combinadas de forma a atender às necessidades priorizadas na fase de Projeto Informacional. Esse procedimento reduz a subjetividade no processo de tomada de decisão durante o desenvolvimento do produto, contribuindo para a diminuição das incertezas associadas à aceitação do conceito pelo mercado.

A validação do conjunto foi conduzida por meio de ciclos iterativos de avaliação, seguindo a lógica Build-Measure-Learn (Construir-Medir-Aprender) de Ries (2011). Em cada ciclo, cada feature é analisada em relação à necessidade que pretende atender. Como critério de aprovação, estabeleceu-se que cada característica deveria atingir um índice mínimo de 75% de aceitação entre os respondentes, calculado como a proporção de respostas nos níveis 4 ("Concordo") e 5 ("Concordo totalmente") da escala Likert, para ser considerada validada dentro do arranjo proposto. Caso uma feature não alcance esse limiar, ela é substituída por uma alternativa associada à mesma necessidade priorizada e o arranjo completo é reavaliado no ciclo seguinte. Cada candidato a MVP é composto por uma única feature representativa para cada necessidade priorizada, totalizando 11 características principais.

A metodologia avalia o produto de forma sistêmica. Assim, sempre que uma nova feature é introduzida no conjunto, torna-se necessário reavaliar o conceito completo. A reavaliação integral do conjunto justifica-se pelo fato de que a aceitação de uma característica pode influenciar a percepção de valor das demais, alterando a avaliação global do produto pelos usuários. Esse mecanismo permite que o conceito seja refinado com base em evidências empíricas, reduzindo progressivamente o risco de rejeição mercadológica.

4.2.1. Primeiro candidato à MVP

A aplicação prática da metodologia iniciou-se com a formulação do primeiro candidato a MVP, composto por 11 features selecionadas a partir da Matriz Morfológica (Tabela 9), uma por necessidade priorizada.

O instrumento Q4 foi construído com uma lógica distinta dos questionários anteriores: enquanto Q2 e Q3 avaliavam necessidades (o que o cliente deseja), o Q4 avalia features (como o produto propõe atender a esse desejo). Essa transição exigiu um formato de questão diferenciado. O processo de construção seguiu as seguintes etapas: (i) definição do formato,

em que cada feature foi apresentada ao respondente na forma de hipótese afirmativa no formato causa-efeito (por exemplo, "Uma estrutura selada com certificação IP garante confiabilidade em diferentes condições"), seguida de avaliação em escala Likert de 5 pontos em escala de nível concordância com a afirmação proposta, ancorando a avaliação na relação explícita entre a feature proposta e a necessidade que ela pretende atender; (ii) elaboração das hipóteses afirmativas, em que, para cada uma das 11 features selecionadas, o pesquisador redigiu uma hipótese afirmativa que explicita a relação causal entre o atributo do produto e o benefício esperado pelo usuário; (iii) produção de material visual, em que foram geradas representações visuais do conceito do produto (Figura 16) utilizando a ferramenta Gemini Flash, com o objetivo de contextualizar as features em uma proposta tangível e facilitar a avaliação pelos respondentes; e (iv) estruturação do questionário, em que as 11 hipóteses foram apresentadas em sequência única, precedidas por uma breve descrição do conceito do produto e pelas imagens de referência, permitindo ao respondente avaliar cada feature no contexto do conjunto completo. O protocolo metodológico final é apresentado no Quadro 5.

Elemento	Descrição
Objetivo	Validar a aceitação percebida das 11 features do primeiro candidato a MVP junto aos potenciais usuários
Público-alvo	Base de potenciais usuários estabelecida nas fases anteriores
Período de aplicação	05 de janeiro a 19 de janeiro de 2026
Número de questões	11 (uma por feature, no formato de hipótese afirmativa causa-efeito)
Tipo de escala	Likert de 5 pontos (1 = "Discordo totalmente"; 5 = "Concordo totalmente")
Material visual	Representações visuais do produto (Figura 16) apresentadas junto ao questionário, geradas com auxílio da ferramenta Gemini Flash
Forma de divulgação	Google Formulários, distribuído via redes sociais e correio eletrônico
Respostas obtidas	64 respostas válidas
Critério de aprovação	$\geq 75\%$ de respostas nos níveis 4 ou 5
Formato das questões	Hipóteses afirmativas no formato causa-efeito
Avaliação	Cada feature avaliada individualmente pelo respondente, porém apresentada no contexto do conjunto completo do MVP

Quadro 5: Protocolo metodológico do instrumento Q4.
Fonte: Autoria própria (2026).

O formato de hipóteses afirmativas causa-efeito foi adotado para que cada respondente pudesse avaliar o grau de concordância com a proposição de que determinada feature atende efetivamente à necessidade correspondente. As hipóteses completas encontram-se

documentadas no Apêndice F. Os respondentes tiveram acesso à representação visual do produto (Figura 16), o que permitiu contextualizar as features avaliadas dentro de uma proposta de produto tangível. Os resultados são apresentados na Tabela 10.

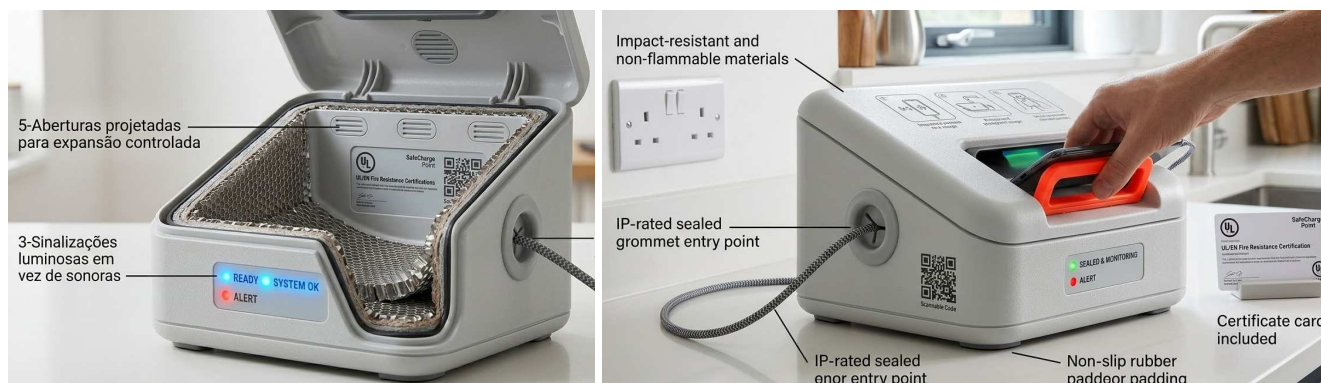


Figura 16: Designs apresentados junto ao Primeiro candidato à MVP no Q4.
Fonte: Autoria própria (2026) com auxílio da ferramenta Gemini Flash.

A validação se deu por meio do questionário Q4 utilizando a escala Likert de 1 a 5 com as medidas variando entre 1 - Discordo totalmente e 5 - Concordo totalmente. Para isso, foram elaboradas hipóteses afirmativas no formato causa efeito, que foram colocadas em um questionário utilizando a plataforma google formulários, conforme o Apêndice F. Os resultados da validação do primeiro candidato a MVP são apresentados na Tabela 10. O N° associado a cada feature diz respeito a identificação da mesma na matriz morfológica da Tabela 9 do Capítulo 4.1.

Necessidade Priorizada	N° - Feature	Validação >75% (Sim/Não)
Confiabilidade em diferentes condições	1.1 - Estrutura selada com certificação IP	~86% (Sim)
Compatibilidade com a infraestrutura existente	2.2 - Instalação sem necessidade de ferramentas especializadas	~81% (Sim)
Tempo suficiente para evacuação segura	1.3 - Mecanismo rápido de contenção térmica	~78% (Sim)
Eficácia em diferentes ambientes da casa	3.4 - Base antiderrapante para diferentes superfícies	~66% (Não)
Materiais resistentes ao fogo com certificações	1.5 - Certificação internacional de resistência ao fogo (UL/EN)	~91% (Sim)
Longa durabilidade	1.6 - Materiais externos resistentes a impactos e desgaste	~83% (Sim)
Garantia e suporte do fabricante	1.7 - QR Code para acesso à documentação	~80% (Sim)
Contenção rápida do foco de incêndio	5.8 - Aberturas projetadas para expansão controlada	~58% (Não)

Manuseio intuitivo em emergência, sob estresse	3.9 - Pontos de interação em cor de destaque ou brilho no escuro	~69% (Não)
Seguro para ambientes com crianças/animais	2.10 - Bordas arredondadas e sem partes expostas	~88% (Sim)
Silencioso quando inativo	3.11 - Sinalizações luminosas em vez de sonoras	~81% (Sim)

Tabela 10: Primeiro candidato à MVP via Q4.
Fonte: Autoria própria (2026).

Os resultados indicaram que 8 das 11 features atingiram o critério de aprovação, enquanto 3 foram reprovadas, como explicado anteriormente. A metodologia avalia o produto de forma sistêmica. Assim, sempre que uma nova feature é introduzida no conjunto, torna-se necessário reavaliar o conceito completo, ou seja, quando 3 features são reprovadas, o conjunto mvp 1 é considerado reprovado. A análise das features reprovadas fornece informações valiosas sobre o modelo mental do usuário e sobre a adequação das soluções propostas:

(a) "Base antiderrapante para diferentes superfícies" (66%): A baixa aceitação desta feature para a necessidade "Eficácia em diferentes ambientes" sugere que os respondentes não perceberam a aderência a superfícies como o fator determinante para a eficácia em ambientes variados. É provável que o conceito de "eficácia em diferentes ambientes" esteja mais associado, na percepção do usuário, à robustez ambiental (resistência a condições climáticas variáveis) do que à fixação física do dispositivo. Esse achado orientou a substituição por uma feature de resistência a variações de umidade.

(b) "Aberturas projetadas para expansão controlada" (58%): Esta foi a feature com menor aceitação de todo o arranjo. O resultado indica uma possível dissonância cognitiva: para um produto de contenção de incêndio, a ideia de "aberturas" pode transmitir insegurança ao usuário sem treinamento especializado, evocando a possibilidade de escape de chamas ou gases, mesmo que tecnicamente a feature se refira a ventilação controlada para evitar explosão por pressurização. A comunicação inadequada do benefício, e não necessariamente a inadequação técnica da solução, parece ter sido o fator determinante da rejeição. A substituição por "arquitetura interna que orienta o calor para longe de pontos críticos" buscou preservar a função técnica com uma formulação que transmite contenção ativa, e não abertura.

(c) "Pontos de interação em cor de destaque ou brilho no escuro" (69%): A aceitação moderada sugere que, embora a sinalização visual seja valorizada, o conceito de "pontos de interação coloridos" pode ter sido percebido como insuficiente para garantir intuitividade sob estresse. A substituição por "instruções em pictogramas gravados na carcaça" representa uma

solução comunicacional mais completa, que não depende apenas de cor, mas fornece orientação funcional direta.

A análise dos possíveis motivos de rejeição revela um padrão consistente: as três features reprovadas ("Base antiderrapante" (66%), "Aberturas para expansão controlada" (58%) e "Pontos de interação em cor de destaque" (69%)) compartilham uma característica comum: todas propõem soluções técnicas que, embora coerentes do ponto de vista da engenharia, falham em comunicar valor na linguagem do modelo mental do usuário sem treinamento especializado. A "base antiderrapante" resolve um problema de fixação mecânica que o usuário não percebe como determinante para "eficácia em diferentes ambientes"; as "aberturas controladas" evocam exposição ao risco em um contexto em que o usuário busca contenção total; e os "pontos de cor" oferecem sinalização visual quando o usuário demanda orientação funcional explícita. Esse padrão reforça um princípio central do desenvolvimento centrado no usuário: a aceitação de uma feature depende não apenas de sua adequação técnica, mas da clareza com que seu benefício é percebido ou explicado ao público-alvo. A implicação prática é que, nas fases de Projeto Detalhado e Preparação da Produção, cada decisão deverá ser acompanhada de uma análise de comunicabilidade do benefício ao usuário final.

4.2.2. Segundo candidato à MVP

Após a identificação das três features reprovadas no primeiro ciclo, procedeu-se à substituição por alternativas correspondentes, mantendo a associação com as mesmas necessidades priorizadas. A Tabela 11 apresenta as substituições realizadas. O N° associado a cada feature diz respeito a identificação da mesma na matriz morfológica da Tabela 9.

Necessidade Priorizada	N° - Feature Reprovada (<75%)	N° - Feature Substituta
Eficácia em diferentes ambientes da casa	3.4 - Base antiderrapante para diferentes superfícies	2.4 - Resistência a variações de umidade
Contenção rápida do foco de incêndio	5.8 - Aberturas projetadas para expansão controlada	3.8 - Arquitetura interna que orienta o calor para longe de pontos críticos
Manuseio intuitivo em emergência, sob estresse	3.9 - Pontos de interação em cor de destaque ou brilho no escuro	4.9 - Instruções em pictogramas gravados na carcaça

Tabela 11: Substituições do primeiro candidato à MVP para o segundo candidato.

Fonte: Autoria própria (2026).

Com base nessas alterações, foi estruturado um segundo candidato a MVP, composto pelo novo conjunto de features.

O instrumento Q5 foi construído a partir da estrutura do Q4, incorporando as substituições decorrentes do primeiro ciclo de validação. O processo de construção seguiu três etapas: (i) manutenção do formato, em que as 8 hipóteses afirmativas aprovadas no Q4 foram mantidas integralmente; (ii) elaboração de novas hipóteses, em que, para cada uma das 3 features substitutas (Resistência a variações de umidade, Arquitetura interna que orienta o calor para longe de pontos críticos, e Instruções em pictogramas gravados na carcaça), o pesquisador redigiu uma nova hipótese afirmativa causa-efeito, seguindo o mesmo padrão linguístico do Q4 e explicitando a relação entre a feature substituta e a necessidade priorizada correspondente; e (iii) atualização do material visual, em que as representações visuais do produto (Figura 17) foram atualizadas para refletir as modificações conceituais introduzidas pelas features substitutas, particularmente a inclusão de pictogramas na carcaça e a representação da arquitetura interna de direcionamento térmico. O instrumento foi revisado por 3 respondentes-piloto para verificar a clareza das novas hipóteses, sem necessidade de ajustes adicionais. O protocolo metodológico é descrito no Quadro 6.

Elemento	Descrição
Objetivo	Validar a aceitação percebida do segundo candidato a MVP (11 features, incluindo 3 substitutas) junto aos potenciais usuários
Público-alvo	Base de potenciais usuários estabelecida nas fases anteriores
Período de aplicação	24 de janeiro a 06 de fevereiro de 2026
Número de questões	11 (as 8 features aprovadas no Q4 + 3 novas hipóteses para as features substitutas)
Tipo de escala	Likert de 5 pontos (1 = "Discordo totalmente"; 5 = "Concordo totalmente")
Material visual	Representações visuais atualizadas do produto (Figura 17)
Forma de divulgação	Google Formulários, distribuído via redes sociais e correio eletrônico
Respostas obtidas	78 respostas válidas
Critério de aprovação	≥ 75% de respostas nos níveis 4 ou 5
Novas hipóteses	H1: "A resistência a variações de umidade garante a eficácia do produto em diferentes ambientes da casa." H2: "Uma arquitetura interna que orienta o calor para longe de pontos críticos é fundamental para permitir a contenção rápida do foco de incêndio." H3: "A presença de instruções em pictogramas gravados na carcaça assegura um manuseio intuitivo, mesmo em situações de emergência e estresse."

Quadro 6: Protocolo metodológico do instrumento Q5.

Fonte: Autoria própria (2026).



Figura 17: Designs apresentados junto ao Segundo candidato à MVP no Q5.
Fonte: Autoria própria (2026) com auxílio da ferramenta Gemini Flash.

Conforme a metodologia estabelecida, o segundo ciclo reavaliou o conceito completo (as 8 features mantidas e as 3 substitutas), uma vez que a introdução de novos elementos pode alterar a percepção global do arranjo. Os resultados são apresentados na Tabela 12. O N° associado a cada feature diz respeito a identificação da mesma na matriz morfológica da Tabela 9 do Capítulo 4.1.

Necessidade Priorizada	N° - Feature	Validação >75% (Sim/Não)
Confiabilidade em diferentes condições	1 - Estrutura selada com certificação IP	~90% (Sim)
Compatibilidade com a infraestrutura existente	2 - Instalação sem necessidade de ferramentas especializadas	~85% (Sim)
Tempo suficiente para evacuação segura	1 - Mecanismo rápido de contenção térmica	~83% (Sim)
Eficácia em diferentes ambientes da casa	2 - Resistência a variações de umidade	~81% (Sim)
Materiais resistentes ao fogo com certificações	1 - Certificação internacional de resistência ao fogo (UL/EN)	~89% (Sim)
Longa durabilidade	1 - Materiais externos resistentes a impactos e desgaste	~86% (Sim)

Garantia e suporte do fabricante	1 - QR Code para acesso à documentação	~78% (Sim)
Contenção rápida do foco de incêndio	3 - Arquitetura interna que orienta o calor para longe de pontos críticos	~79% (Sim)
Manuseio intuitivo em emergência, sob estresse	4 - Instruções em pictogramas gravados na carcaça	~83% (Sim)
Seguro para ambientes com crianças/animais	2 - Bordas arredondadas e sem partes expostas	~87% (Sim)
Silencioso quando inativo	3 - Sinalizações luminosas em vez de sonoras	~85% (Sim)

Tabela 12: Segundo candidato à MVP via Q5.
Fonte: Autoria própria (2026).

Os resultados do segundo ciclo indicaram que todas as 11 features atingiram o critério de aprovação de 75%, com índices variando entre 78% (QR Code para documentação) e 90% (Estrutura selada com certificação IP). A aprovação integral do arranjo encerra o ciclo iterativo e valida o conceito do MVP.

A análise das três features substitutas oferece aprendizados relevantes sobre o processo de refinamento: (a) "Resistência a variações de umidade" (81%, substituindo "Base antiderrapante" 66%): O ganho de 15 pontos percentuais confirma a interpretação de que "eficácia em diferentes ambientes" está associada, na percepção do usuário, à robustez ambiental do dispositivo (capacidade de funcionar em ambientes úmidos, secos, quentes) e não à aderência mecânica a superfícies. Essa substituição alinha a feature à lógica do segmento-alvo: usuários que recarregam dispositivos em quartos, cozinhas e escritórios necessitam de um produto que tolere as variações ambientais típicas desses espaços.

(b) "Arquitetura interna que orienta o calor para longe de pontos críticos" (79%, substituindo "Aberturas para expansão controlada" 58%): O ganho de 21 pontos percentuais é o mais expressivo do ciclo e corrobora a hipótese de que a rejeição anterior decorreu primariamente de um problema de comunicação da feature, e não de inadequação técnica. A formulação substituta transmite a ideia de contenção ativa e direcionamento controlado (conceitos que geram segurança no modelo mental do usuário sem treinamento especializado), enquanto "aberturas" evocava perda de contenção. Esse aprendizado tem implicações diretas para a comunicação do produto em fases futuras de marketing e embalagem.

(c) "Instruções em pictogramas gravados na carcaça" (83%, substituindo "Pontos de interação em cor de destaque" 69%): O ganho de 14 pontos percentuais sugere que o usuário

valoriza orientação funcional explícita (o que fazer em emergência) mais do que sinalização visual abstrata (onde interagir com o produto). Pictogramas gravados oferecem informação permanente, não dependente de condições de iluminação ou bateria, e comunicam instruções de uso universais, atributos particularmente relevantes para um dispositivo de segurança que poderá ser acionado em condições de estresse e baixa visibilidade.

Observa-se também que as features mantidas do primeiro ciclo apresentaram tendência de elevação nos índices de aceitação (por exemplo, "Estrutura selada" subiu de 86% para 90%; "Bordas arredondadas" de 88% para 87%; "Instalação sem ferramentas" de 81% para 85%). Essa tendência pode estar associada a dois fatores: (i) a melhoria percebida do conjunto global, com a substituição de features de menor aceitação, eleva a avaliação de todo o arranjo; e (ii) o aumento da amostra (de 64 para 78 respondentes) pode ter estabilizado os percentuais em torno de valores mais representativos.

4.3. Síntese Conclusiva da Fase de Projeto Conceitual

Features finais validadas: O MVP validado é composto por 11 features que, em conjunto, respondem às 11 necessidades priorizadas pelo segmento-alvo. O arranjo final combina features de quatro dimensões: Função (mecanismo de contenção térmica, arquitetura de direcionamento de calor), Qualidade (estrutura selada com certificação IP, resistência a umidade, materiais resistentes a impactos, certificação internacional UL/EN), Experiência (instalação sem ferramentas, QR Code para documentação, pictogramas gravados, sinalizações luminosas) e Estilo (bordas arredondadas e sem partes expostas), configurando um conceito equilibrado entre eficácia funcional e adequação ao uso doméstico. Todas as features atingiram índices de aceitação entre 78% e 90%, superando o limiar de 75% estabelecido como critério de validação de aceitação percebida.

Principais aprendizados do ciclo de substituição: O processo iterativo de validação revelou três aprendizados metodológicos e de projeto relevantes. Primeiro, a comunicação da feature é tão determinante quanto sua adequação técnica: a reformulação de "aberturas para expansão controlada" para "arquitetura que orienta calor para longe de pontos críticos" produziu o maior ganho de aceitação (+21 pontos percentuais), sem alteração da função técnica subjacente. Segundo, o modelo mental do usuário sem treinamento especializado frente a um dispositivo de segurança é orientado por conceitos de contenção e controle, rejeitando formulações que evoquem abertura, exposição ou escape. Terceiro, a orientação funcional explícita (pictogramas com instruções de uso) é mais valorizada que a sinalização

visual abstrata (cores de destaque), o que sugere que a comunicação do produto deve priorizar a clareza instrucional sobre o apelo estético.

Convergência do processo de geração e seleção: O Projeto Conceitual operou como um funil de convergência progressiva, partindo de 55 features candidatas (5 por necessidade na Matriz Morfológica) e chegando a 11 features validadas que compõem o escopo funcional do MVP. Essa convergência ocorreu em três estágios: (i) geração assistida por IA (55 features), (ii) seleção qualitativa para composição do primeiro candidato a MVP (11 features selecionadas), e (iii) refinamento iterativo por validação empírica junto aos clientes (2 ciclos, com substituição de 3 features). A taxa de aprovação no primeiro ciclo (72,7%, ou 8 de 11 features) e a aprovação integral no segundo ciclo (100%) indicam que a combinação entre geração assistida por IA, curadoria humana e validação empírica constitui um protocolo eficaz para a convergência de conceitos em contextos de alta incerteza mercadológica.

Conexão com as fases seguintes do PDP: As 11 features validadas constituem o escopo funcional do MVP final, que será detalhado tecnicamente na fase de Projeto Detalhado. Essa fase deverá incluir: (a) especificações de materiais, isto é, seleção de compósitos cerâmicos e polímeros retardantes de chama compatíveis com as certificações UL e EN identificadas no Capítulo 2, dimensionamento da estrutura selada (certificação IP) e especificação dos revestimentos anticorrosão e anti-UV; (b) dimensionamento e tolerâncias, isto é, definição das dimensões externas compatíveis com os padrões de tomadas e extensões comerciais brasileiras (NBR 14136), especificação de tolerâncias para os mecanismos de encaixe sem ferramentas e projeto da base adaptável a diferentes superfícies domésticas; (c) testes de resistência ao fogo e contenção térmica, isto é, ensaios experimentais segundo os protocolos UL 9540A e IEC 62619 para validar a eficácia do mecanismo de contenção, do direcionamento térmico e da dissipação controlada; e (d) certificações de segurança, isto é, obtenção das certificações nacionais (INMETRO) e internacionais necessárias para a comercialização do produto. Na fase subsequente de Preparação da Produção, o projeto deverá ser otimizado para manufacturabilidade, considerando processos de fabricação escaláveis e custos compatíveis com o mercado de consumo doméstico.

5. CONCLUSÕES E APRENDIZADOS

Este trabalho resultou no desenvolvimento e validação de um conceito de Produto Mínimo Viável (MVP) para um dispositivo ignífugo de uso pessoal destinado à contenção de eventos de fuga térmica em baterias de íons de lítio. O processo foi estruturado em cinco instrumentos de coleta de dados sequenciais (Q1 a Q5), conduzidos ao longo de quatro meses, envolvendo um total de 263 respostas válidas acumuladas. O segundo candidato a MVP, composto por 11 features, apresentou índices de aprovação entre 78% e 90% junto a 78 respondentes, superando o limiar de aceitação de 75% em todos os atributos avaliados.

5.1. Resultados e Contribuições

A revisão da literatura permitiu estabelecer que os incidentes envolvendo fuga térmica em baterias de íons de lítio podem alcançar temperaturas superiores a 500 °C, com liberação de compostos gasosos inflamáveis e tóxicos, e elevado risco de re-ignição. A análise comparativa das tecnologias de contenção existentes, tanto sistemas ativos (extintores de água aditivada, dispersões aquosas de vermiculita, aerossóis de compostos sólidos) quanto passivos (mantas de fibra de vidro, invólucros rígidos, materiais de mudança de fase e aerogéis), evidenciou uma lacuna significativa: as soluções comerciais disponíveis concentram-se predominantemente em aplicações industriais, automotivas e em sistemas estacionários de armazenamento de energia, sem equivalente direcionado ao usuário doméstico. Essa lacuna constitui a justificativa central do trabalho e delimitou o espaço de inovação explorado.

A fase de Projeto Informacional gerou resultados quantitativos expressivos. O instrumento Q1 (n = 61) caracterizou o segmento-alvo como usuários entre 18 e 49 anos, predominantemente do sexo feminino (67%), que utilizam em média 2,5 dispositivos simultâneos e realizam a carga principalmente em ambientes domésticos, com 34,8% dos respondentes reportando o quarto como local habitual de recarga. Esse perfil explicita o caráter dos riscos: usuários sem treinamento especializado, expostos a eventos de fuga térmica em ambientes de repouso, sem acesso a equipamentos de proteção especializados. O Q2 (n = 52) submeteu 46 hipóteses de necessidades à validação, das quais 26 atingiram o limiar de 75% de concordância (taxa de conversão de 56,5%). O Q3 (n = 68) aplicou critério mais restritivo ($\geq 87,5\%$), priorizando 11 das 26 necessidades validadas, correspondendo a uma taxa de conversão global de 23,9% a partir das 46 hipóteses originais.

As 11 necessidades priorizadas, ordenadas por percentual de concordância no Q3, foram: Confiabilidade em diferentes condições, como umidade, poeira e calor (95,6%); Compatibilidade com a infraestrutura existente (94,8%); Tempo suficiente para evacuação

segura (92,6%); Materiais resistentes ao fogo com certificações (90,8%); Garantia e suporte do fabricante (90,2%); Contenção rápida do foco de incêndio (90,0%); Longa durabilidade (89,4%); Segurança em ambientes com crianças e animais (88,8%); Eficácia em diferentes ambientes da casa (88,2%); Manuseio intuitivo em emergência, sob estresse (88,0%); e Silencioso quando inativo (87,6%). Nota-se que “Reduzir ativamente o risco de incêndio”, que atingiu 98,1% no Q2, não integrou o conjunto priorizado no Q3, pois os usuários a tratam como pré-requisito óbvio do produto e não como diferencial de valor percebido.

Na fase de Projeto Conceitual, uma matriz morfológica com 55 features para as 11 necessidades priorizadas foi construída. O primeiro candidato a MVP (Q4, n = 64) apresentou três features rejeitadas: “Base antiderrapante para diferentes superfícies” (66%), “Aberturas projetadas para expansão controlada” (58%) e “Pontos de interação em cor de destaque ou brilho no escuro” (69%). A análise das rejeições revelou um padrão comum: às três features apresentavam lacuna de comunicabilidade entre a solução técnica proposta e o modelo mental do usuário sem treinamento especializado. Em especial, “Aberturas para expansão controlada” obteve a menor aceitação de todo o estudo (58%), pois a ideia de abertura em um produto de contenção evoca perda de segurança, ainda que tecnicamente a feature se referisse a ventilação controlada contra pressurização. As três features foram substituídas por alternativas conceituais reformuladas, preservando a função técnica com formulações compatíveis com a percepção de segurança do usuário.

O segundo candidato a MVP (Q5, n = 78) obteve aprovação integral: todas as 11 features superaram o limiar de 75%, com índices entre 78% (QR Code para documentação) e 90% (Estrutura selada com certificação IP). Os ganhos de aceitação das features substituídas foram expressivos: “Resistência a variações de umidade” atingiu 81% (+15 pontos percentuais em relação à base antiderrapante); “Arquitetura interna que orienta o calor para longe de pontos críticos” atingiu 79% (+21 pontos percentuais, o maior ganho do ciclo); e “Instruções em pictogramas gravados na carcaça” atingiu 83% (+14 pontos percentuais). Além disso, as oito features mantidas do primeiro ciclo apresentaram tendência de elevação nos índices de aceitação, evidenciando que a melhoria do arranjo global elevou a percepção de valor de cada feature individualmente.

Do ponto de vista técnico, o trabalho contribuiu para o princípio do desenvolvimento de soluções de segurança preventiva no uso doméstico de tecnologias baseadas em baterias de íons de lítio ao propor um conceito de dispositivo ignífugo integralmente orientado ao usuário final. A análise comparativa das tecnologias de contenção existentes, organizadas nas categorias de sistemas ativos e passivos, evidencia que a adaptação dessas tecnologias ao

contexto doméstico exige não apenas ajustes de portabilidade e custo, mas uma reordenação das prioridades de projeto: a confiabilidade operacional autônoma e a usabilidade sob estresse emergem como requisitos de projeto tanto quanto a eficácia térmica. Esse reposicionamento é uma contribuição conceitual relevante para o campo da segurança preventiva em eletrônicos de consumo.

Do ponto de vista metodológico, o trabalho demonstra a viabilidade de integrar o processo de desenvolvimento de produtos tradicional com a lógica da metodologia ágil de ciclos Build-Measure-Learn (Ries, 2011), aplicando-se uma metodologia ágil de desenvolvimento de produtos para a concepção de produtos inovadores sem precedente direto no mercado. A aplicação dessa abordagem eliminou a necessidade de prototipagem física nas fases iniciais, desenvolvidas no trabalho, permitindo a validação de uma versão conceitual do produto mínimo com base em descrições textuais e representações visuais geradas, o que reduziu o tempo e o investimento de recursos em um contexto de alta incerteza. A estrutura sequencial do PDP, garantiu a progressividade lógica das decisões: fase de projeto informacional, com a segmentação até a priorização, e fase de projeto conceitual da geração de features à validação do MVP. Essa complementaridade documentada em cinco ciclos quantitativos de interação no formato de questionários, com amostra acumulada de 263 respondentes, constitui um protocolo metodológico transferível a outros contextos de desenvolvimento de produtos de baixo custo.

5.2. Aprendizados Metodológicos

Os principais aprendizados metodológicos deste trabalho referem-se à utilização do método ágil de desenvolvimento de produtos baseado em ciclos iterativos de validação, como o processo de avaliação sucessiva das features demonstrou que pequenas alterações nas características do produto podem gerar mudanças significativas na percepção de valor pelos usuários. A importância da distinção entre validar a relevância de uma necessidade (Q2 e Q3) e validar a adequação de uma feature proposta para atendê-la (Q4 e Q5). Os resultados obtidos mostraram que uma feature técnica coerente pode ser rejeitada quando sua formulação não comunica o benefício esperado na linguagem do modelo mental do usuário. O caso mais expressivo foi o da feature “Aberturas projetadas para expansão controlada” (58%), que, em termos de engenharia, respondia adequadamente à necessidade de contenção rápida; porém, o termo “abertura” em um dispositivo de contenção evocou no usuário sem treinamento especializado a idéia de perda de barreira, resultando em rejeição. Sua substituta, “Arquitetura interna que orienta o calor para longe de pontos críticos”, preservou a função técnica com

uma formulação que transmite controle ativo (+21 p.p.). Esse padrão implica que, nas fases de Projeto Detalhado e Preparação da Produção, cada decisão técnica deverá ser acompanhada de uma análise de comunicabilidade do benefício ao usuário final.

Um segundo aprendizado refere-se à hierarquia de necessidades revelada pelo processo iterativo de priorização. A necessidade “Reduzir ativamente o risco de incêndio” alcançou 98,1% de concordância no Q2, mas não foi priorizada no Q3, indicando que os usuários a classificam como fator higiênico: obrigatória para o produto existir, mas insuficiente para diferenciá-lo. Simultaneamente, “Silencioso quando inativo” (87,6%) integrou o conjunto priorizado, evidenciando que a experiência de uso em modo de espera, e não apenas em emergência, é condicionante para a aceitação de longo prazo. Esse resultado é coerente com o perfil identificado no Q1, que indica 34,8% dos respondentes carregando dispositivos no quarto, ambiente em que ruídos indesejados seriam particularmente intolerados.

Um terceiro aprendizado diz respeito ao efeito de arranjo na validação de features. As oito features mantidas do primeiro ciclo apresentaram tendência de elevação dos índices de aceitação no segundo ciclo; por exemplo, “Estrutura selada com certificação IP” subiu de 86% para 90% e “Instalação sem ferramentas” subiu de 81% para 85%. Esse fenômeno sugere que a percepção de cada feature individual é influenciada pela qualidade percebida do arranjo como um todo, o que reforça a importância de avaliar o produto de forma sistêmica, e não feature a feature de forma isolada. Por fim, a utilização de representações visuais geradas por IA generativa junto aos formulários Q4 e Q5 demonstrou contribuir para a consistência das avaliações dos respondentes, viabilizando uma validação conceitual fundamentada sem o custo e o tempo de uma prototipagem física.

5.3. Limitações do Trabalho

A principal limitação deste trabalho é inerente ao seu escopo metodológico: a validação conduzida é de natureza perceptual e declaratória, não técnica ou experimental. Os respondentes avaliaram features com base em descrições textuais e representações visuais, não em interação com protótipos funcionais. Isso significa que os resultados atestam que as features são desejáveis e percebidas como relevantes pelo público-alvo, mas não comprovam: (a) a eficácia técnica das soluções propostas em condições reais de fuga térmica; (b) a viabilidade construtiva dentro de restrições de custo e manufatura; ou (c) a conformidade com os padrões normativos aplicáveis (IEC 62133, UL 9540A, entre outros identificados na revisão da literatura). Essas dimensões de validação técnica, econômica e regulatória são de

competência das fases de Projeto Detalhado e Prototipagem, cuja ausência neste trabalho constitui uma limitação intencional e metodologicamente justificada pelo escopo do TCC.

Uma segunda limitação refere-se ao tamanho e à diversidade da amostra. Os respondentes foram recrutados predominantemente por conveniência via redes sociais e correio eletrônico a partir da rede de contatos do pesquisador, o que pode introduzir viés de seleção e limitar a representatividade nacional dos resultados. Embora os tamanhos amostrais sejam compatíveis com as práticas de validação conceitual na literatura de desenvolvimento de produtos, a generalização dos resultados para segmentos com perfis socioeconômicos e culturais distintos dos identificados no Q1 deve ser feita com cautela.

5.4. Sugestões para trabalhos futuros

A etapa imediatamente subsequente do PDP consiste na realização do Projeto Detalhado, em que as 11 features validadas no MVP deverão ser traduzidas em especificações técnicas completas. Essa tradução inclui, entre outros aspectos: seleção de materiais capazes de suportar temperaturas superiores a 500 °C e resistência à projeção de partículas incandescentes, em conformidade com as normas IEC 62133-2 e UL 9540A identificadas na fundamentação teórica; dimensionamento estrutural do invólucro e dos mecanismos de direção térmica interna; e definição das especificações dos sistemas de sinalização. A partir dessas especificações, torna-se necessária a construção de protótipos físicos para avaliação experimental em ensaios de exposição a altas temperaturas, resistência mecânica, contenção de chamas e liberação de gases.

Adicionalmente, a modelagem térmica computacional do comportamento do dispositivo durante eventos de fuga térmica, incluindo simulações da arquitetura interna de direcionamento de calor validada no MVP, representa uma via promissora para orientar decisões de projeto antes da prototipagem física. Estudos futuros também poderiam ampliar o alcance da validação com usuários, incorporando metodologias qualitativas, testes de usabilidade em cenários simulados de emergência e amostras mais diversificadas regionalmente, de modo a verificar a robustez das preferências identificadas frente a variações culturais e socioeconômicas.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16976: Acumuladores chumbo-ácido estacionários, Requisitos de segurança e métodos de ensaio para sistemas de armazenamento de energia. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- AKAO, Yoji. Quality function deployment: integrating customer requirements into product design. Cambridge: Productivity Press, 1990.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM C1055-20: Standard Guide for Heated System Surface Conditions that Produce Contact Burn Injuries. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.
- BACK, Nelson; OGLIARI, André; DIAS, Acires; SILVA, Jonny Carlos. Projeto de produtos: métodos e metodologias. Barueri: Manole, 2008.
- BEYLER, C. L. Fire Hazard Assessment. In: HURLEY, M. J.; GOTTUK, L. HALL, J. R. Jr; HARADA, K. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 5. ed. Gaithersburg: Springer, 2016. p. 2955-299.
- BLANK, S. The Four Steps to the Epiphany: Successful Strategies for Products that Win. 2. ed. Pescadero: K&S Ranch, 2013.
- BLUEFIELD PROCESS SAFETY. Thermal Safety and Burn Thresholds: Understanding ASTM C1055. [S. l.], 2023.
- BUGRYNIEC, Peter J.; RESENDIZ, Erik G.; NWOPHOKE, Solomon M.; KHANNA, Simran; JAMES, Charles; BROWN, Solomon F. Review of gas emissions from lithium-ion battery thermal runaway failure: considering toxic and flammable compounds. Journal of Energy Storage, v. 87, art. 111288, 2024. DOI: 10.1016/j.est.2024.111288.
- DAI, Yixin; PANAH, Aidin. Thermal runaway process in lithium-ion batteries: a review. Next Energy, v. 6, art. 100186, jan. 2025. DOI: 10.1016/j.nxener.2024.100186.
- DOUGHTY, Dan H.; ROTH, E. Peter. A General Discussion of Li Ion Battery Safety. The Electrochemical Society Interface, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 37-44, 2012.
- FENG, Xuning; OLUWASEYI, Omid; HE, Xiaodong; OOMMEN, Thomas; LU, Languang; XUE, Qing; ZHANG, Xiong; O'KANE, Simon; OTHERS. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. Energy Storage Materials, v. 10, p. 246-267, 2018.
- FORCELLINI, Fernando Antônio. Gestão do processo de desenvolvimento de produtos. Apostila da disciplina EMC 5240. Florianópolis: UFSC, 2021.
- FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. Lithium-Ion Battery Market Size, Share & Industry Analysis, 2025-2032. Pune: Fortune Business Insights, 2025. Disponível em: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/lithium-ion-battery-market-100123>.
- FU, Wenduo; SUN, Shiqi; WANG, Bo. An overview of lithium-ion battery safety: existing problems and potential solutions. E3S Web of Conferences, v. 606, art. 02010, 2025. DOI: 10.1051/e3sconf/202560602010.

GAO, Xinyi; WANG, Zhenpo; ZHOU, Xuening; YUAN, Weifeng; WANG, Cheng. Experimental study on fire extinguishing of lithium-ion batteries by alternating synergistic strategies of water mist and liquid nitrogen under low-temperature conditions. *Journal of Energy Storage*, v. 134, art. 117986, 2025. DOI: 10.1016/j.est.2025.117986.

GARCIA, Vilson. Concepção, análise e implementação de um sistema de gerenciamento para baterias de íon lítio, com monitoramento de forma remota. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/222222>.

GHIJI, Mohammadmahdi; NOVOZHILOV, Vasily; MOINUDDIN, Khalid; JOSEPH, Paul; BURCH, Ian; SUENDERMANN, Brigitta; GAMBLE, Grant. A review of lithium-ion battery fire suppression. *Energies*, v. 13, n. 19, art. 5117, 2020. DOI: 10.3390/en13195117.

GHIJI, Mohammadmahdi; BURCH, Ian; SUENDERMANN, Brigitta; GAMBLE, Grant; NOVOZHILOV, Vasily; JOSEPH, Paul; MOINUDDIN, Khalid. Lithium-ion battery fire suppression using water mist systems. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, v. 17, p. 1-8, 2021. DOI: 10.5098/hmt.17.13.

GLASER, Barney G.; STRAUSS, Anselm L. *The discovery of grounded theory: strategies for qualitative research*. New Brunswick: Aldine Transaction, 2006.

GM INSIGHTS. *Lithium-Ion Battery Market Size, Growth Outlook 2025-2034*. Selbyville: Global Market Insights, 2025. Disponível em: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/lithium-ion-battery-market>.

GOLUBKOV, A. W. et al. Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivine-type cathodes. *RSC Advances*, [s. l.], v. 4, n. 7, p. 3633-3642, 2014.

GOODENOUGH, John B.; PARK, Kyu-Sung. The Li-ion rechargeable battery: a perspective. *Journal of the American Chemical Society*, v. 135, n. 4, p. 1167-1176, 2013.

HAOYANG, Liu; JIAN, Li. Study on extinguishing performance and suppression mechanism of thermal runaway combustible gas flame of lithium battery by NH₄H₂PO₄ water mist. *Case Studies in Thermal Engineering*, v. 71, art. 106208, 2025. DOI: 10.1016/j.csite.2025.106208.

INERIS. *Summary of work on extinguishing Li-ion batteries fires of electric vehicles*. Verneuil-en-Halatte: INERIS, 2024. Disponível em: <https://www.ineris.fr/en/summary-work-extinguishing-li-ion-batteries-fires-electric-vehicles>.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 62133-2: 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*. Genebra: IEC, 2017.

LINDEN, David; REDDY, Thomas B. *Handbook of Batteries*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2002.

MANICA, Lucas Augusto. Análise numérica de sistemas de gerenciamento térmico de baterias para veículos elétricos. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/248347>.

MARKET.US. Lithium-ion Battery Market Report, 2025. [S.l.]: Market.us, 2025. Disponível em: <https://market.us/report/lithium-ion-battery-market/>.

MARTHENDAL, Gabriel Borges. Análise de modos de falha e efeitos de uma célula de lítio-íon em aplicação na equipe de competição Fórmula CEM. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/232565>.

MCKINSEY & COMPANY. Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular. McKinsey & Company, 2023. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/battery-2030-resilient-sustainable-and-circular>.

MEI, Wenxin; LIU, Zhi; WANG, Chengdong; WU, Chuang; LIU, Yubin; LIU, Pengjie; XIA, Xudong; XUE, Xiaobin; HAN, Xile; SUN, Jinhua; XIAO, Gaozhi; TAM, Hwa-Yaw; ALBERT, Jacques; WANG, Qingsong; GUO, Tuan. Operando monitoring of thermal runaway in commercial lithium-ion cells via advanced lab-on-fiber technologies. *Nature Communications*, v. 14, art. 5251, 2023. DOI: 10.1038/s41467-023-40995-3.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. NFPA 855: Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems. Quincy, MA: NFPA, 2023.

NILSSON, Elna J. K.; ANDERSSON, Petra; RASMUSSEN, Maria; ANDERSSON, Fredrik; JOHANSSON, Petra; CHRISTENSEN, Paul A. Gas emissions from lithium-ion batteries: a review of measurements, mechanisms, and mitigation. *Batteries*, v. 10, n. 12, art. 443, 2024. DOI: 10.3390/batteries10120443.

NORMAN, Donald A. *The Design of Everyday Things: Revised and Expanded Edition*, O design do dia a dia. Tradução de Ana Deiró. Ed. Revisada e expandida. New York: Basic Books; Rio de Janeiro: Rocco, 2013.

OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION (OSHA). *Lithium Battery Safety Guide*. Washington, DC: U.S. Department of Labor, 2024.

OUYANG, Dongxu; CHEN, Mingyi; HUANG, Jian; WENG, Jingwen; WANG, Zhirong; WANG, Jian. Characteristics and mechanisms of as well as evaluation methods and countermeasures for thermal runaway propagation in lithium-ion batteries. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 108, art. 101209, 2025. DOI: 10.1016/j.pecs.2025.101209.

OUYANG, Dongxu; HU, Jiajun; CHEN, Mingyi; HUANG, Jian; WANG, Zhirong. Thermal runaway and flame propagation of lithium-ion battery in confined spaces: experiments and simulations. *Journal of Energy Storage*, v. 80, art. 116154, 2025. DOI: 10.1016/j.est.2025.116154.

PATTON, Michael Quinn. *Qualitative research & evaluation methods: integrating theory and practice*. 4th ed. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2015.

PESSÔA, Marcelo Schneck de Paula; LOUREIRO, Guilherme. Reengineering the product development process: a new approach for a new market. *Journal of Integrated Design and Process Science*, v. 10, n. 4, p. 47-61, 2006.

PUGH, Stuart. *Total design: integrated methods for successful product engineering*. Wokingham: Addison-Wesley, 1991.

RIES, Eric. *The lean startup: how today's entrepreneurs use continuous innovation to create radically successful businesses*. New York: Crown Business, 2011.

ROZENFELD, Henrique; FORCELLINI, Fernando Antônio; AMARAL, Daniel Capaldo; TOLEDO, José Carlos de; SILVA, Sérgio Luís da; ALLIPRANDINI, Dário Henrique; SCALICE, Régis Kovacs. *Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo*. São Paulo: Saraiva, 2006.

THOMKE, S.; REINERTSEN, D. Six Myths of Product Development. *Harvard Business Review*, v. 90, n. 5, p. 84-94, 2012.

UL STANDARDS & ENGAGEMENT. Thermal Runaway Incident Program (TRIP), Program overview and data hub. Northbrook: UL Standards & Engagement, 2025a. Disponível em: <https://www.batteryfiresafety.org/trip>.

UL STANDARDS & ENGAGEMENT. Aviation lithium battery incidents, data & guidance. Northbrook: UL Standards & Engagement, 2025b. Disponível em: <https://www.batteryfiresafety.org/aviation>.

ULRICH, Karl T.; EPPINGER, Steven D. *Product design and development*. 6th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015.

UNDERWRITERS LABORATORIES. UL 1642: Standard for Lithium Batteries. Northbrook, IL: UL, 2020.

UNDERWRITERS LABORATORIES. UL 9540A: Test Method for Evaluating Thermal Runaway Fire Propagation in Battery Energy Storage Systems. 5. ed. Northbrook, IL: UL, 2025.

WANG, Haitao; XU, Hao; ZHANG, Zheng; WANG, Qing; JIN, Chaojie; WU, Chaozhong; XU, Chengshan; HUO, Yan; JIAN, Xuning. Performance of low-pressure dual-fluid water mist to suppress lithium-ion battery thermal runaway fires. *BoHrium (Fire Science & Technology)*, Beijing, 2023. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0520.

WANG, Kuo; OUYANG, Dongxu; QIN, Peng; LIU, Yue; HUANG, Qionqiong; CHEN, Mingyi; WANG, Jian. Early warning method and fire extinguishing technology of lithium-ion battery thermal runaway: a review. *Energies*, v. 16, n. 7, art. 2960, 2023. DOI: 10.3390/en16072960.

XU, Bin; LEE, Jeevan; KWON, Dongkoo; KONG, Lingxi; PECHT, Michael. Mitigation strategies for Li-ion battery thermal runaway: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 143, art. 111437, 2021. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111437.

YUAN, Shuai; FENG, Genggeng; WANG, Xianjia; YU, Tongtong; PENG, Qiming; ZUO, Xin; ZHANG, Jianrui. A review of fire-extinguishing agent on suppressing lithium-ion batteries fire. *Journal of Energy Chemistry*, v. 61, p. 29-45, 2021. DOI: 10.1016/j.jechem.2021.03.031.

ZHANG, Li; JIN, Kai; SUN, Jinhua; WANG, Qingsong. A review of fire-extinguishing agents and fire suppression strategies for lithium-ion batteries fire. *Fire Technology*, v. 58, p. 817-858, 2022. DOI: 10.1007/s10694-022-01278-3.

ZHAO, Junchao; ZHANG, Zhenpo; GUO, Pengfei; DU, Xiaoxiao. A comparative study on the thermal runaway inhibition of 18650 lithium-ion batteries by different fire extinguishing agents. *iScience*, v. 24, n. 10, art. 102854, 2021. DOI: 10.1016/j.isci.2021.102854.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Questionário Segmento de Clientes (Q1)

Pergunta 1: Quais destes dispositivos eletrônicos você possui e utiliza com frequência em sua rotina pessoal?

Para essa pergunta o estilo de resposta possível era no formato de Caixa de Seleção, possibilitando múltiplas seleções, com as seguintes possíveis respostas:

Celular;

Notebook / Laptop;

Tablet / iPad;

Smartwatch / Anel inteligente / Pulseira inteligente;

Fones de ouvido sem fio;

Power Bank (Carregador portátil);

Cigarro eletrônico / Vape;

Patinete elétrico, bicicleta elétrica ou hoverboard;

Drones ou equipamentos de radiomodelismo;

Aparelho de saúde com bateria (Audição/Respiração);

Outro:

Pergunta 2: Com que frequência você deixa seus dispositivos carregando sem supervisão (ex: quando sai de casa ou enquanto dorme)?

Para essa pergunta o estilo de resposta possível era no formato de múltipla escolha, com apenas uma resposta possível, com as seguintes possíveis respostas:

Sempre (toda noite/todo dia);

Frequentemente (algumas vezes na semana);

Raramente (só quando esqueço);

Nunca (só carrego quando estou por perto e acordado)

Pergunta 3: Pensando no dispositivo eletrônico que você mais usa, onde ele costuma ficar enquanto carrega à noite?

Para essa pergunta o estilo de resposta possível era no formato de múltipla escolha, com apenas uma resposta possível, com as seguintes possíveis respostas:

No quarto, sobre a cama ou móvel de cabeceira enquanto durmo.;

Na sala, em cima do sofá ou móvel de madeira.;

No escritório/mesa de trabalho.;

No banheiro.;

Na cozinha/área de serviço.;

Eu não costumo deixar carregando enquanto durmo.;

Outro:

Pergunta 4: Além de você, quem mais vive na sua residência?

Para essa pergunta o estilo de resposta possível era no formato de Caixa de Seleção, possibilitando múltiplas seleções, com as seguintes possíveis respostas:

Animais de estimação (cães, gatos, etc.);

Outros adultos;

Crianças (0 a 12 anos);

Adolescentes (12 a 17 anos);

Idosos;

Moro sozinho(a).

Pergunta 5: Você já presenciou alguma destas situações com a bateria de um dispositivo eletrônico?

Para essa pergunta o estilo de resposta possível era no formato de Caixa de Seleção, possibilitando múltiplas seleções, com as seguintes possíveis respostas:

O equipamento esquentou tanto que ficou difícil de segurar ou desligou sozinho.;

A bateria estufou, deformando o aparelho.;

Presença de fumaça ou cheiro forte de queimado saindo de um dispositivo com bateria.;

O aparelho pegou fogo ou soltou faíscas espontaneamente.;

Não presenciei, mas conheço pessoas que passaram por isso.;

Nunca presenciei nem ouvi falar de nenhuma dessas situações.;

Outro:

Pergunta 6: Você conhece pessoas que tem medo de utilizar o dispositivo eletrônico durante o carregamento?

Para essa pergunta o estilo de resposta possível era no formato de múltipla escolha, com apenas uma resposta possível, com as seguintes possíveis respostas:

Sim, conheço.

Sim, conheço e sou uma dessas pessoas.

Não conheço.

Outro:

Pergunta 7: O quanto você se preocupa com a possibilidade de um incêndio começar na sua casa por causa de um dispositivo eletrônico equipado com bateria?

Para essa pergunta o estilo de resposta possível era no formato de múltipla escolha, com apenas uma resposta possível, com as seguintes possíveis respostas:

- 1 - Não me preocupo nem um pouco.;
- 2 - Me preocupo pouco.;
- 3 - As vezes tenho medo/preocupação.;
- 4 - Tenho medo.;
- 5 - Tenho muito medo disso acontecer.

Pergunta 8: Você estaria interessado(a) em ajudar a desenvolver um novo produto para impedir a propagação de um incêndio em baterias em estado de fuga térmica?

Para essa pergunta o estilo de resposta possível era no formato de múltipla escolha, com apenas uma resposta possível, com as seguintes possíveis respostas:

- Tenho interesse, acredito que seja um problema.;
- Não possuo interesse, não vejo a necessidade.

APÊNDICE B - Lista de Hipóteses de Necessidades

1. Se o produto funcionar com diferentes tipos de baterias (celulares, notebooks, etc.), então o usuário terá mais conveniência e economia.
2. Se o produto for compatível com a infraestrutura atual (tomadas, extensões), então a adoção pelo usuário será mais fácil e imediata.
3. Se o produto não atrapalhar outros equipamentos de segurança (detectores de fumaça), então o usuário manterá a confiabilidade do seu ecossistema de segurança.
4. Se o produto se integrar a sistemas de casa inteligente (apps, assistentes), então o usuário terá maior controle e monitoramento remoto.
5. Se o produto comportar múltiplos dispositivos carregando ao mesmo tempo, então ele trará mais praticidade ao usuário.
6. Se o produto funcionar bem em diferentes ambientes (garagem, quarto), então ele atenderá às diversas necessidades de recarga do usuário.
7. Se o produto reduzir o risco de incêndio ao recarregar baterias, então o usuário se sentirá mais seguro e tranquilo em sua casa.
8. Se o produto contiver o incêndio sem se espalhar para objetos próximos, então os danos materiais e o risco à vida serão reduzidos.
9. Se o produto ganhar tempo suficiente para agir ou evacuar com segurança, então a segurança pessoal dos moradores aumentará.

10. Se a solução funcionar mesmo sem energia elétrica, então a proteção mais confiável.
11. Se o funcionamento não gerar gases ou resíduos perigosos, então o ambiente permanecerá mais seguro para os ocupantes após o incidente.
12. Se o usuário perceber de imediato que um incêndio está ocorrendo (via alarme), então ele poderá tomar uma atitude mais rápida.
13. Se a solução avisar claramente se é de uso único ou múltiplo, então o usuário saberá exatamente quando precisa substituí-la.
14. Se o manuseio for seguro após um incidente (sem risco de queimaduras), então o usuário poderá remover o dispositivo danificado sem se ferir.
15. Se o produto reduzir a fumaça e a fuligem, então a limpeza pós-incidente será mais fácil e os danos secundários serão menores.
16. Se o produto evitar odores fortes ou persistentes após a contenção, então o ambiente ficará habitável mais rapidamente.
17. Se o produto contiver o foco de incêndio o mais rápido possível, então a chance de a bateria explodir ou o fogo se alastrar será minimizada.
18. Se o produto puder ser instalado sem ferramentas especiais nem ajuda técnica, então mais pessoas poderão utilizá-lo corretamente.
19. Se o usuário entender como usar o produto sem ler um manual extenso, então a chance de uso correto será maior.
20. Se o usuário puder ver rapidamente o status (pronto/ativo/manutenção), então ele terá mais confiança e tranquilidade diária.
21. Se a solução não complicar a rotina de carga diária, então a adesão ao uso do produto será maior.
22. Se o produto ocupar pouco espaço e caber onde o usuário costuma carregar os dispositivos, então ele será mais facilmente integrado ao ambiente doméstico.
23. Se o produto puder ser movido facilmente entre cômodos, então o usuário terá mais flexibilidade de uso.
24. Se o produto tiver um ponto de pega claro (alça/aba), então o usuário poderá removê-lo do local com mais segurança em caso de emergência.
25. Se o produto for silencioso quando inativo (sem ruídos), então ele não será um incômodo em ambientes de descanso, como o quarto.
26. Se o alerta audível/visível for suficiente à distância, então o usuário será notificado mesmo se estiver em outro cômodo.

27. Se o produto for intuitivo mesmo sob estresse, então a chance de o usuário agir corretamente durante um incêndio aumenta.
28. Se o usuário souber claramente quando o produto não está mais em condições de uso (vencimento), então ele poderá substituí-lo preventivamente.
29. Se a manutenção do produto for simples, então o usuário manterá o produto em condições ideais de uso por mais tempo.
30. Se eventuais refis forem fáceis de encontrar, então a vida útil do produto principal será prolongada.
31. Se o produto tiver garantia e suporte claros do fabricante, então o usuário terá mais confiança na compra.
32. Se o usuário puder ver evidências científicas de eficácia (dados de teste, certificações) antes de comprar, então ele se sentirá mais seguro sobre a qualidade da solução.
33. Se o produto funcionar de forma confiável em diferentes condições (umidade, poeira, calor), então ele será adequado para diversos ambientes.
34. Se peças de reposição estiverem disponíveis, então o produto será visto como um investimento de longo prazo.
35. Se houver assistência técnica próxima para dúvidas ou reparos, então o usuário se sentirá mais amparado no pós-venda.
36. Se a limpeza após um evento de incêndio for simples, então o transtorno geral causado pelo incidente será menor.
37. Se o descarte ao fim da vida útil for ambientalmente correto, então o usuário com consciência ecológica ficará mais satisfeito com a compra.
38. Se o custo total do produto couber no orçamento do usuário, então a barreira financeira para a adoção da segurança será baixa.
39. Se o produto estiver em conformidade com regras (condomínio, seguradora, normas vigentes), então o usuário evitará problemas legais ou contratuais.
40. Se os materiais do produto forem resistentes ao fogo e certificados, então a confiança na eficácia da contenção será maior.
41. Se o produto for durável e evitar trocas frequentes, então o usuário perceberá um melhor custo-benefício a longo prazo.
42. Se o produto utilizar materiais com menor impacto ambiental, então ele atrairá consumidores preocupados com a sustentabilidade.

43. Se o produto for seguro para casas com crianças e/ou animais, então ele poderá ser usado por famílias sem preocupação.
44. Se as instruções forem em linguagem simples e multilíngue, então a chance de instalação e uso corretos aumenta globalmente.
45. Se o produto puder ser transportado com facilidade (inclusive em viagens), então o usuário poderá manter sua segurança onde quer que vá.
46. Se o produto tiver um design discreto que combine com a decoração da casa, então o usuário não hesitará em deixá-lo visível e acessível.

APÊNDICE C - Conversão de Hipóteses em Perguntas

Prompt: "Estou trabalhando em uma pesquisa para validação de requisitos de um produto diretamente com os clientes. Preciso que você me ajude a transformar cada uma das 46 hipóteses de necessidades (que estão no formato 'Se/então') em uma tabela contendo uma pergunta para cada uma das hipóteses. A pergunta a ser formulada deve ser capaz de ser validada em um questionário utilizando a escala Likert de 1 a 5, onde 1 = Nem um pouco importante e 5 = Extremamente importante. A lista de hipóteses é a seguinte: (...)”

APÊNDICE D - Perguntas Formuladas para as Hipóteses de Necessidades

1. Quão importante é para você que a solução seja compatível com diferentes tipos de baterias, como as de celulares, notebooks e outros dispositivos?
2. Você considera importante que o produto funcione perfeitamente com as tomadas, extensões e carregadores que você já utiliza?
3. É importante para você que o funcionamento do produto não cause interferência ou falsos alarmes em outros equipamentos de segurança, como detectores de fumaça?
4. Você considera importante que a solução possa ser integrada ao seu sistema de casa inteligente (por exemplo, via aplicativo ou assistente virtual)?
5. Quão importante é que o produto permita o carregamento seguro de múltiplos dispositivos simultaneamente?
6. É importante para você que o produto seja eficaz em diferentes ambientes da sua casa, como garagem, escritório ou quarto?
7. Você considera fundamental que a principal função do produto seja reduzir ativamente o risco de incêndio durante a recarga de baterias?
8. Quão importante é que, em caso de incêndio, a solução consiga conter o fogo e evitar que ele se espalhe para móveis ou objetos próximos?

9. É uma prioridade para você que o produto forneça tempo suficiente para uma evacuação segura ou para o combate inicial ao fogo?
10. Você considera importante que a proteção contra incêndio funcione mesmo se houver uma queda de energia elétrica?
11. Quão importante é para você que o processo de contenção do incêndio não libere gases tóxicos ou resíduos perigosos no ambiente?
12. É importante para você ser alertado imediata e claramente (por alarme sonoro ou visual) sobre o início de um incêndio?
13. Você precisa saber claramente se o produto é de uso único ou se pode ser reutilizado após um evento de contenção?
14. Quão importante é que o produto possa ser manuseado com segurança durante ou após um incêndio, sem risco de queimaduras?
15. Você considera importante que a solução também ajude a reduzir a quantidade de fumaça e fuligem gerada pelo fogo?
16. É importante para você que o produto ajude a minimizar odores fortes ou persistentes após a contenção do incêndio?
17. Você considera crucial que a solução aja o mais rápido possível para conter o foco do incêndio?
18. Quão importante é para você conseguir instalar o produto sozinho, sem a necessidade de ferramentas especiais ou ajuda técnica?
19. Você considera importante que o modo de usar o produto seja intuitivo, sem depender da leitura de um manual longo?
20. É importante para você poder verificar rapidamente o status do produto (se está pronto, ativo ou se precisa de manutenção) através de indicadores visuais?
21. Quão importante é que o uso do produto não torne sua rotina diária de carregar os dispositivos mais complicada?
22. Você considera importante que o produto seja compacto e caiba facilmente nos locais onde você costuma carregar seus aparelhos?
23. É importante para você que o produto seja portátil e fácil de mover entre diferentes cômodos?
24. Você acha importante que o produto tenha um local claro para ser pego (como uma alça) em uma situação de emergência?
25. Quão importante é que o produto não emita ruídos ou zumbidos enquanto estiver inativo (em modo de espera)?

26. Você considera crucial que os alertas (sonoros ou visuais) do produto sejam perceptíveis mesmo à distância?
27. É fundamental para você que o manuseio do produto em uma emergência seja intuitivo, mesmo sob estresse?
28. Quão importante é que o produto indique claramente quando atingiu sua data de vencimento ou fim da vida útil?
29. Você considera importante que a manutenção necessária para o produto seja simples e rápida de fazer?
30. Caso o produto utilize refis, é importante para você que eles sejam fáceis de encontrar para compra?
31. É fundamental para você ter acesso fácil à garantia e suporte do fabricante caso o produto apresente falhas?
32. Quão importante é para você ter acesso a dados de testes ou certificações que comprovem a eficácia do produto antes de comprá-lo?
33. Você considera importante que o produto mantenha sua confiabilidade mesmo em ambientes com variações de umidade, poeira ou calor?
34. Caso o produto permita reparos, é importante para você que peças de reposição estejam disponíveis no mercado?
35. É importante para você ter acesso a uma assistência técnica próxima para solucionar dúvidas ou realizar reparos?
36. Quão importante é que a limpeza do produto e da área afetada, após um evento de contenção, seja simples?
37. Você se preocupa que o descarte do produto ao final de sua vida útil seja feito de forma ambientalmente correta?
38. Você considera fundamental que o preço do produto esteja de acordo com o seu orçamento disponível para esse tipo de solução?
39. É importante para você que o produto esteja de acordo com as regras do seu condomínio, exigências de seguradoras ou normas técnicas vigentes?
40. Quão importante é que os materiais usados na fabricação do produto sejam comprovadamente resistentes ao fogo e possuam certificações?
41. Você valoriza que o produto tenha uma longa durabilidade para evitar a necessidade de trocas frequentes?
42. É importante para você que o produto seja fabricado com materiais de baixo impacto ambiental?

43. Quão importante é que o produto seja seguro para o uso em ambientes com crianças ou animais de estimação (sem peças pequenas ou fáceis de arrancar)?
44. Você considera importante que as instruções de uso sejam escritas em linguagem simples e, se possível, disponíveis em mais de um idioma?
45. É importante para você que a solução seja portátil a ponto de poder ser levada em viagens?
46. Você considera importante que o design do produto seja discreto e harmonize com a decoração da sua casa?

APÊNDICE E - Proposição de Features

Prompt: "Elabore uma tabela com propostas de features que atendam às seguintes necessidades priorizadas: (...). As mesmas foram levantadas por uma investigação com clientes de um produto ignífugo para contenção de fuga térmica em baterias de íons de lítio. Para cada necessidade, apresente cinco features, classificando-as obrigatoriamente nas categorias de Estilo, Função, Experiência ou Qualidade. A resposta deve ser no formato de tabela, onde uma coluna apresenta a necessidade priorizada e na outra as features com sua classificação".

APÊNDICE F - Formulário de Validação do Candidato a MVP 1 (Q4)

Figura 16

“Uma estrutura selada com certificação IP garante confiabilidade em diferentes condições (umidade, poeira, calor).”

“A instalação sem necessidade de ferramentas especializadas é compatível com a infraestrutura existente.”

“Um mecanismo de contenção térmica de resposta rápida é eficaz para isolar o foco de incêndio imediatamente.”

“Base antiderrapante para diferentes superfícies servem para eficácia em diferentes ambientes da casa.”

“A presença de certificação internacional (UL/EN) em materiais resistentes ao fogo é indispensável para a segurança do produto.”

“O uso de materiais externos resistentes a impactos e ao desgaste assegura a longa durabilidade do equipamento.”

“A disponibilização de um QR Code para acesso à documentação facilita o suporte e a confiança na garantia do fabricante.”

“Aberturas projetadas para expansão controlada devem garantir tempo suficiente para evacuação segura.”

“Pontos de interação com cores de destaque ou que brilham no escuro permitem um manuseio intuitivo sob estresse ou baixa visibilidade.”

“O design com bordas arredondadas e sem partes móveis expostas torna o dispositivo seguro para convívio com crianças e animais.”

“A substituição de alertas sonoros por sinalizações luminosas é ideal para manter o ambiente silencioso enquanto o produto está inativo.”

APÊNDICE G - Formulário de Validação do Candidato a MVP 2 (Q5)

Figura 17

“Uma estrutura selada com certificação IP garante confiabilidade em diferentes condições (umidade, poeira, calor).”

“A instalação sem necessidade de ferramentas especializadas é compatível com a infraestrutura existente.”

“Um mecanismo de contenção térmica de resposta rápida é eficaz para isolar o foco de incêndio imediatamente.”

“A resistência a variações de umidade garante a eficácia do produto em diferentes ambientes da casa.”

“A presença de certificação internacional (UL/EN) em materiais resistentes ao fogo é indispensável para a segurança do produto.”

“O uso de materiais externos resistentes a impactos e ao desgaste assegura a longa durabilidade do equipamento.”

“A disponibilização de um QR Code para acesso à documentação facilita o suporte e a confiança na garantia do fabricante.”

“Uma arquitetura interna que orienta o calor para longe de pontos críticos é fundamental para permitir a contenção rápida do foco de incêndio.”

“A presença de instruções em pictogramas gravados na carcaça assegura um manuseio intuitivo, mesmo em situações de emergência e estresse.”

“O design com bordas arredondadas e sem partes móveis expostas torna o dispositivo seguro para convívio com crianças e animais.”

“A substituição de alertas sonoros por sinalizações luminosas é ideal para manter o ambiente silencioso enquanto o produto está inativo.”