UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS – PPGE3M

RODRIGO LEÃO MIANES

Infraestrutura da Qualidade para Mobilidade Elétrica: Normas, Ensaios e Segurança no Contexto Brasileiro

PORTO ALEGRE

2025

RODRIGO LEÃO MIANES

Infraestrutura da Qualidade para Mobilidade Elétrica: Normas, Ensaios e Segurança no Contexto Brasileiro

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Coorientadora: Profa. Dra. Carla Schwengber ten Caten

PORTO ALEGRE

2025

RODRIGO LEÃO MIANES

Infraestrutura da Qualidade para Mobilidade Elétrica: Normas, Ensaios e Segurança no Contexto Brasileiro

Esta tese foi analisada e julgada adequada como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração Ciência e Tecnologia dos Materiais, sendo aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

_____

Prof. Dr. Afonso Reguly

Orientador PPGE3M/UFRGS

_____

Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

Coordenador PPGE3M/UFRGS

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Bibiana Maitê Petry Ferraz (DELAE/UFRGS)

Prof. Dr. Paulo Roberto Eckert (DELET/UFRGS)

Dra. Inês Hexsel Grochau (Consultora)

Dedico esta tese aos meus pais, Nivaldo (em memória) e Rosane, que estarão sempre presentes em minha vida, estejam aqui ou não — pelo amor, exemplo e valores que me guiam todos os dias.

AGRADECIMENTOS

Expresso minha sincera gratidão à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pela oportunidade de integrar sua comunidade acadêmica. Levo comigo não apenas o conhecimento adquirido, mas também a admiração pela excelência do ensino e pelo comprometimento de seus docentes e técnicos.

Agradeço ao Prof. Dr. Afonso Reguly, orientador, e à Profa. Dra. Carla ten Caten, coorientadora, pela orientação atenta e competente, pautada em rigor técnico e relevância prática, que qualificou este trabalho e ampliou suas perspectivas. Minha profunda admiração pela sua competência e visão estratégica.

Sou grato aos amigos e colegas de trabalho, que compreenderam minha ausência e respeitaram o distanciamento imposto pelas demandas desta jornada, mantendo-se presentes de forma silenciosa, mas significativa.

Ao meu irmão Felipe, agradeço pela amizade, pelo incentivo e por ter sido o pioneiro na família a cursar o doutorado, abrindo caminho que me inspirou a seguir.

À minha companheira Lísia, expresso meu mais profundo reconhecimento pelo amor, paciência e compreensão incondicionais. Seu apoio foi mais do que presença: foi sustento emocional nos momentos de maior cansaço e incerteza, tornando possível concluir esta etapa.

Por fim, meu agradecimento mais especial é dedicado aos meus pais, Nivaldo (em memória) e Rosane, que fizeram tudo ao seu alcance para proporcionar o melhor aos filhos. Minha gratidão eterna por todo o amor, entrega, incentivo e apoio. Levo comigo, para sempre, o orgulho de ter sido motivo de orgulho para vocês.

LISTA DE SIGLAS

BEV	Veículo elétrico a bateria (*Battery Electric Vehicle*)
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
Cgcre	Coordenação Geral de Acreditação
CO_2	Dióxido de Carbono
Conmetro	Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
Embrapii	Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial
EMC	Compatibilidade Eletromagnética
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
ENIQ	Estratégia Nacional de Infraestrutura da Qualidade
ESG	Ambiental, Social e Governança (*Environmental, Social and Governance*)
FCEV	Veículo a célula de combustível (*Fuel Cell Electric Vehicle*)
Finep	Financiadora de Estudos e Projetos
HEV	Veículo híbrido convencional (*Hybrid Electric Vehicle*)
IAF-MLA	*International Accreditation Forum Multilateral Recognition Arrangement*
ICD	Índice de Confiabilidade Documental
ILAC-MRA	*International Laboratory Accreditation Cooperation Mutual Recognition Arrangement*
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IoT	Internet das Coisas (*Internet of Things*)
IQ	Infraestrutura da Qualidade
MHEV	Veículo híbrido leve (*Mild Hybrid Electric Vehicle*)
PBE-V	Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular
PHEV	Veículo híbrido plug-in (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*)
RBLE	Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio

GLOSSÁRIO

Acreditação — Reconhecimento formal, por organismo competente, da competência de laboratórios e organismos de avaliação da conformidade para executar atividades específicas, segundo critérios internacionalmente aceitos.

AIR (Análise de Impacto Regulatório) — Processo estruturado que avalia problema, alternativas e efeitos esperados de atos normativos, subsidiando decisões regulatórias com base em evidências.

Alta tensão (Classe B) — Circuitos elétricos com tensão nominal superior a 60 V até 1.500 V DC ou 30 V até 1.000 V AC (rms), conforme ISO 6469-3:2021. Exigem requisitos adicionais de proteção (isolamento, barreiras e ensaios).

ASIL (Automotive Safety Integrity Level) — Nível de integridade de segurança da ISO 26262 (QM, A, B, C, D), definido a partir de Severidade, Exposição e Controlabilidade, que orienta metas de segurança funcional.

Avaliação da conformidade (compulsória) — Processo obrigatório, definido em regulamento técnico, que demonstra atendimento a requisitos como condição legal para comercialização.

Avaliação da conformidade (voluntária) — Processo opcional para antecipar exigências, diferenciar produtos ou sinalizar desempenho e segurança; pode envolver declaração do fornecedor, ensaios por laboratório acreditado e/ou certificação por terceira parte.

Cgcre — Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro; organismo de acreditação brasileiro, signatário do ILAC-MRA e do IAF-MLA.

Compatibilidade eletromagnética (EMC) — Capacidade de um equipamento de não emitir interferências excessivas e de resistir a perturbações eletromagnéticas do ambiente. Nos veículos eletrificados, assegura o funcionamento confiável de subsistemas de potência e controle.

Conmetro — Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial; instância normativa superior do Sinmetro.

Declaração do fornecedor (*Supplier's Declaration of Conformity*, SDoC) — Atestação na qual o fornecedor declara que o produto atende a requisitos especificados; pode ser apoiada por ensaios/auditorias e segue diretrizes da norma ISO/IEC 17050.

ENIQ (Estratégia Nacional de Infraestrutura da Qualidade) — Agenda decenal de modernização da Infraestrutura da Qualidade brasileira, com eixos de harmonização regulatória, transformação digital e inserção internacional.

ENCE / PBE-V — Etiqueta Nacional de Conservação de Energia / Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular; mecanismos oficiais de informação de eficiência energética e autonomia de veículos.

Ensaios de proficiência — Programas interlaboratoriais que avaliam o desempenho de laboratórios, essenciais para demonstrar competência técnica e comparabilidade de resultados.

Esquemas de certificação — Modelos estruturados de certificação de produtos (conforme norma ISO/IEC 17067).

EVSE (*Electric Vehicle Supply Equipment*) — Equipamento de fornecimento de energia para recarga de veículos elétricos, incluindo proteções e comunicação com o veículo/estação.

FCEV / BEV / PHEV / HEV / MHEV — Veículo elétrico a célula de combustível; veículo elétrico a bateria; veículo híbrido plug-in; veículo híbrido convencional; veículo híbrido leve.

Fuga térmica (*thermal runaway*) — Reação exotérmica autocatalítica em células/baterias que pode levar a incêndio ou explosão, exigindo requisitos específicos de projeto e ensaios.

IAF-MLA — *International Accreditation Forum Multilateral Recognition Arrangement*; acordo de reconhecimento multilateral para acreditações de organismos de certificação.

ILAC-MRA — *International Laboratory Accreditation Cooperation Mutual Recognition Arrangement*; acordo de reconhecimento mútuo para acreditações de laboratórios de ensaio/calibração.

ICD (Índice de Confiabilidade Documental) — Índice proposto nesta tese que pondera o risco funcional presumido (IRR_gen) pela robustez da evidência apresentada (Nota-Evidência).

IRR_gen (Índice de Risco Relativo genérico) — Medida numérica proposta nesta tese para representar a criticidade funcional presumida de subsistemas, derivada da classificação ASIL.

Inmetro — Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia; órgão executivo central do Sinmetro com competências em metrologia, avaliação da conformidade e regulação técnica.

IQ (Infraestrutura da Qualidade) — Conjunto formado por metrologia, normalização, acreditação, avaliação da conformidade e vigilância de mercado, que sustenta segurança, confiança e competitividade.

IoT (*Internet of Things*) — Conceito de dispositivos conectados com coleta e intercâmbio de dados; em eletromobilidade, habilita medição inteligente e gestão de carregamento.

HARA (*Hazard Analysis and Risk Assessment*) — Método da ISO 26262 para identificar perigos e classificar risco funcional por Severidade, Exposição e Controlabilidade.

NE (Nota-Evidência) — Escala proposta nesta tese para classificar a robustez da evidência documental (por exemplo, certificado por terceira parte; relatório de laboratório acreditado; estudo analítico).

Normalização — Processo de elaboração e adoção de normas técnicas por organismos nacionais (ABNT) e internacionais (ISO, IEC), visando interoperabilidade, segurança e desempenho.

OCP (Organismo de Certificação de Produtos) — Entidade independente que certifica produtos, processos ou serviços com base em requisitos reconhecidos e esquemas definidos.

Padrões de referência — Artefatos/instrumentos com valores conhecidos e incertezas estabelecidas que asseguram rastreabilidade metrológica em calibrações e ensaios.

RBLE — Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaios; base oficial dos laboratórios de ensaios acreditados (Cgcre/Inmetro) e seus escopos de acreditação.

Segurança funcional — Capacidade de sistemas elétricos/eletrônicos manterem estado seguro diante de falhas previsíveis, conforme princípios e processos da ISO 26262.

Sinmetro — Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial; integra Inmetro, Cgcre, Conmetro e demais entidades.

SOC (*State of Charge*) — Estado de carga; percentual de energia disponível em relação à capacidade nominal da bateria.

Testes de abuso — Ensaios que submetem baterias ou módulos a condições extremas (sobrecarga, curto-circuito, impacto, calor, perfuração) para avaliar seu comportamento em falhas e prevenir riscos como fuga térmica, incêndio ou explosão.

V2G (*Vehicle-to-Grid*) — Operação bidirecional em que o veículo pode fornecer energia elétrica de volta à rede, sujeita a requisitos técnicos e regulatórios específicos.

Vigilância de mercado — Monitoramento de produtos/serviços disponíveis no mercado para verificação de conformidade, identificação de riscos e adoção de medidas corretivas.

VRU (*Vulnerable Road User*) — Usuário vulnerável da via (pedestres, ciclistas e afins), domínio considerado em programas de avaliação de segurança veicular.

RESUMO

Esta tese apresenta uma análise integrada da Infraestrutura da Qualidade (IQ) voltada à mobilidade elétrica no Brasil, com ênfase em normas, ensaios laboratoriais e critérios de segurança funcional. O trabalho é estruturado em três artigos inter-relacionados: (i) a análise do modelo regulatório do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) e a proposição de um roteiro metodológico para programas de avaliação da conformidade voluntários, fundamentado em diretrizes internacionais; (ii) o diagnóstico da infraestrutura laboratorial nacional, evidenciando lacunas críticas para realização de ensaios em componentes essenciais de veículos eletrificados, além de barreiras à acreditação; e (iii) o desenvolvimento e simulação de um programa brasileiro de etiquetagem de segurança funcional para veículos eletrificados, baseado em análise de risco e critérios objetivos de evidência documental. Os resultados demonstram a necessidade de articulação entre regulação, fortalecimento dos laboratórios acreditados e desenvolvimento de mecanismos de comunicação ao consumidor, para consolidar um ecossistema nacional competitivo e seguro. A tese oferece recomendações práticas para políticas públicas, incentivo à acreditação, integração entre indústria, governo e academia, e propõe uma trajetória evolutiva que conecta regulação, infraestrutura técnica e desenvolvimento de mecanismos de avaliação da conformidade no setor de mobilidade elétrica.

Palavras-chave: Infraestrutura da qualidade; Mobilidade elétrica; Programas de avaliação da conformidade voluntários; Segurança funcional; Etiquetagem.

ABSTRACT

This thesis presents an integrated analysis of the Quality Infrastructure (QI) aimed at electric mobility in Brazil, with an emphasis on standards, laboratory testing, and functional safety criteria. The work is structured into three interrelated articles: (i) an analysis of the regulatory model of Brazil's National Institute of Metrology, Quality and Technology (Inmetro), and the proposal of a methodological roadmap for voluntary conformity assessment programs, aligned with international guidelines; (ii) a diagnosis of the national laboratory infrastructure, highlighting critical gaps in the testing of essential components of electrified vehicles, as well as barriers to accreditation; and (iii) the development and simulation of a Brazilian functional safety labeling program for electrified vehicles, based on risk analysis and objective criteria for documentary evidence. The results demonstrate the need for articulation between regulation, the strengthening of accredited laboratories, and the development of consumer communication mechanisms, in order to consolidate a competitive and safe national ecosystem. The thesis offers practical recommendations for public policies, incentives for accreditation, integration between industry, government, and academia, and proposes an evolutionary path that connects regulation, technical infrastructure, and the development of conformity assessment mechanisms in the electric mobility sector.

Keywords: Quality infrastructure; Electric mobility; Voluntary conformity assessment programs; Functional safety; Labeling.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13

1.1 Tema e objetivos 14

1.2 Justificativa 15

1.2.1 Justificativa do tema 15

1.2.2 Justificativa dos objetivos 16

1.3 Método de trabalho 16

1.4 Delimitações do trabalho 17

1.5 Estrutura do trabalho 18

2 ARTIGOS PROPOSTOS 19

2.1 Artigo 1 20

2.2 Artigo 2 66

2.3 Artigo 3 115

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 175

4 REFERÊNCIAS 182

1 INTRODUÇÃO

O avanço das fontes renováveis de energia, aliado a políticas voltadas à mitigação do aquecimento global e à redução da poluição atmosférica, vem impulsionando mudanças significativas na dinâmica econômica e produtiva mundial (IPCC, 2023; OECD, 2021). Paralelamente, a difusão de práticas sustentáveis e o fortalecimento da consciência ambiental têm modificado padrões de consumo, levando os consumidores a atribuir maior relevância a aspectos ambientais no momento da compra (GlobeScan, 2021; Ipsos, 2021; McKinsey; NielsenIQ, 2023). Essas transformações refletem não apenas a adoção de novas tecnologias, mas também uma reorientação das cadeias de valor e das estratégias empresariais.

Entre os setores emissores de gases de efeito estufa, o transporte ocupa posição de destaque, respondendo por mais de um quinto das emissões globais de CO_2. Nesse contexto, o modal rodoviário concentra cerca de três quartos dessas emissões (IEA, 2024). A eletrificação veicular desponta como alternativa tecnológica aos modelos movidos a combustíveis fósseis, especialmente quando associada ao uso de eletricidade proveniente de matrizes de baixa emissão de carbono. Essa combinação representa uma estratégia relevante para a mitigação das emissões e para a transição rumo a sistemas de transporte mais limpos (Steinberg *et al.*, 2017).

O mercado mundial de veículos eletrificados tem apresentado expansão acelerada. Em 2024, as vendas superaram 17 milhões de unidades, o equivalente a aproximadamente um quinto de todos os veículos leves comercializados globalmente (IEA, 2025). No Brasil, embora o país figure entre os maiores produtores e mercados automotivos do mundo (Anfavea, 2025), a participação desse segmento permanece inferior à média global. Ainda assim, o crescimento é consistente: a presença dos eletrificados no mercado interno passou de 1,77% em 2021 para 4,31% em 2023, com estimativas que apontam para até 22% em 2030. Esse cenário reforça a necessidade de fortalecer a inovação, a capacidade produtiva e as atividades de pesquisa, fatores essenciais para manter a competitividade frente à concorrência internacional (Anfavea, 2022, 2024, 2025).

O avanço da mobilidade elétrica impõe a ampliação de mecanismos que assegurem qualidade, segurança e confiabilidade de veículos e seus componentes.

Casos registrados internacionalmente, envolvendo baterias, sistemas de recarga e outros subsistemas críticos, evidenciam riscos capazes de afetar o desempenho funcional dos veículos e, sobretudo, comprometer a segurança dos usuários (Brzezinska; Bryant, 2022; Chen; Li; Yang, 2022; Dorsz; Lewandowski, 2021; Victor Chombo; Laoonual; Wongwises, 2021). Nesse contexto, torna-se fundamental fortalecer os programas de avaliação da conformidade e expandir a capacidade laboratorial no Brasil, de modo a atender aos requisitos técnicos e regulatórios — como segurança, desempenho e compatibilidade eletromagnética — e contribuir para um mercado mais seguro, competitivo e alinhado às práticas internacionais.

Nesse panorama, a Infraestrutura da Qualidade (IQ) — que integra metrologia, normalização, acreditação, avaliação da conformidade e vigilância de mercado — desempenha papel estratégico ao garantir que produtos e serviços atendam a normas técnicas, favoreçam a integração internacional e assegurem a proteção ao consumidor (IEC; ISO; UNIDO, 2023). A adoção de mecanismos padronizados de comunicação técnica, como programas de etiquetagem fundamentados em critérios objetivos, pode aumentar a transparência para o público e criar um ambiente propício à inovação e à competitividade no setor

1.1 Tema e objetivos

Esta tese investiga o fortalecimento da Infraestrutura da Qualidade (IQ) aplicada à mobilidade elétrica no Brasil, com foco em normas técnicas, ensaios laboratoriais e segurança funcional. A abordagem articula três frentes complementares. A primeira refere-se à regulação e aos programas de avaliação da conformidade, com ênfase em modelos voluntários alinhados a boas práticas internacionais e à modernização regulatória conduzida pelo Inmetro. A segunda concentra-se na infraestrutura laboratorial, envolvendo o diagnóstico das capacidades existentes no país, a identificação de lacunas técnicas e institucionais e a análise de barreiras que limitam a acreditação para ensaios de segurança, desempenho e compatibilidade eletromagnética. Por fim, a terceira frente aborda a comunicação técnica ao consumidor, por meio da proposição e da simulação de um programa de etiquetagem de segurança funcional, fundamentado em análise de risco e em evidências documentais auditáveis.

O objetivo geral consiste em propor ações e instrumentos que contribuam para elevar a confiabilidade, a segurança e a competitividade dos veículos eletrificados no Brasil, estabelecendo conexões entre regulação, capacidade laboratorial e mecanismos de avaliação da conformidade e rotulagem. Para alcançar esse propósito, definem-se três objetivos específicos: analisar o modelo regulatório do Inmetro e elaborar um roteiro metodológico para programas voluntários de avaliação da conformidade; diagnosticar a infraestrutura laboratorial nacional voltada a veículos eletrificados, identificando lacunas críticas e propondo ações de fomento e acreditação; e desenvolver e simular um programa de etiquetagem para subsistemas de alta tensão, baseado em critérios objetivos e evidências documentais, com proposta de integração à Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE).

Espera-se, como resultado, consolidar uma trajetória evolutiva integrada que favoreça a adoção escalonada de programas voluntários, a ampliação da infraestrutura laboratorial acreditada e a disponibilização de informações padronizadas e transparentes ao consumidor. Dessa forma, busca-se contribuir para a formação de um ecossistema nacional de mobilidade elétrica mais seguro, confiável e competitivo, em consonância com as melhores práticas internacionais.

1.2 Justificativa

1.2.1 Justificativa do tema

A mobilidade elétrica no Brasil demanda o fortalecimento e a integração da IQ, diante da rápida evolução tecnológica, do aumento das exigências de sustentabilidade e da necessidade de alinhamento com requisitos internacionais de segurança, desempenho e confiabilidade. O atendimento a esses requisitos pressupõe a aplicação de normas nacionais e internacionais e a disponibilidade de laboratórios capacitados para realizar ensaios que gerem evidências objetivas para avaliação da conformidade.

Ocorrências documentadas em diversos países envolvendo veículos eletrificados — tais como incêndios em estacionamentos, eventos de fuga térmica de baterias, falhas em sistemas de recarga rápida e acidentes relacionados à integridade elétrica — evidenciam riscos à segurança dos usuários e reforçam a importância de mecanismos regulatórios e laboratoriais que mitiguem esses riscos, protejam o

consumidor e sustentem a competitividade industrial (Brzezinska; Bryant, 2022; Dorsz; Lewandowski, 2021; Jiang *et al.*, 2021; Linja-Aho, 2024; Sun *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2024). A ausência de mecanismos padronizados de comunicação técnica ao consumidor e a limitada integração entre os atores do setor dificultam a consolidação de um mercado nacional seguro e competitivo.

1.2.2 Justificativa dos objetivos

A definição dos objetivos desta tese decorre da necessidade de desenvolver ações que sustentem os avanços tecnológicos e fortaleçam a IQ brasileira, promovendo confiança, qualidade e competitividade nos produtos e serviços ofertados à sociedade. O cenário nacional da mobilidade elétrica evidencia lacunas técnicas e institucionais, tornando central o fortalecimento da avaliação da conformidade como ferramenta para assegurar requisitos normativos, proteger a saúde e a segurança da população e coibir práticas comerciais inadequadas.

A proposição de um roteiro metodológico para programas de avaliação da conformidade voluntários, o diagnóstico da infraestrutura laboratorial nacional e o desenvolvimento de um mecanismo padronizado de comunicação ao consumidor visam ampliar a capacidade do setor em atender requisitos técnicos de segurança, desempenho e compatibilidade eletromagnética. Esses objetivos buscam orientar a formulação de políticas de fomento, apoiar a inserção competitiva da indústria nacional e viabilizar a oferta de informações técnicas comparáveis ao mercado.

Em face do exposto, a questão central que orienta este estudo é: “Quais são as ações e estratégias necessárias para fortalecer a infraestrutura brasileira da qualidade, visando garantir a avaliação da conformidade e a segurança dos veículos eletrificados no contexto da mobilidade elétrica?”. A abordagem desta questão é essencial para que o Brasil esteja preparado para os desafios e oportunidades da transição tecnológica e possa usufruir dos benefícios econômicos, ambientais e sociais associados à consolidação da mobilidade elétrica.

1.3 Método de trabalho

Esta pesquisa é classificada, quanto à sua finalidade, como aplicada, voltada à solução de problemas específicos relacionados à Infraestrutura da Qualidade na

mobilidade elétrica. A abordagem adotada é predominantemente qualitativa, adequada à análise interpretativa de normas, regulamentações, práticas institucionais e dados técnicos, incorporando, quando pertinente, elementos quantitativos para o desenvolvimento de critérios numéricos aplicados à comparação entre modelos de veículos eletrificados.

O objetivo principal é de caráter exploratório, buscando identificar problemas, mapear lacunas e formular hipóteses relevantes para o fortalecimento da Infraestrutura da Qualidade no Brasil. Os procedimentos técnicos compreendem pesquisa bibliográfica e documental, análise de normas e regulamentos, mapeamento da infraestrutura laboratorial, levantamento junto a especialistas e simulação de mecanismos de avaliação da conformidade e de comunicação ao consumidor.

Os resultados foram sistematizados em três artigos científicos (apresentados no Capítulo 2) e, posteriormente, integrados em uma síntese final que reúne recomendações práticas para políticas públicas, mecanismos de fomento e estratégias voltadas ao fortalecimento da Infraestrutura da Qualidade aplicada à mobilidade elétrica.

1.4 Delimitações do trabalho

Esta tese se limita à mobilidade elétrica rodoviária no contexto brasileiro, com foco em veículos eletrificados cujo armazenamento de energia é baseado em baterias. Nesse escopo, incluem-se veículos elétricos a bateria (*Battery Electric Vehicles*, BEV), veículos híbridos plug-in (*Plug-in Hybrid Electric Vehicles*, PHEV), veículos híbridos convencionais (*Hybrid Electric Vehicles*, HEV) e veículos híbridos leves (*Mild Hybrid Electric Vehicles*, MHEV). Essas modalidades diferem quanto à arquitetura de propulsão, ao dimensionamento e gerenciamento de baterias e ao perfil de uso, mas compartilham a necessidade de normas técnicas, ensaios laboratoriais e mecanismos de avaliação da conformidade aplicáveis a subsistemas de alta tensão. Para os fins desta tese, o termo alta tensão é empregado em conformidade com a ISO 6469-3:2021 (ISO, 2021), que classifica como circuitos de alta tensão (Classe B) aqueles cuja tensão nominal seja superior a 60 V e até 1.500 V em corrente contínua (DC), ou superior a 30 V e até 1.000 V em corrente alternada (AC, valor eficaz). Acima desses

limites, os circuitos devem atender a requisitos normativos específicos de proteção, incluindo isolamento, barreiras e ensaios de conformidade.

As normas e estatísticas consideradas correspondem às vigentes até agosto de 2025 e restringem-se a documentos aplicáveis à mobilidade elétrica rodoviária baseada em baterias. Ficam fora do escopo os veículos elétricos a célula de combustível (Fuel Cell Electric Vehicles, FCEV), que demandam infraestrutura de abastecimento específica e apresentam requisitos próprios de segurança e normalização, bem como outros modais ou tecnologias (aeronaves, embarcações, sistemas ferroviários). Não são abordados processos de fabricação de baterias nem políticas públicas gerais relacionadas à expansão de redes elétricas. As recomendações e programas propostos têm caráter conceitual ou de projeto-piloto e não foram implementados até o encerramento da pesquisa. Questões internacionais são tratadas apenas quando necessárias para fundamentar referências normativas e procedimentos aplicáveis ao contexto brasileiro.

1.5 Estrutura do trabalho

Esta tese está organizada em três capítulos. O Capítulo 2 reúne os três artigos que compõem a pesquisa, cada um dedicado a um eixo específico: (i) modelo regulatório e programas de avaliação da conformidade voluntários; (ii) infraestrutura laboratorial; e (iii) etiquetagem de segurança funcional. O Capítulo 3 apresenta as considerações finais, consolidando as conclusões e apontando recomendações e perspectivas para trabalhos futuros.

2 ARTIGOS PROPOSTOS

Este capítulo reúne os três artigos científicos que estruturam a pesquisa, cada um dedicado a uma frente específica da Infraestrutura da Qualidade aplicada à mobilidade elétrica:

2.1 Artigo 1 – Infraestrutura da Qualidade e Avaliação da Conformidade Voluntária: O Caso Brasileiro e Adaptações Globais. Analisa o modelo regulatório do Inmetro, compara experiências internacionais e apresenta a elaboração, validada por especialistas, de um roteiro metodológico para programas voluntários de avaliação da conformidade.

2.2 Artigo 2 – Infraestrutura Laboratorial para Avaliação da Conformidade na Mobilidade Elétrica: Um Estudo de Caso no Brasil. Caracteriza componentes críticos, levanta normas aplicáveis, investiga a infraestrutura laboratorial nacional e propõe ações voltadas à ampliação da capacidade de ensaios.

2.3 Artigo 3 – Programa Brasileiro de Etiquetagem de Segurança Funcional para Subsistemas Críticos de Veículos Eletrificados Baseado em Risco e Evidência. Examina programas internacionais de etiquetagem, desenvolve uma modelagem normativa baseada em risco, define critérios classificatórios e simula a aplicação do programa.

Em conjunto, os três artigos oferecem uma visão integrada que conecta regulação, infraestrutura laboratorial e mecanismos de comunicação ao consumidor, consolidando recomendações para o fortalecimento da Infraestrutura da Qualidade no contexto da mobilidade elétrica no Brasil.

2.1 Artigo 1

INFRAESTRUTURA DA QUALIDADE E AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE VOLUNTÁRIA: O CASO BRASILEIRO E ADAPTAÇÕES GLOBAIS

QUALITY INFRASTRUCTURE AND VOLUNTARY CONFORMITY ASSESSMENT: THE BRAZILIAN CASE AND GLOBAL ADAPTATIONS

Infraestrutura da Qualidade e Avaliação da Conformidade Voluntária: O Caso Brasileiro e Adaptações Globais

Rodrigo Leão Mianes (rodrigo.mianes@ufrgs.br)
Afonso Reguly (reguly@ufrgs.br)
Carla Schwengber ten Caten (carla.caten@ufrgs.br)

Resumo: A Infraestrutura da Qualidade (IQ) desempenha papel estratégico para garantir segurança, sustentabilidade e competitividade industrial, sendo composta por metrologia, normalização, acreditação, avaliação da conformidade e vigilância de mercado. Este estudo analisa o modelo regulatório do Inmetro, com foco no desenvolvimento de programas de avaliação da conformidade voluntários, e realiza comparação com os sistemas da União Europeia, Estados Unidos e Coreia do Sul. Adotou-se uma abordagem qualitativa, estruturada em cinco etapas: análise documental dos regulamentos brasileiros, comparação internacional, elaboração de um roteiro metodológico, validação por meio de questionário aplicado a especialistas de governo, indústria, academia e organismos de certificação, e consolidação das contribuições recebidas. Os resultados incluem a síntese das tendências regulatórias globais e a apresentação de um roteiro detalhado, adaptável a diferentes setores, que incorpora boas práticas internacionais e critérios de sustentabilidade. O roteiro demonstrou viabilidade e relevância segundo os especialistas, embora persistam desafios como custos, infraestrutura limitada e necessidade de incentivo à adesão, especialmente para pequenas empresas. Conclui-se que a adoção estruturada de programas voluntários, alinhados a normas internacionais e à nova regulamentação brasileira, pode fortalecer a IQ nacional, aumentar a competitividade e apoiar a convergência regulatória internacional, especialmente em países em fase de modernização normativa e em setores emergentes, como a mobilidade elétrica.
Palavras-chave: infraestrutura da qualidade; avaliação da conformidade voluntária; regulação baseada em risco; ISO/IEC 17065; ISO/IEC 17067; harmonização regulatória; vigilância de mercado; política energética; mobilidade elétrica; eletrificação do transporte.

Abstract: Quality Infrastructure (QI) plays a strategic role in ensuring safety, sustainability, and industrial competitiveness, comprising metrology, standardization,

accreditation, conformity assessment, and market surveillance. This study analyzes the regulatory model of Inmetro, focusing on the development of voluntary conformity assessment schemes, and compares it with the systems of the European Union, the United States, and South Korea. A qualitative approach was adopted and structured in five stages: documentary analysis of Brazilian regulations, international comparison, development of a methodological roadmap, validation through a questionnaire administered to experts from government, industry, academia, and certification bodies, and consolidation of the contributions received. The results include a synthesis of global regulatory trends and the presentation of a detailed, sector-adaptable roadmap that incorporates international best practices and sustainability criteria. The roadmap was deemed viable and relevant by the experts, although challenges persist, such as costs, limited infrastructure, and the need to encourage participation, especially for small businesses. A structured approach to adopting voluntary conformity assessment schemes—aligned with international standards and the new Brazilian regulations—can strengthen the national Quality Infrastructure, boosting competitiveness and facilitating international regulatory convergence, particularly in countries modernizing their regulations and in emerging industries such as electric mobility.

Keywords: quality infrastructure; voluntary conformity assessment; risk-based regulation; ISO/IEC 17065; ISO/IEC 17067; regulatory harmonization; market surveillance; energy policy; electric mobility; transport electrification.

1 Introdução

A Infraestrutura da Qualidade (IQ) ocupa posição determinante para garantir que produtos e serviços sejam seguros, sustentáveis e adequados a padrões globais. Ao contemplar saúde, segurança e meio ambiente, a IQ também impulsiona a competitividade industrial e facilita o acesso a mercados internacionais. A IQ é composta por organizações, políticas, estruturas legais e práticas regulatórias, alicerçadas na metrologia, normalização, acreditação, avaliação da conformidade e vigilância de mercado [1–3].

No Brasil, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) desempenha o papel de órgão executivo central do Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Sinmetro). Entre suas atribuições destacam-se

a elaboração de regulamentos técnicos, a avaliação da conformidade de produtos, insumos e serviços e o poder de polícia administrativa. Dessa forma, assegura-se que os bens e serviços comercializados atendam às normas legais e aos requisitos técnicos vigentes [4].

Em 2022, o Inmetro publicou, por meio da Portaria Inmetro nº 30 [5], um modelo regulatório atualizado que visa à flexibilidade, à adaptabilidade e ao dinamismo. O documento define visão, objetivos, princípios e diretrizes de um sistema modernizado, elaborado após consultas públicas e estudos de sistemas de IQ em países como Estados Unidos, Coreia do Sul e União Europeia. A iniciativa alinha o modelo brasileiro às tendências globais da economia digital e da Indústria 4.0, prevendo cinco anos de transição para que o setor regulado se adapte [5].

A avaliação da conformidade constitui elemento essencial da IQ, pois atesta que produtos, processos, sistemas, pessoas ou organismos cumprem requisitos estabelecidos [2–6]. Esses requisitos costumam vir acompanhados de mecanismos de vigilância de mercado destinados a monitorar o desempenho de produtos e serviços disponíveis, identificando possíveis riscos à segurança ou problemas regulatórios [5]. Nos esquemas compulsórios, a não conformidade configura infração legal; nos programas voluntários, fornecedores ou consumidores aderem de forma opcional, antecipando futuras demandas regulatórias ou demonstrando adesão a padrões técnicos mais rigorosos [2].

Nos setores emergentes, como o de mobilidade elétrica, o uso inicial de programas voluntários é recorrente, dada a rápida evolução tecnológica e a necessidade de regulamentos adaptáveis. Essa estratégia permite uma transição gradual para exigências legais, validando critérios antes que se tornem compulsórios. Embora o foco deste estudo seja o Brasil, os desafios regulatórios discutidos são comuns a outras economias em processo de modernização normativa, o que reforça a utilidade de analisar a experiência brasileira como estudo de caso.

Para além de sua previsão no modelo regulatório do Inmetro, os programas voluntários carecem de orientações específicas que garantam sua credibilidade e efetividade. Visando preencher essa lacuna, o presente trabalho propõe um roteiro metodológico para o desenvolvimento e a aplicação desses programas, alinhando-os

às exigências do modelo regulatório brasileiro. Ao promover procedimentos harmonizados, busca-se fortalecer a capacidade do mercado nacional de responder a futuras demandas e criar um referencial apto a ser adotado por outros sistemas internacionais de IQ.

Cumpre destacar que o Brasil já conta com centenas de organismos de certificação de produtos acreditados, que oferecem apoio efetivo aos fabricantes em todas as etapas do processo de avaliação da conformidade, sobretudo em esquemas compulsórios. Ainda assim, a abordagem apresentada neste artigo deve ser vista como um avanço evolutivo destinado a harmonizar e ampliar práticas já consolidadas, de modo a enfrentar novos desafios — notadamente no campo dos programas voluntários e em setores emergentes.

Complementarmente, ressalta-se que, embora a proposta priorize a certificação formal por organismos de terceira parte, outros mecanismos de atestação — como a declaração do fornecedor — são reconhecidos e aplicados internacionalmente, especialmente em mercados mais maduros ou para produtos considerados de menor risco. No contexto brasileiro, entretanto, a adoção dessas alternativas ainda encontra limitações práticas, tanto pelo estágio de desenvolvimento da infraestrutura de fiscalização quanto pela cultura regulatória predominante. Por essa razão, o presente roteiro considera a certificação formal como referência principal.

Este artigo, portanto, tem três objetivos: (i) analisar o novo modelo regulatório brasileiro em perspectiva comparada com arranjos internacionais; (ii) apresentar um roteiro metodológico para a estruturação de programas de avaliação da conformidade voluntários; e (iii) discutir implicações práticas, desafios de implementação e perspectivas de pesquisa.

2 Materiais e métodos

Este estudo adota uma perspectiva qualitativa, de caráter exploratório e descritivo, para propor um roteiro metodológico voltado a programas de avaliação da conformidade voluntários, considerando o contexto regulatório do Inmetro e a convergência com práticas internacionais consolidadas globalmente. O trabalho foi desenvolvido em cinco etapas principais, descritas a seguir, observando critérios de rigor metodológico e coerência com os objetivos da pesquisa.

2.1 Análise do modelo regulatório do Inmetro

A primeira etapa consistiu na análise documental das principais portarias e regulamentos emitidos pelo Inmetro — com destaque para a Portaria Inmetro nº 30/2022 [5] — além de relatórios técnicos e documentos oficiais sobre a modernização regulatória no Brasil. O objetivo foi mapear as revisões recentes, identificando princípios como flexibilidade, foco em resultados e abordagem baseada em riscos, e compreender seus fundamentos estratégicos. Para isso, examinaram-se (i) os dispositivos legais que formalizam as mudanças, atentando para alterações procedimentais e de escopo, e (ii) publicações que apresentam o diagnóstico do modelo anterior e as justificativas para a adoção do novo arranjo regulatório.

2.2 Comparação entre modelos regulatórios internacionais

Na segunda etapa, foi conduzida uma revisão bibliográfica e documental sobre os sistemas regulatórios da União Europeia, dos Estados Unidos e da Coreia do Sul. O objetivo principal foi: (i) identificar boas práticas — a partir de relatórios, publicações, normas e legislação — que indiquem como cada jurisdição define requisitos técnicos, distribui responsabilidades e realiza a vigilância de mercado; e (ii) apontar elementos passíveis de adaptação ao contexto brasileiro, mapeando convergências como a responsabilidade do fabricante, a adoção de normas internacionais, estratégias de descentralização e o uso de tecnologias digitais.

A escolha desses três modelos se explica pela variedade de arranjos institucionais e graus de maturidade regulatória que representam. A União Europeia é o paradigma de harmonização supranacional; os Estados Unidos ilustram uma abordagem descentralizada e flexível, com forte participação do setor privado; e a Coreia do Sul oferece um sistema centralizado e ágil, marcado pela aplicação intensiva de soluções digitais. Esse recorte comparativo fornece subsídios consistentes para aprimorar o cenário brasileiro.

Estudos recentes corroboram a relevância dessa estratégia comparativa. Uma revisão das regulamentações sobre qualidade da energia elétrica em países da América Latina identificou convergências estruturais e desafios de harmonização normativa entre legislações nacionais [7]. Embora voltado a outro setor, esse estudo apresenta paralelos metodológicos com a presente pesquisa, ao evidenciar como

análises comparativas de legislações podem revelar padrões, lacunas e oportunidades de alinhamento regulatório.

2.3 Desenvolvimento de uma proposta de roteiro metodológico

Com base nos resultados obtidos nas etapas anteriores, elaborou-se um roteiro metodológico composto por 14 passos para orientar o desenvolvimento de programas de avaliação da conformidade voluntários. A construção desse roteiro observou três premissas centrais: (i) alinhamento às diretrizes do novo modelo regulatório do Inmetro; (ii) incorporação de boas práticas internacionais, respaldadas por normas reconhecidas da Organização Internacional de Normalização (International Organization for Standardization, ISO) e da Comissão Eletrotécnica Internacional (International Electrotechnical Commission, IEC); e (iii) organização lógica que facilite tanto a implementação quanto a operação dos programas. Cada passo foi desenhado de modo a assegurar proporcionalidade de requisitos, clareza procedimental e possibilidade de adaptação a diferentes setores produtivos.

2.4 Coleta de opiniões de especialistas

A quarta etapa teve por objetivo validar o roteiro metodológico, avaliando sua viabilidade e adequação prática. Para isso, foi aplicado um questionário on-line a doze especialistas. Optou-se por manter paridade entre os quatro segmentos-chave da Infraestrutura da Qualidade — academia, indústria, órgão regulador (Inmetro) e organismos de certificação — com três participantes em cada grupo, de modo a equilibrar perspectivas institucionais. Os respondentes apresentaram média de 18,8 anos de experiência profissional, com formações que incluem Engenharia de Produção, Engenharia Metalúrgica, Engenharia Elétrica, Engenharia Química, Física, Matemática/Estatística/IA, Metrologia, Química/Ciência do Solo e Administração. Esse perfil assegura diversidade técnica e senioridade adequadas à avaliação crítica do roteiro, preservando-se o anonimato mediante códigos internos (E1–E12). O painel foi considerado adequado para validar a coerência e a aplicabilidade preliminar do roteiro. Reconhece-se, contudo, que a amostra reduzida limita a generalização dos achados, sendo recomendada a ampliação do número de participantes em pesquisas futuras.

O questionário, detalhado no Apêndice A, combinou questões fechadas, que permitiram quantificar tendências, e questões abertas, destinadas a captar percepções qualitativas. Esse formato buscou: (i) alcançar abrangência geográfica, contemplando diferentes regiões do país; (ii) oferecer flexibilidade de participação, reduzindo a taxa de não resposta; e (iii) assegurar diversidade de perfis, reunindo representantes de setores distintos.

2.5 Consolidação do roteiro metodológico

A quinta etapa consistiu em consolidar o roteiro metodológico, integrando de forma sistemática as contribuições recebidas dos especialistas. As respostas foram analisadas sob três eixos: (i) identificação de convergências e divergências quanto à clareza, aplicabilidade e abrangência dos passos; (ii) refinamento dos critérios técnicos, operacionais e procedimentais, com atenção às especificidades setoriais e à experiência prática dos respondentes; e (iii) verificação da aderência do roteiro ao modelo regulatório brasileiro e às referências internacionais em IQ.

Com base nesses eixos, ajustaram-se descrições de etapas, eliminaram-se ambiguidades, redundâncias e lacunas, aperfeiçoaram-se termos técnicos e incluíram-se exemplos de aplicação para setores com perfis de risco distintos. Por fim, confirmou-se que o roteiro consolidado permanece alinhado às diretrizes do Inmetro e compatível com as tendências globais identificadas nas normas ISO e IEC.

3 Resultados

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir das cinco etapas metodológicas descritas no Capítulo 2, organizados em quatro blocos: (i) análise do novo modelo regulatório do Inmetro; (ii) síntese comparativa dos modelos da União Europeia, dos Estados Unidos e da Coreia do Sul; (iii) roteiro metodológico proposto em 14 passos; e (iv) contribuições da consulta a especialistas que validaram o roteiro.

3.1 O modelo regulatório do Inmetro

A Portaria Inmetro nº 30, de 25 de fevereiro de 2022 [5], oficializa o novo modelo de regulamentação do Instituto, baseado em flexibilidade, transparência, foco em resultados e abordagem orientada por riscos. A medida busca superar limitações do sistema anterior — caracterizado por regulamentos prescritivos (com requisitos e

procedimentos estabelecidos de forma rígida) e processos burocráticos — e convergir com padrões internacionais, em sintonia com a Indústria 4.0 e a economia digital.

As consultas públicas coordenadas pelo Inmetro foram determinantes para conferir legitimidade ao processo. O documento “Novo modelo regulatório para o Inmetro – diagnóstico e proposta de um Novo Modelo Regulatório baseado na atuação da Dconf” recebeu mais de 900 contribuições de partes interessadas [8–10], reforçando a construção participativa do modelo.

A Portaria Inmetro nº 30 [5] também destaca a avaliação voluntária da conformidade como alternativa escalável e proporcional para mitigar riscos regulatórios, equilibrando custos de implementação e eficácia das normas e incentivando a colaboração entre setor público e privado. Esse enfoque contribui para fortalecer a competitividade industrial e facilitar a integração do Brasil aos mercados internacionais. A Quarta Revolução Industrial — com a incorporação de Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial, *big data* e *blockchain* — oferece oportunidades para adoção de práticas globais e tecnologias que aprimorem a eficiência regulatória do país [11].

Para conduzir a transição, a Portaria Inmetro nº 286, de 3 de agosto de 2022 [12], instituiu o Arcabouço do Processo de Governança de Transição e o Regimento Interno do Comitê de Governança de Transição do Modelo Regulatório (CGTMRI). O comitê supervisiona a implementação do modelo renovado, com foco em gestão de riscos, monitoramento de resultados e participação de partes interessadas. Complementarmente, a Portaria GM/MDIC nº 301, de 5 de outubro de 2023 [13], aprovou o regimento interno do Comitê Técnico de Assessoramento *Ad Hoc* de Infraestrutura da Qualidade (CTIQ), que apoia o Conmetro na Estratégia Nacional de Infraestrutura da Qualidade (ENIQ).

Lançada em 2023, com horizonte de dez anos, a ENIQ prioriza modernização regulatória, transformação digital e inserção internacional [14]. Embora o novo modelo represente avanço, ainda falta detalhamento operacional para o desenvolvimento e a implementação de programas de avaliação da conformidade voluntários, o que limita seu pleno aproveitamento.

3.2 Modelos regulatórios internacionais

Este tópico compara os modelos regulatórios da União Europeia, dos Estados Unidos e da Coreia do Sul. A análise estabelece as bases para entender convergências, divergências e lições que podem orientar o aprimoramento do contexto brasileiro.

3.2.1 O modelo regulatório da União Europeia

O arcabouço normativo da União Europeia atribui responsabilidades diretas aos fabricantes e demais operadores econômicos, como importadores e distribuidores. Antes de lançar um produto no mercado, cabe ao fabricante verificar se o item está sujeito a exigências específicas e, em caso afirmativo, assegurar o atendimento a todos os requisitos, por avaliação própria ou com apoio de organismos terceirizados [10].

Para formalizar o cumprimento dessas exigências, o fabricante elabora um dossiê técnico que descreve concepção, produção e desempenho do produto e, em seguida, emite a declaração de conformidade — condição para aplicar a marcação de Conformidade Europeia (*Conformité Européenne*, CE). Essa marca atesta o atendimento às normas de segurança, saúde e proteção ambiental do bloco; recomenda-se manter toda a documentação acessível às autoridades por, no mínimo, dez anos [10].

A União Europeia busca equilibrar inovação e segurança ao estabelecer requisitos essenciais que definem riscos a serem mitigados, sem impor um caminho único para demonstrar conformidade. O uso de normas harmonizadas, publicadas no Jornal Oficial da União Europeia, confere presunção de conformidade; alternativas são admitidas, desde que comprovem equivalência [10]. A avaliação da conformidade divide-se em módulos que determinam o grau de envolvimento de organismos notificados. O Módulo A contempla o controle interno da produção, dispensando intervenção externa, enquanto módulos de maior abrangência exigem participação de terceiros, de acordo com o risco e a complexidade do produto [10].

A vigilância de mercado, estabelecida pelo Regulamento (UE) 2019/1020 [15] e em vigor desde julho de 2021, reforçou a fiscalização — inclusive no comércio

eletrônico — e intensificou a coordenação entre autoridades dos Estados-Membros. Sempre que há suspeita de não conformidade, podem ser adotadas medidas como *recall* ou restrição de venda, chegando, em certos países, a sanções penais [15].

O Sistema de Informação e Comunicação para Vigilância de Mercado (*Information and Communication System for Market Surveillance*, ICSMS) apoia a cooperação entre autoridades, compartilhando dados sobre irregularidades e riscos identificados. Essa plataforma digital agiliza os procedimentos de vigilância e reforça a confiança no sistema regulatório, sobretudo em setores de alta complexidade técnica [10].

3.2.2 O modelo regulatório dos Estados Unidos da América

Nos Estados Unidos, a regulação é descentralizada. Agências federais e estaduais possuem atribuições específicas, exercendo funções executivas, legislativas e judiciais. Predomina a avaliação da conformidade voluntária, exceto quando o produto oferece risco evidente à população [16].

A elaboração de normas conta com intensa participação pública, realizada por meio de consultas transparentes. Regulamentos estaduais podem impor exigências mais restritivas, refletindo o caráter federativo. Órgãos como a Comissão para a Segurança de Produtos de Consumo (*Consumer Product Safety Commission*, CPSC) promovem audiências para coletar contribuições de consumidores e setores produtivos, buscando equilibrar proteção ao cidadão e necessidades do mercado [16].

O país valoriza normas técnicas de consenso elaboradas por entidades especializadas, coordenadas pelo Instituto Nacional Americano de Normalização (*American National Standards Institute*, ANSI). A legislação federal estimula as agências a adotar esses referenciais sempre que compatíveis com suas obrigações, promovendo uniformidade técnica e eficiência [16].

Cada agência define mecanismos de avaliação da conformidade conforme seu escopo, com foco em saúde, segurança e meio ambiente, sem gerar custos desproporcionais. A responsabilização de fornecedores no sistema judicial — com penalidades céleres — incentiva o cumprimento regulatório e a adoção voluntária de certificações como salvaguarda jurídica. Na vigilância de mercado, coletas de

amostras e bancos de dados sobre acidentes de consumo embasam ações das agências, facilitando a identificação de produtos potencialmente inseguros [16].

A flexibilidade regulatória, aliada ao desenvolvimento de normas de consenso, favorece a inovação, permitindo soluções tecnológicas sem imposições excessivamente prescritivas. A descentralização possibilita que estados e municípios adaptem parte das normas às suas realidades específicas, sem comprometer práticas essenciais de proteção ao consumidor [16].

3.2.3 O modelo regulatório da Coreia do Sul

Na Coreia do Sul, produtos de interesse regulatório para o Brasil (no âmbito do Inmetro) estão sujeitos a atos legislativos que estabelecem requisitos de segurança, saúde e patrimônio dos usuários, além de regras de vigilância de mercado e penalidades em caso de descumprimento [17,18].

A legislação sul-coreana contempla vários métodos de avaliação da conformidade: certificação (com ensaios e inspeção de fábrica), verificação (por instituições designadas pelo Ministério do Comércio, Indústria e Energia), declaração de conformidade (emitida pelo próprio fabricante ou por terceiros) e atendimento a normas de segurança. A escolha do método depende do risco do produto, segundo deliberação de comitês setoriais [19].

A responsabilidade civil de fabricantes e fornecedores é rigorosa. Caso um consumidor sofra danos por defeito do produto, a lei considera fatores como intencionalidade, gravidade e limitações técnicas de detecção à época da fabricação; atenuantes são previstos quando o fabricante comprova que cumpriu todos os padrões vigentes [20,21].

As autoridades dispõem de instrumentos para recomendar ou impor ações corretivas — *recall*, destruição, reparo, substituição ou reembolso. Em situações de risco significativo, tais medidas são mandatórias. O Instituto Coreano de Segurança de Produtos (*Korean Institute of Product Safety*, KIPS) atua no centro desse processo, conduzindo avaliações em colaboração com a indústria e organizações de consumidores [21–23].

O monitoramento de incidentes é realizado pelo Sistema de Vigilância de Lesões de Consumidores (*Consumer Injury Surveillance System*, CISS), gerenciado pela Agência de Consumidores da Coreia (*Korea Consumer Agency*, KCA). O sistema recebe mais de 70 mil notificações anuais, subsidiando decisões de *recall*, ajustes normativos e aumentando a transparência sobre a segurança de produtos [24].

A combinação de fiscalização contínua, banco de dados robusto e ações corretivas céleres permite à Coreia do Sul responder rapidamente a irregularidades, característica especialmente relevante em mercados globais de rápida evolução tecnológica.

3.3 Proposta de roteiro metodológico

O presente artigo propõe um roteiro metodológico estruturado em 14 passos, que constituem o núcleo do método sugerido. Esses passos estão apresentados na Tabela 1 e ilustrados na Figura 1. Cada um é acompanhado de uma “Pergunta Orientadora”, que torna a aplicação do roteiro mais intuitiva. Alguns deles são opcionais, mas recomendados para ampliar a abrangência.

Tabela 1. 14 passos para estruturar um programa de avaliação da conformidade voluntário.

Passo	**Pergunta Orientadora**
1. Definição do produto ou serviço	O que será certificado?
2. Requisitos técnicos e padrões de avaliação	Quais normas e regulamentos se aplicam?
3. Organismos de certificação	Quais organismos têm competência para avaliar?
4. Designação de laboratórios de ensaios	Há laboratórios acreditados para realizar os ensaios?
5. Procedimentos de certificação	Qual modelo de certificação será adotado e por quê?
6. Ensaios e auditorias iniciais	Quais ensaios e verificações são necessários?
7. Análise dos resultados e decisão	Os resultados demonstram conformidade com os critérios?
8. Emissão do certificado e uso de marcas	Como será feita a comunicação da certificação ao mercado?
9. Monitoramento contínuo e auditorias	Como acompanhar a conformidade ao longo do tempo?
10. Gestão de não conformidades	Como serão tratadas eventuais falhas de conformidade?
11. Revisão periódica e melhoria contínua	Como garantir a atualização do programa de certificação?
12. Uso de tecnologias avançadas (opcional)	Como agregar eficiência e confiabilidade com tecnologias?
13. Adaptação ao contexto setorial (opcional)	Quais adequações setoriais são necessárias?
14. Sustentabilidade e critérios ESG (opcional)	Como incorporar práticas ESG no programa?

Fonte: Os autores.

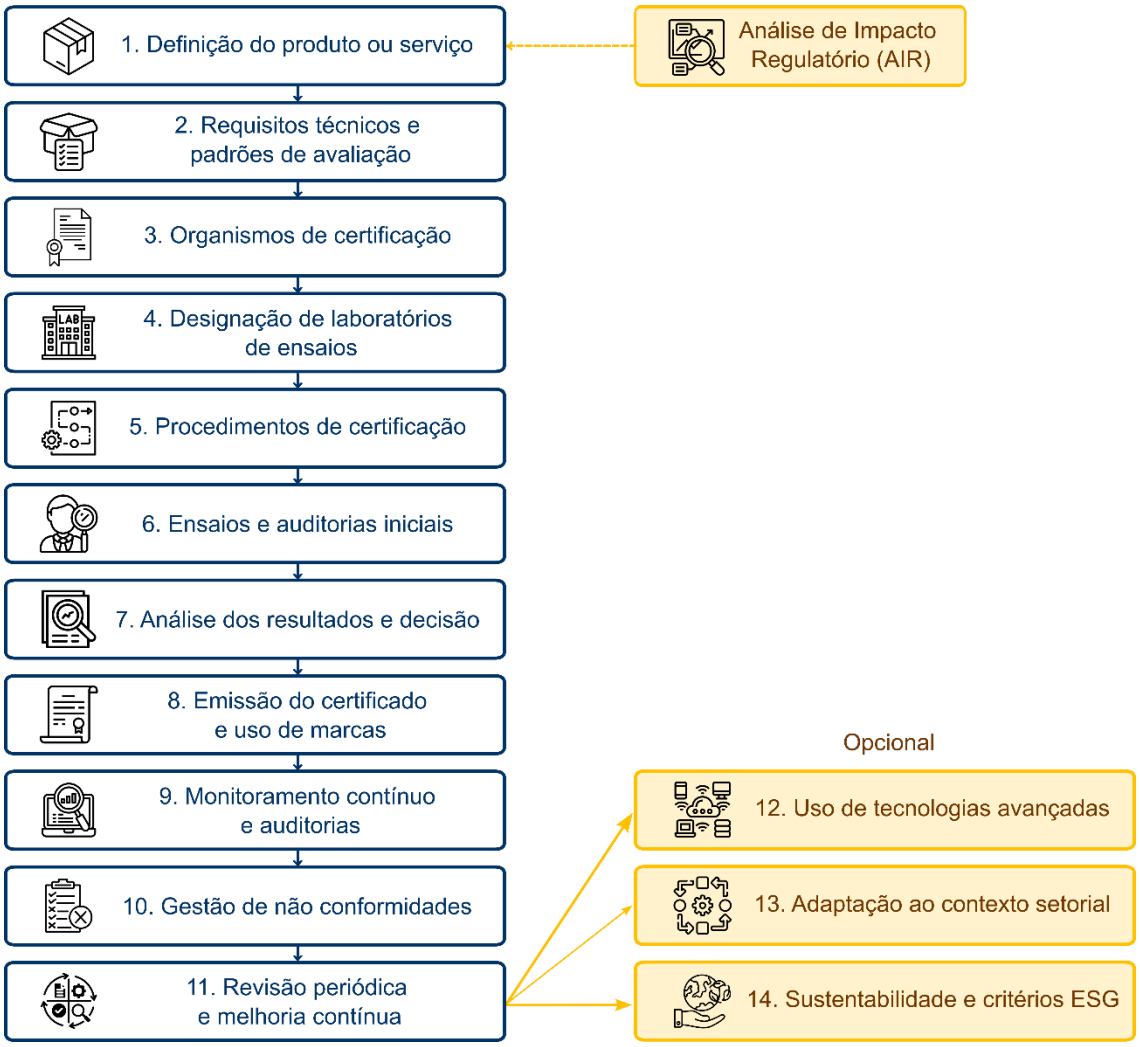


Figura 1. Diagrama de fluxo dos 14 passos para estruturação de programas de avaliação da conformidade voluntários, conforme roteiro metodológico proposto neste artigo.
Fonte: Os autores.

3.4 Resultados da consulta a especialistas

De modo geral, as avaliações quantitativas evidenciaram percepção positiva quanto à estrutura, coerência e integração normativa internacional do artigo, bem como à adequação do roteiro de 14 passos. Assim, obteve-se um conjunto ampliado e validado de etapas. A comparação entre modelos regulatórios internacionais foi considerada útil para contextualizar desafios e oportunidades no cenário brasileiro.

Diversos especialistas — sobretudo da academia e da indústria — sugeriram detalhar visualmente o roteiro com quadros comparativos, diagramas de fluxo e exemplos práticos, a fim de facilitar sua aplicação em diferentes setores. No âmbito acadêmico, destacou-se a inclusão de indicadores-chave de desempenho para tornar o processo mensurável e transparente. Representantes da indústria ressaltaram a

importância de estratégias de comunicação e de incentivos que ampliem a adesão dos fornecedores, especialmente mediante políticas de apoio voltadas a micro e pequenas empresas.

Mecanismos de diferenciação, como selos por níveis de conformidade, sistemas de etiquetagem e ferramentas para controle da reputação de organismos, foram mencionados como forma de valorizar o produto certificado e evitar a desvalorização dos selos voluntários. Houve ainda recomendações — em especial do Inmetro — relativas à definição do proprietário do programa, à necessidade de endosso institucional e à articulação com grandes *stakeholders*, além da inclusão de incentivos fiscais.

Entre os principais desafios práticos apontados figuram: custos de implementação, limitações de infraestrutura laboratorial e de recursos humanos, ausência de tradição em programas voluntários, escassez de Organismos de Certificação de Produtos (OCP) para escopos não compulsórios e dificuldades de adesão de micro e pequenas empresas. A carência de políticas de apoio, subsídios, linhas de crédito e ações de capacitação técnica foi enfatizada por participantes de três segmentos — academia, indústria e organismos de certificação.

Representantes do Inmetro também destacaram entraves institucionais, como a operacionalização ainda limitada do novo modelo regulatório, a dependência de demanda para viabilizar laboratórios e a importância de conduzir uma Análise de Impacto Regulatório (AIR) como etapa preliminar para definir o tipo de programa voluntário a ser adotado. Divergências surgiram a respeito do equilíbrio entre certificação formal e declaração do fornecedor, considerando as restrições do setor produtivo nacional. Enquanto representantes da academia destacaram que a declaração do fornecedor poderia ser considerada em produtos de menor risco ou em situações de limitação de infraestrutura, os especialistas do Inmetro enfatizaram a certificação formal como referência preferencial, ainda que reconhecendo a existência da SDoC em normas internacionais. Por sua vez, os organismos de certificação defenderam de forma mais enfática a certificação por terceira parte, ressaltando a importância da acreditação e do controle de reputação para preservar a credibilidade dos programas voluntários.

Todas as contribuições pertinentes foram analisadas de modo sistemático e incorporadas ao roteiro consolidado. Parte dos desafios práticos descritos será aprofundada na Seção 4.4, que discute implicações e recomendações.

4 Discussão

Este capítulo analisa criticamente os achados apresentados no Capítulo 3, relacionando-os à literatura e às experiências regulatórias internacionais. A discussão parte do contraste entre os modelos da União Europeia, dos Estados Unidos e da Coreia do Sul, resgata a lógica que sustenta o roteiro e, por fim, considera desafios práticos, recomendações de políticas e lacunas que podem orientar pesquisas futuras. O propósito é mostrar de que modo as evidências reunidas contribuem para aperfeiçoar a regulação brasileira e ampliar o uso de programas de avaliação da conformidade voluntários.

4.1 Comparação entre os modelos regulatórios internacionais estudados

A análise dos modelos regulatórios da União Europeia, dos Estados Unidos e da Coreia do Sul mostra que, embora cada sistema reflita particularidades históricas e institucionais, todos buscam proteger o consumidor, estimular a competitividade industrial e fomentar a inovação. Esses objetivos comuns se materializam por meio de três tendências convergentes: flexibilidade normativa proporcional ao risco, adoção de referências internacionais e emprego crescente de tecnologias digitais na vigilância de mercado.

A União Europeia baseia-se em normas harmonizadas e na marcação CE para criar um mercado único coerente. Os Estados Unidos adotam um modelo descentralizado, com forte participação pública e normas de consenso coordenadas pelo ANSI. Já a Coreia do Sul combina centralização legislativa com uso intensivo de plataformas digitais, assegurando respostas ágeis a irregularidades. Nos três casos, a responsabilidade primária recai sobre o fabricante, ajustada ao nível de risco do produto. Quanto aos mecanismos de vigilância, a União Europeia utiliza redes integradas como o ICSMS; os EUA valem-se de bases de dados de acidentes e sanções judiciais; e a Coreia do Sul opera o CISS, que possibilita monitoramento contínuo e ações corretivas imediatas.

Essas características confirmam que programas de avaliação da conformidade voluntários, sobretudo em produtos de menor risco ou em setores emergentes, podem antecipar requisitos futuros, fomentar a inovação e fortalecer a competitividade industrial. A Tabela 2 sintetiza os pontos convergentes e aspectos singulares de cada modelo, fornecendo subsídios objetivos para o caso brasileiro.

Tabela 2. Comparação das características dos modelos regulatórios da União Europeia, Estados Unidos e Coreia do Sul.

Aspecto	União Europeia	Estados Unidos	Coreia do Sul
Estrutura regulatória	Supranacional multinível; diretivas harmonizadas transpostas pelos Estados-Membros	Descentralizada, com autonomia estadual	Centralizada, definida por atos legislativos
Responsabilidade do fabricante	Documentação técnica alinhada ao nível de risco; presunção de conformidade via normas harmonizadas	Normas técnicas voluntárias, com rigor proporcional ao risco	Métodos diversos (certificação, verificação, declaração) conforme a periculosidade
Envolvimento de partes interessadas	Consultas públicas para definir e rever normas harmonizadas	Participação ativa em audiências públicas e normalização voluntária	Forte uso de tecnologias digitais e atuação conjunta de órgãos públicos e organizações da sociedade
Vigilância de mercado	Coordenação entre Estados-Membros, com fiscalização integrada e uso de sistemas digitais (ICSMS)	Baseada em bancos de dados de acidentes de consumo e divulgação ampla de resultados	Acompanhamento contínuo por meio do CISS, permitindo respostas rápidas e *recall* imediato em casos de irregularidade
Penalidades e responsabilidade	Multas e sanções administrativas proporcionais à gravidade; sanções penais em alguns Países-Membros	Responsabilidade civil elevada, aplicada via sistema judiciário	Ações corretivas obrigatórias em casos graves (incluindo *recalls*) com punições previstas em lei

Fonte: Os autores.

O caso brasileiro, entretanto, foi analisado separadamente na Seção 3.1. Essa escolha se justifica porque o novo modelo regulatório ainda se encontra em fase de transição e operacionalização, o que limitaria comparações diretas com sistemas já consolidados. Além disso, por ser o foco central deste estudo, o Brasil demandou uma análise mais aprofundada, destacando suas especificidades e lacunas frente às referências internacionais.

4.2 Discussão e fundamentação do roteiro metodológico proposto

Antes de iniciar o desenvolvimento de um programa voluntário de avaliação da conformidade, recomenda-se realizar uma AIR. Essa etapa delimita o problema,

define objetivos e estima benefícios, garantindo que o programa atenda a uma necessidade real e se apoie em fundamentos sólidos. Cabe ainda ressaltar que a avaliação e a classificação dos riscos devem ocorrer nas fases iniciais, norteando a escolha do esquema de certificação, o grau de rigor e a periodicidade de auditorias, conforme a ISO/IEC 17067:2013 [25].

Nesta subseção, discute-se e fundamenta-se cada um dos 14 passos do roteiro metodológico proposto, destacando as justificativas técnicas, a aderência a normas ISO/IEC e as convergências com boas práticas internacionais. Quando pertinente, exemplos da mobilidade elétrica — tema da Agenda Regulatória do Inmetro 2024/2025 [26,27] — ilustram a aplicação prática de cada passo.

4.2.1 Definição do produto ou serviço a ser avaliado

A definição clara do produto, processo ou serviço a ser submetido à avaliação da conformidade é fundamental para o êxito de qualquer programa de certificação. Esse delineamento reduz ambiguidades e orienta a escolha de requisitos técnicos, métodos de ensaio e auditorias adequados às características específicas do objeto avaliado, reforçando a confiabilidade dos certificados emitidos e a aceitação pelo mercado.

Segundo a ISO/IEC 17000:2020 [6], a avaliação da conformidade consiste em demonstrar o atendimento a requisitos especificados, sendo essencial a delimitação precisa do que se pretende avaliar. Nesse sentido, a ISO/IEC 17065:2012 [28] destaca que o escopo da certificação deve ser claramente definido, de modo a identificar produtos, processos ou serviços a serem certificados. Essa orientação assegura que os organismos de certificação atuem dentro de sua competência técnica e que os métodos de inspeção ou de ensaio sejam efetivamente aplicáveis ao escopo proposto. Além disso, a ISO/IEC 17067:2013 [25] e a ISO/IEC 17060:2022 [29] reforçam que a clareza sobre o objeto avaliado facilita a seleção de requisitos específicos e a comparabilidade entre diferentes programas de certificação.

A União Europeia prioriza a identificação rigorosa do objeto sujeito à marcação CE, permitindo a categorização correta de produtos e a definição do caminho de avaliação mais adequado [10]. Nos Estados Unidos, a CPSC costuma exigir a certificação compulsória apenas para itens considerados de maior risco; porém,

mesmo em programas voluntários, a caracterização minuciosa do produto é indispensável para a verificação de conformidade [16]. Já na Coreia do Sul, o Ministério do Comércio, Indústria e Energia — por meio da Agência Coreana de Tecnologia e Padrões (*Korean Agency for Technology and Standards*, KATS) — define requisitos de segurança e padrões técnicos para cada categoria de produto, contemplando legislações específicas, como a Lei de Segurança de Produtos e a Lei de Responsabilidade do Produto. Em todos esses modelos, um ponto em comum é a necessidade de estabelecer, logo no início, qual produto (ou qual parte dele) se encontra no escopo do processo de avaliação [19,20,22].

No segmento de mobilidade elétrica, a precisão dessa definição torna-se ainda mais relevante, pois engloba componentes e sistemas complexos, como baterias, módulos e interfaces de carregamento. Ao especificar um programa de certificação voluntária para baterias de veículos elétricos, é fundamental decidir se o foco recairá sobre células individuais, módulos ou pacotes completos. Para células de íons de lítio, a IEC 62660-1:2018 [30] estabelece critérios de desempenho que podem servir de base para a avaliação inicial, mas a certificação de módulos ou pacotes completos poderá requerer requisitos adicionais, como os relativos à integração de sistemas ou à segurança térmica.

4.2.2 Requisitos técnicos e padrões de avaliação

A definição de requisitos técnicos e padrões de avaliação constitui etapa determinante para assegurar a credibilidade e a eficácia de qualquer programa de avaliação da conformidade. Ao estabelecer critérios claros de desempenho, segurança e qualidade, facilita-se a uniformidade das metodologias de ensaio, minimizam-se interpretações dúbias e promove-se a previsibilidade para os fabricantes. Além disso, quando os requisitos são compatíveis com as demandas regulatórias e as condições reais de mercado, cresce a probabilidade de aceitação do produto em diversos países ou blocos econômicos, fomentando a competitividade internacional.

Para ilustrar a diversidade de referenciais aplicáveis, destacam-se alguns exemplos setoriais: no setor elétrico, a IEC 60335-1:2020 [31] estabelece padrões de segurança para eletrodomésticos; na área de alimentos, a ISO 22000:2018 [32]

orienta sistemas de gestão de segurança alimentar; e, para edificações, a ABNT NBR 15575-1:2024 [33] trata do desempenho de edifícios habitacionais. Em setores inovadores ou em produtos ainda não cobertos por normativas específicas, recomenda-se recorrer a guias de boas práticas nacionais ou internacionais — ou até desenvolver critérios mínimos em colaboração com especialistas e partes interessadas — garantindo a clareza e a aplicabilidade do programa de avaliação da conformidade.

No âmbito das normas de avaliação da conformidade, a ISO/IEC 17000:2020 [6] define que os requisitos especificados representam necessidades ou expectativas expressas, detalhadas ou gerais. A ISO/IEC 17065:2012 [28] exige critérios documentados e reproduzíveis, assegurando que os organismos de certificação atuem segundo metodologias tecnicamente verificáveis. A ISO/IEC 17067:2013 [25] complementa essas diretrizes ao apresentar modelos de esquemas de certificação que especificam os requisitos a serem atendidos e detalham a maneira de estruturá-los, enquanto a ISO/IEC 17060:2022 [29] orienta boas práticas na elaboração desses critérios normativos.

Experiências da União Europeia, dos Estados Unidos e da Coreia do Sul ressaltam a importância de requisitos claros. Na União Europeia, a adoção de normas harmonizadas confere “presunção de conformidade”; quem não as segue deve demonstrar atendimento aos requisitos essenciais por outros meios [10]. Nos Estados Unidos, a CPSC utiliza normas técnicas voluntárias como referência regulatória, oferecendo flexibilidade aos fabricantes [16]. Na Coreia do Sul, o Ministério do Comércio, Indústria e Energia estabelece padrões de segurança para cada classe de produto e garante a atualização desses critérios conforme a evolução tecnológica [19,20,22]. Em todos esses sistemas, a clareza e a abrangência dos requisitos alinham expectativas de mercado e reduzem divergências ao longo do processo de certificação.

No campo da mobilidade elétrica, a certificação de baterias de veículos elétricos requer critérios técnicos bem definidos para assegurar proteção elétrica, controle térmico e eficiência energética. Os requisitos gerais apontados na IEC 62660-1:2018 [30] devem ser complementados por normas específicas, como a IEC 62660-2:2018 [34] (confiabilidade e testes de abuso) e a IEC 62660-3:2022 [35] (requisitos de

segurança), a fim de garantir avaliação abrangente de desempenho, durabilidade e segurança. Assim, embora a IEC 62660-1:2018 [30] assegure requisitos rigorosos para as células, uma avaliação completa de segurança e eficiência energética exige a consideração de um conjunto mais amplo de normas.

4.2.3 Organismos de certificação

A participação de organismos de certificação competentes é decisiva para garantir credibilidade e imparcialidade nos processos de avaliação da conformidade. Ao atestar que produtos, processos ou serviços cumprem requisitos técnicos predefinidos, esses organismos proporcionam transparência às partes interessadas e confiança aos consumidores. Em programas voluntários, a escolha de entidade especializada e reconhecida amplia a legitimidade do certificado e harmoniza o programa com as expectativas de órgãos reguladores e do público-alvo.

Além da competência técnica e da acreditação dos organismos de certificação, a definição clara do proprietário do programa (“*scheme owner*”) é essencial para o reconhecimento formal e a governança dos programas voluntários. No Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H), por exemplo, o Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR) reconhece que entidades setoriais podem propor, manter e coordenar Programas Setoriais da Qualidade (PSQ), mediante aprovação da Coordenação-Geral do PBQP-H [36]. A identificação transparente do proprietário e o respectivo endosso institucional fortalecem a governança e favorecem a utilização dos programas como apoio a regulamentações. Modelos internacionais seguem lógica semelhante: o reconhecimento de entidades setoriais como proprietárias contribui para a aceitação e a interoperabilidade dos programas voluntários.

A ISO/IEC 17065:2012 [28] estabelece requisitos gerais para organismos que certificam produtos, processos e serviços, abrangendo independência, imparcialidade e competência técnica. Esses organismos devem manter sistemas de gestão da qualidade robustos, garantir rastreabilidade dos resultados de avaliação e atuar segundo procedimentos escritos que assegurem reprodutibilidade das decisões. A acreditação, por sua vez, segue a ISO/IEC 17011:2017 [37], que define requisitos para organismos responsáveis por avaliar a competência dessas entidades.

Cada jurisdição adota formatos próprios de reconhecimento. Na União Europeia, os ‘organismos notificados’ são habilitados pelos Estados-Membros para avaliar a conformidade de produtos sujeitos a requisitos específicos [10]. Nos Estados Unidos, o processo é descentralizado: organismos privados são acreditados por entidades como o ANSI ou o ANSI *National Accreditation Board* (ANAB) [16]. Na Coreia do Sul, o governo designa formalmente determinados organismos de certificação, que devem cumprir requisitos legais e manter procedimentos de verificação robustos para áreas de maior risco [19]. Em todos os casos, o prestígio e a competência técnica do organismo emissor são determinantes para o valor do selo de conformidade.

Na mobilidade elétrica, a seleção de organismos de certificação capacitados em normas específicas — por exemplo, a IEC 61851-1:2017 [38] para estações de recarga — é essencial para garantir avaliações completas e confiáveis. Esses organismos precisam dominar temas como segurança elétrica, desempenho energético e, quando pertinente, metodologias de ensaio de durabilidade e compatibilidade eletromagnética. A acreditação conforme a ISO/IEC 17065:2012 [28] e o reconhecimento internacional do emissor elevam a aceitação global do produto certificado, beneficiando fabricantes e fornecedores nacionais.

Além dos organismos de certificação e dos laboratórios de ensaio, outros organismos de avaliação da conformidade — de inspeção (ISO/IEC 17020:2012 [39]) e de verificação e validação (ISO/IEC 17029:2019 [40]) — podem atuar tanto na execução quanto no desenvolvimento, proposição e coordenação de programas voluntários. Em setores inovadores, ambientais ou ainda não plenamente regulados, esses organismos frequentemente assumem também o papel de proprietários ou mantenedores dos esquemas, fortalecendo a governança técnica, facilitando a adaptação de requisitos e incentivando o desenvolvimento de programas robustos alinhados às demandas específicas de cada segmento, em consonância com a Portaria Inmetro nº 30/2022 [5].

4.2.4 Designação de laboratórios de ensaios

A indicação de laboratórios de ensaio competentes é determinante para garantir resultados confiáveis e consistentes no processo de avaliação da conformidade.

Como esses laboratórios realizam testes específicos — medições de segurança, desempenho, durabilidade ou impacto ambiental —, a conformidade final do produto, processo ou serviço depende diretamente da qualidade de seus métodos e da precisão dos dados obtidos. A adequação técnica dos laboratórios, aliada à geração de resultados rastreáveis, confere credibilidade aos certificados emitidos.

A acreditação segundo a ISO/IEC 17025:2017 [41] constitui condição fundamental para assegurar a confiabilidade dos dados e a integridade de todo o processo. Embora, em alguns setores, essa exigência seja percebida como onerosa, ela funciona como salvaguarda essencial para a aceitação dos ensaios e para a preservação da credibilidade de programas voluntários perante o mercado e as autoridades reguladoras. A norma define requisitos gerais de competência para laboratórios de ensaio e calibração, enfatizando rastreabilidade metrológica, imparcialidade e gestão de recursos.

A ISO/IEC 17065:2012 [28] exige que organismos de certificação utilizem laboratórios acreditados ou reconhecidos para garantir a confiabilidade dos ensaios, enquanto a ISO/IEC 17011:2017 [37] estabelece critérios de atuação para organismos de acreditação. Conjuntamente, essas normas formam a base técnica e de governança para a designação dos laboratórios em programas de avaliação da conformidade.

Na União Europeia, a designação de laboratórios ocorre, em muitos casos, por meio de organismos notificados que verificam a conformidade de produtos sujeitos a requisitos específicos [9]. Nos Estados Unidos, a acreditação é descentralizada e pode ser conduzida por entidades privadas — como a ANAB ou a Associação Americana de Acreditação de Laboratórios (*American Association for Laboratory Accreditation*, A2LA) —, em consonância com critérios definidos por agências reguladoras, como a CPSC [16]. Na Coreia do Sul, funcionam laboratórios vinculados a institutos governamentais ou à iniciativa privada; todos precisam comprovar conformidade com critérios técnicos e de gestão estabelecidos em lei [19].

Em programas de certificação voluntária voltados à mobilidade elétrica, a disponibilidade de laboratórios que atendam às normas IEC — por exemplo, IEC 62660-1:2018 [30] para baterias ou IEC 61851-1:2017 [38] para estações de recarga

— é essencial. Esses laboratórios devem dispor de equipamentos para ensaios e profissionais capazes de interpretar corretamente os requisitos técnicos. A designação de laboratórios acreditados assegura resultados rastreáveis, alinhados às boas práticas internacionais, contribuindo para que o produto avaliado conquiste maior aceitação no mercado e atenda às expectativas regulatórias em evolução.

4.2.5 Procedimentos de certificação

A definição de procedimentos de certificação, com etapas claras e bem documentadas, assegura uniformidade e rastreabilidade na verificação de produtos, processos ou serviços. Esses procedimentos abrangem desde a solicitação de certificação pelo fabricante, passando pela análise de documentação técnica, até a decisão final sobre a conformidade. Em programas voluntários, o delineamento cuidadoso do fluxo de avaliação fortalece a transparência e a credibilidade do certificado, ao mesmo tempo em que otimiza recursos para fabricantes e organismos de certificação.

A ISO/IEC 17065:2012 [28] determina que os procedimentos de certificação sejam conduzidos de forma estruturada e baseada em evidências, contemplando aspectos de imparcialidade e competência. Já a ISO/IEC 17067:2013 [25] apresenta diferentes esquemas (Tipos 1 a 6) para certificação de produtos, que diferem em supervisão contínua, periodicidade de auditorias e requisitos de ensaios adicionais.

Essa flexibilidade permite ajustar o nível de rigor conforme o risco e a complexidade do objeto avaliado: produtos de maior criticidade demandam esquemas com ensaios mais extensos, auditorias frequentes e monitoramento contínuo (como o Tipo 5), enquanto produtos de menor risco podem recorrer a esquemas com menor recorrência de verificação (Tipos 1 a 3). Assim, é possível equilibrar a proteção do consumidor e a credibilidade do certificado com flexibilidade regulatória e custos proporcionais ao mercado.

Além disso, recomenda-se que a implementação dos procedimentos siga as boas práticas de auditoria da ISO 19011:2018 [42], que incluem critérios claros de avaliação e comunicação transparente dos resultados. Os principais tipos de esquemas e suas características essenciais estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3. Esquemas de certificação conforme a ISO/IEC 17067:2013 [25].

Tipo de esquema	Descrição resumida	Supervisão pós-certificação
1a / 1b	Ensaio ou inspeção única: amostra-tipo (1a) ou lote inteiro (1b). Não há avaliação do processo.	Sem vigilância (certificado restrito ao item/lote).
2	Ensaio inicial de amostra(s). Não há avaliação do processo.	Ensaios periódicos em amostras do mercado.
3	Ensaio inicial e avaliação do processo de produção.	Ensaios de amostras da fábrica/mercado e reavaliação periódica do processo.
4	Ensaio inicial e avaliação do processo de produção (Tipo 3 com análise estatística adicional ou amostragem reforçada).	Ensaios de amostras da fábrica/mercado (ou análise estatística) e reavaliação periódica do processo.
5	Ensaio inicial, avaliação do processo e do Sistema de Gestão (SG).	Ensaios frequentes em amostras de produção e/ou mercado, auditorias do SG e reavaliação do processo.
6	Certificação dirigida a serviços ou processos.	Auditorias ou inspeções periódicas, conforme plano de vigilância.

Nota: Quadro-resumo elaborado pelos autores com base na ISO/IEC 17067:2013 [25]. Recomenda-se consultar a norma para detalhes completos e oficiais.
Fonte: Os autores.

Nas jurisdições estudadas, observam-se variações de operacionalização desses procedimentos. Na União Europeia, o sistema de “módulos de avaliação da conformidade” (A a H) define o grau de envolvimento de organismos notificados, desde a autoavaliação do fabricante (Módulo A) até a garantia total da qualidade (Módulo H), que inclui auditorias mais abrangentes [10]. Nos Estados Unidos, a abordagem é descentralizada, com uso de normas voluntárias e ensaios realizados por laboratórios ou organismos de certificação acreditados, seguindo critérios técnicos validados por agências como a CPSC [16]. A Coreia do Sul, por sua vez, estabelece diferentes métodos — certificação, verificação ou declaração — conforme o risco e a complexidade do produto, exigindo ensaios iniciais e inspeções periódicas para confirmar a manutenção da conformidade [19].

No contexto da mobilidade elétrica, a definição dos procedimentos de certificação permite verificar, sistematicamente, requisitos como segurança elétrica, desempenho energético e confiabilidade de componentes. Por exemplo, ao certificar baterias de íons de lítio segundo a IEC 62660-1:2018 [30], o processo pode abranger: (i) coleta e análise de documentação do fabricante; (ii) ensaios laboratoriais de capacidade e desempenho térmico; (iii) auditoria inicial da linha de produção; e (iv) decisão final baseada em relatórios técnicos. Dependendo da relevância econômica

e do risco envolvido, pode-se optar por um esquema do Tipo 3 ou Tipo 5 (conforme a ISO/IEC 17067:2013 [25]), que prevê monitoramento periódico e auditorias adicionais para reforçar a confiança no desempenho contínuo do produto.

4.2.6 Ensaios e auditorias iniciais

A realização de ensaios e auditorias iniciais é uma das etapas mais relevantes de um programa de certificação, pois confirma se o produto, processo ou serviço atende aos requisitos técnicos estabelecidos antes da emissão do certificado. Esses procedimentos englobam testes laboratoriais, inspeções *in loco* e análise documental, oferecendo evidências objetivas para a decisão do organismo de certificação. Em programas voluntários, a precisão dessas verificações iniciais influencia diretamente a aceitação do certificado pelo mercado, ao reforçar a confiança dos usuários na conformidade do objeto avaliado.

A ISO/IEC 17065:2012 [28] requer que os organismos de certificação adotem procedimentos documentados e imparciais, que incluam métodos de ensaio e critérios de auditoria. A ISO/IEC 17025:2017 [41] estabelece requisitos gerais de competência para os laboratórios responsáveis pelos testes, garantindo a confiabilidade dos resultados. A ISO/IEC 17067:2013 [25] descreve diferentes esquemas de certificação que podem demandar avaliações iniciais mais ou menos extensas conforme o risco e a complexidade do produto. Por fim, a ISO 19011:2018 [42] fornece diretrizes para a condução de auditorias, assegurando metodologias consistentes na verificação das instalações e procedimentos do fabricante ou prestador de serviço.

No cenário internacional, o grau de rigor aplicado varia conforme a legislação. Na União Europeia, os módulos de avaliação da conformidade (A a H) exigem desde a autoinspeção do fabricante até a inspeção de terceiros acreditados, de acordo com a categoria de risco do produto [10]. Nos Estados Unidos, a CPSC determina ensaios em laboratórios acreditados para itens de maior risco, enquanto produtos de menor criticidade podem passar por avaliações voluntárias [16]. Na Coreia do Sul, determinados produtos só podem ser comercializados após auditorias iniciais e testes realizados em institutos aprovados pelo governo [19]. Esse grau de rigor sustenta a credibilidade dos diferentes esquemas de certificação.

No contexto da mobilidade elétrica, as verificações iniciais são essenciais para garantir a segurança e o desempenho de componentes e sistemas de alta complexidade tecnológica, como baterias, conversores ou estações de recarga. Para baterias de íons de lítio, por exemplo, os ensaios podem ser conduzidos conforme a IEC 62660-1:2018 [30]. Auditorias na linha de produção avaliam se os processos de fabricação seguem padrões de qualidade e segurança alinhados às diretrizes setoriais. Dessa forma, a etapa inicial de verificação contribui para que o produto seja introduzido no mercado com maior confiabilidade.

4.2.7 Análise dos resultados e decisão

A análise dos resultados e a subsequente tomada de decisão constituem etapa central do programa de certificação, pois reúnem e interpretam as evidências obtidas nos ensaios e auditorias iniciais. Nessa fase, o organismo de certificação avalia, de forma crítica e sistemática, o atendimento integral aos requisitos técnicos. Um processo decisório claro reforça a credibilidade do certificado e a confiança dos consumidores, além de orientar eventuais ações corretivas antes da emissão formal da certificação.

A ISO/IEC 17065:2012 [28] estabelece que a decisão deve basear-se em informações verificáveis e procedimentos documentados que assegurem imparcialidade e rastreabilidade. A ISO/IEC 17025:2017 [41] garante a confiabilidade dos resultados laboratoriais ao definir requisitos de competência técnica e gestão da qualidade, enquanto a ISO 19011:2018 [42] apresenta diretrizes de auditoria que sustentam a objetividade dos critérios aplicados. A integração desses referenciais permite ao organismo de certificação adotar um processo decisório transparente, alinhado às boas práticas internacionais.

Na União Europeia, a concessão da marcação CE decorre de avaliação formal conduzida por organismos notificados, responsáveis por verificar o cumprimento dos requisitos essenciais das diretivas aplicáveis [10]. Nos Estados Unidos, a CPSC exige que relatórios de ensaio para produtos de maior risco sejam revisados por laboratórios acreditados antes de a certificação ser emitida, assegurando robustez na análise [16]. Na Coreia do Sul, organismos ou agências de certificação designados avaliam se os critérios técnicos definidos pelas leis de segurança de produtos foram plenamente

satisfeitos antes de liberar a comercialização [19]. Em qualquer desses modelos, a decisão final pode aprovar o produto, solicitar ajustes ou negar a certificação.

No setor de mobilidade elétrica, a análise dos resultados de ensaios e auditorias iniciais confirma se baterias, estações de recarga ou componentes correlatos cumprem as normas de desempenho e segurança, como a IEC 62660-1:2018 [30] e a IEC 61851-1:2017 [38]. Ao avaliar baterias de íons de lítio, por exemplo, o organismo de certificação examina dados de capacidade, ciclagem e segurança térmica em relação aos limites estabelecidos. Depois de avaliadas todas as evidências, decide-se pela aprovação, pela exigência de ajustes ou pela negativa de certificação.

4.2.8 Emissão do certificado e uso de marcas

A emissão do certificado e o uso de marcas associadas (selos ou logotipos) representam a conclusão formal de um programa de certificação, atestando ao mercado que o produto, processo ou serviço cumpre requisitos específicos de segurança, qualidade ou desempenho. Em iniciativas voluntárias, um selo reconhecido fortalece a reputação do fabricante e aumenta a confiança dos consumidores, pois sinaliza compromisso com padrões técnicos verificados. Além disso, o uso ordenado da marca de conformidade garante transparência e rastreabilidade, contribuindo para a credibilidade do programa.

A ISO/IEC 17065:2012 [28] impõe obrigações aos organismos certificadores quanto à emissão de certificados, ressaltando requisitos de integridade e rastreabilidade. A ISO/IEC 17030:2021 [43] descreve requisitos gerais para marcas de conformidade de terceira parte, abrangendo formato, proteção legal e monitoramento de uso. A ISO/IEC 17067:2013 [25] complementa essas diretrizes ao orientar a implementação de esquemas que envolvam selos ou logomarcas, assegurando coerência entre a avaliação realizada e o símbolo exibido ao mercado. Conjuntamente, essas normas formam uma estrutura consistente para padronizar a concessão e a exibição de marcas de conformidade.

No âmbito internacional, a União Europeia utiliza a marcação CE para produtos que atendem aos regulamentos e diretivas harmonizadas, embora seja considerada declaração do fabricante e não selo de qualidade [10]. Nos Estados Unidos, além de selos voluntários de organismos privados (por exemplo, o *Underwriters Laboratories*

– UL), existem certificações específicas exigidas por agências como a CPSC para determinados produtos [16]. Na Coreia do Sul, produtos de alto risco devem ostentar marca oficial de segurança emitida por organismos autorizados, podendo passar por verificações regulares para validar a conformidade [19]. Em todas essas jurisdições, regras claras disciplinam o uso do certificado ou selo, evitando manipulações e assegurando a integridade do processo.

Na mobilidade elétrica, a concessão do certificado e o uso de marcas específicas podem abranger, por exemplo, baterias certificadas segundo a IEC 62660-1:2018 [30] ou estações de recarga conformes à IEC 61851-1:2017 [38]. Após a aprovação, os fabricantes podem exibir a marca de certificação no produto ou em materiais promocionais, comunicando o cumprimento de normas de segurança elétrica, eficiência e qualidade. Para garantir transparência, os organismos certificadores devem manter registros detalhados dos certificados emitidos e do uso das marcas, possibilitando que consumidores, autoridades e demais partes interessadas verifiquem a validade das alegações de conformidade.

4.2.9 Monitoramento contínuo e auditorias

O monitoramento contínuo, aliado à realização periódica de auditorias, assegura que produtos, processos ou serviços certificados mantenham o padrão de conformidade verificado na etapa inicial. Em esquemas de certificação voluntária, esse acompanhamento reforça a confiança das partes interessadas, pois demonstra compromisso com a qualidade ao longo de todo o ciclo de vida do produto. Além disso, a supervisão regular funciona como mecanismo de detecção precoce de eventuais desvios, permitindo ações corretivas mais ágeis e eficazes.

A ISO/IEC 17067:2013 [25] indica que os esquemas de certificação devem prever mecanismos de monitoramento proporcionais ao nível de risco e à complexidade dos produtos, envolvendo ensaios periódicos, auditorias de sistemas de gestão ou inspeções em fábrica. Em complemento, a ISO/IEC 17065:2012 [28] exige que os organismos de certificação definam um plano de vigilância que estabeleça a frequência e a natureza das avaliações pós-certificação. Nesse processo, a ISO 19011:2018 [42] fornece diretrizes para planejar e conduzir auditorias

de maneira sistemática e transparente, garantindo rastreabilidade das evidências e objetividade das constatações.

Na União Europeia, módulos de avaliação da conformidade — como D, E e H — frequentemente exigem auditorias regulares em sistemas de gestão da qualidade, além de ensaios em amostras selecionadas [10]. Nos Estados Unidos, a CPSC não determina auditorias contínuas para todos os produtos, mas recomenda monitoramento regular de itens de maior risco e a adoção de planos de vigilância pelos fabricantes [16]. Na Coreia do Sul, autoridades de segurança de produtos realizam inspeções periódicas, enquanto organismos de certificação podem requisitar testes de mercado para confirmar a aderência contínua aos requisitos [19]. Em todos os cenários, o objetivo é manter segurança e qualidade, evitando que o certificado se torne obsoleto ou inconsistente.

Nos programas de certificação voltados à mobilidade elétrica, o monitoramento contínuo pode contemplar verificações sazonais em baterias de veículos, estações de recarga ou outros componentes críticos, avaliando desgaste, desempenho energético e conformidade com requisitos de segurança. O organismo de certificação define auditorias anuais ou bianuais ajustadas ao nível de risco, analisando dados de produção, histórico de falhas e eventuais modificações de projeto. Esse procedimento favorece a identificação precoce de não conformidades e impulsiona a melhoria contínua, reforçando o valor do selo de certificação.

Por fim, a frequência de auditorias e ações de monitoramento deve ser proporcional ao risco, à complexidade do objeto avaliado e ao histórico de desempenho do fornecedor, conforme as melhores práticas internacionais e as recomendações da ISO/IEC 17067:2013 [25]. A norma não estabelece intervalos fixos; sugere que os proprietários dos esquemas regulem essa periodicidade de forma flexível e alinhada ao contexto setorial. Na prática, isso pode significar auditorias mais frequentes para produtos de maior criticidade ou com histórico de não conformidades, e intervalos mais extensos para programas com desempenho consolidado e risco reduzido — ajustando recursos de modo eficiente sem comprometer a robustez do programa voluntário.

4.2.10 Gestão de não conformidades

A identificação e o tratamento de não conformidades constituem etapas essenciais para manter a credibilidade e a efetividade de um programa de avaliação da conformidade. Sempre que um produto, processo ou serviço certificado deixa de atender aos requisitos especificados, é necessário adotar medidas corretivas e preventivas que restaurem o padrão de qualidade e preservem a confiança das partes interessadas. Em programas voluntários, a eficácia dessa gestão valoriza o certificado e evidencia compromisso com a melhoria contínua.

A ISO/IEC 17065:2012 [28] exige que os organismos de certificação possuam procedimentos documentados para tratar não conformidades, definindo métodos de identificação, correção e prevenção de recorrência. Em auditorias, a ISO 19011:2018 [42] orienta o registro e o acompanhamento dos desvios, enquanto a ISO/IEC 17067:2013 [25] destaca que esquemas de certificação podem prever suspensão ou cancelamento do certificado caso problemas não sejam solucionados.

Nos sistemas da União Europeia, produtos com marcação CE podem ser alvo de ações corretivas, *recall* ou restrições de comercialização quando falhas comprometem a segurança ou descumprem requisitos legais [15]. Nos Estados Unidos, a CPSC pode ordenar *recalls* e aplicar penalidades a itens que ofereçam riscos significativos à saúde ou segurança do consumidor [16]. Na Coreia do Sul, organismos de certificação e agências governamentais têm poder para revogar a certificação ou impor sanções quando as não conformidades afetam os padrões de segurança e desempenho [19]. Em todos esses cenários, agilidade e clareza na condução das ações corretivas protegem o público e a reputação dos programas.

No segmento de mobilidade elétrica, a gestão de não conformidades pode envolver a retirada de lotes de baterias com falhas térmicas ou risco de curto-circuito. Estações de recarga que se mostrem incompatíveis com padrões de segurança elétrica exigem intervenção imediata para evitar riscos aos usuários. Após identificar o problema, o fabricante deve elaborar plano de ação corretiva, documentar as alterações e submeter-se a nova avaliação do organismo de certificação, garantindo o restabelecimento do nível de conformidade previamente atestado.

4.2.11 Revisão periódica e melhoria contínua

A revisão periódica de requisitos, procedimentos e resultados de certificação garante que o programa permaneça alinhado às inovações tecnológicas, às atualizações normativas e às demandas do mercado. Esse ciclo de aprimoramento contínuo reforça a confiabilidade dos certificados, eleva a qualidade das práticas de avaliação e demonstra o compromisso dos participantes com a excelência — fatores essenciais para a longevidade e a credibilidade de iniciativas voluntárias. Para operacionalizar esse processo, recomenda-se a adoção de indicadores-chave de desempenho (*Key Performance Indicators*, KPIs) — por exemplo, taxa de adesão, tempo médio de certificação, frequência de não conformidades, satisfação dos participantes e efetividade das ações corretivas. O monitoramento sistemático desses indicadores amplia a transparência, facilita a identificação de oportunidades de melhoria e embasa decisões estratégicas, permitindo ajustes tempestivos.

Esses dados retroalimentam as auditorias periódicas previstas no monitoramento contínuo (etapa 9) e funcionam como insumos para a própria revisão e melhoria do programa (etapa 11). Não conformidades identificadas, pontos de atenção recorrentes e retornos dos participantes orientam correções nos critérios técnicos, nos procedimentos de auditoria e nas ações corretivas, fomentando um aperfeiçoamento dinâmico. Além disso, organismos de acreditação devem detectar rapidamente problemas emergentes e atuar com agilidade, preservando a competitividade leal entre os agentes.

A ISO/IEC 17067:2013 [25] prevê que os esquemas de certificação se adaptem ao longo do tempo, especialmente diante de novas evidências técnicas ou alterações normativas. A ISO/IEC 17065:2012 [28] reforça que organismos de certificação devem monitorar a eficácia de seus processos e incorporar melhorias frente a mudanças regulatórias, tecnológicas ou de mercado. Complementarmente, a ISO 19011:2018 [42] orienta auditorias internas e externas de sistemas de gestão, contribuindo para a manutenção de um ambiente de melhoria contínua.

Na União Europeia, normas harmonizadas e módulos de avaliação da conformidade passam por atualizações regulares, exigindo que organismos notificados e fabricantes ajustem suas práticas de certificação [10]. Nos Estados

Unidos, a CPSC revisa periodicamente as regulamentações, incorporando retornos de múltiplas partes interessadas, o que impacta os critérios técnicos utilizados pelos organismos certificadores [16]. Já na Coreia do Sul, ciclos oficiais de revisão garantem que padrões de segurança e desempenho permaneçam atuais, incentivando ajustes tempestivos [19]. O princípio comum, nesses contextos, é a adaptação contínua para acompanhar a evolução tecnológica.

A revisão periódica é particularmente relevante em setores de rápida transformação, como a mobilidade elétrica. A evolução das baterias de íons de lítio — amparada por normas como a IEC 62660-1:2018 [30] — e o surgimento de novas tecnologias de recarga (IEC 61851-1:2017 [38]) exigem atualização constante dos critérios de ensaio e das metodologias de auditoria. Um programa de certificação voluntária robusto deve, portanto, prever intervalos regulares para analisar dados de mercado, relatórios de falhas e mudanças normativas, ajustando requisitos para refletir as melhores práticas e garantir simultaneamente competitividade e segurança.

4.2.12 Uso de tecnologias avançadas (opcional)

A adoção de tecnologias avançadas em programas de certificação voluntária tem ganhado relevância por ampliar eficiência, confiabilidade e rastreabilidade nos processos de avaliação da conformidade. Ao automatizar etapas e incorporar ferramentas inteligentes, reduz-se a subjetividade em análises, aprimora-se a tomada de decisão e facilita-se o monitoramento contínuo de desvios. Dessa forma, a modernização tecnológica fortalece o valor do certificado junto ao mercado e às autoridades reguladoras.

Entre os recursos mais promissores destacam-se: (i) *blockchain*, para garantir rastreabilidade e autenticidade dos registros; (ii) IoT, permitindo monitoramento remoto de produtos e instalações; e (iii) inteligência artificial, utilizada na análise automatizada de não conformidades, triagem documental e detecção preditiva de falhas. A escolha da tecnologia deve considerar custo, viabilidade operacional, maturidade setorial, infraestrutura disponível e alinhamento às exigências regulatórias. Quando a adoção é incipiente, recomenda-se iniciar com projetos-piloto e consultas técnicas, validando a eficácia das soluções e fomentando o engajamento dos participantes.

Sob o prisma normativo, a ISO/IEC 17067:2013 [25] salienta que os esquemas de certificação devem adaptar-se a novas soluções que aprimorem segurança e qualidade dos resultados. Em complemento, a ISO/IEC 17030:2021 [43] apresenta diretrizes específicas para emissão e controle de marcas de conformidade por meios digitais. embora não prescreva tecnologias específicas, suas diretrizes podem ser atendidas, por exemplo, com QR *codes*, *blockchain* ou outras plataformas digitais que reforcem rastreabilidade e prevenção de fraudes.

Experiências internacionais confirmam essa tendência. Na União Europeia, sistemas digitais de vigilância de mercado, como o ICSMS, otimizam o intercâmbio de dados entre autoridades e simplificam a identificação de inconformidades. Nos Estados Unidos, organismos privados gerem plataformas tecnológicas que auxiliam a CPSC a monitorar produtos com agilidade. Na Coreia do Sul, a integração de *big data* ao banco de acidentes de consumo (CISS) tornou as ações corretivas mais céleres e eficazes.

No setor de mobilidade elétrica, essas tecnologias viabilizam o monitoramento remoto — em tempo real — de estações de recarga e baterias veiculares, aprimorando segurança operacional e prevenindo falhas. Embora a IEC 61851-1:2017 [38] não detalhe o uso de IoT ou inteligência artificial, fabricantes e organismos de certificação podem integrar essas inovações para verificar conformidade continuamente e mitigar riscos de sobrecarga, aquecimento ou interrupções de energia. Essa abordagem integrada aumenta a confiabilidade de todo o ecossistema de mobilidade elétrica e ressalta o papel das tecnologias avançadas no avanço dos programas de avaliação da conformidade voluntários.

4.2.13 Adaptação ao contexto setorial (opcional)

A adequação dos programas de certificação voluntária às características de cada setor produtivo é essencial para garantir que os critérios de avaliação sejam, simultaneamente, aplicáveis e atraentes para a indústria. Ao propor requisitos técnicos ajustados ao cenário específico, o programa torna-se mais eficaz e incentiva a adesão de fabricantes, fornecedores e demais atores do mercado.

A efetividade dessa adaptação depende do engajamento setorial, promovido por processos participativos — consultas públicas, fóruns técnicos ou grupos de

trabalho multissetoriais. Esses espaços de diálogo permitem que requisitos técnicos, métodos de avaliação e práticas de auditoria reflitam as realidades operacionais, tecnológicas e regulatórias de cada segmento, ampliando a robustez e a aceitação dos programas voluntários.

Nesse contexto, a experiência do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBE-V) ilustra o valor de uma governança colaborativa: coordenado pelo Inmetro, o PBE-V reuniu representantes governamentais, da indústria automobilística e consultorias técnicas, mostrando como a validação coletiva de critérios e a auditoria contínua aprimoram o programa [44].

Do ponto de vista normativo, a ISO/IEC 17067:2013 [25] permite diferentes formatos de certificação que contemplam particularidades setoriais, enquanto a ISO/IEC 17065:2012 [28] recomenda que os organismos considerem demandas de mercado ao definir seus esquemas. A ISO/IEC 17000:2020 [6] reforça que processos de avaliação da conformidade devem minimizar barreiras desnecessárias ao comércio, promovendo harmonização e reconhecimento internacional.

No setor de mobilidade elétrica, por exemplo, a IEC 61851-1:2017 [38] estabelece diretrizes gerais para infraestrutura de recarga de veículos. Contudo, a adoção no Brasil pode requerer adequações às diferentes topologias de rede elétrica e aos tipos de conectores locais, além de prever soluções para condições climáticas adversas. A customização de normas e metodologias de ensaio, portanto, favorece a competitividade e garante que o programa voluntário atenda às demandas técnicas e regulatórias de cada contexto setorial.

4.2.14 Sustentabilidade e critérios ESG (opcional)

A integração de práticas sustentáveis e requisitos Ambientais, Sociais e de Governança (*Environmental, Social, and Governance*, ESG) em programas de avaliação da conformidade voluntários reflete a demanda crescente de consumidores, governos e investidores por responsabilidade corporativa. Além de reforçar a credibilidade dos produtos e processos certificados, essa abordagem promove transparência e contribui para mitigar riscos ambientais e sociais ao longo da cadeia produtiva.

Em termos normativos, a ISO 14067:2018 [45] estabelece diretrizes para quantificação e relato da pegada de carbono de produtos, oferecendo parâmetros objetivos para mensurar impactos ambientais. A ISO 14001:2015 [46] define requisitos de gestão ambiental, enquanto a ISO 26000:2010 [47] aborda responsabilidade social. Esses referenciais podem ser incorporados a esquemas de certificação, ampliando o escopo para contemplar governança, proteção ambiental e respeito aos direitos humanos.

No setor de mobilidade elétrica, a introdução de padrões ambientais e sociais abrange, simultaneamente, a origem responsável de minérios para baterias (como lítio e cobalto) e a eficiência energética de sistemas de recarga. A certificação de baterias pode incluir critérios ESG relativos à rastreabilidade de matérias-primas, pegada de carbono e eficiência energética. A ISO 14067:2018 [45] fornece diretrizes para quantificar a pegada de carbono ao longo de todo o ciclo de vida, enquanto a ISO 26000:2010 [47] assegura a extração responsável e a prevenção de abusos trabalhistas. Além disso, considerar o impacto no fim da vida útil — incentivando reciclagem e reuso — alinha-se aos princípios da ISO 14001:2015 [46]. Ao incorporar esses critérios, os programas voluntários fomentam inovação sustentável, reforçam a competitividade das organizações e garantem maior adesão às boas práticas globais, consolidando produtos certificados como referência no mercado internacional.

4.3 Consolidação e síntese do roteiro metodológico

O roteiro metodológico proposto adere de forma consistente às diretrizes da Portaria Inmetro nº 30 [5] ao combinar flexibilidade, foco em resultados, abordagem baseada em riscos e convergência internacional numa sequência lógica. Cada etapa foi concebida para ajustar o nível de rigor à criticidade do produto ou serviço, conforme os esquemas diferenciados da ISO/IEC 17067:2013 [25], assegurando proporcionalidade regulatória.

A ênfase em riscos concretiza-se com a condução prévia da AIR e com a segmentação dos esquemas de avaliação, direcionando recursos aos produtos de maior impacto potencial. A convergência internacional resulta do uso sistemático de normas ISO e IEC desde a definição de requisitos técnicos até a escolha de organismos de certificação e laboratórios, facilitando o reconhecimento mútuo de certificados. Por fim, o roteiro privilegia a participação das partes interessadas —

consultas públicas, validação técnica e adaptação setorial —, promovendo diálogo permanente entre indústria, organismos de avaliação, governo e academia.

Cabe esclarecer que o roteiro metodológico não foi concebido de forma exclusiva para a eletromobilidade, mas sim como uma estrutura transversal aplicável a programas voluntários em diferentes setores. A contribuição específica deste artigo está em reunir, de forma integrada, elementos que raramente aparecem combinados — análise de impacto regulatório (AIR) prévia, definição clara do proprietário do programa (*scheme owner*) e seu endosso institucional, equilíbrio proporcional entre certificação formal por terceira parte e declaração do fornecedor, uso de indicadores (KPIs) e integração de tecnologias digitais. Esse arranjo distingue a proposta em relação a modelos tradicionais e reforça seu caráter inovador.

4.4 Desafios práticos na implementação

A implementação do roteiro enfrenta desafios ao longo de todo o processo, da concepção ao amadurecimento dos programas, exigindo abordagem sistêmica e colaborativa para superá-los. No início da estruturação, um dos entraves é a resistência de setores produtivos à adesão, especialmente em segmentos de menor porte, baixa maturidade regulatória ou escassa tradição em gestão da qualidade. Tal resistência decorre, sobretudo, do desconhecimento dos benefícios dos programas voluntários. A comunicação aprimorada e estratégias segmentadas — dirigidas a sociedade, consumidores e fornecedores — são, portanto, essenciais para ampliar o engajamento e valorizar os produtos certificados.

O engajamento de grandes *stakeholders* — empresas líderes, associações setoriais e compradores institucionais — tem papel decisivo na consolidação e na governança das cadeias produtivas. A inclusão dos programas voluntários como critério em processos de avaliação de fornecedores potencializa a adesão, agregando valor ao produto e estimulando competitividade.

A adoção de abordagens baseadas em risco apresenta desafios técnicos e culturais, notadamente em segmentos pouco familiarizados com essas metodologias. Capacitação, disseminação de boas práticas e suporte especializado são necessários para internalizar o conceito de risco e aplicá-lo na definição dos requisitos dos programas.

Quanto à designação de organismos de certificação e laboratórios, destacam-se a limitação da infraestrutura e a oferta restrita de OCP para escopos voluntários, sobretudo em segmentos inovadores e regiões periféricas. A natureza voluntária dos programas gera incerteza de demanda, o que pode dificultar investimentos em equipamentos e na qualificação de equipes. Essa condição não configura uma limitação da proposta, mas um desafio inerente ao modelo, cuja superação depende de políticas públicas articuladas — incentivos fiscais, subsídios, linhas de crédito e reconhecimento de certificados em compras governamentais — capazes de mitigar esse obstáculo. Por outro lado, a flexibilidade dos programas cria oportunidades em nichos ainda não cobertos por regulamentação compulsória, estimulando inovação e parcerias setoriais, como evidenciado no PBE-V.

O custo de participação — taxas de certificação, ensaios, auditorias e atualização tecnológica — afeta principalmente micro e pequenas empresas. Descontos, benefícios fiscais ou preferência em compras públicas, aliados a campanhas informativas ao setor produtivo e ao consumidor final, são recomendados para esclarecer os diferenciais mercadológicos dos produtos certificados e fomentar adesão.

No monitoramento contínuo, auditorias e revisões periódicas enfrentam desafios logísticos em regiões com recursos limitados ou dispersão geográfica. Planejamento operacional rigoroso e soluções remotas ou colaborativas tornam-se, aqui, essenciais.

A diferenciação de produtos certificados também impulsiona a adesão. Selos ou etiquetas por níveis de conformidade — como as de eficiência energética — agregam valor, facilitam o reconhecimento pelo consumidor e criam vantagem competitiva, desde que geridos com critério e reconhecidos pelos agentes de mercado.

No plano institucional, a centralização de competências e a limitação de quadros técnicos no Inmetro podem dificultar a agilidade regulatória; já nos programas voluntários, a descentralização e o protagonismo de entidades setoriais favorecem a rapidez e a capilaridade.

A formação, atualização e retenção de profissionais qualificados em laboratórios e organismos de avaliação configuram desafios estruturais persistentes. Parcerias com universidades, institutos de pesquisa e centros de formação profissional são fundamentais para suprir lacunas e assegurar a credibilidade do sistema.

Por fim, a implementação de critérios ESG enfrenta obstáculos relativos a custos de adaptação, definição de métricas ambientais e necessidade de incentivos regulatórios. O alinhamento com padrões ISO/IEC facilita o reconhecimento mútuo de certificados e reduz barreiras técnicas ao comércio, mas requer investimento contínuo e acompanhamento das tendências globais.

4.5 Sugestões para pesquisas futuras

Pesquisas futuras podem aprofundar o entendimento sobre a aplicação do roteiro proposto e apoiar seu aperfeiçoamento. Como primeiro passo, convém analisar empiricamente os programas de avaliação da conformidade voluntários já conduzidos pelo Inmetro, registrando casos de sucesso e de insucesso para identificar fatores que favorecem — ou dificultam — sua aceitação, eficácia e sustentabilidade.

Em seguida, é útil comparar esses programas com programas setoriais de qualidade existentes no Brasil, a fim de revelar pontos de convergência, lacunas metodológicas e oportunidades de integração que reforcem a Infraestrutura da Qualidade em distintas cadeias produtivas.

Estudos comparativos entre países em diferentes estágios de maturidade regulatória constituem outro eixo promissor: eles ajudam a compreender como normas ISO e IEC são adaptadas em múltiplos contextos e evidenciam estratégias de convergência normativa efetivas no exterior.

Adicionalmente, investigações sobre o potencial de tecnologias digitais — inteligência artificial, *blockchain*, IoT e *big data* — podem demonstrar caminhos para modernizar processos de certificação e vigilância de mercado; testes-piloto de rastreabilidade em *blockchain*, por exemplo, ofereceriam subsídios valiosos para a digitalização dos programas.

Por fim, estudos sobre a percepção de fabricantes, consumidores, organismos de certificação e autoridades reguladoras esclareceriam motivações e barreiras à adoção dos programas voluntários. Levantamentos de custos, retorno sobre investimento e impactos na competitividade industrial completariam o quadro, subsidiando políticas públicas que estimulem adesão e ampliem a confiança no sistema.

5 Conclusões

A consolidação das recomendações apresentadas nos subcapítulos 4.2.1 a 4.2.14 confirma a relevância de instituir um processo estruturado, coerente e alinhado ao modelo regulatório brasileiro para programas de avaliação da conformidade voluntários. Os 14 passos propostos constituem o núcleo do roteiro metodológico, articulando referenciais internacionais (ISO e IEC) às diretrizes do Inmetro. A Tabela 1, acompanhada das “Perguntas Orientadoras”, oferece uma síntese didática que facilita a aplicação prática e assegura aderência às normas globais. Ao incorporar exigências do novo modelo regulatório e padrões reconhecidos mundialmente, o roteiro contribui simultaneamente para a competitividade, segurança e inovação, reforçando a credibilidade de produtos e serviços nos mercados nacional e internacional.

A superação dos desafios identificados — mediante políticas públicas integradas, incentivos tangíveis, parcerias estratégicas, valorização de profissionais e comunicação estruturada — será determinante para consolidar os programas de avaliação da conformidade voluntários e expandir o alcance da IQ no país. Ao promover a convergência entre inovação, competitividade e segurança, essas iniciativas reforçam a posição do Brasil em cadeias globais de valor e favorecem um ambiente regulatório mais ágil, transparente e alinhado às melhores práticas internacionais.

Lista de Siglas

A2LA	American Association for Laboratory Accreditation
AIR	Análise de Impacto Regulatório
ANAB	ANSI National Accreditation Board
ANSI	American National Standards Institute
CE	Conformité Européenne
CGTMRI	Comitê de Governança de Transição do Modelo Regulatório do Inmetro

CISS	Consumer Injury Surveillance System
Conmetro	Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
CPSC	Consumer Product Safety Commission
CTIQ	Comitê Técnico de Assessoramento Ad Hoc de Infraestrutura da Qualidade
ENIQ	Estratégia Nacional de Infraestrutura da Qualidade
ESG	Environmental, Social and Governance
IEC	International Electrotechnical Commission
ICSMS	Information and Communication System for Market Surveillance
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IoT	Internet of Things
IQ	Infraestrutura da Qualidade
ISO	International Organization for Standardization
KATS	Korean Agency for Technology and Standards
KCA	Korea Consumer Agency
KIPS	Korean Institute of Product Safety
KPI	Key Performance Indicator
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
OCP	Organismo de Certificação de Produtos
PBQP-H	Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat
PBE-V	Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular
PSQ	Programa Setorial da Qualidade
SG	Sistema de Gestão
Sinmetro	Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
UL	Underwriters Laboratories

Referências

1. Harmes-Liedtke, U.; Di Matteo, J.J.O. Global Quality Infrastructure Index Report 2020; Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB): Braunschweig, Germany; International Network on Quality Infrastructure (INetQI): Bad Homburg, Germany; INTI: Buenos Aires, Argentina, 2021;

2. Kellermann, M. Ensuring Quality to Gain Access to Global Markets: A Reform Toolkit; World Bank: Washington, DC, USA; Physikalisch-Technische Bundesanstalt: Braunschweig, Germany, 2019;

3. UNIDO Quality Policy: Guiding Principles; United Nations Industrial Development Organization: Vienna, Austria, 2018;

4. Brasil. Portaria No 2, de 4 de Janeiro de 2017; Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços: Brasília, Brazil, 2017; p. 111;.

5. Brasil. Portaria No 30, de 25 de Fevereiro de 2022; Ministério da Economia/Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia: Brasília, Brazil, 2022; pp. 1–14;.

6. ISO/IEC 17000:2020. Conformity Assessment—Vocabulary and General Principles; International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2020;

7. Delavechia, R.P.; Ferraz, B.P.; Weiand, R.S.; Silveira, L.; Ramos, M.J.S.; dos Santos, L.L.C.; Bernardon, D.P.; Garcia, R.A.F. Electricity Supply Regulations in South America: A Review of Regulatory Aspects. Energies (Basel) 2023, 16, 915, https://doi.org/10.3390/en16020915;

8. GIZ Estudo Sobre as Proposições Das Partes Interessadas Para Modernização Do Modelo Regulatório Do Inmetro; Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH: Brasília, Brazil, 2021;
9. GIZ Estudo Sobre Os Modelos Regulatórios Da Europa e Dos Estados Unidos Da América, e Sobre a Influência Da Indústria 4.0 Na Modernização Da Regulamentação Do Inmetro. Parte 1 – Modelo Regulatório Da Europa; Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH: Brasília, Brazil, 2021;
10. European Commission The “Blue Guide” on the Implementation of EU Products Rules 2022; Publications Office of the European Union: Luxembourg, Luxembourg, 2022;
11. GIZ Estudo Sobre a Influência Da Indústria 4.0 No Modelo Regulatório Do Inmetro; Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH: Brasília, Brazil, 2021;
12. Brasil. Portaria No 286, de 3 de Agosto de 2022; Ministério da Economia; Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia: Brasília, Brazil, 2022;
13. Brasil. Portaria GM/MDIC No 301, de 5 de Outubro de 2023; Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços: Brasília, Brazil, 2023;
14. Secretaria de Competitividade e Política Regulatória. Resultados Da Tomada Pública de Subsídios ENIQ; Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços: Brasília, Brazil, 2024;
15. European Commission. Regulation (EU) 2019/1020 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2019 on Market Surveillance and Compliance of Products and Amending Directive 2004/42/EC and Regulations (EC) No 765/2008 and (EU) No 305/2011; Publications Office of the European Union: Luxembourg, Luxembourg, 2024;
16. GIZ. Estudo Sobre Os Modelos Regulatórios Da Europa e Dos Estados Unidos Da América, e Sobre a Influência Da Indústria 4.0 Na Modernização Da Regulamentação Do Inmetro. Parte 2 – Modelo Regulatório Dos Estados Unidos Da América; Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH: Brasília, Brazil, 2021;
17. Korea. Framework Act on National Standards; Ministry of Trade, Industry and Energy: Seoul, Republic of Korea, 2018;
18. Korea. Framework Act on Consumers; Korea Fair Trade Commission: Seoul, Republic of Korea, 2018;
19. Korea. Electrical Appliances and Consumer Products Safety Control Act; Ministry of Trade, Industry and Energy: Seoul, Republic of Korea, 2017;
20. Korea. Product Liability Act; Korea Fair Trade Commission: Seoul, Republic of Korea, 2017;
21. Kim, S.J.; Lee, C.; Kim, J.J.; Oh, B.C.; Chang, K. Product Liability and Safety in South Korea: Overview; Thomson Reuters Practical Law: London, UK, 2022;
22. Korea. Framework Act on the Safety of Products; Ministry of Trade, Industry and Energy: Seoul, Republic of Korea, 2019;
23. Korea. Enforcement Decree of the Framework Act on the Safety of Products; Ministry of Trade, Industry and Energy: Seoul, Republic of Korea, 2019;
24. KCA. Add Value to Consumer Life; Korea Consumer Agency: Seoul, Republic of Korea, 2020;

25. ISO/IEC 17067:2013. Conformity Assessment — Fundamentals of Product Certification and Guidelines for Product Certification Schemes; International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2013;
26. Brasil. Portaria No 629, de 26 de Dezembro de 2023; Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços: Brasília, Brazil, 2023;
27. Brasil. Portaria No 786, de 26 de Dezembro de 2024; Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços: Brasília, Brazil, 2024;
28. ISO/IEC 17065:2012. Conformity Assessment — Requirements for Bodies Certifying Products, Processes and Services; International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2012;
29. ISO/IEC 17060:2022. Conformity Assessment—Code of Good Practice; International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2022;
30. IEC 62660-1:2018. Secondary Lithium-Ion Cells for the Propulsion of Electric Road Vehicles - Part 1: Performance Testing; International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2018;
31. IEC 60335-1:2020. Household and Similar Electrical Appliances – Safety – Part 1: General Requirements; International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2020; ISBN 9782832286005.
32. ISO 22000:2018. Food Safety Management Systems — Requirements for Any Organization in the Food Chain; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2018;
33. ABNT NBR 15575-1:2024. Edificações Habitacionais — Desempenho. Parte 1: Requisitos Gerais; Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, Brazil, 2024; ISBN 978-85-07-09944-4.
34. IEC 62660-2:2018. Secondary Lithium-Ion Cells for the Propulsion of Electric Road Vehicles - Part 2: Reliability and Abuse Testing; International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2018;
35. IEC 62660-3:2022. Secondary Lithium-Ion Cells for the Propulsion of Electric Road Vehicles - Part 3: Safety Requirements; International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2022;
36. Brasil. Portaria No 79, de 14 de Janeiro de 2021; Ministério do Desenvolvimento Regional: Brasília, Brazil, 2021;
37. ISO/IEC 17011:2017. Conformity Assessment — Requirements for Accreditation Bodies Accrediting Conformity Assessment Bodies; International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2017;
38. IEC 61851-1:2017. Electric Vehicle Conductive Charging System - Part 1: General Requirements; International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2017;
39. ISO/IEC 17020:2012. Conformity Assessment — Requirements for the Operation of Various Types of Bodies Performing Inspection; International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2012;
40. ISO/IEC 17029:2019. Conformity Assessment — General Principles and Requirements for Validation and Verification Bodies; International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2019;

41. ISO/IEC 17025:2017. General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories; International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2017;
42. ISO 19011:2018. Guidelines for Auditing Management Systems; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2018;
43. ISO/IEC 17030:2021. Conformity Assessment — General Requirements for Third-Party Marks of Conformity; International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2021;
44. Novgorodcev, A.; Murgel Branco, G.; Cardinale Branco, F.; Martin, R.; Guimarães Alzuguir, C.; Mainier, F. Labelling and Standards for Light Duty Vehicles in Brazil Improving Energy Efficiency and Reducing CO2. In Proceedings of the FISITA, World Automotive Congress; FISITA: Budapest, May 30 2010.
45. ISO 14067:2018. Greenhouse Gases — Carbon Footprint of Products — Requirements and Guidelines for Quantification; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2018;
46. ISO 14001:2015. Environmental Management Systems - Requirements with Guidance for Use; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2015;
47. ISO 26000:2010. Guidance on Social Responsibility; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2010;

APÊNDICE

Apêndice A

Este apêndice apresenta o conjunto de questões utilizadas na validação por especialistas quanto ao modelo regulatório do Inmetro e ao roteiro proposto para programas de avaliação da conformidade voluntários. As perguntas dividem-se em duas partes: questões fechadas, com escala de 1 (Discordo totalmente) a 5 (Concordo totalmente), e questões abertas, para coleta de impressões qualitativas.

Parte I – Questões Fechadas:

1. Estrutura e Coerência Geral: “Em sua avaliação, o conteúdo do artigo está bem estruturado e apresenta coerência interna quanto à discussão do modelo regulatório do Inmetro e dos programas de avaliação da conformidade voluntários?”

2. Contribuição da Análise Comparativa: “A comparação entre os modelos regulatórios da União Europeia, dos Estados Unidos e da Coreia do Sul contribui de forma eficaz para a compreensão dos desafios e oportunidades no contexto brasileiro?”

3. Adequação do Roteiro Metodológico: “O roteiro proposto – composto pelos 14 passos – é adequado e suficientemente completo para orientar a implementação de programas voluntários de avaliação da conformidade no Brasil?”

4. Integração dos Aspectos Normativos Internacionais: “O artigo integra de maneira consistente os requisitos e boas práticas previstos em normas internacionais (como ISO/IEC 17065:2012, 17067:2013 e 17025:2017) na proposta metodológica?”

5. Aplicabilidade das Tecnologias Avançadas: “A discussão sobre o uso de tecnologias avançadas (ex.: IoT, *blockchain*, inteligência artificial) para aprimorar o monitoramento e a rastreabilidade dos processos está bem fundamentada e alinhada com as tendências globais?”

6. Integração dos Critérios ESG: “A inclusão de requisitos e diretrizes de ESG (*Environmental, Social, and Governance*) no roteiro metodológico é clara, consistente

e adequada para atender às demandas de sustentabilidade e responsabilidade social no contexto dos programas de avaliação da conformidade voluntários?”

7. Adaptação ao Contexto Setorial: “A proposta contempla de maneira eficaz a adaptação dos programas de avaliação aos diferentes contextos setoriais, como o de mobilidade elétrica, considerando as particularidades de cada segmento?”

Parte II – Questões Abertas:

8. Sugestões para Aperfeiçoamento do Roteiro: “Quais pontos ou etapas do roteiro metodológico você acredita que merecem maior detalhamento ou revisão para aumentar sua clareza e efetividade na prática?”

9. Desafios Práticos na Implementação: “Na sua experiência, quais os principais desafios práticos (por exemplo, resistência de setores, limitações de infraestrutura laboratorial, custos de implementação) que poderiam ser abordados de forma mais aprofundada no artigo?”

10. Complementos e Recomendações: “Você tem sugestões adicionais – seja em termos de inclusão de novas abordagens normativas ou de métodos de avaliação – que possam fortalecer a proposta do artigo e aumentar a aceitação dos programas de avaliação da conformidade voluntários?”.

2.2 Artigo 2

INFRAESTRUTURA LABORATORIAL PARA AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE NA MOBILIDADE ELÉTRICA: UM ESTUDO DE CASO NO BRASIL

LABORATORY INFRASTRUCTURE FOR CONFORMITY ASSESSMENT IN ELECTRIC MOBILITY: A CASE STUDY IN BRAZIL

Infraestrutura Laboratorial para Avaliação da Conformidade na Mobilidade Elétrica: Um Estudo de Caso no Brasil

Rodrigo Leão Mianes (rodrigo.mianes@ufrgs.br)
Afonso Reguly (reguly@ufrgs.br)
Carla Schwengber ten Caten (carla.caten@ufrgs.br)

Resumo: A crescente demanda global por veículos elétricos evidencia a necessidade de uma infraestrutura laboratorial robusta para avaliação da conformidade de sistemas de mobilidade elétrica, em consonância com padrões internacionais de segurança, desempenho e compatibilidade eletromagnética. Este estudo apresenta um mapeamento detalhado da infraestrutura laboratorial brasileira voltada à mobilidade elétrica rodoviária, abrangendo laboratórios acreditados, grupos de pesquisa e unidades de inovação industrial. O trabalho compreende a identificação das normas técnicas pertinentes, a análise da capacidade nacional para ensaios e certificação, bem como a caracterização das principais lacunas e desafios institucionais. Os resultados indicam que a oferta de ensaios formalmente reconhecidos permanece limitada a uma fração das normas vigentes, concentrando-se em poucos centros e deixando descobertas áreas críticas, como segurança de baterias. Essas restrições resultam em dependência de serviços estrangeiros e impactam negativamente a competitividade industrial. As conclusões destacam a necessidade de fortalecimento das políticas públicas, incentivo à acreditação de laboratórios e maior integração entre indústria, academia e governo. Embora centrado no contexto brasileiro, o estudo fornece subsídios para reflexões e estratégias em outros países que enfrentam desafios similares frente à expansão da mobilidade elétrica.
Palavras-chave: mobilidade elétrica; avaliação da conformidade; infraestrutura da qualidade; infraestrutura laboratorial; acreditação de laboratórios; segurança de baterias; compatibilidade eletromagnética; infraestrutura de recarga; normas para veículos elétricos; avaliação da conformidade voluntária.

Abstract: The growing global demand for electric vehicles highlights the need for a robust laboratory infrastructure for the conformity assessment of electric mobility systems, in accordance with international standards for safety, performance, and electromagnetic compatibility. This study presents a detailed mapping of the Brazilian

laboratory infrastructure for road electric mobility, encompassing accredited laboratories, research groups, and industrial innovation units. The work includes identifying relevant technical standards, analyzing the national capacity for testing and certification, and characterizing key institutional gaps and challenges. The results indicate that the supply of formally recognized tests remains limited to a fraction of the current standards, concentrated in a few centers and leaving critical areas, such as battery safety, unaddressed. These restrictions result in a dependence on foreign services and negatively impact industrial competitiveness. The conclusions underscore the need to strengthen public policies, incentivize laboratory accreditation, and promote greater integration among industry, academia, and government. Although focused on the Brazilian context, the study provides a foundation for reflections and strategies in other countries that face similar challenges in the face of expanding electric mobility.
Keywords: electric mobility; conformity assessment; quality infrastructure; laboratory infrastructure; laboratory accreditation; battery safety; electromagnetic compatibility; charging infrastructure; electric vehicle standards; voluntary conformity assessment.

1 Introdução

A implementação de estratégias para mitigar as mudanças climáticas e reduzir a poluição atmosférica, aliada ao crescente interesse por fontes de energia renovável, têm impulsionado transformações no mercado global [1,2]. A maior conscientização ambiental e a adoção de práticas sustentáveis também influenciam padrões de consumo, elevando a importância de critérios ambientais na decisão de compra [3–5].

No contexto das emissões de gases de efeito estufa, o setor de transportes se destaca por representar aproximadamente 39,9% das emissões globais de CO_2 dos setores finais de uso de energia. Este percentual considera apenas as emissões diretas associadas ao uso final de energia, excluindo aquelas provenientes de processos de transformação, conversão e perdas de distribuição. Quando consideradas as emissões globais totais de CO_2 — incluindo as etapas de transformação e perdas —, a participação do setor de transportes é de aproximadamente 22% do total [6].

Diante desse cenário, veículos movidos por motores elétricos têm sido adotados como alternativa aos modelos a combustão, sobretudo quando a eletricidade utilizada em sua recarga é proveniente de fontes limpas; esse processo, denominado eletrificação, tem sido adotado como estratégia para mitigar emissões de carbono [7]. Embora a mobilidade elétrica também apresente aplicações em segmentos como aviação e navegação, o modal rodoviário se sobressai, respondendo por cerca de 74,7% das emissões do setor e 43,1% da demanda global de petróleo [6].

Nos últimos anos, o aumento na comercialização de veículos elétricos tem evidenciado a rápida expansão desse mercado. Em 2024, as vendas globais de automóveis desse tipo atingiram aproximadamente 17 milhões de unidades, representando mais de 20% do total de veículos vendidos no mundo e correspondendo a um crescimento de 25% em relação a 2023. Para 2025, a Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency*, IEA) projeta que as vendas ultrapassem 20 milhões, de modo que mais de um em cada quatro carros vendidos seja elétrico [8]. O Brasil ocupa a oitava posição no ranking global de produção de veículos e a sexta em tamanho de mercado interno, conforme o Anuário 2025 da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (Anfavea) [9]. Embora a participação do país na mobilidade elétrica ainda esteja abaixo da média global, observa-se um crescimento contínuo. As vendas de veículos leves desse tipo passaram de 1,77% em 2021 para 2,51% em 2022, 4,31% em 2023 e 7,13% em 2024. As projeções para 2030 indicam uma participação entre 12% e 22%, podendo atingir de 32% a 62% até 2035. Esse cenário exige investimentos contínuos em manufatura, pesquisa e desenvolvimento ao longo de toda a cadeia produtiva, a fim de fortalecer a competitividade nacional diante das importações [9–11].

Diferentemente dos veículos a combustão, os elétricos dependem intensamente de componentes eletrônicos, incluindo motores de tração, conversores de potência, sistemas de armazenamento de energia e infraestrutura de recarga [12]. Essa distinção tecnológica amplia oportunidades para novos participantes no mercado automotivo e setores correlatos. No entanto, a fabricação e comercialização locais exigem iniciativas coordenadas entre indústria, instituições de ensino, políticas públicas e setor elétrico, com especial atenção às normas e ensaios, sobretudo aos

requisitos de segurança [13–16]. Além dos benefícios ambientais, a segurança operacional dos veículos elétricos tem sido alvo de crescente atenção. Relatos de incidentes envolvendo riscos à integridade dos usuários, como ignições espontâneas durante o estacionamento, autoignições durante o uso e incêndios no momento da recarga ou após colisões, reforçam a necessidade de regulamentações rigorosas para garantir a confiabilidade desses sistemas [17–19]. Entre os principais pontos de preocupação estão as baterias, que podem sofrer estresse mecânico, levando a curtos-circuitos internos e aumentando significativamente o risco de fuga térmica. Esse fenômeno é caracterizado pela elevação abrupta da temperatura no interior da célula, podendo resultar em incêndios, explosões e liberação de substâncias tóxicas [20–23].

Além das baterias, outros componentes críticos, como inversores e conversores eletrônicos de potência, desempenham um papel essencial na regulação do fluxo de energia nos veículos elétricos. Falhas nesses dispositivos podem comprometer a integridade do sistema, levando à ocorrência de sobrecorrentes ou fluxos elétricos não previstos pelo projeto, o que aumenta o risco de incêndios [24–27]. Os circuitos de alta tensão, que conectam a bateria ao motor e demais subsistemas, também exigem verificações rigorosas, pois falhas no isolamento podem resultar em choques elétricos e curtos-circuitos [28]. Os desafios de segurança não se limitam ao veículo em si, mas também à infraestrutura de recarga. Fatores ambientais, como temperaturas elevadas e alta umidade, podem acelerar a degradação dos componentes, aumentando a suscetibilidade a falhas [29]. Além disso, avaliações detalhadas de eficiência energética e autonomia demonstram a influência de variáveis externas - como condições climáticas e velocidade média - no consumo de energia e no desempenho dos veículos elétricos [30,31]. Esses estudos não apenas contribuem para aprimoramentos no design dos veículos e no desenvolvimento de algoritmos de previsão de alcance, mas também aumentam a transparência para os consumidores, permitindo expectativas mais realistas quanto à autonomia dos automóveis em diferentes cenários operacionais.

Outro aspecto relevante na avaliação de veículos elétricos refere-se à compatibilidade eletromagnética (*Electromagnetic Compatibility*, EMC). Os campos eletromagnéticos gerados pelos circuitos de potência podem não apenas interferir em

dispositivos eletrônicos próximos, mas também ser afetados por esses campos, comprometendo a confiabilidade operacional dos sistemas embarcados e, consequentemente, a segurança veicular. Esse cenário evidencia a necessidade de normativas e processos de certificação que garantam não apenas a segurança estrutural e funcional dos veículos, mas também a robustez de seus componentes eletrônicos em diferentes condições operacionais [25,32,33]. Em situações extremas, a interferência eletromagnética pode afetar sistemas críticos, aumentando o risco de falhas operacionais e acidentes. Para mitigar esses desafios, os fabricantes adotam diretrizes rigorosas de EMC desde as etapas iniciais de desenvolvimento dos dispositivos, a fim de garantir maior resistência a interferências. Nesse contexto, dispositivos eletrônicos inteligentes de potência têm gradualmente substituído componentes tradicionais, como fusíveis, relés e interruptores, em aplicações como airbags e sistemas de freios antibloqueio (*Anti-lock Braking System*, ABS). No entanto, devido à operação em condições adversas, a realização de ensaios de conformidade com padrões rigorosos de EMC torna-se indispensável para assegurar a confiabilidade desses dispositivos [34]. A crescente complexidade dos sistemas eletrônicos tem levado ao aumento de *recalls*, muitos dos quais relacionados a falhas de EMC. A ausência de testes rigorosos pode gerar altos custos com redesenho e substituição de componentes, além de comprometer a segurança dos usuários. Assim, garantir a imunidade eletromagnética e a estabilidade operacional tornou-se uma prioridade na indústria automotiva [35].

Diante desses desafios, a existência de uma infraestrutura laboratorial adequada para a realização de ensaios de avaliação da conformidade é essencial para garantir que veículos e seus componentes atendam aos requisitos normativos e operacionais. A Infraestrutura da Qualidade (IQ) desempenha um papel central nesse processo, assegurando que produtos e serviços estejam em conformidade com padrões técnicos e de segurança, além de fortalecer a competitividade industrial em mercados internacionais. A IQ abrange áreas como metrologia, normalização, acreditação, avaliação da conformidade e vigilância de mercado [36–38]. No setor de mobilidade elétrica, a avaliação da conformidade é fundamental para garantir segurança e confiabilidade, além de coibir práticas comerciais inadequadas [39]. Entre os serviços dedicados a esse processo, os ensaios laboratoriais são indispensáveis, pois subsidiam a certificação de produtos e viabilizam a efetividade da IQ em

diferentes contextos nacionais. Entretanto, um dos principais desafios é a disponibilidade de laboratórios capacitados para realizar os ensaios necessários [37]. No cenário brasileiro atual, contudo, os veículos eletrificados que entram no mercado não passam por avaliações nacionais de segurança funcional e elétrica. A ausência dessa infraestrutura pode resultar em dependência de serviços externos, aumento dos custos de certificação e atraso na implementação de inovações que aprimorem a segurança, a confiabilidade e a sustentabilidade do setor.

Este artigo investiga as lacunas na infraestrutura laboratorial dedicada à avaliação da conformidade da mobilidade elétrica rodoviária no Brasil. Embora o foco esteja no contexto nacional, as reflexões apresentadas possuem aplicação internacional, considerando a crescente eletrificação da frota de veículos no mundo. Assim, busca-se sistematizar informações que possam subsidiar ações estratégicas para fortalecer a qualidade industrial e a segurança dos veículos elétricos, impulsionando a inovação e a competitividade.

2 Materiais e métodos

O presente estudo adota uma abordagem qualitativa, de caráter exploratório e descritivo, com o objetivo de mapear a infraestrutura laboratorial disponível para avaliação da conformidade de sistemas de mobilidade elétrica no Brasil. A metodologia foi estruturada em quatro etapas principais: (i) caracterização dos elementos constitutivos da mobilidade elétrica; (ii) mapeamento do arcabouço normativo aplicável; (iii) investigação da infraestrutura laboratorial nacional; e (iv) análise crítica das lacunas identificadas e proposição de ações.

2.1 Caracterização dos Elementos da Mobilidade Elétrica

Nesta etapa, foram identificados os principais componentes dos sistemas de mobilidade elétrica rodoviária, possibilitando estabelecer, de forma estruturada, a relação entre elementos críticos da mobilidade elétrica e os requisitos normativos atualmente aplicáveis à avaliação da conformidade. A categorização adotada contempla quatro grupos principais:

• Trem de força elétrico: Inclui motores elétricos de tração, conversores eletrônicos de potência e unidades de controle eletrônico, responsáveis pela conversão e gerenciamento da energia elétrica utilizada na propulsão veicular.

• Sistemas de armazenamento de energia: Compreendem baterias de alta tensão, seus módulos, sistemas de gerenciamento de bateria (*Battery Management System*, BMS) e sistemas de gerenciamento térmico e elétrico, essenciais para o desempenho e a segurança dos veículos elétricos.

• Sistemas de recarga: Abrangem carregadores internos e externos, infraestrutura de recarga e protocolos de comunicação destinados à transferência eficiente e segura de energia.

• Conectores, plugues, tomadas e cabos: São elementos fundamentais para garantir a compatibilidade, segurança e intercambiabilidade entre diferentes sistemas de recarga e fabricantes.

Essa caracterização norteou as etapas subsequentes, assegurando a adequação das análises normativas e laboratoriais às necessidades técnicas específicas dos sistemas de mobilidade elétrica.

2.2 Mapeamento do Arcabouço Normativo

Foi realizada uma revisão sistemática das normas técnicas relacionadas à mobilidade elétrica, emitidas por organismos internacionais e nacionais, com o objetivo de identificar os requisitos normativos aplicáveis à avaliação da conformidade. A pesquisa contemplou as bases de dados da Organização Internacional para Padronização (*International Organization for Standardization*, ISO) e da Comissão Eletrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission*, IEC), além das normas nacionais publicadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Para garantir um escopo abrangente e metodologicamente consistente, optou-se por considerar apenas normas classificadas sob o código 43.120 da classificação internacional para normas (*International Classification for Standards*, ICS) [40], que abrange veículos elétricos rodoviários e seus componentes. Essa delimitação visa assegurar a coerência do levantamento, permitindo identificar de forma objetiva as lacunas específicas da infraestrutura laboratorial voltada à avaliação da conformidade

em mobilidade elétrica, sem incluir normas destinadas a componentes sob outras óticas, como baterias (ICS 29.220), compatibilidade eletromagnética (ICS 33.100) ou sistemas auxiliares (ICS 43.040). Ressalta-se, portanto, que as lacunas identificadas neste estudo se referem estritamente ao universo normativo da mobilidade elétrica rodoviária definido por esse recorte, não abrangendo requisitos mais amplos presentes em outros contextos normativos. As normas identificadas foram agrupadas em três categorias principais:

• Ensaios de segurança: englobam normas voltadas à avaliação de riscos elétricos, incêndios, falhas mecânicas e demais aspectos relacionados à integridade do veículo e de seus componentes.

• Ensaios de desempenho: compreendem normas que estabelecem critérios de eficiência energética, confiabilidade operacional e vida útil dos componentes dos veículos elétricos.

• Ensaios de compatibilidade eletromagnética: abrangem normas que regulam a emissão e a imunidade eletromagnética dos componentes, assegurando a operação segura dos sistemas eletrônicos embarcados.

Foram analisadas apenas normas vigentes e diretamente aplicáveis à avaliação da conformidade de veículos elétricos e seus componentes, sendo excluídas aquelas direcionadas a dispositivos de transporte pessoal, veículos movidos a células de combustível ou de natureza exclusivamente terminológica. No caso das normas nacionais, verificou-se a existência de equivalências com os padrões internacionais ISO ou IEC. Cabe observar que as normas aplicáveis variam de acordo com o tipo de eletrificação veicular. Os veículos elétricos a bateria (BEV) estão integralmente sujeitos às normas específicas de armazenamento, propulsão elétrica e recarga. Já os veículos híbridos plug-in (PHEV) acumulam requisitos dos veículos a combustão interna (emissões, segurança e desempenho) e das normas aplicáveis aos sistemas elétricos de alta tensão. Nos híbridos convencionais (HEV) e híbridos leves (MHEV), os requisitos associados ao motor a combustão permanecem predominantes, enquanto as normas elétricas se aplicam, de forma mais restrita, aos subsistemas de apoio (por exemplo, baterias de menor capacidade e conversores). Neste estudo, adotou-se a classificação ampla de veículos eletrificados baseados em baterias,

reconhecendo-se que, em contextos regulatórios, cada tipologia pode demandar combinações normativas específicas, ainda em evolução em função da diversidade tecnológica.

2.3 Investigação da Infraestrutura Laboratorial Nacional

Com base nas normas identificadas na etapa anterior, realizou-se um levantamento dos laboratórios brasileiros potencialmente aptos a executar os ensaios necessários para a avaliação da conformidade de veículos elétricos e seus componentes. A coleta de dados foi estruturada a partir de três fontes primárias:

• Banco de dados oficial: Foram analisados os escopos das instituições acreditadas pela Coordenação Geral de Acreditação (Cgcre) na Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio (RBLE), referência nacional para laboratórios formalmente reconhecidos pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), responsáveis pela realização de ensaios em conformidade com padrões normativos e regulatórios.

• Grupos de pesquisa: Para mapear centros acadêmicos com infraestrutura voltada à mobilidade elétrica, utilizou-se o banco de dados do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Inicialmente, consultou-se o Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil, empregando os termos: Mobilidade elétrica, Eletromobilidade, Veículo elétrico, Veicular, Automóvel, Automotiva, Baterias, Motores, Compatibilidade eletromagnética e Eletrificação. Posteriormente, realizou-se pesquisa complementar no Censo 2023 do CNPq, abrangendo eventuais grupos não identificados na etapa anterior. Foram selecionados exclusivamente projetos com foco em veículos elétricos e tecnologias correlatas.

• Inovação industrial: A Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (Embrapii), organização social que atua em parceria com o Governo Federal, fomenta projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação em colaboração com o setor industrial. Ao promover a cooperação entre institutos de pesquisa, universidades e empresas, a Embrapii incentiva o desenvolvimento e o fortalecimento de laboratórios com competências tecnológicas avançadas. Foram analisadas as unidades credenciadas em áreas diretamente relacionadas à eletromobilidade.

O primeiro passo metodológico consistiu na consulta à base de laboratórios acreditados à Cgcre na RBLE, com análise detalhada dos respectivos escopos de atuação, a fim de identificar as instituições formalmente reconhecidas para operar segundo as normas relacionadas à mobilidade elétrica previamente mapeadas. Para ampliar o mapeamento e identificar possíveis laboratórios não acreditados, foram realizados contatos com todas as instituições identificadas nas fontes primárias: (i) os próprios laboratórios acreditados, visto que podem executar outros ensaios mesmo sem acreditação específica; (ii) os grupos de pesquisa identificados; e (iii) as unidades Embrapii vinculadas à área de eletromobilidade.

A cada uma dessas instituições foi encaminhado um questionário on-line, adaptado conforme o perfil institucional. Os questionários enviados aos laboratórios tiveram como objetivo levantar informações sobre o escopo de acreditação, a realização atual ou planejada de ensaios voltados à mobilidade elétrica, investimentos em infraestrutura e desafios técnicos enfrentados (Apêndice A.1). Para os grupos de pesquisa, o formulário buscou mapear a infraestrutura disponível em universidades e centros de pesquisa, bem como o uso compartilhado, parcerias, planos de acreditação e capacidade de realização de ensaios (Apêndice A.2). No caso das unidades Embrapii, o questionário objetivou compreender de que forma essas organizações contribuem para o desenvolvimento e ampliação da infraestrutura de ensaios no setor, além de identificar capacidades instaladas e perspectivas futuras (Apêndice A.3).

Além das fontes primárias, a consulta a associações setoriais foi incorporada ao levantamento, com o objetivo de captar a visão do setor produtivo quanto às demandas, limitações e oportunidades na realização de ensaios para avaliação da conformidade. Por meio de questionário específico (Apêndice A.4), buscou-se identificar percepções sobre a disponibilidade de infraestrutura laboratorial, áreas consideradas críticas e iniciativas em andamento, ampliando a compreensão dos desafios enfrentados e das possibilidades de cooperação entre diferentes atores institucionais.

Foram consultadas a Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE), a Confederação Nacional da Indústria (CNI) e o Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores (Sindipeças), entidades selecionadas em razão de sua reconhecida relevância e representatividade no setor: a ABVE atua no

segmento de veículos elétricos; a CNI é uma das principais entidades representativas do setor industrial no Brasil; e o Sindipeças representa a indústria de componentes automotivos. A Anfavea também foi contatada nessa etapa, porém não houve retorno às solicitações.

Os dados coletados foram organizados e analisados com base em análise de conteúdo categorial, permitindo sistematizar as respostas de acordo com parâmetros técnicos e institucionais previamente definidos. Os resultados foram consolidados e subsidiam a avaliação da adequação da infraestrutura laboratorial nacional diante das exigências normativas internacionais.

2.4 Análise Crítica das Lacunas e Proposições de Ações

Com base na investigação da infraestrutura laboratorial nacional, esta etapa analisou a correlação entre os requisitos normativos mapeados e a capacidade laboratorial disponível no Brasil, identificando lacunas na realização de ensaios voltados à mobilidade elétrica e propondo ações estratégicas para sua mitigação. A análise foi estruturada em duas fases principais.

A primeira fase consistiu na identificação de normas cuja aplicabilidade à avaliação da conformidade já havia sido reconhecida, mas para as quais não há infraestrutura laboratorial adequada para sua execução no país. Foram analisadas as normas catalogadas, verificando-se sua correspondência com os laboratórios identificados.

A segunda fase buscou compreender os impactos dessas deficiências e formular recomendações capazes de orientar o desenvolvimento de soluções para a ampliação da capacidade de ensaios. Nesse contexto, foram propostas ações e recomendações estratégicas para o fortalecimento da infraestrutura laboratorial brasileira, considerando-se os desafios identificados, a necessidade de maior alinhamento às normas técnicas e o estímulo à pesquisa e à cooperação entre os setores público e privado.

3 Resultados

Este capítulo apresenta os achados resultantes das etapas metodológicas descritas anteriormente, estruturando-os de modo a evidenciar demandas e lacunas

na avaliação da conformidade de sistemas de mobilidade elétrica. Inicialmente, são caracterizados os principais componentes veiculares, com ênfase em sua relevância para a segurança, confiabilidade e desempenho dos veículos elétricos. Na sequência, é apresentado o mapeamento normativo aplicável à avaliação da conformidade desses componentes. Por fim, são analisadas as condições da infraestrutura laboratorial disponível no Brasil para a realização de ensaios em mobilidade elétrica, contemplando tanto laboratórios acreditados quanto não acreditados.

3.1 Caracterização dos Componentes Críticos da Mobilidade Elétrica

A mobilidade elétrica rodoviária é sustentada por um conjunto de subsistemas interdependentes, que asseguram o desempenho, a segurança e a confiabilidade dos veículos elétricos. Os principais componentes dessa infraestrutura tecnológica são: (i) o trem de força elétrico; (ii) o sistema de armazenamento de energia; (iii) o sistema de recarga; e (iv) os conectores e interfaces elétricas [12].

3.1.1 Trem de Força Elétrico

O trem de força elétrico é composto pelo motor elétrico de tração e pelo conversor eletrônico de potência (inversor), equipamentos destinados à conversão e ao gerenciamento da energia elétrica utilizada na propulsão do veículo [12]. Do ponto de vista conceitual, o termo mais rigoroso seria “máquina elétrica de tração”, visto que o dispositivo pode operar tanto como motor quanto como gerador. Contudo, neste trabalho será mantida a denominação “motor elétrico”, em consonância com o uso mais difundido na literatura técnica e no setor de mobilidade elétrica. Os motores elétricos podem ser classificados em diversas tipologias, destacando-se os modelos síncronos de ímã permanente e os de indução, por conta da eficiência energética e da elevada densidade de potência. O inversor, por sua vez, converte a corrente contínua (CC) fornecida pela bateria em corrente alternada (CA) para o motor, além de permitir a recuperação de energia cinética por meio do freio regenerativo [41–44]. Em termos de segurança, falhas nos inversores podem provocar curtos-circuitos, superaquecimento e degradação da isolação elétrica, o que acarreta perda de desempenho e maior propensão a falhas operacionais [45].

De forma complementar, a arquitetura usual também integra a unidade de distribuição de potência — com contatoras e relés de alta tensão, fusíveis,

barramentos de alta tensão e lógica de proteção — e o conversor CC–CC, responsável por adequar a tensão do barramento de alta tensão para a rede de baixa tensão (12 V/48 V). Neste estudo, tais elementos são considerados de forma integrada ao trem de força e ao gerenciamento de energia; contudo, esses componentes poderão ser tratados futuramente como categorias específicas de análise.

3.1.2 Sistema de Armazenamento de Energia

Em algumas classificações da literatura especializada, as baterias de alta tensão são consideradas parte integrante do trem de força, junto ao motor, ao inversor e a outros elementos de propulsão. Neste estudo, entretanto, optou-se por tratar o armazenamento de energia como categoria independente, tanto pela sua centralidade para a segurança veicular quanto pela existência de normas e requisitos específicos direcionados à sua avaliação, o que justifica a separação analítica no diagnóstico da infraestrutura laboratorial.

Nos veículos elétricos, o armazenamento de energia ocorre predominantemente em baterias de íons de lítio, que convertem energia química em energia elétrica por meio de células eletroquímicas. Essas baterias, organizadas em módulos e pacotes, suprem o motor elétrico [46,47]. Sua confiabilidade depende de parâmetros como capacidade, potência específica, resistência interna, ciclo de vida e retenção de carga [48]. Entretanto, a segurança operacional requer um controle rigoroso de temperatura e tensão, pois falhas nessas variáveis podem resultar em fuga térmica, incêndios e explosões [49]. Normas internacionais definem protocolos de ensaio para verificar a degradação em condições operacionais extremas, a resistência a impactos mecânicos e a estabilidade térmica [50].

3.1.3 Sistema de Recarga

O sistema de recarga compreende os carregadores embarcados, as estações externas de carregamento e a infraestrutura elétrica associada. Enquanto os carregadores a bordo realizam a conversão de CA em CC ao abastecer o veículo em redes convencionais, os carregadores externos podem operar com níveis de potência mais elevados, ao utilizar diretamente a corrente contínua na bateria [12]. Em geral, a recarga pode ocorrer de modo condutivo, caracterizado pelo uso de cabos metálicos, predominante no mercado por sua eficiência e menor custo, ou de modo indutivo, em

que a energia é transferida sem contato físico entre a estação e o veículo. As estações condutivas são classificadas em diferentes modos, os quais determinam tensões e correntes máximas e definem se o fornecimento ocorre em CA ou CC [51]. Sob o ponto de vista da segurança, o processo de recarga exige atenção crescente, pois diversos incidentes envolvendo veículos elétricos ocorrem durante essa etapa, o que representa risco ao usuário e pode afetar a aceitação da tecnologia [51,52]. As normas técnicas aplicáveis aos sistemas de recarga abrangem requisitos de proteção contra sobrecargas, compatibilidade eletromagnética e segurança do usuário [53].

3.1.4 Conectores, Plugues, Tomadas e Cabos

Nesse contexto, incluem-se cabos e conectores adequados, plugues padronizados (como IEC 62196, *Combined Charging System* (CCS) e *CHArge de MOve* (CHAdeMO)) e os protocolos de comunicação veículo-posto, responsáveis pela interface entre o veículo e a infraestrutura de recarga, em conformidade com especificações técnicas que asseguram eficiência e segurança durante o abastecimento [12]. A ausência de uma padronização global unificada representa um obstáculo à interoperabilidade dos veículos elétricos em diferentes regiões, pois cada mercado tende a adotar padrões distintos, como SAE J1772 nos Estados Unidos, IEC 62196 Tipo 2 na Europa e *Guóbiāo/Tuījiàn* (GB/T) na China [49]. O uso de cabos e conectores apropriados contribui para reduzir perdas elétricas, aumentar a segurança do usuário e prolongar a vida útil do sistema [54].

3.2 Resultados do Mapeamento Normativo

Esta seção descreve os achados referentes ao levantamento das normas técnicas aplicáveis à avaliação da conformidade de sistemas de mobilidade elétrica rodoviária. O propósito foi identificar e caracterizar o arcabouço normativo relevante, evidenciando tanto a quantidade de documentos quanto a sua abrangência no contexto dos veículos elétricos.

3.2.1 Quantidade de Normas e Classificação por Aplicabilidade

A consulta às bases de dados nacionais e internacionais (ISO, IEC e ABNT) resultou no mapeamento de 111 normas. Dentre elas, 75 foram consideradas aplicáveis ao escopo desta pesquisa, pois dispõem sobre requisitos técnicos

pertinentes aos componentes e sistemas veiculares investigados. Em alguns casos, os documentos foram organizados em categorias de maior abrangência. As normas de “segurança operacional geral” englobam exigências ou recomendações que transcendem subsistemas específicos, como requisitos para prevenção de choques elétricos, incêndios ou qualquer falha que ponha em risco a integridade do veículo. Já as normas associadas ao “veículo como um todo” abordam a integração sistêmica, contemplando a interação entre subsistemas de armazenamento de energia, trem de força, recarga e demais elementos em um mesmo conjunto de diretrizes.

As 36 normas classificadas como não aplicáveis, embora relacionadas ao tema mais amplo da eletromobilidade, não atendem ao foco desta pesquisa, seja por tratarem de veículos de duas rodas, *scooters* e tecnologias de célula de combustível, seja por se restringirem a conteúdos essencialmente terminológicos, sem diretrizes para avaliação da conformidade. Essa distinção possibilitou concentrar as análises apenas nas normas que de fato orientam ensaios laboratoriais no âmbito rodoviário. As Tabelas B1 e B2, apresentadas no Apêndice B, agrupam respectivamente as normas não aplicáveis (com justificativa para exclusão) e as normas consideradas aplicáveis, indicando os componentes a que se relacionam e sua abrangência.

3.2.2 Distribuição das Normas

Para ilustrar como as 75 normas aplicáveis se associam aos diferentes subsistemas, cada documento foi vinculado aos principais componentes da mobilidade elétrica rodoviária, conforme apresentado na Tabela 1. Como algumas normas abrangem mais de um subsistema ou estabelecem requisitos simultâneos (por exemplo, ensaios que envolvem tanto os sistemas de recarga quanto os conectores, plugues, tomadas e cabos), o total indicado em cada linha da tabela não é excludente, mas reflete a quantidade de normas aplicáveis a cada componente.

Tabela 1. Normas por Componente.

Componente	Quantidade de Normas
Trem de força elétrico	9
Armazenamento de energia (baterias)	11
Sistemas de recarga	34
Conectores, plugues, tomadas e cabos	16
Segurança operacional geral	3
Veículo como um todo	8

Fonte: Os autores.

Entre os componentes, os sistemas de recarga se destacam, com 34 normas aplicáveis, possivelmente devido à variedade de modos de carregamento (AC, DC, contato, sem fio) e à necessidade de garantir segurança e interoperabilidade entre veículos e infraestrutura. Os conectores e cabos, relacionados a 16 normas, reforçam esse enfoque, uma vez que a padronização de plugues e interfaces elétricas é essencial para a compatibilidade internacional. Já as baterias, contempladas em 11 normas, abrangem requisitos de segurança contra incêndio, fuga térmica e desempenho em condições de operação extremas, dentre outros aspectos. Por fim, o trem de força elétrico, associado a 9 normas, reúne requisitos funcionais e de segurança para motores, inversores e sistemas de gerenciamento de energia na propulsão.

3.2.3 Classificação das Normas por Abrangência (Segurança, Desempenho e EMC)

Com o objetivo de compreender o teor de cada documento, o mapeamento incluiu a categorização das normas segundo três aspectos centrais: segurança, desempenho e EMC. Identificou-se que 47 normas tratam prioritariamente da segurança, 64 abordam desempenho e 17 focam EMC. No entanto, é comum que uma mesma norma inclua simultaneamente critérios de segurança, desempenho e EMC, razão pela qual os valores apresentados não representam conjuntos excludentes. Além disso, a quantidade de normas em cada categoria não implica maior ou menor relevância, pois a extensão e a profundidade podem variar: algumas normas abordam especificações muito pontuais (por exemplo, teste de resistência de cabos), ao passo que outras fornecem diretrizes amplas, contemplando vários cenários técnicos e ensaios laboratoriais complexos. A Figura 1 ilustra a distribuição das normas por categoria de abrangência, destacando as sobreposições entre segurança, desempenho e EMC.

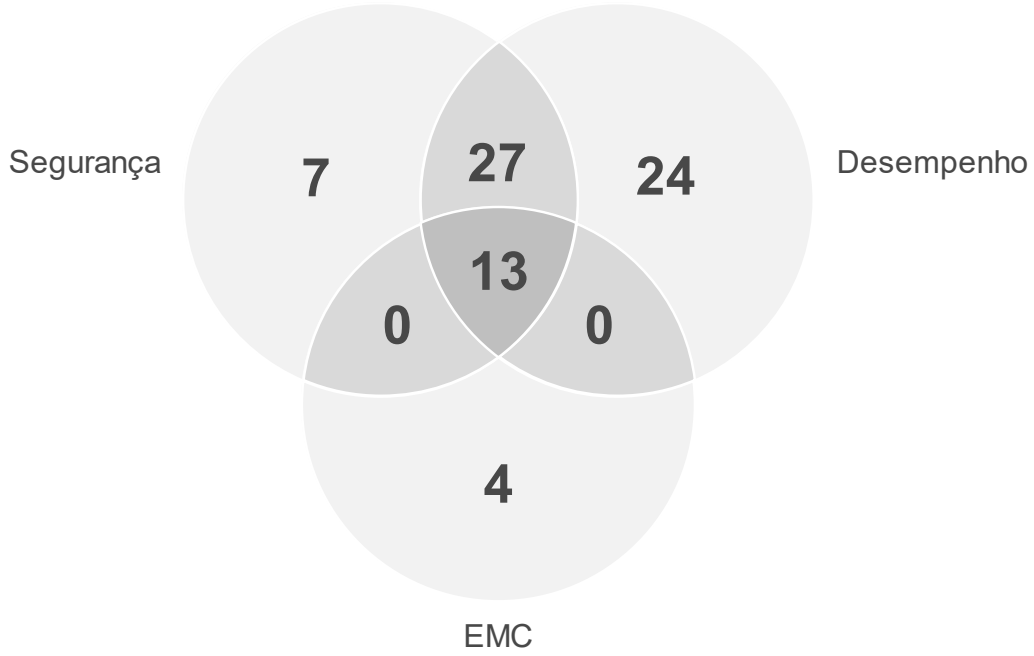


Figura 1. Distribuição das normas por abrangência (Segurança, Desempenho e EMC).
Fonte: Os autores.

3.3 Investigação da Infraestrutura Laboratorial Nacional Acreditada

A existência de laboratórios acreditados para a realização de ensaios normativos é fundamental para assegurar a confiabilidade e a segurança dos sistemas de mobilidade elétrica. Nesse contexto, esta subseção apresenta uma análise da infraestrutura laboratorial brasileira, avaliando a capacidade de atendimento às normas técnicas descritas na seção 3.2.

No levantamento realizado, foram identificados 1.435 laboratórios acreditados à Cgcre na RBLE. Com o objetivo de verificar sua adequação ao setor de mobilidade elétrica, analisaram-se os respectivos escopos de acreditação, buscando identificar aqueles habilitados a executar ensaios de acordo com as 75 normas aplicáveis previamente mapeadas (ver Apêndice B, Tabela B2). Os resultados apontam restrições relevantes: apenas três normas contam com laboratórios acreditados para sua execução no Brasil. As demais 72 normas aplicáveis não possuem, até a data da pesquisa, laboratórios acreditados no país com capacidade para realizar os ensaios correspondentes. A Tabela 2 sintetiza as normas efetivamente cobertas, indicando os componentes contemplados, a abrangência dos ensaios e o número de instituições reconhecidas em cada caso. Já a Figura 2 mostra a distribuição geográfica das infraestruturas laboratoriais mapeadas, evidenciando a concentração nas regiões Sudeste e Sul e a escassez em áreas periféricas.

Tabela 2. Normas com Cobertura Laboratorial Acreditada no Brasil.

Norma	Componente	Abrangência	Laboratórios Acreditados	Observações
ABNT NBR 16567:2020	Veículo como um todo	Desempenho	5	1 dos laboratórios apresenta versão obsoleta da norma (2016).
ABNT NBR 17142:2023	Veículo como um todo	Desempenho	2	—
IEC 61851-21-2:2018	Sistema de recarga	EMC	1	Somente itens 4.4.2, 4.4.3, 5, 6.3.1, 6.3.2, 6.3.3 e 6.3.4 estão cobertos.

Fonte: Os autores.

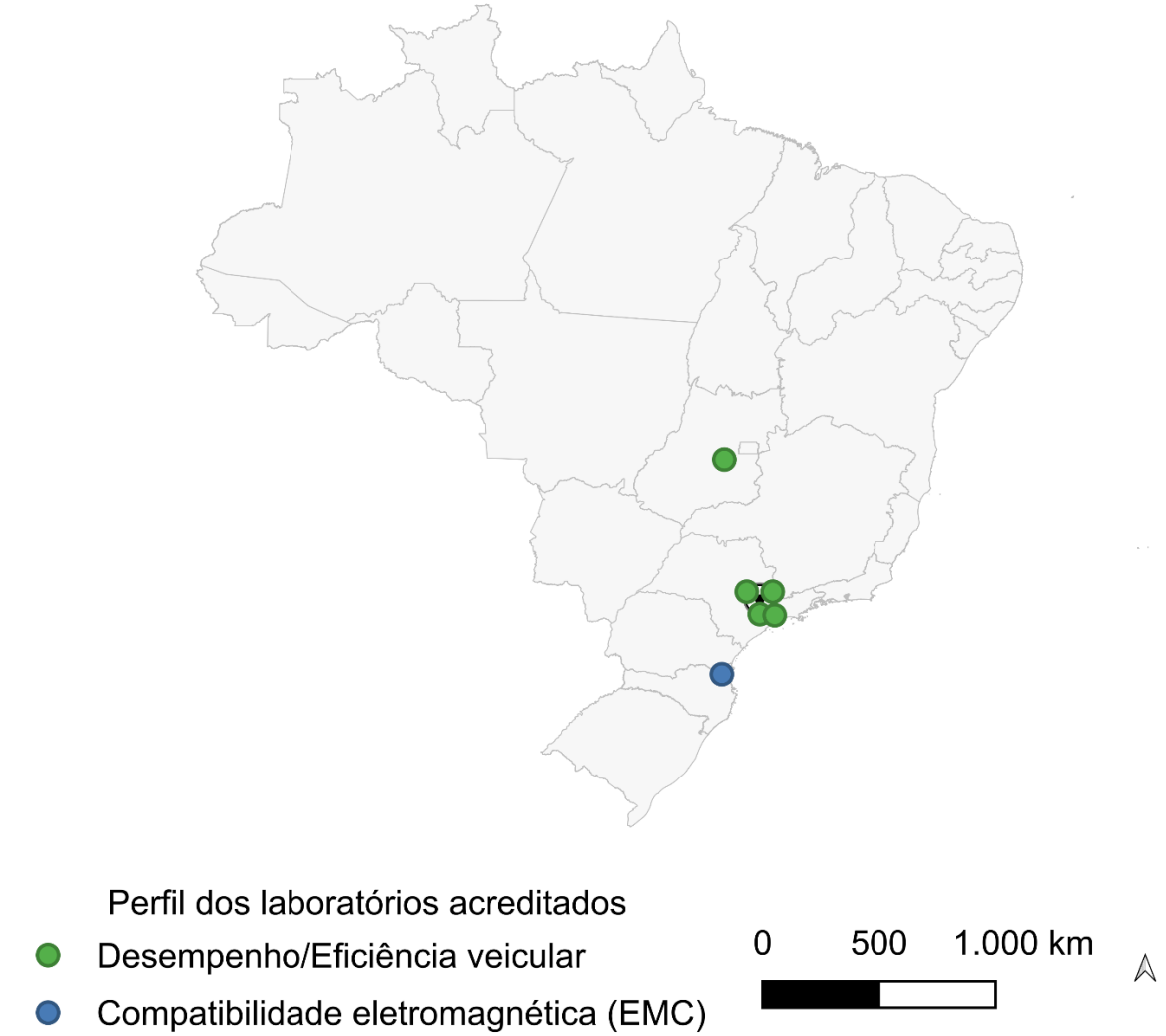


Figura 2. Distribuição geográfica dos laboratórios acreditados no Brasil, classificados por perfil de atuação. Observa-se concentração nas regiões Sudeste e Sul, com destaque para os escopos de Desempenho/Eficiência veicular (verde) e Compatibilidade eletromagnética – EMC (azul)
Fonte: Os autores.

3.4 Investigação da Infraestrutura Laboratorial Nacional Não Acreditada

A utilização de laboratórios não acreditados constitui uma alternativa estratégica para a realização de ensaios voltados ao desenvolvimento tecnológico, especialmente em fases de desenvolvimento demandadas pela indústria. Esses laboratórios, frequentemente vinculados a universidades, centros de pesquisa ou unidades industriais, já dispõem de parte da infraestrutura física e de equipes técnicas qualificadas, o que viabiliza sua atuação em testes exploratórios e em processos de aprimoramento de produtos antes da submissão aos ensaios oficiais de conformidade.

Além disso, o incentivo à acreditação desses ambientes pode representar um caminho mais ágil para o fortalecimento da capacidade nacional em avaliação laboratorial. Por já possuírem equipamentos, instalações e profissionais especializados, a transição para o status de laboratório acreditado demanda investimentos e prazos reduzidos, quando comparada ao desenvolvimento de novas instalações. Essa estratégia pode ampliar a rede de laboratórios aptos a atender às exigências normativas da mobilidade elétrica no Brasil, promovendo maior competitividade industrial e dinamizando o processo de certificação de veículos e componentes.

3.4.1 Laboratórios Acreditados em Escopos Correlatos

Entre as infraestruturas não acreditadas, destacam-se laboratórios já reconhecidos para outros tipos de ensaio, que frequentemente dispõem de parte dos equipamentos necessários para testes em mobilidade elétrica, mas ainda não ampliaram seus escopos de acreditação devido a fatores como custo, baixa demanda ou restrições institucionais. A interlocução com essas instituições é relevante, pois, além da infraestrutura já instalada, acumulam experiência no setor e fornecem percepções valiosas sobre oportunidades e desafios para a expansão das capacidades nacionais.

A análise deste item baseou-se nos cinco laboratórios acreditados já mapeados em etapa anterior (ver seção 3.3), localizados nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil, todos com instalações permanentes e histórico consolidado em ensaios automotivos. O perfil desses laboratórios abrange desde análises químicas e emissões veiculares até ensaios elétricos, magnéticos e de compatibilidade

eletromagnética, conforme a especialidade de cada instituição. O laboratório do Centro-Oeste concentra suas atividades em análises químicas de combustíveis, óleos e emissões veiculares, com ênfase em ensaios regulatórios. Os três laboratórios do Sudeste destacam-se pela especialização em medições de emissões veiculares, consumo de combustível e energia, incluindo testes aplicados a veículos elétricos, motociclos e veículos similares, com abrangência sobre emissões gasosas, evaporativas e avaliações ambientais. Já na região Sul, o laboratório direciona sua atuação para ensaios elétricos, magnéticos e de EMC, atendendo tanto equipamentos industriais quanto a infraestrutura de recarga para veículos elétricos.

Dos cinco laboratórios contatados, dois responderam ao questionário. A análise das informações disponíveis — considerando tanto os laboratórios que responderam quanto os que não responderam — indica uma sobreposição parcial de escopos e confirma a diversidade de competências existente no grupo analisado. Embora o número de respostas seja limitado, os perfis identificados sugerem que as informações coletadas oferecem um panorama representativo das capacidades disponíveis e dos desafios enfrentados para a ampliação da infraestrutura laboratorial dedicada à mobilidade elétrica no Brasil.

Um dos laboratórios informou atuar exclusivamente dentro do escopo já acreditado, enquanto o outro destacou possuir infraestrutura capaz de atender, quase integralmente, aos requisitos das normas ISO 16750-2 e ISO 21498. Cabe ressaltar que a ISO 16750-2, apesar de mencionada, não integra o escopo deste estudo, pois é classificada como ICS 43.040 e não é específica para veículos elétricos. Já a ISO 21498 refere-se a normas de desempenho diretamente relacionadas à mobilidade elétrica.

No que diz respeito à inclusão de novas normas no escopo de acreditação, ambos os laboratórios demonstraram cautela. Um declarou não prever ampliação, ao passo que o outro sinalizou a possibilidade de aumentar o escopo de ensaios aceitos sob auditoria externa, sem formalização da acreditação. As respostas sobre infraestrutura evidenciam cenários variados: enquanto um laboratório possui apenas equipamentos para medições de eficiência energética conforme as normas já mencionadas, o outro conta com recursos suficientes para realizar outros ensaios – os quais não foram especificados na resposta.

Em relação a investimentos para ampliação da infraestrutura, um dos laboratórios indicou que pretende apenas atualizar os recursos existentes, enquanto o outro informou planos concretos de expansão, buscando abranger de forma mais ampla as demandas do setor. No tocante à percepção de demanda, ambos os laboratórios não enxergam, no momento, justificativas claras provenientes de fabricantes ou órgãos reguladores que motivem a ampliação do escopo de acreditação, especialmente em áreas como EMC ou segurança de baterias. Os desafios mais citados para ampliação da capacidade incluem o elevado custo de aquisição de equipamentos e de infraestrutura, sobretudo para medições complexas. Além disso, a falta de exigência formal por parte dos fabricantes dificulta a justificativa para o direcionamento de recursos em novas áreas de acreditação.

No âmbito das parcerias, ambos relataram colaborações com outras instituições e a realização de ensaios em laboratórios externos, embora tenham destacado que, mesmo nessas colaborações, muitas vezes os testes não são conduzidos sob normas formalmente acreditadas. Por fim, quanto ao compartilhamento de infraestrutura, treinamentos e intercâmbios técnicos para suprir lacunas em ensaios críticos, as respostas evidenciaram diferentes realidades: um laboratório afirmou não ser possível avaliar a existência de iniciativas específicas nesse sentido, enquanto o outro relatou que, quando não dispõe de infraestrutura própria, recorre ao suporte de laboratórios parceiros, reforçando a importância de arranjos colaborativos para viabilizar testes essenciais ao desenvolvimento da mobilidade elétrica no Brasil.

3.4.2 Grupos de Pesquisa

Além dos laboratórios listados na RBLE, destaca-se o papel dos grupos de pesquisa, frequentemente situados em universidades federais, estaduais e institutos tecnológicos. Assim como os laboratórios acreditados, essas estruturas acadêmicas costumam dispor de equipamentos especializados e equipes técnicas qualificadas, tornando-se alternativas relevantes para a realização de ensaios pela indústria, especialmente os de desenvolvimento. O incentivo à utilização e eventual acreditação desses grupos pode ampliar significativamente a capacidade nacional de avaliação laboratorial, facilitando o acesso a testes especializados e aproximando o meio acadêmico do setor produtivo.

Foram contatados 75 grupos de pesquisa, dos quais 18 responderam ao questionário. Entre os 57 que não responderam, a análise de informações públicas disponíveis indica que a maioria está vinculada a universidades federais e institutos públicos, atuando em áreas estratégicas relacionadas à eletromobilidade, embora sem detalhamento específico sobre infraestrutura ou capacidade operacional. A ausência de resposta pode estar associada ao foco em pesquisa básica, limitações de pessoal, desinteresse momentâneo ou ausência de atividades laboratoriais aplicadas. Ainda assim, há potencial para que esses grupos possuam infraestrutura relevante, ainda não consolidada ou divulgada.

Os 18 grupos de pesquisa que forneceram respostas detalhadas estão distribuídos em todas as regiões do Brasil e atuam em áreas estratégicas da mobilidade elétrica, como sistemas embarcados, baterias, motores, infraestrutura de recarga, compatibilidade eletromagnética, controle de potência, automação veicular e eficiência energética. Foram identificadas competências e infraestruturas relevantes, incluindo bancadas de teste para motores, inversores e conversores, sistemas de avaliação do processo de recarga, bancadas de testes de baterias e instrumentação para ensaios de EMC. Destaca-se ainda a prestação de serviços externos por seis desses grupos, que relatam atender demandas de ensaios provenientes de empresas e órgãos reguladores, o que reforça o potencial de integração entre o meio acadêmico e o setor produtivo.

No que se refere aos projetos em andamento, quatro grupos de pesquisa informaram atuar em temas como segurança de baterias — incluindo estudos sobre fuga térmica e impacto mecânico —, compatibilidade eletromagnética e eficiência energética de veículos elétricos, embora sem detalhar a distribuição dessas atividades. Outras áreas mencionadas incluem baterias com enfoque em economia circular e segurança elétrica, demonstrando a diversidade de abordagens e temas de pesquisa presentes entre os grupos respondentes.

Quanto aos planos de investimento ou expansão da infraestrutura, apenas quatro grupos relataram iniciativas concretas em andamento. A maioria, porém, não possui projetos estruturados para ampliação. Entre as justificativas para a ausência de planos, destacam-se a falta de legislação específica e o uso de normas próprias

pelo setor automotivo e pelas empresas, fatores que limitam o interesse e a mobilização de investimentos para expansão das capacidades laboratoriais.

Com relação a parcerias com laboratórios já acreditados para compartilhamento de conhecimento ou infraestrutura complementar, observa-se uma diversidade de situações: parte dos grupos mantém colaborações formais ou informais com universidades, institutos e centros de pesquisa, enquanto outros relatam apenas contatos esporádicos, acordos não formalizados ou ausência de parcerias ativas. Houve relato de que, no passado, programas governamentais como o Sistema Brasileiro de Tecnologia (Sibratec) incentivaram iniciativas dessa natureza, mas atualmente a articulação ocorre de forma mais pontual, dependendo de redes institucionais ou contatos específicos.

As principais barreiras apontadas pelos grupos de pesquisa para ampliar a capacidade de ensaios concentram-se na escassez de recursos financeiros, limitação de espaço físico, falta de equipamentos e dificuldades para contratação ou manutenção de pessoal qualificado. Respondentes também destacam desafios para justificar institucionalmente novos investimentos, especialmente em ambientes vinculados a instituições públicas, além de restrições legais para prestação de serviços fora do escopo previsto em lei. Foram citados ainda o alto custo de dinamômetros e equipamentos específicos, assim como exigências técnicas ou comerciais consideradas excessivas por parte de algumas empresas demandantes, fatores que dificultam a expansão da infraestrutura laboratorial.

Por outro lado, a maioria dos grupos reconhece a existência de editais e fontes de financiamento, tanto públicos quanto privados, capazes de impulsionar o desenvolvimento de infraestrutura laboratorial dedicada a veículos elétricos. Entre os mecanismos mais citados estão a Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), a Embrapii e programas setoriais como Rota 2030 e Programa Mover. Essas iniciativas são apontadas como alternativas viáveis para viabilizar investimentos e ampliar as capacidades técnicas, embora alguns grupos relatem desconhecimento ou acesso restrito a essas oportunidades em seus contextos institucionais.

3.4.3 Unidades Embrapii

As Unidades Embrapii exercem papel estratégico na consolidação da infraestrutura tecnológica voltada à pesquisa aplicada e inovação industrial no Brasil. O levantamento realizado abrangeu 21 unidades distribuídas em todas as regiões do país, incluindo centros de inovação tecnológica, institutos federais, universidades e fundações privadas. Reconhecidas nacionalmente por sua atuação em projetos de desenvolvimento tecnológico em colaboração com o setor produtivo, essas unidades priorizam a transferência de tecnologia e a execução de projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação customizados para empresas.

Das 21 unidades contatadas, 9 responderam ao questionário, fornecendo informações detalhadas sobre suas competências, infraestrutura, tipos de ensaio realizados e perspectivas para parcerias futuras ou processos de acreditação formal. O conjunto das 12 unidades que não responderam ao questionário é formado por universidades, institutos federais e centros de inovação, envolvidos em áreas como automação, energia, eletrônica, química e materiais. A ausência de resposta pode estar associada ao foco em áreas não diretamente ligadas à mobilidade elétrica, à sobrecarga institucional ou à confidencialidade de projetos em andamento. Ainda assim, é plausível supor que parte dessas instituições possua infraestrutura relevante para testes e validação de sistemas automotivos elétricos, especialmente em projetos industriais.

As nove Unidades Embrapii que responderam ao questionário demonstram ampla diversidade e relevância em suas linhas de pesquisa e desenvolvimento voltadas à mobilidade elétrica. Entre as atividades executadas ou em andamento, destacam-se modelagem e otimização de baterias, desenvolvimento de sistemas avançados de assistência ao condutor (*Advanced Driver Assistance Systems*, ADAS), robótica, veículos autônomos e otimização de redes de recarga elétrica integradas a soluções de Internet das Coisas (IoT). As unidades também relatam avanços em digitalização da mobilidade, com iniciativas em inversores, software de gerenciamento, inteligência artificial e plataformas de gestão para eletropostos, hubs de recarga e comunicação entre sistemas. O desenvolvimento de hardware abrange baterias de lítio para aplicações veiculares e aeronáuticas, segunda vida de baterias, BMS, eletropostos fixos, móveis e soluções V2G, além de módulos de controle. Outras

frentes contemplam o desenvolvimento de estações de recarga, bancadas de testes (simuladores de veículos elétricos), corredores elétricos, carregadores inteligentes e projetos de eletrificação de frotas. Adicionalmente, há atuação em avaliação de compatibilidade eletromagnética, inclusive em bicicletas elétricas, evidenciando o espectro multidisciplinar das competências presentes nessas unidades.

No que se refere à realização de testes laboratoriais com foco em avaliação da conformidade, a maioria das Unidades Embrapii respondeu positivamente, indicando que seus projetos frequentemente incluem ensaios de validação de hardware, desenvolvimento de bancadas de teste e aplicação de normas técnicas nacionais e internacionais, como a IEC 61851-23 para estações de recarga. Tais testes são realizados tanto no desenvolvimento de produtos quanto na etapa de produtização, abrangendo desde simulações em bancada até avaliações de compatibilidade eletromagnética, conforme solicitado por clientes.

A gama de ensaios laboratoriais realizada pelas Unidades Embrapii é bastante diversificada, incluindo testes de carga e descarga de baterias, ensaios de inversores, avaliações de segurança elétrica e performance de baterias veiculares, testes de EMC e verificação de protocolos de comunicação entre veículos e estações de recarga — contemplando padrões internacionais. Algumas unidades destacaram a realização de ensaios específicos de requisitos de organismos reguladores, como do Inmetro e da Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel). Mesmo quando não ofertam diretamente ensaios para mobilidade elétrica, informam dispor de infraestrutura e conhecimento técnico aplicáveis, reforçando o potencial para atuação nesse segmento.

No que diz respeito ao atendimento a requisitos normativos nacionais e internacionais, as respostas das Unidades Embrapii demonstram cenários variados. Algumas relataram conformidade parcial, atendendo apenas a determinados testes ou normas nacionais específicas, enquanto outras informaram aderência a normas internacionais, especialmente em ensaios para baterias e eletropostos — embora nem sempre a infraestrutura possua certificação formal para todos os ensaios, utilizando-se em muitos casos para testes de desenvolvimento.

Quanto a incentivos para expansão da capacidade de ensaios, as Unidades Embrapii relataram que, de modo geral, não existem programas específicos dentro da própria Embrapii. Os incentivos disponíveis concentram-se em projetos até o nível de maturidade tecnológica (*Technology Readiness Level*, TRL) 7, sem contemplar diretamente a certificação de produtos acabados. Há casos pontuais de aporte expressivo de recursos por meio de programas, como do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) e Rota 2030, permitindo investimentos em equipamentos e infraestrutura. Algumas unidades mencionam que é possível estruturar ambientes de ensaio dentro de projetos inovadores, desde que em conformidade com as condições do fomento vigente, mas a percepção predominante é de que o incentivo direto à infraestrutura laboratorial de ensaios permanece limitado no contexto atual.

As principais fontes de recursos para atualização e expansão da infraestrutura são majoritariamente públicas, com destaque para editais da Finep, agências estaduais de fomento, projetos INCT, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Fundo Tecnológico (Funtec) do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e programas setoriais como o Mover. Em alguns casos, recursos privados advindos de parcerias industriais ou de fundações de apoio também contribuem para novos investimentos, mas a maior parte dos aportes depende de iniciativas públicas e editais.

Com relação às demandas futuras, as Unidades Embrapii identificam as baterias — principalmente em aspectos de armazenamento, degradação e segurança — como prioridade central para ensaios. Além das baterias, são mencionados inversores, conversores de potência, estações de recarga rápida, sistemas de armazenamento veicular, tecnologias de carregamento, componentes de eletrônica embarcada, sistemas de infotenimento, EMC e homologação junto à Anatel.

A maioria das unidades informou possuir planejamento para ampliar o portfólio de serviços com vistas a atender à crescente demanda por avaliação da conformidade no setor automotivo elétrico. Algumas ressaltam que a efetivação dessas expansões ainda depende da obtenção de recursos adicionais, em virtude do ritmo gradual de crescimento da demanda. De todo modo, nota-se uma disposição generalizada para ampliar a oferta de ensaios, acompanhando a evolução tecnológica e regulatória do setor.

3.4.4 Associações Setoriais

A interação com associações setoriais visou ampliar o entendimento sobre o cenário brasileiro de avaliação da conformidade em mobilidade elétrica, considerando as perspectivas do setor produtivo. Por meio do diálogo com essas entidades, buscou-se reunir impressões sobre a infraestrutura laboratorial disponível, identificar áreas prioritárias e mapear iniciativas em curso, além de compreender desafios e oportunidades para o fortalecimento da cooperação entre empresas, entidades representativas e instituições de pesquisa.

De modo geral, as associações setoriais avaliam que a disponibilidade de laboratórios nacionais para testes em veículos elétricos e seus componentes ainda é incipiente, refletindo uma fase inicial de crescimento e adaptação frente ao avanço da eletromobilidade no Brasil. Ressaltam que a capacidade instalada permanece limitada, com baixo interesse e poucos investimentos direcionados à área, enquanto as instituições de ciência e tecnologia ainda estão em processo de adequação para atender às novas demandas do setor. Em consenso, consideram que o atual estágio é insuficiente diante das projeções de expansão da frota elétrica e das necessidades crescentes por infraestrutura laboratorial especializada.

Quanto ao mapeamento da infraestrutura existente, as associações relatam a inexistência de levantamentos sistemáticos e atualizados sobre laboratórios aptos a oferecer ensaios específicos de mobilidade elétrica no Brasil. Os dados disponíveis resultam de mapeamentos informais, baseados em informações fornecidas por associados ou na disposição espontânea dos próprios laboratórios em divulgar suas capacidades. Ainda que existam algumas iniciativas pontuais, foi destacado que poucos laboratórios estão de fato preparados para ensaios em veículos elétricos, sendo mais comum a preparação para veículos híbridos.

No que diz respeito às áreas de ensaio consideradas mais críticas e carentes, as associações destacam, de forma recorrente, a segurança de baterias e os sistemas de recarga, seguidas dos testes de EMC veicular e dos ensaios abrangendo todo o ciclo de vida das baterias. A preocupação com o desenvolvimento de tecnologia nacional para produção de baterias também é recorrente, sendo vista como estratégica para reduzir dependências externas e fortalecer a autonomia do setor.

As associações setoriais apontam a existência de uma demanda reprimida significativa por ensaios laboratoriais, o que frequentemente leva a indústria nacional a recorrer a laboratórios estrangeiros, principalmente devido à ausência de recursos e infraestrutura adequada no país. Muitas vezes, apenas fabricantes que exportam para mercados com exigência regulatória realizam ensaios localmente, enquanto a falta de regulação específica no Brasil inibe investimentos e limita o desenvolvimento da capacidade nacional. Destaca-se, ainda, que o país segue atuando principalmente como importador e seguidor de tecnologias de baterias e sistemas elétricos.

Em relação à ampliação da infraestrutura, as associações mencionam iniciativas em curso, como a inauguração de parques de mobilidade e ações promovidas pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), que tem buscado se estruturar para atender à demanda emergente. Também são mencionados programas de fomento industrial e projetos de pesquisa e desenvolvimento, embora se ressalte que os ensaios laboratoriais frequentemente ocupam papel secundário nessas agendas, sendo impulsionados principalmente por iniciativas dos próprios laboratórios na captação de patrocinadores. Além disso, é citado que o Brasil deveria explorar de forma mais estratégica o potencial de suas reservas de minerais críticos, visando não apenas ampliar a infraestrutura de ensaios, mas também fortalecer a capacidade nacional de desenvolvimento e produção tecnológica.

As associações reconhecem que a integração de laboratórios acadêmicos e centros de pesquisa é fundamental para suprir a demanda por ensaios no Brasil. Iniciativas como alianças industriais e parcerias institucionais têm sido estratégicas, especialmente na fase inicial de desenvolvimento do mercado de testes e certificação. No entanto, destacam que a dependência exclusiva do meio acadêmico pode ser limitada em áreas onde as tecnologias já atingiram maturidade internacional, exigindo estratégias complementares para garantir a atualização e a competitividade do setor.

Por fim, as associações são unânimes em afirmar que baterias e sistemas de recarga são os componentes prioritários para o desenvolvimento de infraestrutura laboratorial nacional. A certificação de baterias e sistemas de recarga é vista como decisiva para superar a informalidade do setor, favorecer a padronização e consolidar a indústria local. Ainda assim, ressaltam que todos os principais componentes —

baterias, inversores, sistemas de recarga e tecnologias embarcadas — devem ser contemplados, uma vez que a mobilidade elétrica é uma tecnologia em desenvolvimento contínuo e exige atualização constante da capacidade nacional de ensaios.

4 Discussão

A presente seção analisa criticamente os resultados obtidos, a partir das duas fases metodológicas delineadas: (i) a identificação das normas técnicas já reconhecidas como aplicáveis à avaliação da conformidade em mobilidade elétrica, mas ainda sem cobertura laboratorial nacional adequada; e (ii) a compreensão dos impactos dessas deficiências e a proposição de ações voltadas à ampliação da capacidade de ensaios, considerando desafios institucionais, regulatórios e técnicos.

4.1 Análise Crítica das Lacunas

Esta seção apresenta a análise crítica das lacunas identificadas na infraestrutura laboratorial nacional para avaliação da conformidade em mobilidade elétrica, com base nos dados sistematizados nas etapas anteriores. A abordagem adotada busca evidenciar não apenas o grau de aderência entre o arcabouço normativo e a infraestrutura atualmente disponível, mas também os principais fatores institucionais, regulatórios e técnicos que limitam a consolidação de uma base de ensaios alinhada às demandas da eletromobilidade no Brasil. O texto detalha as dimensões da cobertura normativa restrita, o potencial subutilizado de grupos de pesquisa e Unidades Embrapii, e os impactos da ausência de regulação e demanda qualificada, compondo uma visão crítica das principais barreiras e oportunidades para o fortalecimento do ecossistema nacional de ensaios.

4.1.1 Cobertura Normativa Restrita e Infraestrutura Acreditada

A análise dos resultados evidencia uma discrepância significativa entre a quantidade de normas técnicas aplicáveis à avaliação da conformidade em mobilidade elétrica rodoviária no Brasil e a cobertura efetiva oferecida pelos laboratórios nacionais acreditados. Das 75 normas identificadas como relevantes para o setor, apenas três contam com infraestrutura laboratorial acreditada para sua execução no país, correspondendo a cerca de 4% do total normativo mapeado (ver Tabela 2). Esse

quadro revela que áreas estratégicas, como segurança de baterias, permanecem sem cobertura reconhecida, restringindo a capacidade nacional de realizar ensaios regulatórios essenciais para o avanço tecnológico e a competitividade industrial.

A concentração dos ensaios disponíveis em poucos centros laboratoriais reforça a dependência de serviços estrangeiros, impactando diretamente os custos e prazos para a introdução de novas tecnologias no mercado interno. Além disso, a ausência de infraestrutura laboratorial acreditada para requisitos críticos compromete não apenas a conformidade com padrões internacionais, mas também a possibilidade de inserção dos produtos brasileiros em mercados externos com regulamentação mais rigorosa. Esse contexto coloca o Brasil em posição vulnerável tanto do ponto de vista da inovação quanto da proteção do mercado interno, ao dificultar a certificação de produtos nacionais e abrir espaço para a entrada de produtos importados com menor rigor técnico.

4.1.2 Infraestrutura Laboratorial Nacional Não Acreditada e Potencial Subutilizado

Apesar das limitações verificadas na infraestrutura laboratorial acreditada, o país conta com uma rede de grupos de pesquisa e Unidades Embrapii que já dispõem de parte relevante da infraestrutura física e de capital humano para apoiar o desenvolvimento tecnológico em mobilidade elétrica. Entretanto, a ausência de incentivos específicos e de recursos direcionados tem dificultado a conversão desse potencial em uma infraestrutura formalmente acreditada e reconhecida para avaliação da conformidade.

Práticas de colaboração, como o uso compartilhado de equipamentos, a execução de projetos conjuntos e o suporte técnico entre instituições, vêm se mostrando estratégias relevantes para suprir demandas pontuais, especialmente nas fases iniciais de desenvolvimento tecnológico. Contudo, essas iniciativas ainda se caracterizam por sua pontualidade e baixa sistematização, sendo frequentemente limitadas por barreiras institucionais e regulatórias. Além disso, observa-se uma carência de editais e de programas de apoio voltados à acreditação e ao fortalecimento dessas estruturas, o que restringe o pleno aproveitamento do potencial já existente no ecossistema nacional.

4.1.3 Ausência de Regulação, Demanda Reprimida e Capital Humano

Um dos fatores centrais que limitam a expansão e a consolidação da infraestrutura laboratorial dedicada à mobilidade elétrica no Brasil é a ausência de regulamentação específica que estabeleça a obrigatoriedade de ensaios para avaliação da conformidade. Essa lacuna normativa perpetua um ciclo vicioso: a falta de regulação resulta na inexistência de demanda consistente por serviços laboratoriais, o que, por sua vez, desestimula o investimento no desenvolvimento de novos laboratórios e na acreditação de estruturas já existentes.

Nesse contexto, a ausência de demanda e investimento compromete não apenas a consolidação da infraestrutura, mas também a formação e retenção de capital humano técnico qualificado — profissionais essenciais para o desenvolvimento, operação e inovação no setor de mobilidade elétrica. Assim, a dependência nacional de serviços estrangeiros passa a ser também uma dependência de conhecimento, de métodos e de capacitação técnica, restringindo o desenvolvimento autônomo do país.

Adicionalmente, o déficit de laboratórios habilitados limita a capacidade nacional de avançar em novas tecnologias, bem como de testar, homologar e garantir a qualidade de tecnologias já existentes ou importadas, com reflexos diretos sobre o progresso técnico e a segurança dos consumidores. Esse cenário pode se agravar caso mercados internacionais passem a exigir certificações específicas indisponíveis no Brasil, tornando produtos nacionais inviáveis para exportação. De forma análoga, a ausência de regulação e infraestrutura adequada favorece a entrada de produtos de baixa qualidade, projetados para mercados menos exigentes, fragilizando a proteção ao consumidor e comprometendo a competitividade da indústria nacional.

4.2 Ações Propostas

Para enfrentar essas limitações e promover o avanço do setor, este estudo apresenta um conjunto de recomendações integradas para ampliar a capacidade nacional de ensaios, fortalecer a infraestrutura laboratorial e alinhar o Brasil às melhores práticas internacionais. Essas ações abrangem iniciativas de fomento, integração, valorização de capital humano e priorização de investimentos em áreas críticas.

4.2.1 Programas Voluntários de Avaliação da Conformidade

Diante das limitações identificadas, recomenda-se o desenvolvimento de programas voluntários de avaliação da conformidade nacionais, para o setor de mobilidade elétrica. Essa estratégia viabiliza a consolidação de critérios técnicos e incentiva a adesão progressiva dos diferentes agentes do setor, sem exigir a implementação imediata de regulação compulsória. Programas dessa natureza podem criar diferenciais de mercado, sendo atrativos para fabricantes e fornecedores que desejam evidenciar a qualidade e a conformidade de seus produtos. Exemplos bem-sucedidos, como o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBE-V), demonstram o potencial dessas iniciativas para estimular a infraestrutura de ensaios e induzir padrões de excelência técnica, mesmo em contextos em que o arcabouço regulatório ainda está em fase de consolidação.

4.2.2 Fomento à Acreditação e Fortalecimento da Infraestrutura

Para romper o ciclo vicioso gerado pela ausência de demanda e de investimento, torna-se fundamental a promoção de políticas públicas e instrumentos de fomento direcionados especificamente à acreditação de laboratórios já parcialmente equipados, com ênfase nas áreas mais críticas. Essa expansão não depende apenas do desenvolvimento de novos laboratórios de ensaio, mas também da disponibilidade de laboratórios de calibração de equipamentos, de padrões de referência confiáveis e de programas de ensaios de proficiência que assegurem rastreabilidade metrológica e comparabilidade de resultados. Soma-se a isso a necessidade de fortalecer a capacidade institucional da Cgcre para conduzir processos de acreditação em novos escopos, de modo a evitar atrasos e garantir que a ampliação da rede ocorra em ritmo compatível com a evolução tecnológica da mobilidade elétrica. É recomendável, portanto, a estruturação de editais dedicados e a destinação de recursos financeiros para a modernização, ampliação e acreditação da infraestrutura laboratorial, considerando tanto o alto investimento inicial quanto o retorno de longo prazo característico desse setor.

Adicionalmente, recomenda-se que esses editais contemplem não apenas as Unidades Embrapii, mas também grupos de pesquisa aptos a atuar de forma colaborativa, otimizando o uso de recursos e evitando sobreposição de esforços. A

previsão de recursos segmentados por área de conhecimento e a adoção de critérios de custo-benefício nacional podem contribuir para a efetividade dos investimentos, alinhando-os de maneira mais precisa às necessidades estratégicas do país. Esse arranjo multissetorial favorece a consolidação de uma rede de ensaios tecnicamente robusta, capaz de responder de forma coordenada às demandas de acreditação e de sustentar a confiabilidade da infraestrutura nacional de avaliação da conformidade.

4.2.3 Integração, Redes de Cooperação e Transparência de Informações

O fortalecimento das redes nacionais de colaboração constitui um dos caminhos mais eficazes para ampliar a eficiência da infraestrutura já instalada e acelerar sua consolidação. Incentivar a formação de consórcios de acreditação, o compartilhamento de equipamentos e o desenvolvimento de fluxos institucionais contínuos de cooperação entre indústria, governo, universidades, unidades Embrapii e laboratórios pode ampliar a oferta de ensaios e aumentar a sinergia entre os diversos atores do ecossistema nacional.

Uma medida estratégica para potencializar essa integração é o desenvolvimento de uma base nacional de dados de acesso público, consolidando e atualizando periodicamente informações sobre as capacidades nacionais em ensaios, equipamentos disponíveis, escopos acreditados e especializações técnicas no campo da mobilidade elétrica. Tal iniciativa promoveria maior transparência, facilitaria a formação de parcerias, orientaria investimentos e evitaria a sobreposição de esforços entre instituições, otimizando o desenvolvimento do setor no Brasil.

4.2.4 Formação e Valorização de Capital Humano

Outro aspecto fundamental para o fortalecimento da infraestrutura laboratorial é o investimento contínuo na formação e valorização de profissionais qualificados, aptos a atuar em laboratórios, centros de pesquisa e setores industriais relacionados à mobilidade elétrica. O desenvolvimento e o fortalecimento de laboratórios nacionais não apenas ampliam a capacidade técnica instalada, mas também funcionam como polos de capacitação de mão de obra, elemento indispensável para o incremento de competências técnicas e científicas no país. Recomenda-se que políticas de formação integrada, estágios, intercâmbios e treinamentos sejam incorporadas de forma estruturada aos programas de fomento, de modo a acelerar a formação e retenção

desse capital humano estratégico, fundamental para a consolidação e sustentabilidade do ecossistema de inovação.

4.2.5 Priorização e Monitoramento

Por fim, recomenda-se a definição de áreas estratégicas para investimento em infraestrutura laboratorial, acompanhada de um monitoramento permanente da evolução normativa internacional. Esse acompanhamento contínuo é fundamental para ajustar prioridades nacionais, alinhar o portfólio de ensaios às tendências globais e garantir a atualização constante da capacidade laboratorial frente às demandas técnicas e regulatórias do setor de mobilidade elétrica.

4.3 Limitações do Estudo

Apesar dos esforços metodológicos para mapear e analisar de forma abrangente a infraestrutura laboratorial dedicada à avaliação da conformidade em mobilidade elétrica no Brasil, algumas limitações devem ser consideradas na interpretação dos resultados.

Em primeiro lugar, destaca-se a baixa taxa de resposta aos questionários enviados a laboratórios, grupos de pesquisa e unidades Embrapii, o que pode restringir a representatividade do levantamento em relação ao universo real de capacidades e práticas existentes no país. A ausência de respostas pode estar relacionada a fatores como falta de interesse, restrições institucionais, sobrecarga operacional ou mesmo à inexistência de infraestrutura específica para mobilidade elétrica em algumas instituições.

Outra limitação relevante refere-se à escassez de levantamentos sistemáticos e atualizados por parte de entidades setoriais ou órgãos governamentais, dificultando a obtenção de dados consolidados sobre a distribuição geográfica, o escopo de atuação e a capacidade instalada dos laboratórios brasileiros não acreditados, voltados à área de mobilidade elétrica. Em muitos casos, as informações públicas disponíveis são incompletas, desatualizadas ou restritas a iniciativas pontuais, limitando a análise longitudinal e dificultando a comparação entre diferentes períodos ou regiões.

Além disso, barreiras de confidencialidade e restrições de acesso a dados detalhados sobre equipamentos, processos e parcerias institucionais limitaram a possibilidade de validação cruzada das informações coletadas, especialmente no que se refere a projetos de pesquisa em andamento, investimentos planejados e articulação de redes colaborativas.

Essas limitações podem impactar tanto a abrangência dos achados quanto a capacidade de generalização das recomendações apresentadas, reforçando a necessidade de estudos complementares, acompanhamento contínuo do tema e o desenvolvimento de mecanismos públicos de transparência e atualização permanente dos dados nacionais sobre infraestrutura laboratorial.

4.4 Sugestões para Pesquisas Futuras

Como perspectivas futuras, recomenda-se o aprofundamento do mapeamento nacional da infraestrutura laboratorial, o monitoramento contínuo das políticas públicas e a análise dos impactos das ações de fomento sobre a capacitação técnica e a competitividade do setor. A consolidação de uma base de dados aberta e colaborativa pode contribuir para maior transparência, integração e eficiência dos investimentos, fornecendo condições favoráveis para o desenvolvimento sustentável da mobilidade elétrica no Brasil.

5 Conclusões

O presente estudo revelou que a infraestrutura laboratorial brasileira dedicada à avaliação da conformidade em mobilidade elétrica, embora registre avanços pontuais, ainda é limitada em termos de cobertura normativa, disponibilidade de ensaios acreditados e articulação entre os principais atores do setor. Foram identificadas lacunas relevantes, especialmente em áreas críticas, como segurança de baterias. Observou-se, ainda, a existência de potencial subutilizado em grupos de pesquisa, universidades e unidades Embrapii, cuja integração ao sistema formal de acreditação permanece restrita devido à ausência de incentivos e recursos direcionados.

A persistência dessas lacunas representa um obstáculo à competitividade da indústria nacional, à inovação tecnológica e à inserção do Brasil em cadeias globais

de valor na área de mobilidade elétrica. A falta de infraestrutura laboratorial adequada compromete não apenas a conformidade dos produtos com padrões internacionais, mas também a segurança dos consumidores e a proteção do mercado interno contra produtos de baixa qualidade. O fortalecimento dessa infraestrutura é, portanto, estratégico para impulsionar o desenvolvimento sustentável, fomentar o capital humano especializado e promover o avanço técnico-científico do país.

De forma integrada, os resultados e análises deste estudo indicam cinco frentes prioritárias para o fortalecimento da infraestrutura laboratorial nacional em mobilidade elétrica: (i) implementação de programas voluntários de avaliação da conformidade, fomentando padrões de qualidade mesmo antes da regulação compulsória; (ii) estímulo à acreditação e modernização de laboratórios já parcialmente equipados; (iii) ampliação das redes de cooperação e transparência de informações sobre capacidades instaladas; (iv) formação e valorização de capital humano especializado; e (v) definição de áreas estratégicas e monitoramento contínuo da evolução normativa internacional. Essas ações, articuladas de forma coordenada entre governo, indústria e academia, podem reduzir a dependência externa, elevar a competitividade nacional e garantir maior segurança e confiabilidade para a mobilidade elétrica no Brasil.

Lista de Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Anti-lock Braking System
ABVE	Associação Brasileira do Veículo Elétrico
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
Anfavea	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
BEV	Battery Electric Vehicle
BMS	Battery Management System
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCS	Combined Charging System
Cgcre	Coordenação Geral de Acreditação
CHAdeMO	CHArge de Move
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CO_2	Dióxido de Carbono
Embrapii	Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial
EMC	Electromagnetic Compatibility
Finep	Financiadora de Estudos e Projetos
Funtec	Fundo Tecnológico

GB/T	Guóbiāo/Tuījiàn
HEV	Hybrid Electric Vehicle
ICS	International Classification for Standards
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
INCT	Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IoT	Internet of Things
IQ	Infraestrutura da Qualidade
ISO	International Organization for Standardization
MHEV	Mild Hybrid Electric Vehicle
PBE-V	Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
RBLE	Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
Sibratec	Sistema Brasileiro de Tecnologia
Sindipeças	Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores
TRL	Technology Readiness Level
V2G	Vehicle-to-Grid
WPT	Wireless Power Transfer

Referências

1. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team: H. Lee, J. Romero (Eds.)]; IPCC: Geneva, Switzerland, 2023;

2. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). Financial Markets and Climate Transition: Opportunities, Challenges and Policy Implications; 2021st ed.; OECD: Paris, France, 2021; ISBN 978-92-64-54453-6.

3. GlobeScan. Healthy & Sustainable Living: Global Consumer Insights 2021 Highlights Report; GlobeScan, 2021;

4. Ipsos Climate Change + Consumer Behaviour: A Global Advisor Survey Available online: https://www.ipsos.com/en/climate-change-consumer-behaviour-2021 (accessed on 2 August 2025).

5. McKinsey; NielsenIQ Consumers Care about Sustainability—and Back It up with Their Wallets Available online: https://www.mckinsey.com/industries/consumer-packaged-goods/our-insights/consumers-care-about-sustainability-and-back-it-up-with-their-wallets#/ (accessed on 2 August 2025).

6. International Energy Agency. World Energy Outlook 2024; IEA: Paris, France, 2024;

7. Steinberg, D.; Bielen, D.; Eichman, J.; Eurek, K.; Logan, J.; Mai, T.; Mcmillan, C.; Parker, A.; Vimmerstedt, L.; Wilson, E. Electrification & Decarbonization: Exploring U.S. Energy Use and Greenhouse Gas Emissions in Scenarios with Widespread Electrification and Power Sector Decarbonization; Golden, CO, 2017;

8. International Energy Agency. Global EV Outlook 2025: Expanding Sales in Diverse Markets; IEA: Paris, France, 2025;

9. Anfavea. Anuário Da Indústria Automobilística Brasileira 2025; Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (Anfavea): São Paulo, Brazil, 2025;

10. Anfavea. Anuário Da Indústria Automobilística Brasileira 2024; Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (Anfavea): São Paulo, Brazil, 2024;
11. Anfavea. Anuário Da Indústria Automobilística Brasileira 2022; Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (Anfavea): São Paulo, Brazil, 2022;
12. Pereirinha, P.G. Electric Vehicles. In Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering; García, J., Ed.; Elsevier: Oxford, UK, 2023; Vol. 1, pp. 350–387.
13. Barassa, E. A Construção de Uma Agenda Para a Eletromobilidade No Brasil: Competências Tecnológicas e Governança. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas: Campinas, 2019.
14. Consoni, F.L.; Barassa, E.; Martínez, J.; Moraes, H.B. Roadmap Tecnológico Para Veículos Elétricos Leves No Brasil; Laboratório de Estudos do Veículo Elétrico, Unicamp/GIZ/Ministério da Economia: Brasília, Brazil, 2019;
15. PNME 1o Anuário Brasileiro Da Mobilidade Elétrica; Plataforma Nacional de Mobilidade Elétrica: Brasília/Rio de Janeiro, 2021;
16. D'Agosto, M. de A.; Gonçalves, D.N.S.; Goes, G.V.; Bandeira, R.A. de M.; da Costa, M.G. Normas e Regulamentos Para a Mobilidade Elétrica No Enquadramento Do Brasil - Análise Internacional e Propostas de N&R Para o Contexto Brasileiro; IBTS/GIZ/Ministério da Economia: Rio de Janeiro, Brazil, 2020;
17. Brzezinska, D.; Bryant, P. Performance-Based Analysis in Evaluation of Safety in Car Parks under Electric Vehicle Fire Conditions. Energies (Basel) 2022, 15, 649, https://doi.org/10.3390/en15020649.
18. Dorsz, A.; Lewandowski, M. Analysis of Fire Hazards Associated with the Operation of Electric Vehicles in Enclosed Structures. Energies (Basel) 2021, 15, 11, https://doi.org/10.3390/en15010011.
19. Victor Chombo, P.; Laoonual, Y.; Wongwises, S. Lessons from the Electric Vehicle Crashworthiness Leading to Battery Fire. Energies (Basel) 2021, 14, 4802, https://doi.org/10.3390/en14164802.
20. Bąkowski, H.; Przytuła, I.; Cebulska, W.; Hadryś, D.; Ćwiek, J. The Impact of Mechanical Failure of 18650 Batteries on the Safety of Electric Transport Operations. Energies (Basel) 2024, 17, 5980, https://doi.org/10.3390/en17235980.
21. Winslow, K.M.; Laux, S.J.; Townsend, T.G. A Review on the Growing Concern and Potential Management Strategies of Waste Lithium-Ion Batteries. Resour Conserv Recycl 2018, 129, 263–277, https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.11.001.
22. Khaneghah, M.Z.; Alzayed, M.; Chaoui, H. Fault Detection and Diagnosis of the Electric Motor Drive and Battery System of Electric Vehicles. Machines 2023, 11, 713, https://doi.org/10.3390/machines11070713.
23. Sun, P.; Bisschop, R.; Niu, H.; Huang, X. A Review of Battery Fires in Electric Vehicles. Fire Technol 2020, 56, 1361–1410, https://doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3.
24. Zhang, Z.; Dong, H.; Wang, L.; Wang, Y.; He, X. Tracing Root Causes of Electric Vehicle Fires. Energy Technology 2024, 12, https://doi.org/10.1002/ente.202400931.
25. Choudhary, A.; Fatima, S.; Panigrahi, B.K. State-of-the-Art Technologies in Fault Diagnosis of Electric Vehicles: A Component-Based Review. IEEE Transactions on Transportation Electrification 2023, 9, 2324–2347, https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3209166.

26. Soares, L.O.; Reis, A. da C.; Vieira, P.S.; Hernández-Callejo, L.; Boloy, R.A.M. Electric Vehicle Supply Chain Management: A Bibliometric and Systematic Review. Energies (Basel) 2023, 16, 1563, https://doi.org/10.3390/en16041563.
27. Mohd Tohir, M.Z.; Martín-Gómez, C. Electric Vehicle Fire Risk Assessment Framework Using Fault Tree Analysis. Open Research Europe 2023, 3, 178, https://doi.org/10.12688/openreseurope.16538.1.
28. Katis, C.; Karlis, A. Evolution of Equipment in Electromobility and Autonomous Driving Regarding Safety Issues. Energies (Basel) 2023, 16, 1271, https://doi.org/10.3390/en16031271.
29. Jiang, L.; Diao, X.; Zhang, Y.; Zhang, J.; Li, T. Review of the Charging Safety and Charging Safety Protection of Electric Vehicles. World Electric Vehicle Journal 2021, 12.
30. Zhao, C.; Li, Y.; Yang, Y.; Wan, S.; Yu, F.; Yu, C.; Deng, C.; Zhou, A.; Shen, X. Research on Electric Vehicle Range under Cold Condition. Advances in Mechanical Engineering 2022, 14, https://doi.org/10.1177/16878132221087083.
31. Konzept, A.; Reick, B.; Kaufmann, A.; Hermanutz, R.; Stetter, R. Battery Electric Vehicle Efficiency Test for Various Velocities. Vehicles 2022, 4, 60–73, https://doi.org/10.3390/vehicles4010004.
32. Wang, T.; Li, B.; Zhao, K.; Yu, Q.; Xu, L.; Chi, Y.; Guan, S. Evaluation of Electromagnetic Exposure of the Human with a Coronary Stent Implant from an Electric Vehicle Wireless Power Transfer Device. Electronics (Basel) 2023, 12, 4231, https://doi.org/10.3390/electronics12204231.
33. Afonso, J.L.; Cardoso, L.A.L.; Pedrosa, D.; Sousa, T.J.C.; Machado, L.; Tanta, M.; Monteiro, V. A Review on Power Electronics Technologies for Electric Mobility. Energies (Basel) 2020, 13, 6343, https://doi.org/10.3390/en13236343.
34. Sterniczuk, D.; Zaklika, W.; Kozłowski, M. Identification Tests of Modern Vehicles' Electromagnetic Environment as Part of the Assessment of Their Functional Safety. Sensors 2024, 25, 7, https://doi.org/10.3390/s25010007.
35. Deutschmann, B.; Winkler, G.; Kastner, P. Impact of Electromagnetic Interference on the Functional Safety of Smart Power Devices for Automotive Applications. e & i Elektrotechnik und Informationstechnik 2018, 135, 352–359, https://doi.org/10.1007/s00502-018-0633-4.
36. Harmes-Liedtke, U.; Di Matteo, J.J.O. Global Quality Infrastructure Index Report 2020; Bad Homburg / Germany; Buenos Aires / Argentina, 2021;
37. Kellermann, M. Ensuring Quality to Gain Access to Global Markets: A Reform Toolkit; Washington, DC: World Bank; Braunschweig, Germany: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2019; ISBN 978-1-4648-1372-6.
38. Quality Policy: Guiding Principles; United Nations Industrial Development Organization: Vienna, Austria, 2018;
39. Building Trust - The Conformity Assessment Toolbox; International Electrotechnical Commission; International Organization for Standardization; United Nations Industrial Development Organization: Geneva, Switzerland; Vienna, Austria, 2023;
40. International Organization for Standardization. International Classification for Standards. 7th Edition; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2015; ISBN 978-92-67-10652-6.
41. Eldho Aliasand, A.; Josh, F.T. Selection of Motor Foran Electric Vehicle: A Review. Mater Today Proc 2020, 24, 1804–1815, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.605.

42. López, I.; Ibarra, E.; Matallana, A.; Andreu, J.; Kortabarria, I. Next Generation Electric Drives for HEV/EV Propulsion Systems: Technology, Trends and Challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2019, 114, 109336, https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109336.
43. Wahid, M.; Budiman, B.; Joelianto, E.; Aziz, M. A Review on Drive Train Technologies for Passenger Electric Vehicles. Energies (Basel) 2021, 14, 6742, https://doi.org/10.3390/en14206742.
44. Rajashekara, K. Present Status and Future Trends in Electric Vehicle Propulsion Technologies. IEEE J Emerg Sel Top Power Electron 2013, 1, 3–10, https://doi.org/10.1109/JESTPE.2013.2259614.
45. Mosleuzzaman, M.; Hussain, M.D.; Shamsuzzaman, H.M.; Mia, A.; Hossain, M.S. ELECTRIC VEHICLE POWERTRAIN DESIGN: INNOVATIONS IN ELECTRICAL ENGINEERING. ACADEMIC JOURNAL ON SCIENCE, TECHNOLOGY, ENGINEERING & MATHEMATICS EDUCATION 2024, 1, 1–18, https://doi.org/10.69593/ajieet.v1i01.114.
46. Faraz, A.; Ambikapathy, A.; Thangavel, S.; Logavani, K.; Arun Prasad, G. Battery Electric Vehicles (BEVs). In Green Energy and Technology; Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021; pp. 137–160.
47. Tie, S.F.; Tan, C.W. A Review of Energy Sources and Energy Management System in Electric Vehicles. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2013, 20, 82–102, https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.077.
48. Ruiz V.; Di Persio F. Standards for the Performance and Durability Assessment of Electric Vehicle Batteries: Possible Performance Criteria for an Ecodesign Regulation; European Commission, Joint Research Centre: Luxembourg, 2018; ISBN 9789279941795.
49. Sanguesa, J.A.; Torres-Sanz, V.; Garrido, P.; Martinez, F.J.; Marquez-Barja, J.M. A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. Smart Cities 2021, 4, 372–404, https://doi.org/10.3390/smartcities4010022.
50. Vega-Muratalla, V.O.; Ramírez-Márquez, C.; Lira-Barragán, L.F.; Ponce-Ortega, J.M. Review of Lithium as a Strategic Resource for Electric Vehicle Battery Production: Availability, Extraction, and Future Prospects. Resources 2024, 13, 148, https://doi.org/10.3390/resources13110148.
51. Wang, B.; Dehghanian, P.; Wang, S.; Mitolo, M. Electrical Safety Considerations in Large-Scale Electric Vehicle Charging Stations. IEEE Trans Ind Appl 2019, 55, 6603–6612, https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2936474.
52. Jiang, L.; Diao, X.; Zhang, Y.; Zhang, J.; Li, T. Review of the Charging Safety and Charging Safety Protection of Electric Vehicles. World Electric Vehicle Journal 2021, 12, 184, https://doi.org/10.3390/wevj12040184.
53. Santos, J.B.; Francisco, A.M.B.; Cabrita, C.; Monteiro, J.; Pacheco, A.; Cardoso, P.J.S. Development and Implementation of a Smart Charging System for Electric Vehicles Based on the ISO 15118 Standard. Energies (Basel) 2024, 17, 3045, https://doi.org/10.3390/en17123045.
54. Linja-Aho, V. Electric Vehicle Charging Safety – The State of Art, Best Practices, and Regulatory Aspects. In Proceedings of the 2024 IEEE IAS Electrical Safety Workshop (ESW); IEEE, March 4 2024; pp. 1–10.

APÊNDICES

Apêndice A

Este apêndice apresenta os questionários utilizados na pesquisa para o mapeamento da infraestrutura laboratorial aplicável à avaliação da conformidade na mobilidade elétrica no Brasil. Os formulários foram adaptados ao perfil institucional dos respondentes e enviados on-line às entidades identificadas. As respostas subsidiaram a análise da capacidade nacional de realização de ensaios laboratoriais, conforme descrito na seção 2.3.

Apêndice A.1

Objetivo do questionário: Identificar laboratórios acreditados que já realizam ou planejam realizar ensaios voltados à mobilidade elétrica, bem como mapear seu escopo de acreditação, investimentos e desafios técnicos.

Questionário:

1. Quais normas técnicas relacionadas à mobilidade elétrica o seu laboratório já atende?

2. Há previsões de inclusão de novas normas em seu escopo de acreditação (por exemplo, ensaios para baterias, compatibilidade eletromagnética, sistemas de recarga)?

3. O laboratório possui, mesmo que parcialmente, equipamentos capazes de executar ensaios em veículos elétricos ou seus componentes (baterias, motores, inversores)?

4. Existe algum plano de investimento ou expansão dessa infraestrutura para abranger requisitos específicos de veículos elétricos?

5. Há demanda suficiente, por parte de fabricantes ou órgãos reguladores, para justificar a ampliação do escopo de acreditação em áreas como EMC ou segurança de baterias?

6. Quais os principais desafios (técnicos, financeiros, regulatórios) para ampliar essa capacidade?

7. Seu laboratório mantém parcerias ou acordos com outras instituições que já realizam ou pretendem realizar testes para veículos elétricos?

8. Há iniciativas de compartilhamento de infraestrutura, treinamentos ou intercâmbios técnicos para suprir lacunas em ensaios críticos?

9. Você poderia indicar outros laboratórios acreditados com potencial ou interesse em realizar ensaios voltados à mobilidade elétrica?

Apêndice A.2

Objetivo do questionário: Levantar a infraestrutura disponível em universidades e centros de pesquisa, incluindo uso compartilhado, parcerias, planos de acreditação e capacidade de realização de ensaios em mobilidade elétrica.

Questionário:

1. Vocês possuem equipamentos ou laboratórios dedicados à pesquisa em mobilidade elétrica (ex.: dinamômetros, câmaras climáticas, bancadas de teste de baterias, medição de EMC)?

2. Esses recursos são utilizados exclusivamente para fins acadêmicos ou também podem atender demandas de teste vindas de empresas e órgãos reguladores?

3. Os projetos atuais incluem estudos sobre segurança de baterias (fuga térmica, impacto mecânico), compatibilidade eletromagnética ou eficiência energética de veículos elétricos?

4. Quais resultados práticos dessas pesquisas podem ser aplicados em processos de avaliação da conformidade?

5. Há planos ou perspectivas para acreditar formalmente o laboratório em normas específicas de mobilidade elétrica?

6. Vocês mantêm parcerias com laboratórios já acreditados, contribuindo com know-how ou infraestrutura complementar?

7. Quais são as principais barreiras para ampliar a capacidade de ensaios?

8. Existem editais ou fontes de financiamento público/privado que possam catalisar o desenvolvimento de infraestrutura laboratorial focada em veículos elétricos?

9. Vocês poderiam indicar outros grupos de pesquisa, centros acadêmicos ou instituições que possuam (ou estejam desenvolvendo) infraestrutura voltada à mobilidade elétrica e que sejam importantes de serem contatados neste mapeamento?

Apêndice A.3

Objetivo do questionário: Compreender como as unidades Embrapii contribuem para o desenvolvimento de soluções e infraestrutura de ensaios em mobilidade elétrica, além de mapear capacidade instalada e perspectivas futuras.

Questionário:

1. Quais linhas de pesquisa e desenvolvimento em mobilidade elétrica a unidade Embrapii já executou ou está executando?

2. Esses projetos incluem a realização de testes laboratoriais, visando avaliação de conformidade de produtos para o mercado?

3. Que tipos de ensaios relacionados à mobilidade elétrica são oferecidos pela unidade (segurança de baterias, testes de inversores e motores, EMC etc.)?

4. A infraestrutura existente atende a requisitos normativos nacionais e internacionais (ISO, IEC, ABNT)?

5. Há programas específicos de incentivo à expansão da capacidade de ensaios em mobilidade elétrica dentro da Embrapii?

6. Quais são as principais fontes de recursos (públicas ou privadas) que viabilizam investimentos em novos equipamentos de teste?

7. Quais componentes ou tecnologias vocês entendem que demandarão maior atenção em termos de ensaios nos próximos anos?

8. Existe planejamento para ampliação do portfólio de serviços para atender demandas crescentes de avaliação da conformidade no setor automotivo elétrico?

9. Vocês poderiam indicar outras unidades Embrapii ou centros de inovação industrial que atuem em projetos de mobilidade elétrica e disponham de infraestrutura ou interesse em desenvolver testes e ensaios na área?

Apêndice A.4

Objetivo do questionário: Obter a visão estratégica das associações representativas do setor automotivo e elétrico quanto às lacunas na infraestrutura de ensaios, iniciativas em andamento e oportunidades de cooperação.

Questionário:

1. Como a associação avalia a disponibilidade de laboratórios nacionais para testes em veículos elétricos e seus componentes?

2. Existem levantamentos atualizados que indiquem quantos e quais laboratórios já oferecem (ou planejam oferecer) ensaios específicos de mobilidade elétrica?

3. Quais áreas de ensaios são consideradas mais críticas e carentes no Brasil (por exemplo, segurança de baterias, EMC, sistemas de recarga)?

4. Há demanda reprimida das indústrias associadas que acabe direcionando ensaios para laboratórios estrangeiros?

5. Existem programas, projetos ou parcerias em andamento (nacionais ou internacionais) para ampliar a infraestrutura de ensaios para veículos elétricos?

6. Há ações de cooperação setorial (por exemplo, consórcios de empresas) visando compartilhar laboratórios ou custos de equipagem para testes em mobilidade elétrica?

7. A associação vê oportunidade de integrar laboratórios acadêmicos ou centros de pesquisa como parte da solução para suprir a demanda de ensaios?

8. Em termos de competitividade, quais componentes (baterias, inversores, sistemas de recarga, etc.) demandam maior atenção no desenvolvimento de infraestrutura nacional para ensaios?

9. Há outras associações setoriais ou entidades no setor automotivo/elétrico que a sua associação recomendaria para contatarmos a fim de enriquecer este mapeamento?

Apêndice B

Tabela B1. Normas Consideradas Não Aplicáveis na Pesquisa.

Norma	Motivo para Não Aplicabilidade
ABNT ISO/TR 8713:2015	Norma de vocabulário.
ISO/TR 8713:2019	Norma de vocabulário.
ABNT NBR 9500:2023	Estabelece requisitos técnicos para veículos porta-contêiner.
ISO/TR 11954:2024	Aplicável a veículos movidos a células de combustível utilizando hidrogênio comprimido.
ISO 15118-1:2019	Não contém ensaios no seu conteúdo.
ISO 15118-2:2014	Não contém ensaios no seu conteúdo.
ISO 15118-3:2015	Não contém ensaios no seu conteúdo.
ISO 15118-8:2020	Não contém ensaios no seu conteúdo.
ISO 15118-20:2022	Não contém ensaios no seu conteúdo.
ABNT NBR 15875-1:2010	Estabelece requisitos para acionamento elétrico de vidros, divisórias e tetos solares.
ABNT NBR 15875-2:2013	Estabelece requisitos para acionamento elétrico de vidros, divisórias e tetos solares.
ABNT NBR 15875-3:2010	Estabelece requisitos para acionamento elétrico de vidros, divisórias e tetos solares.
ABNT NBR 15875-4:2013	Estabelece requisitos para acionamento elétrico de vidros, divisórias e tetos solares.
ABNT NBR 17019:2022	Estabelece requisitos para a instalação elétrica fixa.
ISO/TR 17326:2023	Aplicável a veículos movidos a células de combustível utilizando hidrogênio comprimido.
ISO 23273:2013	Aplicável a veículos movidos a células de combustível utilizando hidrogênio comprimido.
ISO 23828:2022	Aplicável a veículos movidos a células de combustível utilizando hidrogênio comprimido.
IEC 60335-2-114:2022	Aplicável a dispositivos de transporte pessoal elétrico.
IEC 60364-7-722:2018	Estabelece requisitos para instalações elétricas de baixa tensão.
IEC TS 61851-3-4:2023	Não contém ensaios no seu conteúdo.
IEC TS 61851-3-5:2023	Não contém ensaios no seu conteúdo.
IEC TS 61851-3-6:2023	Não contém ensaios no seu conteúdo.
IEC TS 61851-3-7:2023	Não contém ensaios no seu conteúdo.
IEC 62827-3:2016	Diretrizes para gestão de múltiplas fontes em WPT, sem foco em veículos elétricos.
IEC TS 62840-1:2016	Não contém ensaios no seu conteúdo.
IEC TR 62933-2-200:2021	Não contém ensaios no seu conteúdo.
IEC 63110-1:2022	Não contém ensaios no seu conteúdo.
IEC 63119-1:2019	Não contém ensaios no seu conteúdo.
IEC 63119-2:2022	Não contém ensaios no seu conteúdo.
IEC 63281-1:2023	Aplicável a dispositivos de transporte pessoal elétrico.
IEC 63281-2-1:2024	Aplicável a dispositivos de transporte pessoal elétrico.
IEC 63281-3-1:2024	Aplicável a dispositivos de transporte pessoal elétrico.
IEC 63281-3-2:2024	Aplicável a dispositivos de transporte pessoal elétrico.
IEC SRD 63460:2025	Não contém ensaios no seu conteúdo.
IEC PAS 63472:2023	Não contém ensaios no seu conteúdo.
IEC 63584:2024	Não contém ensaios no seu conteúdo.

Fonte: Os autores.

Tabela B2. Normas Consideradas Aplicáveis na Pesquisa.

Norma	Sistema(s) Associado(s)	Abrangência
ISO 5474-1:2024	Recarga	Segurança / Desempenho / EMC
ISO 5474-2:2024	Recarga	Segurança / Desempenho / EMC
ISO 5474-3:2024	Recarga	Segurança / Desempenho / EMC
ISO/TS 5474-5:2024	Recarga	Segurança / Desempenho
ISO/PAS 5474-6:2025	Recarga	Segurança / Desempenho / EMC
ISO 6469-1:2019+Amd 1:2022	Armazenamento de energia	Segurança / Desempenho
ISO 6469-2:2022	Segurança operacional geral	Segurança
ISO 6469-3:2021	Segurança operacional geral	Segurança
ISO 6469-4:2015	Segurança operacional geral	Segurança
ISO 8714:2023	Veículo como um todo	Desempenho
ISO 8715:2001	Veículo como um todo	Desempenho
ISO 12405-4:2018	Armazenamento de energia	Desempenho
ISO/SAE 12906:2024	Veículo como um todo	Desempenho
ISO 15118-4:2018	Recarga	Desempenho
ISO 15118-5:2018	Recarga	Desempenho
ISO 15118-9:2022	Recarga	Desempenho
ABNT NBR 16567:2020	Veículo como um todo	Desempenho
ABNT NBR 17142:2023	Veículo como um todo	Desempenho
ISO 17409:2020	Recarga Conectores, plugues, tomadas e cabos	Segurança
ISO 18300:2016	Armazenamento de energia	Segurança / Desempenho
ISO 19363:2020	Recarga	Segurança / Desempenho / EMC
ISO 20762:2018	Veículo como um todo	Desempenho
ISO 21498-1:2021	Trem de força elétrico Armazenamento de energia Recarga	Desempenho
ISO 21498-2:2024	Trem de força elétrico Armazenamento de energia Recarga	Desempenho
ISO 21782-1:2023	Trem de força elétrico	Desempenho
ISO 21782-2:2019	Trem de força elétrico	Desempenho
ISO 21782-3:2019	Trem de força elétrico	Desempenho
ISO 21782-4:2021	Trem de força elétrico	Desempenho
ISO 21782-5:2021	Trem de força elétrico	Desempenho
ISO 21782-6:2019	Trem de força elétrico	Desempenho
ISO 21782-7:2021	Trem de força elétrico	Desempenho
ISO 23274-1:2019	Veículo como um todo	Desempenho
ISO 23274-2:2021	Veículo como um todo	Desempenho
ABNT NBR IEC 61851-1:2021	Recarga	Segurança / Desempenho
IEC 61851-1:2017+COR1:2023	Recarga	Segurança / Desempenho
IEC PAS 61851-1-1:2023	Recarga Conectores, plugues, tomadas e cabos	Segurança / Desempenho
IEC TS 61851-3-1:2023	Recarga	Segurança / Desempenho
IEC TS 61851-3-2:2023	Recarga	Segurança / Desempenho
ABNT NBR IEC 61851-21-1:2021	Recarga	EMC
IEC 61851-21-1:2017	Recarga	EMC
ABNT NBR IEC 61851-21-2:2021	Recarga	EMC
IEC 61851-21-2:2018	Recarga	EMC

Fonte: Os autores.

Tabela B2. Continuação.

Norma	Sistema(s) Associado(s)	Abrangência
ABNT NBR IEC 61851-23:2020	Recarga	Segurança / Desempenho / EMC
IEC 61851-23:2023	Recarga	Segurança / Desempenho / EMC
ABNT NBR IEC 61851-24:2021	Recarga	Segurança
IEC 61851-24:2023	Recarga	Segurança
IEC 61851-25:2020	Recarga	Segurança / Desempenho
ABNT NBR IEC 61980-1:2022	Recarga	Segurança / Desempenho / EMC
IEC 61980-1:2020	Recarga	Segurança / Desempenho / EMC
IEC 61980-2:2023	Recarga	Desempenho
IEC 61980-3:2022	Recarga	Segurança / Desempenho / EMC
IEC PAS 61980-5:2024	Recarga	Segurança / Desempenho / EMC
ABNT NBR IEC 62196-1:2021	Conectores, plugues, tomadas e cabos	Segurança / Desempenho
IEC 62196-1:2022	Conectores, plugues, tomadas e cabos	Segurança / Desempenho
ABNT NBR IEC 62196-2:2021	Conectores, plugues, tomadas e cabos	Segurança / Desempenho
IEC 62196-2:2022	Conectores, plugues, tomadas e cabos	Segurança / Desempenho
IEC 62196-3:2022	Conectores, plugues, tomadas e cabos	Segurança / Desempenho
IEC TS 62196-3-1:2020	Conectores, plugues, tomadas e cabos	Segurança / Desempenho
IEC TS 62196-4:2022	Conectores, plugues, tomadas e cabos	Segurança / Desempenho
IEC 62196-6:2022	Conectores, plugues, tomadas e cabos	Segurança / Desempenho
IEC 62576:2018	Armazenamento de energia	Segurança / Desempenho
ABNT NBR IEC 62660-1:2022	Armazenamento de energia	Desempenho
IEC 62660-1:2018	Armazenamento de energia	Desempenho
ABNT NBR IEC 62660-2:2022	Armazenamento de energia	Segurança / Desempenho
IEC 62660-2:2018	Armazenamento de energia	Segurança / Desempenho
IEC 62660-3:2022	Armazenamento de energia	Segurança
IEC 62752:2024	Recarga	Segurança / Desempenho / EMC
IEC 62840-2:2016	Recarga	Segurança / Desempenho / EMC
IEC PAS 62840-3:2021	Recarga	Segurança / Desempenho
IEC 62893-1:2017+AMD1:2020	Conectores, plugues, tomadas e cabos	Segurança / Desempenho
IEC 62893-2:2017	Conectores, plugues, tomadas e cabos	Segurança / Desempenho
IEC 62893-3:2017	Conectores, plugues, tomadas e cabos	Segurança / Desempenho
IEC 62893-4-1:2020	Conectores, plugues, tomadas e cabos	Segurança / Desempenho
IEC TS 62893-4-2:2021	Conectores, plugues, tomadas e cabos	Segurança / Desempenho
IEC PAS 63454:2022	Conectores, plugues, tomadas e cabos	Segurança / Desempenho

Fonte: Os autores.

2.3 Artigo 3

PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM DE SEGURANÇA FUNCIONAL PARA SUBSISTEMAS CRÍTICOS DE VEÍCULOS ELETRIFICADOS BASEADO EM RISCO E EVIDÊNCIA

THE BRAZILIAN PROGRAM FOR FUNCTIONAL SAFETY LABELING OF CRITICAL SUBSYSTEMS IN ELECTRIFIED VEHICLES: A FRAMEWORK BASED ON RISK AND EVIDENCE

Programa Brasileiro de Etiquetagem de Segurança Funcional para Subsistemas Críticos de Veículos Eletrificados Baseado em Risco e Evidência

Rodrigo Leão Mianes (rodrigo.mianes@ufrgs.br)
Afonso Reguly (reguly@ufrgs.br)
Carla Schwengber ten Caten (carla.caten@ufrgs.br)

Resumo: A ausência de informações padronizadas sobre segurança funcional limita a aceitação de veículos eletrificados (VE) no Brasil. Este estudo propõe um programa brasileiro voluntário de etiquetagem de segurança para VE, fundamentado em normas internacionais e adaptado ao contexto nacional. Os procedimentos do método integram: (i) análise comparativa de programas estrangeiros; (ii) modelagem de risco segundo a ISO 26262:2018 (*Road Vehicles – Functional Safety*); e (iii) classificação dos quatro subsistemas de alta tensão mais críticos — bateria, motor-inversor, sistema de recarga e cabos/conectores. Para cada subsistema realizou-se uma Análise de Perigos e Avaliação de Riscos (*Hazard Analysis and Risk Assessment*, HARA) com os parâmetros Severidade, Exposição e Controlabilidade, resultando em um Índice de Risco Relativo genérico (IRR_gen). A diferenciação entre modelos é obtida por meio do Índice de Confiabilidade Documental (ICD), que pondera o IRR_gen pela robustez da documentação técnica (Nota-Evidência). O resultado é comunicado ao consumidor por uma etiqueta física com cinco classes (1–5), integrada à Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) e vinculada a um código de resposta rápida (*Quick Response code*, QR code) para dados detalhados. A comparação internacional destacou a originalidade do índice integrado, e uma simulação com cem modelos demonstrou o poder discriminatório da escala. A proposta tem potencial para reduzir a desconfiança do consumidor, estimular inovações industriais e favorecer a harmonização regulatória, representando um avanço para a mobilidade elétrica no Brasil.
Palavras-chave: Mobilidade elétrica; Segurança veicular; Etiquetagem voluntária; Veículos eletrificados; Avaliação da conformidade.

Abstract: The lack of standardized information on functional safety is limiting the adoption of electrified vehicles (EVs) in Brazil. This study proposes a voluntary Brazilian safety labeling program for EVs, grounded in international standards and

adapted to the national context. The method's procedures integrate: (i) a comparative analysis of foreign programs; (ii) risk modeling based on ISO 26262:2018 (Road Vehicles – Functional Safety); and (iii) the classification of the four most critical high-voltage subsystems—battery, motor-inverter, charging system, and cables/connectors. For each subsystem, a Hazard Analysis and Risk Assessment (HARA) was conducted using the parameters of Severity, Exposure, and Controllability, resulting in a generic Relative Risk Index (IRR_gen). Model differentiation is achieved through the Document Reliability Index (ICD), which weights the IRR_gen by the robustness of technical documentation (Evidence Score). The result is communicated to consumers via a physical label with five classes (1–5), integrated with the National Energy Conservation Label (ENCE) and linked to a Quick Response (QR) code for detailed data. The international comparison highlighted the originality of the integrated index, and a simulation with 100 models demonstrated the scale's discriminatory power. The proposal has the potential to reduce consumer distrust, stimulate industrial innovation, and promote regulatory harmonization, representing an advancement for electric mobility in Brazil.
Keywords: Electric mobility; Vehicle safety; Voluntary labeling; Electrified vehicles; Conformity assessment.

1 Introdução

A indústria automobilística global passa por uma transformação estrutural impulsionada pela rápida adoção de veículos eletrificados (VE), incluindo tanto os veículos elétricos a bateria (*battery-electric vehicle*, BEV) quanto os híbridos plug-in (*plug-in hybrid-electric vehicle*, PHEV) [1]. Em 2012, apenas 120 mil unidades foram vendidas no mundo; já em 2024, as vendas globais consolidadas até dezembro ultrapassaram 17 milhões, representando cerca de 20% das vendas globais de veículos leves [2]. Essa tendência reflete avanços tecnológicos, políticas públicas de incentivo e maior conscientização ambiental, afetando países desenvolvidos e economias emergentes [3,4]. Nesse contexto, o presente estudo aborda as necessidades regulatórias comuns a mercados emergentes — tendo o Brasil como estudo de caso principal — e propõe diretrizes alinhadas às melhores práticas internacionais.

O impacto ambiental positivo dos VE é significativo em contextos com matriz elétrica limpa e uso intensivo, o que os torna vantajosos em termos de emissões de dióxido de carbono (*carbon dioxide*, CO_2) ao longo do ciclo de vida [5]. Além disso, as arquiteturas eletrificadas alteram o perfil de confiabilidade operacional dos veículos, aumentando a criticidade das falhas elétricas e eletrônicas e elevando o desafio de garantir a segurança funcional prevista na série de normas da Organização Internacional de Normalização (International Organization for Standardization, ISO) 26262:2018 — *Road Vehicles — Functional Safety* [6]. Nos BEV, a redução da complexidade mecânica elimina componentes como turbocompressores e sistemas de injeção. Nos PHEV, a combinação de sistemas convencionais e de alta tensão eleva a complexidade global. Em ambos os casos, falhas passam a ocorrer mais frequentemente em sistemas eletrônicos e baseados em software, como os sistemas de gerenciamento de bateria (*Battery Management System*, BMS) e inversores de tração [5,7].

A confiança do público nos VE também depende da segurança dos seus componentes de alta tensão; esse receio soma-se às barreiras de autonomia, custo inicial e disponibilidade de infraestrutura de recarga [3,8–10]. Neste contexto, a segurança funcional — definida pela ISO 26262-1:2018 [11] como a capacidade dos sistemas elétricos e eletrônicos de manter funcionamento seguro mesmo diante de falhas previsíveis — torna-se parâmetro essencial de comparação. Embora existam normas internacionais relevantes, como a IEC 62660-1:2018 [12] e a ISO 6469-3:2021 [13], elas permanecem estritamente voluntárias na ausência de regulamentação nacional específica [14] — quadro que ainda vigora em países como o Brasil e dificulta a comparação objetiva entre os modelos disponíveis no mercado.

Nesse contexto, o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBE-V), iniciado em 2009, já fornece informações comparativas sobre consumo energético e emissões de CO_2. Sua ampliação para incluir modelos híbridos e elétricos demonstra a capacidade institucional de adaptação a novas tecnologias [15]. Entretanto, falta ao mercado do País um instrumento que comunique ao consumidor, de forma padronizada, o nível de segurança funcional de subsistemas de alta tensão.

Para suprir essa lacuna, desenvolveu-se um método independente para avaliar a segurança funcional de quatro subsistemas de alta tensão de VE, com base em

normas técnicas internacionais e adaptada ao contexto técnico e regulatório brasileiro. A proposta prevê o desenvolvimento de um modelo conceitual de classificação por risco funcional presumido — risco inferido para cada subsistema a partir dos parâmetros de Severidade, Exposição e Controlabilidade descritos na ISO 26262-3:2018 [16], sem exigir o acesso a dados proprietários de projeto —, apoiado em evidências técnicas geradas por laboratórios de terceira parte, conforme boas práticas internacionais de avaliação da conformidade [17]. Trata-se de uma abordagem diferente da homologação tradicional, focada na verificação de produtos já fabricados e adquiridos por montadoras, mas voltada à rotulagem de veículos novos, com ênfase em facilidade de acesso à informação, comparabilidade e transparência ao consumidor.

Diferentemente dos Programas de Avaliação de Carros Novos (*New Car Assessment Program*, NCAP), que se concentram na proteção estrutural em colisões e, mais recentemente, em sistemas avançados de assistência ao condutor [18], a presente proposta foca na segurança funcional dos subsistemas de alta tensão dos VE. Ao consolidar, em uma única etiqueta física, um índice agregado de segurança baseado na série ISO 26262:2018 [6], complementado pela robustez da documentação apresentada para cada subsistema, o programa preenche a lacuna identificada nas principais iniciativas internacionais: nenhuma delas comunica ao consumidor, de forma comparável e padronizada, a criticidade relativa de baterias, inversores, sistemas de recarga e cabos de alta tensão. Essa abordagem voluntária, alinhada à infraestrutura de avaliação da conformidade do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), busca elevar a transparência sobre riscos elétricos, estimular melhorias tecnológicas e harmonizar o mercado brasileiro às melhores práticas globais, atuando como complemento eficiente — e não concorrente — às notas de segurança veicular já fornecidas pelos NCAP regionais.

2 Materiais e métodos

Este estudo adotou uma abordagem de pesquisa integrada, composta por: (i) uma análise qualitativa e exploratória de programas internacionais de etiquetagem veicular, cujo objetivo foi identificar boas práticas de governança e comunicação; e (ii) uma modelagem normativa de risco funcional, baseada em procedimentos quantitativos fundamentados na série de normas ISO 26262:2018 [6], sobre a qual foi

sustentada a classificação proposta. Essa integração busca assegurar tanto profundidade analítica quanto reprodutibilidade dos resultados.

Os procedimentos do método foram estruturados em quatro etapas principais, detalhadas nas Seções 2.1 a 2.4. A primeira envolve a análise comparativa de programas internacionais de etiquetagem veicular que comunicam atributos técnicos relevantes ao consumidor. A segunda compreende a construção de uma Análise de Perigos e Avaliação de Riscos (*Hazard Analysis and Risk Assessment*, HARA) genérica de referência, baseada na série ISO 26262:2018 [6], para atribuição de riscos funcionais presumidos aos principais subsistemas eletrificados, considerando Severidade, Exposição e Controlabilidade. A terceira etapa trata da proposição da estrutura gráfica e informacional da etiqueta de segurança, adaptada a VE e alinhada às melhores práticas de comunicação visual. Por fim, a quarta etapa refere-se à definição do protocolo de classificação e do modelo de adesão voluntária.

2.1 Análise de Programas Internacionais de Etiquetagem Veicular

A primeira etapa consistiu no mapeamento de 14 iniciativas de rotulagem veicular com documentação pública disponível (em inglês, espanhol ou português), consultadas entre 1º de março e 30 de junho de 2025, data-corte adotada para este estudo. Foram aplicados três critérios de inclusão: (i) a aplicabilidade direta ao setor automotivo, compreendida como a avaliação de automóveis de passeio ou veículos leves; (ii) a disponibilidade pública dos métodos, entendida como a existência de protocolo técnico completo, gratuito e acessível online, que permita a reprodução das etapas de ensaio e classificação; e (iii) o reconhecimento institucional, caracterizado pelo endosso formal de governos, organismos técnicos independentes ou consórcios regulatórios de âmbito nacional ou internacional.

Foram examinados três grupos de portais: (a) portais regulatórios — Comissão Econômica das Nações Unidas para a Europa (*United Nations Economic Commission for Europe*, UNECE), Administração Nacional de Segurança no Trânsito nas Rodovias (*National Highway Traffic Safety Administration*, NHTSA) e Ministério das Terras, Infraestrutura e Transportes da Coreia do Sul (*Ministry of Land, Infrastructure and Transport*, MOLIT); (b) portais institucionais — Centro de Pesquisa e Tecnologia Automotiva da China (*China Automotive Technology and Research Center*, CATARC), Instituto Coreano de Testes e Pesquisa Automotiva (*Korea Automobile Testing &*

Research Institute, KATRI) e Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro); (c) portais de Programas de Avaliação de Carros Novos (NCAP) — Programa Global de Avaliação de Carros Novos (*Global New Car Assessment Programme*, Global NCAP), Programa Europeu de Avaliação de Carros Novos (*European New Car Assessment Programme*, Euro NCAP) e Programa Latino-Americano de Avaliação de Carros Novos (*Latin New Car Assessment Programme*, Latin NCAP).

Foram igualmente examinadas as bases bibliográficas Scopus e Web of Science, utilizando a string de busca: ("*vehicle label*" OR ("*rating program*" AND (*vehicle* OR *automotive* OR *vehic**))) AND (*safety* OR *efficiency*). Consideraram-se elegíveis documentos redigidos em inglês, espanhol ou português. A triagem resultou em 37 registros iniciais, dos quais 14 protocolos completos atenderam aos critérios; não foram identificados programas adicionais até a data-corte, indicando saturação temática da amostra.

Seis iniciativas foram excluídas por não atenderem simultaneamente aos critérios de aplicabilidade setorial, transparência do protocolo e reconhecimento institucional: (i) Programa Indiano de Avaliação de Carros Novos (*Bharat New Car Assessment Program*, Bharat NCAP) — portal oficial indisponível; (ii) Programa Japonês de Avaliação de Carros Novos (*Japan New Car Assessment Program*, JNCAP) — documentação legalmente válida disponível apenas em japonês; (iii) Programa Russo Auto Review de Avaliação de Carros (*Auto Review Car Assessment Program*, ARCAP) / Programa Russo de Avaliação de Carros Novos (*Russian New Car Assessment Program*, RuNCAP) — ausência de protocolo técnico público; (iv) Instituto de Seguros para Segurança nas Estradas (*Insurance Institute for Highway Safety*, IIHS) — não dispõe de sistema padronizado de rotulagem física; (v) *SmartWay*, da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*U.S. Environmental Protection Agency*, EPA) — voltado exclusivamente a veículos pesados; e (vi) Regulamento UE 2019/1242/VECTO — igualmente restrito a veículos pesados. Apesar dessas exclusões, análises secundárias indicam que tais programas seguem lógicas classificatórias semelhantes às iniciativas incluídas, de modo que sua ausência não compromete os eixos conceituais — classificação, evidência e comunicação — adotados neste estudo.

Restaram, assim, oito programas internacionais: NHTSA NCAP [19–21] e EPA/DOE *Fuel Economy & Environment Label* [22–27] (EUA), C-NCAP [28–32] (China), K-NCAP [33–40] (Coreia do Sul), Euro NCAP [41–50] e Green NCAP [51–61] (Europa), Latin NCAP [62–78] (América Latina) e PBE-V [15,79–86] (Brasil). Embora os programas EPA/DOE, Green NCAP e PBE-V tenham como foco principal a eficiência energética e os impactos ambientais, foram mantidos na amostra em razão de suas boas práticas de governança, transparência de dados e design comunicacional — aspectos considerados relevantes para a construção da etiqueta de segurança aqui proposta. Todos os programas analisados, responsáveis por mais de 95% das vendas globais de VE em 2024 [2], comunicam atributos técnicos ligados à segurança, desempenho ou confiabilidade dos veículos e abrangem América do Norte, Europa, Ásia-Pacífico e América Latina. Essa diversidade garante uma base institucional e geográfica suficientemente ampla para extrair boas práticas comparativas, ainda que sem pretensão de exaustividade global. Para cada programa, obteve-se o protocolo mais recente diretamente do respectivo portal oficial, registrando-se versão e data de acesso a fim de assegurar informações atualizadas. Reconhece-se, contudo, a assimetria geográfica resultante da indisponibilidade de protocolos públicos na África e no Oriente Médio, prevendo-se sua inclusão futura quando houver disponibilidade pública.

A análise baseou-se no exame sistemático de documentos técnicos, manuais de referência e publicações especializadas, considerando critérios de classificação, parâmetros avaliados e formatos de comunicação utilizados. Foram comparados elementos como a lógica de classificação (faixas, estrelas ou índices), os parâmetros técnicos abordados e os mecanismos de avaliação da conformidade. Os dados coletados subsidiaram as decisões do método adotadas nas etapas subsequentes, incluindo a construção da HARA genérica, a definição do algoritmo de classificação baseado na robustez da evidência apresentada e o desenho da etiqueta proposta. Os resultados do levantamento internacional subsidiaram três pilares do método proposto: a estrutura de classificação, a hierarquia de evidências e as estratégias de comunicação (detalhados na Seção 3.1).

2.2 Análise de Riscos Operacionais em Subsistemas Críticos

Esta etapa do estudo estabelece um critério técnico sistematizado para a classificação do risco funcional dos principais subsistemas de VE, com base em suas características operacionais e nos perigos associados a falhas plausíveis. A análise é fundamentada nos princípios da série de normas ISO 26262:2018 [6], com ênfase na Parte 3 (Fase de Conceito), segundo o método HARA [16].

2.2.1 Escopo dos Subsistemas e HARA Genérica

Nesta etapa conceitual da proposta, foram considerados quatro subsistemas de alta tensão: bateria, motor-inversor, sistema de recarga e cabos e conectores. Esses subsistemas foram selecionados por apresentarem tensão nominal superior a 60V DC e alta densidade ou fluxo de energia, critérios estabelecidos pela ISO 6469-3:2021 [13] para categorização de riscos elétricos. Além disso, concentram os requisitos fundamentais de segurança funcional estabelecidos nas principais normas técnicas aplicáveis à eletromobilidade. Entre essas normas, destacam-se: a IEC 62660-1:2018 [12], voltada à avaliação de desempenho de células de íon-lítio; a IEC 62660-2:2018 [87], que abrange ensaios de durabilidade e resistência a abusos mecânicos, térmicos e elétricos; a IEC 61851-1:2017 [88], com requisitos para sistemas de recarga condutivos; a IEC 61851-23:2023 [89], que define diretrizes para estações de recarga em corrente contínua; e a IEC 62196-3:2022 [90], responsável pela padronização de conectores AC e/ou DC. A escolha dessa taxonomia também se alinha a resultados preliminares de um estudo complementar em andamento, conduzido pelos autores (dados ainda não publicados).

Componentes auxiliares de alta tensão, como conversores CC-CC, o sistema de climatização elétrica (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*, HVAC) e os módulos lógicos do BMS são modelados neste estudo como elementos internos dos quatro itens de referência. Nessa abordagem, eventuais falhas nesses componentes são representadas como cenários de falha dos subsistemas aos quais estão funcionalmente integrados — por exemplo, falhas do BMS são alocadas no item bateria — evitando duplicidade de contagem e assegurando a plena representação do risco. Em consonância com a definição de item da ISO 26262-1:2018 [11], cada um dos quatro subsistemas é deliberadamente delimitado como item funcional

autônomo para fins de análise, o que permite sua avaliação isolada em relação à arquitetura veicular e garante compatibilidade com análises pós-homologação.

A aplicação da HARA genérica ocorre fora do ciclo de desenvolvimento tradicional previsto na série ISO 26262:2018 [6]. De acordo com a Cláusula 6.4.5 da ISO 26262-2:2018 [91], atividades do ciclo de segurança podem ser modificadas ou omitidas, desde que tecnicamente justificadas e devidamente documentadas. Neste estudo, preservam-se as etapas essenciais para a inferência do risco funcional, ou seja, a análise de perigos, a classificação dos parâmetros de Severidade, Exposição e Controlabilidade (S-E-C), a definição do Nível de Integridade de Segurança Automotiva (*Automotive Safety Integrity Level*, ASIL) e a verificação por evidência técnica. Por outro lado, foram suprimidas as atividades vinculadas ao desenvolvimento do sistema — como a definição de requisitos, simulações de falha e validação da arquitetura — por não serem aplicáveis em avaliações pós-homologação. Os cenários de falha descritos, por sua vez, representam os contextos de risco mais críticos entre aqueles efetivamente analisados; não pretendem esgotar todas as combinações possíveis. Conforme novas evidências de campo, ensaios laboratoriais ou contribuições de especialistas sejam incorporadas, o escopo da HARA poderá ser ampliado e os parâmetros S-E-C refinados, mantendo-se a rastreabilidade normativa e a atualização contínua da classificação de risco.

2.2.2 Derivação do Índice de Risco Relativo Genérico (IRR_gen)

Para cada um dos quatro subsistemas delimitados, foi elaborada uma HARA genérica de referência, combinando os parâmetros de Severidade (S), Exposição (E) e Controlabilidade (C), conforme estabelecido pela norma ISO 26262-3:2018 [16]. Entre os diversos cenários analisados, escolheu-se aquele que resulta no nível ASIL mais elevado identificado, de modo a assegurar que o índice represente o contexto funcional mais crítico entre os analisados. A lógica detalhada das Análises de Árvore de Falhas (*Fault Tree Analysis* , FTA) está disponível nos Apêndices A a D. A inclusão de valores quantitativos dependerá da coleta de dados de campo em versões futuras.

O nível ASIL genérico atribuído a cada subsistema— QM (Gestão da Qualidade, *Quality Management*), A, B, C ou D — é então convertido em um valor numérico para fins de atribuição operacional, segundo a correspondência linear QM =

0,5; A = 1; B = 2; C = 3; D = 4. A atribuição de valor 0,5 ao nível QM preserva a ordem hierárquica entre os níveis (isto é, A > QM) e garante que subsistemas classificados como QM — ou seja, que não requerem metas formais de segurança funcional segundo a série ISO 26262:2018 [6] — ainda contribuam, mesmo que minimamente, para as etapas subsequentes do protocolo.

Essa linearização tem caráter exclusivamente operacional, permitindo a conversão da escala ordinal da norma em uma métrica numérica contínua. Não se assume, com isso, que os intervalos entre os níveis ASIL sejam equidistantes; a intenção é apenas assegurar que valores mais elevados representem maior criticidade funcional, em conformidade com as advertências da literatura especializada sobre o uso de aritmética em escalas ordinais [92]. A adoção provisória de valores equidistantes segue práticas consolidadas em engenharia de segurança, como o Número de Prioridade de Risco (*Risk Priority Number*, RPN) da IEC 60812:2018 [93], que converte três escalas ordinais em um índice numérico para priorização de ações. Reconhece-se, contudo, que operar aritmeticamente sobre dados ordinais é conceitualmente controverso [92]. Com vistas a verificar a robustez dessa simplificação, foi conduzida uma análise preliminar de sensibilidade — descrita na Seção 2.2.5 e cujos resultados são apresentados na Seção 3.2.6 — na qual foram comparadas funções linear, exponencial e logarítmica. A conversão adotada será reavaliada por meio de validação empírica durante a fase-piloto e de consulta a painel Delphi (Seção 2.4.2); ajustes iterativos ou eventual substituição por métodos não-paramétricos — como *lookup-tables* baseadas em percentis ou rankings ordinais — poderão ser implementados caso consenso técnico ou evidências de campo recomendem uma representação alternativa das escalas. Essa abordagem busca assegurar equilíbrio entre simplificação operacional e representatividade funcional dos riscos atribuídos.

O valor resultante para cada subsistema, denominado Índice de Risco Relativo genérico (IRR_gen), representa uma medida numérica padronizada da criticidade funcional. Esse índice sintetiza o cenário de maior criticidade observado, em termos de Severidade, Exposição e Controlabilidade, e será utilizado como entrada para o cálculo do Índice de Confiabilidade Documental (ICD), detalhado na Seção 2.2.3.

2.2.3 Cálculo do ICD em Função da Evidência Técnica Apresentada

Uma vez atribuído o IRR_gen a cada subsistema, é calculado o ICD, que combina o risco funcional presumido com a robustez da documentação técnica apresentada pelo proponente. Para esse fim, adota-se a NE, uma escala graduada de 0 a 9. Organismos de avaliação da conformidade acreditados por organismos de acreditação que atendem à ISO/IEC 17011:2017 [94], apresentam maior grau de confiabilidade [95,96]. A NE = 9 é atribuída quando o subsistema apresenta certificação emitida por organismo de avaliação da conformidade acreditado segundo a ISO/IEC 17065:2012 [97], assegurando elevado grau de confiabilidade, com verificação independente. A NE = 7 corresponde a relatórios de ensaio elaborados por laboratórios de terceira parte acreditados conforme a ISO/IEC 17025:2017 [98], com respaldo técnico relevante, ainda que limitado ao escopo do ensaio. Já a NE = 5 refere-se a relatórios internos com rastreabilidade completa e método explícito. Evidências analíticas recebem NE = 3, desde que demonstrem a não criticidade funcional do subsistema e incluam, ao menos: a descrição completa do método de ensaio ou modelagem, a rastreabilidade da amostra (com código de peça, lote e data), o registro dos instrumentos utilizados com respectivas calibrações, quando aplicável, e a assinatura do responsável técnico. Quando a evidência não atende a esses critérios mínimos, ou está ausente, atribui-se NE = 0, representando a penalidade máxima. Os detalhes sobre rastreabilidade documental e o processo de auditoria de verificação das evidências analíticas encontram-se descritos na Seção 2.4.4, que estabelece as condições para auditorias direcionadas e possíveis reensaios.

A escala adota intervalos regulares de dois pontos entre os níveis 9, 7, 5 e 3, enquanto a passagem de 3 para 0 implica uma penalidade abrupta. Essa transição representa um corte conceitual deliberado, pois NE = 3 já constitui o limiar inferior de aceitabilidade técnica para a classificação funcional. A granularidade da escala poderá ser reavaliada durante fase-piloto, com base em dados empíricos e em contribuições técnicas de especialistas. O valor do ICD para cada subsistema é calculado conforme a Equação 1, sendo a aplicação prática desse procedimento detalhada na Seção 3.2.5:

$$ICD = IRR_gen * (1 – NE/10), \quad (1)$$

2.2.4 Cálculo do Índice Global (ICD_total) do Veículo e Mapeamento para a Etiqueta

Com os valores de ICD atribuídos aos quatro subsistemas, o índice global do veículo é calculado por meio da soma direta desses índices, conforme a Equação 2:

$$ICD_total = ICD_bateria + ICD_motor\text{-}inversor + ICD_recarga + ICD_cabos_conectores \quad (2)$$

Cada subsistema pode apresentar valores entre 0 (risco totalmente mitigado) e 4 (risco genérico sem evidência técnica), o que define um intervalo teórico de ICD_total entre 0 e 16. Os valores efetivos de IRR_gen atribuídos a cada subsistema, bem como os limites práticos do ICD_total observados na aplicação do protocolo, são apresentados e discutidos na Seção 3.2.5, juntamente com o detalhamento da distribuição entre as classes propostas. Caso versões futuras do protocolo incluam ou removam subsistemas críticos, esse limite inferior poderá ser ajustado proporcionalmente, de modo a garantir que o risco residual nunca seja completamente anulado.

Nesta versão conceitual, o ICD_total é convertido em cinco classes numéricas de segurança funcional (1–5), obtidas pela divisão uniforme do intervalo efetivo observado; seus limites provisórios preservam o poder discriminatório e serão recalibrados ao fim da fase-piloto, com regras para valores extremos e revisões periódicas que garantam a comparabilidade entre ciclos. O número resultante será apresentado na etiqueta como barra cromática e símbolo numérico (1-5), cujo layout será validado na fase-piloto quanto à inteligibilidade, padronização visual e eficácia de comunicação. Um código de resposta rápida (*Quick Response code*, QR code) permitirá o acesso ao detalhamento dos subsistemas e Notas-Evidência, promovendo transparência e rastreabilidade.

Embora, para fins de cálculo, os quatro subsistemas sejam tratados como unidades funcionais autônomas, reconhece-se que falhas combinadas podem ocorrer, como um curto-circuito em chicotes de alta tensão que atinja simultaneamente bateria e inversor. Nesta versão inicial adota-se, por simplificação, a hipótese de independência estatística entre os subsistemas. A plausibilidade dessa hipótese será verificada durante a fase-piloto por meio de análise de sensibilidade a correlações entre pares de subsistemas e por investigação de causas comuns em registros de

campo. Caso se verifiquem correlações relevantes, o modelo poderá ser complementado por métodos já consagrados na literatura técnica e na própria série ISO 26262:2018 [6] – por exemplo, introdução de eventos de causa comum ou aplicação de coeficientes de acoplamento em cenários específicos de falhas sistêmicas – proporcionando maior aderência à realidade operacional dos VE.

2.2.5 Análise de Sensibilidade do Algoritmo ICD

Para verificar a robustez e a adequação da função de ajuste adotada para o cálculo do ICD (Equação 1), planejou-se uma análise de sensibilidade considerando diferentes cenários de variação da Nota-Evidência (NE).

Três funções de ajuste foram comparadas: (i) linear (Equação 1, já apresentada); (ii) exponencial (Equação 3); e (iii) logarítmica (Equação 4). Os parâmetros α e β foram fixados por calibração de dois pontos de ancoragem: (i) NE = 0, que não deve reduzir o risco genérico; e (ii) NE = 9, que deve limitar o risco residual a 10 % do valor original. Resolvendo as expressões de ajuste, obtêm-se $\alpha = \ln 10 / 9 \approx 0{,}25$ para a função exponencial e $\beta \approx 0{,}85$ para a logarítmica. Esses valores asseguram que a curva respeite os extremos desejados, assegurando a monotonicidade da relação (isto é, ausência de inversões no comportamento da função) e a transparência do procedimento de cálculo, até que dados empíricos da fase-piloto permitam refinamento estatístico.

$$ICD_exp = IRR_gen * \exp(-0{,}25 * NE) \quad (3)$$

$$ICD_log = IRR_gen * [1 - \ln(1 + 0{,}85 * NE) / \ln(1 + 0{,}85 * 9)] \quad (4)$$

Embora as três funções tenham sido analisadas quanto à robustez e aderência teórica, para efeito de aplicação nesta versão conceitual do protocolo, adotou-se provisoriamente a função linear para todos os cálculos, exemplos e simulações apresentados. Essa escolha fundamenta-se na simplicidade operacional, transparência do modelo e facilidade de implementação, critérios já consolidados em avaliações de risco em engenharia.

Os cenários simulados compreenderam: a variação uniforme dos valores de NE (0, 3, 5, 7, 9) aplicados igualmente aos quatro subsistemas; combinações realistas, em que diferentes valores de NE foram atribuídos entre os subsistemas; e a avaliação

dos limites teóricos mínimos e máximos do protocolo. Os resultados quantitativos dessas simulações, incluindo tabelas, gráficos e análises interpretativas, são apresentados na Seção 3.2.6.

2.2.6 Fluxo do Protocolo de Classificação

O procedimento de classificação do risco funcional adotado neste estudo foi estruturado em quatro etapas conceituais, formuladas para garantir coerência normativa, reprodutibilidade técnica e viabilidade prática em contextos de avaliação pós-homologação.

A primeira etapa consiste na definição dos itens funcionais, com a delimitação técnica e a descrição operacional dos quatro subsistemas críticos dos VE, conforme descrito na Seção 2.2.1. Na etapa seguinte, procede-se à identificação de cenários típicos de falha, combinando dados técnicos, registros de campo e literatura especializada, priorizando situações plausíveis que possam gerar eventos perigosos. Para cada subsistema foi elaborada uma FTA qualitativa, em conformidade com a IEC 61025:2006 [99]. As árvores de falhas foram verificadas por um coautor que não participou da sua modelagem inicial e validada por consenso entre todos os autores—engenheiros com mais de dez anos de experiência em confiabilidade de sistemas. Os Apêndices A a D incluem a representação gráfica da FTA, a descrição textual dos eventos e a Tabela de Conjuntos de Corte Mínimos (*Minimal Cut Set*, MCS). Devido à indisponibilidade, no momento, de estatísticas de campo representativas, esta versão segue estritamente qualitativa, conforme permitido pela IEC 61025:2006 [99]. A quantificação probabilística e a verificação de independência estatística serão realizadas na fase-piloto (Seção 2.4.2).

Na terceira etapa, procede-se à classificação dos parâmetros S–E–C, com a atribuição de níveis de Severidade (S0–S3), Exposição (E0–E4) e Controlabilidade (C0–C3), conforme as tabelas da ISO 26262-3:2018 [16]. Para cada subsistema avaliam-se todos os cenários de falha identificados e seleciona-se aquele que conduz ao nível ASIL mais elevado segundo a matriz qualitativa S-E-C prevista pela norma; ou seja, considera-se como cenário mais crítico aquele cuja combinação (S-E-C) resulta no ASIL mais elevado dentro do conjunto de hipóteses avaliadas. Por fim, o valor ASIL obtido é então convertido em um índice numérico denominado IRR_gen,

por meio de um mapeamento linear. Esse índice é posteriormente utilizado para o cálculo do ICD, com base na NE atribuída à documentação técnica apresentada, conforme descrito na Seção 2.2.3. A aplicação da Equação 1 gera os valores do ICD, que são somados para o cálculo do ICD_total do veículo, utilizado na classificação final, conforme definido na Seção 2.2.4.

Para assegurar a rastreabilidade entre a HARA genérica e as evidências apresentadas, o proponente deverá incluir no dossiê de segurança uma matriz de rastreabilidade, estabelecida conforme a ISO 26262-8:2018 [100], item 6.4.3. Essa matriz vincula, para cada perigo listado na HARA genérica, o requisito derivado, a medida de segurança implementada e a respectiva evidência de mitigação. Adicionalmente, durante auditorias realizadas por organismos de terceira parte, será verificada a consistência entre os perigos identificados, as medidas de segurança implementadas e os documentos apresentados.

2.2.7 Justificativa da Abordagem

A adoção de um modelo baseado em riscos funcionais presumidos, estruturado a partir de uma HARA genérica de referência, representa um avanço do método em relação às tradicionais matrizes de risco, que consideram apenas os parâmetros de probabilidade e severidade. Ao incorporar explicitamente o critério de controlabilidade — conforme estabelecido na ISO 26262-3:2018 [16] — o modelo proposto permite avaliar não apenas a gravidade dos eventos perigosos e sua frequência estimada, mas também a capacidade de mitigação por parte do condutor, dos ocupantes ou de terceiros usuários da via. Os produtos resultantes — notadamente a matriz de riscos genérica, os níveis ASIL atribuídos e os respectivos valores de IRR_gen — constituem a base técnica primária para a classificação de segurança funcional e para a estruturação da etiqueta proposta.

2.3 Proposição da Estrutura da Etiqueta de Segurança

Com base nos riscos funcionais presumidos atribuídos aos subsistemas críticos dos VE, esta etapa concentrou-se na elaboração da estrutura da etiqueta de segurança funcional. O objetivo é conciliar critérios técnicos, derivados da análise sistematizada de risco, com estratégias acessíveis de comunicação, de modo a

traduzir informações complexas em um formato visual claro, comparável e compreensível ao consumidor.

O ICD_total de cada veículo, conforme a classificação estabelecida na Seção 2.2.4, é representado visualmente por uma barra cromática associada a um número de classe (1 a 5). Dessa forma, mantém-se coerência com modelos amplamente reconhecidos de comunicação de risco técnico, ao mesmo tempo em que se favorece a aceitação e o reconhecimento imediato da nova etiqueta pelo consumidor final. Embora graficamente espaçadas de forma uniforme, as faixas representam níveis ordinais de risco funcional; portanto, o salto percebido entre categorias não deve ser interpretado como variação linear ou proporcional da severidade. Para assegurar acessibilidade plena, cada faixa incluirá, além da cor correspondente, o número da classe em alto contraste, de forma que o nível de segurança seja identificado mesmo por pessoas com deficiência de percepção cromática.

Para viabilizar a adoção industrial e evitar a multiplicação de rótulos no veículo, o módulo de segurança funcional será impresso no mesmo substrato vinílico autoadesivo da ENCE/PBE-V, formando uma etiqueta composta. O layout preserva o bloco original de eficiência energética e acrescenta, à direita, uma coluna de 25 mm de largura, contendo uma barra cromática segmentada por classe (1 a 5), o número correspondente e o QR code.

Para evitar sobreposição de escopos, essa nova coluna será identificada no cabeçalho como “Segurança Elétrica”, deixando claro que a classificação se refere exclusivamente aos subsistemas de alta tensão. A proposta busca, assim, consolidar uma ferramenta técnica confiável e eficaz na comunicação, capaz de apoiar decisões de compra e fomentar uma cultura de segurança funcional no mercado de VE.O rótulo complementa, sem substituir, as avaliações de resistência a colisões já divulgadas por programas como os NCAP, que permanecem responsáveis pela comunicação dos aspectos estruturais da segurança veicular.

2.4 Protocolo de Classificação e Modelo de Adesão Voluntária

Esta seção apresenta o protocolo de classificação e os procedimentos propostos para adesão voluntária ao programa de etiquetagem de segurança funcional. O procedimento foi desenvolvido a partir de um modelo previamente

elaborado pelos autores para programas voluntários de avaliação da conformidade, atualmente em fase de publicação. A proposta aqui apresentada busca alinhar iniciativas setoriais à nova arquitetura regulatória brasileira, incorporando princípios da infraestrutura internacional da qualidade e mantendo coerência com as práticas reconhecidas por organismos multilaterais.

2.4.1 Processo de Adesão e Submissão de Evidências

A adesão ao programa é voluntária e pode ser iniciada por fabricantes, importadores ou demais agentes econômicos interessados. O processo envolve a submissão de evidências técnicas que permitam reclassificar ou confirmar o risco funcional presumido originalmente atribuído a cada subsistema. Cada tipo de evidência técnica é associado a uma NE, conforme os critérios descritos na Seção 2.2.3.

2.4.2 Validação e Fase-Piloto

Após a conclusão da fase conceitual, o protocolo será submetido a um processo de validação composto por dois estágios complementares. O primeiro estágio corresponde à realização de um painel Delphi, estruturado com base no método Processo Analítico Hierárquico (*Analytic Hierarchy Process*, AHP), e contará com a participação de especialistas vinculados ao Inmetro, à indústria automotiva, a laboratórios acreditados, a organismos de certificação, a universidades e a entidades de defesa do consumidor. O painel será composto por, no mínimo, doze especialistas distribuídos de forma equilibrada entre os segmentos representados.

Os participantes deverão avaliar diferentes aspectos estruturantes do modelo proposto. No plano técnico-funcional, será examinada a adequação dos cenários de falha selecionados, a consistência com a ISO 26262-5:2018 [101] quanto à possibilidade futura de empregar taxas genéricas de confiabilidade (IEC 61709:2017 [102]) e aos critérios para substituí-las por dados de campo, a coerência das classificações S-E-C atribuídas aos subsistemas e a pertinência da adoção do maior nível ASIL como representativo do risco funcional de cada item. No plano matemático-inferencial, serão analisadas a validade da linearização da escala ordinal ASIL, a consistência da função de ajuste (1 – NE/10) e a robustez do critério de soma direta dos ICD para cálculo do ICD_total. Por fim, será avaliada a plausibilidade da hipótese

de independência estatística entre os subsistemas, bem como a lógica de distribuição da escala classificatória (limites entre as classes 1–5). Caso algum desses itens permaneça com grau de concordância inferior a 75% ao final da terceira rodada, será realizado uma reunião virtual de consolidação, na qual as alternativas serão votadas por maioria simples. O resultado dessa votação será considerado decisão final do painel.

O segundo estágio refere-se à fase-piloto, que terá duração de 12 meses e envolverá a aplicação do protocolo em, no mínimo, vinte modelos de VE, ou em um conjunto correspondente a 10% dos modelos BEV e PHEV licenciados no ano-base anterior, prevalecendo o maior valor. A amostragem deverá incluir, sempre que possível, veículos de diferentes categorias de mercado, como hatch, sedan, utilitário esportivo (*Sport Utility Vehicle*, SUV) ou utilitário, de forma a assegurar diversidade tecnológica mínima para o ajuste da escala 1–5.

2.4.3 Reconhecimento Internacional e Evidências Estrangeiras

Durante o primeiro ano de implementação do programa, enquanto se consolida o mapeamento da infraestrutura nacional de ensaios, serão aceitos, em caráter provisório, relatórios de ensaio e certificados emitidos por organismos estrangeiros que mantenham acordo com o Inmetro, no âmbito do Acordo de Reconhecimento Mútuo da Cooperação Internacional de Acreditação de Laboratórios (*International Laboratory Accreditation Cooperation Mutual Recognition Arrangement*, ILAC-MRA) ou do Acordo Multilateral do Fórum Internacional de Acreditação (*International Accreditation Forum Multilateral Recognition Arrangement*, IAF-MLA). A aceitação desses documentos estará condicionada à apresentação de uma declaração formal de equivalência técnica, emitida pelo próprio laboratório ou organismo de certificação responsável.

Essa declaração deverá demonstrar que os procedimentos adotados, incluindo as normas de ensaio, as condições ambientais, os critérios de amostragem e os métodos de avaliação, são tecnicamente compatíveis com os requisitos estabelecidos no protocolo brasileiro. Com isso, busca-se assegurar rastreabilidade internacional, comparabilidade entre evidências nacionais e estrangeiras, e preservação do rigor do

método do protocolo, permitindo que o programa opere de forma imediata mesmo antes da consolidação plena da capacidade laboratorial nacional.

2.4.4 Rastreabilidade e Controle de Confiabilidade

Os documentos apresentados para fins de cálculo do ICD deverão atender a requisitos mínimos de rastreabilidade, conforme a natureza da evidência submetida. No caso de certificações emitidas por organismos acreditados segundo a ISO/IEC 17065:2012 [97] (NE = 9), presume-se a rastreabilidade do subsistema no âmbito do próprio processo de certificação. Para relatórios de ensaio elaborados por laboratórios de terceira parte acreditados conforme a ISO/IEC 17025:2017 [98] (NE = 7), o documento deve declarar explicitamente que a amostra foi recebida sem intervenções pós-produção e incluir a identificação da peça, o número do lote e a data de fabricação, conforme os requisitos da Seção 7.4 da referida norma. Para relatórios técnicos internos (NE = 5) ou estudos analíticos (NE = 3), aplica-se o conjunto de requisitos descrito na Seção 2.2.3. Em todos os casos, os documentos devem estar vinculados à matriz de rastreabilidade descrita na Seção 2.2.6. Durante auditorias conduzidas por organismos de terceira parte, a entidade gestora poderá exigir novos ensaios com amostragem aleatória, caso sejam detectadas evidências de seleção dirigida, inconsistências entre os documentos apresentados e o produto comercializado, ou ausência de comprovação adequada da origem dos dados.

Cada relatório de ensaio ou certificado técnico deverá estar acompanhado de registro de rastreabilidade, contendo os números de lote, os códigos de peça ou as versões de software e firmware que identifiquem com precisão o subsistema ao qual a evidência se aplica. A classe (1-5) impressa na coluna “Segurança Elétrica” será válida exclusivamente para o modelo avaliado nas condições de ensaio declaradas e não será retroativamente alterada por revisões do método ou por eventual *recall* posterior. Caso o fabricante implemente modificações de projeto ou substituições de fornecedor que se enquadrem como mudança de engenharia, será exigida a apresentação de uma nova evidência de ensaio ou, alternativamente, de uma declaração formal de equivalência técnica assinada pelo responsável de engenharia. Nesses casos, a reavaliação será voluntária e aplicável apenas às unidades produzidas após a alteração, gerando nova etiqueta conforme a versão vigente do protocolo. Esse controle assegura que a evidência técnica permaneça diretamente

vinculada à configuração avaliada, garantindo a validade e a comparabilidade das classificações emitidas.

3 Resultados

Esta seção apresenta os principais resultados decorrentes da aplicação conceitual do método proposto. A organização segue as quatro etapas descritas na Seção 2, evidenciando como referências internacionais, análises de risco e requisitos normativos foram integrados na formulação da etiqueta de segurança para VE. Busca-se demonstrar, de modo sistemático, a viabilidade da proposta, detalhando seus componentes técnicos, a lógica de classificação e os potenciais impactos sobre o setor automotivo. Assim, a Seção 3.1 reúne os achados da Etapa 1 (análise comparativa de programas internacionais); a Seção 3.2 corresponde à Etapa 2 (classificação de riscos por subsistema); a Seção 3.3 materializa a Etapa 3 (desenho da etiqueta); e a Seção 3.4 consolida a Etapa 4, discutindo a fase-piloto e os impactos previstos.

3.1 Síntese dos Programas Internacionais Analisados

A comparação internacional iniciou-se pelos programas com foco prioritário em segurança veicular — em especial os Programas de Avaliação de Carros Novos (*New Car Assessment Programs*, NCAP). Esses esquemas, aqui classificados como programas governamentais informativos ou independentes voluntários, foram incluídos por satisfazerem os três critérios estabelecidos na Seção 2.1 (representatividade geográfica, transparência do protocolo e reconhecimento institucional).

Nos Estados Unidos, o NCAP administrado pela *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) configura-se como um programa governamental de informação ao consumidor, sem caráter regulatório de desempenho [19]. As montadoras não são obrigadas a submeter cada veículo; a própria NHTSA adquire veículos no varejo e realiza os testes, sem necessidade de inscrição ou consentimento prévio. Uma vez testado, o modelo deve exibir na *Monroney Label* a classificação de 1 a 5 estrelas. Modelos que nunca foram avaliados permanecem sem nota [20,21]. Os testes combinam ensaios de colisão instrumentados e provas de pista, além da verificação de tecnologias de Sistemas Avançados de Assistência ao Condutor

(*Advanced Driver Assistance Systems*, ADAS); modelagens computacionais são usadas apenas em pesquisas internas e não influenciam a nota oficial [19]. Desde 2024 o protocolo encontra-se em revisão pública, estruturada em três pilares (segurança em colisões, prevenção de acidentes e usuários vulneráveis) e quatro novas tecnologias ADAS; os resultados passarão a ser divulgados on-line a partir dos anos-modelo 2026. O roteiro de modernização 2024-2033 prevê integrar, a partir dos anos-modelo 2028, notas específicas para cada pilar em um sistema geral revisado [19]. O programa, todavia, não avalia de forma destacada a integridade dos subsistemas HV.

O China NCAP (C-NCAP), administrado pelo *China Automotive Technology and Research Center* (CATARC), é um programa governamental voluntário [28,29]. O protocolo vigente (7.ª revisão, 2024) avalia proteção de ocupantes, usuário vulnerável da via (*Vulnerable Road User*, VRU) e Sistemas de Assistência à Segurança, atribuindo notas de 0 a 5 estrelas — e, para pontuações superiores a 92%, confere o selo Super Five-Star, que opera como distinção acima da nota máxima de cinco estrelas [28,30]. A revisão de 2024 introduziu cenários específicos para VE (por exemplo, impacto lateral focado na bateria) [30], porém continua a não publicar um índice dedicado aos riscos HV. Os resultados, divulgados no portal do CATARC, influenciam a regulamentação chinesa, mas não exigem etiqueta física no veículo [28,30,31].

O Korean NCAP (KNCAP), conduzido pelo *Ministry of Land, Infrastructure and Transport* (MOLIT) e executado pelo *Korea Automobile Testing & Research Institute* (KATRI) da *Korea Transportation Safety Authority* (KOTSA), é um programa governamental informativo que cumpre os critérios da Seção 2.1 [33,34]. O protocolo atual avalia três domínios: segurança em colisões, VRU e Sistemas de Assistência à Segurança [35]. Além dos três domínios que compõem a classificação global, o KNCAP passou a publicar separadamente um grau de segurança do conjunto de baterias baseado nas funções do BMS. Esse escore é divulgado de forma isolada e não compõe a classificação global do veículo, nem abrange outros subsistemas de alta tensão como inversores, cabos ou sistemas de recarga [36]. A classificação final baseia-se em cinco classes ordenadas, derivadas de um escore percentual, em que a classe 1 representa o melhor desempenho e a classe 5, o pior [34]. Embora de

caráter informativo, os resultados são divulgados on-line e influenciam o mercado; não há obrigatoriedade de etiqueta física [34,37].

O Euro NCAP, consórcio independente voluntário, cumpre igualmente os três requisitos da Seção 2.1 [41]. Seu protocolo avalia quatro domínios — ocupantes adultos, ocupantes infantis, VRU e Sistemas de Assistência à Segurança — consolidando-os em uma escala de 0 a 5 estrelas [42,43]. Embora o roteiro de modernização inclua requisitos para VE [41], o programa ainda não fornece indicador específico para os riscos HV. O logotipo oficial só pode ser utilizado conforme as *Guidelines for Use of the Star Rating*, e a ampla divulgação dos relatórios confere ao Euro NCAP forte influência sobre seguradoras, fabricantes e políticas públicas, mesmo sem etiqueta física obrigatória [41,43,44].

O Latin NCAP, consórcio independente voluntário, também satisfaz os critérios da Seção 2.1 [62,63]. Os veículos são adquiridos anonimamente e testados em laboratórios independentes, resultando em classificação única de 0 a 5 estrelas que combina quatro domínios (ocupantes adultos, ocupantes infantis, VRU e Sistemas de Assistência à Segurança) [62,64]. O ciclo do método 2020-2024 será sucedido, em 2026, pela versão 2.0.1, que introduzirá o manequim infantil equivalente a uma criança de 10 anos (Q10) e novos critérios de Sistemas de Assistência à Segurança [65,66]. Apesar de incorporar itens específicos para VE em alguns ensaios [67,68], não publica índice dedicado aos riscos HV. Os resultados, amplamente divulgados on-line, orientam políticas públicas sem necessidade de etiqueta física [63,64].

O *Fuel Economy and Environment Label* — programa regulatório compulsório administrado conjuntamente pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*Environmental Protection Agency*, EPA) e pela NHTSA, com o apoio técnico do Departamento de Energia dos Estados Unidos (*U.S. Department of Energy*, DOE) — também atende aos critérios de seleção [22]. Desde 2013 o rótulo deve ser afixado em todos os veículos leves novos vendidos nos EUA, exibindo métricas padronizadas de consumo, emissões e custos anuais. Os índices de emissões — Classificação de Emissões de Gases de Efeito Estufa (*Greenhouse Gas Rating*) e Classificação de Poluentes de Névoa Fotoquímica (*Smog Rating*) — são apresentados em uma escala ordinal de 1 a 10, enquanto o consumo energético permanece em valores numéricos absolutos [22–24]. O design inclui QR code que direciona o consumidor a

comparativos personalizados [24,25]. Há versões específicas para BEV, PHEV e veículos a célula de combustível (*Fuel Cell Vehicle*, FCV) [22].

O Green NCAP, consórcio independente associado ao Euro NCAP, atribui de 0 a 5 estrelas verdes combinando três índices — qualidade do ar, eficiência energética e emissões de Gases de Efeito Estufa — obtidos por ensaios laboratoriais e medições em uso real [51–54]. O método, mais exigente do que os requisitos regulatórios, incorpora um fator de ponderação para PHEV e, desde 2022, adota a abordagem “do poço à roda+” (*well-to-wheel+*), contemplando as emissões associadas à produção e distribuição de combustíveis e eletricidade, bem como à construção e operação da infraestrutura de abastecimento [54]. Em 2023, lançou o selo *Greener-Choice LCA Award* e prevê, a partir de 2025, fichas de Avaliação de Ciclo de Vida por modelo [55]. Apesar da ampla divulgação dos resultados em seu portal, o Green NCAP não exige a afixação de etiqueta física nos veículos avaliados.

Por fim, o PBE-V, coordenado pelo Inmetro, configura-se como programa governamental informativo [15,79]. Embora a participação seja voluntária, a vinculação a incentivos fiscais (Lei 14.902/2024 — Programa Mover) resultou, na prática, na etiquetagem de 100 % dos modelos comercializados [80,81]. A Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) classifica a eficiência em cinco classes (A–E) e inclui a autonomia elétrica dos VE [79,80,86]. Nos termos da Portaria Inmetro nº 169/2023 [15], a ENCE deve ser afixada em local visível em todo veículo participante do PBE-V, ainda que a participação no programa permaneça facultativa. Os valores detalhados são públicos e podem ser consultados na base técnica do ciclo correspondente.

Em virtude dessa diversidade institucional, de métodos e geográfica, a Tabela 1 sintetiza as principais características dos programas analisados em seis dimensões: nome, região de aplicação, tipologia institucional (governamental regulatório, governamental informativo ou independente voluntário), foco técnico predominante (segurança veicular, eficiência energética ou impacto ambiental), sistema de classificação (estrelas, faixas ou índices) e exigência de afixação física. Essa consolidação ampara a discussão crítica desenvolvida na subseção seguinte.

Tabela 1. Comparação entre Programas Internacionais de Etiquetagem Veicular.

Programa	Região	Tipo de Programa	Foco Técnico	Sistema de Classificação	Etiqueta Física
NHTSA / NCAP	Estados Unidos	Governamental informativo (não regulatório / não compulsório)	Segurança veicular	Estrelas (1 a 5)	Obrigatória somente para veículos testados
C-NCAP	China	Governamental voluntário	Segurança veicular	Estrelas (0 a 5) + selo Super Five-Star	Não obrigatória
KNCAP	Coreia do Sul	Governamental informativo	Segurança veicular	Classes (1ª a 5ª)	Não obrigatória
Euro NCAP	Europa	Independente voluntário	Segurança veicular	Estrelas (0 a 5)	Não obrigatória
Latin NCAP	América Latina e Caribe	Independente voluntário	Segurança veicular	Estrelas (0 a 5)	Não obrigatória
EPA/DOE Label	Estados Unidos	Governamental regulatório	Eficiência energética, emissões e custo de uso	Índices de emissões (1 a 10) + consumo (absoluto)	Obrigatória
Green NCAP	Europa	Independente voluntário	Eficiência energética, emissões e ciclo de vida	Estrelas verdes (0 a 5)	Não obrigatória
PBE-V (Inmetro)	Brasil	Governamental informativo	Eficiência energética e emissões	Classes (A a E)	Obrigatória para veículos participantes

Fonte: Os autores.

3.2 Classificação Qualitativa de Riscos por Subsistema

A seguir, apresentam-se os resultados obtidos por meio da aplicação do procedimento descrito na Seção 2.2. A subseção 3.2.1 detalha o caso do Subsistema Bateria, incluindo a árvore de falhas e a justificativa dos parâmetros S–E–C; as subseções seguintes resumem os resultados dos demais subsistemas. As representações completas das FTA encontram-se nos Apêndices A–D.

3.2.1 Subsistema Bateria

A bateria de alta tensão configura-se como o elemento de maior criticidade funcional nos VE, pois reúne elevada densidade energética (250–300 Wh kg^{-1}), complexidade eletroquímica e correntes de operação expressivas. Na fase exploratória, compararam-se múltiplos cenários de falha descritos na literatura — fuga térmica, penetração de objetos, sobreaquecimento externo, sobrecarga elétrica e mau funcionamento do BMS [103–108].

O cenário de maior criticidade identificado para a bateria foi determinado pelo procedimento HARA resumido na Seção 2.2.6: combinou-se uma FTA de topo único — “incêndio catastrófico do conjunto de baterias em recarga DC” — com validação documental, identificando a condição S3–E3–C3 (ASIL C). A classificação qualitativa dos eventos confirma a plausibilidade desse resultado, dispensando maiores detalhes nesta subseção. Cinco fatores principais justificam a escolha desse cenário mais crítico identificado:

• Aumento da densidade/energia específica das células de íon-lítio, que eleva o calor liberado durante a fuga térmica, intensificando a severidade do evento [103,109].

• Correntes de carga ou descarga muito altas, capazes de gerar gradientes térmicos internos e favorecer a deposição de lítio metálico (dendritas), mecanismo frequentemente associado a curtos internos [106–108,110].

• Manutenção do estado de carga (*State Of Charge*, SOC) elevado, que reduz a temperatura de início da fuga térmica, pois maior energia eletroquímica fica disponível para reações exotérmicas [103,107].

• Temperaturas ambiente em torno de 40°C, que diminuem significativamente a margem de segurança térmica, aproximando a operação normal do limiar de auto aquecimento celular [103,106,109].

• Rapidez de propagação célula-módulo, verificada em testes de abuso: após o gatilho, a expansão pode ocorrer em poucos minutos, e ações do condutor ou do BMS apenas limitam correntes residuais, sem extinguir o incêndio [103,109].

A FTA desse subsistema contém um evento condicional BT_CE1, quatro ramos principais (BT_G1–BT_G4), e seis eventos básicos (BT_B1–BT_B6). Os ramos “Curto interno em célula” (BT_G1) e “Penetração mecânica” (BT_G4) são modelados como eventos intermediários, de modo a preservar a rastreabilidade para os respectivos eventos básicos (BT_B1 e BT_B6). A condição operacional representativa de maior criticidade — combinação de SOC elevado e temperatura ambiente alta durante recarga rápida em DC (SOC ≥ 80 % e temperatura ambiente ≥ 40 °C) — foi modelada

como evento condicional BT_CE1, que alimenta uma porta INHIBIT ligada ao operador OR das quatro causas primárias (BT_G1–BT_G4).

Para estimar o parâmetro Exposição (E), considerou-se que a frequência da situação é igual ou superior a uma vez por mês, que de acordo com a tabela B.3 da ISO 26262-3:2018 [16], enquadra-se na classe E3 – probabilidade média de ocorrência. Os valores decorrem de estimativa conservadora dos autores e serão ajustados por painel Delphi ou substituídos por estatísticas públicas quando disponíveis. Em conformidade com a Cláusula 6 da mesma norma, avaliaram-se os parâmetros Severidade (S), Exposição (E) e Controlabilidade (C) para esse cenário, cujos resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Classificação dos parâmetros S-E-C para o Subsistema Bateria.

Parâmetro	Classe	Fundamentação
Severidade	S3	Incêndio catastrófico com potencial de múltiplas fatalidades
Exposição	E3	Uso frequente de recarga DC rápida
Controlabilidade	C3	Propagação célula-módulo em minutos; condutor sem meios de contenção

Fonte: Os autores.

A estrutura completa da árvore de falhas é mostrada na Figura A1. A matriz S-E-C leva ao nível ASIL C; pela conversão definida na Seção 2.2.2, esse resultado equivale a IRR_gen = 3. O cálculo de ICD segue, na sequência, o procedimento da Equação 1.

3.2.2 Subsistema Motor-inversor

O conjunto formado por motores elétricos e inversores é responsável por converter a energia armazenada na bateria em movimento, desempenhando função central no sistema de propulsão dos VE. Os riscos mais relevantes estão associados a falhas de isolamento, que podem resultar em descarga elétrica, interferência eletrônica ou perda momentânea de tração [111]. Durante a fase exploratória deste estudo, foram avaliados diferentes cenários operacionais de falha, como: sobreaquecimento do inversor, falha do sistema de controle, travamento do rotor e perda de isolamento galvânico entre o inversor e o chassi [111–113].

Do conjunto de modos de falha avaliados, identificou-se como cenário de maior criticidade a perda súbita de tração durante condução ativa. Essa condição pode ocorrer, por exemplo, devido a um curto-circuito permanente em um semicondutor de

potência do inversor, responsável por cerca de 38% dos incidentes em drivers de tração [111,113]. Nessa ocorrência, a fase afetada permanece energizada, ocasionando sobrecorrente imediata e torque de frenagem reverso que compromete a estabilidade longitudinal do veículo [113]. Conforme a ISO 26262-3:2018 [16], a possibilidade de perda de controle em velocidade de cruzeiro — com risco de colisão de alta energia — enquadra a severidade na classe S3.

O defeito pode manifestar-se durante ultrapassagens em rodovias, condição que se repete algumas vezes por mês no ciclo de uso de um automóvel de passeio; por esse motivo, a exposição é classificada como E3 (frequência média), seguindo o exemplo da tabela B.3 da norma [16]. Embora o sistema de proteção atue de forma quase instantânea, a desaceleração brusca resultante, acompanhada de torque inverso, inviabiliza reação eficaz do condutor, caracterizando controlabilidade C3 (difícil ou incontrolável). A combinação S3–E3–C3 conduz ao nível ASIL C, que, pela linearização adotada, corresponde a IRR_gen = 3 para o subsistema motor-inversor (ver Tabela 3 e Apêndice B).

Tabela 3. Classificação dos parâmetros S-E-C para o Subsistema Motor-inversor.

Parâmetro	Classe	Fundamentação
Severidade	S3	Perda súbita de controle direcional, com potencial para colisão de alta energia e lesões fatais
Exposição	E3	Falha possível em condução ativa (frequência média)
Controlabilidade	C3	Sobrecorrente instantânea; condutor sem meios de mitigação

Fonte: Os autores.

3.2.3 Subsistema Sistema de Recarga

O sistema de recarga estabelece a interface elétrica e funcional entre o veículo e o equipamento de suprimento de energia para veículo elétrico (*Electric Vehicle Supply Equipment*, EVSE), abrangendo o conector Sistema de Recarga Combinado (*Combined Charging System*, CCS) do veículo, cabos de alta tensão, circuitos de comunicação e dispositivos de proteção. Nos modos AC (1 a 3) o carregador embarcado converte a energia; no Modo 4 (DC-fast) o conversor de potência é externo ao veículo. Os riscos operacionais são maiores nas recargas rápidas em corrente contínua, que operam tipicamente entre 400V e 1000V e 150A a 500A, em ambientes externos sujeitos a calor, chuva e poeira. Na fase exploratória foram avaliados cenários como sobrecorrente prolongada, sobreaquecimento de cabos, falhas de

aterramento e degradação do isolamento em conectores submetidos a uso intenso [106,111,114–116].

Do conjunto de modos de falha avaliados, identificou-se como cenário de maior criticidade a ocorrência de sobrecorrente sustentada no condutor de alta tensão durante sessões de recarga rápida em corrente contínua (modo 4), associada à atuação deficiente dos dispositivos de proteção térmica e elétrica, tanto no EVSE quanto no veículo. Essa condição pode ocorrer em contextos nos quais há degradação progressiva de sensores térmicos no conector, impedindo o desligamento em tempo adequado [115]. Simulações e ensaios indicam que, sob recarga rápida, a temperatura dos terminais pode atingir valores superiores a 90°C — patamar no qual a norma IEC 61851-23:2023 [89] exige o desligamento imediato da recarga por motivos de segurança térmica. Há evidência técnica de que correntes elevadas em conectores de estações DC podem causar falhas de isolamento e atuar como fonte de ignição, especialmente em interfaces mal projetadas ou expostas a ciclos térmicos intensos [117].

Estudos com células de Óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto (*Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide*, NMC) mostram que, mesmo com resfriamento forçado ativo, podem surgir gradientes térmicos de até 20°C durante ciclos de carga com corrente elevada [118]. A taxa C — que expressa a razão entre a corrente aplicada e a capacidade da célula — não foi especificada no estudo, mas os resultados sugerem comportamento térmico comparável ao de aplicações rápidas, reforçando a plausibilidade de aquecimento interno não detectado em casos de sobrecorrente sustentada. As normas técnicas IEC 62196-3:2022 [90] e IEC 61851-23:2023 [89] estabelecem limites para elevação de temperatura e requisitos de proteção nos sistemas de recarga DC.

Em conformidade com a ISO 26262-3:2018 [16], o evento é classificado como S3 (risco de incêndio com ameaça direta à vida), E3 (frequente em operações urbanas com recargas sucessivas) e C3 (evento de difícil controle, sem sinalização imediata ao condutor). Essa combinação conduz ao nível ASIL C, correspondente a IRR_gen = 3 (ver Tabela 4 e Apêndice C).

Tabela 4. Classificação dos parâmetros S-E-C para o Subsistema Sistema de Recarga.

Parâmetro	Classe	Fundamentação
Severidade	S3	Sobreaquecimento localizado com risco de ignição em conector, com potencial para incêndio do veículo
Exposição	E3	Recarga DC rápida usada com frequência em ciclos urbanos intensivos
Controlabilidade	C3	Aquecimento progressivo e não perceptível; usuário sem meios de intervenção direta

Fonte: Os autores.

3.2.4 Subsistema Cabos e Conectores

Os cabos e conectores de alta tensão são responsáveis por interligar os principais subsistemas elétricos do veículo — como bateria, inversores, motores e sistema de recarga — garantindo a integridade da condução de energia e a segurança do circuito. Embora sejam componentes passivos, sua confiabilidade é essencial para o desempenho e a proteção funcional do sistema como um todo, principalmente devido ao seu comprimento, exposição ambiental e envolvimento direto em trajetos de corrente de alta potência. Durante a fase exploratória deste estudo, foram analisados cenários como desconexão acidental sob carga, degradação térmica de isolantes, falha de travamento mecânico e abrasão externa com exposição de condutores [106,111,115,116].

Do conjunto de modos de falha avaliados, identificou-se como cenário de maior criticidade a abrasão do revestimento isolante externo em chicotes de alta tensão, que expõe o condutor, favorece curto a massa e desencadeia arcos elétricos sustentados — tipicamente na faixa de 150V e energia liberada da ordem de 9 a 12 kJ [119]. Esse mecanismo domina situações em que o chicote passa por roteamentos apertados, vibração contínua ou atrito contra bordas metálicas do monobloco. Estudos de envelhecimento térmico isolado mostram que o polietileno reticulado (*Cross-Linked Polyethylene*, XLPE) perde de 17% a 23 % de rigidez dielétrica após 500h a 135°C ou 672h a 120°C [120,121]; quando essa degradação se soma a abrasão localizada, espera-se redução adicional da margem dielétrica, embora ainda sem quantificação publicada específica.

Em termos normativos, a ocorrência potencial de arco elétrico no cofre do motor configura severidade S2 (lesões graves não fatais); o veículo experimenta ciclos de torção e atrito em praticamente todos os trajetos urbanos, resultando em exposição E3 (frequente); a falha permanece parcialmente controlável por fusíveis e o dispositivo

de detecção de corrente contínua residual (*Residual Direct Current Detecting Device*, RDC-DD), mas a abertura nem sempre é imediata, classificando-se como controlabilidade C2 (limitada). A matriz conduz ao ASIL A; a linearização adotada converte esse resultado em IRR_gen = 1 (ver Tabela 5 e Apêndice D).

Tabela 5. Classificação dos parâmetros S-E-C para o Subsistema Cabos e Conectores.

Parâmetro	Classe	Fundamentação
Severidade	S2	Arco elétrico localizado pode causar queimadura grave ou incêndio limitado (lesões graves)
Exposição	E3	Vibração/atrito em uso urbano → ocorrência mensal ou mais frequentemente
Controlabilidade	C2	Fusíveis/RDC-DD abrem o circuito com atraso; situações ainda “normalmente controláveis” (> 90 %)

Fonte: Os autores.

3.2.5 Cálculos e Exemplos do ICD

Os resultados das análises qualitativas realizadas para cada subsistema (Seções 3.2.1 a 3.2.4) são sintetizados na Tabela 6, a seguir, que consolida os parâmetros S–E–C, o nível ASIL genérico e o valor de IRR_gen atribuídos a cada item avaliado.

Tabela 6. Valores de Severidade (S), Exposição (E) e Controlabilidade (C), ASIL genérico e IRR_gen dos subsistemas avaliados.

Subsistema	S-E-C	ASIL_gen	IRR_gen
Bateria	S3-E3-C3	C	3
Motor-inversor	S3-E3-C3	C	3
Sistema de Recarga	S3-E3-C3	C	3
Cabos e Conectores	S2-E3-C2	A	1

Fonte: Os autores.

Após a obtenção dos valores de IRR_gen para cada subsistema, procede-se ao cálculo do ICD de acordo com a robustez da documentação técnica apresentada (NE), conforme estabelecido na Equação 1 (Seção 2.2.3). Essa expressão assegura que o ICD de cada subsistema seja proporcionalmente reduzido conforme a qualidade da evidência aumenta, mantendo, no entanto, um risco residual mínimo (10% do valor original) mesmo para a documentação mais robusta. Como exemplo ilustrativo, para o subsistema bateria com IRR_gen = 3 e NE = 7 (relatório de laboratório acreditado), obtém-se ICD = 0,9. Se a evidência corresponder apenas a um estudo analítico com NE = 3, o valor resultante seria 2,1.

Considerando os valores de IRR_gen atribuídos aos quatro subsistemas de referência — três subsistemas com IRR_gen = 3 e um subsistema com IRR_gen = 1 — o menor ICD_total possível (obtido quando todos apresentam NE = 9) é 1,00. Valores inferiores só ocorreriam caso todos os subsistemas fossem classificados como QM, hipótese não contemplada nesta versão.

Com base nesses resultados, o intervalo efetivo do ICD_total nesta versão é de 1 a 10. Assim, as fronteiras provisórias entre as cinco classes foram estabelecidas em 2,8; 4,6; 6,4 e 8,2, de modo que valores inferiores a 2,8 pertencem à Classe 5; iguais ou superiores a 2,8 e inferiores a 4,6, à Classe 4; entre 4,6 e 6,4, à Classe 3; de 6,4 a 8,2, à Classe 2; e iguais ou superiores a 8,2, à Classe 1. Para evitar ambiguidade na extremidade inferior, todo resultado abaixo de 1 e igual ou superior a 0,20 — cenário possível apenas se todos os subsistemas fossem classificados como QM — também é incluído na Classe 5.

Caso futuras versões do protocolo incluam ou removam subsistemas críticos, os limites inferiores e superiores poderão ser ajustados proporcionalmente, assegurando que o risco residual nunca seja completamente anulado. Estes intervalos poderão ser revisados ao final da fase-piloto, empregando-se os percentis 20-40-60-80 da distribuição observada.

3.2.6 Análise de Sensibilidade do Algoritmo ICD

Com base no método descrito na Seção 2.2.5, foi realizada uma análise de sensibilidade para avaliar como diferentes funções de ajuste e variações na Nota-Evidência (NE) impactam o ICD e o ICD_total. Os resultados para os três cenários simulados estão apresentados nas Tabelas 7 e 8 e ilustrados na Figura 1.

Tabela 7. Variação do ICD_total com a NE uniforme – Cenário S-1 (vetor-base [3 3 3 1]).

NE	ICD_lin	Classe_lin	ICD_exp	Classe_exp	ICD_log	Classe_log
0	10,00	1	10,00	1	10,00	1
3	7,00	2	4,72	3	4,72	3
5	5,00	3	2,87	4	3,08	4
7	3,00	4	1,74	5	1,91	5
9	1,00	5	1,05	5	1,00	5

Fonte: Os autores.

Tabela 8. Faixas do ICD_total nos cenários realista (S-2) e extremos (S-3).

Cenário	Configuração NE[1]	ICD_lin	Classe_lin	ICD_exp	Classe_exp	ICD_log	Classe_log
S-2 (min)	9 9 9 7	1,20	5	1,12	5	1,09	5
S-2 (max)	5 5 5 3	5,20	3	3,05	4	3,25	4
S-3 (min)	ASIL QM, NE = 9	0,20	5	0,21	5	0,20	5
S-3 (max)	ASIL D, NE = 0	16,00	1	16,00	1	16,00	1

[1] Ordem dos subsistemas: Bateria, Motor-inversor, Recarga, Cabos e Conectores.
Fonte: Os autores.

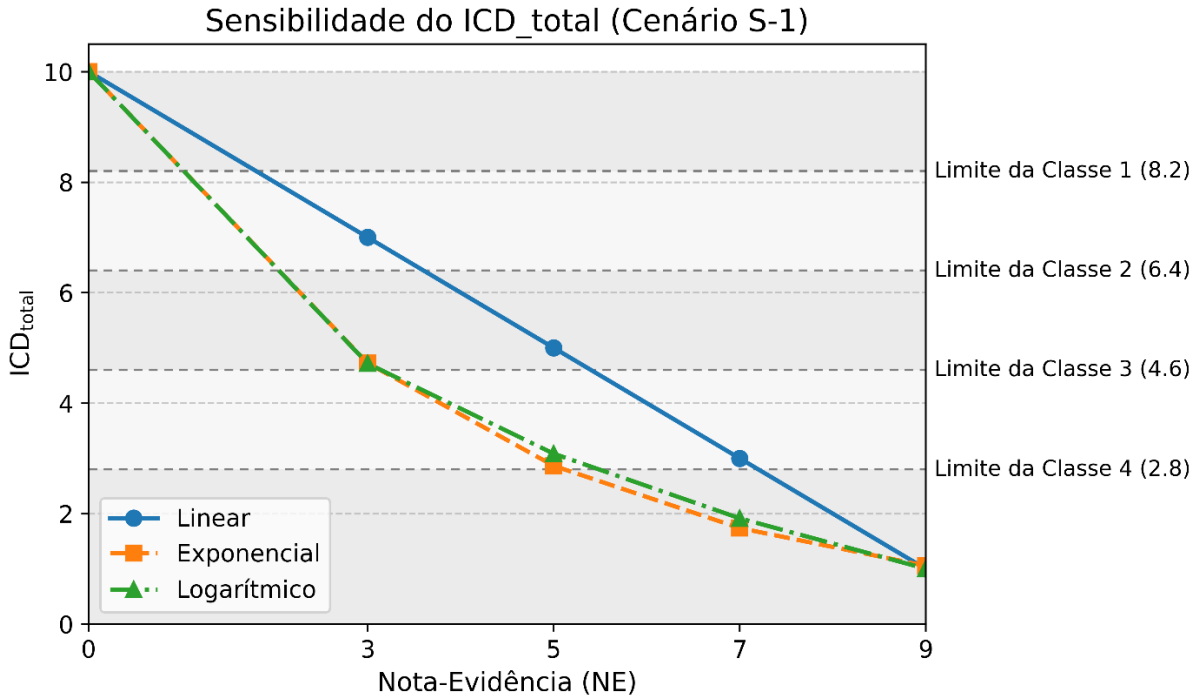


Figura 1. Variação do ICD_total em função da NE no Cenário S-1 para os três modelos de ajuste; linhas horizontais pontilhadas indicam os limites das classes 1–5.

Fonte: Os autores.

A Tabela 7 apresenta a variação do ICD_total com NE uniforme no cenário S-1 (vetor-base [3 3 3 1]). Observa-se que, para NE = 0, o ICD_total permanece em 10,00 e enquadra-se na Classe 1 para os três modelos. Com NE = 3, há redução mais acentuada nos modelos exponencial e logarítmico (4,72, Classe 3), em comparação ao linear (7,00, Classe 2). À medida que a NE aumenta, o ICD_total cai de forma mais pronunciada nos ajustes exponencial e logarítmico: para NE = 5, atingem as Classes 4 (2,87 e 3,08, respectivamente), enquanto o linear permanece em Classe 3 (5,00). Para NE = 7, o exponencial (1,74) e o logarítmico (1,91) já se enquadram na Classe 5, enquanto o linear atinge a Classe 4 (3,00). Em NE = 9, todos os modelos convergem para a Classe 5, com valores próximos a 1,00.

A Tabela 8 mostra as faixas do ICD_total para cenários realistas (S-2) e extremos (S-3). No cenário S-2 (min), com NE = 9, 9, 9, 7, o ICD_total varia de 1,20 (Classe 5, linear) a 1,12 (Classe 5, exponencial) e 1,09 (Classe 5, logarítmico). No cenário S-2 (max), com NE = 5, 5, 5, 3, o índice oscila entre 5,20 (Classe 3, linear), 3,05 (Classe 4, exponencial) e 3,25 (Classe 4, logarítmico). Os cenários extremos (S-3) confirmam o limite teórico máximo (16,00) nos três modelos; o mínimo teórico de 0,20 é atingido nos ajustes linear e logarítmico, enquanto o exponencial resulta em 0,21, todos permanecendo na Classe 5.

Já a Figura 1 ilustra graficamente o comportamento do ICD_total no cenário S-1 para os três modelos de ajuste, evidenciando que o ajuste linear muda de classe apenas nos pontos de corte definidos, enquanto os ajustes exponencial e logarítmico antecipam a transição para a Classe 5 já a partir de NE = 7. As linhas horizontais pontilhadas indicam os limites provisórios das classes 1–5, permitindo comparar visualmente os resultados obtidos nas Tabelas 7 e 8 e confirmando que valores mais elevados de NE, correspondentes a maior robustez da evidência documental, reduzem o ICD_total e deslocam o resultado para classes de menor risco residual (maior confiabilidade).

Os parâmetros $\alpha = 0{,}25$ (exponencial) e $\beta = 0{,}85$ (logarítmica) foram definidos por calibração dos pontos de ancoragem (NE = 0 e NE = 9), garantindo monotonicidade e manutenção da hierarquia ordinal na faixa de NE analisada; ressalta-se que esses valores não constituem calibração definitiva, mas sim referência operacional provisória para a etapa conceitual do protocolo. A calibração final dos parâmetros, bem como a escolha da função de ajuste mais aderente ao comportamento empírico das evidências documentais, será realizada com base nos dados coletados durante a fase-piloto e validada por consenso técnico no painel Delphi (Seção 2.4.2), de modo a assegurar representatividade estatística e consistência com a formulação do modelo.

3.3 Estrutura Proposta da Etiqueta de Segurança

A etiqueta de segurança foi concebida para comunicar, de modo inequívoco, o nível de risco funcional dos VE, assegurando coerência com o algoritmo ICD descrito na Seção 2.2 e com os valores consolidados na Seção 3.2. Conforme ilustrado na

Figura 2, o layout ocupa uma coluna adicional de 25 mm na margem direita da ENCE/PBE-V, preservando o mesmo substrato vinílico autoadesivo e evitando sobreposição visual ou temática com as faixas de eficiência energética já consagradas.

Para assegurar rastreabilidade, foi integrado um QR code no canto inferior da coluna “Segurança Elétrica”; seu redirecionamento conduz a um dossiê digital que exibe: (i) os ICD de bateria, motor-inversor, sistema de recarga e cabos e conectores; (ii) a Nota-Evidência de cada subsistema; e (iii) o resumo do protocolo. A estrutura modular admite revisões bienais — ou extraordinárias nos termos da Seção 4.3.1 — sem necessidade de alterar dimensões ou pontos de fixação, assegurando compatibilidade retroativa e mínima carga logística aos fabricantes.

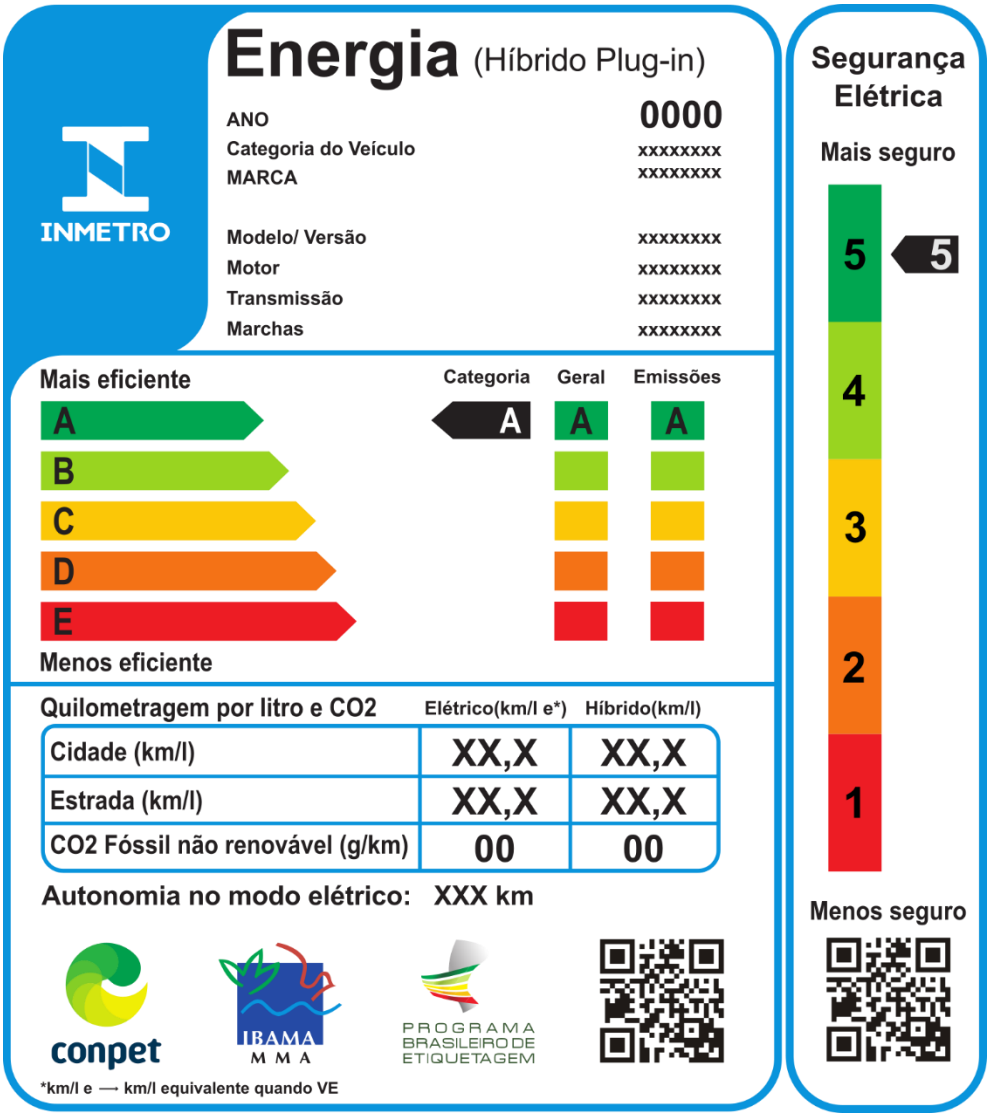


Figura 2. Layout proposto da etiqueta de segurança funcional integrada à ENCE/PBE-V.

Fonte: Adaptado de Inmetro [122].

3.4 Simulação de Aplicação

Com o propósito de demonstrar a operacionalidade do ICD e da etiqueta proposta, realizou-se uma simulação hipotética envolvendo cem modelos de VE. Com os níveis ASIL genéricos adotados (C, C, C e A), o menor valor efetivamente alcançável pelo ICD_total é 1. Os valores de IRR_gen apresentados na Tabela 6 foram mantidos constantes; a variabilidade decorreu exclusivamente da Nota-Evidência (NE = 0, 3, 5, 7 ou 9) atribuída aleatoriamente a cada subsistema. Para cada veículo, calculou-se o ICD (Equação 1), o ICD_total (Equação 2) e, em seguida, a Classe correspondente. A distribuição obtida está apresentada na Tabela 9.

Tabela 9. Distribuição simulada de cem veículos conforme faixas de ICD_total.

Classe	Faixa ICD_total	n	ICD_total médio
5 (mais seguro)	< 2,8	12	2,24
4	≥ 2,8 < 4,6	30	3,65
3	≥ 4,6 < 6,4	34	5,33
2	≥ 6,4 < 8,2	19	7,20
1 (menos seguro)	≥ 8,2	5	8,68

Fonte: Os autores.

4 Discussão

A proposta de um programa brasileiro de etiquetagem voluntária de segurança funcional para VE atingiu, nas seções anteriores, os elementos necessários para a análise crítica que se segue. Os resultados obtidos — índice de risco, classificação ordinal e mecanismo de ajuste — são examinados nas subseções seguintes quanto ao impacto para consumidores, indústria e formuladores de políticas.

Neste capítulo, os resultados obtidos são analisados em relação às hipóteses que motivaram o estudo, com destaque para a lacuna informacional sobre riscos de alta tensão nos VE. A discussão está organizada em quatro partes: (i) lições extraídas da análise de programas internacionais; (ii) benefícios e contribuições potenciais do modelo para consumidores, indústria e formuladores de políticas; (iii) aspectos de governança, atualização e próximos passos para o programa; e (iv) principais desafios do método e limitações identificadas, bem como perspectivas para aprimoramento do protocolo.

4.1 Lições Extraídas dos Modelos Internacionais

A análise comparativa apresentada na Seção 3.1 evidencia cinco lições fundamentais para a estruturação de um programa brasileiro de etiquetagem de segurança para VE. Essas lições, extraídas das convergências e lacunas identificadas nos oito programas internacionais examinados, garantem a consistência técnica e o alinhamento do modelo proposto às melhores práticas de avaliação da conformidade.

Primeiro, verifica-se que nenhum dos programas analisados apresenta um rótulo físico que permita ao consumidor comparar o risco funcional dos subsistemas de alta tensão. Apenas o K-NCAP divulga um indicador específico para baterias, restrito ao seu portal e sem impacto na nota global do veículo, o que reforça a necessidade de um índice integrado. Em segundo lugar, nota-se que, salvo o rótulo EPA/DOE, todos os demais programas utilizam escalas ordinais de cinco ou seis níveis. Por isso, este estudo adota as cinco classes 1–5, conforme definido anteriormente.

O terceiro ponto destaca a importância da hierarquia das evidências técnicas: protocolos como Euro NCAP, Green NCAP e K-NCAP conferem maior peso a ensaios ou certificações de organismos de terceira parte acreditados, princípio adotado na escala NE deste trabalho. O quarto aspecto refere-se ao papel do incentivo econômico na adesão voluntária. A experiência do PBE-V mostrou que a vinculação a benefícios fiscais resultou na participação de toda a frota nacional em 2023 [80]. Aplicar essa estratégia ao módulo de segurança funcional tende a ampliar a adesão sem necessidade de obrigatoriedade regulatória.

Por fim, programas independentes como Euro NCAP, Green NCAP e Latin NCAP demonstram que a credibilidade depende de governança transparente, auditorias externas e revisões do protocolo periódicas — elementos também incorporados ao modelo aqui proposto. Essas cinco lições — comunicação integrada, escala compacta, evidência robusta, incentivo econômico e governança transparente — sustentam a base conceitual do programa brasileiro apresentado neste estudo.

4.2 Potenciais Benefícios e Contribuições

Os resultados apresentados na Seção 3 mostram que o algoritmo ICD, aliado à escala 1–5, traz benefícios concretos para consumidores, indústria e formuladores de

políticas. Para o consumidor, a etiqueta introduz uma métrica comparável sobre o risco funcional dos principais subsistemas, inexistente nos programas NCAP ou no PBE-V. Ao reunir essas informações em um único indicador, a proposta reduz a assimetria de informação, tradicionalmente reconhecida como obstáculo à adoção de veículos eletrificados. A simulação da Tabela 9 confirma o poder discriminatório da escala, permitindo orientar decisões de compra e diminuir incertezas no ponto de venda. As médias de ICD_total evoluem quase linearmente entre as classes, com intervalos próximos de 1,7 ponto, o que reforça sua utilidade também como referência para políticas de incentivo.

Para os fabricantes, o modelo oferece uma ferramenta de diferenciação competitiva. Veículos classificados nas classes 4 ou 5 demonstram o atendimento adequado aos requisitos de segurança funcional. Essa transparência é valorizada por investidores, estimula ensaios acreditados — já reconhecidos por Euro NCAP e Green NCAP — e fortalece a infraestrutura laboratorial nacional.

No âmbito regulatório e acadêmico, a consolidação periódica dos resultados do ICD_total permitirá criar um repositório estatístico relevante para o ajuste de políticas públicas e intervalos de classe. Embora o caráter voluntário preserve a flexibilidade normativa do programa, a eventual vinculação a incentivos fiscais pode acelerar a adesão, como ocorreu com o PBE-V.

Do ponto de vista do método, a proposta reúne HARA genérica, linearização do ASIL e hierarquia de evidências em um protocolo pós-homologação que pode ser replicado em outros mercados emergentes. A futura integração de requisitos de cibersegurança (UNECE R155:2021 [123]; ISO/SAE 21434:2021 [124]) ampliará o escopo de proteção e pode posicionar o Brasil na vanguarda regulatória da eletromobilidade.

4.3 Governança, Atualização e Próximos Passos

A robustez de um programa voluntário depende não só de seus fundamentos técnicos, mas também da gestão e da capacidade de adaptação ao longo do tempo. Este tópico apresenta as diretrizes de governança, os mecanismos de revisão periódica e a incorporação gradual de novos requisitos, abordando inicialmente a

atualização do protocolo, a integração de cibersegurança e, por fim, a estrutura institucional prevista para sustentar o programa.

4.3.1 Atualização do Protocolo

Após a fase-piloto, o protocolo passará por atualizações regulares a cada dois anos, incorporando avanços normativos, inovações tecnológicas e evidências geradas pela aplicação prática. Além desse calendário, revisões extraordinárias poderão ser realizadas diante de situações específicas: *recall* envolvendo 5% ou mais da frota nacional em um subsistema de alta tensão; publicação de nova norma internacional que altere critérios de Severidade, Exposição ou Controlabilidade; ou apresentação, por qualquer interessado, de dados técnicos que justifiquem ajustes nos parâmetros de classificação. Nesses casos, caberá à entidade gestora propor as revisões necessárias, abrir consulta pública e concluir o processo em até seis meses, garantindo que o protocolo permaneça alinhado às exigências técnicas e normativas do setor.

4.3.2 Integração de Cibersegurança

Embora o protocolo aborde, nesta fase, apenas a segurança funcional relacionada a falhas elétricas ou eletrônicas físicas, reconhece-se que vulnerabilidades cibernéticas também podem afetar a controlabilidade dos sistemas veiculares ou provocar falhas combinadas com impacto crítico. Por isso, está prevista a integração progressiva de um módulo específico de cibersegurança, alinhado ao Regulamento UNECE R155:2021 [123] e à norma ISO/SAE 21434:2021 [124], a ser implementado em duas etapas.

Na primeira, após a fase-piloto, cada proponente deverá apresentar uma declaração de conformidade com um processo interno de gestão de cibersegurança, conforme os princípios da ISO/SAE 21434:2021 [124]. Durante esse período, incidentes comprovados de perda de controlabilidade causados por vulnerabilidades cibernéticas (C2 ou C3) poderão levar, mediante avaliação da entidade gestora, à redução extraordinária da NE do subsistema correspondente.

Na segunda etapa, prevista para até 24 meses após a publicação do protocolo final, será exigida auditoria formal de cibersegurança realizada por organismo de

certificação acreditado conforme os critérios das normas citadas. O relatório técnico dessa auditoria poderá ser utilizado como evidência adicional para ajuste do IRR_gen, especialmente nos casos em que riscos cibernéticos impactem funções críticas dos subsistemas avaliados.

Essa abordagem em duas fases permite o alinhamento gradual do protocolo brasileiro às exigências internacionais, sem impor requisitos excessivos na fase inicial e dando tempo para que os fabricantes se adaptem tecnicamente às novas demandas.

4.3.3 Governança e Gestão do Programa

Para garantir credibilidade institucional e efetividade do protocolo, recomenda-se que a gestão do programa seja atribuída a um organismo público brasileiro com competência legal em avaliação da conformidade, preferencialmente o Inmetro. Alternativamente, a coordenação poderá ser realizada por um consórcio interinstitucional que inclua representantes do Inmetro, da indústria automotiva, de laboratórios acreditados e de entidades de defesa do consumidor.

A entidade gestora deverá seguir os princípios da ISO/IEC 17067:2013 [125], em especial os esquemas do tipo 5, que preveem avaliação inicial de conformidade, auditoria documental e vigilância periódica. Também será necessário instituir um procedimento formal de resolução de controvérsias, assegurando tratamento técnico, transparente e devidamente registrado para questionamentos sobre as classificações emitidas.

Em caso de não conformidades graves, o regulamento deve prever medidas corretivas progressivas, começando por advertência formal, podendo incluir suspensão temporária da classificação e, se necessário, retirada definitiva da etiqueta. O proponente terá direito a um único recurso, com prazo de até quinze dias, sendo a decisão final da entidade gestora, fundamentada em parecer técnico independente.

Todas as decisões relacionadas à suspensão, revogação ou alteração de classificações deverão ser publicadas em portal específico, mantido pela entidade gestora, com acesso aberto e atualização periódica. Essa transparência é essencial

para preservar a confiança dos consumidores, assegurar previsibilidade e reforçar o caráter dissuasório do sistema.

4.4 Desafios e Limitações

Apesar dos avanços no método, a proposta apresenta limitações que precisam ser explicitadas para orientar sua evolução científica e operacional. Na fase-piloto, serão avaliados pontos como a viabilidade do algoritmo de classificação, a qualidade e rastreabilidade dos documentos e a percepção dos consumidores quanto à clareza, utilidade e confiabilidade da etiqueta. As correções e ajustes da escala classificatória, conforme a Seção 2.2.4, deverão ser incorporados à versão final do protocolo antes de sua publicação. Essa etapa servirá de base para enfrentar sete desafios principais:

1. Robustez paramétrica inicial: Os valores atribuídos a Severidade, Exposição e Controlabilidade derivam de literatura internacional e julgamento de engenharia. Embora a HARA genérica siga a ISO 26262-3:2018 [16], a ausência de estatísticas nacionais pode enviesar o IRR_gen. A fase-piloto e o painel Delphi (Seção 2.4) permitirão coletar dados de campo para recalibrar essas distribuições. Esses registros servirão, posteriormente, para quantificar as árvores de falhas, substituindo gradualmente a modelagem qualitativa por taxas de ocorrência reais e refinando os parâmetros S–E–C;

2. Hipótese de independência entre subsistemas: O cálculo direto do ICD pressupõe ausência de correlação entre falhas dos subsistemas. Na fase-piloto, deverão ser estimadas correlações empíricas (conforme detalhado em 2.2.4); caso relevantes, o modelo poderá ser ajustado para incorporar fatores de acoplamento ou eventos de causa comum nas FTA;

3. Linearização do ASIL e sensibilidade do modelo: A conversão QM = 0,5 … D = 4 é utilizada apenas para fins operacionais e não pressupõe proporcionalidade real entre os níveis. Ensaios de sensibilidade (Seção 2.2.5) indicaram monotonicidade aceitável, e a análise da Seção 3.2.6 mostrou que o modelo percorre toda a escala (1–5) mesmo em cenários realistas e extremos de NE, preservando a hierarquia ordinal e o poder discriminatório. No entanto, os ajustes finais de linearização e limites de classe dependerão de dados reais coletados na fase-piloto, inclusive com simulações complementares baseadas em distribuições realistas de NE, para garantir

melhor aderência estatística ao mercado. Esses resultados mostram que o algoritmo responde de forma estável, mas sua calibração definitiva estará condicionada à validação empírica e à evolução do protocolo;

4. Representatividade amostral e cobertura de subsistemas: O protocolo atual considera quatro itens de alta tensão, e a inclusão de novos componentes dependerá de análises de Pareto dos incidentes registrados. De modo similar, a amostra simulada de 100 modelos (Seção 3.4) deverá ser comparada à frota real para validar o poder discriminatório da escala 1–5;

5. Dimensão de cibersegurança: Falhas decorrentes de ataques remotos podem causar perda de controlabilidade sem danos físicos prévios. O cronograma de integração do módulo UNECE R155:2021 [123] e ISO/SAE 21434:2021 [124] (Seção 4.3.2) busca mitigar essa lacuna, mas exigirá métricas específicas e integração consistente com a Nota-Evidência;

6. Aderência voluntária e governança: O êxito do programa está associado à vinculação a incentivos econômicos e à transparência das auditorias. Será necessário definir modelos de financiamento sustentado para manter a base de dados e permitir revisões bienais antes da implementação em escala nacional;

7. Validação do layout da etiqueta: O protótipo gráfico (Figura 2, Seção 3.3) — especialmente a coluna “Segurança Elétrica” integrada à ENCE — será avaliado durante a fase-piloto quanto à legibilidade, contraste cromático e ergonomia do QR code. Resultados de usabilidade poderão demandar ajustes dimensionais ou de cores antes da versão definitiva, impactando a aceitação industrial e a eficácia comunicacional da etiqueta.

Cabe destacar, por fim, que o protocolo não se restringe a veículos elétricos a bateria (BEV), mas é aplicável a veículos eletrificados em geral, desde que contemplem subsistemas de alta tensão. Futuras versões poderão incorporar componentes adicionais de criticidade reconhecida, como a unidade de distribuição de potência (PDU) e os conversores CC–CC, em complemento aos quatro itens atualmente considerados. Recomenda-se, ainda, estender a aplicação às arquiteturas híbridas (PHEV, HEV, MHEV), nas quais a avaliação deve combinar riscos de

propulsão elétrica e de combustão, com atenção às interfaces eletromecânicas e aos requisitos de segurança funcional associados a essas configurações.

Conclusões

Este estudo apresentou um programa brasileiro de etiquetagem voluntária de segurança funcional para VE, voltado a suprir a lacuna informacional que ainda limita a expansão da eletromobilidade. Três elementos centrais sustentam a proposta: (i) o algoritmo ICD, que transforma análises HARA genéricas em valores numéricos ponderados pela robustez documental (NE); (ii) a escala ordinal de cinco classes (1–5), capaz de informar ao consumidor, de forma clara e comparável, o nível de risco funcional dos principais subsistemas; e (iii) um modelo de governança voluntária, fundamentado na infraestrutura nacional de avaliação da conformidade e alinhado a incentivos já consagrados pelo PBE-V.

Os resultados indicam que a nova etiqueta pode reduzir a insegurança percebida pelos consumidores, fornecer à indústria um critério transparente de diferenciação e apoiar formuladores de políticas com um indicador agregado para revisões regulatórias. Ao harmonizar-se com referências internacionais e prever mecanismos de ajuste dinâmico, o protocolo posiciona o Brasil como referência emergente em avaliação pós-homologação de VE.

As próximas etapas envolvem a execução de uma fase-piloto com pelo menos vinte modelos, validação paramétrica por painel Delphi e a integração progressiva de um módulo de cibersegurança compatível com UNECE R155:2021 [123] e ISO/SAE 21434:2021 [124]. Essas iniciativas garantirão a evolução contínua do programa e ampliarão seu impacto na consolidação da mobilidade elétrica no país.

Lista de Siglas

ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
AHP	Analytic Hierarchy Process
ARCAP	Auto Review Car Assessment Program
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
BEV	Battery Electric Vehicle
BMS	Battery Management System
CATARC	China Automotive Technology and Research Center
CCS	Combined Charging System
CO_2	Carbon dioxide
CP	Control Pilot

DOE	Department of Energy
ECU	Electronic Control Unit
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EPA	Environmental Protection Agency
EVSE	Electric Vehicle Supply Equipment
FCV	Fuel Cell Vehicle
FTA	Fault Tree Analysis
HARA	Hazard Analysis and Risk Assessment
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
HV	High Voltage
IAF MLA	International Accreditation Forum Multilateral Recognition Arrangement
ICD	Índice de Confiabilidade Documental
IIHS	Insurance Institute for Highway Safety
ILAC MRA	International Laboratory Accreditation Cooperation Mutual Recognition Arrangement
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IRR_gen	Índice de Risco Relativo genérico
ISO	International Organization for Standardization
JNCAP	Japan New Car Assessment Program
KATRI	Korea Automobile Testing & Research Institute
KNCAP	Korean New Car Assessment Program
KOTSA	Korea Transportation Safety Authority
MCS	Minimal Cut Set
MOLIT	Ministry of Land, Infrastructure and Transport
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
NCAP	New Car Assessment Program
NE	Nota-Evidência
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
NTC	Negative Temperature Coefficient
PD	Partial Discharge
PBE-V	Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular
PHEV	Plug in Hybrid Electric Vehicle
Q10	10-year-old child dummy
QR code	Quick Response code
RDC DD	Residual Direct Current Detecting Device
RMS	Root Mean Square
RPN	Risk Priority Number
RuNCAP	Russian New Car Assessment Program
SOC	State of Charge
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
VE	Electrified Vehicle
VRU	Vulnerable Road User
XLPE	Cross-Linked Polyethylene

Referências

1. International Energy Agency. Global EV Outlook 2022: Securing Supplies for an Electric Future; IEA: Paris, France, 2022;

2. International Energy Agency. Global EV Outlook 2025: Expanding Sales in Diverse Markets; IEA: Paris, France, 2025;

3. Bryła, P.; Chatterjee, S.; Ciabiada-Bryła, B. Consumer Adoption of Electric Vehicles: A Systematic Literature Review. Energies (Basel) 2022, 16, 205, https://doi.org/10.3390/en16010205.
4. Barassa, E. A Construção de Uma Agenda Para a Eletromobilidade No Brasil: Competências Tecnológicas e Governança. Ph.D. Thesis, Universidade Estadual de Campinas: Campinas, Brazil, 2019.
5. Koniak, M.; Jaskowski, P.; Tomczuk, K. Review of Economic, Technical and Environmental Aspects of Electric Vehicles. Sustainability 2024, 16, 9849, https://doi.org/10.3390/su16229849.
6. ISO 26262:2018. Road Vehicles—Functional Safety (All Parts); International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2018;
7. Sanguesa, J.A.; Torres-Sanz, V.; Garrido, P.; Martinez, F.J.; Marquez-Barja, J.M. A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. Smart Cities 2021, 4, 372–404, https://doi.org/10.3390/smartcities4010022.
8. Huang, X.; Lin, Y.; Lim, M.K.; Tseng, M.-L.; Zhou, F. The Influence of Knowledge Management on Adoption Intention of Electric Vehicles: Perspective on Technological Knowledge. Industrial Management & Data Systems 2021, 121, 1481–1495, https://doi.org/10.1108/IMDS-07-2020-0411.
9. Tanţău, A.; Gavrilescu, I. Key Anxiety Factors for Buying an Electric Vehicle. Management & Marketing. Challenges for the Knowledge Society 2019, 14, 240–248, https://doi.org/10.2478/mmcks-2019-0017.
10. Velandia Vargas, J.E.; Seabra, J.E.A.; Cavaliero, C.K.N.; Walter, A.C.S.; Souza, S.P.; Falco, D.G. The New Neighbor across the Street: An Outlook for Battery Electric Vehicles Adoption in Brazil. World Electric Vehicle Journal 2020, 11, 60, https://doi.org/10.3390/wevj11030060.
11. ISO 26262-1:2018. Road Vehicles — Functional Safety — Part 1: Vocabulary; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2018;
12. IEC 62660-1:2018. Secondary Lithium-Ion Cells for the Propulsion of Electric Road Vehicles - Part 1: Performance Testing; International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2018;
13. ISO 6469-3:2021. Electrically Propelled Road Vehicles — Safety Specifications — Part 3: Electrical Safety; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2021;
14. Ruiz, V.; Pfrang, A.; Kriston, A.; Omar, N.; Van den Bossche, P.; Boon-Brett, L. A Review of International Abuse Testing Standards and Regulations for Lithium Ion Batteries in Electric and Hybrid Electric Vehicles. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2018, 81, 1427–1452, https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.195.
15. Portaria No. 169, de 3 de Maio de 2023; Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia: Rio de Janeiro, Brazil, 2023;
16. ISO 26262-3:2018. Road Vehicles — Functional Safety — Part 3: Concept Phase; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2018;
17. Kellermann, M. Ensuring Quality to Gain Access to Global Markets: A Reform Toolkit; World Bank: Washington, DC, USA; Physikalisch Technische Bundesanstalt: Braunschweig, Germany, 2019;
18. Global NCAP. Vehicle Safety Rating Labelling Schemes for Consumers; Global New Car Assessment Programme: London, UK, 2023;

19. National Highway Traffic Safety Administration. New Car Assessment Program Final Decision Notice — Advanced Driver Assistance Systems and Roadmap; NHTSA: Washington, DC, USA, 2024;
20. National Highway Traffic Safety Administration. 49 CFR § 575.302 — Vehicle Labeling of Safety Rating Information; NHTSA: Washington, DC, USA, 2023;
21. National Highway Traffic Safety Administration. New Car Assessment Program; Request for Comments. Fed Regist 2023, 88, 34366–34410.
22. U.S. Environmental Protection Agency; National Highway Traffic Safety Administration. Revisions and Additions to Motor Vehicle Fuel Economy Label. Fed Regist 2011, 76, 39478–39577.
23. U.S. Government Publishing Office. Code of Federal Regulations. Title 40, Part 600, Subpart D—Fuel Economy Labeling; Washington, DC, USA, 2024;
24. U.S. Environmental Protection Agency. Learn about the Fuel Economy and Environment Label. Available online: https://www.epa.gov/greenvehicles/learn-about-fuel-economy-label (accessed on 23 May 2025).
25. U.S. Department of Energy; U.S. Environmental Protection Agency. Learn More about the Fuel Economy Label for Electric Vehicles. Available online: https://www.fueleconomy.gov/feg/label/learn-more-electric-label.shtml (accessed on 23 May 2025).
26. United States Congress. 49 U.S.C. § 32908 — Fuel Economy Information; U.S. Government Publishing Office: Washington, DC, USA, 2023;
27. U.S. Government Publishing Office. Code of Federal Regulations. Title 49, § 575.401 — Vehicle Labeling of Fuel Economy, Greenhouse Gas and Other Pollutant Emissions Information; Washington, DC, USA, 2023;
28. CATARC. C-NCAP Management Regulation (2021 Edition); China Automotive Technology and Research Center: Tianjin, China, 2020;
29. CATARC. C-NCAP Official Website — About Us. Available online: https://www.c-ncap.org.cn/aboutus?columnId=7b969748ec9f442da3e708a0fa56c0f9 (accessed on 20 May 2025).
30. CATARC. C-NCAP Management Regulation (2024 Edition); China Automotive Technology and Research Center: Tianjin, China, 2024;
31. CATARC. C NCAP Technical Questions & Answers — FAQ. Available online: https://www.c-ncap.org.cn/questions-and-answers/cncap?columnId=00455c387ea911e8865ddbe7f209548c (accessed on 20 May 2025).
32. CATARC. Industry Think Tank — Government Technical Support Section. Available online: https://www.catarc.ac.cn/zyyw/hyzk.html (accessed on 20 May 2025).
33. Ministry of Land Infrastructure and Transport. KNCAP 20th Anniversary Ceremony — Press Release. Available online: https://www.molit.go.kr/english/USR/BORD0201/m_28286/DTL.jsp?id=eng_mltm_new&mode=view&idx=2894 (accessed on 22 May 2025).
34. Ministry of Land Infrastructure and Transport. Regulation on Motor Vehicle Safety Evaluation (MOLIT Notice 2022 305, effective 3 Jun 2022); MOLIT: Sejong, Republic of Korea, 2022;
35. Ministry of Land Infrastructure and Transport. KNCAP Test and Assessment Protocol – GR-OP-1: General Provisions (Report No. GR-OP-1); MOLIT: Sejong, Republic of Korea, 2025;

36. Ministry of Land Infrastructure and Transport. KNCAP Test and Assessment Protocol – GR-AP-1: Method for Calculating the Comprehensive Safety Grade (Report No. GR-AP-1); MOLIT: Sejong, Republic of Korea, 2025;

37. Korea Transportation Safety Authority. KNCAP Test Results Portal — 자동차 안전도평가 결과. Available online: https://www.kncap.org/indexNew.jsp (accessed on 22 May 2025).

38. Korea Transportation Safety Authority. Vehicle Safety Research — KATRI (Brochure). Available online: https://main.kotsa.or.kr/resources/upload/2024/08/brochure_eng_202408.pdf (accessed on 22 May 2025).

39. Ministry of Land Infrastructure and Transport. Regulation for Enforcement of the Motor-Vehicle Management Act (Ordinance No. 1484); MOLIT: Sejong, Republic of Korea, 2025;

40. Ministry of Land Infrastructure and Transport. KNCAP Test and Assessment Protocol – GR-OP-2: Requirements and Procedures for Re-tests (Report No. GR-OP-2); MOLIT: Sejong, Republic of Korea, 2025;

41. Euro NCAP. Euro NCAP Vision 2030: A Safer Future for Mobility; Euro NCAP: Leuven, Belgium, 2022;

42. Euro NCAP. Assessment Protocol – Adult Occupant Protection, Version 9.3; Euro NCAP: Leuven, Belgium, 2023;

43. Euro NCAP. Visual Identity Guidelines 2025, Version 2; Euro NCAP: Leuven, Belgium, 2025;

44. Euro NCAP. Application of Star Ratings Protocol, Version 1.8.1; Euro NCAP: Leuven, Belgium, 2021;

45. Euro NCAP. Test Protocol – AEB/LSS VRU Systems, Version 4.5.1; Euro NCAP: Leuven, Belgium, 2024;

46. Euro NCAP. Test Protocol – AEB Car-to-Car Systems, Version 4.3.1; Euro NCAP: Leuven, Belgium, 2024;

47. Euro NCAP. Vehicle Selection, Specification, Testing and Retesting (VSSTR) Protocol, Version 7.4.3; Euro NCAP: Leuven, Belgium, 2021;

48. Euro NCAP. Assessment Protocol – Safety Assist: Safe Driving, Version 10.4; Euro NCAP: Leuven, Belgium, 2024;

49. Euro NCAP. Assessment Protocol – Safety Assist: Collision Avoidance, Version 10.4.1; Euro NCAP: Leuven, Belgium, 2024;

50. Euro NCAP. Assessment Protocol – Child Occupant Protection, Version 8.1; Euro NCAP: Leuven, Belgium, 2023;

51. Green NCAP. The Green NCAP Privacy and GDPR Information & Website Usage. Available online: https://www.greenncap.com/privacy-policy/ (accessed on 23 May 2025).

52. Green NCAP. Green NCAP Announces Final LCA Awardees: The Greenest Cars of 2024. Available online: https://www.greenncap.com/press-releases/greenest-cars-2024/ (accessed on 23 May 2025).

53. Green NCAP. Consortium - Green NCAP. Available online: https://www.greenncap.com/members/ (accessed on 25 May 2025).

54. Green NCAP. Rating Procedure 2022 Version 3.0.0; Green NCAP: Leuven, Belgium, 2022;

55. Green NCAP. Greener Choice: LCA Award – Calculation Rules and Criteria; Green NCAP: Leuven, Belgium, 2024;
56. Green NCAP. Overall Test Procedure Version 3.0.0; Green NCAP: Leuven, Belgium, 2022;
57. Jungmeier, G.; Meltzer, A.; Beermann, M. Estimated Greenhouse Gas Emissions and Primary Energy Demand of Passenger Vehicles – Life Cycle Assessment Methodology and Data; Green NCAP: Leuven, Belgium, 2024;
58. Green NCAP. WLTC+ CAT (Cold Ambient Temperature) Test Procedure Version 2.0.0; Green NCAP: Leuven, Belgium, 2022;
59. Green NCAP. WLTC+ Test Procedure (World-Harmonised Light-Duty Vehicle Test Cycle Custom Tailored for Green NCAP) Version 3.0.0; Green NCAP: Leuven, Belgium, 2022;
60. Green NCAP. PEMS+ Test Procedure (Real-World Environmental Performance Custom Tailored for Green NCAP) Version 3.0.0; Green NCAP: Leuven, Belgium, 2022;
61. Green NCAP. Special Requirements for Hybrid Electric Vehicles Version 2.0.0; Green NCAP: Leuven, Belgium, 2022;
62. Latin NCAP. Latin NCAP - About Us. Available online: https://www.latinncap.com/en/about-us (accessed on 25 May 2025).
63. Furas, A.; Ramos, J.; Bhalla, K.; Garrido, N.; Zamora, E. Mejora de Los Estándares de Seguridad de Los Vehículos En América Latina y El Caribe a Través de La Adopción de Reglamentos ONU y Sistemas de Información al Consumidor: Informe Final Del Proyecto Bien Público Regional (BPR); Banco Interamericano de Desarrollo, 2019;
64. Latin NCAP. Car Specification, Sponsorship, Testing and Retesting Protocol 2020-2024, Version 1.1.2; Latin NCAP: Montevideo, Uruguay, 2020;
65. Latin NCAP. Assessment Protocol – Safety Assist (2026–2029); Latin NCAP: Montevideo, Uruguay, 2024;
66. Latin NCAP. Testing Protocols (2026–2029); Latin NCAP: Montevideo, Uruguay, 2024;
67. Latin NCAP. Assessment Protocol – Adult Occupant Protection (2026–2029); Latin NCAP: Montevideo, Uruguay, 2024;
68. Euro NCAP. TB 011 – Technical Bulletin – Testing of Electric Vehicles, Version 1.0; Euro NCAP: Leuven, Belgium, 2010;
69. Latin NCAP. Testing Protocol – Moose Test, Version 1.0.1; Latin NCAP: Montevideo, Uruguay, 2020;
70. Latin NCAP. Latin NCAP - FAQ. Available online: https://www.latinncap.com/en/faq (accessed on 25 May 2025).
71. Latin NCAP. Assessment Protocol – Adult Occupant Protection (2020–2024); Latin NCAP: Montevideo, Uruguay, 2020;
72. Latin NCAP. Assessment Protocol – Child Occupant Protection (2020–2024); Latin NCAP: Montevideo, Uruguay, 2020;
73. Latin NCAP. Assessment Protocol – Child Occupant Protection (2026–2029); Latin NCAP: Montevideo, Uruguay, 2024;

74. Latin NCAP. Assessment Protocol – Safety Assist (2020–2024); Latin NCAP: Montevideo, Uruguay, 2020;
75. Latin NCAP. Assessment Protocol – Pedestrian Protection (2020–2024); Latin NCAP: Montevideo, Uruguay, 2020;
76. Latin NCAP. Assessment Protocol – Pedestrian Protection (2026–2029); Latin NCAP: Montevideo, Uruguay, 2024;
77. Latin NCAP. Assessment Protocol – Overall Rating (2020–2024); Latin NCAP: Montevideo, Uruguay, 2020;
78. Latin NCAP. Assessment Protocol – Overall Rating (2026–2029); Latin NCAP: Montevideo, Uruguay, 2024;
79. Ibama; Inmetro. Portaria Conjunta No 2, de 16 de Dezembro de 2010; Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis: Brasília, Brazil; Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia: Rio de Janeiro, Brazil, 2010;
80. Inmetro. Programa Completa 15 Anos Em 2023 e Abrange 100 % Da Frota. Available online: https://www.gov.br/inmetro/pt-br/centrais-de-conteudo/noticias/inmetro-publica-portaria-com-aperfeicoamentos-do-pbe-veicular (accessed on 23 May 2025).
81. Brasil. Lei No 14.902, de 27 de Junho de 2024; Diário Oficial da União: Brasília, Brazil, 2024;
82. ABNT NBR 7024:2017. Veículos Rodoviários Automotores – Determinação Do Consumo de Combustível Em Veículos Leves; Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, Brazil, 2017;
83. Ministério da Indústria Comércio Exterior e Serviços. Portaria No 2.202, de 28 de Dezembro de 2018; Diário Oficial da União: Brasília, Brazil, 2018;
84. SAE J1634:2020. Electric Vehicle Energy Consumption and Range Test Procedure; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2020;
85. ABNT NBR 16567:2020. Veículos Rodoviários Automotores – Veículos Elétricos e Híbridos – Procedimento de Ensaio Para Determinação Do Consumo de Energia Elétrica, Autonomia e Eficiência Energética; Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, Brazil, 2020;
86. Inmetro. Veículos Leves 2025 – 17.o Ciclo: Tabela Técnica Do PBE-V; Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia: Rio de Janeiro, Brazil, 2025;
87. IEC 62660-2:2018. Secondary Lithium-Ion Cells for the Propulsion of Electric Road Vehicles - Part 2: Reliability and Abuse Testing; International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2018;
88. IEC 61851-1:2017. Electric Vehicle Conductive Charging System - Part 1: General Requirements; International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2017;
89. IEC 61851-23:2023. Electric Vehicle Conductive Charging System - Part 23: DC Electric Vehicle Supply Equipment; International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2023;
90. IEC 62196-3:2022. Plugs, Socket-Outlets, Vehicle Connectors and Vehicle Inlets – Conductive of Electric Vehicles – Part 3: Dimensional Compatibility Requirements for DC and AC/DC Pin and Contact-Tube Vehicle Couplers; International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2022;

91. ISO 26262-2:2018. Road Vehicles — Functional Safety — Part 2: Management of Functional Safety; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2018;
92. Arvidsson, R. On the Use of Ordinal Scoring Scales in Social Life Cycle Assessment. Int J Life Cycle Assess 2019, 24, 604–606, https://doi.org/10.1007/s11367-018-1557-2.
93. IEC 60812:2018. Failure Modes and Effects Analysis (FMEA and FMECA); International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2018;
94. ISO/IEC 17011:2017. Conformity Assessment — Requirements for Accreditation Bodies Accrediting Conformity Assessment Bodies; International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2017;
95. International Laboratory Accreditation Cooperation; International Accreditation Forum. Recommended Guide for Engaging with Government & Regulators; ILAC/IAF: ILAC: Silverwater, Australia; IAF: Chelsea, QC, Canada, 2018;
96. International Laboratory Accreditation Cooperation; International Accreditation Forum. Accreditation: A Global Tool to Support Public Policy; ILAC/IAF: ILAC: Silverwater, Australia; IAF: Chelsea, QC, Canada, 2023;
97. ISO/IEC 17065:2012. Conformity Assessment — Requirements for Bodies Certifying Products, Processes and Services; International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2012;
98. ISO/IEC 17025:2017. General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories; International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2017;
99. IEC 61025:2006. Fault Tree Analysis (FTA); International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2006;
100. ISO 26262-8:2018. Road Vehicles — Functional Safety — Part 8: Supporting Processes; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2018;
101. ISO 26262-5:2018. Road Vehicles — Functional Safety — Part 5: Product Development at the Hardware Level; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2018;
102. IEC 61709:2017. Electric Components - Reliability - Reference Conditions for Failure Rates and Stress Models for Conversion; International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2017;
103. Dorsz, A.; Lewandowski, M. Analysis of Fire Hazards Associated with the Operation of Electric Vehicles in Enclosed Structures. Energies (Basel) 2021, 15, 11, https://doi.org/10.3390/en15010011.
104. Bąkowski, H.; Przytuła, I.; Cebulska, W.; Hadryś, D.; Ćwiek, J. The Impact of Mechanical Failure of 18650 Batteries on the Safety of Electric Transport Operations. Energies (Basel) 2024, 17, 5980, https://doi.org/10.3390/en17235980.
105. Vega-Muratalla, V.O.; Ramírez-Márquez, C.; Lira-Barragán, L.F.; Ponce-Ortega, J.M. Review of Lithium as a Strategic Resource for Electric Vehicle Battery Production: Availability, Extraction, and Future Prospects. Resources 2024, 13, 148, https://doi.org/10.3390/resources13110148.
106. Jiang, L.; Diao, X.; Zhang, Y.; Zhang, J.; Li, T. Review of the Charging Safety and Charging Safety Protection of Electric Vehicles. World Electric Vehicle Journal 2021, 12, 184, https://doi.org/10.3390/wevj12040184.

107. Spotnitz, R.; Franklin, J. Abuse Behavior of High-Power, Lithium-Ion Cells. J Power Sources 2003, 113, 81–100, https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00488-3.

108. Wang, C.-Y.; Liu, T.; Yang, X.-G.; Ge, S.; Stanley, N. V.; Rountree, E.S.; Leng, Y.; McCarthy, B.D. Fast Charging of Energy-Dense Lithium-Ion Batteries. Nature 2022, 611, 485–490, https://doi.org/10.1038/s41586-022-05281-0.

109. Sun, P.; Bisschop, R.; Niu, H.; Huang, X. A Review of Battery Fires in Electric Vehicles. Fire Technol 2020, 56, 1361–1410, https://doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3.

110. Zhang, Z.; Dong, H.; Wang, L.; Wang, Y.; He, X. Tracing Root Causes of Electric Vehicle Fires. Energy Technology 2024, 12, https://doi.org/10.1002/ente.202400931.

111. Choudhary, A.; Fatima, S.; Panigrahi, B.K. State-of-the-Art Technologies in Fault Diagnosis of Electric Vehicles: A Component-Based Review. IEEE Transactions on Transportation Electrification 2023, 9, 2324–2347, https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3209166.

112. Rajashekara, K. Present Status and Future Trends in Electric Vehicle Propulsion Technologies. IEEE J Emerg Sel Top Power Electron 2013, 1, 3–10, https://doi.org/10.1109/JESTPE.2013.2259614.

113. Khaneghah, M.Z.; Alzayed, M.; Chaoui, H. Fault Detection and Diagnosis of the Electric Motor Drive and Battery System of Electric Vehicles. Machines 2023, 11, 713, https://doi.org/10.3390/machines11070713.

114. Pereirinha, P.G. Electric Vehicles. In Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering; García, J., Ed.; Elsevier: Oxford, UK, 2023; Vol. 1, pp. 350–387.

115. Linja-Aho, V. Electric Vehicle Charging Safety – The State of Art, Best Practices, and Regulatory Aspects. In Proceedings of the 2024 IEEE IAS Electrical Safety Workshop (ESW); IEEE, March 4 2024; pp. 1–10.

116. Wang, B.; Dehghanian, P.; Wang, S.; Mitolo, M. Electrical Safety Considerations in Large-Scale Electric Vehicle Charging Stations. IEEE Trans Ind Appl 2019, 55, 6603–6612, https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2936474.

117. Larsson, F.; Andersson, P.; Mellander, B.E. Are Electric Vehicles Safer than Combustion Engine Vehicles? In Systems Perspectives on Electromobility; Sandén, B., Ed.; Chalmers University of Technology: Gothenburg, Sweden, 2013; pp. 33–44.

118. De Hoog, J.; Jaguemont, J.; Abdel-Monem, M.; Van Den Bossche, P.; Van Mierlo, J.; Omar, N. Combining an Electrothermal and Impedance Aging Model to Investigate Thermal Degradation Caused by Fast Charging. Energies (Basel) 2018, 11, 804, https://doi.org/10.3390/en11040804.

119. Liu, Y.; Swingler, J.; Flynn, D. Failure Mode Mechanism and Effect Analysis of High Voltage DC Arcs in Electric Vehicle Cable. In Proceedings of the 2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE); IEEE, April 1 2021; pp. 6–13.

120. Han, T.; Li, W.; Zheng, Z.; Li, Y.; Chu, J.; Hao, C. Insulation Aging Evaluation Method of High Voltage Cable Based on Dielectric Loss Characteristics. Energies (Basel) 2025, 18, 1267, https://doi.org/10.3390/en18051267.

121. Zhang, Y.; Hou, Z.; Wu, K.; Wang, S.; Li, J.; Li, S. Influence of Oxygen Diffusion on Thermal Ageing of Cross-Linked Polyethylene Cable Insulation. Materials 2020, 13, 2056, https://doi.org/10.3390/MA13092056.

122. Inmetro. Máscara PBEV 2025 - Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular Available online: https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/veiculos-automotivos-pbe-veicular/mascara-pbev-2025-mar-11.pdf/view (accessed on 12 August 2025).
123. UNECE. UN Regulation No. 155 – Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles with Regards to Cyber Security and Cyber Security Management System; United Nations Economic Commission for Europe: Geneva, Switzerland, 2021;
124. ISO/SAE 21434:2021. Road Vehicles — Cybersecurity Engineering; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2021;
125. ISO/IEC 17067:2013. Conformity Assessment — Fundamentals of Product Certification and Guidelines for Product Certification Schemes; International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2013;

APÊNDICES

Apêndice A

Este apêndice apresenta a Análise de Árvore de Falhas (*Fault-Tree Analysis*, FTA) qualitativa desenvolvida para o Subsistema Bateria, contemplando o evento-topo “incêndio catastrófico do conjunto de baterias em recarga DC”. A modelagem segue a IEC 61025:2006 [100] e preserva, para cada evento, apenas os elementos necessários à rastreabilidade normativa: identificação (ID), descrição sucinta, tipo de porta lógica associada e classe de Severidade (S) atribuída segundo a ISO 26262-3:2018 [16]. As informações são resumidas na Tabela A1, enquanto a Tabela A2 apresenta os Conjuntos de Corte Mínimos (*Minimal Cut Set*, MCS) identificados para o evento-topo BT_T0 – Incêndio catastrófico do conjunto de baterias em recarga DC. A Figura A1 exibe o diagrama completo da árvore em notação padronizada.

Tabela A1. Caracterização qualitativa dos eventos da FTA – Subsistema Bateria.

ID	Evento/Condição	Gate	S[1]
BT_T0	Incêndio catastrófico do conjunto de baterias em recarga DC	EVENT	3
BT_G0	BT_CE1 ∧ BT_G_OR	INHIBIT	–
BT_CE1	SOC[2] ≥ 80 % ∧ Tamb[3] ≥ 40 °C	COND	–
BT_G_OR	OR (BT_G1…BT_G4)	OR	–
BT_G1	Curto interno em célula	IE	3
BT_B1	Defeito interno (dendrito)	BASIC	3
BT_G2	Curto externo no barramento HV (BT_B2 ∧ BT_B3)	AND	–
BT_B2	Falha de isolamento do chicote HV[4]	BASIC	3
BT_B3	Contator/Fusível HV[4] não abre	BASIC	3
BT_G3	Sobrecorrente de carga > 2C (BT_B4 ∨ BT_B5)	OR	–
BT_B4	MOSFET[5] em curto	BASIC	3
BT_B5	Protocolo CCS[6] incompleto	BASIC	2
BT_G4	Penetração mecânica	IE	3
BT_B6	Impacto lateral durante recarga	BASIC	3

[1] Classe de Severidade definida pela ISO 26262-3:2018 [16].

[2] Estado de carga (*State Of Charge*, SOC).

[3] Temperatura ambiente (Tamb).

[4] Alta tensão (*High Voltage*, HV).

[5] Transistor de efeito de campo de porta metálica (*Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*, MOSFET).

[6] Sistema de Recarga Combinado (*Combined Charging System*, CCS).

Fonte: Os autores.

Tabela A2. Conjuntos de Corte Mínimos do Subsistema Bateria.

MCS	Eventos básicos/condicionais	Nº de eventos
BT_MCS-1	BT_CE1 + BT_B1	2
BT_MCS-2	BT_CE1 + BT_B2 + BT_B3	3
BT_MCS-3	BT_CE1 + BT_B4	2
BT_MCS-4	BT_CE1 + BT_B5	2
BT_MCS-5	BT_CE1 + BT_B6	2

Fonte: Os autores.

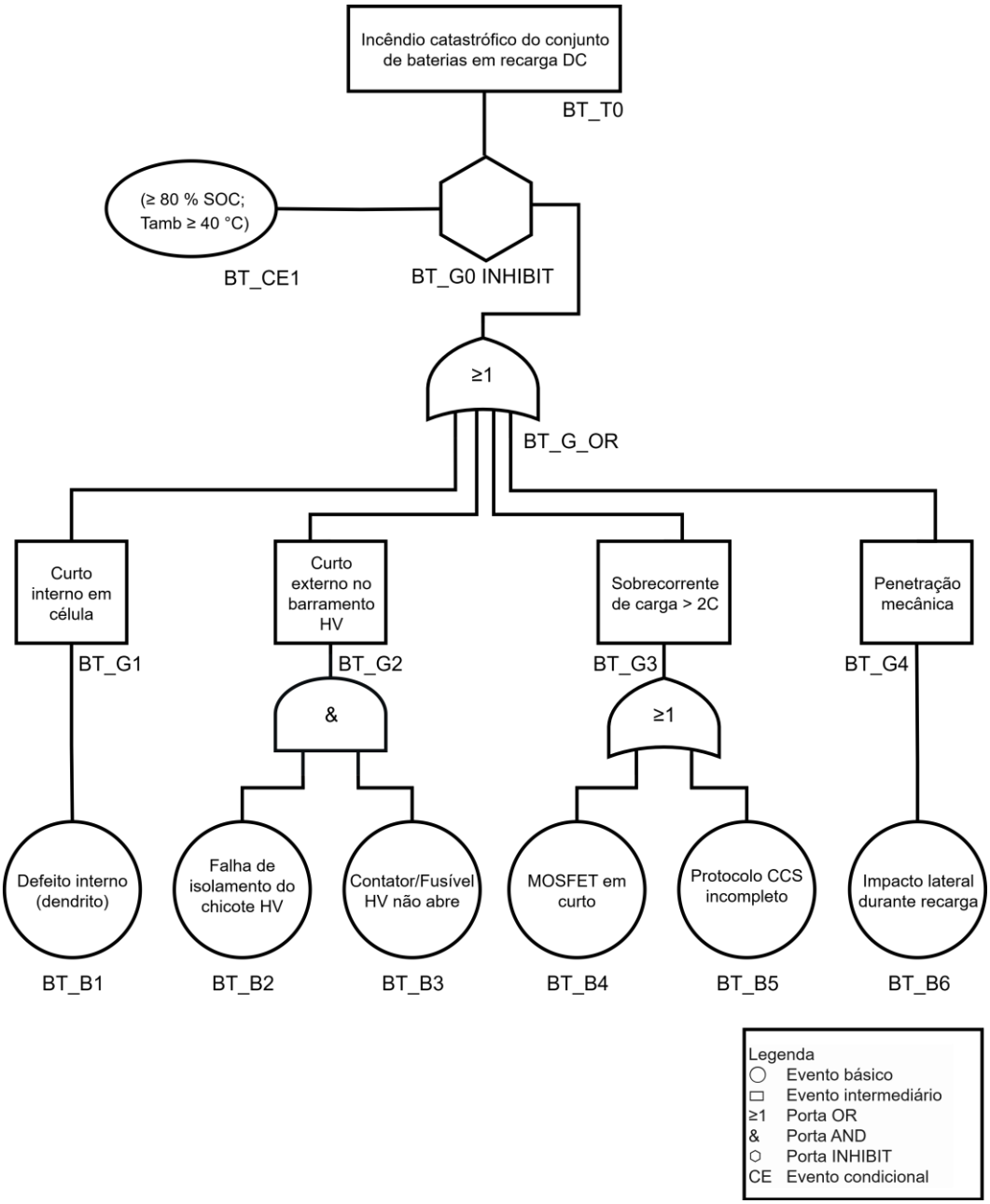


Figura A1. Diagrama FTA qualitativo do Subsistema Bateria, modelada conforme IEC 61025:2006 [100]. A porta INHIBIT BT_G0 combina a condição operacional BT_CE1 (SOC ≥ 80 % ∧ Tamb ≥ 40°C) com o gate OR agregador BT_G_OR, que reúne os quatro ramos causais independentes (BT_G1–BT_G4). Legenda dos Símbolos: ◯ evento básico; ▭ evento intermediário; ≥1 porta OR; & porta AND; ⬡ porta INHIBIT; CE evento condicional.

Fonte: Os autores.

Apêndice B

Este apêndice apresenta a Análise de Árvore de Falhas (*Fault-Tree Analysis*, FTA) qualitativa desenvolvida para o Subsistema Motor-inversor, contemplando o evento-topo “perda súbita de tração”. A modelagem segue a IEC 61025:2006 [100] e preserva, para cada evento, apenas os elementos necessários à rastreabilidade normativa: identificação (ID), descrição sucinta, tipo de porta lógica associada e classe de Severidade (S) atribuída segundo a ISO 26262-3:2018 [16]. As informações são resumidas na Tabela B1, enquanto a Tabela B2 resume os Conjuntos de Corte Mínimos (*Minimal Cut Set*, MCS) obtidos para o evento-topo MI_T0 – Perda súbita de tração. A Figura B1 exibe o diagrama completo da árvore em notação padronizada.

Tabela B1. Caracterização qualitativa dos eventos da FTA – Subsistema Motor-inversor.

ID	Evento/Condição	Gate	S[1]
MI_T0	Perda súbita de tração	EVENT	3
MI_G0	MI_CE1 ∧ MI_G_OR	INHIBIT	—
MI_CE1	Veículo em tração (> 50 km h^{-1})	COND	—
MI_G_OR	OR (MI_G1…MI_G5)	OR	—
MI_G1	Inversor bloqueado por curto no semicondutor (MI_B1)	IE	—
MI_B1	Transistor de potência em curto	BASIC	3
MI_G2	Perda de alimentação do inversor (MI_B2 ∨ MI_B3)	OR	—
MI_B2	Driver de gate desliga inversor	BASIC	3
MI_B3	Fusível HV[2] abre (atua)	BASIC	3
MI_G3	Interrupção do circuito HV[2] (pré-carga/DC 0 V) (MI_B4 ∨ MI_B5)	OR	—
MI_B4	Relé de pré-carga aberto	BASIC	3
MI_B5	Tensão do barramento DC < limite	BASIC	3
MI_G4	Falha severa no motor / circuito de fase (MI_B6 ∨ MI_B7)	OR	—
MI_B6	Chicote HV[2] do motor desconectado	BASIC	3
MI_B7	Bobina do estator em curto ou aberto	BASIC	3
MI_G5	Falha de comando / sensores da ECU[3] de tração	IE	—
MI_B8	Sensor de posição/velocidade do motor falha	BASIC	3

[1] Classe de Severidade definida pela ISO 26262-3:2018 [16].

[2] Alta tensão (*High Voltage*, HV).

[3] Unidade de controle eletrônico (*Electronic Control Unit*, ECU).

Fonte: Os autores.

Tabela B2. Conjuntos de Corte Mínimos do Subsistema Motor-inversor.

MCS	Eventos básicos/condicionais	Nº de eventos
MI_MCS-1	MI_CE1 + MI_B1	2
MI_MCS-2	MI_CE1 + MI_B2	2
MI_MCS-3	MI_CE1 + MI_B3	2
MI_MCS-4	MI_CE1 + MI_B4	2
MI_MCS-5	MI_CE1 + MI_B5	2
MI_MCS-6	MI_CE1 + MI_B6	2
MI_MCS-7	MI_CE1 + MI_B7	2
MI_MCS-8	MI_CE1 + MI_B8	2

Fonte: Os autores.

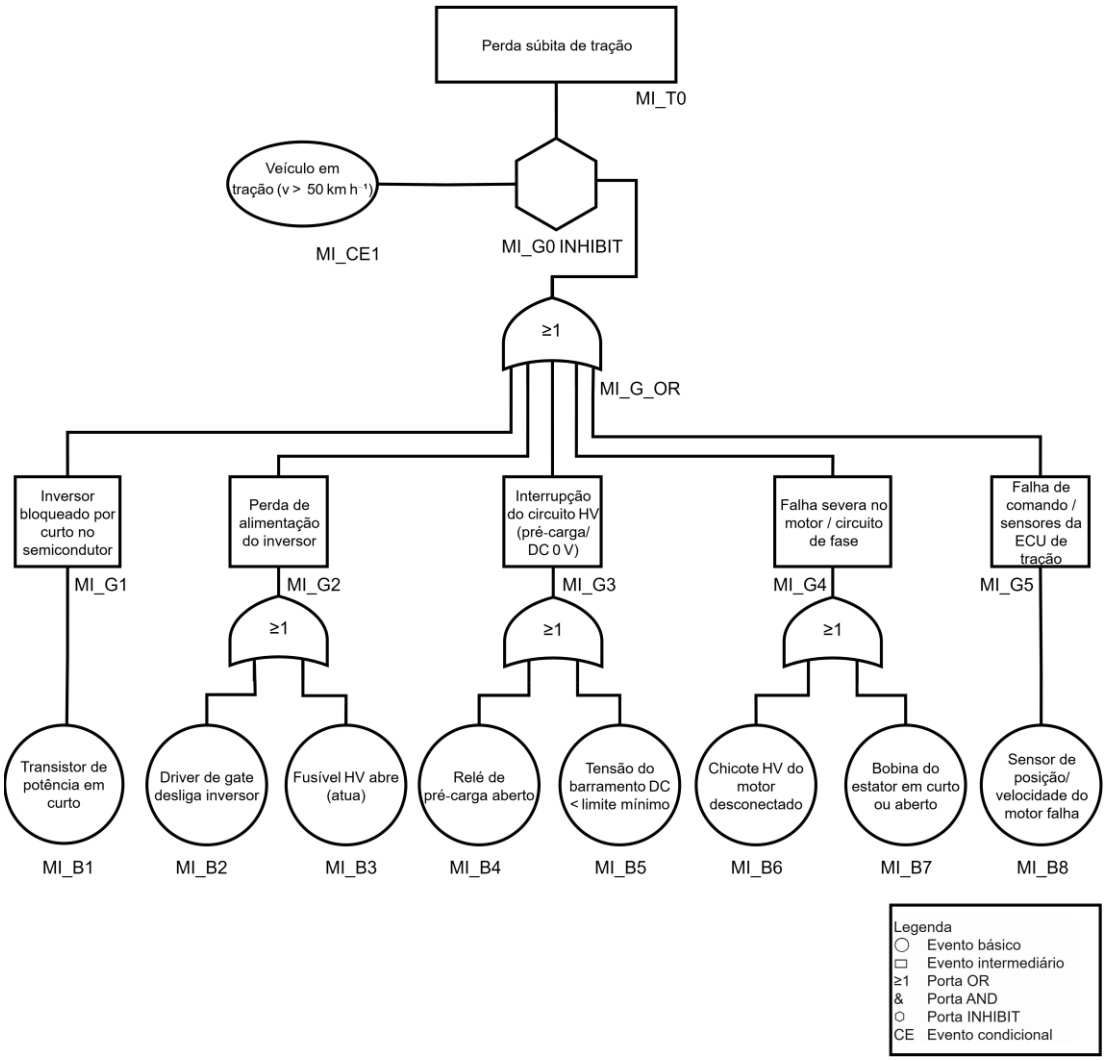


Figura B1. Diagrama FTA qualitativo do Subsistema Motor-inversor, modelada conforme IEC 61025:2006 [100]. A porta INHIBIT MI_G0 combina a condição operacional MI_CE1 (condução ativa) com o gate agregador MI_G_OR, que reúne cinco ramos causais independentes (MI_G1-MI_G5). Legenda dos Símbolos: ◯ evento básico; ▭ evento intermediário; ≥1 porta OR; & porta AND; ⬡ porta INHIBIT; CE evento condicional.

Fonte: Os autores.

Apêndice C

Este apêndice apresenta a Análise de Árvore de Falhas (*Fault-Tree Analysis*, FTA) qualitativa desenvolvida para o Subsistema Sistema de Recarga, contemplando o evento-topo “sobrecorrente sustentada no condutor de alta tensão”. A modelagem segue a IEC 61025:2006 [100] e preserva, para cada evento, apenas os elementos necessários à rastreabilidade normativa: identificação (ID), descrição sucinta, tipo de porta lógica associada e classe de Severidade (S) atribuída segundo a ISO 26262-3:2018 [16]. As informações são resumidas na Tabela C1, enquanto a Tabela C2 lista os Conjuntos de Corte Mínimos (*Minimal Cut Set*, MCS) relativos ao evento-topo SR_T0 – Sobrecorrente sustentada no condutor de alta tensão. A Figura C1 exibe o diagrama completo da árvore em notação padronizada.

Tabela C1. Caracterização qualitativa dos eventos da FTA – Subsistema Sistema de Recarga.

ID	Evento/Condição	Gate	S[1]
SR_T0	Sobrecorrente sustentada no condutor de alta tensão	EVENT	3
SR_G0	SR_CE1 ∧ SR_G_OR	INHIBIT	—
SR_CE1	I ≥ Inominal + 20% ∧ Tcon[2] ≥ 90°C	COND	—
SR_G_OR	OR (SR_G1…SR_G5)	OR	—
SR_G1	Contator principal soldado	IE	—
SR_B1	Soldagem dos contatos por arco	BASIC	3
SR_G2	Falha dupla de sensores de corrente (SR_B2 ∧ SR_B3)	AND	—
SR_B2	Sensor Hall saturado	BASIC	3
SR_B3	Canal back-up fora da faixa	BASIC	3
SR_G3	Firmware EVSE[3] sem resposta	IE	—
SR_B4	Watch-dog inoperante	BASIC	3
SR_G4	CP[4] em curto + BMS[5] inerte (SR_B5 ∧ SR_B6)	AND	—
SR_B5	Linha CP[4] curto-circuitada	BASIC	3
SR_B6	BMS[5] não corta em 100ms	BASIC	3
SR_G5	Conector superaquecido (SR_B7 ∨ SR_B8)	OR	—
SR_B7	Mola de contato degradada	BASIC	3
SR_B8	NTC[6] aberto ou deriva > ±10K	BASIC	3

[1] Classe de Severidade definida pela ISO 26262-3:2018 [16].

[2]Temperatura do conector (Tcon)

[3] Equipamento de suprimento de energia para veículo elétrico (*Electric Vehicle Supply Equipment*, EVSE).

[4] Pino de controle (*Control Pilot*, CP).

[5] Sistema de gerenciamento de bateria (*Battery Management System*, BMS)

[6] Coeficiente negativo de temperatura (*Negative Temperature Coefficient*, NTC).
Fonte: Os autores.

Tabela C2. Conjuntos de Corte Mínimos do Subsistema Sistema de Recarga.

MCS	Eventos básicos/condicionais	Nº de eventos
SR_MCS-1	SR_CE1 + SR_B1	2
SR_MCS-2	SR_CE1 + SR_B2 + SR_B3	3
SR_MCS-3	SR_CE1 + SR_B4	2
SR_MCS-4	SR_CE1 + SR_B5 + SR_B6	3
SR_MCS-5	SR_CE1 + SR_B7	2
SR_MCS-6	SR_CE1 + SR_B8	2

Fonte: Os autores.

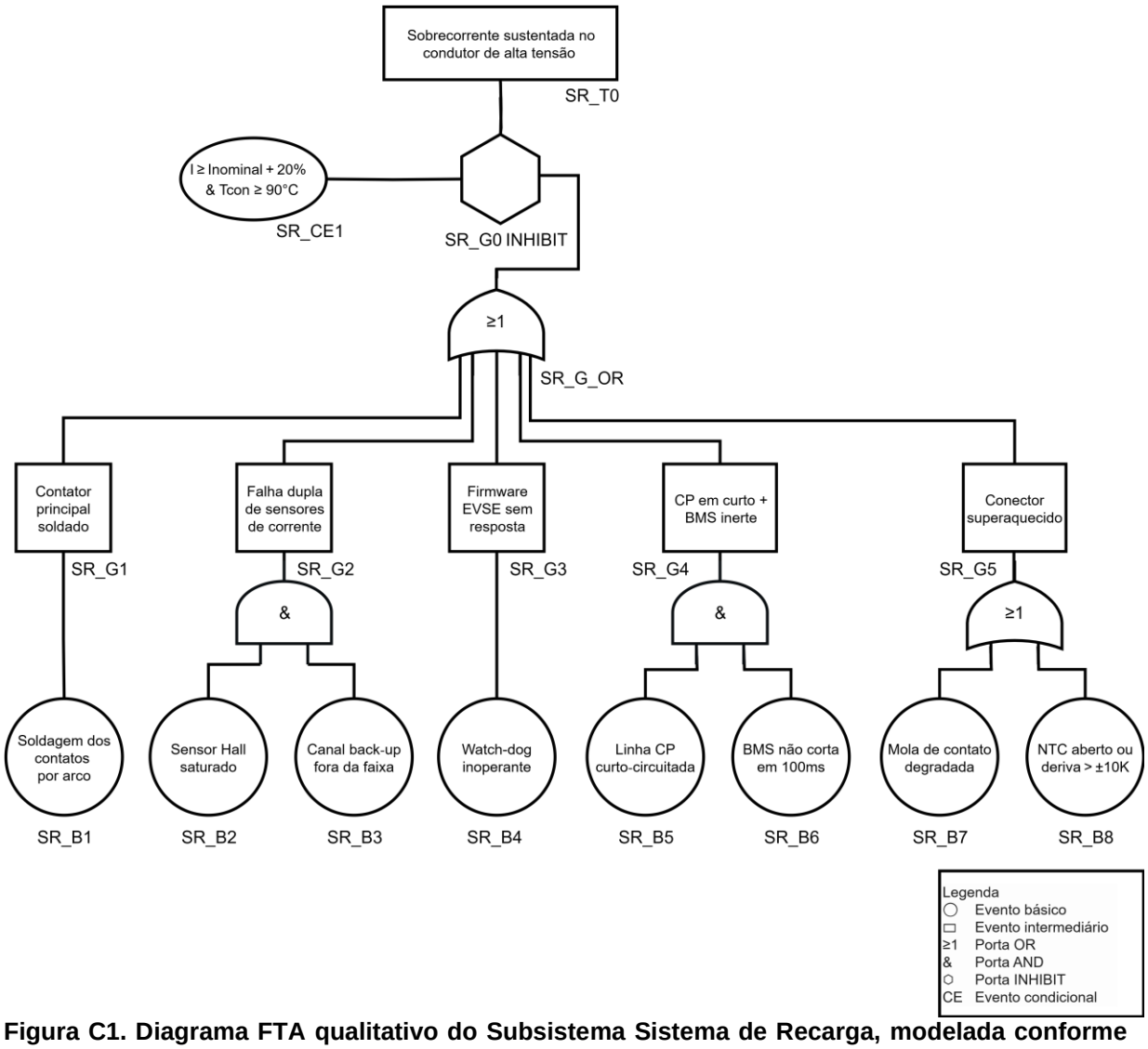


Figura C1. Diagrama FTA qualitativo do Subsistema Sistema de Recarga, modelada conforme IEC 61025:2006 [100]. A porta INHIBIT SR_G0 combina a condição operacional SR_CE1 com o gate agregador SR_G_OR, que reúne cinco ramos causais independentes (SR_G1-SR_G5). Legenda dos Símbolos: ◯ evento básico; ▭ evento intermediário; ≥1 porta OR; & porta AND; ⬡ porta INHIBIT; CE evento condicional.

Fonte: Os autores.

Apêndice D

Este apêndice apresenta a Análise de Árvore de Falhas (*Fault-Tree Analysis*, FTA) qualitativa desenvolvida para o Subsistema Cabos e Conectores, contemplando o evento-topo “arco elétrico sustentado no chicote HV”. A modelagem segue a IEC 61025:2006 [100] e preserva, para cada evento, apenas os elementos necessários à rastreabilidade normativa: identificação (ID), descrição sucinta, tipo de porta lógica associada e classe de Severidade (S) atribuída segundo a ISO 26262-3:2018 [16]. As informações são resumidas na Tabela D1, enquanto a Tabela D2 reúne os Conjuntos de Corte Mínimos (*Minimal Cut Set*, MCS) calculados para o evento-topo CC_T0 – Arco elétrico sustentado no chicote HV. A Figura D1 exibe o diagrama completo da árvore em notação padronizada.

Tabela D1. Caracterização qualitativa dos eventos da FTA – Subsistema Cabos e Conectores.

ID	Evento/Condição	Gate	S[1]
CC_T0	Arco elétrico sustentado no chicote HV[2]	EVENT	2
CC_G0	CC_CE1 ∧ CC_G_OR	INHIBIT	—
CC_CE1	Vibração contínua ≥ 500 h ano^{-1}	COND	—
CC_G_OR	OR(CC_G1…CC_G6)	OR	—
CC_G1	Abrasão do revestimento isolante (CC_B1 ∨ CC_B2)	OR	—
CC_B1	Atrito repetitivo cabo-chassi	BASIC	2
CC_B2	Amarração frouxa ou ausente	BASIC	2
CC_G2	Degradação térmica + oxidação (CC_B3 ∧ CC_B4)	AND	—
CC_B3	Exposição > 135°C por 200h	BASIC	2
CC_B4	Oxidação do XLPE[3]	BASIC	2
CC_G3	Folga em conector + vibração elevada (CC_B5 ∧ CC_B6)	AND	—
CC_B5	Trava do conector não encaixada	BASIC	2
CC_B6	Vibração > 10g RMS[4]	BASIC	2
CC_G4	Umidade no feixe (CC_B7 ∧ CC_B8)	AND	—
CC_B7	Infiltração de água	BASIC	2
CC_B8	Sensor de umidade inoperante	BASIC	2
CC_G5	Falha de detecção de PD[5] (CC_B9)	IE	—
CC_B9	Circuito PD[4] com falha latente	BASIC	2
CC_G6	Proteção de sobrecorrente inoperante (CC_B10)	IE	—
CC_B10	Fusível HV[2] não abre	BASIC	2
CC_G7	Proteção RDC-DD[6] inoperante (CC_B11 ∨ CC_B12)	OR	—
CC_B11	Sensor de corrente residual aberto/curto	BASIC	2
CC_B12	Algoritmo de detecção travado (firmware)	BASIC	2

[1] Classe de Severidade definida pela ISO 26262-3:2018 [16].
[2] Alta tensão (*High Voltage*, HV).
[3] Polietileno reticulado (*cross-Linked Polyethylene*, XLPE).
[4] Valor eficaz (*Root-Mean-Square*, RMS).
[5] Descarga parcial (*Partial Discharge*, PD).
[6] Dispositivo de detecção de corrente contínua residual (*Residual Direct Current Detecting Device*, RDC-DD)
Fonte: Os autores.

Tabela D2. Conjuntos de Corte Mínimos do Subsistema Cabos e Conectores.

MCS	Eventos básicos/condicionais	Nº de eventos
CC_MCS-1	CC_CE1 + CC_B1	2
CC_MCS-2	CC_CE1 + CC_B2	2
CC_MCS-3	CC_CE1 + CC_B3 + CC_B4	3
CC_MCS-4	CC_CE1 + CC_B5 + CC_B6	3
CC_MCS-5	CC_CE1 + CC_B7 + CC_B8	3
CC_MCS-6	CC_CE1 + CC_B9	2
CC_MCS-7	CC_CE1 + CC_B10	2
CC_MCS-8	CC_CE1 + CC_B11	2
CC_MCS-9	CC_CE1 + CC_B12	2

Fonte: Os autores.

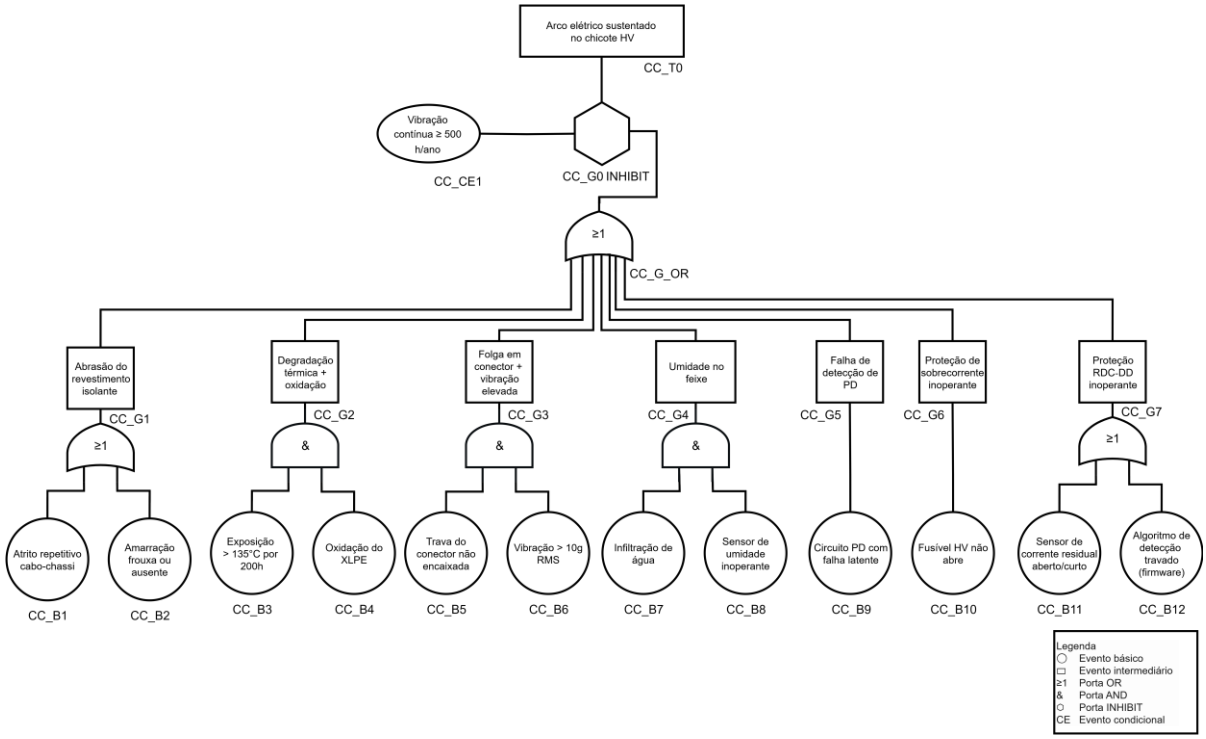


Figura D1. Diagrama FTA qualitativo do Subsistema Cabos e Conectores, modelada conforme IEC 61025:2006 [100]. A porta INHIBIT CC_G0 combina a condição operacional CC_CE1 (Vibração contínua ≥ 500 h ano⁻¹) com o gate agregador CC_G_OR, que reúne sete ramos causais independentes (CC_G1-CC_G7). Legenda dos Símbolos: ◯ evento básico; ▭ evento intermediário; ≥1 porta OR; & porta AND; ⬡ porta INHIBIT; CE evento condicional.

Fonte: Os autores.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo consolida os resultados obtidos, articulando-os aos três eixos que estruturam a tese: (i) análise do modelo regulatório e elaboração de roteiro metodológico para programas voluntários de avaliação da conformidade; (ii) diagnóstico da infraestrutura laboratorial nacional para mobilidade elétrica; e (iii) desenvolvimento e simulação de um programa voluntário de etiquetagem de segurança funcional para veículos eletrificados. São apresentados a seguir a síntese integrada dos resultados, a inter-relação entre os eixos, as implicações práticas, as limitações e perspectivas de evolução, bem como as recomendações estratégicas e as considerações finais.

3.1 Síntese integrada dos resultados

A pesquisa atingiu o objetivo geral de propor ações e estratégias para o fortalecimento da IQ aplicada à mobilidade elétrica no Brasil, com foco na avaliação da conformidade, segurança funcional e comunicação técnica ao consumidor. Os objetivos específicos também foram cumpridos, conforme sintetizado na Tabela 1, que associa cada artigo aos respectivos achados, implicações e impactos esperados.

Tabela 1. Síntese dos objetivos, achados, implicações e impactos por artigo.

Artigo	Objetivo específico	Achado-chave	Implicação direta / contribuição	Impacto esperado
Artigo 1	Analisar o modelo regulatório do Inmetro e elaborar roteiro metodológico para programas de avaliação da conformidade voluntários	Ausência de orientações operacionais específicas; desenvolvimento e validação de roteiro, com validação de especialistas de quatro segmentos da IQ	Roteiro alinhado às normas ISO/IEC 17065:2012, ISO/IEC 17067:2013 e ISO/IEC 17025:2017 e à Portaria Inmetro nº 30/2022	Harmonização regulatória; aumento da competitividade; preparação para transição à compulsoriedade
Artigo 2	Diagnosticar a infraestrutura laboratorial nacional dedicada à mobilidade elétrica e identificar lacunas críticas	Apenas 3 de 75 normas aplicáveis (≈4 %) com cobertura acreditada; ausência em segurança de baterias e compatibilidade eletromagnética (EMC); concentração geográfica	Evidencia urgência de ampliar escopos acreditados e descentralizar infraestrutura	Redução de dependência externa; diminuição de custos/prazos de certificação; fortalecimento da autonomia tecnológica
Artigo 3	Desenvolver e simular programa voluntário de etiquetagem de segurança funcional para veículos eletrificados	Viabilidade técnica do Índice de Confiabilidade Documental (ICD) integrado à ENCE do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBE-V); discriminação consistente em 5 classes (1–5)	Mecanismo padronizado de comunicação técnica ao consumidor, baseado em risco funcional e robustez da evidência	Aumento da transparência; estímulo à melhoria tecnológica; incentivo à adesão voluntária

Fonte: Os autores.

3.2 Integração dos eixos de pesquisa

A estrutura desenvolvida no Artigo 1 oferece a base para programas voluntários consistentes no Brasil, especialmente em setores de rápida evolução tecnológica, como a mobilidade elétrica. O diagnóstico apresentado no Artigo 2 demonstra que a execução desses programas, bem como a realização de ensaios previstos em normas, requer expansão e descentralização da infraestrutura laboratorial acreditada.

A proposta de etiquetagem de segurança funcional do Artigo 3 depende diretamente dessa integração. A cobertura limitada de normas cobertas pela infraestrutura laboratorial, identificada no Artigo 2, implica que, na fase-piloto do programa de etiquetagem, a viabilidade das classificações poderá ser afetada pela indisponibilidade de ensaios acreditados para componentes como baterias de alta tensão e sistemas de recarga. A Tabela 2 apresenta a síntese operacional dessas interdependências, indicando recomendações prioritárias e os atores-chave para sua implementação.

Tabela 2. Integração operacional dos eixos de pesquisa e atores-chave para implementação.

Artigo / Eixo	Recomendações práticas prioritárias	Atores-chave envolvidos
Artigo 1 – Modelo regulatório e programas voluntários	Implementar programas voluntários conforme roteiro; vincular incentivos fiscais; priorizar setores de alto risco	Inmetro, Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Conmetro), associações setoriais, organismos de avaliação da conformidade, indústria automotiva
Artigo 2 – Infraestrutura laboratorial	Expandir e acreditar laboratórios já equipados; lançar editais e crédito subsidiado; elaborar base nacional de capacidades	Inmetro, Coordenação Geral de Acreditação (Cgcre), Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (Embrapii), organismos de avaliação da conformidade, universidades, institutos de pesquisa, associações industriais
Artigo 3 – Etiquetagem de segurança funcional	Conduzir fase-piloto com ≥ 20 modelos; ajustar algoritmo com dados empíricos; integrar QR code na ENCE/PBE-V	Inmetro, indústria automotiva, organismos de avaliação da conformidade, varejistas, entidades de defesa do consumidor
Integração dos eixos	Ações coordenadas para sinergia entre programas voluntários, expansão laboratorial e comunicação ao consumidor	Coordenação interinstitucional; Comitê Técnico de IQ para Mobilidade Elétrica

Fonte: Os autores.

3.3 Implicações setoriais e recomendações de ação imediata

As implicações setoriais desta pesquisa decorrem da constatação de que a mobilidade elétrica no Brasil exige respostas rápidas e articuladas para que o país não perca competitividade global. Essas recomendações, de natureza imediata e operacional, podem ser implementadas já na etapa de transição regulatória, com efeitos de curto prazo sobre a qualidade e a segurança, bem como sobre a inserção da indústria nacional em cadeias de valor.

Primeiramente, a implementação de programas de avaliação da conformidade voluntários, alinhados à Portaria Inmetro nº 30/2022 (Brasil, 2022) e ao roteiro proposto no Artigo 1, apresenta-se como ponto de partida consistente para a ampliação da cultura de conformidade no setor. Essa medida cria demanda inicial para a estruturação dos laboratórios e para a preparação gradual da indústria, sem impor obrigatoriedade imediata. Ao oferecer previsibilidade regulatória, essa medida permite que fabricantes ajustem processos e produtos em ritmo compatível com seus ciclos de desenvolvimento, enquanto a infraestrutura laboratorial se organiza para absorver a futura demanda. Essa abordagem reduz resistências à adoção e antecipa o alinhamento com padrões técnicos internacionais.

Em segundo lugar, é necessário ampliar e acreditar a infraestrutura laboratorial, com foco em normas críticas, mediante políticas de fomento, incentivos fiscais e crédito subsidiado. O diagnóstico realizado nesta tese revela que a capacidade nacional é limitada e concentrada, com apenas 4% das normas aplicáveis cobertas por laboratórios acreditados. A acreditação, além de assegurar a confiabilidade e a comparabilidade dos resultados, possibilita o reconhecimento internacional por meio de acordos multilaterais, favorecendo exportações. A consolidação das capacidades no catálogo da Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio (RBLE) também amplia a transparência sobre a oferta de serviços e orienta investimentos estratégicos.

Além disso, a aplicação da etiqueta de segurança funcional integrada à ENCE/PBE-V, mesmo em formato inicial e com simplificações no método, representa um avanço concreto na comunicação técnica ao consumidor. Essa primeira implementação permitirá comparações objetivas entre veículos e servirá como base para coleta de dados e ajustes no protocolo, a partir dos resultados das rodadas-piloto.

O envolvimento precoce dos atores-chave – fabricantes, organismos de avaliação da conformidade e entidades de defesa do consumidor – é relevante para ampliar a legitimidade e a aceitação da etiqueta.

Por fim, a integração dessas iniciativas com políticas públicas vigentes, como o Programa Mover e a Estratégia Nacional de Infraestrutura da Qualidade (ENIQ), tende a maximizar o alcance e a efetividade das ações. A experiência do PBE-V demonstra que a vinculação a benefícios fiscais e programas de inovação acelera a adesão e consolida práticas de melhoria contínua no setor, criando um ambiente regulatório e econômico mais favorável à transição tecnológica.

3.4 Limitações e impacto potencial

As limitações desta pesquisa incluem, primeiramente, a taxa de resposta nas consultas realizadas a laboratórios e grupos de pesquisa, afetando a representatividade do levantamento e, por consequência, a abrangência das conclusões. Também foi adotada a hipótese de independência estatística entre subsistemas no cálculo do ICD, que necessita de validação empírica. No curto prazo, essa hipótese implica que as classificações da etiqueta devem ser interpretadas com cautela, sobretudo em modelos cujos subsistemas apresentem interações significativas. Outra limitação é a ausência de dados nacionais consolidados sobre custos e prazos de ensaios, o que dificulta a estimativa de impactos econômicos com precisão. Soma-se a isso a restrição do escopo da análise de risco a quatro subsistemas de alta tensão, sem incluir requisitos de cibersegurança.

Apesar dessas limitações, a implementação das ações propostas apresenta potencial qualitativo para reduzir custos de certificação, encurtar o tempo de introdução de novos modelos no mercado, ampliar a segurança funcional percebida e aumentar a competitividade da indústria nacional em cadeias globais de valor.

3.5 Perspectivas e trabalhos futuros

As perspectivas e trabalhos futuros representam a continuidade lógica das ações aqui propostas e visam consolidar a maturidade da IQ aplicada à mobilidade elétrica. Trata-se de iniciativas que demandam planejamento escalonado e

acompanhamento periódico, de modo a garantir alinhamento às tendências tecnológicas e normativas internacionais.

No curto prazo, propõe-se aplicar o roteiro metodológico em programas-piloto setoriais, mensurando custo, tempo e nível de adesão, de forma a validar sua viabilidade operacional. Paralelamente, deve-se conduzir fase-piloto da etiqueta de segurança funcional com pelo menos 20 modelos representativos, incluindo pesquisa detalhada de percepção do consumidor para avaliar clareza, utilidade e confiabilidade da informação. Também é relevante atualizar periodicamente o mapeamento da infraestrutura laboratorial nacional, monitorando a evolução da cobertura normativa e identificando áreas críticas de investimento.

Em um horizonte de médio prazo, recomenda-se ampliar a análise de risco para novos subsistemas críticos da mobilidade elétrica e incluir critérios de cibersegurança, integrando-os aos procedimentos de avaliação da conformidade. Além disso, é necessário avaliar o impacto econômico e tecnológico da adoção dos programas voluntários e das etiquetas, incorporando métricas de *recall*, tempo de introdução de novos modelos e desempenho em mercados nacional e internacional. A aplicação de tecnologias digitais, como *blockchain*, Internet das Coisas (IoT) e inteligência artificial, para rastreabilidade e monitoramento contínuo, poderá contribuir para maior confiabilidade e eficiência na verificação de conformidade.

No longo prazo, o objetivo deve ser o de estabelecer um modelo brasileiro de reconhecimento internacional de certificações e ensaios, com base em acordos multilaterais como o *International Laboratory Accreditation Cooperation Mutual Recognition Arrangement* (ILAC-MRA) e o *International Accreditation Forum Multilateral Recognition Arrangement* (IAF-MLA), de modo a ampliar a aceitação dos produtos nacionais em mercados externos. A implantação de um observatório nacional de IQ para mobilidade elétrica, integrando dados de regulação, infraestrutura laboratorial, desempenho de mercado e percepção de usuários, pode servir como plataforma de inteligência estratégica para políticas públicas e decisões industriais, fortalecendo de forma contínua a articulação entre governo, setor produtivo, academia e organismos de avaliação da conformidade para antecipar tendências e orientar investimentos.

3.6 Recomendações estratégicas

As recomendações estratégicas aqui reunidas têm caráter estruturante e visam sustentar, no médio e longo prazo, a consolidação da IQ para mobilidade elétrica. Diferenciam-se das ações imediatas por demandarem maior articulação institucional, investimentos de maior porte e integração com políticas públicas permanentes.

O fomento direcionado à acreditação deve constituir uma política contínua, com programas específicos voltados para laboratórios já equipados, priorizando áreas críticas como segurança de baterias e compatibilidade eletromagnética. Isso inclui apoio técnico para adequação às normas ISO/IEC 17025:2017 (ISO; IEC, 2017) e ISO/IEC 17065:2013 (ISO; IEC, 2013) e uma estratégia de cobertura integral das normas relevantes para a mobilidade elétrica. A ampliação da rede acreditada, conduzida com visão de longo prazo e atualização constante frente às revisões normativas internacionais, favorece a inserção da indústria nacional em cadeias globais de fornecimento e reduz vulnerabilidades decorrentes da dependência de serviços externos. Nesse sentido, análises recentes reforçam que medidas complementares no campo da regulação energética — como a expansão da medição inteligente, a calibragem de estruturas tarifárias e a definição de requisitos para integração veicular à rede (V2G) — devem caminhar em paralelo ao fortalecimento da IQ, de modo a consolidar um ecossistema regulatório coerente e robusto para a mobilidade elétrica no Brasil (Rosa *et al.,* 2023).

Paralelamente, convém promover a integração multissetorial, ampliando a cooperação entre governo, indústria e academia para o uso compartilhado de infraestrutura, intercâmbio de especialistas e formação de capital humano. Essa articulação, alinhada à ENIQ, deve harmonizar expectativas regulatórias, capacidades técnicas e prazos de implementação, ao mesmo tempo em que antecipa tendências tecnológicas. Fóruns permanentes de integração podem reduzir sobreposições de esforços e assegurar uniformidade técnica nas práticas adotadas.

Outra medida estratégica é a valorização dos programas voluntários como instrumento permanente de estímulo à melhoria técnica, mesmo após a transição de alguns setores para a compulsoriedade. A experiência do PBE-V indica que a oferta de incentivos fiscais e reconhecimento público aumenta significativamente a adesão.

Consolidar programas voluntários dessa natureza como mecanismo de resposta rápida para setores em transição tecnológica favorece a inovação, reforça a conformidade técnica e estabelece padrões de referência antes da obrigatoriedade legal.

3.7 Encerramento e visão de futuro

A presente tese evidencia que o fortalecimento da Infraestrutura da Qualidade para a mobilidade elétrica no Brasil requer uma abordagem articulada e sistêmica, integrando estrutura regulatória sólida, capacidade laboratorial distribuída e acreditada, e mecanismos de comunicação técnica transparentes ao consumidor. As três contribuições originais – o roteiro metodológico validado por especialistas, o diagnóstico da infraestrutura e a proposta de etiquetagem de segurança funcional – oferecem bases concretas para reduzir a dependência externa, ampliar a competitividade industrial e elevar o nível de segurança na transição para sistemas de transporte eletrificados.

A efetividade das medidas recomendadas dependerá da coordenação entre governo, indústria e academia, do alinhamento com políticas públicas consistentes e da garantia de que cada exigência regulatória seja sustentada por infraestrutura reconhecida e tecnicamente robusta. A viabilidade de replicação internacional, especialmente em mercados emergentes com desafios similares, reforça o potencial de o Brasil não apenas acompanhar, mas liderar iniciativas inovadoras no setor, desde que as soluções sejam adaptadas às condições normativas e institucionais locais.

A implementação coordenada e sustentada destas ações pode posicionar o país como referência regional em regulação técnica, inovação e segurança para a mobilidade elétrica. Mais do que responder a uma demanda tecnológica, trata-se de definir um padrão de excelência capaz de orientar a evolução do setor nas próximas décadas, projetando o Brasil como protagonista na construção de uma mobilidade elétrica segura, competitiva e alinhada aos compromissos globais de sustentabilidade.

4 REFERÊNCIAS

ANFAVEA. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2022**. São Paulo: Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (Anfavea), 2022. Disponível em: https://anfaveacombr-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/arquivos_anfavea_com_br/EdtBzJprInlFtzDQTww9XVcBK9T6bVs3ibDXmNSqB4kcQA?e=eSQqFA. Acesso em: 8 ago. 2025.

ANFAVEA. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2024**. São Paulo: Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (Anfavea), 2024. Disponível em: https://anfavea.com.br/site/wp-content/uploads/2024/05/ANFAVEA-ANUARIO-DIGITAL-2024-NOVOATUALIZADOalta_compressed.pdf. Acesso em: 8 ago. 2025.

ANFAVEA. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2025**. São Paulo: Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (Anfavea), 2025. Disponível em: https://anfavea.com.br/site/wp-content/uploads/2025/06/DIGITAL-ANUARIO-2025ALT.CAP_.4_compressed.pdf. Acesso em: 8 ago. 2025.

BRASIL. **Portaria Nº 30, de 25 de fevereiro de 2022**. Aprova o Modelo Regulatório do Inmetro - Visão, Objetivos, Princípios e Diretrizes. 2022. Disponível em: https://in.gov.br/web/dou/-/portaria-n-30-de-25-de-fevereiro-de-2022-383075663.

BRZEZINSKA, D.; BRYANT, P. Performance-Based Analysis in Evaluation of Safety in Car Parks under Electric Vehicle Fire Conditions. **Energies**, [*s. l.*], v. 15, n. 2, p. 649, 2022. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1073/15/2/649. Acesso em: 8 ago. 2025.

CHEN, J.; LI, K.; YANG, S. Electric Vehicle Fire Risk Assessment Based on WBS-RBS and Fuzzy BN Coupling. **Mathematics**, [*s. l.*], v. 10, n. 20, p. 3799, 2022. Disponível em: https://www.mdpi.com/2227-7390/10/20/3799. Acesso em: 8 ago. 2025.

DORSZ, A.; LEWANDOWSKI, M. Analysis of Fire Hazards Associated with the Operation of Electric Vehicles in Enclosed Structures. **Energies**, [*s. l.*], v. 15, n. 1, p. 11, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1073/15/1/11. Acesso em: 8 ago. 2025.

GLOBESCAN. **Healthy & Sustainable Living: Global Consumer Insights 2021 Highlights Report**. [*S. l.*]: GlobeScan, 2021. Disponível em: https://globescan.com/wp-content/uploads/2021/10/GlobeScan-HSL-Highlights-Report-2021.pdf. Acesso em: 8 ago. 2025.

IEA. **Global EV Outlook 2025: Expanding Sales in Diverse Markets**. Paris: International Energy Agency (IEA), 2025. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/7ea38b60-3033-42a6-9589-71134f4229f4/GlobalEVOutlook2025.pdf. Acesso em: 8 ago. 2025.

IEA. **World Energy Outlook 2024**. Paris: International Energy Agency (IEA), 2024. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/140a0470-5b90-4922-a0e9-838b3ac6918c/WorldEnergyOutlook2024.pdf. Acesso em: 8 ago. 2025.

IEC; ISO; UNIDO. **Building trust - The conformity assessment toolbox**. Geneva; Vienna: International Electrotechnical Commission (IEC); International Organization for Standardization (ISO); United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), 2023. Disponível em: https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/store/en/PUB100230.pdf. Acesso em: 8 ago. 2025.

IPCC. **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team: H. Lee, J. Romero (eds.)]** (P. Arias et al., Org.). Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf. Acesso em: 8 ago. 2025.

IPSOS. **Climate change + Consumer Behaviour: A Global Advisor survey**. [*S. l.: s. n.*], 2021. Disponível em: https://www.ipsos.com/en/climate-change-consumer-behaviour-2021. Acesso em: 8 ago. 2025.

ISO. **ISO 6469-3:2021. Electrically Propelled Road Vehicles — Safety Specifications — Part 3: Electrical Safety**. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2021.

ISO; IEC. **ISO/IEC 17025:2017. General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories**. Geneva: International Organization for Standardization (ISO); International Electrotechnical Commission (IEC), 2017. Disponível em: www.iso.org. .

ISO; IEC. **ISO/IEC 17067:2013. Conformity assessment — Fundamentals of product certification and guidelines for product certification schemes**. Geneva: International

Organization for Standardization (ISO); International Electrotechnical Commission (IEC), 2013.

JIANG, L. *et al.* Review of the Charging Safety and Charging Safety Protection of Electric Vehicles. **World Electric Vehicle Journal**, [*s. l.*], v. 12, n. 4, p. 184, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/2032-6653/12/4/184.

LINJA-AHO, V. Electric Vehicle Charging Safety – The State of Art, Best Practices, and Regulatory Aspects. *In*: , 2024. **2024 IEEE IAS Electrical Safety Workshop (ESW)**. [*S. l.*]: IEEE, 2024. p. 1–10. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/10752779/.

MCKINSEY; NIELSENIQ. **Consumers care about sustainability—and back it up with their wallets**. New York, 2023. Disponível em: https://www.mckinsey.com/industries/consumer-packaged-goods/our-insights/consumers-care-about-sustainability-and-back-it-up-with-their-wallets#/. Acesso em: 8 ago. 2025.

OECD. **Financial markets and climate transition**. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 2021. Disponível em: https://www.oecd.org/en/publications/financial-markets-and-climate-transition_ab4655d6-en.html. Acesso em: 8 ago. 2025.

ROSA, C. B. *et al.* Regulatory analysis of E-mobility for Brazil: A comparative review and outlook. **Utilities Policy**, [*s. l.*], v. 84, p. 101638, 2023. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957178723001509.

STEINBERG, D. *et al.* **Electrification & Decarbonization: Exploring U.S. Energy Use and Greenhouse Gas Emissions in Scenarios with Widespread Electrification and Power Sector Decarbonization**. [*S. l.: s. n.*], 2017. Disponível em: https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/68214.pdf. Acesso em: 8 ago. 2025.

SUN, P. *et al.* A Review of Battery Fires in Electric Vehicles. **Fire Technology**, [*s. l.*], v. 56, n. 4, p. 1361–1410, 2020. Disponível em: https://link.springer.com/10.1007/s10694-019-00944-3.

VICTOR CHOMBO, P.; LAOONUAL, Y.; WONGWISES, S. Lessons from the Electric Vehicle Crashworthiness Leading to Battery Fire. **Energies**, [*s. l.*], v. 14, n. 16, p. 4802, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1073/14/16/4802. Acesso em: 8 ago. 2025.

WANG, B. *et al.* Electrical Safety Considerations in Large-Scale Electric Vehicle Charging Stations. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [*s. l.*], v. 55, n. 6, p. 6603–6612, 2019. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/8809284/.

ZHANG, Z. *et al.* Tracing Root Causes of Electric Vehicle Fires. **Energy Technology**, [*s. l.*], v. 12, n. 12, 2024. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ente.202400931.