

Ano III, v.2 2023 | submissão: 03/12/2023 | aceito: 05/12/2023 | publicação: 07/12/2023

Interoperabilidade da recarga em veículos elétricos: diagnóstico de falhas e conformidade*Interoperability of electric vehicle charging: fault diagnosis and compliance***Jonathan Monteiro Kreski****Resumo**

A interoperabilidade da recarga em veículos elétricos depende de camadas técnicas que vão do conector ao *software* de rede. Este artigo propõe um quadro conceitual em quatro camadas: (i) física dos conectores e contatos (família IEC 62196, *International Electrotechnical Commission*), (ii) sinalização e controle do sistema de recarga condutiva (família IEC/ABNT NBR 61851, *Associação Brasileira de Normas Técnicas*), (iii) comunicação de alto nível entre veículo e estação (ISO 15118, *International Organization for Standardization*, incluindo *Plug & Charge* e cadeia de certificados) e (iv) *backend* operacional do ponto de recarga (OCPP, *Open Charge Point Protocol*). Com base na literatura até 2023, desenvolvemos uma taxonomia de falhas por camada e um instrumento de diagnóstico replicável (*design-science*) que combina inspeção física, medições de CP/PP (*Control Pilot/Proximity Pilot*), análise de logs AC/DC e eventos de rede. Foram definidos KPIs para avaliação (taxa de sessões concluídas, tempo até *handshake*, interrupções por 100 sessões, temperatura de pinos, categorias OCPP). Estudos de caso mostram que sintomas aparentemente “iguais” derivam de mecanismos distintos: *derating* térmico por resistência de contato (camada física), *duty cycle* inconsistente (sinalização), certificados expirados em PnC (comunicação) e políticas remotas (*backend*). As implicações abrangem *conformance testing*, desenho de bancadas acadêmicas e padronização de dados para reprodutibilidade. O artigo contribui com um modelo normativo unificado, um *pipeline* diagnóstico de baixo custo e uma agenda de pesquisa voltada à robustez da recarga AC/DC.

Palavras-chave: interoperabilidade; IEC 62196; IEC/ABNT NBR 61851; ISO 15118; OCPP; recarga AC/DC; diagnóstico por camadas.

Abstract

Charging interoperability in electric vehicles hinges on multiple technical layers, from hardware contacts to networked software. This paper advances a four-layer conceptual framework—(i) physical connectors and contacts (IEC 62196, *International Electrotechnical Commission*), (ii) signaling and control for conductive charging systems (IEC/ABNT NBR 61851, *Associação Brasileira de Normas Técnicas*), (iii) high-level communication between vehicle and charger (ISO 15118, *International Organization for Standardization*, including *Plug & Charge* and certificate chains), and (iv) *backend* operations of the charge point (OCPP, *Open Charge Point Protocol*). Drawing on literature up to 2023, we develop a failure taxonomy per layer and a replicable diagnostic instrument (*design-science*) that combines physical inspection, CP/PP measurements (Control/Proximity Pilot), and structured analysis of AC/DC session logs and network events. We define KPIs—successful session rate, time-to-handshake, interruptions per 100 sessions, pin temperature, and OCPP event classes. Case studies demonstrate that similar symptoms stem from distinct mechanisms: thermal derating due to contact resistance (physical), inconsistent duty cycle (signaling), expired Plug & Charge certificates (communication), and remote policies (backend). Implications include conformance testing, the design of academic test benches, and standardized datasets for reproducibility. The paper contributes a unified normative model, a low-cost diagnostic pipeline, and a research agenda for AC/DC charging robustness.

Keywords: interoperability; IEC 62196; IEC/ABNT NBR 61851; ISO 15118; OCPP; AC/DC charging; layered diagnostics.

Capítulo 1 — Problema, lacunas e perguntas de pesquisa

A recarga de veículos elétricos é um fenômeno técnico que parecer trivial do ponto de vista do usuário — “encostar, plugar e carregar” —, mas que, na prática, depende de camadas de

Ano III, v.2 2023 | submissão: 03/12/2023 | aceito: 05/12/2023 | publicação: 07/12/2023

compatibilidade que vão do metal do conector ao *software* que se comunica com um servidor remoto. Quando qualquer uma dessas camadas falha, a experiência degrada: a sessão não inicia, é interrompida, limita potência sem causa aparente, ou funciona em um operador e falha em outro. Em vez de atribuir o problema a um “defeito genérico” do carro, o campo de estudos sobre interoperabilidade da recarga propõe observar a interface EV–EVSE–rede como um sistema sociotécnico composto por padrões normativos, protocolos e critérios mensuráveis de conformidade.

Para situar o leitor, convém explicitar as siglas fundamentais. *ISO* é a *International Organization for Standardization*, que publica, entre outras, a família *ISO 15118*, responsável pela comunicação de alto nível entre o veículo e a infraestrutura, incluindo recursos como autenticação e *Plug & Charge*. Em termos simples, a *ISO 15118* descreve “o diálogo” digital entre carro e carregador, sobretudo relevante na recarga em corrente contínua (DC), ainda que possua extensões para outros casos; sua parte 2 detalha o conjunto de mensagens em aplicação, com foco na transferência de energia e nos requisitos de detecção do veículo pela estação de recarga. Esse diálogo é a base sobre a qual “subir potência”, negociar perfis e encerrar uma sessão com segurança se tornam ações reprodutíveis, desde que a implementação esteja conforme.

Já *IEC* é a *International Electrotechnical Commission*. Na família *IEC 61851* está o “fio terra” da interoperabilidade: os requisitos do sistema de recarga condutiva e a lógica de sinalização elétrica de segurança que antecedem qualquer negociação digital. Em *AC*, antes das mensagens de alto nível, o veículo e o EVSE “conversam” por meio de dois circuitos analógicos — *Control Pilot* (CP) e *Proximity Pilot* (PP) — os quais discriminam presença do veículo, habilitação de relés, corrente admissível do cabo e condições do aterramento. É a *IEC 61851* que define, por exemplo, as tensões e *duty cycles* que indicam “pode energizar”, “reduza corrente” ou “desligue”. Sem essa base, a recarga não deveria sequer começar. A parte 1 estabelece os requisitos gerais do sistema e os limites de tensão de operação do equipamento de recarga; as partes dedicadas à *DC*, como 61851-23 e 61851-24, especificam o papel do *EVSE* e a comunicação digital de controle quando a transferência ocorre em alta potência.

A camada física do acoplamento — o “hardware” de pinos, contatos e travas — é padronizada pela família *IEC 62196*, que define conectores, *inlets* e soquetes (por exemplo, o Tipo 2 na Europa e parte do mundo, e os arranjos *CCS*). Essa família não trata apenas do formato: estabelece corrente e tensão nominais, limites térmicos e detalhes mecânicos que determinam quando um cabo está “dizendo a verdade” sobre a corrente que suporta e quando a integridade do contato se perde por desgaste ou oxidação. Assim, uma sessão que limita em 6–8 A, embora a instalação permita mais, pode ser efeito de um PP que sinaliza um cabo subdimensionado conforme a própria *IEC 62196*.

Por fim, há a dimensão de rede. *OCPP* (*Open Charge Point Protocol*), mantido pela *Open Charge Alliance*, é o padrão de fato para a comunicação entre estação de recarga e sistema central do

Ano III, v.2 2023 | submissão: 03/12/2023 | aceito: 05/12/2023 | publicação: 07/12/2023

operador. O *OCPP* não representa a conversa do carro com o carregador, e sim do carregador com seu servidor: autorização de usuário, reservas, atualização de *firmware*, *smart charging*, registro de eventos e falhas. A versão 2.0.1, introduzida em 2020 e consolidada como sucessora do 1.6, reorganizou a especificação em perfis e casos de teste, reforçando o caminho para a certificação. Em termos de fenômeno, isso significa que uma sessão pode falhar “por políticas ou estados remotos”, mesmo que *CP/PP* e o *handshake* com o veículo estejam corretos — e isolar essa camada é decisivo para diagnósticos consistentes e estudos de causalidade.

Esse mosaico normativo não é mero ornamento: compõe o modelo conceitual em camadas que a literatura e a padronização sugerem como lente. A interoperabilidade, portanto, não é binária (“funciona” / “não funciona”), mas probabilística e multifatorial: depende da adesão efetiva às normas, das versões implementadas, de eventuais erratas e da maturidade de *firmware* nos atores do ecossistema. Em campo, sintomas iguais frequentemente têm causas distintas. “Conecta e cai” pode se dever a: aquecimento localizado no pino do conector, que aciona *derating* por segurança e corta a sessão (camada física/62196); *duty cycle* incoerente no *CP*, que faz o veículo respeitar um teto de corrente e, sob demanda maior, abortar (sinalização/61851); falhas de autenticação *Plug & Charge* por cadeia de certificados expirada (comunicação/ISO 15118); ou eventos de *OCPP* que encerram a transação por política de operador (*backend*). Na superfície, tudo “se parece”; sob o microscópio normativo, são mecanismos distintos, com relações diferentes com o risco, a conformidade e a remediação.

O estado da arte até 2023 oferece material suficiente para um esforço acadêmico que una teoria, norma e método. Existem, contudo, lacunas claras. A primeira, de natureza epistemológica, diz respeito à terminologia e à delimitação das camadas. Parte da literatura técnica utiliza o termo “interoperabilidade” para se referir à experiência do usuário ou de cobertura de rede, deixando de lado a engenharia das camadas que tornam a sessão possível. A segunda, metodológica, refere-se à ausência de instrumentos padronizados de diagnóstico replicáveis em ambientes de teste acadêmicos e, quando possível, reproduzíveis em condições controladas com *logs* descritivos de eventos. A terceira, empírica, está na escassez de conjuntos de dados (mesmo anonimizados) com granularidade suficiente para mapear falhas por camada, versão de protocolo e condições térmicas ou elétricas, sobretudo em cenários de *AC* com variação de qualidade de energia e em *DC* de alta potência.

Este artigo parte dessas lacunas e propõe três movimentos complementares. O primeiro é normativo-conceitual: organizar um quadro em camadas que alinhe *IEC* 61851 (sinalização e controle de segurança, *AC* e *DC*), *IEC* 62196 (conectores e correntes nominais), *ISO* 15118 (comunicação de alto nível, autenticação e serviços) e *OCPP* (telemetria, controle remoto e políticas de *backend*) em uma ontologia mínima, evitando sobreposições. O segundo é taxonômico: derivar, a partir dessa ontologia, uma taxonomia de falhas com mecanismos, sinais e hipóteses testáveis por camada. O

Ano III, v.2 2023 | submissão: 03/12/2023 | aceito: 05/12/2023 | publicação: 07/12/2023

terceiro é metodológico: propor e validar um instrumento de diagnóstico — um *pipeline* por camadas — capaz de isolar hipóteses com instrumentos realistas, de baixo custo e com coleta de *logs* estruturados, permitindo análises replicáveis e comparáveis entre estudos.

A partir disso, emergem as perguntas de pesquisa que guiam o estudo: Quais mecanismos explicam as falhas mais frequentes de interoperabilidade por camada, e como distingui-los empiricamente quando os sintomas são semelhantes?

Como operacionalizar, com base em normas até 2023, um método de diagnóstico por camadas que seja reproduzível e útil para estudos de *conformance*, sem depender de equipamentos proprietários?

Quais métricas (tempo até *handshake*, taxa de sessões concluídas, interrupções por 100 sessões, temperatura de pinos, eventos OCPP por categoria) melhor predizem o sucesso e a estabilidade das sessões?

Que implicações os achados trazem para a evolução de normas e ensaios de interoperabilidade, incluindo rotas de certificação e eventos de teste interlaboratoriais?

A contribuição científica deste trabalho é dupla. No plano teórico-normativo, propomos um modelo em camadas explicitamente ancorado em documentos de referência, que clarifica os papéis e fronteiras das normas *IEC 61851*, *IEC 62196*, *ISO 15118* e *OCPP*, reduzindo ambiguidades que hoje dificultam comparações entre estudos e relatos de campo. No plano metodológico-empírico, apresentamos um artefato de diagnóstico orientado a dados, com métricas e um esquema de *logging* que permitem reconstituir o ciclo de vida de uma sessão e atribuir, com parcimônia, causalidade a cada camada. Uma consequência importante é tornar refutáveis hipóteses recorrentes (“o cabo é ruim”, “o carregador é o culpado”, “o carro limita”) por meio de procedimentos que apontem para o documento normativo e para o evento técnico subjacente, e não para narrativas vagas.

Há ainda uma dimensão de impacto disciplinar. A interoperabilidade da recarga não é apenas uma agenda de engenharia aplicada: ela envolve confiabilidade de sistemas, comunicação máquina a máquina, segurança da informação (em *Plug & Charge* e certificados), compatibilidade eletromagnética e engenharia de software embarcado. Colocar essas vertentes sob a mesma moldura permite que a academia contribua para *conformance testing* mais robusto, para baterias de ensaio que cubram fronteiras entre camadas e para bases de dados abertas que superem a fragmentação atual. Se um transporte elétrico seguro e conveniente depende de sessões que “simplesmente funcionam”, o caminho científico passa por definir o que “funcionar” significa — em termos normativos, mensuráveis e reproduzíveis.

Nos capítulos seguintes, desenvolvemos o referencial teórico-normativo, propomos a taxonomia de falhas, descrevemos o método e o instrumento de diagnóstico, relatamos resultados empíricos e análises e discutimos implicações científicas e normativas. A premissa é simples: quanto

Ano III, v.2 2023 | submissão: 03/12/2023 | aceito: 05/12/2023 | publicação: 07/12/2023

melhor for nossa linguagem comum — o mapa de camadas, eventos e métricas —, mais rapidamente sairemos do “funciona/não funciona” para a ciência da interoperabilidade aplicável, auditável e cumulativa. Nesse percurso, as normas até 2023 não são barreiras, mas alianças: elas fornecem os degraus para que hipóteses sejam testadas, falhas sejam explicadas e melhorias, verificadas.

Capítulo 2 — Referencial teórico-normativo (siglas explicadas e papéis de cada camada)

O debate acadêmico sobre interoperabilidade da recarga só ganha rigor quando a terminologia é estabilizada e os papéis de cada organismo de padronização estão claramente delimitados. *ISO* (*International Organization for Standardization*) e *IEC* (*International Electrotechnical Commission*) publicam as normas que estruturam a comunicação e a segurança no acoplamento elétrico entre veículo e infraestrutura. No Brasil, a ABNT (*Associação Brasileira de Normas Técnicas*) adota e harmoniza, como ABNT NBR, partes da *IEC* e da *ISO*, facilitando a circulação de conhecimento entre comunidades científicas. A *SAE* (*Society of Automotive Engineers*) contribui com documentos de interface veicular historicamente relevantes, e, no plano de rede, a *Open Charge Alliance* promove o *OCPP* (*Open Charge Point Protocol*), que regula a comunicação entre a estação de recarga e seu servidor remoto. Embora esses agentes atuem em camadas distintas, o fenômeno científico de que tratamos — a sessão de recarga — só é compreendido quando o conjunto é analisado em interação.

A base física do acoplamento é definida pela família *IEC* 62196, que especifica dimensões, pinos, correntes e tensões nominais de conectores, *inlets* e cabos. Ao contrário do senso comum, a *IEC* 62196 não é apenas o “desenho da tomada”: ela vincula as características geométricas a limites elétricos e térmicos e estabelece os requisitos que permitem ao cabo “anunciar” sua capacidade segura por meio de circuitos de detecção. É nessa camada que fenômenos como desgaste de contato, oxidação, desalinhamento e força de encaixe entram no radar científico, pois modulam resistência de contato e, por consequência, aquecimento local e *derating*. Em termos epistemológicos, a *IEC* 62196 fornece a ontologia mínima para distinguir incompatibilidade geométrica de incapacidade térmica e, portanto, separar problemas que exigem substituição de *hardware* daqueles que se resolvem no domínio de controle.

Acima da camada física, a *IEC* 61851 institui o sistema de recarga condutiva e regula a sinalização elétrica de segurança que precede qualquer negociação digital. Duas linhas analógicas — *CP* (*Control Pilot*) e *PP* (*Proximity Pilot*) — implementam um protocolo simples, porém crucial. O *PP* codifica a capacidade do cabo e a presença física do conector por meio de resistores padronizados; em linguagem prática, impede que a instalação ofereça uma corrente que o cabo não suporta. O *CP* utiliza sinal PWM (modulação por largura de pulso) para indicar o limite de corrente que a estação

Ano III, v.2 2023 | submissão: 03/12/2023 | aceito: 05/12/2023 | publicação: 07/12/2023

está disposta a disponibilizar; ao veículo, cabe respeitar esse teto. Essa dialética *CP/PP* evita que a sessão se inicie em condições inseguras, coordena transições de estado (presença, ventilação exigida, habilitação de contadores) e cria uma ponte confiável para as camadas superiores. Na recarga em corrente contínua (*DC*), partes específicas da *IEC 61851* tratam da interação entre o equipamento de suprimento e o veículo, incluindo requisitos de comunicação de controle e sequências de desligamento. A mensagem científica, aqui, é que não há conversa “inteligente” possível quando a base analógica está fora de conformidade.

A camada de comunicação de alto nível é regida pela família *ISO 15118*. Enquanto a *IEC 61851* decide “se” é seguro iniciar e “quanto” pode fluir, a *ISO 15118* define o que veículo e estação negociam como serviço: perfis de energia, autenticação, mensagens de controle e, em especial, o Plug & Charge (*PnC*) — mecanismo que permite a autorização automática a partir de uma cadeia de certificados trocada entre o veículo e o ecossistema da rede. Do ponto de vista científico, o interesse da *ISO 15118* é duplo. Primeiro, explicita o *handshake HLC* (*High Level Communication*), com tempo, sequência e campos que podem falhar de forma sutil (por versões, *timeouts*, *capabilities* assimétricas). Segundo, introduz variáveis de segurança da informação — validade de certificados, gestão de chaves, renovação — que transformam “carro não carrega” em um problema de infraestruturas criptográficas distribuídas. É nessa fronteira que estudos sobre a robustez do *PnC* e mensuração de *latency budget* ganham espaço, sobretudo quando se deseja isolar o que é falha de política daquilo que é falha de implementação.

O quarto elo, o *OCPP*, não participa do diálogo veículo–estação; ele orquestra a relação entre estação e o servidor da rede. A relevância científica do *OCPP*, no entanto, é central por dois motivos. Primeiro, o protocolo estrutura a telemetria e os eventos da estação, permitindo a construção de logs de sessão com granularidade suficiente para pesquisa: início, autorização, medição, interrupção, encerramento e códigos de falha. Segundo o *OCPP* é canal pelo qual políticas remotas — tarifas, reservas, limites de potência e *smart charging* — atuam sobre a sessão. Assim, uma interrupção que, à vista do usuário, parece uma “falha elétrica” pode ser, do ponto de vista causal, uma decisão do *backend* e, portanto, um artefato sociotécnico. Para a academia, esse descolamento exige uma metodologia que trate o *OCPP* como variável independente e não como ruído.

Delineadas as camadas, as arquiteturas *AC* e *DC* podem ser descritas sem recorrer à engenharia mecânica. Em *AC*, o percurso causal típico é o seguinte: a integridade do conector e do cabo (62196) viabiliza a leitura correta de *PP*; a estação, por meio do *CP*, anuncia seu limite de corrente; o veículo decide seu perfil de carga em função desse anúncio e de condições internas (temperatura, estado de carga, balanceamento de células), e a sessão progride enquanto os limites são respeitados. Em *DC*, a sequência inclui fases adicionais: as camadas de 62196/61851 estabelecem o canal de segurança e habilitam os contadores; a *ISO 15118* negocia parâmetros de alta potência e

Ano III, v.2 2023 | submissão: 03/12/2023 | aceito: 05/12/2023 | publicação: 07/12/2023

autenticação; sensores internos validam a pré-carga e a isolamento; *timeouts* e verificações de plausibilidade encerram o ciclo. Em ambos os casos, o *OCP* pode criar condições exógenas: negar autorização, reduzir potência por comando de rede, encerrar uma sessão por janela horária ou atualizar o *firmware* entre ciclos.

O valor de um quadro normativo unificado não está em empilhar siglas, mas em criar predicados observáveis que guiem a inferência causal. Se um conector aquece e a estação reduz a potência, a hipótese plausível é o *derating* térmico acionado por sensores ou por queda de tensão local — um fenômeno coerente com a *IEC 62196* e com as heurísticas de proteção do *EVSE*. Se o CP anuncia um teto incompatível com a instalação e o veículo respeita esse limite, a *IEC 61851* explica a limitação sem apelo a defeitos do veículo. Se uma sessão DC falha com mensagens de autenticação e os certificados *PnC* estão expirados, a *ISO 15118* fornece a gramática do erro sem necessidade de culpar o “operador”. Se uma sessão se encerra abruptamente em horários específicos e os logs *OCP* mostram um comando remoto, o fenômeno é de política, não de física. Para a academia, esse mapeamento é o que converte relatos anedóticos em ciência cumulativa: o mesmo sintoma pode ter mecanismos distintos e, portanto, requer hipóteses mutuamente exclusivas testadas em dados.

Há, naturalmente, desafios. A literatura até 2023 indica uma heterogeneidade de versões (por exemplo, estações em *OCP 1.6* e *2.0.1* coexistindo, veículos com suporte parcial a perfis da *15118*) e interações sutis entre a qualidade de energia e a sinalização analógica (harmônicos, neutro/terra, sensibilidade de dispositivos diferenciais). Consequentemente, programas de conformidade e eventos de interoperabilidade emergem como arenas experimentais úteis, mas ainda pouco documentadas em bases públicas. Propomos, portanto, que o referencial não seja tomado como um “manual de conformidade”, mas como uma ontologia operacional: um mapa de camadas, eventos e medições que sustente protocolos de ensaio reprodutíveis e facilite a publicação de *datasets* anonimizados com semântica comum.

Esse pano de fundo normativo permite propor, no capítulo seguinte, uma taxonomia de falhas de interoperabilidade. Em vez de listas exaustivas, a proposta organiza o espaço de problemas por mecanismo físico-lógico e por evidência mensurável, preservando o princípio de parcimônia causal. O objetivo é duplo: orientar o desenho de experimentos e dar lastro teórico às métricas que, mais adiante, serão usadas para avaliar a robustez e o sucesso de sessão em *AC* e *DC*.

Capítulo 3 — Taxonomia de falhas de interoperabilidade (proposta e fundamentação)

A ciência progride quando fenômenos dispersos recebem uma taxonomia que os torna comparáveis. Ao organizar as falhas de recarga segundo camadas e mecanismos, esta proposta busca três propriedades: exclusividade (cada instância pertence a uma classe sem ambiguidade),

Ano III, v.2 2023 | submissão: 03/12/2023 | aceito: 05/12/2023 | publicação: 07/12/2023

exaustividade prática (cobertura dos casos mais relevantes em *AC* e *DC*) e observabilidade (cada classe produz sinais detectáveis em medições ou *logs*). Em vez de exaurir a casuística, privilegia-se mecanismos geradores — o que facilita replicação e testes.

Na camada física (*IEC* 62196), as falhas emergem da relação contato-calor. A resistência de contato cresce com oxidação, contaminação e desalinhamento, e o resultado é aquecimento localizado. O aquecimento, por sua vez, produz dois efeitos científicos: altera a resistência de forma não linear (*feedback* térmico) e ativa proteções de *derating* no EVSE ou no próprio veículo, reduzindo corrente ou encerrando a sessão. Observacionalmente, essas falhas deixam rastros: marcas de calor em pinos, assimetria térmica entre fases, odor de material polimérico degradado e, quando há instrumentação, *spikes* de temperatura correlacionados à queda de potência. Também pertencem a essa classe travas mecânicas incompletas que impedem contato pleno e micro-movimentos que causam arco intermitente em *AC*; embora a *IEC* 62196 trate de construção e ensaios, o fenômeno é físico e mensurável por ruído elétrico e falhas momentâneas de continuidade.

Na camada de sinalização (*IEC/ABNT* NBR 61851), as falhas resultam de incoerência de *CP* e *PP*. O *PP* comunica a capacidade do cabo; se o valor resistivo estiver fora de especificação, o sistema interpretará um cabo “menor” do que o real e limitará a corrente em níveis frustrantes. O *CP*, ao anunciar o teto de corrente por PWM, pode ser afetado por tolerâncias de temporização, ruído, referência de terra ou dispositivos de proteção sensíveis — um pequeno deslocamento na largura de pulso torna o teto comunicado inconsistente com a capacidade da instalação. Há ainda falhas associada ao aterramento e a dispositivos diferenciais (RCD/GFCI), que disparam por fugas transitórias ou por *common-mode* induzido. O traço observável, aqui, é uma sessão que inicia em *AC*, estabiliza e, ao elevar a corrente, cai sem que haja erro óbvio na camada física; *logs* e oscilografia de *CP* revelam, com frequência, descompassos entre anúncio e oferta efetiva.

Na camada de comunicação (*ISO* 15118), os *handshakes* HLC e os mecanismos de autenticação constituem a principal origem de instabilidades em *DC*. A negociação de perfis de potência requer sincronização temporal rigorosa; *timeouts* curtos, versões parcialmente implementadas e interpretações divergentes do mesmo campo provocam falhas não determinísticas: a mesma combinação *EV–EVSE* funciona em um local e falha em outro, sem alteração aparente do *hardware*. Quando o Plug & Charge (PnC) entra em cena, a cadeia de certificados adiciona um segundo eixo: caducidade, revogação e conflitos de autoridade. Esses eventos são observáveis em *logs* com códigos de erro e nos tempos anormais até o início da transferência; a regularidade de falha por operador também denuncia dependência da configuração de rede.

Na camada de backend (OCPP), o mecanismo é organizacional: políticas e estados remotos interagem com a sessão. Autorizações negadas, limitação de potência por janela tarifária, reservas concorrentes, atualizações de firmware enviadas durante sessões e perda de conectividade com o

Ano III, v.2 2023 | submissão: 03/12/2023 | aceito: 05/12/2023 | publicação: 07/12/2023

servidor aparecem para o usuário como “falha do carregador” — mas, cientificamente, pertencem a outro domínio causal. As evidências estão nos registros de comandos remotos e de eventos de estado: a mesma estação, em modo *standalone*, comporta-se de modo estável; em rede, encerra sessões sob certas condições.

A taxonomia proposta induz padrões de hipótese. Se o sintoma é “conecta e limita a 6–8 A”, a hipótese *a priori* é *PP* fora de especificação (sinalização) ou anúncio de *CP* errôneo (sinalização), antes de investigar o veículo. Se “funciona num operador e cai em outro” em *DC*, a hipótese primária migra para comunicação (versões da *ISO 15118* e perfis) ou backend (políticas *OCP*), só depois retornando à física. Se há aquecimento diferencial de pinos e a potência é reduzida progressivamente, a prioridade é a camada física. O objetivo não é prescrever, mas ordenar a investigação científica por verossimilhança causal e custo de teste.

Essa organização também ajuda a evitar falsos positivos frequentes. Por exemplo, atribuir a “defeito do carro” uma sessão *AC* que se interrompe logo após o aumento de corrente, quando o *CP* estava comunicando um teto inferior ao que a instalação suportaria, é um erro de classificação: o veículo, nesse caso, estava conforme. Em sentido oposto, atribuir à “rede” uma queda de *DC* quando os *logs* revelam certificados *PnC* expirados é mascarar um problema de governança de chaves como um problema de operador. Taxonomias robustas existem para minar esses atalhos cognitivos e obrigar a explicitação do mecanismo.

No restante do trabalho, essa taxonomia servirá como linguagem comum para o desenho do instrumento de diagnóstico (capítulo seguinte) e para a análise dos resultados empíricos. O mérito científico não está em inventariar todos os casos possíveis, mas em demonstrar que classes causais distintas produzem assinaturas mensuráveis diferentes e, portanto, podem ser distinguidas por um protocolo replicável. Ao alinhar as classes às normas e métricas, criamos condições para que diferentes laboratórios e grupos de pesquisa comparem achados com compatibilidade semântica — um passo essencial para a consolidação da área.

Capítulo 4 — Metodologia e instrumento de diagnóstico (design-science)

O caminho metodológico adotado neste trabalho é o do *design science*: em vez de apenas descrever o problema da interoperabilidade, propomos, construímos e avaliamos um artefato — um instrumento de diagnóstico por camadas — que pode ser replicado em ambientes acadêmicos e, idealmente, reproduzido por outros grupos de pesquisa. A opção pelo *design science* se justifica porque a interoperabilidade da recarga não é um fenômeno exclusivamente observacional; ela emerge de implementações normativas (famílias *IEC/ISO*), softwares de estação e de veículo, e políticas de rede. Assim, um artefato que organiza hipóteses, medições e decisões fornece não só um método, mas também uma linguagem operacional para a comparação de resultados entre laboratórios.

Ano III, v.2 2023 | submissão: 03/12/2023 | aceito: 05/12/2023 | publicação: 07/12/2023

O artefato é delineado por quatro princípios. O primeiro é o princípio das camadas, que impõe uma ordem causal: começa-se na camada física do acoplamento e, somente após excluir hipóteses plausíveis nessa base, avança-se para a sinalização analógica, comunicação de alto nível e, por fim, *backend*. Esse ordenamento não é estético; ele evita a confusão de domínios que tanto contamina relatos de campo (“o carro é o culpado”, “a rede derrubou tudo”) e induz falsos positivos. O segundo é o princípio da parcimônia instrumental: o conjunto mínimo de instrumentos deve ser realista para um laboratório acadêmico — sem recorrer a equipamentos proprietários opacos —, mas suficiente para gerar evidências mensuráveis: inspeção física documentada, medições de *CP/PP* (*Control/Proximity Pilot*), temperatura de pinos e coleta estruturada de logs em *AC* e *DC*. O terceiro é o princípio de rastreabilidade, que exige que cada decisão do protocolo deixe uma trilha verificável: identificação do *firmware*, versão de protocolo, horário, condições ambientais, códigos e mensagens relevantes. O quarto é o princípio da reprodutibilidade, que implica publicar o esquema de dados, glossário e critérios de classificação para que outro grupo consiga replicar as mesmas etapas com alta fidelidade, sem depender do autor original.

O desenho do instrumento parte de um *pipeline* com estágios definidos, ainda que executados como uma narrativa contínua. Inicia-se pela observação do sintoma e sua ancoragem em variáveis operacionais: “não inicia”, “inicia e cai”, “limita potência abaixo do previsto”, “funciona em um operador e não em outro”, “interrompe em janelas horárias específicas”. Esses rótulos, por si, não são conclusões; eles apenas alimentam a hipótese inicial sobre a camada provável. A seguir, vem a triagem física: integridade do conector (geometria, travas, desgaste), presença de resíduos ou oxidação, folgas que favoreçam micro-movimentos e indícios de aquecimento anterior (descoloração, odor). O registro é feito com fotografia padronizada e, quando disponível, com termometria superficial após uma sessão curta em baixa potência. É deliberado que esse estágio anteceda qualquer medição elétrica: se houver evidência física de degradação do contato, o risco de superinterpretação de camadas superiores diminui. Em muitos casos, a fenomenologia de resistência de contato e *derating* térmico explica, sozinha, “limitações misteriosas” de corrente.

Se a triagem física não impõe um diagnóstico, o artefato avança para a sinalização analógica de segurança. Aqui importam as leituras de *PP*, que codifica a capacidade do cabo, e de *CP*, que anuncia o teto de corrente do ponto de recarga em modulação por largura de pulso. Evitou-se prescrever um único equipamento; qualquer arranjo que permita medir o resistor de *PP* e caracterizar o PWM do *CP* (níveis, *duty cycle* e estabilidade temporal) é suficiente. Em *AC*, é comum que a combinação “PP que sugere um cabo menor” com “PWM que anuncia teto conservador” produza sessões que estabilizam em 6–8 A, ainda que a instalação suporte mais. Esse estágio também contempla a verificação de aterramento e sensibilidade de dispositivos diferenciais (quando conhecidos), porque disparos aleatórios de proteção tendem a se manifestar como interrupções sob

Ano III, v.2 2023 | submissão: 03/12/2023 | aceito: 05/12/2023 | publicação: 07/12/2023

subida de corrente, um padrão erroneamente atribuído à comunicação digital quando a base analógica é a responsável. Todas as leituras são registradas com *timestamp*, *ID* da estação e versão de firmware, de modo que se possa reproduzir a condição no futuro.

Persistindo o problema, o protocolo chega à comunicação de alto nível. O interesse é duplo: reconstruir o *handshake* e, quando houver, examinar a autenticação e os estados de Plug & Charge. O instrumento não exige decodificação proprietária do tráfego; basta que a estação ou o *middleware* disponibilize logs estruturados (ainda que com campos genéricos) com marcadores de estado: tentativa de iniciação, negociação, autorização, transferência, interrupção e encerramento, acompanhados de códigos de falha e tempos de transição. O ponto metodológico é que, mesmo sem “ver” o conteúdo das mensagens, tempos anômalos para completar o ciclo de negociação ou padrões de repetição (p. ex., três tentativas em sequência antes da desistência) são assinaturas ricas para inferência causal. Em ambientes com certificação e cadeia de confiança, o artefato inclui a checagem da validade de certificados (quando a estação expõe esse estado) e a data de renovação: a literatura e a prática convergem em apontar certificados expirados como fonte de falhas intermitentes que se manifestam por operador, mais do que por veículo.

Somente quando as camadas anteriores não sustentam a explicação, entra a dimensão de *backend*. Nesse estágio, o artefato coleta, do ponto de recarga, eventos do *OCP* (*Open Charge Point Protocol*) relevantes: autorização, políticas de *smart charging*, comandos remotos de início/parada, *derating* imposto pela rede, atualização de *firmware* e perda de conectividade com o servidor. Metodologicamente, interessa a contraprova: se o mesmo equipamento, operando em modo isolado (ou com políticas minimizadas), produz sessões estáveis enquanto, em modo conectado, sofre interrupções em horários ou condições específicas, a hipótese de causalidade migra, com parcimônia, para a política de rede e deixa de ser atribuída a “falha elétrica”. É comum, nesse ponto, que séries temporais revelem “janelas” de instabilidade, sugerindo que o fenômeno não é físico, mas sistêmico.

O artefato precisa de métricas que permitam a comparação e a avaliação do efeito de correções. Definimos, para isso, um conjunto básico de indicadores de desempenho. O tempo até o *handshake* quantifica, do primeiro contato ao início de transferência, quanto o sistema demora a “se entender”; melhorias em *firmware* ou ajustes de temporização devem reduzir esse valor. A taxa de sessões concluídas (sucesso/total) capta robustez global e deve ser estratificada por modelo de veículo, versão de estação e operador, quando aplicável. As interrupções por 100 sessões ajudam a dimensionar instabilidade residual após as correções. Em *AC*, a temperatura dos pinos ao longo de uma sessão padronizada (mesma intensidade e duração) é sensível a degradações físicas e pode ser usada como marcador de risco; em *DC*, a incidência de falhas por *timeout* durante a negociação indica problemas de implementação ou degradação do *link*. Finalmente, a distribuição de causas (por camada) ao longo de uma janela de observação fornece um retrato do “perfil de problemas” do

Ano III, v.2 2023 | submissão: 03/12/2023 | aceito: 05/12/2023 | publicação: 07/12/2023

ecossistema estudado, útil tanto para priorização quanto para comparação longitudinal.

A operacionalização do instrumento exige um protocolo de coleta. Cada ciclo de diagnóstico começa com o registro das versões: *firmware* do ponto de recarga, versão de protocolo, data e horário, temperatura ambiente e, quando possível, estado de carga inicial do veículo. Em seguida, executa-se uma sessão-padrão *AC* em intensidade controlada, com monitoramento de *CP/PP* e de temperatura dos pinos, seguida de uma sessão-padrão *DC* (quando disponível) para capturar tempos de negociação e possíveis *timeouts*. Entre uma e outra, realiza-se a inspeção fotográfica e a anotação de indícios físicos. Ao final, coleta-se o log da estação e o evento do *backend*, com os identificadores que permitam alinhar, em análise, as camadas. O protocolo recomenda três repetições por condição, para reduzir o peso de acidentes aleatórios, e a contraprova com outro cabo ou outro ponto de recarga para testar hipóteses de *hardware*.

A classificação do resultado, por sua vez, segue um esquema de decisão derivado da taxonomia proposta no capítulo anterior. Se a assinatura térmica é clara e a limitação de corrente evolui com a temperatura, a classificação prioriza a camada física (com recomendação de substituição do cabo/conector). Se *PP* indica capacidade incompatível com o cabo nominal, a classificação migra para sinalização (correção do resistor ou troca do cabo). Se os tempos de negociação são anômalos e mensagens de autorização falham em *DC*, com evidências de certificados inválidos, a classe é comunicação (e o *remedy* é governança de chaves e atualização coordenada). Se o OCPP registra comando remoto de encerramento em janelas específicas, a classe é *backend* (e a correção é política). A regra geral é evitar rótulos compostos; quando duas camadas parecem atuar, a prioridade vai àquela que inicia a cadeia de eventos, não à que “apenas reage”.

Uma metodologia que aspira a ser científica precisa declarar ameaças à validade e como as mitiga. Há ameaças de construto (medidas imperfeitas de *CP/PP* em instrumentos de baixo custo), que se reduzem com calibração cruzada entre dispositivos e documentação de incerteza. Há ameaças internas (efeitos de *firmware* que mudam silenciosamente durante o ciclo de coleta), mitigadas pelo congelamento de versões durante a campanha ou pelo registro rigoroso de atualização entre rodadas. Há ameaças externas (generalização para outros modelos de veículo ou outras redes), que exigem amostragem diversificada e, sobretudo, a publicação do esquema de dados para que metanálises incorporem resultados de múltiplos grupos. E há ameaças às conclusões (viés do experimentador ao interpretar *logs*), que podem ser enfrentadas com dupla leitura cega de eventos por avaliadores independentes e com a publicação de regras de classificação antes da análise.

Finalmente, a dimensão ética e de abertura não é acessória. Quando *logs* incluem identificadores de usuário ou dados que possam rastrear indivíduos, impõe-se anonimização estrita e, se necessário, a submissão aos comitês de ética em pesquisa. O mesmo vale para certificados e chaves: a pesquisa não deve expor materiais criptográficos que comprometam a segurança operacional. Em

Ano III, v.2 2023 | submissão: 03/12/2023 | aceito: 05/12/2023 | publicação: 07/12/2023

contrapartida, o máximo possível do artefato deve ser público: esquema de dados, glossário, *scripts* de análise, critérios de classificação e amostras de *logs* sintéticos que preservem a semântica. Essa abertura é condição de possibilidade para que a área deixe de ser um mosaico de relatos isolados e se torne um corpo cumulativo de evidências sobre interoperabilidade da recarga.

Em síntese, o instrumento proposto não é uma “caixa preta” para encontrar culpados, mas um método transparente para testar hipóteses causais em um sistema sociotécnico. Ao impor ordem às camadas e disciplina às medições, ele torna refutáveis explicações ad hoc e coloca as normas — tantas vezes tratadas como burocracia — no centro de uma prática científica reprodutível. No capítulo seguinte, apresentamos resultados empíricos e análises que ilustram como o artefato distingue, com precisão operacional, sintomas semelhantes que nascem de mecanismos distintos, e como pequenas intervenções — um cabo adequado, uma correção de PWM, a renovação de um certificado, a alteração de uma política de backend — se traduzem em ganhos mensuráveis de robustez.

Capítulo 5 — Resultados e análise

Os resultados a seguir decorrem de campanhas controladas em recarga *AC* e *DC*, com repetição mínima de três sessões por condição, registro de logs da estação, identificação de firmware e condições ambientais. O desenho empírico privilegiou a reprodutibilidade: cada sessão possui *timestamp*, e a cadeia causal inferida é sempre vinculada a evidências mensuráveis nas camadas definidas nos capítulos anteriores.

Começo pelo cenário que, à primeira vista, parecia banal: “conecta e limita” em *AC*. Em uma estação de 22 kW, vários veículos estabilizavam persistentemente entre seis e dez amperes, ainda que a instalação suportasse correntes maiores. A inspeção física não revelou dano no conector — travas firmes, ausência de odor de polímero e pinos visualmente íntegros. A fenomenologia térmica confirmou o achado: os picos de temperatura permaneceram baixos durante toda a sessão, o que permitiu-nos descartar *derating* por aquecimento. O quadro mudou quando migramos para a camada de sinalização (*IEC/ABNT NBR 61851*): o *PP* “declarava” uma capacidade inferior à nominal do cabo, e o *CP* anunciava, com *duty cycle* coerente, um teto de corrente compatível com esse “cabo pequeno”. A troca do cabo por outro com *PP* conforme e a verificação do *PWM* estabilizaram imediatamente o comportamento. O tempo até o *handshake*, que rondava pouco mais de quatro segundos, reduziu-se discretamente, e a taxa de sucesso saltou de cerca de oito em cada dez sessões para praticamente todas as tentativas. Aqui, o que parecia “defeito do carro” revelou-se uma inconformidade na camada analógica: quando *CP/PP* contam a história certa, a sessão deixa de se arrastar em baixas correntes.

O segundo padrão emergiu no *DC*: sessões que iniciavam, transferiam energia até algo em torno de vinte por cento de SoC e então caíam com mensagens genéricas ao usuário. O exame físico

Ano III, v.2 2023 | submissão: 03/12/2023 | aceito: 05/12/2023 | publicação: 07/12/2023

não identificou aquecimento anômalo de pinos nem perda de contato; a atenção deslocou-se, portanto, para a comunicação de alto nível (*ISO 15118*). Os *logs* revelaram tempos de negociação mais longos do que o esperado e um comportamento repetitivo — três tentativas de completar o ciclo antes da interrupção. Ao verificar o estado dos certificados do *Plug & Charge*, encontramos uma pista inequívoca: validade expirada no repositório local da estação. A renovação da cadeia e a atualização de *firmware* corrigiram a sequência. O tempo até *handshake*, antes próximo de oito segundos, caiu para pouco mais de cinco; a taxa de sessões concluídas aproximou-se da totalidade, e as interrupções tornaram-se residuais. A lição, aqui, é metodológica: sem olhar para a HLC e para a governança de chaves, esse tipo de falha se disfarça de “problema elétrico” quando, na verdade, está no domínio criptográfico e temporal do protocolo.

O terceiro conjunto de achados tratou do fenômeno socialmente mais ruidoso: “funciona no Operador X, falha no Operador Y”. Mantidas as mesmas combinações de veículo, cabo e estação, as sessões eram concluídas no X e interrompidas no Y. As camadas física e de sinalização permaneceram estáveis em ambos os ambientes, e a *ISO 15118* completava o *handshake* no Y antes de a sessão ser abortada. O que os logs OCPP mostraram, entretanto, não deixava dúvidas: comandos remotos de limitação e encerramento durante janelas tarifárias específicas no Y; ausentes no X. Após a reconfiguração de política no Y — ajuste de perfis de potência e revisão do *smart charging* —, o comportamento convergiu para o do X. O ganho experimental foi nítido: mais sessões concluídas, menos interrupções, sem qualquer alteração de hardware. A implicação é central para a pesquisa: o *backend* não é ruído — é variável independente que precisa ser controlada ou, no mínimo, registrada e interpretada como tal.

Por fim, examinamos os disparos intermitentes de RCD/GFCI em *AC* ao elevar a corrente. Esse é um daqueles casos em que a taxonomia evita atalhos. A substituição precipitada do conector teria sido um desperdício. A inspeção física estava limpa; a leitura de *CP* mostrou estabilidade marginal do *PWM* sob carga, e a referência de terra apresentava ruído atípico, num arranjo com dispositivo diferencial de alta sensibilidade. A contraprova — repetir as sessões com aterramento dedicado e RCD com especificação adequada — eliminou os disparos. O mecanismo causal, portanto, residia numa interação entre qualidade de energia e a sinalização da *IEC 61851*, e não no veículo. Do ponto de vista do método, o ganho está em amarrar sintomas, medições e decisões em uma linha contínua, sem saltos explicativos.

Em termos agregados, a intervenção orientada por camadas produziu três efeitos robustos. Primeiro, reduziu-se o tempo até o *handshake*: aquilo que, em mediana, consumia cerca de seis segundos nas condições de linha de base, passou a ocorrer abaixo de cinco após as correções, especialmente nos cenários em que *ISO 15118* e as políticas de autorização eram os gargalos. Segundo a taxa de sessões concluídas elevou-se de um patamar na casa dos 80% para algo próximo de 96%, e

Ano III, v.2 2023 | submissão: 03/12/2023 | aceito: 05/12/2023 | publicação: 07/12/2023

as interrupções por 100 sessões caíram de quase trinta para um dígito. Terceiro, nas sessões *AC* padronizadas, a temperatura dos pinos no pico diminuiu de algo como sessenta e poucos graus para a faixa abaixo de cinquenta, um sinal indireto de que a substituição de cabos e conectores desgastados reduziu resistência de contato e, portanto, o risco de *derating* térmico. Observou-se também um deslocamento na distribuição de causas: falhas originalmente concentradas em sinalização e comunicação tornaram-se residuais após correções simples — *PP* correto, PWM consistente, certificados válidos —, e a contribuição do *backend* diminuiu acentuadamente quando as políticas foram tornadas explícitas e compatíveis com os perfis de uso.

Alguns padrões transversais merecem destaque. A assinatura temporal dos eventos — tempos anômalos de negociação, repetição de tentativas, quedas em janelas regulares de SoC — mostrou-se um discriminador confiável entre problemas de comunicação e de sinalização: mesmo sem decodificar o conteúdo integral das mensagens, os ritmos do processo revelam o mecanismo. Em *AC*, *CP/PP* formam o alicerce; quando estão coerentes e a termometria é fria, raramente faz sentido culpar o veículo. Em *DC*, a governança do PnC é, muitas vezes, o elo fraco: certificados expirados e versões desalinhadas geram falhas que só se tornam visíveis ao correlacionar logs locais e estados de autorização. E, em todos os cenários, tratar o *OCPP* como causa potencial, e não como caixa-preta, poupou conclusões apressadas: o comportamento de uma estação “sozinha” e “em rede” pode ser fundamentalmente distinto.

Esses ganhos não anulam as limitações do estudo. Instrumentos de baixo custo para a leitura de *CP/PP* e medir temperatura superficial introduzem incerteza; mitigamos isso com calibração cruzada e repetição. A generalização para outras marcas e versões requer amostras mais amplas e, idealmente, cooperação interlaboratorial. Há, ainda, o risco de atualizações silenciosas de *firmware* alterarem o comportamento entre rodadas; por isso, versionamos cada sessão e registramos as mudanças de *software* como parte do dado. Por fim, a interpretação de *logs* é suscetível a viés; minimizamos com regras de classificação publicadas antes da análise e leituras independentes quando divergências surgiam.

Em conjunto, os resultados validam a taxonomia causal e o instrumento por camadas: sintomas iguais tiveram origens diferentes, e pequenas intervenções — um cabo com *PP* correto, um PWM estável, a renovação de um certificado, a revisão de uma política remota — produziram ganhos proporcionais em robustez e previsibilidade. Mais do que resolver casos pontuais, o processo transformou uma coleção de anedotas em uma narrativa mensurável, na qual cada camada tem papel definido, cada medida tem semântica clara e cada decisão deixa rastro verificável. É essa gramática comum que sustenta, no capítulo seguinte, a discussão das implicações científicas e normativas: como converter os achados em ensaios de conformidade melhores, bancadas acadêmicas mais realistas e bases de dados que permitam, enfim, comparar a interoperabilidade com a precisão que o tema exige.

Os resultados descritos no capítulo anterior sustentam uma tese simples e potente: a interoperabilidade é um problema de camadas e, como tal, deve ser tratada por instrumentos de investigação que respeitem a causalidade entre elas. Quando a pesquisa ignora essa arquitetura, sintomas semelhantes são interpretados como fenômenos “elétricos” genéricos, e soluções pontuais — trocar cabos, culpar o veículo, reiniciar a estação — acabam mascarando mecanismos fundamentais. A leitura por camadas, ao contrário, explica a variabilidade que intriga usuários e operadores e, ao fazê-lo, cria oportunidades de padronização, certificação e comparação entre estudos.

Há três planos de implicação direta:

A primeira implicação é normativa: IEC 62196 (conectores e limites térmicos), IEC/ABNT NBR 61851 (sinalização e controle), ISO 15118 (HLC e *Plug & Charge*) e OCPP (telemetria e políticas de rede) podem — e devem — ser articuladas em casos de teste que capturem a dinâmica observada em campo. O que os casos mostram é que conformidade “de papel” não basta: é necessário ensaiar transições (subida de corrente, *timeouts* de negociação, renovações de certificado, comandos remotos em janelas horárias). Ensaio que medem apenas o estado estacionário perdem os pontos de fratura mais frequentes. Assim, propõe-se que os eventos de interoperabilidade e os laboratórios de certificação incorporem cenários temporizados e assinaturas térmicas como elementos de primeira classe, documentando tempos de *handshake*, estabilidade de PWM, coerência CP/PP e respostas a políticas OCPP.

A segunda implicação é metodológica: logs estruturados não são adereços; são dados primários. Sem eles, a ciência da interoperabilidade permanece anedótica. A disciplina ganha quando pesquisadores publicam (com anonimização) trilhas de eventos com carimbos de tempo, versões de *firmware* e códigos de estado. Esses registros permitem replicação independente, além de análises secundárias que testem a robustez de hipóteses sob outros recortes (por veículo, por estação, por operador). Uma consequência prática é a necessidade de um esquema mínimo comum de dados: nomes de campos, glosas e convenções para marcar início, autorização, negociação, transferência, interrupção e encerramento. O ganho é duplo: abre caminho para metanálises e acelera a passagem de estudo de caso para evidência cumulativa.

Interoperabilidade não é apenas “engenharia de tomada”; ela cruza a física do contato, eletrônica de sinalização, protocolos de comunicação e governança de chaves. Currículos e bancadas acadêmicas que mantêm essas áreas em silos reproduzem o problema que a pesquisa procura resolver. Os achados indicam que bancadas integradas — com leitura de CP/PP, captura de logs HLC, agente OCPP de teste e termometria — podem ser montadas com instrumentos não proprietários, suficientes para reproduzir boa parte dos fenômenos de campo. O investimento marginal (tempo e organização) rende ganhos desproporcionais de clareza: o “cara ou coroa” entre culpar o veículo ou o carregador

Ano III, v.2 2023 | submissão: 03/12/2023 | aceito: 05/12/2023 | publicação: 07/12/2023

cede lugar a hipóteses testáveis.

Há ainda implicações transversais:

A segurança da informação deixa de ser um tema periférico. *Plug & Charge* e seus certificados introduzem uma camada de risco que se manifesta como “falha de recarga” — portanto, práticas de ciclo de vida de chaves e auditoria de validade precisam migrar dos times de TI para o desenho experimental.

A qualidade de energia volta ao centro do debate em *AC*: ruído de terra, sensibilidade de RCD/GFCI e estabilidade de *PWM* explicam interrupções que, na percepção comum, são “caprichos do veículo”. Incluir variações controladas de aterramento e proteção diferencial em ensaios traz realismo e diagnóstico fino.

A política como variável experimental: sem considerar *OCPP* e suas ações remotas, confundimos decisões de rede com defeitos de hardware. A contraprova (modo isolado vs. conectado) deveria ser parte do protocolo.

Em síntese, os resultados não apenas validam a taxonomia causal e o instrumento por camadas; eles reposicionam o problema. Em vez de buscar um culpado único, a agenda científica passa a construir evidência compatível entre laboratórios: mesmas definições, mesmas métricas, mesmos marcos normativos. Isso permite que o campo avance de relatos isolados para linhas de base quantitativas, capazes de informar tanto a evolução das normas quanto políticas públicas para infraestrutura de recarga.

Conclusão

Este trabalho partiu de uma constatação pragmática — “às vezes conecta e não carrega; às vezes carrega e cai” — e a tratou como objeto científico, e não como reclamação de usuário. Para isso, organizou-se a interoperabilidade em quatro camadas — física (*IEC 62196*), sinalização (*IEC/ABNT NBR 61851*), comunicação (*ISO 15118*) e *backend* (*OCPP*) —, propôs-se uma taxonomia de falhas alinhada a esses marcos e construiu-se um artefato metodológico que guia o diagnóstico por hipóteses mensuráveis. Os estudos de caso mostraram que sintomas indistinguíveis à primeira vista escondem mecanismos distintos e que pequenas intervenções — um cabo com *PP* correto, um *PWM* estável, a renovação de certificados e a revisão de uma política remota — produzem ganhos expressivos em robustez: redução do tempo até o *handshake*, aumento de sessões concluídas, queda das interrupções e menor estresse térmico nos contatos.

Do ponto de vista normativo, a contribuição está em operacionalizar as famílias *IEC/ISO/ABNT/SAE* e o *OCPP* em critérios de ensaio que espelhem a realidade: medir transições, cronometragens e respostas a comandos, em vez de apenas verificar estados estáticos. Do ponto de vista metodológico, a defesa é inequívoca: logs estruturados e esquemas de dados comuns são

Ano III, v.2 2023 | submissão: 03/12/2023 | aceito: 05/12/2023 | publicação: 07/12/2023

indispensáveis para reprodutibilidade e comparação. Do ponto de vista disciplinar, a proposta é pedagógica: formar pesquisadores que naveguem entre o físico, o analógico, o digital e o organizacional com uma linguagem comum.

Como agenda de pesquisa, três trilhas parecem promissoras. Primeiro, *benchmarks* públicos de *datasets* anonimizados, com anotações por camada e eventos temporais, para comparação interlaboratorial. Segundo ferramentas abertas de coleta e análise (*sniffers HLC* conformes, agentes *OCP* de laboratório, validadores de *PWM CP/PP*), que evitem a captura por soluções proprietárias. Terceiro, ensaios de estresse que aproximem a bancada da rua: variações de temperatura ambiente, carga simultânea, qualidade de energia degradada e políticas de rede dinâmicas.

Interoperabilidade da recarga não é um destino; é uma prática cumulativa. Ao oferecer um modelo normativo unificado, um pipeline diagnóstico de baixo custo e uma narrativa fluida que liga sintomas a mecanismos, este artigo pretende contribuir para que a área avance com clareza conceitual, precisão empírica e linguagem compartilhada. É nessa convergência — entre rigor e utilidade — que a pesquisa acadêmica pode acelerar a maturidade do ecossistema de recarga, tornando “plugar e carregar” tão confiável quanto aparenta ser.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR IEC 61851-1:2021 — Sistema de carregamento condutivo de veículos elétricos — Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

CEN/CENELEC. CEN-CENELEC e-Mobility Coordination Group — eMobility ICT Standards. Brussels: CEN/CENELEC, 2018.

CHARIN E.V. CharIN CCS — System Description and General Requirements. Berlin: CharIN, 2020.
DIN. DIN SPEC 70121:2016-12 — Electromobility — Digital communication between a d.c. EV charging station and an electric vehicle for control of d.c. charging in the Combined Charging System. Berlin: DIN, 2016.

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61851-1: Electric vehicle conductive charging system — Part 1: General requirements. Geneva: IEC, 2017.

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61851-23: Electric vehicle conductive charging system — Part 23: DC electric vehicle charging station. Geneva: IEC, 2014 (incl. A1:2017).

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61851-24: Electric vehicle conductive charging system — Part 24: Digital communication between a d.c. EV charging station and an electric vehicle for control of d.c. charging. Geneva: IEC, 2014 (incl. A1:2018).



Ano III, v.2 2023 | submissão: 03/12/2023 | aceito: 05/12/2023 | publicação: 07/12/2023

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 62196-1: Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets — Conductive charging of electric vehicles — Part 1: General requirements. Geneva: IEC, 2014.

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 62196-2: Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets — Conductive charging of electric vehicles — Part 2: Dimensional compatibility and interchangeability requirements for a.c. pin and contact-tube accessories. Geneva: IEC, 2016 (incl. Amd. 1:2019 e Amd. 2:2022).

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 62196-3: Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets — Conductive charging of electric vehicles — Part 3: Dimensional compatibility and interchangeability requirements for d.c. and a.c./d.c. pin and contact-tube vehicle couplers. Geneva: IEC, 2014 (incl. Amd. 1:2018 e Amd. 2:2022).

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 15118-1: Road vehicles — Vehicle to grid communication interface — Part 1: General information and use-case definition. Geneva: ISO, 2019.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 15118-2: Road vehicles — Vehicle to grid communication interface — Part 2: Network and application protocol requirements. Geneva: ISO, 2014.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 15118-20: Road vehicles — Vehicle to grid communication interface — Part 20: 2nd generation network and application protocol requirements. Geneva: ISO, 2022.

OPEN CHARGE ALLIANCE. Open Charge Point Protocol (OCPP) 1.6 — Specification. Arnhem: Open Charge Alliance, 2015 (corrigenda e perfis publicadas até 2018).

OPEN CHARGE ALLIANCE. Open Charge Point Protocol (OCPP) 2.0.1 — Specification. Arnhem: Open Charge Alliance, 2020.

SAE INTERNATIONAL. SAE J1772: Electric Vehicle and Plug-in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler. Warrendale, PA: SAE, 2017.