



## Interoperability Testing Guide for IoT Applications

---

Karina Branco, Valéria Lelli and Liana Carvalho

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

February 15, 2024

# Guia de Teste de Interoperabilidade

Karina da Silva Castelo Branco, Valeria Lelli Leitão Dantas, Liana Mara Carvalho de Menezes

<sup>1</sup>Universidade Federal do Ceará (UFC)  
Programa de Pós-Graduação em Ciências da Computação  
Fortaleza – CE – Brasil

Karinascb@alu.ufc.br, valerialelli@ufc.br, limacm95@gmail.com

**Abstract.** *The Internet of Things (IoT) has expanded the Internet to include smart objects, enabling the effective collection and sharing of information. Interoperability challenges arising from the diversity of devices and interaction methods are addressed by interoperability testing. This article presents a testing guide for IoT applications, built through a literature review identifying relevant technical approaches and standards, such as ISOs. Validation of the guide involved a structural evaluation using the TAM model and a controlled experiment in an IoT application, highlighting the effectiveness of the guide in planning and executing interoperability tests.*

**Resumo.** *A Internet das Coisas (IoT) ampliou a Internet para incluir objetos inteligentes, permitindo a coleta e compartilhamento eficaz de informações. Os desafios de interoperabilidade decorrentes da diversidade de dispositivos e métodos de interação são abordados por testes de interoperabilidade. Este artigo apresenta um guia de teste para aplicações IoT, construído através de uma revisão de literatura identificando abordagens e normas técnicas relevantes, como as ISOs. A validação do guia envolveu uma avaliação estrutural pelo modelo TAM e um experimento controlado em uma aplicação IoT, destacando a eficácia do guia na planificação e execução de testes de interoperabilidade.*

## 1. INTRODUÇÃO

A tecnologia tem transformado significativamente as interações humanas com os objetos cotidianos, expandindo a sua forma de comunicação. Essa ampla conectividade com a Internet deu origem à “Internet das Coisas (IoT)”, que expandiu as fronteiras da Internet para abranger esses objetos, denominados inteligentes, que interconectados podem coletar e compartilhar informações para prover serviços de forma eficaz. Conforme salientado por Razzaque et al. [Razzaque et al. 2015], o acesso à Internet tornou-se progressivamente mais acessível e rápido.

À medida que a sociedade avança, somos cada vez mais confrontados com a diversidade da conectividade entre vários dispositivos através da Internet. A sociedade tem se deparado cada vez mais com a diversidade da conectividade entre diversos dispositivos por meio da Internet. Essa extensa interconexão, representada pela conhecida “Internet das Coisas”, abre caminho para novas perspectivas futuras, nas quais a Internet abrange não apenas computadores, mas também objetos do cotidiano, tais como: geladeiras, relógios e até mesmo os carros Mattern e Floerkemeier [Mattern and Floerkemeier 2010].

Conforme abordado por Giusto et al. [Giusto et al. 2010], a “Internet das Coisas” representa um paradigma de comunicação entre objetos inteligentes e a maneira como

compartilham informações entre si e com outras entidades físicas e virtuais na rede, visando à prestação de serviços.

Vários estudos têm sido conduzidos na literatura para identificar os desafios e as lacunas existentes referente ao teste de características relevantes para aplicações IoT [Cortés et al. 2019, García et al. 2018, Kim and Ziegler 2017]. Dentre as características em que há mais esforços de teste, pode-se citar: *Segurança*, *Interoperabilidade* e *Desempenho* [Carvalho et al. 2022].

A *Interoperabilidade* se refere à capacidade de dois ou mais sistemas se comunicarem efetivamente, garantindo a integridade dos dados [Soares 2010]. Gulla et al. [Gulla et al. 2006] descrevem a interoperabilidade como a capacidade de dois aplicativos aceitarem e compreenderem os dados um do outro, completando uma tarefa específica de forma satisfatória, sem intervenção humana.

Nesse contexto, os testes de interoperabilidade abrangem a verificação da conformidade com a sintaxe e o formato dos dados, bem como a utilização de métodos de conexão apropriados e recursos de fácil utilização. Os programas de software devem ser capazes de receber e encaminhar dados de forma ágil e sem inconvenientes operacionais [Mattiello-Francisco 2009].

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é propor um guia de teste de *Interoperabilidade* para aplicações IoT, baseado na abordagem de teste para avaliar características de IoT proposta por Carvalho et al. (2022). Portanto, neste trabalho são investigadas as seguintes questões de pesquisa (QP):

**QP1.** Como avaliar a característica de interoperabilidade em aplicações IoT?

**QP2.** Quais são as abordagens usadas para avaliar a interoperabilidade em aplicações IoT?

**QP3.** Quais são os principais desafios relacionados ao teste de *Interoperabilidade* em aplicações IoT?

Além disso, neste artigo são discutidas a composição estrutural do guia e as subcaracterísticas identificadas relacionadas à *Interoperabilidade*. Para a elaboração do guia, foi realizada uma revisão da literatura seguindo os princípios de mapeamento sistemático [Kitchenham 2004] para identificar as subcaracterísticas de *Interoperabilidade*, padrões e abordagens utilizados nos testes de interoperabilidade. Foi conduzido um experimento controlado para avaliar a utilização de um guia, juntamente com a aplicação de um questionário baseado no modelo Technology Acceptance Model (TAM), com o propósito de verificar o modelo de aceitação de tecnologia. O TAM é uma teoria de sistemas de informação que modela como os usuários aceitam e adotam uma determinada tecnologia.

A estrutura restante deste artigo é organizada da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a base teórica necessária para compreender a pesquisa. A Seção 3 discorre sobre os trabalhos correlatos. A metodologia adotada nessa pesquisa é descrita na Seção 4. A Seção 5 será apresentado o seu conteúdo. A Seção 7 traz a discussão dos resultados. Por fim, a Seção 9 apresenta as conclusões e os trabalhos futuros.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. Internet das coisas**

A pesquisa conduzida por Revell [Revell 2013] , com referência bibliográfica, apresenta o conceito de “Internet das Coisas” como uma transformação paradigmática em curso, notável pela proliferação contínua de dispositivos interligados por meio da rede global de computadores. No contexto desse cenário, as “coisas” aludem a entidades físicas, incluindo objetos, ambientes e veículos, que ostentam crescente capacidade de armazenar informações e estabelecer conexões e comunicações tanto entre si como com outros dispositivos habilitados para o acesso à Internet.

De acordo com Sundmaeker et al. [Sundmaeker et al. 2010] , a finalidade da Internet das Coisas é viabilizar a conexão contínua, em qualquer localidade, de pessoas e objetos entre si, por meio de qualquer método e/ou rede, possibilitando interações com qualquer coisa e qualquer pessoa.

### **2.2. Teste de interoperabilidade em aplicações IoT**

Conforme enfatizado por Desmoulin [Desmoulin and Viho 2009] , o propósito central do teste de interoperabilidade em aplicações de Internet das Coisas é determinar se duas ou mais aplicações estão se comunicando de forma correta e observar se o comportamento está de acordo com as especificações durante o processo de suas comunicações.

Nesses casos, a mensuração da interoperabilidade torna-se desafiadora e com lacunas existentes. A medição da interoperabilidade é feita com base no grau de riqueza da comunicação (troca de informações) permitida por um determinado sistema ou grupo de sistemas [Salum et al. 2013]

## **3. TRABALHOS RELACIONADOS**

Diante dos desafios apresentados, procurou-se na literatura por trabalhos que abordassem as lacunas nos testes de interoperabilidade em aplicações IoT. A pesquisa englobou estudos, diretrizes, técnicas, metodologias, estruturas conceituais e processos de teste específicos para aplicações de Internet das Coisas (IoT) desenvolvidos nos últimos anos.

No trabalho de Mujjiga et al. [Mujjiga and Sukumaran 2007] propõem uma estrutura de geração automática de testes de interoperabilidade com base em modelos, utilizando a linguagem SAL (*SAL é a linguagem de anotação de código-fonte da Microsoft*). Os modelos são construídos para diversos tipos de dispositivos de DVD, seguindo padrões e especificações. O diferencial deste estudo está na abordagem ampla, não dependendo de padrões específicos, o que o destaca em relação a pesquisas anteriores.

No trabalho de Zaid et al. [Zaidi et al. 2009] apresenta um método baseado em assinaturas contextuais para testar a interoperabilidade em aplicações IoT, focando em propriedades de interoperabilidade e camadas em uma pilha de protocolos. O autor utiliza um algoritmo de correlação entre eventos coletados de diferentes visualizações de rede e assinaturas contextuais para verificar a validade das propriedades de interoperabilidade. Destaca-se que este trabalho se diferencia pela proposta de um guia de teste de interoperabilidade abrangente para aplicações IoT, aplicável a várias ferramentas e contextos, proporcionando flexibilidade para diversos tipos de testes..

No estudo conduzido por Carvalho et al. (2022), é apresentada uma metodologia de teste para a avaliação de atributos de aplicações Internet das Coisas (IoT) com base em diretrizes estruturadas. O trabalho propõe um guia de teste para avaliar o desempenho das aplicações IoT, organizado em 11 seções, que incluem a definição dos atributos de desempenho, contexto, casos de teste abstratos, métricas e ferramentas, entre outros. Além disso, a estrutura do guia foi instanciada especificamente para o atributo de “Desempenho”, o qual foi dividido em três subatributos: “Comportamento Temporal”, “Utilização de Recursos” e “Capacidade”. A avaliação do guia foi realizada por especialistas e por meio de um experimento controlado. Os resultados demonstraram que a abordagem teve efeitos positivos na avaliação dos aspectos de desempenho das aplicações IoT, além de identificar falhas inerentes à IoT.

Com base na análise dos trabalhos relacionados, foi possível identificar aspectos e características que os diferenciam desta proposta de estudo. Observa-se que o foco da pesquisa em questão compartilha semelhanças nas abordagens adotadas por outros trabalhos, tais como o teste de interoperabilidade em aplicações IoT. Contudo, alguns desses estudos não elucidam de forma clara quais são as abordagens usadas.

#### 4. METODOLOGIA

A metodologia para instanciación do guia se baseou na proposta de Carvalho et al. (2022). No trabalho é definida uma estrutura de guia para avaliar características IoT. A estrutura possui 11 seções, entre elas, Definições da característica, Correlações da característica, Casos de testes abstratos, Medições, dentre outras. No trabalho é apresentada a metodologia com 6 atividades para instanciar essa estrutura, para qualquer característica IoT. A seguir são detalhadas as atividades na Figura 1.



**Figure 1. Metodologia para instanciación**

Para a primeira atividade de **“Realização de uma revisão da literatura para a característica IoT selecionada”**, foi elaborada uma *string* de busca com foco na característica IoT selecionada. Deve ser feita a extração de estudos que tragam abordagens relacionadas ao teste da característica em questão, a fim de vislumbrar cenários de teste, definições de termos relevantes, métricas, dentre outros aspectos relevantes para o preenchimento das seções.

Na segunda atividade de **“Extração de dados”**, devem ser extraídos as informações que irão povoar as seções do guia.

A metodologia criada por Carvalho et al. (2022) avalia uma característica de IoT, considerando suas subcaracterísticas, quando há. Deste modo, há seções no guia que

são preenchidas para cada subcaracterística, como é o caso da seção de Medições, Caso de testes abstratos, dentre outras, em que cada subcaracterística possui os seus dados específicos. Sendo assim, a terceira atividade de **“Análise e estruturação dos dados para as subcaracterísticas”** é conduzida caso a característica da qual esteja instanciando o guia tenha subcaracterísticas, caso contrário, deve-se seguir para a quarta atividade.

Para a quarta atividade de **“Análise e estruturação dos dados para as características”**, é conduzido um processo semelhante ao da atividade anterior, só que relacionado as seções que diz respeito a característica, como é o caso de Definições da característica, Sugestões de ferramentas, dentre outras. Nessa atividade é feita a análise dos dados obtidos e adicionadas as informações a seção correspondente.

Na quinta atividade de **“Observação de aplicações IoT reais”**, é indicado utilizar ao menos duas aplicações reais de IoT em contextos diferentes. Essa atividade visa adicionar as informações as seções, que não foram obtidas por meio da literatura.

Na sexta etapa da **“Avaliação do Guia”** imperativo realizar avaliações utilizando diversos métodos de validação aplicados ao guia instanciado. Recomenda-se conduzir avaliações referentes à utilização do guia, validação da sua estrutura e análise do conteúdo. É crucial ressaltar que essas avaliações devem ser conduzidas por profissionais com conhecimento especializado nas características em questão.

A metodologia para instanciamento do guia de interoperabilidade se baseou em [Carvalho et al. 2022] uma metodologia composta por seis fases distintas, a saber: “Revisão da Literatura”, “Análise dos estudos obtidos”, “Construção da estrutura do guia”, “Observação do comportamento das aplicações IoT”, “Validação do Guia de *Interoperabilidade*” e “Refinamento do Guia”.

A string definida para esta pesquisa é apresentada na Tabela 1. A escolha da base de dados ACM se baseia no fato de que este repositório abriga publicações diretamente relacionadas ao escopo da pesquisa.

**Table 1. String de busca e a quantidade de estudos identificados**

| String de busca                                                                                                                                                                      | Base de Dados | Estudos retornados | Estudos selecionados |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------------------|----------------------|
| <i>(“internet of things”) AND (“interoperability test” or (“interoperability testing”) AND (method OR approach OR challenges OR framework OR tool OR architecture OR framework))</i> | ACM           | 393                | 50                   |

## 5. Guia de teste de interoperabilidade

O guia proposto<sup>1</sup> foi elaborado com o intuito de abarcar uma ampla gama de cenários de teste relacionados à interoperabilidade da IoT. Cada subcaracterística é minuciosamente descrita, incluindo suas definições, propriedades, casos de teste e métodos de medição.

<sup>1</sup>O guia completo está disponível neste link: <https://drive.google.com/drive/folders/1zQEFUXnORseWxoGONdaXEvdYoTaPvYcN?usp=sharing>

O guia de teste de *Interoperabilidade* foi desenvolvido utilizando como base a abordagem proposta por [Carvalho et al. 2022]. A estrutura do manual proposto é abrangente e, portanto, pode ser personalizada para testar diferentes aspectos da IoT em contexto profissional.

O Guia de Teste de *Interoperabilidade* está estruturado em 11 seções distintas conforme supracitado. A seguir são apresentadas as seções do Guia de Teste de *Interoperabilidade*.

### 5.1. Definições de interoperabilidade

Na primeira seção do Guia, são apresentadas as seis “Definições de interoperabilidade” extraídas da literatura e da norma ISO 30141:2018 [ISO/IEC 30141 2018]:

1. “A *interoperabilidade* é a capacidade de dois ou mais sistemas ou componentes de trocar informações e usar as informações que foram trocadas.” [Legner and Wende 2006]
2. “A *capacidade de um sistema para trocar dados e informações com outros sistemas sem perda ou corrupção de informações.*” [ISO 15926 2011]

### 5.2. Correlações de característica

Ao efetuar uma análise dos resultados do mapeamento sistemático apresentado por Carvalho et al. (2022), foi possível identificar um conjunto de pelo menos 27 características relacionadas à Internet das Coisas. Com o intuito de investigar as inter-relações de interoperabilidade entre essas características IoT e as demais, o tópico do guia intitulado “Correlação das Características”, apresenta 14 atributos que estão associados à *Interoperabilidade* conforme ilustrado na Figura 2.

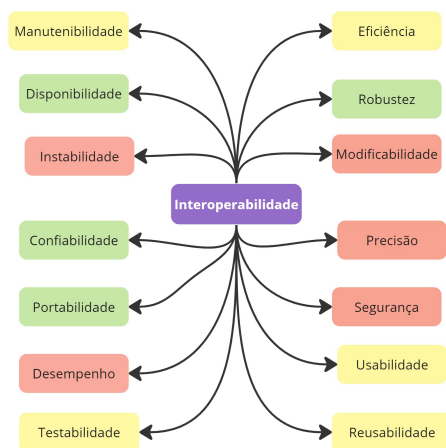


Figure 2. Correlações das características da IoT com interoperabilidade

### 5.3. Configuração do ambiente de teste

Na seção do guia intitulada “Configuração do Ambiente”, são minuciosamente elucidadas as configurações requeridas para a utilização deste guia.

#### 5.4. Subcaracterísticas de interoperabilidade

As seções 5, 6, 7 e 8 do guia abordam as subcaracterísticas “Semântica dos Dados”, “Protocolos de Comunicação”, “Integração de Sistemas” e “Protocolo de Rede”. Com o propósito de orientar os testes da característica de *Interoperabilidade* nessas seções, encontram-se os seguintes tópicos: “Definição da subcaracterística”, “Contextualização”, “Casos de Teste Abstratos” e “Medições” relacionados a cada subcaracterística.

As subdivisões correspondentes a cada característica identificada no guia apresentam os “Casos de Teste Abstratos” associados a cada subcaracterística. No total, foram especificados 25 Casos de Teste Abstratos para as subcaracterísticas da Interoperabilidade. Os casos de teste seguem a estrutura exemplificada na Tabela 2.

**Table 2. Modelo do caso de teste abstrato**  
**Caso de teste 01 - TCO1**

|                          |                                                                                                             |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Título</b>            | Leitura de dados                                                                                            |
| <b>Ambiente de teste</b> | Uma rede de dispositivos IoT heterogêneos                                                                   |
| <b>Pré-condição</b>      | Dispositivos conectados à mesma rede Wi-Fi                                                                  |
| <b>Passo a passo</b>     | 1 - Iniciar o aplicativo móvel<br>2 -Selecionar a leitura de um dado<br>3 -Verificar o dado exibido na tela |
| <b>Pós-condições</b>     | O dado exibido na tela do dispositivo móvel deve corresponder ao mesmo dado solicitado pelo atuador         |

Foram selecionadas 19 métricas previamente documentadas na literatura para auxiliar na avaliação da Interoperabilidade. Essas métricas seguem a estrutura exposta na Tabela 3.

**Table 3. Modelo de métrica**  
**Capacidade de dispositivos - M01**

|                   |                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Propósito</b>  | Avaliar a capacidade de diferentes dispositivos IoT interagirem uns com os outros de forma eficaz.                                                                                                          |
| <b>Método</b>     | Realizar testes de interoperabilidade com diferentes combinações de dispositivos IoT.                                                                                                                       |
| <b>Medida</b>     | <b>Taxa de Sucesso</b> = (Número de Interações Bem-Sucedidas / Número Total de Interações) x 100                                                                                                            |
| <b>Explicação</b> | Calcula a taxa de sucesso em porcentagem, onde o número de interações bem-sucedidas é dividido pelo número total de interações realizadas e multiplicado por 100 para obter a representação em porcentagem. |
| <b>Referência</b> | [ISO/IEC 30141 2018][Atzori et al. 2010]                                                                                                                                                                    |

##### 5.4.1. Impacto das subcaracterísticas

Os impactos dessas subcaracterísticas “Semântica dos Dados”, “Protocolos de Comunicação”, “Integração de Sistemas” e “Protocolo de Rede” na interoperabilidade

em IoT podem ser significativos. A falta de interoperabilidade pode resultar em sistemas incompatíveis que não podem se comunicar entre si, o que pode limitar a eficiência e a eficácia da IoT.

Para estabelecer as interações entre as quatro subcaracterísticas de interoperabilidade supracitadas, é essencial analisar como cada uma delas influencia as outras características. Vale ressaltar que essa influência é contextual e depende da aplicação que está sendo testada. No guia é fornecida uma visão geral dessas interações para as quatro subcaracterísticas. Na Figura 3, são apresentadas as interações da subcaracterística “Semântica dos Dados” com outras características.

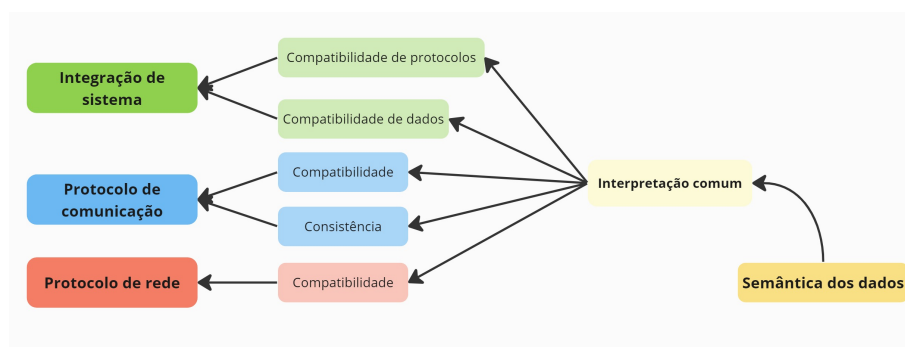


Figure 3. Impacto da subcaracterística “Semântica dos Dados”

#### 5.4.2. Custo-benefício

Foi adotada uma fórmula para calcular o custo-benefício, divergente daquela proposta por Carvalho et al. (2022). Optou-se por uma criação de uma nova fórmula fundamentada na norma ISO 30141:2018 [ISO/IEC 30141 2018]. O cálculo do custo-benefício envolve a relação entre o impacto da característica e o custo da execução dos testes. No caso da interoperabilidade em IoT, pode-se calcular o custo-benefício da seguinte forma:

- **Quantidade de caso de teste (CTE):** Representa a quantidade total de casos de testes elaborados.
- **Tempo médio de teste (TC):** Representa o tempo médio do profissional para realizar os casos de teste.
- **Custo de Material (CM):** o custo dos recursos materiais necessários para realizar o teste.
- **Custo de Tempo (CT):** o tempo gasto pelo responsável pelo teste.
- **Custo de Esforço (CE):** o esforço humano necessário para realizar o teste.

A fórmula de custo-benefício considerando esses fatores pode ser definida como:

$$Custo - Benefício(CB) = (CTE * TC + CM) / (CT + CE)(1)$$

#### 5.4.3. Sugestões de ferramentas

Uma outra seção do guia diz respeito às “Sugestões de Ferramentas” para automatizar o teste de interoperabilidade. Esta seção apresenta um conjunto abrangente de ferramentas

provenientes da literatura que podem ser utilizadas para apoiar o processo de teste de interoperabilidade no contexto da Internet das Coisas.

Neste segmento, foram catalogadas oito ferramentas, das quais apenas uma é de código fechado. Para cada ferramenta identificada, foram estabelecidos os seguintes aspectos: descrição detalhada; metodologia de teste empregada; ambiente de teste utilizado; processo de execução do teste; tipo de licença; e disponibilidade da ferramenta.

### 5.5. Exemplo de uso do guia

Um exemplo prático da aplicação do guia de teste de *Interoperabilidade* para aplicações IoT pode ser observado em um contexto de casa inteligente, onde diversos dispositivos IoT de diferentes fabricantes são utilizados, tais como fechaduras, lâmpadas, aspiradores, ar-condicionados e termostatos, todos esses dispositivos inteligentes. Nesse cenário, o guia de teste de interoperabilidade desempenha um papel fundamental ao permitir a avaliação da capacidade desses dispositivos em interagir harmoniosamente com a aplicação que os gerencia.

## 6. Avaliação do GUIA

Na avaliação do guia de teste de interoperabilidade em aplicações IoT, adotamos uma abordagem bifásica, composta por um experimento controlado seguido por uma análise da estrutura utilizando o Modelo de Aceitação de Tecnologia (TAM, do inglês *Technology Acceptance Model*) em uma amostra heterogênea de alunos de graduação e pós-graduação matriculados na disciplina de Verificação e Validação.

Essa abordagem proporcionou uma diversidade de perspectivas e níveis de experiência, enriquecendo a análise da aceitação do guia de teste de interoperabilidade.

### 6.1. Aula de nivelamento sobre teste de interoperabilidade

Inicialmente, procedeu-se à realização de uma aula de instrução sobre teste de interoperabilidade, conduzida por uma especialista. Durante essa aula, foram apresentadas explicações teóricas acompanhadas pela execução prática envolvendo aplicações reais. A prática incluiu a manipulação de comandos de ações por meio de objetos inteligentes. O propósito dessa atividade foi homogeneizar o nível de conhecimento da turma em relação ao teste de interoperabilidade.

### 6.2. Aplicação IoT - Rottas

Com o propósito de aprimorar a mobilidade estudantil, o aplicativo disponibiliza dados detalhados e atualizados sobre o transporte público no campus universitário, facilitando o planejamento eficiente das viagens e reduzindo o tempo de espera nas paradas de ônibus. As funcionalidades essenciais do Rottas compreendem:

- **Visualização de Rotas e Horários:** acesso às informações das rotas intracampi e intercampi, juntamente com os horários de partida e chegada dos ônibus.
- **Acompanhamento em Tempo Real:** acompanhar a localização em tempo real dos ônibus intracampi, evitando longos períodos de espera nas paradas.
- **Estimativa de Chegada:** consulta às estimativas de horário de chegada dos ônibus, facilitando o planejamento das viagens.

- **Localização das Paradas:** fornece informações precisas sobre a localização das paradas intracampi.
- **Busca de Locais na UFC:** pesquisar locais específicos dentro do campus, como prédios, faculdades e bibliotecas, para uma melhor orientação.
- **Filtragem e Ordenação de Ônibus:** filtrar e ordenar os ônibus de uma linha específica com base na parada e/ou horário, facilitando a escolha da opção mais adequada.

### 6.3. Perfil dos participantes

O estudo envolveu um total de 18 alunos, dos quais apenas 2 eram provenientes de programas de pós-graduação, enquanto os demais 16 eram graduandos. Notavelmente, 10 dos 18 alunos desempenham papéis profissionais simultaneamente no mercado de trabalho e integram a comunidade acadêmica, evidenciando uma dualidade em seus envolvimento profissionais e acadêmicos. Em contrapartida, 8 alunos dedicam-se exclusivamente aos estudos.

Além disso, constatou-se que somente 4 alunos afirmaram possuir experiência específica no domínio de testes de interoperabilidade. Por outro lado, uma expressiva maioria, composta por 14 alunos, reportou possuir experiência em testar requisitos não-funcionais.

### 6.4. Avaliação usando o método de TAM

O Modelo de Aceitação de Tecnologia (TAM), foi empregado para avaliar a estrutura, aceitação e adaptação dos usuários ao Guia de Teste de Interoperabilidade. Proposto por Davis [Davis 1989], o TAM é amplamente reconhecido na teoria para compreender a aceitação de novas tecnologias.

A amostra consistiu em uma turma mista de alunos de graduação e pós-graduação na disciplina de Verificação e Validação..

O procedimento envolveu a apresentação da aplicação IoT o Rottas, seguida pela disponibilização do Guia de Teste de Interoperabilidade em formato PDF. Após a execução do teste, os seis alunos responderam individualmente ao questionário do TAM, abordando categorias como Percepção de Utilidade (PU), Facilidade de Uso (PEOU), Intenção de Uso Futuro (IU), Impacto na Eficiência do Teste e Satisfação Geral.

### 6.5. Resultados do modelo TAM

Os resultados destacam uma aceitação unânime do Guia de Teste de Interoperabilidade, elogiando sua clareza e facilidade. As respostas do modelo TAM indicam eficácia e facilidade de uso, com ênfase na utilidade, clareza e capacidade de recomendação.

Na Percepção de Utilidade (PU), todos concordaram com a eficácia do guia em conduzir e planejar testes IoT. Quanto à Facilidade de Uso (PEOU), 50% acharam fácil de entender, 50% observaram uma transição suave na curva de aprendizado, com 16,7% discordando levemente.

Sobre a Intenção de Uso Futuro (IU), 66,7% expressaram forte intenção de adotar o guia em futuros projetos, e 83,3% recomendariam a ferramenta. Quanto ao impacto na eficiência do teste, 66,7% concordaram com a contribuição positiva para testes em aplicações IoT. Na satisfação geral, 83,3% manifestaram total satisfação.

Em síntese, os resultados do modelo TAM revelam uma aceitação positiva do Guia, destacando sua utilidade, facilidade de uso, intenção de uso futuro e impacto positivo nos testes em aplicações IoT, validando sua eficácia para profissionais de teste.

## 6.6. Experimento controlado

Previamente à instauração do experimento controlado, submetemos os participantes a um questionário de pré-teste. O escopo desse questionário era validar a compreensão da turma acerca do teste de interoperabilidade, incluindo aspectos como sua definição e condução. Os participantes foram convidados a expressar seu nível de confiança em realizar testes de interoperabilidade em uma aplicação IoT, fundamentando-se nos conhecimentos adquiridos durante a aula.

Adicionalmente, todo o material instrucional foi disponibilizado por meio de um repositório online, permitindo que os alunos consultassem os recursos após a aula, promovendo uma maior segurança durante a execução da atividade prática.

Nesse contexto, os participantes foram expostos ao guia de teste de interoperabilidade sob condições rigorosamente controladas, visando avaliar objetivamente a eficácia e a utilidade do guia.

O experimento foi conduzido na aplicação IoT Rottas , envolvendo 12 participantes distribuídos em dois grupos: G1, composto por 6 participantes utilizando o guia, e G2, com 6 participantes sem o uso do guia. A aplicação Rottas UFC foi desenvolvida para fornecer informações de transporte aos alunos da Universidade Federal do Ceará, visando melhorar a mobilidade estudantil no campus. As questões norteadoras eram:

- **RQ1.** O uso do guia reduz o esforço destinado à condução dos testes de interoperabilidade?
- **RQ2.** Há uma maior eficácia nos casos de testes gerados por meio do uso do guia?
- **RQ3.** O uso do guia amplia a detecção de falhas IoT?

Essa estrutura experimental fornece uma base robusta para avaliar a eficácia e os impactos do guia de teste de interoperabilidade na aplicação Rottas, proporcionando *insights* relevantes para sua utilidade prática e possíveis aprimoramentos. As hipóteses para o experimento foram definidas como:

### Hipóteses Nulas (H0):

- A abordagem baseada em guia estruturado para conduzir atividades de teste de interoperabilidade requer o mesmo esforço de teste que os testes tradicionais.
- A abordagem baseada em guias estruturados para conduzir atividades de testes de interoperabilidade produz casos de teste com eficácia igual aos testes tradicionais.
- A abordagem baseada em guias estruturados para conduzir atividades de testes de interoperabilidade detecta o mesmo número de falhas IoT que os testes tradicionais.

### Hipóteses Alternativas (H1):

- (H1,<sup>1</sup>) A abordagem baseada em guias estruturados para conduzir atividades de testes de interoperabilidade reduz mais o esforço de teste do que os testes tradicionais.

*Esforço com o guia < Esforço sem o guia*

- (H2,<sup>2</sup>) Abordagem baseada em guias estruturados para conduzir atividades de testes de interoperabilidade produz casos de teste mais eficazes do que os testes tradicionais.

*Eficácia dos casos de teste com o guia > Eficácia dos casos de teste sem o guia*

- (H3,<sup>3</sup>) A abordagem baseada em guias estruturados para conduzir atividades de testes de interoperabilidade encontra mais falhas na IoT do que os testes tradicionais.

*Número de falhas da IoT com o guia > Número de falhas da IoT sem o guia*

- **Variáveis Dependentes:** casos de testes
- **Variáveis Independentes:** falhas específicas para interoperabilidade IoT, esforço no planejamento e execução dos testes

## 6.7. Resultados do experimento controlado

A tabela 4 ilustra uma visão abrangente dos resultados obtidos no experimento, diferenciando os grupos que utilizaram o guia (CG) daqueles que não o utilizaram (SG). Ela exibe, para cada participante, informações como ID, tempo de planejamento, quantidade de casos de teste especificados e o número de falhas de IoT relatadas.

O tempo de planejamento refere-se ao período dedicado à configuração dos dispositivos, elaboração de cenários de teste, escolha de métricas e definição do escopo do plano de teste.

**Table 4. Resultados do experimento controlado**

| ID  | Tempo de planejamento | Casos de teste | Falhas IoT |
|-----|-----------------------|----------------|------------|
| CG1 | 50 minutos            | 8              | 3          |
| CG2 | 45 minutos            | 10             | 2          |
| CG3 | 40 minutos            | 6              | 0          |
| SG1 | 90 minutos            | 4              | 0          |
| SG2 | 60 minutos            | 3              | 0          |
| SG3 | 50 minutos            | 6              | 2          |

No que diz respeito à hipótese H1,1, procedemos à coleta do tempo de planejamento para efetuar uma comparação dos esforços entre os dois grupos. No Grupo 1 (CG), observamos que o tempo médio foi de 40 minutos, com o período mais extenso registrando 50 minutos. No Grupo 2 (SG), a média do tempo de planejamento foi de 66 minutos, sendo que o intervalo mais longo foi de 90 minutos. É relevante destacar que ambos os grupos elaboraram seus planos de teste abordando os mesmos aspectos, tais como métricas, casos de teste, configuração do ambiente e procedimentos de teste.

No entanto, o G1 se beneficiou do suporte proporcionado pelo guia de teste de interoperabilidade para a geração do plano de teste. Acreditamos que esse suporte contribuiu para a redução do esforço necessário no planejamento dos testes. Os resultados indicaram que os esforços empregados pelos dois grupos apresentaram diferenças estatisticamente significativas. Dessa forma, a hipótese H1,1 pode ser aceita.

No que diz respeito à hipótese H2,<sup>2</sup>, analisamos a eficácia dos casos de teste gerados por cada grupo. No Grupo 1 (CG), observamos que a média de eficácia foi de 8, com

o participante CG1 apresentando a maior eficácia de 10. No Grupo 2 (SG), a média de eficácia foi de 4, com o participante SG1 registrando a menor eficácia de 3. Ambos os grupos seguiram o mesmo escopo de teste e métricas.

No entanto, o G1, que utilizou o guia de teste de interoperabilidade, demonstrou uma melhoria estatisticamente significativa na eficácia dos casos de teste em comparação com o G2. A presença do guia parece ter influenciado positivamente na formulação de casos de teste mais eficazes. Assim, com base nos resultados obtidos, podemos aceitar a hipótese H2,<sup>2</sup>.

Quanto à hipótese H3,<sup>3</sup>, que trata da identificação de falhas na IoT, analisamos os dados sobre o número de falhas relatadas por cada grupo. No Grupo 1 (CG), a média de falhas foi de 1.67, com o participante CG1 apresentando o maior número de 3 falhas. No Grupo 2 (SG), a média de falhas foi de 0.67, e o participante SG3 relatou o maior número de falhas, totalizando 2. Ambos os grupos enfrentaram as mesmas condições de teste.

Observamos que o G1, utilizando o guia de teste de interoperabilidade, identificou mais falhas na IoT em comparação com o G2. Essa diferença é estatisticamente significativa, indicando que a abordagem baseada em guias estruturados contribuiu para uma maior detecção de falhas. Portanto, com base nos resultados, a hipótese H3,<sup>3</sup> pode ser aceita.

## **7. Discussão**

Nesta seção, discutem-se as questões de pesquisa investigadas no estudo.

### **QP1. Avaliação da *Interoperabilidade* em Aplicações IoT**

A avaliação envolve testes que verificam dispositivos IoT se comunicarem e cooperarem em ambientes diversos, garantindo uma comunicação fluida.

### **QP2. Abordagens de Teste para Avaliação da *Interoperabilidade***

Incluem teste de conformidade, teste de integração e teste de compatibilidade, verificando padrões, colaboração entre dispositivos e funcionamento em diversas plataformas.

### **QP3. Desafios no Teste de *Interoperabilidade* em Aplicações IoT**

Desafios incluem heterogeneidade de dispositivos, comunicação, complexidade arquitetônica, diversidade de protocolos e ambientes. Garantir interoperabilidade requer testes abstratos e flexíveis para superar esses desafios. Semântica é crucial para compreensão entre diferentes dispositivos.

## **8. Ameaças à validade**

Durante o experimento controlado para validar o guia de teste de interoperabilidade, enfrentamos ameaças à validade, abordadas de maneiras específicas.

A preocupação com a falta de domínio nos testes levou à introdução de uma fase de nivelamento, garantindo que os participantes possuíssem compreensão uniforme dos conceitos fundamentais.

Para mitigar a influência de experiências prévias, implementamos um questionário de pré-teste abrangente, avaliando o conhecimento e a confiança dos participantes. Re-

conhecendo o viés de resposta, mantivemos a natureza específica do guia em sigilo até o término do experimento. Essas estratégias buscaram fortalecer a robustez dos resultados no contexto do experimento controlado.

## 9. CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

O guia proposto foi definido com base na literatura e na ISO/IEC 30141:2018. Foram conduzidas duas revisões bibliográficas baseadas nos princípios de mapeamento sistemático, a primeira revisão abrangendo um escopo amplo com o objetivo de adquirir conhecimentos na área e identificar os desafios e problemáticas existentes, enquanto a segunda revisão direcionou-se ao objetivo específico da pesquisa, que consiste na elaboração de um guia de teste para a característica de interoperabilidade para IoT.

Ao analisar os estudos obtidos na revisão bibliográfica específica para o guia, observou-se uma falta de padronização nos testes de interoperabilidade em aplicações IoT. Com base na proposta apresentada pelo trabalho de [Carvalho et al. 2022], foi adotada a estrutura inicial para a construção do guia de interoperabilidade.

O guia de teste de *Interoperabilidade* foi constituído por 11 seções, nas quais foram incorporadas as subcaracterísticas, tais como: semântica dos dados, protocolos de comunicação, integração de sistemas e protocolo de rede.

Adicionalmente, almeja-se elaborar uma plataforma wiki com o intuito de automatizar o procedimento proposto no guia, permitindo que a utilização dessa tecnologia contribua significativamente para o planejamento desses testes.

Recomenda-se a continuidade da pesquisa, explorando adaptações do guia para diferentes contextos e aplicações específicas. Essa pesquisa pode fornecer *insights* adicionais sobre a aplicabilidade prática do guia e potenciais melhorias para otimizar ainda mais o processo de teste de interoperabilidade em contextos diversos.

## References

- Atzori, L., Iera, A., and Morabito, G. (2010). The internet of things: A survey. *Computer networks*, 54(15):2787–2805.
- Carvalho, L. M., Lelli, V., and Andrade, R. M. (2022). Performance testing guide for iot applications. In *ICEIS (1)*, pages 667–678.
- Cortés, M., Saraiva, R., Souza, M., Mello, P., and Soares, P. (2019). Adoption of software testing in internet of things: A systematic literature mapping. In *Proceedings of the IV Brazilian Symposium on Systematic and Automated Software Testing*, pages 3–11.
- Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS Quarterly*, 13(3):319–340.
- Desmoulin, A. and Viho, C. (2009). Formalizing interoperability for test case generation purpose. *International journal on software tools for technology transfer*, 11(3):261–267.
- García, S. N. M., Hernández-Ramos, J. L., and Skarmeta, A. F. (2018). Test-based risk assessment and security certification proposal for the internet of things. *2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, pages 641–646.

- Giusto, D., Iera, A., Morabito, G., and Atzori, L. (2010). *The internet of things: 20th Tyrrhenian workshop on digital communications*. Springer Science & Business Media.
- Gulla, J. A., Tomassen, S. L., and Strasunskas, D. (2006). Semantic interoperability in the norwegian petroleum industry. In *ISTA*, pages 81–93.
- ISO 15926 (2011). Iso 15926 - industrial automation systems and integration - integration of life-cycle data for process plants including oil and gas production facilities. Geneva: ISO. Accessed on 28 Mar. 2023.
- ISO/IEC 30141 (2018). Iso/iec 30141:2018 - systems and software engineering – content of systems and software life cycle process information products (documentation). International Standard.
- Kim, E. E. and Ziegler, S. (2017). Towards an open framework of online interoperability and performance tests for the internet of things. In *2017 Global Internet of Things Summit (GloTS)*, pages 1–6.
- Kitchenham, B. (2004). Procedures for performing systematic reviews. *Keele, UK, Keele University*, 33(2004):1–26.
- Legner, C. and Wende, K. (2006). Towards an excellence framework for business interoperability. In *19th Bled eConference eValues*, Bled, Slovenia.
- Mattern, F. and Floerkemeier, C. (2010). From the internet of computers to the internet of things. In *From active data management to event-based systems and more*, pages 242–259. Springer.
- Mattiello-Francisco, M. d. F. (2009). Inrob-uma abordagem para testes de interoperabilidade e de robustez de subsistemas de temporeal intensivos em software. *Doutorado em engenharia eletrônica e computação, Instituto de Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP*.
- Mujjiga, S. and Sukumaran, S. (2007). Modelling and test generation using sal for interoperability testing in consumer electronics. In *Proceedings of the second workshop on Automated formal methods*, pages 32–40.
- Razzaque, M. A., Milojevic-Jevric, M., Palade, A., and Clarke, S. (2015). Middleware for internet of things: a survey. *IEEE Internet of things journal*, 3(1):70–95.
- Revell, S. (2013). Internet of things (iot) and machine to machine communications (m2m) challenges and opportunities. *Final Paper, London, UK Google Scholar*.
- Salum, M. I. F. et al. (2013). Interoperabilidade logística: uma proposta de conceito, atributos e práticas.
- Soares, D. d. S. (2010). Interoperabilidade entre sistemas de informação na administração pública.
- Sundmaeker, H., Guillemin, P., Friess, P., Woelfflé, S., et al. (2010). Vision and challenges for realising the internet of things. *Cluster of European research projects on the internet of things, European Commision*, 3(3):34–36.
- Zaidi, F., Bayse, E., and Cavalli, A. (2009). Network protocol interoperability testing based on contextual signatures and passive testing. In *Proceedings of the 2009 ACM symposium on Applied Computing*, pages 2–7.