



ISSN: 1646-9895

Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação
Revista Ibérica de Sistemas y Tecnologías de Información

M a r ç o 2 6 • M a r c h 2 6



©ITMA 2026 <http://www.risti.xyz>

Nº 61

Edição / Edición

Nº 61, 03/2026

Tiragem / Tirage: 1000

Preço por número / Precio por número: 17,5€

Subscrição anual / Suscripción anual: 30€ (2 números)

ISSN: 1646-9895

Depósito legal:

Indexação / Indexación

Academic Journals Database, CiteFactor, Dialnet, DOAJ, DOI, EBSCO, GALE, IndexCopernicus, Index of Information Systems Journals, Web of Science, Latindex, ProQuest, QUALIS, SciELO, SIS, Ulrich's.

Publicação / Publicación

ITMA – Information and Technology Management Association

Pc. 9 de Abril, 26, 4200-422 Porto, Portugal

E-mail: aistic@gmail.com

Web: <http://www.risti.xyz>

Director

Álvaro Rocha, ISEG, University of Lisbon, PT

Coordenadores da Edição / Coordinadores de la Edición

Álvaro Rocha, ISEG, Universidade de Lisboa, PT

Conselho Editorial / Consejo Editorial

Abel Méndez, Technological Institute of Costa Rica, CR

Alejandro Peña, EAFIT University, CO

Alma Gomez-Rodríguez, University of Vigo, ES

Ana Rita Calvao, ESTGA, University of Aveiro, PT

Ania Cravero, Universidad de La Frontera, CL

António Abreu Silva, ISCAP, Polytechnic Institute of Porto, PT

Antonio Garcia, University of Santiago de Compostela, ES

António Godinho, ISEC, Polytechnic Institute of Coimbra, PT

Antonio Jiménez-Martín, Polytechnic University of Madrid, ES

Arturo J. Méndez, University of Vigo, ES

August Climent, Ramon LLull University, ES

Beatriz Rodríguez, Universidad de la Republica, UY

Borja Bordel, Polytechnic University of Madrid, ES

Brenda L. Flores-Rios, Universidad Autónoma de Baja California, MX

Bruno Miguel Ferreira Gonçalves, Polytechnic Institute of Braganca, PT

Carlos Alexandre Silva, Federal Institute of Minas Gerais, BR

Carlos Carreto, Polytechnic Institute of Guarda, PT

Carlos Morais, Polytechnic Institute of Braganza, PT

Carlos Rompante Cunha, UNIAG & CeDRI &

Polytechnic Institute Bragança, PT

Carlos Vaz de Carvalho, Polytechnic Institute of Porto, PT

Célio Marques, Polytechnic Institute of Tomar, PT

Círo Martins, University of Algarve, PT

Concepción Damián-Hernández, Instituto

Tecnológico Superior de Misantla, MX

Cristina Caridade, Polytechnic Institute of Coimbra, PT

Daniel Poland, University of Aveiro, PT
Dante Carrizo, University of Atacama, CL
Edwin Cedeño Herrera, Universidad de Panamá, PA
Fabio Marques, ESTGA, University of Aveiro, PT
Felipe Vasquez, Universidad de La Frontera, CL
Fernando Moreira, REMIT, IJP, Portucalense University & IEETA,
University of Aveiro, PT
Fernando Paulo Belfo, Coimbra Business School – ISCAC, Polytechnic
Institute of Coimbra, PT
Fernando Ribeiro, Polytechnic Institute of Castelo Branco, PT
Fernando Bandeira, PT
Filipe Cardoso, Polytechnic Institute of Viseu, PT
Flor Gomes de María Sánchez Aguirre, Universidad César Vallejo, PE
Francisco Javier Lena-Acebo, University of Cantabria, ES
Gabriel Guerrero-Contreras, University of Cádiz, ES
Gerardo González Filgueira, University of A Coruña, ES
Gloria Valencia, Universidad de las Fuerzas Armadas, EC
Helder Gomes, University of Aveiro, PT
Helder Zagalo, University of Aveiro, PT
Hélia Guerra, University of the Azores, PT
Henrique Gil, Polytechnic Institute of Castelo Branco, PT
Henrique S. Mamede, Open University, PT
Isaias Bianchi, Federal University of Santa Catarina, BR
Ismael Etxeberria-Agiriano, Universidad del País Vasco, ES
Ivan Garcia, Universidad Tecnológica de la Mixteca, MX
Jeimy Cano, Universidad de los Andes, CO
John Emilio Almeida, ISTECH - Porto, PT
João Paulo Ferreira, Polytechnic Institute of Coimbra, PT
Roberto de Toledo Quadros, CEFET/RJ, BR
Joao Tavares, University of Porto, PT
Joaquim Reis, ISCTE - University Institute of Lisbon, PT
Jorge Eduardo Ibarra Esque, Universidad
Autónoma de Baja California, MX

Jorge Hochstetter, Universidad de La Frontera, CL
José Álvarez-García, University of Extremadura, ES
Jose Felipe Cocon Juarez, Universidad Autónoma del Carmen, MX
José Lousado, Polytechnic Institute of Viseu, PT
José Luis Pastrana Brincones, University of Malaga, ES
Jose M. Molina, Carlos III University of Madrid, ES
José Ribeiro, Polytechnic of Leiria, PT
Jose Silvestre Silva, Military Academy, PT
Juan Angel Contreras Vas, University of Extremadura, ES
Juan M. Santos-Gago, University of Vigo, ES
Juan Pablo DAmato, National University of the Center of the
Province of Buenos Aires, AR
Leila Weitzel, Fluminense Federal University, BR
Leonardo Bermón Angarita, National University of Colombia, CO
Lilia Muñoz, Universidad Tecnológica de Panamá, PA
Lucila Romero, Universidad Nacional del Litoral, AR
Luis Alvarez Sabucedo, University of Vigo, ES
Luis Enrique Sánchez Crespo, University of Castilla-la Mancha, ES
Luisa María Romero-Moreno, Universidad Sevilla, ES
Luz María Hernández Cruz, Universidad Autónoma de Campeche, MX
Luz Sussy Bayona Oré, Universidad Nacional Mayor de San Carlos, PE
Marcelo Marciszack, National Technological University, AR
Marcelo Zambrano Vizuite, Universidad Tecnica Del Norte
Marco Painho, NOVA IMS, PT
Margarita Ramirez Ramirez, Universidad Autónoma de Baja California, MX
Maria Cristina Marcelino Bento, UNIFATEA, BR
María de la Cruz del Río-Rama, University of Vigo, ES
Maria de los Milagros Gutierrez, National Technological University, AR
Maria do Rosario Bernardo, Open University, PT
Maria João Ferreira, Portucalense University, PT
Maria João Gomes, University of Minho, PT
Maria Sousa, ISCTE - University Institute of Lisbon, PT
Marisol B. Correia, ESGHT - University of Algarve & CiTUR, PT

Maristela Holanda, University of Brasilia, BR
Martin Llamas Nistal, University of Vigo, ES
Miguel Casquilho, University of Lisbon, PT
Miguel Ramón González Castro, Aimen Technological Center, ES
Mirna Ariadna Muñoz Mata, CIMAT, MX
Nelson Rocha, University of Aveiro, PT
Nuno Melão, Polytechnic Institute of Viseu, PT
Nuno Ribeiro, Fernando Pessoa University, Portugal
Patricia Dias, State University of Minas Gerais, BR
Paula Prata, University of Beira Interior, PT
Paulo Martins, University of Trás-os-Montes and Alto Douro, PT
Paulo Pinto, New University of Lisbon, PT
Paulo Rurato, Fernando Pessoa University, Portugal
Pedro Araújo, University of Beira Interior, PT
Pedro R. Palos-Sanchez, Universidad de Sevilla, ES
Pedro Sanz-Angulo, University of Valladolid, ES
Pedro Sobral, Fernando Pessoa University, Portugal
Pedro Sousa, University of Minho, Portugal
René Faruk Garzozi-Pincay, Santa Elena Peninsula State University, EC
Ruben Pereira, ISCTE – University Institute of Lisbon, PT
Rui Pedro Marques, University of Aveiro, PT
Rui Silva Moreira, Fernando Pessoa University, PT
Samuel Sepúlveda, Universidad de La Frontera, CL
Sandro Carvalho, Polytechnic of Cávado and Ave, PT
Santiago Raul Gonzales Sanches, Universidad Cesar Vallejo, PE
Sara Balderas-Díaz, University of Cádiz, ES
Sergio Araya Guzmán, Universidad del Bío-Bío, CL
Sergio F. Lopes, University of Minho, PT
Solange N Alves-Souza, University of Sao Paulo, BR
Telmo Silva, DigiMedia, University of Aveiro, PT
Thiago Dias, Federal Center for Technological Education of Minas Gerais, BR
Veronica Vasconcelos, Polytechnic Institute of Coimbra, PT
Vítor Carvalho, Polytechnic Institute of Cávado and Ave, PT

Vitor Santos, New University of Lisbon - NOVA IMS, PT

Wagner Tanaka Botelho, Federal University of ABC, BR

Yamid Hernández Julio, Universidad del Sinú, CO

Índice / Index

EDITORIAL

Abordagens Emergentes em Sistemas e Tecnologias de Informação	1
<i>Álvaro Rocha</i>	

ARTIGOS / ARTICULOS / ARTICLES

Simple Patch Matcher: Uma Abordagem Baseada em Amostras para Restauração de Imagens.....	3
<i>Gustavo Becelli do Nascimento, Almir Olivette Artero, Danilo Medeiros Eler, Maurício Araújo Dias, Danillo Roberto Pereira, Francisco Assis da Silva</i>	
ElicitAÇÃO: Jogo Educacional Híbrido para apoiar a Aprendizagem de Levantamento de Requisitos de Software	20
<i>Lucas Dall Asta Martins, Giliane Bernardi</i>	
A importância de testes de performance na plataforma INEP: Um estudo de caso do ENEM	36
<i>Débora Letícia Alves Pereira, Isabelly Maria Andrade Remígio, Brunno Wagner Lemos de Souza</i>	
Integración de la tecnología en la enseñanza musical: formación, uso y barreras desde la perspectiva docente	51
<i>María Elena Cuenca Rodríguez, Pilar Serrano Betored</i>	
Transformación digital verde como servicio (TDVaaS): Un nuevo servicio basado en roles estratégicos.....	66
<i>Díaz González de Mendoza Pável, Fuentes Prieto Mayda Juana y Díaz Manresa Karel</i>	
Modelagem de Riscos em Projetos de IoT: Suporte à Decisão via Redes Bayesianas e Simulação de Monte Carlo	80
<i>Erika Midori Kinjo, Fernando Manoel Alves dos Santos Junior, Fábio Cosme Rodrigues dos Santos, André Felipe Henriques Librantz, Edson Melo de Souza</i>	

Abordagens Emergentes em Sistemas e Tecnologias de Informação

Emerging Approaches in Information Systems and Technologies

*Álvaro Rocha*¹

amr@iseg.ulisboa.pt

¹ ISEG Research, Universidade de Lisboa, Rua Miguel Lupi 20, 1200-109 Lisboa, Portugal.

DOI: 10.17013/risti.61.1-3

A RISTI – Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação reafirma, na sua edição número 61, o compromisso com a publicação de investigação científica rigorosa, inovadora e relevante para a comunidade académica e profissional da área dos Sistemas e Tecnologias de Informação. Esta edição apresenta uma taxa de aceitação de 9,6%, refletindo o elevado nível de exigência e qualidade do processo de revisão científica, bem como a crescente maturidade das submissões recebidas.

Os seis artigos publicados nesta edição evidenciam a diversidade temática e a transversalidade dos Sistemas de Informação, abordando desafios contemporâneos que vão desde o processamento de imagem e a engenharia de software até à transformação digital sustentável, educação tecnológica e gestão de riscos em sistemas complexos.

O primeiro artigo propõe uma abordagem inovadora para a restauração de imagens degradadas através da técnica *Simple Patch Matcher*, demonstrando melhorias significativas face a métodos clássicos, nomeadamente ao nível de métricas como PSNR e SSIM. Esta contribuição reforça o papel das técnicas de processamento de imagem na preservação digital e na recuperação de informação visual de elevado valor cultural e científico.

No domínio da engenharia de software, o segundo artigo apresenta o jogo educacional híbrido *ElicitAÇÃO*, concebido para apoiar a aprendizagem do levantamento de requisitos. A integração de elementos analógicos e digitais, aliada a metodologias ativas,

evidencia o potencial dos jogos educativos na promoção de competências práticas e colaborativas entre estudantes.

O terceiro artigo aborda a importância dos testes de performance em sistemas governamentais de grande escala, tomando como estudo de caso a plataforma do ENEM. A utilização de ferramentas *open-source* e a simulação de cenários de carga permitem identificar limitações e propor melhorias, destacando a relevância estratégica da engenharia de performance para garantir a confiabilidade de serviços públicos digitais.

No contexto educacional, o quarto artigo analisa a integração das tecnologias digitais no ensino da música, evidenciando desafios relacionados com a formação docente, a brecha digital e as condições estruturais das instituições. Os resultados sublinham a necessidade de políticas educativas mais eficazes e de programas de formação contínua ajustados às exigências da transformação digital.

A dimensão da sustentabilidade é explorada no quinto artigo, que introduz o conceito de *Transformação Digital Verde como Serviço (TDVaaS)*. A proposta de novos perfis profissionais que combinam competências digitais e ambientais reflete a emergência de uma “dupla transição” digital e ecológica, posicionando a sustentabilidade como eixo estruturante da inovação organizacional.

Por fim, o sexto artigo apresenta uma abordagem quantitativa para a gestão de riscos em projetos de Internet das Coisas, combinando Redes Bayesianas e Simulação de Monte Carlo. Ao incorporar fatores humanos e éticos como variáveis centrais, o estudo contribui para uma visão mais abrangente e realista dos sistemas sociotécnicos, reforçando o suporte à decisão em contextos de elevada complexidade.

Em conjunto, os artigos desta edição demonstram não apenas a vitalidade da investigação em Sistemas de Informação, mas também a sua capacidade de responder a desafios globais, como a digitalização da sociedade, a sustentabilidade ambiental, a qualidade dos sistemas e a formação de competências no século XXI.

O Conselho Editorial agradece a todos os autores pelas suas valiosas contribuições, bem como aos revisores pelo rigor e dedicação demonstrados ao longo do processo de avaliação. Este esforço coletivo é fundamental para assegurar a qualidade científica da revista e a sua relevância internacional.

Boa leitura!

Simple Patch Matcher: Uma Abordagem Baseada em Amostras para Restauração de Imagens

Gustavo Becelli do Nascimento¹, Almir Olivette Artero¹, Danilo Medeiros Eler¹,
Maurício Araújo Dias¹, Danillo Roberto Pereira¹, Francisco Assis da Silva²

gustavo.becelli@unesp.br; almir.artero@unesp.br; danilo.eler@unesp.br;
ma.dias@unesp.br; danillo.pereira@unesp.br; chico@unoeste.br

¹ Universidade Estadual Paulista – FCT/Unesp, Presidente Prudente, Brasil

² Universidade do Oeste Paulista – FIPP/Unoeste, Presidente Prudente, Brasil

DOI: 10.17013/risti.61.3–19

Resumo: Apesar da importância das fotografias digitais na preservação de memórias e artefatos culturais, a restauração de imagens analógicas ainda é uma tarefa crucial. Porém, este processo continua sendo um grande desafio. Assim, este trabalho propõe uma técnica chamada *Simple Patch Matcher (SPM)*, que se baseia no uso da estrutura do *Fast Marching Method (FMM)* para selecionar os pixels, e similaridade de amostras para restaurar pixels em regiões degradadas, utilizando uma estrutura de dados multidimensional para armazenar amostras não-degradadas da imagem original, que servem como candidatos para a restauração dos pixels em áreas degradadas. Os resultados obtidos com a técnica *SPM* demonstram sua eficácia na restauração, superando algoritmos convencionais. Isso é evidenciado pelo aumento de cerca de 10% na Relação Sinal Ruído de Pico (*PSNR*) e melhorias significativas em outras métricas de qualidade, como o Índice de Similaridade Estrutural (*SSIM*) e o Erro Médio Quadrático (*EMQ*), em comparação com técnicas clássicas de restauração.

Palavras-chave: Inpainting; Processamento de Imagens; Restauração de Imagens; Preenchimento de Regiões.

Simple Patch Matcher: A Sample-Based Approach for Image Restoration

Abstract: Despite the importance of digital photographs in preserving memories and cultural artifacts, the restoration of analog images remains a crucial task. However, this process continues to be a major challenge. Thus, this work proposes a technique called *Simple Patch Matcher (SPM)*, which is based on the use of the *Fast Marching Method (FMM)* structure to select pixels, and sample similarity to restore pixels in degraded regions, using a multidimensional data structure to store non-degraded samples of the original image, which serve as candidates for pixel restoration in degraded areas. The results obtained with *SPM* demonstrate its effectiveness in restoration, surpassing conventional algorithms. This is evidenced by an increase of approximately 10% in the Peak Signal-to-Noise Ratio (*PSNR*) and

significant improvements in other quality metrics, such as the Structural Similarity Index (SSIM) and the Root Mean Square Error (RMSE), compared to classical restoration methods.

Keywords: Inpainting; image processing; image restoration; region filling.

1. Introdução

Atualmente, existe uma grande quantidade de fotografias analógicas que possuem grande valor histórico ou mesmo pessoal e, sofreram algum tipo de degradação. Assim, é vital dispor de técnicas capazes de reverter estas perdas, especialmente na conservação de artefatos culturais (Ritchin, 2009). Mesmo com imagens capturadas digitalmente ainda ocorrem problemas com alguns pixels não correspondendo ao esperado, por exemplo, quando uma parte do cenário a ser fotografado está coberto por algum objeto indesejado, como por exemplo, uma nuvem cobrindo uma área da superfície terrestre em uma imagem de sensoriamento remoto.

Este trabalho apresenta uma comparação entre os resultados obtidos com algumas técnicas de *Inpainting* clássicas (que não usam aprendizado de máquina) (Elharrouss et al., 2019), (Rangel et al., 2019). Adicionalmente, apresenta um algoritmo focado em preencher pixels da imagem usando sínteses de amostras conforme sua similaridade, visando corrigir os defeitos identificados. Essa técnica é apoiada por uma estrutura conhecida como *Fast Marching Method (FMM)* (Shepard, 1968), que também é usada no trabalho de Telea (2004) e, posteriormente implementado, juntamente com a técnica de Bertalmio et al. (2001), na biblioteca de visão computacional (Bradski, 2000). Adicionalmente, apresenta uma técnica chamada *Simple Patch Matcher (SPM)*, que consegue resultados superiores aos obtidos com os algoritmos clássicos. Essa superioridade é evidenciada por uma vantagem de 10% na Relação Sinal-Ruído de Pico (*PSNR*). Além de melhorias significativas com outras métricas, como o Índice de Similaridade Estrutural (*SSIM*) e Erro Médio Quadrático (*EMQ*). A técnica *SPM* foi comparada com as técnicas clássicas de *Inpainting* propostas por Bertalmio et al. (2001), Telea (2004), e Oliveira et al. (2001). Os resultados obtidos neste trabalho destacam a capacidade da técnica *SPM* em restaurar imagens com uma qualidade superior, tornando-a uma alternativa promissora, para competir com as técnicas clássicas, apesar de seu tempo de execução maior.

As demais seções deste artigo estão organizadas da seguinte maneira: Na Seção 2, é apresentada uma revisão da literatura, detalhando algumas técnicas clássicas de *Inpainting* (Elharrouss et al., 2019), além de abordar algumas métricas de avaliação; Na Seção 3, é apresentado um novo algoritmo para realizar a restauração de imagens; Na Seção 4 são realizados alguns experimentos, que comparam os resultados obtidos com as técnicas clássicas e a técnica proposta; finalmente, na Seção 5 são apresentadas algumas conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Trabalhos Relacionados

Oliveira et al. (2001), propõe uma técnica de *inpainting* focada em alta velocidade de processamento, pois as técnicas tradicionais são muito lentas. Sua proposta, usa uma difusão isotrópica, que atua preenchendo pequenas áreas danificadas, a partir de informações do limite da área danificada para o interior da região. Os resultados obtidos são comparáveis aos de técnicas existentes, porém com um tempo de processamento muito menor. O trabalho de Bertalmio et al. (2001), conhecido como *Total Variation (TV)*, apresenta uma abordagem baseada em Equações Diferenciais Parciais (EDP), que se destaca pela sua autonomia, pois elimina a necessidade de interação manual das técnicas semi-automáticas. Nesta técnica, o processo de *inpainting* propaga informações de textura a partir de uma região externa a uma máscara pré-definida, com foco na propagação de linhas com mesmo tom de cinza nas margens da área de interesse. Telea (2004) apresenta um algoritmo de *inpainting* que se baseia no *FMM*, que se destaca pela sua simplicidade de implementação, eficiência de processamento e capacidade de produzir resultados comparáveis às técnicas mais complexas, como o de Bertalmio et al. (2001).

2.2. Métricas de Qualidade de Imagem

A avaliação precisa da qualidade de uma imagem é fundamental como um indicador robusto da eficácia de diversos algoritmos. Entre as métricas mais conhecidas e usadas estão:

- **EMQ:** Esta métrica é definida como a média dos quadrados das diferenças entre os valores dos pixels da imagem original I e da imagem processada K , sendo definida pela Equação 1, onde m e n são as dimensões da imagem.

$$EMQ = \frac{1}{m.n} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i,j) - K(i,j)]^2 \quad (1)$$

- **Erro Médio Absoluto (EMA):** Esta métrica é similar à EMQ, porém, ao invés de calcular o quadrado da diferença entre os valores dos pixels, ela calcula o valor absoluto da diferença, conforme mostra a Equação 2, onde m e n são as dimensões da imagem

$$EMQ = \frac{1}{m.n} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} |I(i,j) - K(i,j)|^2 \quad (2)$$

- **PSNR:** Esta métrica é valiosa por oferecer uma avaliação objetiva e rápida da qualidade. É uma métrica que expressa a relação em decibéis entre a potência máxima de um sinal e a potência do ruído que afeta a qualidade de sua representação. É frequentemente expressa pela Equação 3, onde $MAXI$ é o valor máximo do pixel na imagem.

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAXI^2}{EMQ} \right) \quad (3)$$

- **SSIM:** Esta métrica avalia a percepção visual da imagem. SSIM compara a luminância, o contraste e a estrutura entre duas imagens (Wang et al., 2004). O cálculo considera variáveis estatísticas locais das imagens comparadas. A métrica retorna valores entre -1 e 1, com 1 indicando que as duas imagens são idênticas. A Equação 4 apresenta a fórmula para o cálculo de SSIM.

$$SSIM(I, K) = \frac{(2\mu_I\mu_K + C_1) \cdot (2\sigma_{IK} + C_2)}{(\mu_I^2 + \mu_K^2 + C_1) \cdot (\sigma_I^2 + \sigma_K^2 + C_2)} \quad (4)$$

onde μ_I é a média de I , μ_K é a média de K , σ_I^2 é a variância de I , σ_K^2 é a variância de K , σ_{IK} é a covariância de I e K , $C_1 = (k_1 L)^2$ e $C_2 = (k_2 L)^2$ são duas variáveis para estabilizar a divisão com frações muito pequenas, e L é o intervalo dinâmico da imagem (por exemplo, $L = 255$ para imagens de 8 bits para cada canal de cor).

3. Simple patch matcher

Inspirado no trabalho de Telea (2004), o Simple Patch Matcher (SPM) emprega o FMM como mecanismo de priorização na restauração de imagens degradadas, focando especialmente nos pixels próximos às bordas. O FMM classifica os pixels de acordo com sua distância às regiões conhecidas, e auxilia na priorização dos pixels mais próximos da borda da região degradada. Essa abordagem é essencial, pois a eficácia na restauração de um pixel depende da disponibilidade de pixels vizinhos já restaurados. Esta técnica combina técnicas e algoritmos reconhecidos, utilizando o *FMM* para selecionar pixels em áreas degradadas, com ênfase nos localizados nas bordas. O pseudocódigo a seguir resume o algoritmo proposto.

Algoritmo 1: Pseudocódigo da técnica SPM

1 Dados: Matriz3D imagem, Matriz2D

máscara_binária, inteiro tamanho_kernel;

2 Resultado: Imagem restaurada;

3 Extraí-se lista_amstras;

// Síntese do FFM (Telea, 2004):

```

4 Inicialize distâncias, estados, heap;
5 enquanto heap não estiver vazio faça
6     Retire um ponto da heap e marque-o como preenchido;
7     para cada vizinho 4-conectado faça
8         se vizinho não está preenchido então
9             Compute e atualize distância_mínima;
10            Restaure pixel usando RestaurarPixel;
11            Atualize o novo valor do vizinho na máscara e estados; Insira-o na heap;
12 Função RestaurarPixel
13     Dados: imagem, máscara_binária, ponto, tamanho_kernel, lista_amstras
14     Resultado: Pixel restaurado (Vetor1D)
15     Extraia amostra_da_máscara e amostra_da_imagem no ponto;
        // Dado os pixels conhecidos da amostra_da_máscara:
16     para cada amostra da lista_amstras faça
17         Calcule similaridade entre amostra_da_imagem e amostra da lista_amstras;
18         Determine  $n$  melhores_amstras;
19     retorna valor médio das  $n$  melhores_amstras;

```

3.1. Pré-processamento e Coleta de Amostras

No estágio de pré-processamento, amostras contíguas e não degradadas de dimensões $n \times n$ são extraídas da imagem original, onde n define o tamanho da amostra. Essas amostras são armazenadas em uma estrutura de dados multidimensional, denotada como A , servindo como um repositório de candidatos para a subsequente restauração de pixels. Para abordar o desafio da complexidade computacional inerente ao cálculo de distâncias entre as amostras coletadas, uma subamostragem é executada em intervalos de n pixels. Embora essa estratégia resulte em uma redução significativa da carga computacional, é válido reconhecer o potencial comprometimento na qualidade da imagem restaurada. A Figura 1 ilustra o processo de restauração para $n = 3$. O parâmetro n pode ser ajustado para otimizar o desempenho do algoritmo, sendo que valores maiores resultam em geral numa menor carga computacional devido a haverem menos amostras, mas também em menor qualidade de imagem, devido à subamostragem. Em (a) tem-se a imagem de entrada. Os pixels degradados estão preenchidos em tom de cinza, e os pixels conhecidos estão em branco. Em (b) tem-se amostras contíguas de tamanho 3×3 que são extraídas da imagem de entrada pela técnica. As amostras que não possuem nenhum pixel degradado são selecionadas.

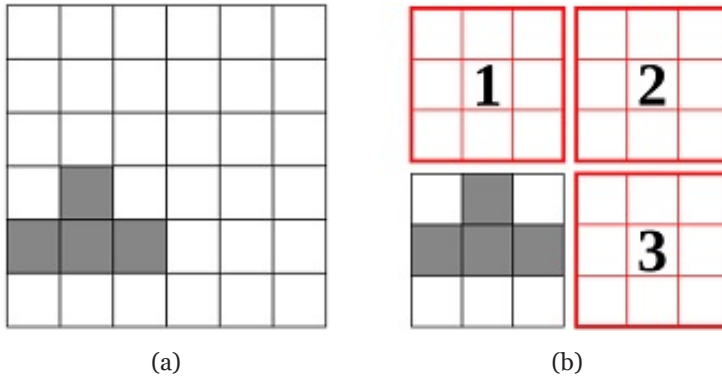


Figura 1 – Coleta de amostras para $n=3$. A imagem original é dividida em amostras de tamanho 3×3 e, em seguida, apenas as amostras que não possuem nenhum pixel degradado são selecionadas. Neste exemplo, o quadrante inferior esquerdo da imagem original não possui amostras válidas. Se imagem possuir dimensões que não são múltiplas de n , os pixels restantes são descartados.

3.2. Priorização e Identificação de Pixels via Fast Marching Method

No momento subsequente, o FMM é empregado para estabelecer uma ordem de prioridade entre os pixels degradados na imagem. O algoritmo prioriza pixels na borda entre pixels conhecidos e degradados. Essa priorização é realizada através de uma *heap* (Kuszmaw, 2023), que armazena os pixels degradados em ordem crescente de distância em relação às regiões conhecidas. A Figura 2 ilustra, de forma simplificada, a priorização dos pixels degradados.

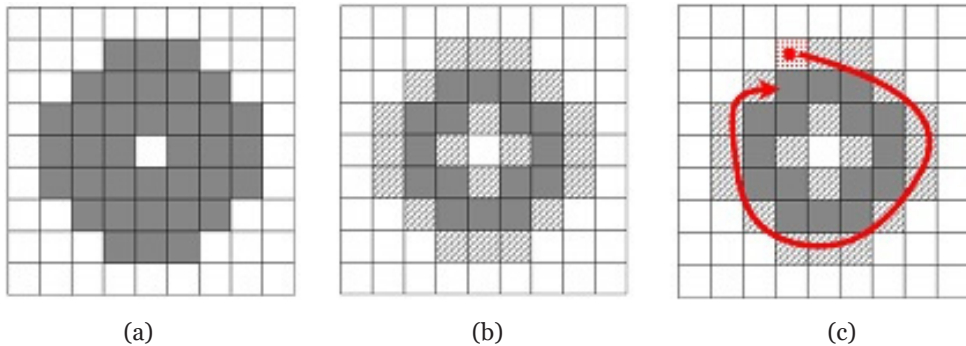


Figura 2 – Classificação dos pixels segundo o FMM implementado neste trabalho, considerando a vizinhança 4-conectada.

Em (a) tem-se a Imagem de entrada, com os pixels degradados preenchidos em tom de cinza. Em (b) tem-se a classificação dos pixels com o FMM (Pixels branco são conhecidos,

pixels zebrados são borda e pixels cinza são degradados). Em (c) tem-se a ilustração da priorização de um pixel. O pixel selecionado está pontilhado, e uma seta indica uma potencial rota de restauração.

3.3. Computação de Similaridade e Seleção de Amostras Candidatas

Para cada pixel degradado identificado p , um cálculo de distância é executado entre este e todas as amostras no conjunto A . Esse cálculo de similaridade emprega a distância euclidiana e é exclusivo aos vizinhos de p que possuem valores conhecidos. A partir deste cálculo, um subconjunto de k amostras com as menores distâncias é selecionado como candidatos para o preenchimento do pixel p .

A fim de otimizar essa etapa, é usado paralelismo (Pádua, 2011): o conjunto A é dividido entre a threads, com a sendo o número de núcleos de processamento disponíveis na máquina. Como os dados são independentes e a linguagem proporciona segurança de memória, isso proporciona, em média, uma aceleração linear da ordem de a , embora seja crucial considerar o *overhead* de criação e gerenciamento de threads, especialmente com imagens de pequenas dimensões.

3.4. Agregação de Amostras e Atualização de Pixels

Após a seleção dos k candidatos mais apropriados, uma média aritmética simples é realizada para agregar essas amostras em uma única. Seguidamente, a média dos valores dos pixels dessa amostra agregada é computada para determinar o valor final do pixel p que está sendo restaurado. A Figura 3 ilustra esse processo.

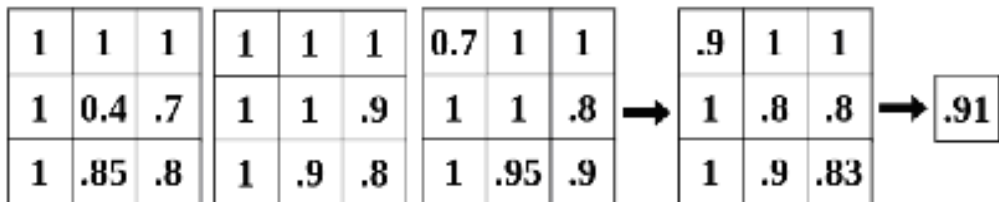


Figura 3 – Agregação de amostras e a síntese de valores em um pixel, para $k = 3$, usando imagem com apenas o canal de luminância. Em caso de imagens coloridas, a distância do passo 3.2 é calculada usando todos os canais e agrega-se as amostras de forma independente para cada canal.

3.5. Iteração e Conclusão do Processo

O algoritmo continua iterativamente, aplicando o critério de priorização estabelecido pelo *FMM*, até que todos os pixels degradados tenham sido restaurados com sucesso. Concomitantemente ao procedimento de restauração, uma máscara binária de dimensões idênticas às da imagem degradada é mantida. Esta máscara guarda o estado de cada pixel, isto é, se foi ou não restaurado, fornecendo um meio eficaz de monitorar o progresso da restauração e de auxiliar na seleção de amostras durante todo o processo.

4. Resultados

A técnica *SPM* e todas as técnicas analisadas foram implementados na linguagem de programação Rust e os experimentos foram executados em um computador com um processador Intel(R) Xeon(R) E5-2690 (2.90GHz) e 32GB de memória RAM. As técnicas selecionadas foram executados em uma única thread, enquanto que a técnica *SPM* foi paralelizada em 16 threads reais, utilizando a biblioteca *Rayon*, que adota o modelo de programação concorrente forkjoin (Matsakis e Stone, 2023), (Conway, 1963). Deste modo, é relevante observar que o tempo de processamento pode variar de acordo com as especificações do hardware, pois fatores como frequência do processador e número de núcleos podem impactar o desempenho.

Para as técnicas de Telea (2004), Bertalmio et al., (2001) e a técnica *SPM*, foi utilizada uma vizinhança 5×5 . Na técnica de Oliveira et al. (2001), foram utilizadas 500 iterações e utilizada a implementação “Simplificada” do algoritmo, conforme descrito no artigo original de Oliveira et al. (2001).

4.1. Avaliação Qualitativa

Para a avaliação qualitativa foi utilizada a imagem original já degradada, apresentada na Figura 4(a). A máscara, em 4(b), selecionada manualmente, define as regiões com arranhões mais notáveis, tarefa que um usuário deve realizar para aplicar as técnicas selecionadas. A Figura 4 exibe uma série de resultados de restauração para uma fotografia com arranhões. A imagem original, a máscara com a região degradada e os resultados obtidos através das técnicas de Oliveira et al. (2001), Bertalmio et al. (2001), Telea (2004), uma média entre Bertalmio et al. (2001), Telea (2004) e *SPM* são representados pelas imagens 4(a) a 4(g), respectivamente. Em (a) tem-se a imagem original que contém arranhões devido à deterioração do material fotográfico. Em (b) tem-se a máscara binária construída manualmente (A cor branca indica os pixels que devem ser mantidos, enquanto o preto indica pixels a serem restaurados. Em (c) tem-se a imagem restaurada pela técnica de Oliveira et al. (2001). Em (d) tem-se a imagem restaurada pela técnica de Bertalmio et al. (2001). Em (e) tem-se a Imagem restaurada pela técnica de Telea (2004). Em (f) tem-se a imagem restaurada pela Média entre Bertalmio et al. (2001) e Telea (2004). Em (g) tem-se a restauração obtida com a técnica *SPM*. Todas as técnicas foram eficazes na remoção dos arranhões, embora apresentem diferentes graus de artefatos visuais. Notavelmente, as técnicas baseadas em síntese de textura e EDP, como a técnica de Bertalmio et al. (2001), oferecem melhores resultados visuais em áreas pouco extensas e promovem uma suavização das regiões restauradas.

A Figura 4g exibe o resultado da restauração com a *SPM*. Observa-se que a *SPM* foi eficaz na remoção dos arranhões, porém introduziu artefatos de alta frequência nas bordas da imagem. Essa característica decorre da estratégia de seleção de pixels, que se baseia em similaridade ao invés de proximidade espacial. A aplicação de um filtro passa-baixa, como a mediana, poderia mitigar esse efeito indesejado, mas aumentaria o tempo de processamento e portanto não foi adotada.

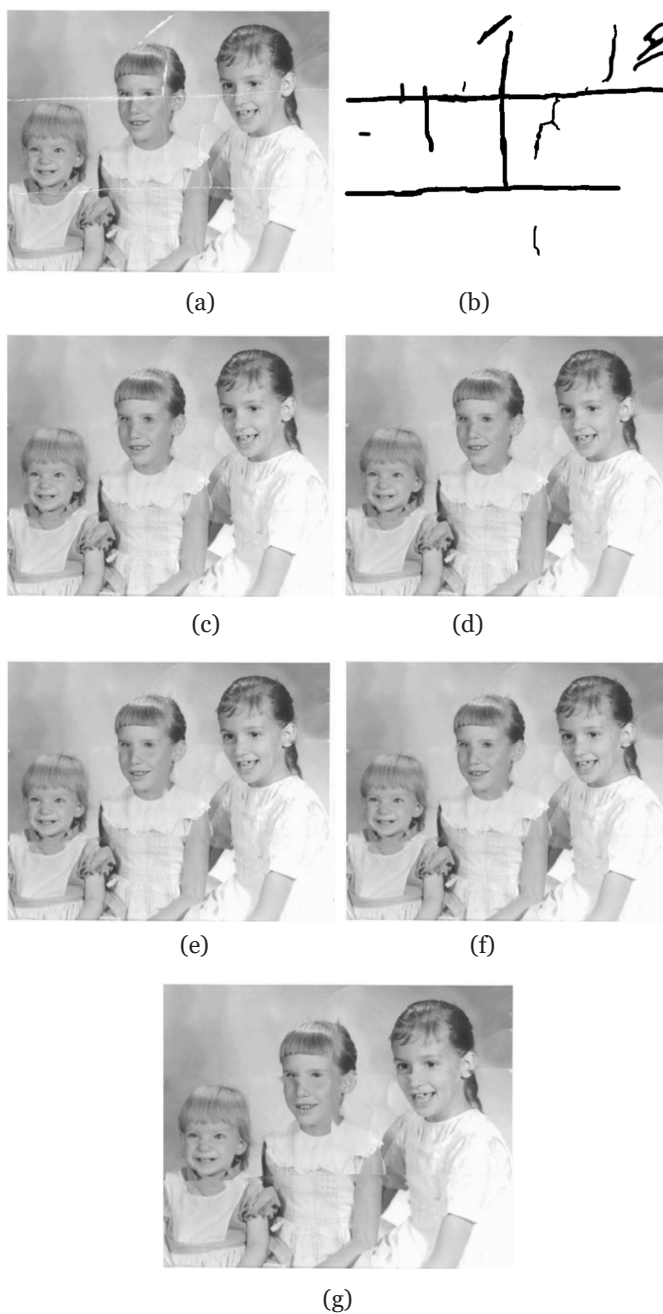


Figura 4 – Aplicação das técnicas avaliadas em uma fotografia contendo arranhões. A máscara incide sobre os arranhões e pequenos detalhes da imagem.

4.2. Avaliação Quantitativa

Os experimentos que medem quantitativamente os resultados tomam a imagem de entrada, aplicam a ela uma degradação e, em seguida, aplicam a restauração, usando uma das técnicas. Por fim, comparam este resultado com a imagem original, usando as métricas. Esta estratégia permite uma comparação robusta entre diferentes técnicas de *inpainting*, pois as regiões degradadas são selecionadas de maneira aleatória para cada imagem de entrada. Adotar este procedimento facilita a padronização na obtenção dos resultados, tornando os trabalhos selecionados comparáveis entre si, assim como outros presentes na literatura. Isso é crítico para avaliar a eficácia relativa de diferentes abordagens, especialmente quando aplicadas a um conjunto diversificado de imagens com características variadas. Ademais, O conjunto de imagens empregado consiste em 1.600 imagens, sendo 800 imagens de baixa resolução e 800 imagens de média resolução, todas extraídas diretamente do banco de imagens *DIV2K* (Ignatov et al., 2019). A degradação foi realizada preenchendo regiões aleatórias da imagem com glifos, linhas, círculos e outras formas geométricas, como ilustrado na Figura 5.

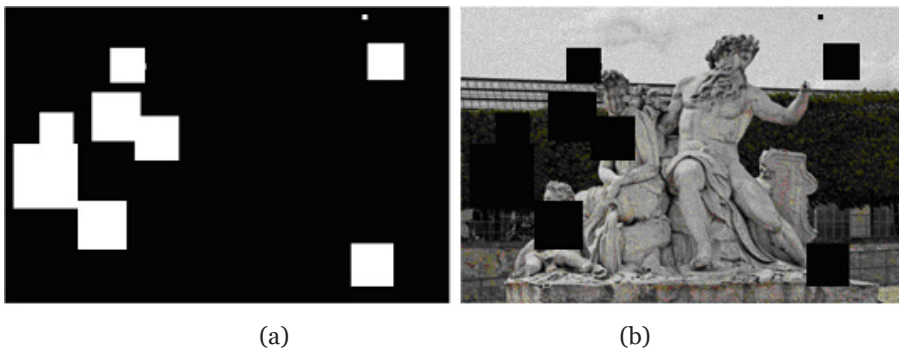


Figura 5 – Exemplo de degradação de uma imagem. A máscara de degradação é aplicada à imagem original, resultando na imagem degradada. A máscara pode ser em qualquer formato, como linhas, círculos, quadrados, etc, e devem ser fornecidas pelo usuário e contidas nas dimensões da imagem original.

Em (a) tem-se uma máscara de degradação composta por vários quadrados de tamanhos diversos. A cor branca indica pixels que devem ser restaurados, enquanto o preto indica pixels que devem ser mantidos. Em (b) tem-se a imagem original degradada com a máscara de degradação. Apesar da área degradada ser destacada em preto, os algoritmos não consideram essa informação para a restauração, utilizando apenas a região conhecida fornecida pela máscara em (a).

Inicialmente, foi conduzido um experimento qualitativo que aplicava uma média aritmética, nomeada como MISTO B & T, entre as abordagens de Bertalmio et al. (2001) e Telea (2004), revelando já antes de ser mensurado, altíssima semelhança visual, como é visível na Seção 4.1. Já num contexto de mensuração quantitativa, os resultados dos experimentos exibiram valores semelhantes, com uma pequena

vantagem para a técnica de Bertalmio et al. (2001), como pode ser observado nas Figuras 6, 7, 8 e 9. Este resultado era esperado, dado que o algoritmo de Telea (2004) foi desenvolvido como uma simplificação e otimização de técnicas anteriores, como Bertalmio et al. (2001), Oliveira et al. (2001). No entanto, a média calculada entre ambos não demonstrou uma melhoria significativa na qualidade da restauração da imagem, implicando que a fusão desses algoritmos não configura uma estratégia efetiva de otimização. Durante a realização deste trabalho, foram exploradas outras possibilidades de integrar técnicas de naturezas diversas, aplicando a média e a mediana entre todas as técnicas implementadas, referenciando-as como MÉDIA e MEDIANA. A hipótese subjacente era de que, ao combinar as virtudes e limitações inerentes a cada técnica, poderia ser possível alcançar um desempenho de restauração mais robusto. Para executar essa integração, foram fundidos os resultados do processo de *inpainting* após a restauração completa dos pixels. Tal procedimento foi adotado em razão dos diferentes critérios de priorização de pixels empregados por cada algoritmo em suas respectivas iterações.

Ao analisar as métricas, nota-se que a técnica *SPM* destaca-se positivamente com várias métricas como *EMA*, *EMQ*, *PSNR* e *SSIM*. Esses indicadores atestam que a técnica *SPM* oferece uma restauração superior às demais técnicas avaliadas e com um nível de consistência maior. No entanto, essa performance vem ao custo de um tempo de execução mais longo, o que pode ser um fator limitante dependendo do contexto de aplicação.

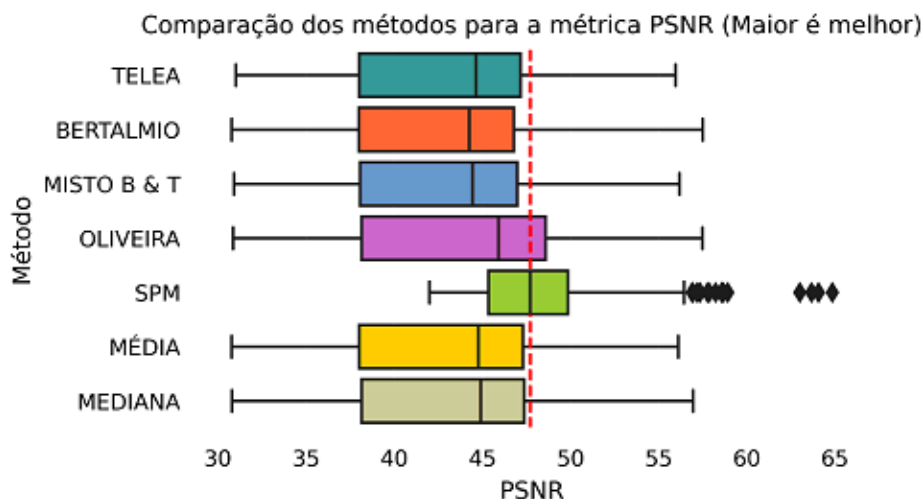


Figura 6 – Boxplot da métrica *PSNR* para imagens de baixa resolução.

Para esta métrica, a técnica *SPM* obteve os maiores valores e, portanto, os melhores resultados. Os marcadores indicados com a linha tracejada indicam alguns resultados excepcionais obtidos com a técnica *SPM* (*Outliers*), muito superiores em relação às demais técnicas.

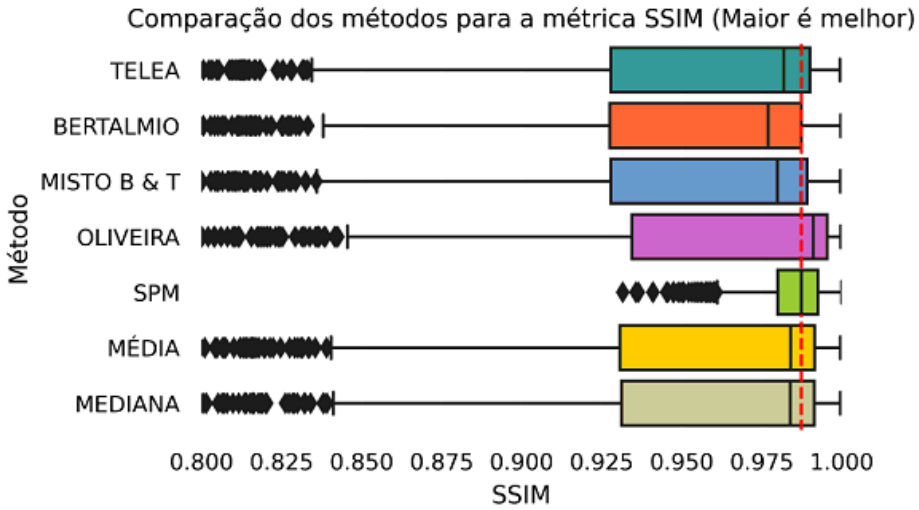


Figura 7 – Boxplot da métrica *SSIM* para imagens de baixa resolução.

Para esta métrica, a técnica *SPM* também obteve os maiores valores e, portanto, os melhores resultados. Os outliers obtidos com a *SPM* também são bastante superiores aos outliers obtidos com as demais técnicas.

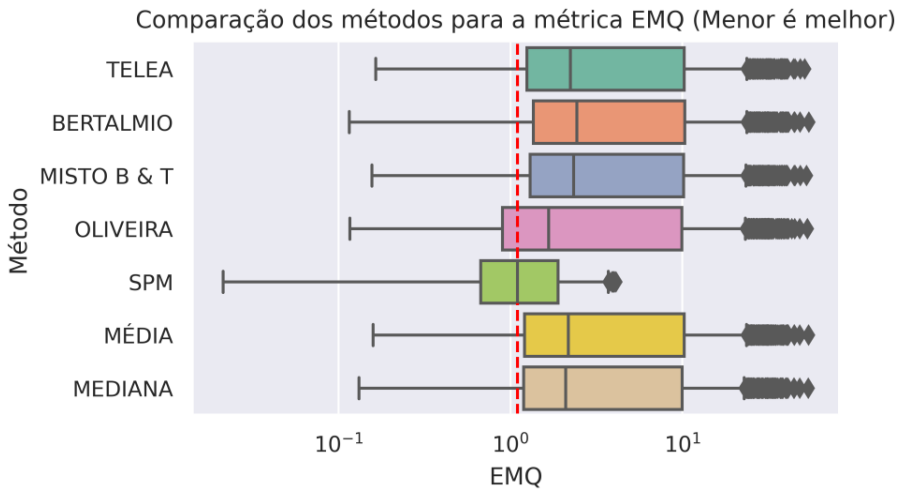


Figura 8 – Boxplot da métrica *EMQ* para imagens de baixa resolução.

Para esta métrica, a técnica *SPM* obteve os menores valores e, portanto, os melhores resultados. Os outliers obtidos com a *SPM* também são bastante superiores aos Outliers obtidos com as demais técnicas.

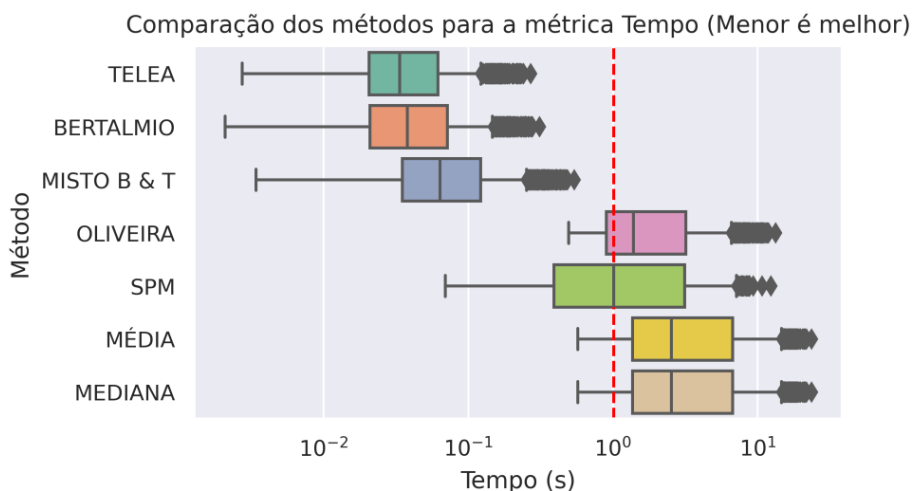


Figura 9 – Boxplot da métrica tempo de execução para imagens de baixa resolução.

Para esta métrica, a técnica *SPM* apresenta resultados piores que as técnicas de Telea (2004), Beltamio et al. (2001) e Misto B&T, ficando próximo ao resultado obtido por Oliveira et al. (2001). De fato, a técnica de Telea (2004) é notavelmente mais rápida, mas as métricas indicam um comprometimento da qualidade da restauração. O próprio autor reconhece essa troca em seu artigo, justificando uma implementação mais simples. A técnica de Oliveira et al. (2001), por sua vez, apresenta um perfil mais equilibrado, com desempenho mediano em métricas como *EMA* e *EMQ*. Contudo, ele exibe uma dispersão maior nessas medidas, o que sugere que seu desempenho pode ser sensível às propriedades específicas da área da imagem que necessita de restauração.

Em relação à variabilidade dos resultados, uma análise da Figura 9 aponta diferenças notáveis entre as técnicas, tanto no aspecto do potencial de restauração de imagens, quanto no tempo de execução necessário para cada abordagem. A técnica *SPM* se destaca por sua menor variabilidade nas métricas de *PSNR*, *EMQ*, e *SSIM*, especialmente quando aplicado a imagens de baixa qualidade. Esta consistência sugere que a *SPM* é mais robusta e confiável, gerando resultados de restauração de alta qualidade de forma mais uniforme. Vale destacar também que os outliers associados a esta técnica superaram qualitativamente os das técnicas comparada, indicando seu potencial até mesmo em casos extremos. Em contrapartida, a técnica de Oliveira et al. (2001) exibe uma maior variabilidade nos resultados, uma particularidade que parece ser intrínseca à sua técnica baseada em convolução. Esta sensibilidade a variações pode ser considerada uma desvantagem, especialmente em aplicações onde a consistência é crucial. No que tange ao tempo de execução, embora a *SPM* se assemelhe a de Oliveira et al. (2001), ele apresenta flutuações mais significativas. Esta variação é particularmente influenciada pelas dimensões da imagem em questão e pela extensão da área degradada, tornando o tempo de processamento um fator menos previsível neste contexto.

Nas técnicas restantes, por serem intrinsecamente similares em suas abordagens, manifestam uma baixa variabilidade em termos de métricas de qualidade e tempo de

execução. Contrariamente às expectativas iniciais do autor, a média e a mediana dos resultados não evidenciaram melhorias significativas, mesmo quando diferentes técnicas foram combinadas. Esta observação questiona a eficácia da combinação de múltiplas técnicas como uma estratégia para otimizar a restauração de imagens. Em resumo, a decisão sobre qual técnica utilizar deve ser baseada em quais atributos são mais críticos para o usuário ou para a aplicação em questão: se a qualidade da restauração é a prioridade, a *SPM* é a mais indicada, apesar de mais consumir mais tempo e recurso computacional para completar a tarefa. Se a rapidez for mais crítica, outras opções podem ser mais adequadas, como o trabalho de Telea (2004).

4.3.Comparação entre resoluções

As imagens do dataset utilizadas foram as de baixa e média resolução, sendo as resoluções próximas de 256×256 e 512×512, respectivamente. Esta análise foi realizada para validar a variabilidade destas técnicas quando observadas em resolução distintas.

Nos resultados comparativos apresentados nas Tabelas 1 e 2, Bmétrica e Mmétrica representam as métricas para imagens de baixa e média resolução, respectivamente. Para métricas quantitativas, exceto o tempo de execução, imagens de média resolução exibiram desempenho superior em geral.

Técnica	Tempo médio	Tempo mediano	EMA médio	EMA mediano	EMQ médio	EMQ mediano
Bertalmio	1.95	3.70	0.44	1.04	0.38	0.90
Telea	1.79	3.20	0.45	1.07	0.38	0.95
Misto B&T	1.92	3.68	0.44	1.00	0.38	0.93
Oliveira	2.17	3.97	0.44	1.14	0.37	0.96
Spm	7.47	13.41	0.77	0.27	0.70	0.28
Média	4.38	7.72	0.44	1.06	0.37	0.93
Mediana	4.38	7.72	0.44	1.08	0.37	0.95

Tabela 1 – Comparativo do desempenho de restauração para resoluções distintas. As razões entre médias $M_{métrica}/B_{métrica}$ e medianas $M_{métrica}/B_{métrica}$ foram empregadas para quantificar a comparação. Resultados inferiores a 1 denotam um desempenho superior para imagens de média resolução em comparação com imagens de baixa resolução.

Conforme antecipado, o tempo de execução aumentou com a resolução devido à complexidade quadrática da *SPM*, embora a qualidade se mantivesse comparável às outras técnicas. Contudo, apesar dos resultados possuírem uma média aritmética melhor (com melhor qualidade), a mediana permaneceu estável, marginalmente pior em imagens de média resolução.

Técnica	PSNR médio	PSNR mediano	SSIM médio	SSIM mediano
Bertalmio	1.09	1.01	1.04	1.01
Telea	1.09	1.01	1.04	1.01
Misto B&T	1.09	1.01	1.04	1.01

Técnica	PSNR médio	PSNR mediano	SSIM médio	SSIM mediano
Oliveira	1.09	1.00	1.04	1.01
Spm	1.07	1.12	1.01	1.01
Média	1.09	1.01	1.04	1.01
Mediana	1.09	1.00	1.04	1.01

Tabela 2 – Comparativo do desempenho de restauração para resoluções distintas. Resultados menores que 1 denotam desempenho superior para imagens de média resolução em comparação com imagens de baixa resolução.

Embora a média aritmética tenha indicado melhor qualidade, a mediana manteve-se estável ou marginalmente inferior para imagens de resolução média. A Figura 10 ilustra que, exceto para a *SPM*, houve um ligeiro declínio na mediana dos valores de *EMA* ao aumentar a resolução. A *SPM*, porém, registrou uma mediana menor (indicando melhoria), provavelmente devido à maior diversidade de amostras, o que favorece a precisão no preenchimento. Apesar dessa vantagem específica, o boxplot demonstra uma melhora abrangente em desempenho e aumento variabilidade para todas as técnicas.

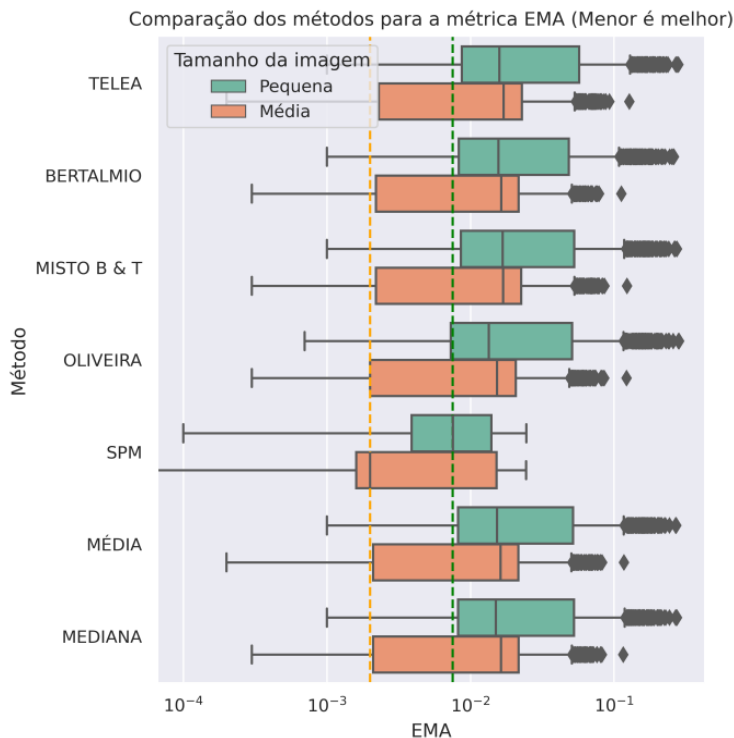


Figura 10 – Boxplot da distribuição do *EMA* por técnica, comparando o desempenho em imagens de baixa e média resolução.

Para esta métrica, a técnica *SPM* também obteve os menores valores e, portanto, os melhores resultados, quando comparada a todas as demais técnicas.

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho é proposta uma nova técnica, a *SPM*, que obteve resultados superiores à algumas das técnicas mais estabelecidas do campo. Nas diversas métricas quantitativas empregadas se mostrou superior em quesito de similaridade com a imagem de entrada. A estratégia de usar amostras demonstrou ser muito eficaz na propagação dos pixels, potencializando a otimização dos resultados em áreas mais extensas da imagem. No entanto, vale ressaltar que o algoritmo focou na síntese dos valores em um pixel, sem efetivamente propagar as amostras de dimensão $n \times n$. Além disso, apesar do emprego do paralelismo, o desafio da escalabilidade se mantém, visto que a quantidade de amostras necessárias para comparação em cada pixel aumenta proporcionalmente ao dimensionamento da imagem. Também é importante destacar que a *SPM* apresentou alta frequência nos artefatos em regiões de borda, particularmente porque não se utiliza da vizinhança imediata para o preenchimento dos pixels. Essa ocorrência foi notável em diversas situações analisadas. Uma possível solução para atenuar esse problema seria a aplicação de um filtro de suavização passa-baixa, como o filtro gaussiano. No entanto, essa abordagem não foi investigada no âmbito deste estudo.

Em trabalhos futuros, deve-se investigar técnicas mais sofisticadas de seleção de amostras, como em Barnes et al. (2009). Essa evolução poderá mitigar a complexidade quadrática associada ao problema, tornando a abordagem mais viável para aplicações em larga escala. Por fim, o uso de técnicas de aprendizado de máquina para aprimorar o preenchimento de pixels é uma perspectiva promissora e já difusa para aprimorar a qualidade dos resultados (Rombach et al., 2021), (You et al., 2019), (Liao et al., 2018), (Rangel et al., 2019).

Referências

- Barnes, C., Shechtman, E., Finkelstein, A., Goldman, D. B. (2009). PatchMatch: A randomized correspondence algorithm for structural image editing. *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH)*, 28. <https://doi.org/10.1145/1531326.1531330>.
- Bertalmio, M., Bertozzi, A., Sapiro, G. (2001). Navier-stokes, fluid dynamics, and image and video inpainting, in *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR*, (vol. 1). <https://doi.org/10.1109/CVPR.2001.990497>.
- Cheng, J., Li, Z. (2018). Markov random field-based image inpainting with direction structure distribution analysis for maintaining structure coherence. *Signal Processing*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2018.09.004>.
- Conway, M. E. (1963). A multiprocessor system design. in *Proceedings of the November 12-14, 1963, Fall Joint Computer Conference, AFIPS '63*, (pp. 139–146). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/1463822.1463838>.

- Elharrouss, O., Almaadeed, N., Al-Maadeed, S., Akbari, Y. (2019). Image inpainting: A review. *Neural Processing Letters*, 51:2007–2028. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.06399>.
- Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press, <http://www.deeplearningbook.org>.
- Ignatov, A., Timofte, R. (2019). Pirm challenge on perceptual image enhancement on smartphones: report. in *European Conference on Computer Vision (ECCV) Workshops*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.01641>.
- Kuszmaul, C. L. (2023). *Dictionary of Algorithms and Data Structures*. <https://www.nist.gov/dads/HTML/heap.html>.
- Liao, H., Funka-Lea, G., Zheng, Y., Luo, J., Zhou, S. K. (2018). Face completion with semantic knowledge and collaborative adversarial learning, in *14th Asian Conference on Computer Vision*, Perth, Australia.
- Matsakis, N. Stone, J. (2023). Rayon: Simple work-stealing parallelism for Rust.
- Oliveira, M., Bowen, B., McKenna, R., Chang, Y.-S. (2001). Fast digital image inpainting. In *Proceedings of the International Conference on Visualization, Imaging and Image Processing (VIIP 2001)*, (pp. 261–266).
- Bradski, G. (2000). The OpenCV Library. *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*.
- Padua, D. (2011). *Encyclopedia of Parallel Computing*. Springer.
- Rangel, J. J., Ruiz, J. S, García, F., & Cervantes, J. (2019). Redes Neuronales Convolucionales en la identificación de melanomas benignos y malignos. *RISTI - Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, E23(2), 15-27. <https://www.risti.xyz/issues/ristie23.pdf>
- Ritchin, F. (2009). *After Photography*. WW Norton & Company.
- Rombach, R., Blattmann A., Lorenz, D., Esser, P., Ommer, B. (2021). Highresolution image synthesis with latent diffusion models, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.10752>.
- Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularlyspaced data. in *Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference, ACM '68*, p. 517–524. Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/800186.810616>.
- Telea, A. (2004). An image inpainting technique based on the fast marching method. *Journal of Graphics Tools*, 9. <https://doi.org/10.1080/10867651.2004.10487596>.
- You, S., You, N., Pan, M. (2019). Pi-rec: Progressive image reconstruction network with edge and color domain. *arXiv preprint arXiv:1903.10146*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1903.10146>.
- Wang, Z., Bovik, A., Sheikh, H., Simoncelli, E. (2004). Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(4):600–612. <https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861>.

ElicitAÇÃO: Jogo Educacional Híbrido para apoiar a Aprendizagem de Levantamento de Requisitos de Software

Lucas Dall Asta Martins¹, Giliane Bernardi²

lucasdallmartins@gmail.com; giliane.bernardi@ufsm.br

¹ Curso de Sistemas de Informação, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, RS, Brasil

² Departamento de Computação Aplicada, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, RS, Brasil

DOI: 10.17013/risti.61.20–35

Resumo: Este artigo apresenta o ElicitAÇÃO, jogo educacional híbrido que integra recursos analógicos (baralho e manual) e digitais (QR Codes, vídeos e quiz em aplicativo), concebido para apoiar o ensino de levantamento de requisitos de software. Seu design foi guiado pelo canvas ENDO-GDC, articulando objetivos pedagógicos e de game design em um cenário lúdico. A avaliação do jogo foi conduzida em ciclos de playtest, sendo discutidos os resultados da terceira sessão, por meio do questionário MEEGA+. Destacam-se como resultados a estética e a acessibilidade, bem como a interação social, a diversão, a relevância e a aprendizagem percebida, sobretudo sobre requisitos funcionais. Entre as fragilidades foi evidenciada a compreensão das regras, a dinâmica dos QR Codes e a identificação de requisitos não funcionais, apontando a necessidade de ajustes no conteúdo, revisão do manual e criação de vídeo de gameplay.

Palavras-chave: levantamento de requisitos; engenharia de software; jogos educacionais.

ElicitAÇÃO: A Hybrid Educational Game to Support Learning in Software Requirements Elicitation

Abstract: This paper presents ElicitAÇÃO, a hybrid educational game integrating analog resources (deck and rulebook) and digital ones (QR codes, video interviews, and a quiz app), designed to support the teaching of software requirements elicitation. Its design was guided by the ENDO-GDC canvas, combining pedagogical and game design goals in a playful scenario. The game was evaluated through playtest cycles, with this paper discussing the results of the third session using the MEEGA+ questionnaire. Findings highlight the game's aesthetics and accessibility, as well as social interaction, fun, relevance, and perceived learning, especially regarding functional requirements. Fragilities were identified in the understanding of rules, the dynamics of QR codes, and the identification of non-functional requirements, indicating the need for content adjustments, a revised rulebook, and the creation of a gameplay video.

Keywords: requirements elicitation; software engineering; educational games.

1. Introdução

A Engenharia de Software é uma área essencial para o desenvolvimento de sistemas, estruturando atividades que vão da concepção inicial do software até sua manutenção contínua (Pressmann & Maxim, 2021). Como parte do processo, a engenharia de requisitos assume papel estratégico ao garantir que os sistemas reflitam as reais necessidades dos usuários e demais partes interessadas, abrangendo atividades como elicitação (levantamento), análise, especificação, validação e gestão de requisitos (Pressmann & Maxim, 2021; Sommerville, 2012).

O levantamento de requisitos, foco deste estudo, consiste em identificar e compreender os objetivos, necessidades e expectativas dos stakeholders em relação a um sistema ou produto. Embora essencial, essa atividade é considerada desafiadora, sobretudo pela dificuldade de comunicação entre usuários e equipe de desenvolvimento, como evidencia a clássica frase de Pressman e Maxim, em seu livro (2021, p. 103): “Eu sei que você pensa que entende o que eu disse, mas o que você não entende é que o que eu disse não é o que eu queria dizer”.

Para lidar com tais desafios, a literatura recomenda a utilização de técnicas de levantamento de requisitos, como entrevistas, observações, questionários e análise de documentos (Carvalho & Chiossi, 2001; Vázquez & Simões, 2016). A aplicação adequada dessas técnicas permite coletar informações mais precisas, favorecendo a definição de requisitos funcionais — que descrevem funções ou comportamentos que o sistema deve executar — e não funcionais, que estabelecem restrições e características de qualidade que o sistema deve possuir e que estão relacionadas as suas funcionalidades, como desempenho, segurança e usabilidade (Valente, 2020).

No contexto educacional, pesquisas apontam que estudantes em processo de formação relatam dificuldades em conectar a teoria do levantamento de requisitos às práticas de elicitação, o que compromete a qualidade da aprendizagem e sua preparação para desafios profissionais (Mendes *et al.*, 2019). Esse conteúdo, em geral, é abordado de forma predominantemente teórica, com aulas expositivas centradas no professor e pouca oportunidade de prática. Como consequência, os alunos demonstram insegurança na aplicação das técnicas em situações reais, sobretudo na identificação de requisitos funcionais e não funcionais (Marinato & Alves, 2019).

Diante desse cenário, estudos reforçam a necessidade de adotar estratégias pedagógicas que aproximem teoria e prática, com destaque para metodologias ativas, como a aprendizagem baseada em problemas, vista como uma ferramenta eficaz para estimular a análise crítica e a resolução em situações contextualizadas (Portela *et al.*, 2017; Córdova-Esparza *et al.*, 2024). Nesse mesmo sentido, experiências que envolvam clientes reais em disciplinas de engenharia de requisitos têm mostrado impactos positivos na motivação e na compreensão aplicada dos conteúdos (Hagel *et al.*, 2018).

Seguindo esta direção, os jogos educacionais emergem como uma abordagem promissora. Além de promoverem engajamento e motivação, permitem que os estudantes vivenciem ciclos de ação–reflexão–ação em um ambiente seguro e controlado, estimulando

pensamento crítico, colaboração e tomada de decisão (Rosa *et al.*, 2021). Conforme destaca McGonigal (2012), jogos bem estruturados apresentam objetivos claros, regras, feedback constante e participação voluntária — elementos que, quando transpostos ao ensino, favorecem uma aprendizagem ativa.

No que se refere à interação, estudos demonstram que jogos pensados dentro de uma perspectiva colaborativa contribuem para a discussão sobre os conteúdos e para a aprendizagem individual a partir do coletivo (Pinheiro & Oliveira, 2023). Além disso, favorecem o desenvolvimento de competências socioafetivas, como a habilidade de trabalho em equipe (Cooney & Darcy, 2020) e as relações interpessoais, por meio do aumento dos níveis de interação em sala de aula (Akbulut & Eryılmaz, 2023), aspectos essenciais no contexto de equipes de desenvolvimento de software.

Apesar desses avanços, Lima *et al.* (2025) evidenciam, em um mapeamento sistemático voltado a identificar jogos digitais em português aplicáveis ao ensino de engenharia de requisitos no Brasil, que ainda são escassas as propostas, tendo sido localizados apenas nove trabalhos. Esses resultados mostram que o tema, embora relevante, permanece com espaço para ser mais explorado.

Considerando o exposto, este artigo apresenta o desenvolvimento e a avaliação de um jogo educacional híbrido, com ênfase na identificação de requisitos funcionais e não funcionais em um cenário lúdico de um parque de diversões. A proposta busca aproximar teoria e prática, estimulando a colaboração entre estudantes e ampliando as oportunidades de aprendizagem em sala de aula.

Para tanto, o artigo está estruturado da seguinte forma: a seção 2 apresenta trabalhos relacionados sobre o uso de jogos no ensino de Engenharia de Software, em especial, de engenharia de requisitos; a seção 3 descreve o percurso metodológico adotado; a seção 4 detalha o desenvolvimento do jogo, enquanto a seção 5 discute a avaliação e os resultados obtidos. Por fim, a seção 6 apresenta algumas considerações finais e perspectivas de continuidade deste projeto.

2. Trabalhos Correlatos

Esta seção apresenta alguns trabalhos analisados que dialogam com o jogo apresentado nesse artigo e ajudaram a subsidiar seu desenvolvimento. O jogo AD-RPG, proposto por Lemos *et al.* (2020), apresenta um ambiente digital adaptativo em estilo RPG medieval para ensinar técnicas de elicitación e diferenciação entre requisitos funcionais e não funcionais. Sua aplicação com estudantes de graduação mostrou-se relevante para a compreensão dos conteúdos, embora aponte necessidade de ajustes quanto ao tempo de execução, que foi considerado muito longo, e no design estético dos materiais de apoio.

Outra proposta é o Mike, Help Me!, desenvolvido por Venâncio & Benitti (2023), um jogo digital multijogador em que os alunos atuam como engenheiros de requisitos, competindo na produção de histórias de usuário. Os resultados apontaram que a proposta favorece tanto a aprendizagem da estrutura das histórias quanto dos critérios de qualidade associados. Além disso, a avaliação destacou a boa usabilidade do jogo.

Classifiqui (Monteiro *et al.*, 2022) é um jogo digital de cartas para Android, cujo objetivo é apoiar o ensino da classificação de requisitos de software. No jogo, os participantes devem identificar corretamente diferentes tipos de requisitos a partir de cartas, mantendo o projeto dentro do prazo e do orçamento estipulado. A avaliação do Classifiqui mostrou que a maioria dos participantes considerou o jogo fácil de usar e reconheceu ganhos no conhecimento sobre requisitos. Os estudantes classificaram a experiência geral como satisfatória e relataram como pontos de melhoria a inserção de feedback sobre acertos e a inclusão de instruções em determinados pontos do jogo.

No campo dos jogos analógicos, apresenta-se o RE-O-Poly, (Smith & Gotel, 2008), uma adaptação do tradicional jogo Monopoly, com o objetivo de apoiar pequenas organizações e engenheiros novatos na adoção de boas práticas de engenharia de requisitos. Resultados preliminares indicaram que a dinâmica despertou engajamento dos participantes e favoreceu uma maior compreensão de conceitos básicos de requisitos, sugerindo um potencial pedagógico relevante. O trabalho ainda destaca que a adoção de jogos pode beneficiar tanto a indústria quanto a academia, ao preparar futuros engenheiros de software para uma transição mais eficaz ao mercado.

A análise desses jogos trouxe contribuições importantes para o design da proposta, destacando o potencial da narrativa imersiva para engajar estudantes, a necessidade de adequar a dinâmica ao tempo de aula, a utilidade do formato de cartas e a relevância de oferecer instruções objetivas e feedback aos jogadores. Diferentemente dessas propostas, o ElicitAÇÃO combina colaboração, recursos analógicos e digitais e foco explícito na distinção entre requisitos funcionais e não funcionais em um tempo compatível com uma aula regular.

Nesse sentido, o jogo desenvolvido foi concebido para integrar tais elementos: utiliza a narrativa lúdica de um parque de diversões para reforçar a imersão, adota uma modalidade colaborativa que valoriza o trabalho em equipe e a interação entre os estudantes, combina recursos analógicos e digitais e organiza suas atividades para se ajustar ao tempo típico de uma aula (aproximadamente 50 minutos). Além disso, apresenta regras simples e objetivas, bem como feedback em diferentes formas ao final da atividade, buscando ampliar tanto o engajamento quanto a efetividade pedagógica em sala de aula.

3. Aspectos Metodológicos

Para o projeto do jogo foi adotado o game design canvas ENDO-GDC (Taucei, 2019), um canvas voltado à concepção de jogos educacionais endógenos, nos quais o conteúdo educacional está diretamente integrado à jogabilidade, de modo que jogar e aprender tornam-se a mesma atividade: para avançar, o jogador precisa aprender e aplicar os conceitos que estão embutidos no próprio desafio. Essa abordagem favorece a articulação entre aprendizagem e experiência lúdica, permitindo que os objetivos de ensino se concretizem no próprio ato de jogar.

O ENDO-GDC é estruturado em seis blocos principais que orientam o desenvolvimento de jogos: o Bloco do Usuário define o público-alvo e os desafios que justificam a existência

do jogo; o Bloco de Aprendizagem explicita os conteúdos pedagógicos e objetivos de aprendizagem; o Bloco de Narrativa se preocupa com a história e objetivos do jogo, reforçando o engajamento e a imersão; o Bloco de Gameplay contempla mecânicas, dinâmicas e elementos estéticos e de inspiração que sustentam a jogabilidade; já o Bloco da Experiência do Usuário foca na definição dos mecanismos de feedback; por fim, o Bloco de Restrições identifica limitações de recursos, tempo e contexto de aplicação, assegurando a viabilidade do jogo.

O desenvolvimento do jogo contou com o uso de diferentes tecnologias que integraram tanto a parte analógica quanto o aplicativo web de apoio. Para a produção das cartas físicas foram utilizados o Figma¹, para o design visual, e o Bing Image Creator², para a geração de ilustrações personalizadas que reforçam a identidade lúdica do jogo. O material físico foi complementado pelo uso de QR codes, gerados a partir da ferramenta QR Code Generator³, que direcionam os jogadores a conteúdos multimídia, como entrevistas simuladas, favorecendo a integração entre elementos analógicos e digitais. Esses vídeos foram produzidos com o auxílio do Vidnoz AI⁴, que permitiu criar narrativas contextualizadas para os personagens do parque temático. Já o aplicativo web foi implementado em React⁵, com suporte do Visual Studio Code⁶ como ambiente de programação.

A avaliação preliminar do jogo foi estruturada em três ciclos de playtest, compreendidos como momentos em que o protótipo em desenvolvimento é colocado em prática com jogadores para verificar se proporciona a experiência desejada. O playtest é considerado parte essencial de processos iterativos de design de jogos, permitindo identificar falhas, ajustar regras e refinar a experiência lúdica (Mourão e Mendonça Jr., 2017). Segundo Fullerton (2008), os testes devem iniciar com os próprios desenvolvedores, em versões simplificadas, evoluir para amigos e colegas próximos e, só então, avançar para jogadores externos, mais propensos a trazer críticas verdadeiras por não possuírem vínculo com os criadores.

Nesse sentido, os dois primeiros momentos de playtest foram realizados com os próprios desenvolvedores e, posteriormente, com colegas do grupo de pesquisa. Ambos tiveram caráter exploratório, funcionando como espaço de ajustes de regras e mecânicas, sem aplicação de instrumentos formais de coleta de dados.

O terceiro ciclo de playtest, foco deste artigo, foi conduzido com estudantes de graduação da área de Computação de uma universidade pública do estado do Rio Grande do Sul, no Brasil, matriculados na disciplina optativa Desenvolvimento de Software Educacional. A escolha deste grupo se justifica porque, embora os participantes não constituíssem o

¹ Disponível em: <https://www.figma.com/pt-br>

² Disponível em: <https://www.bing.com/create>

³ Disponível em: <https://www.qr-code-generator.com/>

⁴ Disponível em: <https://pt.vidnoz.com/>

⁵ React - Biblioteca JavaScript. Disponível em: <https://react.dev/>

⁶ Microsoft Visual Studio Code. Disponível em: <https://code.visualstudio.com/>

público-alvo final — alunos da disciplina de Engenharia de Software, já haviam cursado ou estavam cursando essa disciplina, possuindo conhecimento sobre o tema.

Além disso, encontravam-se, no momento, envolvidos em discussões e projeto de jogos educacionais, constituindo-se como avaliadores adequados para esta etapa, permitindo identificar problemas, limitações e potenciais melhorias no design do jogo e em seus aspectos pedagógicos relacionados ao levantamento de requisitos. A sessão teve duração aproximada de 60 minutos, incluindo explicação inicial, execução do jogo e resposta ao questionário. A aplicação ocorreu em ambiente de sala de aula, com os participantes organizados em grupos, e o questionário foi respondido individualmente, de forma online, logo após a experiência.

Participaram dessa sessão dois grupos de quatro estudantes cada. Após a experiência prática com o jogo, os participantes foram convidados a responder um questionário baseado no modelo de avaliação de jogos educacionais MEEGA+ (Petri *et al.*, 2019), que permitiu coletar percepções relacionadas à usabilidade, experiência do usuário e aprendizagem percebida. O modelo MEEGA+, originalmente concebido para avaliar jogos voltados ao ensino de Engenharia de Software, justifica-se neste trabalho não apenas por sua adequação ao contexto de jogos educacionais de computação, mas também por sua consolidação como instrumento metodológico. Um estudo recente (von Wangenheim *et al.*, 2025) aponta que o MEEGA+ tem sido amplamente adotado em estudos de caso, por sua facilidade de uso e capacidade de apoiar a análise da qualidade de jogos sob a perspectiva da aprendizagem e da experiência envolvida. No total, sete estudantes responderam ao questionário.

4. ElicitAÇÃO – Desenvolvimento e Apresentação

ElicitAÇÃO é um jogo cooperativo de cartas concebido para apoiar o ensino de levantamento de requisitos em disciplinas de Engenharia de Software. A proposta combina recursos analógicos (48 cartas e manual de regras) e digitais (QR Codes, vídeos e aplicativo web), projetada a partir do canvas ENDO-GDC.

A adoção de uma abordagem híbrida busca explorar as potencialidades complementares de recursos analógicos e digitais. Enquanto o formato físico busca favorecer a interação social, a negociação e o raciocínio coletivo, os elementos digitais permitem a incorporação de múltiplas mídias e feedback automatizado. Essa combinação justifica-se pela tentativa de ampliar as possibilidades de engajamento e aproximar a experiência de situações reais de levantamento de requisitos, que envolvem diferentes fontes de informação.

A Figura 1 apresenta o canvas preenchido, destacando as seções de cada bloco.

O público-alvo são estudantes de Engenharia de Software (jogadores), que vivenciam, em um ambiente lúdico, uma simulação próxima da prática profissional (problema). Na narrativa, os jogadores integram uma equipe de inovação convidada para projetar o *Imagination Park*. A missão consiste em analisar o parque atual que o proprietário possui, identificar problemas e necessidades e, a partir disso, apoiar a criação de um novo parque mais eficiente e atrativo (história e objetivos do jogo).



Figura 1 – Game Design Canvas do jogo ElicitAÇÃO (Fonte: dos autores)

Entre os objetivos de aprendizagem, destacam-se: aplicar de forma prática e contextualizada os conceitos de levantamento de requisitos; identificar requisitos funcionais e não funcionais em uma situação simulada; e estimular a colaboração e trabalho em equipe. Para isso, as 48 cartas simulam informações coletadas a partir de técnicas de elicitação de requisitos (entrevista textual e audiovisual, observação, questionário e análise de documentos) e trazem pistas relevantes ou irrelevantes sobre requisitos funcionais e não funcionais (conteúdo pedagógico).

O baralho é organizado em três tipos básicos: 1) cartas que trazem informações sobre requisitos funcionais e não funcionais do parque; 2) cartas relacionadas aos requisitos, mas que denotam conflitos de opinião, fazendo com que os jogadores precisem refletir sobre o que é realmente necessário ou não; e 3) cartas irrelevantes, que funcionam como distrações para o grupo, e devem ser descartadas. Cada jogador inicia o jogo com três cartas em mãos. A Figura 2 apresenta alguns exemplos de cartas criadas.

No que se refere a gameplay, o design traz como inspirações as mecânicas dos jogos comerciais Elementar⁷ (ações de revelar-manter/descartar evidências/cartas; análise final e pontuação) e Convidados Indesejados⁸ (fontes confiáveis — aqui representadas pela engenheira-chefe do parque, cujas declarações sempre são verdadeiras, auxiliando na tomada de decisão frente às cartas conflitantes).

As principais dinâmicas destacam a colaboração e negociação entre os jogadores e consolidação dos resultados por meio de um quiz digital. A estética, seguindo o que

⁷ <https://ludopedia.com.br/jogo/q-tomb-of-the-archaeologist>

⁸ <https://ludopedia.com.br/jogo/awkward-guests-the-walton-case>

sugere o ENDO-GDC, foi pensada para provocar curiosidade e engajamento: cores vivas, imagens lúdicas e a proposta investigativa de “coletar evidências relevantes” em diferentes formatos midiáticos (áudio, vídeo, texto e imagem).

Considerando as regras e ações do jogo (mecânicas), o fluxo ocorre em turnos. Em cada turno, o jogador deve escolher entre duas ações possíveis: revelar uma carta de sua mão, colocando-a na mesa como candidata a requisito relevante, ou descartar uma carta que considera irrelevante. Após a ação, o jogador obrigatoriamente compra uma nova carta do baralho (exceto se este estiver esgotado).

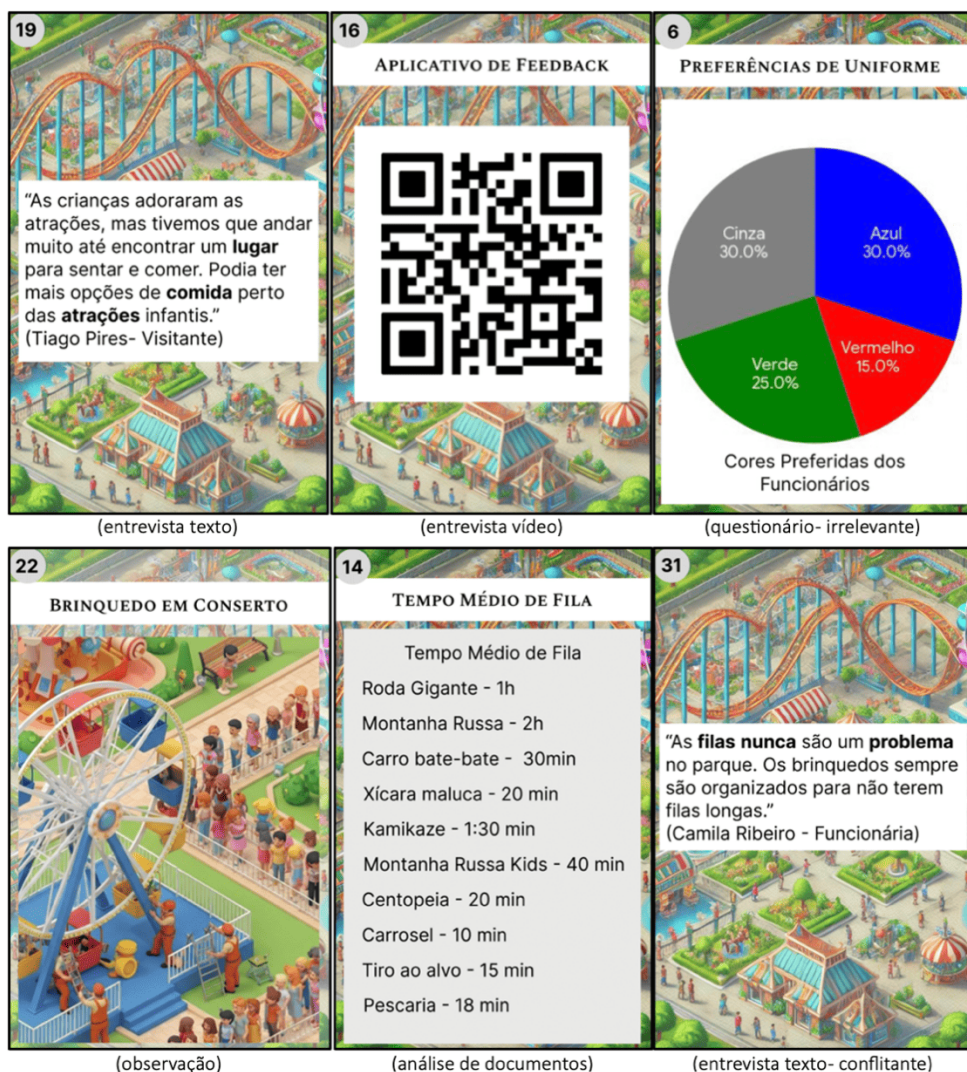


Figura 2 – Exemplos de cartas do jogo (Fonte: dos autores)

Durante as interações com a equipe, não é permitido mostrar diretamente as cartas; apenas os trechos em destaque (nas entrevistas textuais) ou os títulos (nas demais cartas) podem ser lidos em voz alta, exigindo argumentação e negociação entre os participantes. O turno segue para o próximo jogador e as rodadas se repetem até que todas as cartas tenham sido reveladas ou descartadas.

O jogo termina quando os jogadores não têm mais cartas em mãos. Nesse momento, o grupo deve discutir coletivamente sobre as cartas reveladas e avaliar sua relevância para o projeto do parque. Ainda é possível descartar cartas consideradas irrelevantes, mas não recuperar as já eliminadas. Essa etapa garante a consolidação do conhecimento em grupo, por meio da colaboração e da análise crítica.

Por fim, os jogadores devem acessar o aplicativo web, que apresenta um questionário composto por nove perguntas. Oito delas solicitam a associação de cartas a requisitos funcionais e não funcionais, enquanto a última aborda as técnicas de elicitación empregadas no jogo. Após o envio das respostas, o sistema apresenta a pontuação obtida e um feedback pedagógico e lúdico. Por exemplo, jogadores com alto desempenho recebem a mensagem de “Arquiteto de Diversões”, enquanto níveis intermediários ou iniciais recebem outras classificações que incentivam a progressão na aprendizagem.

Além disso, o sistema disponibiliza o gabarito detalhado, trazendo justificativas que evidenciam como cada carta se conecta ao requisito correspondente. No que se refere ao design, a interface do aplicativo foi concebida de forma simples e responsiva, organizada em três blocos principais: tela inicial, questionário e resultados (Figura 3), e prevê expansão para novos cenários de levantamento de requisitos.



Figura 3 – Interfaces do aplicativo do jogo (Fonte: dos autores)

Por último, destacam-se as restrições consideradas para aplicação do jogo: público - estudantes com conhecimentos básicos em engenharia de requisitos; contexto de uso

- preferencialmente em sala de aula, com mesas e cadeiras para organizar as cartas; recursos necessários - celular com câmera, fones de ouvido e acesso à internet, para assistir aos vídeos e ouvir os relatos de entrevista, e para responder ao questionário final no aplicativo.

O detalhamento de todas as etapas do desenvolvimento do jogo pode ser encontrado em Martins (2025) e o jogo está disponível para download no site do grupo de pesquisa⁹.

5. Avaliação e Discussão dos Resultados

Nesta seção, são apresentadas as análises referentes à terceira sessão de playtest, a partir das sete respostas obtidas com a aplicação do questionário MEEGA+, conforme descrito na seção de Aspectos Metodológicos. Também foram apresentadas algumas questões iniciais de perfil e, ao final, três questões abertas, voltadas a identificar o que os estudantes mais gostaram no jogo, os pontos que poderiam ser melhorados e comentários adicionais. Destaca-se que esta avaliação tem caráter exploratório e formativo, sendo conduzida com o objetivo de identificar potencialidades e fragilidades do protótipo em desenvolvimento, e não de mensurar efetividade pedagógica de forma conclusiva.

Primeiramente, é importante delinear o perfil dos participantes. O grupo, em sua maioria, era constituído por jovens de 18 a 25 anos (seis alunos), além de um estudante com idade superior a 25 anos. A maior parte cursava Sistemas de Informação (cinco), tendo um aluno do curso de Sistemas para Internet e um de Ciência da Computação. Em relação ao contato com jogos, verificou-se que dois relataram jogar jogos digitais diariamente, três afirmaram jogar mensalmente, um semanalmente e apenas um raramente. Já no caso dos jogos não digitais, todos indicaram que jogam raramente. Esse perfil revela uma familiaridade mais intensa com jogos digitais, contrastando com uma prática limitada com jogos analógicos, o que pode ter influenciado tanto a facilidade com os elementos tecnológicos do protótipo quanto as dificuldades iniciais relatadas para compreender as regras e dinâmicas do jogo.

O questionário foi estruturado com respostas em escala Likert de 1 (discordo totalmente) a 5 (concordo totalmente). Como a avaliação contou com apenas sete participantes, optou-se por apresentar os resultados em termos de médias por dimensão, dentro dos fatores de Usabilidade (estética, aprendizibilidade, operabilidade e acessibilidade) e Experiência do Jogador (confiança, desafio, satisfação, interação social, diversão, atenção focada, relevância e aprendizagem percebida). A Figura 4 sintetiza esses resultados.

No fator Usabilidade, destacaram-se positivamente as dimensões Estética (4,14) e Acessibilidade (4,43), refletindo os elogios ao design gráfico das cartas e à clareza visual dos elementos. Por outro lado, Aprendizibilidade (3,62) e Operabilidade (3,93) obtiveram médias mais baixas, indicando dificuldades iniciais na compreensão das regras e a necessidade de ajustes tanto no manual quanto na dinâmica de uso dos QR Codes.

Em relação à Experiência do Jogador, os resultados apontaram para uma avaliação muito positiva da Interação Social (4,90), confirmando o potencial cooperativo do

⁹ <https://www.ufsm.br/grupos/gptec>

jogo. Esse resultado dialoga com o que já havia sido discutido sobre jogos educacionais colaborativos, que apontam a interação entre os participantes como elemento central para o engajamento e para a aprendizagem a partir do coletivo (Pinheiro & Oliveira, 2023; Cooney & Darcy, 2020). Além disso, os resultados podem ser considerados alinhados com estudos que destacam o potencial dos jogos para o desenvolvimento de habilidades socioafetivas, como o trabalho em equipe, especialmente relevantes no contexto da Engenharia de Software (Akbulut & Eryilmaz, 2023).

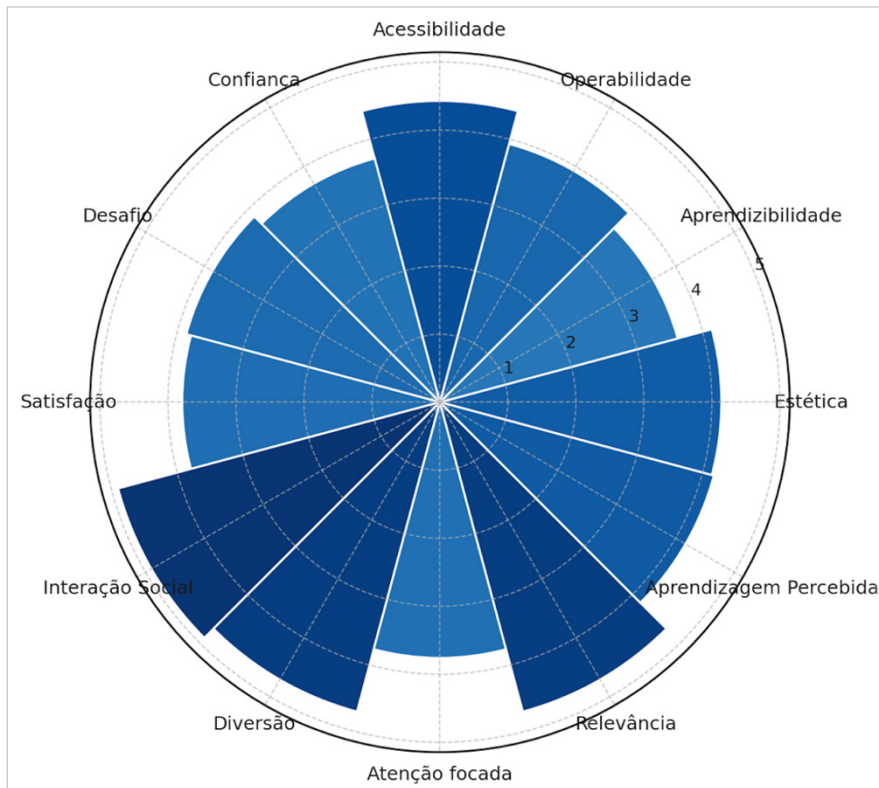


Figura 4 – Avaliação da qualidade do jogo (Fonte: dos autores)

Também se destacaram as dimensões Diversão (4,71) e Relevância (4,71), que reforçam a percepção de que a proposta foi considerada engajadora e conectada à disciplina. O resultado positivo quanto à relevância do jogo reforça argumentos já apresentados na literatura de que jogos educacionais, quando estruturados com objetivos claros, regras definidas e feedback, favorecem a aprendizagem ativa e o engajamento dos estudantes (McGonigal, 2012; Rosa *et al.*, 2021). Ainda, que o uso de um cenário lúdico associado a uma situação próxima da prática profissional contribui para aproximar teoria e prática, aspecto apontado como crítico no ensino de engenharia de requisitos (Portela *et al.*, 2017).

Por outro lado, dimensões como Confiança (3,71), Satisfação (3,79) e Atenção Focada (3,76) apresentaram médias menores, sugerindo que interrupções no fluxo de jogo — em especial pelo uso dos QR Codes e pela clareza insuficiente das regras — impactaram a experiência. Essas fragilidades apareceram também nos comentários: “os QR Codes não são necessários e atrapalham o fluxo do jogo”; “eu demorei um pouco para pegar as regras, talvez deixar a forma de apresentação das regras melhor”.

Um ponto que pode ter influenciado as dificuldades relatadas é a pouca experiência dos participantes com jogos não digitais. O jogo foi inspirado nos chamados jogos de tabuleiro modernos, que trazem regras e mecânicas mais elaboradas, diferentes dos modelos clássicos mais conhecidos, baseados usualmente em rolagem de dados e avanço em casas de um tabuleiro. Para quem não está habituado a esse estilo, a curva de aprendizagem tende a ser maior. Nesse sentido, uma alternativa já em desenvolvimento é a produção de um vídeo curto de gameplay, a ser apresentado antes da partida em sala de aula, acompanhando o manual de regras. Esse formato, bastante comum em comunidades de boardgame, facilita a compreensão inicial e reduz dúvidas. O vídeo será estruturado de modo a apresentar passo a passo as ações possíveis, exemplificando uma rodada completa do jogo.

Quanto ao uso dos QR Codes, embora tenham sido pensados para dar maior realismo às entrevistas de levantamento de requisitos, acabaram sendo percebidos como uma interrupção no andamento da partida. Uma alternativa é manter esse recurso, mas oferecer também a transcrição textual dos diálogos no manual ou em um anexo, de modo que os jogadores possam escolher a forma de acesso que considerarem mais prática.

A dimensão Desafio (3,86) mostrou que o jogo conseguiu propor um nível de dificuldade que instigou os estudantes a pensar e a discutir coletivamente. Essa percepção aparece também nas respostas abertas, em que mencionaram a “necessidade de raciocinar” como parte positiva da experiência.

Por fim, a dimensão Aprendizagem Percebida (4,17) também apresentou bons resultados, sendo que os estudantes afirmaram que o jogo pode contribuir efetivamente para a aprendizagem dos conteúdos da disciplina, sobretudo no que se refere ao levantamento de requisitos e aos requisitos funcionais. Por outro lado, houve relato de dificuldade em identificar quais seriam os requisitos não funcionais.

Estudos apontam que esse tipo de requisito tende a ser menos evidente e mais abstrato para estudantes em formação, especialmente quando comparado aos requisitos funcionais (Marinato & Alves, 2019; Mendes et al., 2019), o que reforça a necessidade de ajustes no conteúdo e nas estratégias didáticas do jogo para que este tema possa ser melhor compreendido. Como forma de ajuste, pretende-se revisar o conteúdo das cartas, tornando mais explícitas as pistas relacionadas a requisitos não funcionais, bem como incluir exemplos adicionais no material de apoio e no feedback do aplicativo.

Ainda considerando os comentários colocados nas questões abertas, os estudantes destacaram a interação entre colegas, as discussões geradas durante a partida, a necessidade de raciocínio e a criatividade da proposta. A fala de que “a discussão com os colegas acabava por ser engraçada” mostra como a cooperação também gerou diversão, o que reforça os resultados das dimensões Interação Social e Diversão. O design das

cartas foi igualmente ressaltado como diferencial, assim como o uso do aplicativo web, apontado como elemento que agregou à experiência.

Entre as sugestões, além dos ajustes pontuais já discutidos, foi sugerida a inclusão de novos cenários além do parque de diversões. Embora registrada no campo de melhorias, essa observação pode ser entendida mais como indício de envolvimento positivo com a proposta, já que os jogadores se mostraram interessados em ver a experiência ampliada e adaptada para outros contextos.

De forma geral, o jogo mostrou-se promissor como recurso de apoio ao ensino de requisitos de software, ao mesmo tempo em que promoveu cooperação e engajamento entre os estudantes. A partir da análise dos resultados, é possível sintetizar algumas lições aprendidas com a terceira sessão de playtest: (i) o jogo apresenta potencial para estimular a interação, a discussão e o raciocínio coletivo; (ii) a clareza das regras e do manual é um aspecto crítico para a fluidez da experiência; (iii) o uso de QR Codes, embora contribua para a imersão, pode interromper o fluxo do jogo e deve ser repensado; e (iv) a abordagem dos requisitos não funcionais precisa ser reforçada, dado o nível de dificuldade relatado pelos participantes. Estes pontos são importantes pois oferecem subsídios concretos para o aprimoramento da proposta e o refinamento de seu potencial pedagógico. Por fim, destaca-se que os resultados relacionados à aprendizagem se referem apenas à percepção dos participantes, não sendo possível inferir ganhos reais de aprendizagem a partir dos dados coletados.

6. Conclusões

Este artigo apresentou o jogo educacional ElicitAÇÃO, voltado ao ensino de Engenharia de Software, com ênfase no levantamento de requisitos. O uso do canvas ENDO-GDC para orientar o projeto do jogo demonstrou-se uma abordagem adequada para sistematizar decisões de design, contribuindo para a integração dos objetivos educacionais com a experiência lúdica.

A avaliação realizada por meio de uma sessão de playtest permitiu identificar tanto potencialidades quanto fragilidades do jogo, cumprindo um papel essencial no processo de desenvolvimento. Os resultados indicaram que o jogo favorece a cooperação, o engajamento e aprendizagem lúdica, ao mesmo tempo em que evidenciaram fragilidades relacionadas à clareza das regras, ao uso dos QR Codes e à compreensão de requisitos não funcionais.

Cabe ressaltar que a avaliação apresentada possui limitações, uma vez que foi conduzida com um número reduzido de participantes e com estudantes que, embora tivessem conhecimento prévio sobre engenharia de requisitos, não correspondiam integralmente ao público-alvo final do jogo. Essa característica configura uma ameaça à validade dos resultados, especialmente no que se refere à generalização das conclusões obtidas.

Ainda assim, a realização dessa sessão de playtest mostrou-se relevante para identificar o potencial da proposta e orientar ajustes no design do jogo, reforçando a importância de ciclos iterativos de avaliação e refinamento durante o desenvolvimento de jogos educacionais.

Entre as perspectivas futuras destacam-se a revisão do manual de regras, a produção de um vídeo de gameplay como apoio inicial, a adaptação dos materiais audiovisuais em formato textual, além da expansão para novos cenários de aplicação. A partir destes ajustes, pretende-se aplicar o jogo em turmas da disciplina de Engenharia de Software, buscando validar sua eficácia em contextos reais de ensino e aprendizagem, junto ao público-alvo para o qual foi concebido.

Referências

- Akbulut, I., & Eryilmaz, Ö. (2023). The effect of using games on students' cooperative learning skills in social studies course. *Journal of Innovative Research in Teacher Education*, 4(3), 410–426.
- Carvalho, H. G., & Chiossi, A. R. (2001). *Introdução à engenharia de software*. Campinas: Editora da Unicamp.
- Cooney, A., & Darcy, E. (2020). It was fun: Exploring the pedagogical value of collaborative educational games. *Journal of University Teaching & Learning Practice*, 17(3), 1–17.
- Córdova-Esparza, D. M., Romero-González, J. A., Córdova-Esparza, K. E., Terven, J., & López-Martínez, R. E. (2024). Active learning strategies in computer science education: A systematic review. *Multimodal Technologies and Interaction*, 8(6).
- Fullerton, T. (2008). *Game design workshop: A play centric approach to creating innovative games* (2nd ed.). Burlington: Morgan Kaufmann.
- Hagel, G., Müller-Amthor, M., Landes, D., & Sedelmaier, Y. (2018). *Involving customers in requirements engineering education: Mind the goals!* In Proceedings of the European Conference of Software Engineering Education (ECSEE 2018) (pp. 113–121). ACM.
- Lemos, E. L., Conceição, M. H., Nunes, F. B., Medina, R. D., & Bernardi, G. (2020). *AD-RPG: Elicitando requisitos na Idade Média utilizando um jogo educacional*. In Anais do 31º Simpósio Brasileiro de Informática na Educação (SBIE 2020). Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação.
- Lima, J., Serra, C. P., Carvalho, G., Gomes, R., Maia, I., Paiva, A., Viana, D., & Rivero, L. (2025). *Jogos educacionais para o ensino de engenharia de requisitos: Extraíndo características a partir de um mapeamento sistemático*. In Anais do 33º Workshop sobre Educação em Computação (WEI 2025). Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação.
- Marinato, M. S., & Alves, S. V. L. (2019). *Uma proposta de gamificação para o ensino de engenharia de software*. In Anais dos Workshops do VIII Congresso Brasileiro de Informática na Educação (CBIE 2019) (pp. 1165–1174). Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação.

- Martins, L. D. A. (2025). *ElicitAÇÃO: um jogo híbrido para apoiar o ensino e aprendizagem de levantamento de requisitos* (Trabalho de Conclusão de Curso). Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/35793>
- McGonigal, J. (2012). *A realidade em jogo: Por que os games nos tornam melhores e como eles podem mudar o mundo*. Rio de Janeiro: Best Seller.
- Mendes, J., Costa, Y., Frazão, K., Santos, R., Santos, D., & Rivero, L. (2019). *Identificação das expectativas e dificuldades de alunos de graduação no ensino de engenharia de software*. In Anais do XXVII Workshop sobre Educação em Computação (WEI 2019) (pp. 669–678). Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação.
- Monteiro, F. E. P., Carvalho, R. M., & Gonçalves, E. J. T. (2022). *CLASSIFIQUI: A game for software requirements classification learning*. In Anais do 21º Simpósio Brasileiro de Jogos e Entretenimento Digital (SBGames 2022). Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação.
- Mourão, M. A., & Mendonça Jr., G. M. (2017). *Boas práticas para a realização de playtest de jogos*. In Anais do 16º Simpósio Brasileiro de Jogos e Entretenimento Digital (SBGames 2017). Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação.
- Petri, G., von Wangenheim, C. G., & Borgatto, A. F. (2019). MEEGA+: Um modelo para a avaliação de jogos educacionais para o ensino de computação. *Revista Brasileira de Informática na Educação*, 27(3), 52–81.
- Pinheiro, A. K. B. C., & Oliveira, S. M. B. C. (2023). Inteligências múltiplas: O uso da jogabilização para o desenvolvimento de jogos educativos. *Revista Tecnologias Educacionais em Rede*, 3(1), e6.
- Portela, C., Vasconcelos, A., & Oliveira, S. R. B. (2017). *Um modelo iterativo para o ensino de engenharia de software baseado em abordagens focadas no aluno*. In Anais do XXVIII Simpósio Brasileiro de Informática na Educação (SBIE 2017) (pp. 290–299). Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação.
- Pressman, R. S., & Maxim, B. R. (2021). *Engenharia de software: Uma abordagem profissional* (9th ed.). Porto Alegre: AMGH.
- Rosa, L. H. C., Bernardi, G., & Duarte Medina, R. (2021). Mundos virtuais como apoio ao ensino e aprendizagem de engenharia de software: Simulando a técnica de entrevista. *Revista Novas Tecnologias na Educação*, 19(1), 371–381.
- Smith, R., & Gotel, O. (2008). *RE-O-Poly: A customizable game to introduce and reinforce requirements engineering good practices*. Pace University.
- Sommerville, I. (2012). *Engenharia de software* (9th ed.). São Paulo: Pearson.
- Taucei, B. B. (2019). *Endo-GDC: Desenvolvimento de um game design canvas para concepção de jogos educativos endógenos* (Dissertação de mestrado). Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.

- Valente, M. T. (2020). *Engenharia de software moderna: princípios e práticas para desenvolvimento de software com produtividade*. Editora: Independente.
- Vázquez, C. E., & Simões, G. S. (2016). *Engenharia de requisitos: Software orientado ao negócio*. Rio de Janeiro: Brasport.
- Venâncio, J. V. D., & Benitti, F. B. V. (2023). *Mike, help me!/: Um jogo para apoio ao processo de ensino-aprendizagem de técnica de especificação de requisitos de software*. In Anais do 31º Workshop sobre Educação em Computação (WEI 2023). Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação.
- von Wangenheim, C. G., Petri, G., & Borgatto, A. F. (2025). Using MEEGA/MEEGA+ for the evaluation of educational games: A retrospective. *Revista Brasileira de Informática na Educação*, 33, 943–971.

A importância de testes de performance na plataforma INEP: Um estudo de caso do ENEM

Débora Letícia Alves Pereira¹, Isabelly Maria Andrade Remígio²,
Brunno Wagner Lemos de Souza³

dlap1@discente.ifpe.edu.br; imar@discente.ifpe.edu.br; brunnosouza@jaboatao.ifpe.edu.br; brunno.souza@upe.br

¹ Análise e Desenvolvimento de Sistemas, Instituto Federal de Pernambuco, 54080-000, Jaboatão dos Guararapes, Brasil

² Análise e Desenvolvimento de Sistemas, Instituto Federal de Pernambuco, 54080-000, Jaboatão dos Guararapes, Brasil

³ Instituto Federal de Pernambuco, 54080-000, Jaboatão dos Guararapes, Brasil

DOI: 10.17013/risti.61.36–50

Resumo: A plataforma digital do Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM), mantida pelo Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (INEP), enfrenta recorrentes desafios de estabilidade e escalabilidade durante períodos de pico de acesso, comprometendo seu desempenho e disponibilidade. Este estudo analisa a importância dos testes de performance como estratégia para garantir a qualidade e a confiabilidade de sistemas governamentais de grande escala. Adota-se uma abordagem funcional dinâmica, sob a perspectiva de caixa-preta, avaliando o comportamento externo da aplicação. O plano de testes contempla Teste de Desempenho, Teste de Pico e Teste de Recuperação. Ferramentas open source, como Apache JMeter, k6 e Locust, são utilizadas para simular cenários de carga em operações críticas, como login e consulta de resultados, coletando métricas de tempo de resposta e throughput. Os resultados permitem identificar limitações e propor melhorias na plataforma.

Palavras-chave: ENEM; INEP; Caixa-Preta; Desempenho; Sistemas Governamentais.

The Importance of Performance Testing on the INEP Platform: A Case Study of ENEM

Abstract: The digital platform of the National High School Exam (ENEM), maintained by the National Institute for Educational Studies and Research Anísio Teixeira (INEP), faces recurring stability and scalability challenges during peak access periods, compromising its performance and availability. This study analyzes the importance of performance testing as a strategy to ensure the quality and reliability of large-scale government systems. A dynamic functional approach is adopted from a black-box perspective, evaluating the application's external behavior. The testing plan encompasses Performance Testing, Spike Testing, and

Recovery Testing. Open-source tools such as Apache JMeter, k6, and Locust are utilized to simulate load scenarios in critical operations, such as login and results inquiry, collecting metrics for response time and throughput. The results allow for the identification of limitations and the proposal of improvements for the platform.

Keywords: ENEM; INEP; Black-box Testing; Performance; Government Systems.

1. Introdução

A garantia da qualidade de software é um requisito não funcional essencial para sistemas que operam em larga escala, especialmente quando esses sistemas atendem a milhões de usuários simultaneamente. Em ambientes governamentais, essa necessidade é ainda mais crítica, pois falhas podem impactar diretamente a sociedade. No Brasil, o Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM), mantido pelo Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (INEP), representa o maior processo seletivo do país e é um dos principais portais de acesso ao ensino superior, concentrando milhões de acessos em períodos específicos (INEP, 2025). A robustez e a estabilidade da plataforma digital do ENEM são, portanto, fundamentais para a integridade do processo seletivo e para a manutenção da confiança pública nas políticas educacionais (Silva, Andrade e Ferreira, 2024).

Entretanto, a plataforma do ENEM apresenta episódios recorrentes de instabilidade e degradação de desempenho em períodos de pico, como a divulgação de resultados e a abertura de inscrições. Durante esses momentos, o sistema é sobrecarregado por acessos simultâneos, ocasionando lentidão e, em alguns casos, indisponibilidade completa do serviço. Conforme noticiado pela CNN Brasil (2024), em 2024 mais de 4,3 milhões de pessoas se inscreveram na prova, evidenciando a dimensão do tráfego enfrentado pela plataforma e as falhas que geraram frustração entre os usuários, demonstrando a vulnerabilidade da infraestrutura tecnológica empregada. Essa recorrência de problemas destaca a necessidade de aplicação sistemática de métodos de teste de performance, capazes de assegurar a escalabilidade e a confiabilidade do sistema.

O problema central deste estudo reside na incapacidade da plataforma do ENEM de sustentar níveis adequados de escalabilidade e desempenho em momentos críticos. A ausência de práticas consistentes de Engenharia de Performance compromete a capacidade do sistema de manter tempos de resposta aceitáveis e estabilidade operacional sob carga elevada. Estudos empíricos sobre problemas de desempenho em sistemas de software de grande escala (Zhao et al., 2021) e análises de métodos de teste aplicados a softwares informacionais complexos (Wang e Li, 2023) indicam que a falta de testes preventivos e planejados é um fator determinante para falhas em sistemas críticos, afetando negativamente a experiência do usuário e a eficiência do serviço público. Sendo assim, questiona-se: qual é o papel dos testes de performance na garantia da estabilidade e confiabilidade dos sistemas digitais do INEP, com foco nos processos relacionados ao ENEM?

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a importância dos testes de performance na manutenção da estabilidade e confiabilidade da plataforma do ENEM. Para tanto, propõe-se identificar métricas de desempenho relevantes para sistemas de larga escala e analisar o comportamento da plataforma em diferentes tipos de testes, incluindo carga,

desempenho, pico e recuperação. Dessa forma, o estudo combina uma abordagem prática e estratégica, orientando melhorias na infraestrutura e na gestão da performance da plataforma.

O estudo apresenta relevância tanto técnica quanto social. Tecnicamente, demonstra a aplicação prática de testes de performance utilizando ferramentas open source, como Apache JMeter, k6 e Locust, estabelecendo um roteiro de avaliação para sistemas críticos. Socialmente, contribui para a melhoria da qualidade de softwares governamentais, promovendo maior confiabilidade e melhor experiência para milhões de usuários da plataforma do ENEM. Em última instância, este trabalho evidencia o valor estratégico da Engenharia de Performance, fortalecendo a robustez de sistemas públicos digitais de grande escala (Beizer, 1990).

A seguir, o artigo é descrito da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a fundamentação teórica; a Seção 3 descreve a metodologia e a estrutura proposta; a Seção 4 analisa os resultados e discussões; a Seção 5 apresenta as limitações do estudo; e, por fim, a Seção 6 conclui o artigo.

2. Fundamentação Teórica

A qualidade de software é um requisito essencial para o desenvolvimento de sistemas confiáveis e eficientes, especialmente em contextos de larga escala, como os sistemas educacionais do Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (INEP) (INEP, 2025). Segundo Pressman (2016) define qualidade de software como o grau com que um produto satisfaz as necessidades explícitas e implícitas dos usuários, refletindo diretamente na confiabilidade e eficiência do sistema. Complementando essa visão, Sommerville (2019) reforça que a busca por qualidade está associada à implementação de processos contínuos de validação e verificação, com ênfase na prevenção de falhas desde as etapas iniciais do ciclo de desenvolvimento.

Nesse contexto, os testes de software representam uma das principais estratégias de controle da qualidade. Myers et al. (2011) definem o teste como o processo de execução controlada de um programa com o objetivo de identificar falhas antes de sua disponibilização ao público. Beizer (1990) destaca que, entre as diversas categorias de teste, os testes de desempenho, carga e estresse assumem papel central na avaliação da capacidade de resposta e resiliência de sistemas de larga escala. Estudos recentes, como o de Sousa (2025) e Lima et al. (2024), reforçam que a simulação de cenários de alto tráfego e falhas controladas permite compreender o comportamento dinâmico das aplicações e antecipar limitações de infraestrutura.

Os testes de performance, especificamente, são voltados para avaliar como o sistema se comporta sob diferentes cargas de trabalho, verificando métricas críticas como tempo de resposta, throughput, consumo de recursos e tolerância a falhas. Conforme Francis Press (2023), a aplicação sistemática de testes de performance permite identificar obstáculos, prever limitações de escalabilidade e fornecer dados concretos para otimização da infraestrutura. No contexto de sistemas educacionais de grande porte, como o ENEM, esses testes são fundamentais para garantir que milhões de usuários simultâneos possam acessar a plataforma sem degradação de serviço, antecipando problemas que poderiam

afetar a experiência do usuário e a confiabilidade do serviço público (CNN Brasil, 2024; Lima et al., 2024).

Zhao et al. (2021) enfatizam que o desempenho de software é um atributo de qualidade crítico que determina o sucesso de um sistema. Em um estudo empírico com 570 problemas reais de performance em 13 projetos de código aberto, os autores identificaram oito tipos gerais de falhas, padrões de otimização e lacunas na validação de desempenho durante os testes, evidenciando que a ausência de práticas consolidadas de engenharia de performance contribui significativamente para problemas de confiabilidade e eficiência. Esses achados consolidam a relevância de avaliar o desempenho de plataformas críticas, como as mantidas pelo INEP, que precisam suportar altas cargas de usuários sem comprometer a disponibilidade. Nesse contexto, a evolução da maturidade técnica em projetos complexos está diretamente ligada à adoção de roteiros (*roadmaps*) de melhoria contínua, garantindo que a infraestrutura acompanhe a crescente complexidade das demandas (Camargo & Galeale, 2024).

Em plataformas educacionais governamentais, como o ENEM, essas práticas de teste assumem caráter estratégico. Lima et al. (2024) demonstram que a aplicação de testes de performance pode reduzir significativamente o tempo de resposta e aumentar a confiabilidade percebida pelos usuários. Considerando o número expressivo de acessos simultâneos ao sistema do ENEM, a implementação sistemática de testes de carga, pico e recuperação é indispensável para garantir a continuidade operacional e a confiança pública.

No campo das ferramentas open source voltadas a testes de performance, destacam-se o Apache JMeter, o K6 e o Locust. O JMeter (The Apache Software Foundation, 2025) permite simular múltiplos usuários simultâneos e determinar métricas como latência, throughput e taxa de erro. O K6 (Grafana Labs, 2025) adota uma abordagem moderna e orientada a desenvolvedores, com scripts em JavaScript e integração contínua (CI/CD). Já o Locust (Locust.io, 2025), escrito em Python, oferece alta escalabilidade e flexibilidade, permitindo a criação de cenários distribuídos de forma programática. Assim, a combinação entre princípios de qualidade de software, práticas de teste e ferramentas especializadas forma a base para avaliação e aprimoramento da infraestrutura digital de sistemas críticos, contribuindo para a robustez técnica e a confiança social em serviços públicos digitais de larga escala, como o ENEM.

Dessa forma, a combinação de princípios de qualidade de software, práticas de teste e uso de ferramentas especializadas forma a base que ajuda a avaliar e aprimorar a infraestrutura digital de sistemas críticos. Os testes de desempenho, em particular, fornecem informações valiosas sobre como o sistema se comporta sob estresse, identificam pontos críticos de desempenho e sugerem melhorias estruturais que garantem estabilidade e confiabilidade, duas características essenciais para plataformas públicas de alto impacto, como a do INEP.

Além da execução empírica de testes, a engenharia de performance se apoia em modelos analíticos para projeção de cenários extremos. O Planejamento de Capacidade (Capacity Planning), conforme definido por Menascé e Almeida (2001), permite estimar a infraestrutura necessária para atender a demandas futuras baseando-se em dados de vazão e latência coletados em testes menores.

Complementarmente, para compreender os limites de crescimento do sistema, aplica-se a Lei Universal da Escalabilidade, proposta por Neil Gunther (2007). Esse modelo matemático demonstra que a escalabilidade de um software não é linear, sendo impactada por custos de contenção (disputa por recursos) e coerência (troca de dados), permitindo prever o ponto de saturação do sistema antes que ele ocorra fisicamente.

3. Metodologia

A pesquisa desenvolvida neste estudo é de natureza aplicada e exploratória, pois busca compreender de forma prática o comportamento da plataforma digital do Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM) frente a diferentes condições de carga e estresse, ao mesmo tempo em que investiga aspectos pouco documentados sobre desempenho e confiabilidade em sistemas de larga escala (Silva et al., 2024; Sommerville, 2019).

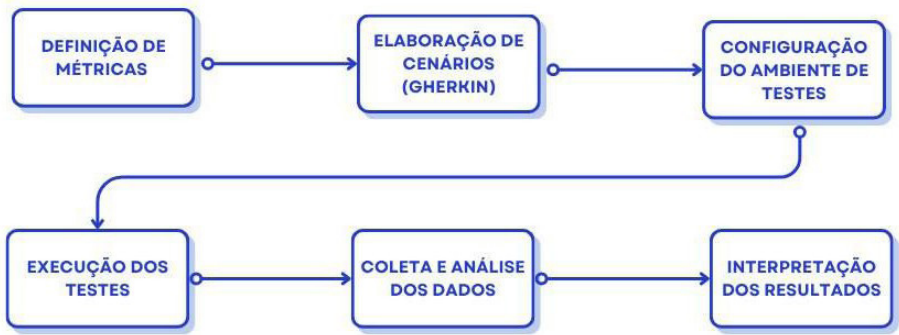


Figura 1 – Fases da Metodologia

Como pode ser visualizado na Figura 1, o procedimento metodológico adotado combina um estudo de caso centrado no ENEM com simulações de testes de performance, em que se identificam os principais desafios técnicos, previsões de limitações de escalabilidade e recomendações concretas para a otimização da plataforma.

A primeira etapa consiste em definir as métricas de avaliação e de parâmetros claros para avaliar a qualidade do sistema e do processo. Foram selecionadas três métricas principais:

- A confiabilidade foi medida por meio do fator recuperabilidade, com o critério de que o sistema deve se recuperar de falhas em até 5 minutos após falha simulada.
- A escalabilidade avaliou o comportamento do sistema sob carga massiva e picos repentinos. Os critérios incluem suporte a 100 mil acessos simultâneos (tempo < 5 segundos e taxa de erro < 2%) e cenários críticos de 200 mil acessos (tempo < 8 segundos e taxa de erro < 8%), além do balanceamento de carga entre regiões (Nordeste e Sudeste).
- A eficiência analisou o desempenho em operações críticas e sob uso prolongado. O critério exige resposta de login em até 3 segundos e estabilidade em carga constante de 50 mil usuários por 2 horas (soak test), com degradação máxima de 20%. Também foi avaliada a paridade de desempenho entre diferentes navegadores.

Em seguida, procedeu-se à elaboração dos cenários de teste por meio da linguagem Gherkin (Sousa, 2025), que permite a descrição de comportamentos esperados do sistema em formato legível e estruturado. Cada cenário simulou condições reais de uso, como recuperação após falha, acessos simultâneos e tempo de resposta durante login, assegurando a rastreabilidade entre requisitos e resultados obtidos durante os testes, conforme apresentado na Tabela 1.

Características	Casos de teste	Cenários (Gherkin)
Confiabilidade	Recuperação	Dado que o sistema do ENEM está sob teste de carga;
		Quando o servidor se torna temporariamente indisponível;
		Então o JMeter deve detectar a retomada das respostas HTTP 200;
		E calcular o tempo total de recuperação do serviço;
		E o tempo de recuperação não deve exceder 5 minutos.
Escalabilidade	Carga Nominal	Dado que o sistema do ENEM está operando normalmente;
		Quando 100 mil usuários acessam simultaneamente o portal e consultam resultados;
		Então o tempo médio de resposta deve permanecer abaixo de 5 segundos com taxa de erro deve ser inferior a 2%;
		E os recursos do servidor (CPU, memória) não devem exceder limites críticos.
Escalabilidade	Pico de Acesso	Dado a divulgação oficial de resultados;
		Quando 200 mil usuários acessam simultaneamente;
		Então o tempo de resposta deve ser < 8 segundos com taxa de erro < 3%.
Escalabilidade	Regionalização	Dado usuários distribuídos no país;
		Quando 10 mil usuários do Nordeste e Sudeste acessam simultaneamente;
		Então o tempo de resposta deve ser equivalente entre as regiões.
Eficiência	Login	Dado que o sistema do ENEM está preparado para 100 usuários simultâneos;
		Quando cada usuário realiza login com credenciais válidas;
		Então o tempo de resposta do sistema deve ser de até 3 segundos;
		E a taxa de erro não deve exceder 1%.
Eficiência	Uso prolongado	Dado operação contínua;
		Quando submetido a carga de 50 mil usuários por 2 horas;
		Então a degradação não deve exceder 20% do tempo inicial.
Eficiência	Compatibilidade	Dado que os usuários acessem de múltiplos navegadores;
		Quando os usuários realizarem o login; Então o tempo de resposta e degradação deve ser equivalente.

Tabela 1 – Cenários de testes de performance em Gherkin

A configuração do ambiente de testes consistiu na preparação de scripts de simulação e definição de parâmetros de carga, como o número de usuários virtuais, tempo de execução e volume de requisições. Além disso, foram utilizadas ferramentas de monitoramento de recursos de servidor para rastrear os indicadores de CPU, memória e latência, o que tornou os resultados replicáveis.

Como o código-fonte da plataforma ENEM não está disponível publicamente, os testes adotaram uma abordagem funcional dinâmica na forma de testes de caixa preta. Isso permitiu a análise do sistema com base no comportamento externo, onde a entrada no sistema e as respostas obtidas nas simulações medem o sucesso e a validade do teste, sem a necessidade de conhecimento prévio do código. Assim, a ênfase foi direcionada à experiência do usuário e à resposta da aplicação sob diferentes condições de carga, garantindo uma análise prática e objetiva de desempenho.

Na fase de execução, os testes seguiram os cenários definidos. Cada ferramenta foi aplicada de acordo com sua especialização: o JMeter para testes de carga e recuperação, o K6 para simulações de pico e o Locust para medições de escalabilidade com múltiplos usuários simultâneos. Essa combinação possibilitou a análise comparativa dos resultados e a verificação cruzada da consistência dos dados coletados

Por questões de ética e bloqueamento, a Lei Universal de Escalabilidade (LUE) (Gunther, 2007) foi utilizada para quantificar e prever o desempenho do sistema, transcendendo a limitação de testes puramente empíricos. A LUE é um modelo matemático que permite calcular o throughput (taxa de transferência) em função do aumento da concorrência, identificando os dois principais fatores que impedem a escalabilidade perfeita: Contenção (α), que é a serialização ou o bloqueio de recursos compartilhados (como locks de banco de dados), e Coerência (β), que representa o overhead de comunicação e sincronização entre os nós de serviço.

O uso da LUE é justificado pois permite que, mesmo que o projeto não possa simular a carga máxima em produção (por bloqueamento de ambiente de teste, limitação de infraestrutura ou preocupações de ética de não sobrecarregar sistemas parceiros), os resultados parciais coletados pelo JMeter, K6 e Locust podem ser extrapolados de forma cientificamente válida para prever o limite máximo de escalabilidade. Especificamente, a LUE transforma a análise de “o sistema ficou lento” em “o sistema atingiu o limite por X% de Contenção e Y% de Coerência”, permitindo que as conclusões do artigo forneçam diagnósticos precisos e sugiram otimizações focadas em serialização (se α for alto) ou comunicação entre nós (se β for alto)

A fase de coleta e análise dos dados teve como objetivo solidificar as métricas de desempenho resultantes de simulação, os indicadores apreendidos incluíram o tempo médio de respostas, a taxa de erro e o tempo de recuperação do sistema. Estes quantitativos forneceram percepções sobre como a plataforma se comportou sob os indicadores de trabalho de sobrecarga e pressão, e mesmo em quais aspectos o desempenho foi deficiente e onde foi aperfeiçoado.

Por fim, a etapa de interpretação dos resultados se propôs a converter os dados coletados em evidências práticas, visando elaborar um plano de teste de performance aplicável à infraestrutura do INEP. Nesse sentido, os cenários simulados de uso real da ENEM, como tentativas de acesso simultâneo, falhas temporárias e recuperação do

processo, orientaram o teste de limites operacionais com recomendações de otimização direcionados à confiabilidade, escalabilidade e eficiência do sistema.

Devido a restrições éticas e operacionais, os experimentos foram realizados com cenários representativos, priorizando qualidade analítica em detrimento de uma ampla variação experimental.

4. Resultados e Discussões

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir da execução dos cenários de teste definidos na metodologia. Os dados foram organizados conforme as três métricas escolhidas: confiabilidade (recuperação de falha), escalabilidade (capacidade de carga e pico) e eficiência (tempo de resposta em transições críticas). A análise combina dados empíricos coletados em ambiente controlado com projeções matemáticas para cenários de alta demanda massiva.

4.1. Análise de Confiabilidade e Recuperação (RTO)

Para avaliar a resiliência da plataforma, utilizou-se a técnica de Engenharia de Caos (Chaos Engineering), conforme proposto por Basiri et al. (2016), por meio do Apache JMeter (The Apache Software Foundation, 2025). Como não há acesso à infraestrutura interna do INEP, aplicou-se a injeção de falhas no lado do cliente (Client-Side Fault Injection). Scripts desenvolvidos em Groovy (JSR223) foram configurados para interceptar as requisições e forçar erros de conexão entre os segundos 60 e 120 da execução, simulando uma interrupção total de conectividade.

O objetivo foi mensurar o Recovery Time Objective (RTO), ou seja, o tempo necessário para o sistema voltar a processar requisições HTTP 200 após o término da falha. Os resultados demonstraram uma recuperação elástica quase instantânea, com o sistema registrando um RTO de 1,001 segundos, e a retomada do serviço ocorrendo imediatamente após o fim da janela de falha programada (120.000 ms), conforme evidenciado no log de execução (Figura 2).

```

111
112 ✓ EVENTO CRÍTICO: RECUPERAÇÃO DE SERVIÇO DETECTADA
113
114 🕒 Data/Hora : 08/12/2025 02:04:24.979
115 ⌚ Tempo Total Teste : 121.001 s
116
117 DADOS DA RETOMADA
118 • Thread : Teste Recuperação 1-72
119 • Status HTTP : 200 OK
120 • URL Acessada : https://enem.inep.gov.br/participante/
121 • Tamanho Resposta : 4060 bytes
122 • Latência da Req. : 1285 ms
123
124 RESULTADO (RTO)
125 • Janela de Falha : Encerrada em 120.000 ms
126 • Momento da Resposta : 121001 ms
127 • Tempo Exato (RTO) : 1.001 segundos
128 • Status : APROVADO!
129

```

Figura 2 – Log de execução demonstrando o momento exato da retomada do serviço e RTO.

A taxa de erro global foi de 22,74%, valor consistente estatisticamente com a duração da falha injetada (20% do tempo total do teste), o que indica que não houve geração de erros “fantasmas” ou travamentos (deadlocks) fora do período de indisponibilidade. Os dados consolidados de erro e vazão podem ser observados no quadro a seguir:

Label	HTTP request	Total
Samples	180.338	180.338
Average	138 ms	138 ms
Error %	22,74%	22,74%
Throughput	495,5/sec	495,5/sec

Tabela 2 – Relatório consolidado (summary report)

Com base na vazão (throughput) média de 495,5 requisições por segundo obtida por instância no teste, aplicou-se um modelo de planejamento de capacidade (Capacity Planning), conforme proposto por Menascé e Almeida (2001), para um cenário hipotético de “Manada” (Thundering Herd), com 3 milhões de usuários simultâneos. A fórmula utilizada para o cálculo do número de instâncias (N) foi:

$$N = \frac{D}{C_{unitário} \times (T_{meta} - L_{rede})}$$

Onde:

- D (Demanda) = 3.000.000 requisições
- $C_{unitário}$ (Capacidade medida no teste) = 495,5 req/s.
- T_{meta} (Tempo alvo de recuperação) = 300 segundos (5 minutos)
- L_{rede} (Latência) = 1,285 segundos

Aplicando os valores:

$$N = \frac{3.000.000}{495,5 \times (300 - 1,285)} \approx 21 \text{ instâncias}$$

O cálculo indicou que um cluster de aproximadamente 21 instâncias de balanceamento de carga seria suficiente para recuperar o serviço em até 5 minutos. Isso sugere que a arquitetura atual do INEP, baseada em nuvem, possui viabilidade técnica para suportar crises massivas através de auto-scaling.

4.2. Análise de Escalabilidade e Picos de Acesso

Devido às restrições éticas e de segurança da realizar ataques de negação de serviço em infraestrutura governamental, a avaliação de escalabilidade utilizou a Lei Universal de Escalabilidade (Niel Gunther, 2007) para projetar o comportamento do sistema em

volumes massivos, partindo de dados reais coletados com até 2.000 usuários virtuais (VUs).

4.2.1. Cenário de 100.00 a 200.000 Usuários

Nos testes empíricos com 1.000 usuários, a plataforma apresentou um tempo de resposta (P95) de 147 ms e taxa de erro de 0%. Ao aplicar a projeção para 100.000 usuários simultâneos, o tempo de resposta estimado foi de 275 ms, mantendo-se confortavelmente abaixo do limite de 5 segundos estabelecido nos requisitos.

Para o cenário crítico de divulgação de resultados (pico de 200.000 usuários), a projeção, baseada em testes com 2.000 VUs (P95 de 171 ms), indicou um tempo de resposta estimado de 944 ms e manutenção da taxa de erro em 0%. Como pode ser observado na Figura 3, esses dados evidenciam que a plataforma utiliza mecanismos eficientes de cache e distribuição de conteúdo (CDN), mitigando o impacto do aumento exponencial de tráfego.

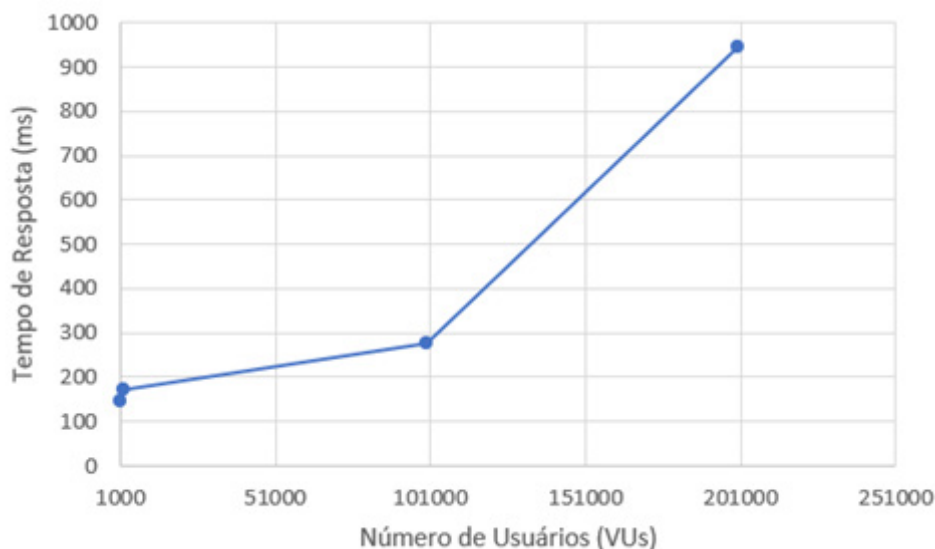


Figura 3 – Projeção do tempo de resposta (P95) em cenários de carga progressiva.

4.2.2. Escalabilidade Regional

O teste de distribuição geográfica simulou 500 usuários divididos igualmente entre as regiões Nordeste e Sudeste. O sistema demonstrou um balanceamento de carga altamente eficiente, com a distribuição de tráfego atingindo a marca de 50,01% para o Nordeste e 49,99% para o Sudeste.

A diferença de latência (P95) entre as regiões foi de apenas 25 ms (176 ms no Nordeste vs. 201 ms no Sudeste). Embora exista uma variação percentual de 13,26%, em termos

absolutos a diferença é imperceptível para a experiência do usuário, indicando um comportamento consistente da arquitetura do INEP. O comparativo de latência entre as regiões pode ser visualizado na Figura 4.

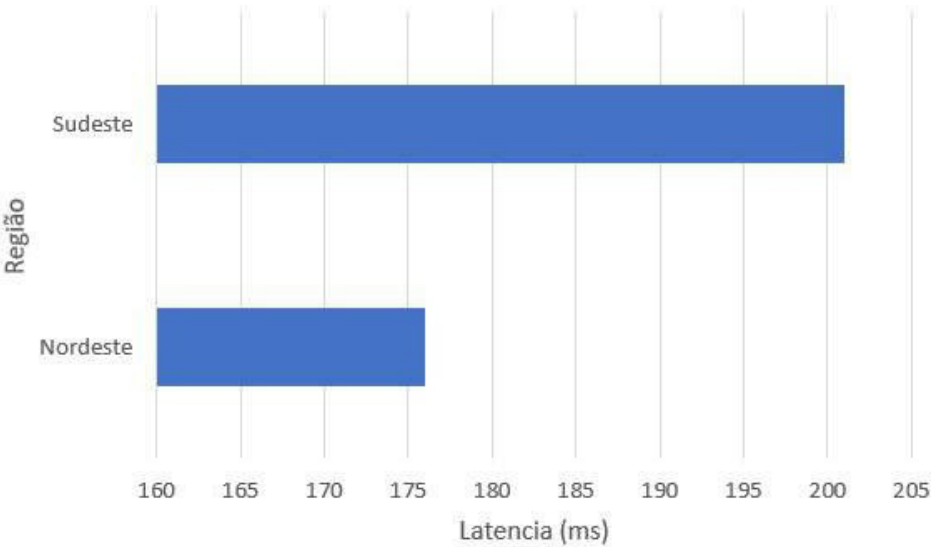


Figura 4 – Comparativo de latência (P95) entre as regiões Nordeste e Sudeste.

4.3. Análise de Eficiência em Transações (Login)

Para a análise de eficiência no endpoint de autenticação, optou-se pela utilização de um servidor simulado localmente para isolar a variável de processamento da aplicação e focar no comportamento do protocolo sob estresse.

No teste de carga sustentada (500 usuários por 10 minutos), o sistema manteve estabilidade funcional (0% de erros), mas apresentou degradação no tempo de resposta, com picos atingindo 1.600 ms (P95). Apesar da degradação, o sistema não colapsou, sugerindo indícios de resiliência do serviço de autenticação. Adicionalmente, os testes de compatibilidade (cross-browser) comprovaram que não há variação significativa de desempenho entre diferentes User-Agents (Chrome, Firefox, Edge, Safari), com tempos médios estabilizados em torno de 205 ms.

4.4. Discussão Geral

Os resultados obtidos indicam que a plataforma do ENEM apresenta um elevado nível de maturidade em Engenharia de Performance, especialmente no que se refere à capacidade de recuperação e ao comportamento sob cargas projetadas. O tempo de recuperação observado (~1 segundo) e as projeções de latência inferiores a 1 segundo para cenários de até 200.000 usuários simultâneos sugerem que a arquitetura da aplicação é capaz de sustentar elevados níveis de concorrência.

Esses achados estão alinhados com estudos como o de Zhao et al. (2021), que apontam que sistemas que incorporam práticas estruturadas de teste de performance tendem a apresentar maior resiliência e previsibilidade sob condições extremas. Da mesma forma, Lima et al. (2024) destacam que a aplicação sistemática de testes de carga contribui significativamente para a melhoria da confiabilidade percebida pelos usuários em sistemas educacionais.

No entanto, é importante considerar que os resultados deste estudo foram obtidos em ambiente controlado e, em parte, baseados em projeções matemáticas. Dessa forma, embora os dados indiquem robustez do ponto de vista da aplicação, não é possível afirmar que esse comportamento se reproduza integralmente em ambiente real, onde fatores como latência de rede, configuração de infraestrutura e políticas de segurança podem impactar o desempenho.

Nesse sentido, os resultados reforçam a hipótese de que os problemas de instabilidade historicamente relatados podem estar menos relacionados à lógica interna do sistema e mais associados a limitações externas, como limitações de infraestrutura, tempo de provisionamento de recursos em nuvem (cold start) e restrições impostas por mecanismos de segurança (WAF). Essa interpretação converge com a literatura, que aponta a infraestrutura como fator crítico em sistemas distribuídos de grande escala.

Adicionalmente, a utilização combinada das ferramentas JMeter, K6 e Locust demonstrou-se eficaz para a construção de uma visão abrangente do comportamento do sistema. Cada ferramenta contribuiu com perspectivas complementares, permitindo não apenas a validação empírica, mas também a extrapolação analítica dos resultados. Ainda assim, a limitação do número de experimentos realizados sugere que estudos futuros devem ampliar a quantidade de cenários testados, de modo a aumentar a robustez estatística das conclusões.

Apesar dos resultados indicarem um comportamento consistente da plataforma, é importante destacar que o número de experimentos realizados ainda é limitado, tanto em volume quanto em diversidade de cenários. Dessa forma, as conclusões apresentadas devem ser interpretadas como indicativas, e não definitivas, sendo necessária a ampliação dos testes em estudos futuros para obtenção de evidências mais robustas.

5. Limitações

Embora os resultados ofereçam um diagnóstico robusto sobre a performance da plataforma, este estudo apresenta limitações inerentes à natureza externa da avaliação (“caixa-preta”). A primeira limitação refere-se à indisponibilidade do código-fonte e acesso à infraestrutura interna, o que impediu a monitoração de métricas de servidor (server-side), como consumo real de CPU, memória e logs de banco de dados do INEP.

Adicionalmente, existem restrições éticas e de segurança que impedem a realização de testes de carga massiva direta (ataques de negação de serviço) contra um domínio governamental ativo. Por isso, a validação de cenários extremos (100 mil a 200 mil usuários) baseou-se em projeções matemáticas (Lei Universal de Escalabilidade) a partir de amostras menores, e não em tráfego real absoluto.

Por fim, a validação da eficiência do endpoint de autenticação utilizou um servidor simulado localmente. Embora essa abordagem isole o comportamento do protocolo, ela não considera latências reais de rede, processamento de firewalls governamentais (WAF) ou concorrência real no banco de dados de produção, o que pode resultar em tempos de resposta ligeiramente otimistas em comparação ao cenário real.

6. Considerações finais

O presente estudo teve como objetivo avaliar a importância dos testes de performance na garantia da estabilidade e confiabilidade da plataforma do Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM). Diante dos desafios recorrentes de instabilidade enfrentados por sistemas governamentais de larga escala, a pesquisa buscou responder qual o papel estratégico dessas validações na manutenção da integridade dos serviços digitais do INEP.

Respondendo à questão norteadora deste trabalho, conclui-se que os testes de performance desempenham uma função que transcende a simples validação técnica; eles atuam como um instrumento de diagnóstico estratégico. A aplicação das métricas de confiabilidade, escalabilidade e eficiência permitiu isolar o comportamento da aplicação (software) das variáveis de infraestrutura, revelando que os resultados sugerem que o núcleo da plataforma apresenta robustez técnica sob as condições avaliadas.

Os experimentos demonstraram que o sistema apresenta alta resiliência, com um Tempo de Recuperação (RTO) de aproximadamente 1 segundo após falhas críticas e capacidade projetada para manter latências abaixo de 1 segundo mesmo em cenários de pico com 200 mil usuários simultâneos. Tais evidências sugerem que as instabilidades percebidas pelos usuários finais em edições anteriores do exame podem não decorrer de falhas na lógica da aplicação, mas sim de limitações externas, como limitações de banda, configurações de segurança (Firewall/WAF) ou latência no escalonamento de recursos em nuvem (cold starts).

Dessa forma, recomenda-se que a gestão tecnológica do INEP priorize investimentos em observabilidade e auto-scaling preditivo, garantindo que a infraestrutura elástica reaja com a mesma eficiência demonstrada pelo software. A adoção contínua de ferramentas open source como JMeter, K6 e Locust mostrou-se uma abordagem viável e eficaz para antecipar cenários de crise.

Em suma, este estudo reafirma que a Engenharia de Performance é indispensável para a soberania digital de serviços públicos. Garantir que milhões de estudantes acessem suas notas ou realizem suas inscrições sem interrupções não é apenas um requisito técnico, mas um compromisso social com a democratização do acesso ao ensino superior no Brasil.

Como trabalhos futuros, sugere-se a expansão desta pesquisa para outros sistemas críticos do ecossistema educacional, como o Sistema de Seleção Unificada (SISU) e o Programa Universidade para Todos (Prouni), que também sofrem com picos sazonais de acesso. Recomenda-se, ainda, a realização de experimentos em parceria oficial com o órgão governamental, visando aplicar os testes em ambiente de homologação (staging)

com acesso a métricas de servidor (white-box testing). Por fim, propõe-se o estudo da integração automatizada desses testes de carga em esteiras de DevOps (CI/CD), permitindo a detecção contínua de regressões de performance a cada nova atualização da plataforma.

Referências

- Basiri, A., Kitchen, N., Rosenthal, C., & Hochstein, L. (2016). Chaos Engineering. *IEEE Software*, 33(3), 35-41. <https://doi.org/10.1109/MS.2016.60>
- Beizer, B. (1990). *Software Testing Techniques* (2nd ed.). Van Nostrand Reinhold.
- Camargo, K. G. A., & Galegale, N. V. (2024). Aumento da maturidade de equipes SCRUM de desenvolvimento de software. *RISTI - Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, (54), 22-38. <https://doi.org/10.17013/risti.54.22-38>
- CNN Brasil. (2024). Enem 2024: site do Inep apresenta instabilidade após divulgação das notas. <https://www.cnnbrasil.com.br/tecnologia/enem-2024-site-do-inep-apresenta-instabilidade-apos-divulgacao-das-notas/>
- Francis Press. (2023). Analysis of Testing Methods of Large-scale Information Software. <https://doi.org/10.25236/AJCIS.2022.050103>
- Grafana Labs. (2025). K6 Load Testing Tool. <https://k6.io/>
- Gunther, N. J. (2007). *Guerrilla Capacity Planning: A Tactical Approach to Planning for Highly Scalable Applications and Services*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-31010-5>
- INEP. (2025). Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM). Governo Federal. <https://www.gov.br/inep/pt-br/areas-de-atuacao/avaliacao-e-exames-educacionais/enem>
- Lima, R., Oliveira, F., & Santos, P. (2024). Aplicando técnicas de teste de performance para melhorar eficiência de softwares web educacionais. Repositório Institucional UFRN. <https://repositorio.ufrn.br/server/api/core/bitstreams/1a9b0657-1968-419e-8a34-9e58bfdd112f/content>
- Locust.io. (2025). Scalable Load Testing Tool Using Python. <https://locust.io/>
- Menascé, D. A., & Almeida, V. A. (2001). *Capacity Planning for Web Services*. Prentice Hall.
- Myers, G. J., Sandler, C., & Badgett, T. (2011). *The Art of Software Testing* (3rd ed.). Wiley.
- Pressman, R. S. (2016). *Engenharia de Software: Uma Abordagem Profissional* (8ª ed.). McGraw-Hill.
- Silva, J., Andrade, M., & Ferreira, L. (2024). Garantia da Qualidade em Sistemas de Larga Escala. *Revista Brasileira de Informática*, 12(3), 45-58.
- Sommerville, I. (2019). *Engenharia de Software* (10ª ed.). Pearson.

- Sousa, H. N. F. (2025). Um experimento comparativo da eficácia de diferentes LLM na geração de cenários Gherkin (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande. <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/jspui/bitstream/riufcg/41048/1/HIAGO%20NATAN%20FERNANDES%20DE%20SOUSA%20-%20DISSERTA%C3%87%C3%83O%20%28PPGCC%29%202025.pdf>
- The Apache Software Foundation. (2025). Documentação do Apache JMeter. <https://jmeter.apache.org/>
- Zhao, Y., Xiao, L., Bondi, A. B., Chen, B., & Liu, Y. (2021). Um estudo empírico de problemas de desempenho na vida real em sistemas de software. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 47(10), 2190–2210. <https://doi.org/10.1109/TSE.2020.2969772>

Integración de la tecnología en la enseñanza musical: formación, uso y barreras desde la perspectiva docente

María Elena Cuenca Rodríguez¹, Pilar Serrano Betored¹

maria.cuenca@uam.es; pilar.serranob@uam.es

¹ Universidad Autónoma de Madrid, Ciudad Universitaria de Cantoblanco, Calle Einstein, 5, 28049 Madrid, Espanha.

DOI: 10.17013/risti.61.51–65

Resumen: La integración de las tecnologías digitales en la enseñanza musical plantea retos específicos para la formación y la práctica docente, que la normativa educativa vigente en España no ha resuelto de forma sistemática. Este estudio analiza las percepciones del profesorado de Música de Educación Primaria y Secundaria sobre su formación en Tecnologías del Aprendizaje y el Conocimiento (TAC), su uso en el aula y las barreras para su integración. Se empleó un diseño descriptivo-correlacional y transversal, mediante un cuestionario administrado a 106 docentes en activo. Los resultados muestran un uso medio de las TAC, una formación inicial escasa y poco aplicable, y una formación continua mejor valorada pero percibida como limitada. La vía principal de adquisición de competencias digitales es la autoformación. Se identificaron correlaciones positivas y significativas entre mayor edad y experiencia docente y la frecuencia de uso de las TAC, así como entre dicho uso y la percepción de motivación del alumnado, sin diferencias relevantes entre etapas educativas. El profesorado declara conciencia de la brecha digital y despliega estrategias de equidad, aunque se enfrenta a barreras de conectividad, recursos, organización y alfabetización digital del alumnado. Los resultados tienen implicaciones directas para el diseño de la formación docente en educación musical y para las políticas de competencia digital en el profesorado.

Palabras clave: Formación docente; Tecnologías del Aprendizaje y el Conocimiento (TAC); Educación musical; Brecha digital; Competencia digital docente.

Integrating Technology into Music Education: Training, Use, and Barriers from the Teacher's Perspective

Abstract: The integration of digital technologies into music education poses specific challenges for teacher training and classroom practice that current educational policy has yet to address in a systematic manner. This study analyses Primary and Secondary Music teachers' perceptions of their training in Learning and Knowledge Technologies (LKT), their classroom use, and the barriers to their integration. A descriptive-correlational, cross-sectional design was employed, based on a questionnaire administered to 106 in-service teachers. The results

show a medium level of LKT use, limited and scarcely applicable initial training, and in-service training that is better valued but perceived as insufficient. The main pathway for acquiring digital competences is self-directed learning. Positive and significant correlations were identified between teachers' age and experience and their frequency of LKT use, as well as between LKT use and the perceived motivation of students, with no relevant differences across educational stages. Teachers report awareness of the digital divide and implement equity-oriented strategies, although they face barriers related to connectivity, resources, organisational constraints, and students' digital literacy. The findings carry direct implications for the design of teacher education in music education and for digital competence policies targeting the teaching workforce.

Keywords: Teacher Training; Learning and Knowledge Technologies (LKT); Music Education; Digital Divide; Teacher Digital Competence.

1. Introducción

1.1. Marco contextual: competencia digital docente en educación musical

La normativa educativa española reciente —LOMLOE y sus Reales Decretos de desarrollo para Primaria (157/2022) y Secundaria (217/2022)— sitúa la competencia digital como eje transversal de la formación integral del alumnado y del profesorado, reclamando no solo el acceso a las TIC (Tecnologías de la Información y la Comunicación) y las TAC (Tecnologías del Aprendizaje y el Conocimiento), sino usos educativos significativos de las mismas (Cabero Almenara y Ruiz-Palmero, 2017; Morales Romo, 2017). En educación musical, este impulso normativo converge con un campo en transformación: aunque la tecnología digital ha ganado presencia como objeto y herramienta pedagógica, su integración sigue siendo desigual y frecuentemente superficial (Calderón-Garrido et al., 2019; Marín-Suelves et al., 2022; Riaño Galán y Murillo Ribes, 2021), oscilando entre experiencias innovadoras de producción y creatividad musical con software y la persistencia de modelos tradicionales que apenas incorporan recursos digitales (Carvalho et al., 2021; Cuervo et al., 2023; Riaño et al., 2022). En este contexto, la cuestión ya no es si integrar TAC, sino cómo hacerlo, y qué factores determinan que el profesorado de Música opte por innovar o resistir.

1.2. Actitudes docentes, acceso tecnológico y uso pedagógico efectivo

Las investigaciones sobre integración de TIC/TAC en educación coinciden en que las decisiones docentes están fuertemente mediadas por actitudes, creencias y visiones pedagógicas (Fu, 2013; Loveless, 2003; Orlando, 2009). El cambio en la práctica docente no se reduce a la disponibilidad de recursos, sino que implica transformaciones en la identidad profesional: estudios sobre profesorado y TIC describen tensiones entre compromiso, cautela y cambio gradual, incluso en contextos con fuerte presión institucional hacia la digitalización (Hennessy et al., 2005; Orlando, 2009). Desde modelos de predicción del comportamiento, se ha evidenciado que las actitudes, las normas subjetivas y las percepciones de control influyen de forma decisiva en la disposición docente a integrar tecnología (Ko y Shin, 2023; Kreijns et al., 2013; Maru et al., 2021). Asimismo, las experiencias previas como aprendices con TIC y la calidad de la formación recibida condicionan el modo en que los docentes diseñan posteriormente

sus propias propuestas didácticas con tecnología (Barak, 2006; Ilomäki, 2008; Kafyulilo y Keengwe, 2013). En música, la tensión entre prácticas tradicionales —centradas en la interpretación y el repertorio canónico— y enfoques más abiertos, creativos y mediados por tecnología se ha señalado como un nudo crítico para el cambio de mentalidad docente (Burnard et al., 2018; Crawford, 2013, 2017; Tobias, 2013).

Esta dimensión actitudinal no puede dissociarse de las condiciones estructurales en las que el profesorado opera. La noción de brecha digital se ha reformulado para incluir no solo el acceso a los dispositivos, sino también las desigualdades en los usos y en las competencias necesarias para emplear las TIC de forma pedagógicamente significativa (Cabero Almenara y Ruiz-Palmero, 2017; Gorski, 2005). Aun cuando el profesorado dispone de equipamiento, el uso puede ser puntual, instrumental o meramente reproductivo, condicionado por la valoración que se hace de las tecnologías y por la confianza en la propia capacidad para integrarlas (Hennessy et al., 2005; Klement et al., 2017; Sipilä, 2014). En el ámbito musical, estas actitudes se entrecruzan con valoraciones culturales sobre qué cuenta como «educación musical seria» o «práctica musical legítima» (Clark, 2024; Henley y Barton, 2022; Trienekens et al., 2024), lo que añade una capa de resistencia específica al cambio tecnológico en este campo. Aunque el número de experiencias documentadas ha aumentado, la integración generalizada en las aulas sigue siendo limitada, con predominio de usos centrados en la reproducción de contenidos o el apoyo puntual a la exposición magistral, frente a propuestas que explotan el potencial creativo y colaborativo de las TAC (Calderón-Garrido et al., 2019; Carvallo et al., 2021; Ma y Wang, 2025; Marín-Suelves et al., 2022; Riaño et al., 2022).

Investigaciones comparadas señalan que incluso en contextos con importante inversión tecnológica persisten barreras estructurales y culturales: falta de tiempo, de apoyos institucionales, de formación específica y de reconocimiento del trabajo innovador (Eyles, 2018; Henley y Barton, 2022; Tsugawa, 2022). Paralelamente, se observa una creciente distancia entre la cultura digital del alumnado y las prácticas escolares (Burnard et al., 2018; Crawford, 2017; Trienekens et al., 2024), y las aportaciones más recientes sobre inteligencia artificial y aprendizaje híbrido alertan de nuevas brechas entre el acceso y el dominio experto de las herramientas (Liu et al., 2025; Valache et al., 2025).

En síntesis, el profesorado que asume una identidad principalmente transmisora tiende a emplear la tecnología para reforzar metodologías conocidas (Hennessy et al., 2005; Loveless, 2003; Orlando, 2009), mientras que quienes adoptan un rol más mediador perciben en las TAC una oportunidad para el diseño de experiencias creativas (Carvallo et al., 2021; Cuervo et al., 2023; Riaño et al., 2022). Sin embargo, la evidencia empírica sobre cómo estas disposiciones se articulan con las condiciones formativas reales del profesorado de música en el sistema educativo español sigue siendo escasa. Este estudio pretende cubrir esa brecha, analizando de forma integrada la formación, el uso y las barreras percibidas por el profesorado de Música de Educación Primaria y Secundaria.

El objetivo general de esta investigación es analizar las percepciones del profesorado de Música de Educación Primaria y Educación Secundaria sobre su formación inicial y continua en las TAC, su aplicación en el aula y las barreras sociales y pedagógicas que enfrentan en su integración. Los objetivos específicos son: (1) identificar el grado de formación en TAC recibida por el profesorado de Música en su trayectoria universitaria

y continua; (2) examinar la percepción de utilidad y aplicabilidad de dicha formación en contextos reales de enseñanza musical; (3) explorar la percepción docente sobre la brecha digital y su impacto en el acceso equitativo a la formación musical; (4) identificar los principales problemas encontrados por el profesorado en el uso de tecnologías digitales; y (5) analizar si existen diferencias entre el profesorado de Primaria y Secundaria en las variables estudiadas.

2. Metodología

2.1. Diseño

Se llevó a cabo un estudio descriptivo-correlacional, no experimental, observacional y transversal, con un enfoque mixto, sobre la formación, la percepción y el uso de las TAC, así como sobre la identificación de barreras específicas para su implementación en las aulas de Música de Educación Primaria y Educación Secundaria a finales del curso 2024-2025. El alcance correlacional viene determinado por el análisis de relaciones entre variables socioprofesionales —nivel educativo, experiencia y edad— y la frecuencia de uso de las TAC, así como entre el uso de estas y la motivación percibida del alumnado, mediante correlaciones de Spearman.

2.2. Participantes

La muestra estuvo compuesta por 106 profesores de Música en activo, con una distribución equilibrada entre Educación Primaria (54 participantes, 50,9 %) y Educación Secundaria (52 participantes, 49,1 %), seleccionados mediante muestreo por respuesta voluntaria. La mayoría pertenecía a centros públicos (88,9 %), seguidos de concertados (8,3 %) y privados (0,9 %). En cuanto al perfil sociodemográfico, predominaban las mujeres (61,1 %), el rango de edad de 40-49 años (50,9 %) y la titulación de grado universitario (50,9 %), seguida de máster (38,9 %). Respecto a la formación musical, el 38,7 % poseía el Título Profesional de Conservatorio y otro 38,7 % el Título Superior, con el resto formado en escuelas de música (16,0 %) o en el ámbito universitario (6,6 %). Los participantes procedían de múltiples regiones de España, con una concentración significativa en la Comunidad de Madrid (45,3 %) y Andalucía (13,2 %), y representación de otras doce comunidades autónomas.

2.3. Instrumento

La recogida de información se realizó mediante un cuestionario administrado en un único momento temporal (abril-junio del curso 2024-2025), diseñado ad hoc para el profesorado de Música en activo. La encuesta se distribuyó en línea por correo electrónico y a través de redes profesionales de docentes. La participación fue anónima y voluntaria; con la finalización de la encuesta se aceptaba el consentimiento para participar en el estudio.

El instrumento se organizó en tres bloques temáticos: datos sociodemográficos y de perfil profesional (Bloque 1); formación docente en TAC (Bloque 2); y percepción, brecha digital y barreras de uso (Bloque 3). Incluyó ítems cerrados con escala de

respuesta tipo Likert de cinco puntos —desde Nada hasta Mucho—, ítems de opción múltiple y preguntas abiertas. La estructura detallada del cuestionario se recoge en el Anexo A.

Con el fin de garantizar la validez de contenido, el cuestionario fue sometido a juicio de expertos antes de su administración definitiva. Se solicitó la participación de seis especialistas con perfil en educación musical, tecnología educativa y/o metodología de la investigación; cinco de ellos cumplieron la rúbrica de valoración en su totalidad. Cada ítem fue evaluado en dos dimensiones —claridad (si la redacción resulta comprensible) e importancia (si el ítem es relevante para medir el objeto de estudio)— mediante una escala de tres puntos (1 = mínima, 3 = máxima). Se calculó el Índice de Validez de Contenido a nivel de ítem (I-CVI), definido como la proporción de expertos que valoraron cada ítem con puntuación ≥ 2 . Todos los ítems alcanzaron un I-CVI = 1.00 en ambas dimensiones, con medias de claridad comprendidas entre 2.60 y 3.00, e índice de validez de contenido global (S-CVI/Ave) = 1.00, indicando un consenso experto pleno sobre la pertinencia y legibilidad del instrumento.

A partir de las observaciones cualitativas recogidas en la rúbrica, se realizaron cuatro ajustes sobre la versión inicial: (1) sustitución del tuteo por el tratamiento de usted en los ítems 2.2 y 2.4; (2) reformulación del ítem 1.5, cuya denominación original «situación administrativa» resultó ambigua, por «categoría laboral»; (3) incorporación de ítems específicos sobre la percepción docente de la motivación del alumnado y los problemas observados en su uso de herramientas digitales; y (4) diferenciación de la opción «Otros» de «prefiero no contestar» en el ítem de género.

2.4. Procedimiento

Los datos cuantitativos se analizaron con IBM SPSS Statistics (versión XX); los datos cualitativos se sometieron a un proceso de categorización y análisis de contenido mediante Atlas.Ti, combinando codificación inductiva y deductiva para identificar temas recurrentes y patrones de significado relevantes para los objetivos de la investigación.

En el plano cuantitativo, se obtuvieron estadísticas descriptivas (frecuencias, porcentajes y medidas de tendencia central) sobre el uso y la formación en TAC, y se aplicaron pruebas no paramétricas: correlaciones de Spearman entre el uso de TAC y variables como nivel educativo, experiencia y edad, así como entre el uso de herramientas digitales y la motivación percibida del alumnado; y contrastes de χ^2 para analizar la asociación entre etapa educativa y conciencia sobre la brecha digital. Las preguntas abiertas sobre equidad, problemas en el centro y dificultades del alumnado se sometieron a un análisis de contenido categorial inductivo con codificación múltiple, cuantificando las categorías mediante frecuencias absolutas y relativas.

La encuesta se llevó a cabo cumpliendo plenamente las directrices éticas establecidas por la institución y el Reglamento General de Protección de Datos de la Unión Europea (RGPD UE 2016/679). Las identidades de los participantes se mantuvieron en el anonimato durante los procesos de recogida, análisis y difusión de los resultados.

3. Resultados

3.1. Formación inicial y continua en TAC y frecuencia de uso

En relación con el uso y la formación en TAC, los resultados muestran que el profesorado de Educación Primaria y de Educación Secundaria Obligatoria declara un nivel de uso medio de las TAC y herramientas digitales en el aula de Música (55,0 % y 57,75 %, respectivamente). Sin embargo, la presencia de contenidos sobre TAC en la formación universitaria solo alcanza el 25,5 % en Primaria y el 23,08 % en Secundaria, y la percepción de que dicha formación les ha servido para integrar las TAC en su práctica docente desciende aún más, hasta el 16,2 % y el 19,7 %, respectivamente. En contraste, la formación continua aparece mejor valorada: la medida en que esta ha abordado las TAC se sitúa en el 58,25 % en Primaria y el 53,0 % en Secundaria, y su utilidad percibida alcanza el 52,25 % y el 53,0 %. No obstante, la percepción de que existe una oferta suficiente de formación continua específica en TAC se mantiene en niveles moderados (38,0 % en Primaria y 42,75 % en Secundaria).

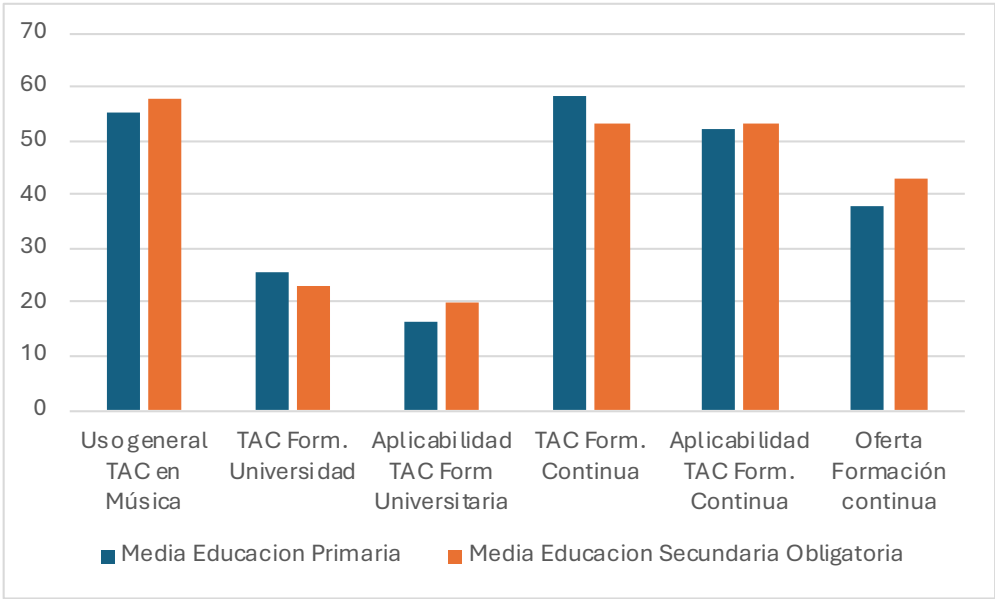


Figura 1 – Uso y formación de las TAC en las aulas de Música. Oferta de cursos

La vía más frecuente de adquisición de competencias digitales es la autoformación mediante videotutoriales (71,0 %), seguida de los cursos del ministerio (51,4 %) y la ayuda de conocidos (29,9 %). Los cursos de formación universitarios (22,4 %) y los de escuelas específicas (13,1 %) ocupan posiciones secundarias, y solo un 3,7 % del profesorado declara no haber recibido ninguna formación en TAC (véase Figura 1).

3.2.Relaciones entre variables socioprofesionales, uso de TAC y motivación percibida

Se calculó una matriz de correlaciones de Spearman entre el nivel educativo del profesorado, los años de experiencia docente en Música, el rango de edad y la frecuencia de uso de TAC y herramientas digitales en el aula de Música (Tabla 1). Se encontraron correlaciones positivas y significativas con los años de experiencia ($\rho = 0.244$, $p = .012$) y con el rango de edad ($\rho = 0.306$, $p = .001$), de magnitud pequeña y pequeña-moderada, respectivamente. Estos resultados indican que el profesorado de mayor edad y con más años de docencia tiende a usar con mayor frecuencia las TAC y herramientas digitales en sus clases. Por el contrario, la correlación entre el nivel educativo y el uso de TAC fue baja y no significativa ($\rho = -0.084$, $p = .391$).

		Nivel educativo	Experiencia como docente de Música	Rango de edad
Uso las TAC y las herramientas digitales en el aula de Música	Rho de Spearman	-0.084	0.244	0.306
	gl	104	104	104
	valor p	0.391	0.012	0.001

Nota. Elaboración propia.

Tabla 1 – Matriz de correlaciones de Spearman entre el nivel educativo, experiencia docente y edad del profesorado versus el uso de las TAC en las aulas de Música

Además, los resultados muestran una relación estadísticamente significativa entre la frecuencia de uso de las TAC en el aula de Música y la percepción de que estas incrementan la motivación del estudiantado (Tabla 2). La correlación de Spearman obtenida fue positiva y de magnitud pequeña-moderada ($\rho = 0.282$, $gl = 104$, $p = .003$), indicando que el profesorado que declara un mayor uso de herramientas digitales tiende también a considerar en mayor medida que estas favorecen la motivación del alumnado hacia el aprendizaje musical.

	¿Cuánto usa las TAC y las herramientas digitales en el aula de Música?	
¿Cree que los estudiantes se motivan más a la hora de aprender música a través de herramientas digitales?	Rho de Spearman	0.282
	gl	104
	valor p	0.003

Nota. Elaboración propia.

Tabla 2 – Correlación de Spearman entre la frecuencia de uso de las TAC en el aula de Música y la percepción docente sobre la motivación del alumnado

3.3. Equidad, gratuidad y barreras en el uso de herramientas digitales

A partir de la tabla y gráfica de contingencia entre la etapa educativa y la conciencia sobre la brecha tecnológica (Figura 2, Tabla 3), no se observan diferencias apreciables entre el profesorado de Educación Primaria y de Educación Secundaria. Alrededor del 89 % del profesorado de ambas etapas se percibe como bastante o muy consciente de la brecha digital del alumnado. El contraste de χ^2 confirmó la ausencia de una asociación estadísticamente significativa entre ambas variables ($\chi^2(3) = 0.449$, $p = .930$, $N = 106$).

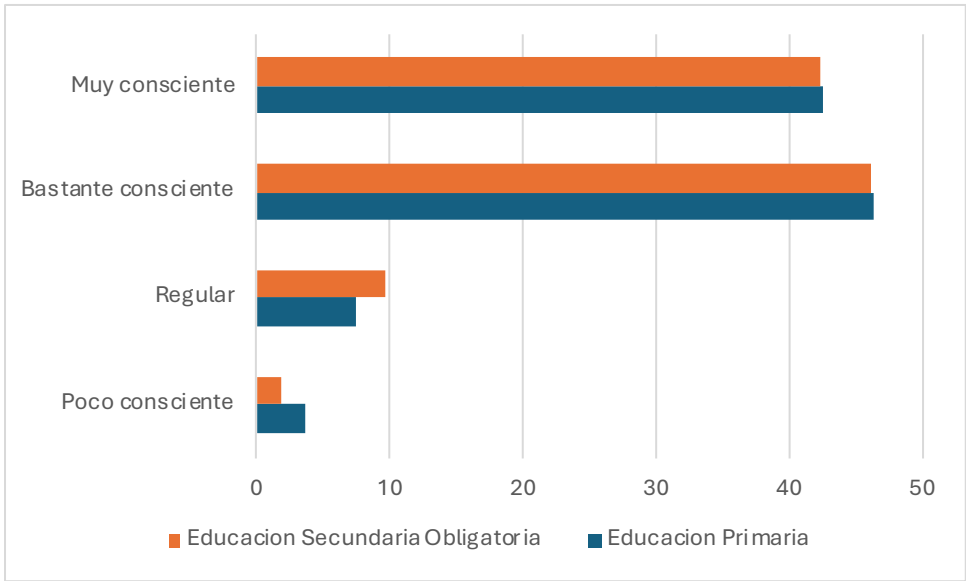


Figura 2 – Conciencia sobre la brecha digital por el uso de la tecnología entre el profesorado de las etapas de Educación Primaria y Educación Secundaria

	Valor	gl
χ^2	0.449 (p = .930)	3
N	106	

Nota. Elaboración propia.

Tabla 3 – Pruebas de χ^2 sobre la conciencia de la brecha digital en el estudiantado según la etapa educativa docente

En Educación Primaria, el 92,6 % del profesorado indica que la mayor parte de las aplicaciones que usa son gratuitas, proporción muy similar a la de Secundaria (90,4 %), lo que refleja una estrategia activa de selección de herramientas accesibles.

La principal estrategia declarada para evitar desigualdades consiste en concentrar las actividades tecnológicas en el aula y en horario lectivo (48,1 %), seguida del uso exclusivo

de la dotación tecnológica del centro (21,7 %), la adaptación de la planificación a los recursos reales del alumnado (14,2 %) y la selección de herramientas gratuitas (13,2 %). En menor medida aparecen el préstamo de dispositivos (11,3 %), el trabajo cooperativo con equipos compartidos (5,7 %) y la limitación del uso cuando la tecnología no está al alcance de todos (4,7 %).

Las problemáticas en el centro se concentran en la conectividad (34,0 %; p. ej., «La conexión a internet se cae constantemente»), el estado del equipamiento (29,2 %; «no funcionan correctamente, se bloquean porque son antiguos») y la escasez de recursos y espacios específicos (23,6 %). A estas se suman condicionantes organizativos y normativos (15,1 %) y dificultades ligadas al alumnado y las familias (11,3 %). Un 19,8 % del profesorado declara no encontrar problemas reseñables.

Respecto a las dificultades del alumnado, predominan la baja alfabetización digital básica (33,0 %; «solo saben manejar las RRSS»), la distracción y el uso inadecuado de dispositivos (12,3 %) y las limitaciones de acceso en el hogar (12,3 %). Un 17,0 % no señala dificultades específicas.

4. Discusión

Los resultados confirman un escenario de uso moderado de las TAC en las aulas de Música de Primaria y Secundaria, sustentado sobre una formación inicial claramente insuficiente y una formación continua solo parcialmente satisfactoria. El bajo peso de las TAC en la universidad y su escasa aplicabilidad percibida contrastan con el énfasis de la normativa vigente en la competencia digital docente, y se alinean con la literatura que describe una integración tecnológica desigual y a menudo superficial en educación musical (Calderón-Garrido et al., 2019; Marín-Suelves et al., 2022). La fuerte dependencia de la autoformación y de recursos informales refuerza la idea de que el profesorado compensa carencias estructurales en su trayectoria formativa (Barak, 2006; Kafyulilo y Keengwe, 2013), mientras que la formación continua, aunque mejor valorada, se percibe como limitada y fragmentaria. Lo que este estudio añade a ese diagnóstico general es su carácter específico al profesorado de Música —un colectivo habitualmente ausente de los estudios sobre competencia digital docente en España— y la constatación de que la brecha entre formación recibida y aplicabilidad percibida es especialmente pronunciada en la etapa universitaria.

En cuanto al uso, la ausencia de diferencias relevantes entre Primaria y Secundaria sugiere que la etapa educativa no explica por sí sola los patrones de integración, desplazando el foco hacia factores como la cultura de centro o la disponibilidad de recursos (Van den Beemt y Diepstraten, 2016). Es especialmente significativo que el mayor uso de TAC se asocie a más edad y más años de experiencia, cuestionando el tópico generacional y apuntando a procesos de cambio gradual anclados en la práctica acumulada (Hennessy et al., 2005; Orlando, 2009). Este hallazgo, coherente con lo observado por Colás-Bravo y Hernández-Portero (2023) en el profesorado de Música de Secundaria, refuerza la idea de que la familiaridad y la confianza en el propio dominio tecnológico son los verdaderos predictores del uso. La relación positiva entre frecuencia de uso y percepción del incremento de la motivación del alumnado refuerza los modelos que sitúan actitudes y creencias como mediadores clave (Kreijns et al., 2013; Ko y Shin,

2023): quienes perciben las TAC como motivadoras tienden a utilizarlas más, y el uso sostenido parece consolidar esa valoración en un ciclo de retroalimentación positiva.

En el plano de la equidad, la alta conciencia sobre la brecha digital es compartida en ambas etapas, coherente con enfoques que amplían la noción de brecha a usos y competencias (Cabero Almenara y Ruiz-Palmero, 2017; Gorski, 2005). El profesorado despliega estrategias claras para evitar desigualdades, pero estas iniciativas conviven con fuertes barreras estructurales: conectividad inestable, equipamiento obsoleto, escasez de dispositivos, restricciones organizativas y falta de apoyo técnico (Eyles, 2018; Henley y Barton, 2022). Este escenario contribuye a explicar por qué predominan usos instrumentales y reproductivos de las TAC, mientras que son menos frecuentes las propuestas creativas y colaborativas (Carvallo et al., 2021; Riaño et al., 2022; Tobias, 2013).

Finalmente, los problemas señalados en el alumnado —baja alfabetización digital básica, uso lúdico o distractor de dispositivos y desigualdades de acceso en el hogar— matizan el discurso del «nativo digital» y evidencian la distancia entre competencias informales y exigencias académicas (Ilomäki, 2008; Gorski, 2005). En educación musical, estas dificultades se superponen a tensiones sobre qué prácticas se consideran legítimas (Clark, 2024; Trienekens et al., 2024). A la luz de las tendencias emergentes en IA y aprendizaje híbrido (Liu et al., 2025; Valache et al., 2025), estos resultados advierten del riesgo de nuevas brechas si no se refuerzan de forma sistemática las competencias digitales básicas, críticas y creativas del alumnado en las aulas de Música.

5. Conclusiones

Este estudio ha analizado las percepciones del profesorado de Música de Educación Primaria y Secundaria respecto a su formación en TAC, su uso en el aula y las barreras para su integración. Los hallazgos permiten formular las siguientes conclusiones articuladas en torno a los objetivos del estudio.

En relación con la formación, el profesorado de Música presenta un perfil caracterizado por una formación universitaria escasa e insuficientemente aplicable al contexto del aula, y una formación continua mejor valorada pero percibida como limitada en su oferta específica para la enseñanza musical. La autoformación mediante videotutoriales y recursos informales constituye la vía principal de adquisición de competencias digitales, lo que evidencia que el profesorado suple de forma autónoma déficits estructurales del sistema formativo formal. No se observaron diferencias significativas entre etapas educativas en ninguna de las dimensiones analizadas.

Respecto al uso y a las actitudes, el estudio identifica correlaciones positivas y estadísticamente significativas entre la edad y la experiencia docente y la frecuencia de uso de las TAC, así como entre el uso de estas herramientas y la percepción de que incrementan la motivación del alumnado. Estos resultados cuestionan la asociación automática entre juventud docente e innovación digital, y apuntan al papel mediador de la confianza y la práctica acumulada. En el plano de la equidad, el profesorado manifiesta una elevada conciencia de la brecha digital del alumnado y despliega estrategias compensatorias activas, aunque estas coexisten con barreras estructurales persistentes.

Este trabajo aporta, por primera vez en el contexto español posterior a la implantación de la LOMLOE, evidencia empírica sistemática y con enfoque mixto sobre la situación formativa y las prácticas de uso de las TAC en el profesorado de Música de Primaria y Secundaria de forma conjunta y comparada. A diferencia de estudios previos centrados en una sola etapa o en el profesorado en general, este estudio integra el análisis de la formación inicial y continua, el uso efectivo en el aula, la percepción de la brecha digital y las barreras estructurales en una muestra que abarca múltiples regiones del territorio español. Los resultados ofrecen un diagnóstico actualizado que puede orientar el diseño de políticas de formación docente en competencia digital específicamente adaptadas al área de Música.

En el diseño de la formación docente, se constata la necesidad de incorporar contenidos específicos de TAC aplicados a la didáctica musical tanto en los grados universitarios como en la formación de posgrado, superando aproximaciones genéricas que el propio profesorado percibe como poco transferibles al aula de Música. En el ámbito de la política educativa, las barreras de infraestructura y conectividad documentadas demandan respuestas institucionales que trasciendan la dotación material y aborden el apoyo técnico-pedagógico continuo.

El estudio presenta diversas limitaciones que deben tenerse en cuenta al interpretar sus resultados. El muestreo por respuesta voluntaria puede introducir sesgos de autoselección, y la concentración geográfica en la Comunidad de Madrid (45,3 %) limita la generalización al conjunto del sistema educativo español. El diseño transversal no permite establecer relaciones causales, y todas las medidas se basan en la autopercepción del profesorado, sin triangulación mediante observación directa. Finalmente, el cuestionario, aunque validado mediante juicio de expertos con S-CVI/Ave = 1.00, no fue sometido a una prueba piloto formal ni se calcularon índices de consistencia interna, lo que impide ofrecer estimaciones de fiabilidad psicométrica. Futuros estudios deberían ampliar la muestra geográficamente, incorporar diseños longitudinales y consolidar el instrumento mediante análisis de fiabilidad.

Referencias

- Barak, M. (2006). Instructional principles for fostering learning with ICT: Teachers' perspectives as learners and instructors. *Education and Information Technologies*, 11(2), 121–135. <https://doi.org/10.1007/s11134-006-7362-9>
- Burnard, P., Minors, H., Wiffen, C., Shihabi, Z., & Van Der Walt, S. J. (2018). Mapping trends and framing issues in higher music education: Changing minds/changing practices. *London Review of Education*, 15(3), 457–473. <https://doi.org/10.17863/CAM.18682>
- Cabero Almenara, J., & Ruiz-Palmero, J. (2017). Las Tecnologías de la Información y Comunicación para la inclusión: reformulando la brecha digital. *IJERI: International Journal of Educational Research and Innovation*, 9, 16–30. <http://hdl.handle.net/10433/10379>

- Calderón-Garrido, D., Cisneros, P., García, I. D., & de las Heras-Fernández, R. (2019). La tecnología digital en la Educación Musical: Una revisión de la literatura científica. *Revista Electrónica Complutense de Investigación en Educación Musical*, 16, 43–55. <https://doi.org/10.5209/reciem.60768>
- Carvalho, A. F., Calderón-Garrido, D., & Gustems-Carnicer, J. (2021). Tecnología digital al servicio de la producción, expresión y percepción musicales: un estudio de caso en la Educación Superior. *Per Musi*, 41, 1–20. <https://doi.org/10.35699/2317-6377.2021.29037>
- Clark, C. (2024). *Overcoming barriers to multicultural instrumental music education: Towards a practical pedagogy* (Doctoral dissertation, Liberty University). <https://digitalcommons.liberty.edu/doctoral/5258>
- Colás-Bravo, M. P., & Hernández-Portero, G. (2023). La relación entre el uso de las TIC en la docencia de la Música en educación secundaria y las creencias del profesorado. *Education in the Knowledge Society*, 24, e28509. <https://doi.org/10.14201/eks.28509>
- Crawford, R. (2013). Evolving technologies require educational policy change: Music education for the 21st century. *Australasian Journal of Educational Technology*, 29(5), 717–734. <https://doi.org/10.14742/ajet.268>
- Crawford, R. (2017). Rethinking teaching and learning pedagogy for education in the twenty-first century: Blended learning in music education. *Music Education Research*, 19(2), 195–213. <https://doi.org/10.1080/14613808.2016.1202223>
- Cuervo, L., Bonastre, C., Camilli, C., Arroyo, D., & García, D. (2023). Digital competences in teacher training and music education via service learning: A mixed-method research project. *Education Sciences*, 13(5), 459. <https://doi.org/10.3390/educsci13050459>
- Eyles, A.-M. (2018). Teachers' perspectives about implementing ICT in music education. *Australian Journal of Teacher Education*, 43(5), 123–139. <https://doi.org/10.14221/ajte.2018v43n5.8>
- Fu, J. S. (2013). ICT in education: A critical literature review and its implications. *International Journal of Education and Development using ICT*, 9(1), 112–125.
- Gorski, P. (2005). Education equity and the digital divide. *AACE Journal*, 13(1), 3–45.
- Henley, J., & Barton, D. (2022). Time for change? Recurrent barriers to music education. *British Journal of Music Education*, 39(2), 203–217. <https://doi.org/10.1017/S026505172200016X>
- Hennessy, S., Ruthven, K., & Brindley, S. (2005). Teacher perspectives on integrating ICT into subject teaching. *Journal of Curriculum Studies*, 37(2), 155–192. <https://doi.org/10.1080/0022027032000276961>
- Iilomäki, L. (2008). *The effects of ICT on school: Teachers' and students' perspectives* (Doctoral dissertation, University of Turku). <https://www.utupub.fi/handle/10024/38492>

- Kafyulilo, A., & Keengwe, J. (2013). Teachers' perspectives on their use of ICT. *Education and Information Technologies*, 19, 913–923. <https://doi.org/10.1007/s10639-013-9259-7>
- Klement, M., Dostál, J., & Bártek, K. (2017). *Perception and possibilities of ICT tools in education*. Palacký University Olomouc. <https://doi.org/10.5507/pdf.17.24450933>
- Ko, Y., & Shin, W. S. (2023). Exploring teachers' intention to integrate technology. *Technology, Pedagogy and Education*, 1–17. <https://doi.org/10.1080/1475939X.2023.2237037>
- Kreijns, K., Vermeulen, M., Kirschner, P. A., van Buuren, H., & Van Acker, F. (2013). Teachers' willingness to use ICT. *Technology, Pedagogy and Education*, 22(1), 55–71. <https://doi.org/10.1080/1475939X.2012.754371>
- Ma, Y., & Wang, C. (2025). Empowering music education with technology. *Humanities and Social Sciences Communications*, 12, 345. <https://doi.org/10.1057/s41599-025-04616-2>
- Maru, G., Pikirang, C. C., Ratu, D. M., & Tuna, J. R. (2021). The integration of ICT in ELT practices. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 15(22), 44–59. <https://doi.org/10.3991/ijim.v15i22.25533>
- Ley Orgánica 3/2020... *BOE*, 340, 122868–122953. <https://www.boe.es/eli/es/lo/2020/12/29/3>
- Liu, C. C., Wang, H. J., & Gu, X. Q. (2025). From access to mastery. *The Internet and Higher Education*, 65, 101018. <https://doi.org/10.1016/j.iheduc.2025.101018>
- Loveless, A. M. (2003). Teachers' perceptions of ICT. *Education and Information Technologies*, 8(4), 313–326. <https://doi.org/10.1023/B:EAIT.0000006796.33652.7c>
- Marín-Suelves, D., Gabarda, V., & Cuevas, N. (2022). Educación Musical y tecnología. *RECIEM*, 19, 261–273. <https://doi.org/10.5209/reciem.74693>
- Morales Romo, N. (2017). Las TIC y los escolares del medio rural. *Bordón*, 69(3), 41–56. <http://hdl.handle.net/11162/140684>
- Orlando, J. (2009). Teachers' ICT practices. *Technology, Pedagogy and Education*, 18(1), 33–44. <https://doi.org/10.1080/14759390802704030>
- Gobierno de España. (2022). Real Decreto 157/2022... *BOE*, 52. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-3296>
- Gobierno de España. (2022). Real Decreto 217/2022... *BOE*, 76. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-4975>
- Riaño Galán, M. E., & Murillo Ribes, A. (2021). Monográfico. *LEEME*, 47, 61–62. <https://doi.org/10.7203/LEEME.47.20897>
- Riaño Galán, M. E., Murillo, A., & Tejada, J. (2022). Educación musical, creatividad y tecnología. *Revista Electrónica Educare*, 26(1), 1–23. <https://doi.org/10.15359/ree.26-1.3>

- Sipilä, K. (2014). Educational use of ICT. *Technology, Pedagogy and Education*, 23(2), 225–241. <https://doi.org/10.1080/1475939X.2013.813407>
- Tobias, E. S. (2013). Toward convergence. *Music Educators Journal*, 99(4), 29–36.
- Trienekens, S., Escobar Campos, J. C., Schutte, L., & Bremmer, M. (2024). Access to careers in music. *Research Studies in Music Education*, 46(3), 388–403. <https://doi.org/10.1177/1321103X231224229>
- Tsugawa, S. (2022). Bridging the digital divide. *International Journal of Music Education*, 41(1), 52–68. <https://doi.org/10.1177/02557614221091888>
- Valache, D. G., Ilie, M., Sârbescu, P., & Cazan, P. I. (2025). Meta-analysis. *Educational Research Review*, 48, 100698. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2025.100698>
- Van den Beemt, A., & Diepstraten, I. (2016). Teacher perspectives on ICT. *Computers & Education*, 92–93, 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2015.10.017>

Anexos

Anexo A. Estructura del cuestionario

BLOQUE 1. Datos sociodemográficos

- 1.1. ¿Es usted docente de Música en Educación Primaria o Educación Secundaria Obligatoria?
- 1.2. Tipo de centro en el que trabaja (público, concertado, privado)
- 1.3. Comunidad Autónoma donde se encuentra el centro
- 1.4. Localidad donde se encuentra el centro
- 1.5. Categoría laboral
- 1.6. Sexo (varón, mujer, otro, prefiero no contestar)
- 1.7. Nivel educativo (grado, máster, doctorado)
- 1.8. Formación musical recibida (respuesta abierta)
- 1.9. ¿Cuántos años lleva ejerciendo como docente de Música? (5 categorías de rangos)
- 1.10. Rango de edad (5 categorías de rangos)

BLOQUE 2. Formación docente en el uso de las TAC

- 2.1. Marca la formación que ha recibido en TAC o herramientas digitales para la educación (varias opciones)
- 2.2. En su formación universitaria, ¿en qué medida le han enseñado el uso de herramientas digitales? (escala Likert)
- 2.3. ¿Cree que esa formación universitaria le ha servido para aplicar herramientas digitales al aula de Música? (escala Likert)
- 2.4. En su formación continua, ¿en qué medida le han enseñado el uso de herramientas digitales? (escala Likert)
- 2.5. ¿Cree que esa formación continua le ha servido para aplicar herramientas digitales al aula de Música? (escala Likert)
- 2.6. En formación continua, ¿cree que existe una oferta de cursos abundante sobre la formación musical a través de las TAC para docentes? (escala Likert)

BLOQUE 3. Percepción y brecha digital en el uso de las TAC en educación musical

- 3.1. ¿Cuánto cree que usa las TAC y las herramientas digitales en el aula de Música? (escala Likert)
- 3.2. ¿La mayor parte de las aplicaciones digitales que usa son gratuitas?
- 3.3. ¿Es consciente de la brecha tecnológica producida por las desigualdades económicas en el contexto familiar del alumnado?
- 3.4. ¿Qué medidas toma para que no se produzca ningún tipo de desigualdad en la formación musical a la hora de utilizar determinados dispositivos / programas? (respuesta abierta)
- 3.5. ¿Cree que los estudiantes se motivan más a la hora de aprender música a través de herramientas digitales? (escala Likert)
- 3.6. ¿Qué problemas ha encontrado en su centro educativo cuando ha usado herramientas digitales? (respuesta abierta)
- 3.7. ¿Qué problemas ha encontrado en su alumnado a la hora de usar herramientas digitales? (respuesta abierta)

Nota. Elaboración propia.

Transformación digital verde como servicio (TDVaaS): Un nuevo servicio basado en roles estratégicos

Díaz González de Mendoza Pável¹, Fuentes Prieto Mayda Juana² y Díaz Manresa Karel³

pdgmendoza@gmail.com; mfp24660@gmail.com; kdm9ovr46@gmail.com

¹ Empresa de Aplicaciones Informáticas (Desoft), 10400 La Habana, Cuba.

² Empresa de Aplicaciones Informáticas (Desoft), 10400 La Habana, Cuba.

³ Centro Universitario Interamericano (INTER), 97302 Mérida, Yucatán, México.

DOI: 10.17013/risti.61.66–79

Resumen: La transformación digital verde (TDV) amplía el alcance de la transformación digital al integrar objetivos ambientales en las estrategias empresariales. Este artículo introduce el modelo de “Transformación Digital Verde como Servicio” (TDVaaS) y presenta una taxonomía de cuatro roles especializados que combinan competencias digitales y sostenibles: Estratega TDV, Arquitecto de Tecnología Digital Verde, Estratega de Marketing y Experiencia Verde y Especialista en Sistemas de Gestión Ambiental. Estos perfiles reconfiguran funciones propias de la transformación digital para cerrar brechas de capacidad identificadas en los últimos cinco años y responder a los llamados internacionales para la integración de competencias verdes. El análisis comparativo con estudios previos evidencia que la TDVaaS alinea innovación tecnológica, rentabilidad y sostenibilidad ambiental mediante dinámicas colaborativas. El artículo concluye destacando el valor estratégico de incorporar la dimensión ambiental como eje estructural de la transformación digital empresarial.

Palabras-clave: Transformación digital verde; transformación digital; sostenibilidad ambiental; mipymes; competencias digitales.

Green Digital Transformation as a Service (GDTaaS): A New Service Based on Strategic Roles

Abstract: Green digital transformation (GDT) broadens the scope of digital transformation by integrating environmental objectives into business strategies. This article introduces the “Green Digital Transformation as a Service” (GDTaaS) model and presents a taxonomy of four specialized roles that combine digital and sustainability-related competencies: GDT Strategist, Green Digital Technology Architect, Green Marketing and Experience Strategist, and Environmental Management Systems Specialist. These profiles reconfigure functions inherent to digital transformation to close capacity gaps identified over the past five years and

to respond to international calls for the integration of green competencies. The comparative analysis with previous studies shows that GDTaaS aligns technological innovation, profitability, and environmental sustainability through collaborative dynamics. The article concludes by highlighting the strategic value of incorporating the environmental dimension as a structural axis of digital transformation in organizations.

Keywords: Green digital transformation; digital transformation; environmental sustainability; SMEs; digital competencies.

1. Introducción

La transformación digital (TD) se ha consolidado en la última década como pilar fundamental de la competitividad empresarial, al integrar tecnologías digitales en todas las áreas organizacionales y modificar radicalmente operaciones y propuestas de valor (Westerman et al., 2014). Estudios diversos confirman sus beneficios, como el incremento significativo en productividad y competitividad internacional. En América Latina y el Caribe, la digitalización de las micro, pequeñas y medianas empresas (mipymes) mejora el acceso a mercados, genera empleos de calidad y multiplica resultados económicos, lo que ha motivado programas gubernamentales y multilaterales para promoverla como vía de desarrollo sostenible (Baier, Walsh & Mulder, 2021, Banco Interamericano de Desarrollo [BID] & OECD, 2020; BID, 2022).

No obstante, la TD tradicional prioriza eficiencia operativa y crecimiento comercial, desligado de la sostenibilidad ambiental. Ante la crisis climática y regulaciones emergentes, surge la necesidad de una “doble transición” verde y digital, considerada desafío estratégico para gobiernos y empresas (CEPAL, 2022). La transformación digital verde (TDV) responde definiéndose como “el uso de tecnologías y datos digitales para mejorar de manera medible el desempeño ambiental” (BID, 2022). A diferencia de la transformación digital sostenible —que abarca factores sociales y de gobernanza—, la TDV enfoca objetivos ambientales específicos a nivel de empresa como: reducir consumo de recursos, minimizar residuos y mitigar impacto ecológico vía digitalización. Este paradigma añade al criterio de rentabilidad una “brújula verde” de desempeño ambiental medible, redefiniendo el éxito empresarial.

Esta dualidad impulsa la integración de agendas digital y ambiental para rendimiento a largo plazo (Belyamani et al., 2025). La fusión digital-verde implica implementar simultáneamente digitalización y transición ecológica, integrando recursos digitales con factores de producción verdes para reformar modelos operativos y procesos (Yue & Luo, 2024). Tal sinergia fomenta refuerzo mutuo, colaboración e interacción dinámica, promoviendo desarrollo corporativo sostenible mediante capacidades dinámicas de integración y adaptación.

La incorporación de esta “brújula verde” requiere reconfigurar roles de TD, como directivos digitales, consultores y curadores tecnológicos, para alinear innovación con sostenibilidad ambiental. Organismos como BID y CEPAL identifican esta brecha de competencias verdes como limitante, requiriendo formación híbrida específica (González et al., 2020; BID, 2022; CEPAL, 2022).

En este contexto emerge la TDV como servicio (TDVaaS), un modelo “llave en mano” para mipymes, externalizando consultoría especializada en TDV. Para su efectividad, resulta crucial definir roles profesionales y sus articulaciones. Este artículo propone una taxonomía de roles para TDVaaS, evolucionados desde TD hacia competencias verdes.

El objetivo de este artículo es proponer una taxonomía de roles especializados para la implementación de servicio TDVaaS, fundamentada en la evolución de los roles de la transformación digital hacia nuevas competencias “verdes”.

2. Metodología

Este estudio cualitativo exploratorio se basa en revisión de literatura y análisis comparativo de marcos conceptuales, siguiendo tres pasos:

1. Análisis de experiencia previa en TD como servicio, partiendo de roles identificados por los autores (Directivo Digital, Consultor Digital, Curador de Tecnología Innovadora) en TD para exportación en mipymes (Díaz & Fuentes, 2025).
2. Revisión bibliográfica (2020-2025) en Scopus y Web of Science, más informes de BID, CEPAL y PNUMA, enfocada en TD, sostenibilidad y perfiles verdes (Abilakimova et al., 2024).
3. Síntesis comparativa para redefinir roles, validada contra marcos internacionales (BID, 2022; CEPAL, 2022), adoptando terminología estándar en Green IT y sostenibilidad.

La propuesta es teórico-conceptual y está fundamentada en la literatura y experiencia práctica, sin validación empírica directa.

3. Desarrollo

3.1. Marco teórico de la Transformación Digital a la Verde

En un trabajo previo, los autores examinaron la relación entre la transformación digital (TD), la transformación digital verde (TDV) y la transformación digital sostenible (TDS), identificando sus convergencias y diferencias conceptuales en el contexto empresarial (Díaz, Fuentes & Díaz, 2026). Ese análisis estableció la base teórica para comprender la TD como un proceso que trasciende la adopción tecnológica al incorporar dimensiones ambientales y de sostenibilidad estratégica. Sobre esta fundamentación, el presente artículo profundiza en la TDV y su operacionalización mediante el modelo de Transformación Digital Verde como Servicio (TDVaaS), avanzando en la definición de roles y competencias para su implementación efectiva.

En la fase inicial de la TD surgieron perfiles como directivos digitales o *Chief Digital Officers*, consultores digitales y curadores tecnológicos, orientados a liderar la estrategia digital, optimizar procesos e incorporar herramientas innovadoras, en respuesta a las demandas de eficiencia y crecimiento propias de la TD (Salazar-Xirinachs, 2021). No obstante, este enfoque privilegió criterios financieros y de productividad, sin integrar

metas ambientales, revelando una limitación crítica para la resiliencia y competitividad de largo plazo.

La literatura reciente subraya la relación bidireccional entre digitalización y sostenibilidad, mostrando cómo las tecnologías digitales catalizan la innovación verde y cómo la sostenibilidad redefine las prioridades del desarrollo digital (Gan et al., 2023; Teo & Sulaymonov, 2024). Esta interacción converge con la visión de la “doble transición” promovida por la Unión Europea y con la Transformación Dual como base de competitividad e inserción en cadenas globales de valor (Encinas-Grijalva et al., 2024; Hein et al., 2025). En la misma línea, la Industria 5.0 impulsa cadenas de valor regenerativas, circulares y eficientes en el uso de recursos (Díaz & Maciá, 2024; Encinas-Grijalva et al., 2024).

Frente a esa brecha, la TDV se define como la integración de tecnologías digitales con metas explícitas y medibles de mejora del desempeño ambiental. El BID (2022) la conceptualiza como “el uso de tecnologías y datos digitales para mejorar de manera medible el desempeño ambiental”, lo que implica evaluar cada iniciativa por su retorno económico y su impacto en reducción de huella de carbono, ahorro energético y disminución de residuos. De este modo, la TDV genera un círculo virtuoso donde la digitalización optimiza procesos y minimiza simultáneamente el impacto ecológico (Sadgi Agarwal, 2025).

En este trabajo, la TDV se asume como el componente ambiental de la TDS. Mientras la TDS integra el triple balance ambiental, social y de gobernanza (ESG), la TDV prioriza de forma explícita y medible el pilar ecológico. Este enfoque responde a la urgencia climática y a oportunidades estratégicas vinculadas a Green IT, economía circular digitalizada, eficiencia energética y reputación de marca, en coherencia con marcos internacionales impulsados por el PNUMA (2022).

Bajo este paradigma, la evolución de roles es inevitable. Más que añadir funciones ambientales de forma ad hoc, la TDV exige redefinir integralmente responsabilidades y métricas de éxito (Taşel & Bayarçelik, 2023; Sotelo & Velázquez, 2025). El directivo digital debe incorporar el ROI verde en la inversión tecnológica; los especialistas deben priorizar soluciones energéticamente eficientes y habilitadoras de reciclaje y gestión inteligente de recursos; y el marketing digital debe comunicar con rigor el desempeño ambiental, evitando el greenwashing. Paralelamente, especialistas en gestión ambiental se convierten en actores centrales al aportar indicadores que orientan el ecosistema de transformación.

En síntesis, la TDV reconfigura los roles estratégicos de la TD, desplazándolos desde silos tecnológicos o comerciales hacia un ecosistema interdependiente donde convergen innovación digital y sostenibilidad ambiental (Pan & Xiao, 2024). Esta transición fundamenta el modelo TDVaaS como servicio externalizado de consultoría especializada para acompañar, especialmente a mipymes, en su transformación dual. Dado su peso en América Latina y el Caribe y sus restricciones de recursos, la TDVaaS les facilita acceso a capacidades especializadas para avanzar simultáneamente en eficiencia digital y desempeño ambiental, fortaleciendo su resiliencia y competitividad en mercados crecientemente exigentes en sostenibilidad.

3.2. Propuesta de roles para TDVaaS y su evolución

La complejidad de la TDV exige un equipo de consultoría con competencias especializadas en múltiples frentes (tecnológico, estratégico, ambiental y comunicacional). Una simple asesoría digital generalista resulta insuficiente en este contexto. Por ello, proponemos una configuración de cuatro roles clave que, trabajando en conjunto, abarcan las distintas facetas de este proceso. Estos roles derivan de los perfiles de la transformación digital como servicio (TDaaS), pero evolucionados para incorporar la sostenibilidad ambiental en su núcleo. En la Tabla 1 se resume la nomenclatura original de cada rol y el nuevo nombre propuesto, junto con la justificación del cambio.

Rol TDaaS	Rol TDVaaS (propuesto)	Fundamentación del nuevo nombre
Directivo digital	Estratega TDV	Enfatiza su función de integrar la visión digital y ambiental en la estrategia de negocio. “Directivo” alude a un puesto interno, mientras “Estratega” indica su rol consultivo orientado a la visión integral.
Consultor en tecnología innovadora	Arquitecto de tecnología digital verde	“Arquitecto” destaca su tarea de <i>diseñar</i> soluciones, y Tecnología Digital Verde (<i>Green IT</i>) es el término estándar internacional. El nuevo nombre es más específico, reflejando el foco en eficiencia y sostenibilidad ambiental.
Consultor digital	Estratega de marketing digital y experiencia verde	Refleja el doble objetivo de este rol: lograr resultados de marketing digital y comunicar la sostenibilidad ambiental de forma auténtica. El nombre captura esta especialización ambiental.
No existe	Especialista en Sistemas de Gestión Ambiental	Se mantiene la esencia del nombre empleado para este rol en el sector empresarial y académico e indica claramente su ámbito “verde”.

Tabla 1 – Fundamentación de los roles estratégicos de la Transformación Digital Verde como Servicio (TDVaaS)

Para visualizar esta transición conceptual y la reconfiguración de competencias, la Figura 1 sintetiza la evolución de los roles estratégicos desde el paradigma de la TD hacia la TDV. Este esquema ilustra cómo los roles del contexto TD, enfocados en eficiencia y crecimiento, se transforman e integran con un nuevo rol especializado, dando lugar al equipo multidisciplinario requerido para la TDVaaS.

Como se observa, la nueva nomenclatura busca mayor precisión y alineación con términos consolidados en la literatura, como Green IT y marketing digital verde, evitando ambigüedades sobre el alcance de cada rol. A continuación, se caracteriza cada rol del modelo TDVaaS, destacando sus competencias esenciales y su vínculo con los roles predecesores de la TD.

1. Estratega TDV: actúa como facilitador del valor ambiental y puente entre la alta dirección de la empresa cliente y el equipo técnico de consultoría. Su función es articular una estrategia integrada donde los objetivos digitales y ambientales converjan en una única hoja de ruta. No solo impulsa soluciones tecnológicas innovadoras, sino que garantiza que cada iniciativa posea un propósito verde

explícito. En la práctica, diseña el plan maestro de transformación evaluando cada inversión por su retorno financiero y su retorno ambiental (ROI verde), incorporando variables como reducción de emisiones y ahorro energético. Esta orientación responde a recomendaciones de organismos como el BID sobre la necesidad de integrar la sostenibilidad ambiental al modelo de negocio desde la estrategia. En síntesis, define la visión y el rumbo de la TDV equilibrando rentabilidad e impacto ecológico. Este rol representa la evolución del directivo digital hacia un perfil dual en el contexto de la TDV.

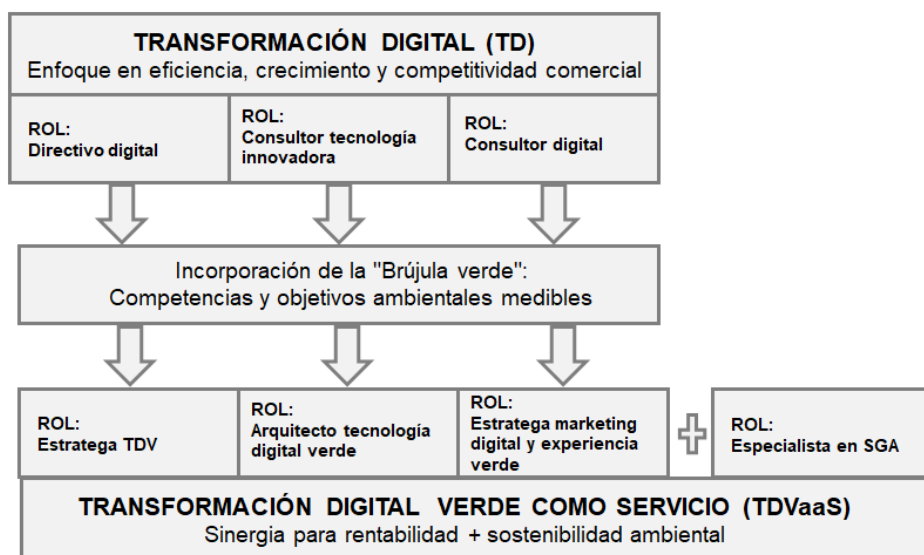


Figura 1 – Representa la evolución de los roles y muestra la reconfiguración de competencias

- Arquitecto de tecnología digital verde: desempeña el papel de traductor técnico-ambiental, responsable de materializar la estrategia TDV en una infraestructura tecnológica concreta y ambientalmente sostenible. Integra competencias en arquitectura TI con conocimiento de eficiencia energética, huella de carbono y normativa verde. Entre sus funciones destaca diseñar soluciones bajo principios de Green IT, como hardware de bajo consumo, migración a nubes con energía renovable e incorporación de sensores para monitorear agua, electricidad y flujos de materiales. Su desempeño se apoya en estándares internacionales promovidos por entidades como el PNUMA, garantizando que la base tecnológica incremente la eficiencia ambiental de la empresa. En resumen, lidera la innovación responsable alineando decisiones técnicas con la estrategia verde global. Este rol deriva del curador de tecnología innovadora de la TD, ampliado hacia la sostenibilidad ambiental.
- Estratega de marketing digital y experiencia verde: funciona como traductor estratégico entre los datos técnico-ambientales verificados y el mercado, construyendo una narrativa de marca creíble en torno a los logros ambientales

de la empresa. Su misión es convertir la inversión en sostenibilidad en valor comercial y reputacional mediante comunicación transparente basada en evidencias, evitando el *greenwashing* y fortaleciendo la confianza de clientes y partes interesadas. Esto implica adaptar estrategias de marketing digital para resaltar atributos verdes de productos y procesos con respaldo verificable, así como rediseñar la experiencia del cliente para que perciba el compromiso ambiental de la empresa. Su relevancia se sustenta en la preferencia creciente de consumidores por marcas con propósito, donde la sostenibilidad bien comunicada favorece fidelización y precios premium (Múnera, 2021). Este rol evoluciona del consultor digital de la TD hacia un perfil orientado a transformar logros técnicos en ventaja competitiva.

4. Especialista en sistemas de gestión ambiental: es el garante de la medición y optimización continua del desempeño ambiental, proporcionando la base de datos auditable que respalda tanto la estrategia comercial como la comunicación transparente. Su responsabilidad incluye implementar herramientas y procedimientos para medir, gestionar y mejorar el desempeño ambiental antes, durante y después de la transformación. Inicialmente realiza diagnósticos de línea base, incluyendo huella de carbono, residuos, agua y energía. Posteriormente diseña o adapta un sistema de gestión ambiental alineado con estándares como ISO 14001, definiendo KPI ambientales y mecanismos de monitoreo y reporte. Dentro del TDVaaS actúa además como auditor interno, verificando que las iniciativas tecnológicas reduzcan efectivamente el impacto ambiental y cumplan la regulación vigente. En esencia, convierte objetivos estratégicos en datos verificables, aspecto crítico para la mejora continua y la credibilidad ante inversionistas, certificadoras y clientes corporativos (Bednarčíková & Repiská, 2021). A diferencia de los anteriores, este rol no deriva de un antecedente directo en la TD, sino que emerge como función estructural propia de la TDV.

Estos cuatro roles actúan como un ecosistema interdependiente más que como silos aislados. Cada uno cubre un frente específico, pero su verdadero valor emerge en la interacción sinérgica entre ellos.

Por ejemplo, imaginemos una iniciativa concreta: el Arquitecto de tecnología digital verde implementa sensores IoT y sistemas de automatización para reducir el consumo energético en una planta; el Especialista en sistemas de gestión ambiental cuantifica esa reducción en términos de toneladas de CO₂ evitadas; el Estratega de marketing digital y experiencia verde convierte esos datos en mensajes de valor para los clientes (comunicando que el producto X ahora se fabrica con 30% menos de emisiones); y el Estratega TDV supervisa que todos estos esfuerzos estén alineados con la visión estratégica y se traduzcan también en ahorros económicos para la mipyme. Este ciclo colaborativo –tecnología->métricas->comunicación->estrategia– es la esencia de la TDVaaS exitosa. La siguiente sección profundiza en esta sinergia y en otros aspectos transversales, discutiendo las implicaciones de adoptar esta propuesta de roles en la práctica.

3.3. Reconfiguración estratégica de roles

La transición de la TD a la TDV conlleva, como hemos visto, una redefinición profunda de los roles estratégicos. Este cambio no se trata solo de añadir nuevas tareas ambientales

a la lista de pendientes, sino de replantear el propósito central de cada rol y el lenguaje con el que se comunica. En este sentido, adoptar nuevos nombres para los roles no es un mero formalismo, sino una decisión estratégica. Un “Consultor Digital” (en el contexto de la TD) difícilmente transmite la idea de que también velará por la sostenibilidad ambiental; en cambio, “Estratega de Marketing digital y Experiencia Verde” deja claro desde el título su doble cometido. La precisión conceptual aporta foco y evita expectativas equivocadas: los clientes (empresas que contraten TDVaaS) comprenden exactamente qué especialidad aporta cada rol y no los confunden con consultores TI genéricos. Además, la nueva nomenclatura crea una identidad de equipo coherente: deja de hablarse de “varios consultores digitales” para presentarse como un equipo multidisciplinario especializado en TDV. Esto facilita la comunicación del servicio y refuerza su propuesta de valor diferenciada.

3.4. Alineación con marcos internacionales

La propuesta de roles TDVaaS está firmemente alineada con las tendencias y recomendaciones de organismos internacionales en materia de desarrollo digital sostenible medioambiental. Por un lado, atiende al llamado del BID y la CEPAL sobre formar talento con competencias verdes para la transformación digital (Bednarčíková & Repiská, 2021; CEPAL, 2022). Cada rol cubre una brecha identificada: el Estratega TDV asegura la integración de la sostenibilidad ambiental en la estrategia de negocio (gap detectado en la TD), el Arquitecto de Tecnología digital Verde lleva el concepto de Green IT a la práctica (gap en las implementaciones tecnológicas de la TD), el Estratega de Marketing digital Verde responde a la necesidad de comunicación ambiental auténtica (brecha en las estrategias comerciales usadas en TD) y el Especialista Ambiental aporta el rigor de métricas y mejora continua.

Por otro lado, los términos usados –Tecnología digital verde, Marketing digital verde, etc., reflejan la terminología estándar a nivel global, lo que facilita la adopción de esta estructura en distintos países y organizaciones sin ambigüedades. Incluso iniciativas recientes, como el grupo de trabajo sobre Transformación Digital Verde de la Red GEALC lanzado en 2024 (Red GEALC, 2024) corroboran la importancia de integrar las agendas digital y ambiental de forma colaborativa en la región. La propuesta TDVaaS provee una manera concreta de materializar esa visión en el sector privado, especialmente en mipymes que suelen carecer de personal propio en estas áreas.

3.5. Sinergias y trabajo en equipo

Esta interdependencia y el flujo de valor creado se representan en la Figura 2, que describe el ciclo sinérgico operativo de la TDVaaS. El esquema muestra cómo la interacción continua entre los cuatro roles—desde la definición de la estrategia hasta la generación de valor económico y ambiental medible—forma un circuito cerrado de mejora, donde la salida de un rol es la entrada del siguiente, asegurando coherencia y maximizando el impacto.

Un hallazgo clave de este análisis es que la sinergia no es opcional, sino obligatoria en la TDVaaS. A diferencia de ciertos proyectos de transformación digital donde expertos TI podían trabajar aisladamente de marketing digital o de operaciones, aquí el valor surge de la colaboración estrecha. La interdependencia de los roles está

diseñada intencionalmente: ninguna de las cuatro especialidades, por sí sola, lograría la transformación digital verde integral. Por ejemplo, de poco sirve que el Arquitecto en Tecnología digital Verde implemente servidores eficientes si nadie mide el ahorro (rol del Especialista en Sistema de Gestión Ambiental) o si el Estratega en marketing digital y Experiencia Verde no comunica ese logro al mercado. Igualmente, de nada valdría proclamar compromisos ecológicos en publicidad sin hacer los cambios tecnológicos de fondo que los respalden. En TDVaaS, cada acción del equipo debe simultáneamente fortalecer la rentabilidad y la sostenibilidad ambiental del negocio, como postula la Teoría de la Decisión de Valor: lograr ese equilibrio requiere comunicación constante entre roles, trabajo colaborativo en cada fase del proyecto (diagnóstico, diseño, implementación, monitoreo) y una cultura organizativa compartida orientada al propósito verde.

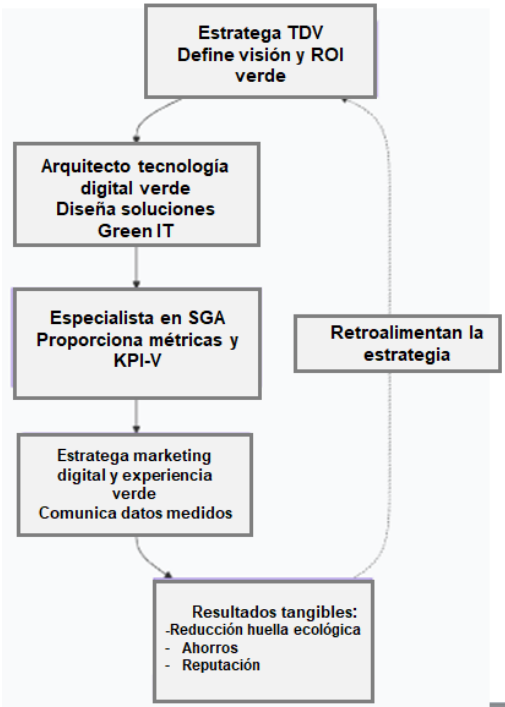


Figura 2 – Representación visual de la sinergia obligatoria entre los roles estratégicos de la TDVaaS

3.6. Beneficios para las mipymes:

Al diseñar esta propuesta se pensó explícitamente en las mipymes, dado que constituyen la mayoría del tejido empresarial en Latinoamérica y el mundo (IEE, 2025; World Bank, 2025). Las mipymes suelen tener recursos limitados y necesitan retornos tangibles en plazos cortos para justificar cualquier inversión. Por ello, TDVaaS con estos roles se

enfoca en proyectos de alto impacto rápido y visible –por ejemplo, reducir la factura eléctrica implementando IoT y eficiencia energética, optimizar el uso de agua, o eliminar desperdicios con analítica de datos –.

Estas acciones no solo producen ahorros inmediatos (valor económico), sino que, al ser comunicadas adecuadamente, mejoran la imagen y competitividad de la pyme en mercados que demandan cada vez más sostenibilidad ambiental. Un aspecto crucial es que TDVaaS libera a la mipyme de tener que contratar internamente a todos estos expertos, algo inviable para muchas. En cambio, mediante el servicio, acceden a un equipo multidisciplinario a demanda, logrando una transformación que de otro modo estaría fuera de su alcance (Brazo, Martín-Velicia & Palos-Sánchez, 2023). Esto convierte a la TDV en un “alto valor agregado y bajo costo” relativo para mipymes, tal como se había planteado para la TD orientada a exportación. En la práctica, implementar TDVaaS puede aumentar la eficiencia operativa de las mipymes, abrirles nichos de mercado “verdes” y prepararlas para cumplir futuras regulaciones ambientales en la cadena de suministro (una preocupación creciente entre exportadores).

3.7. Riesgos y consideraciones:

Desde luego, esta aproximación también conlleva desafíos. Uno es asegurar la credibilidad de los esfuerzos verdes. Aquí la inclusión del Especialista en Sistemas de Gestión Ambiental y las métricas verificables juegan un papel vital para evitar acusaciones de greenwashing. La implementación de TDVaaS requiere un proceso gradual: diagnóstico (4-6 semanas), diseño de hoja de ruta y roles (4-8 semanas), piloto de validación (3-6 meses). Paralelamente, exige programas de *reskilling* y certificación híbrida en competencias digitales-ambientales para Estratega TDV y Arquitecto de Tecnología Digital Verde, condición estructural de viabilidad del modelo

Será necesario impulsar programas de capacitación y certificación específicos para “Estratega TDV” o “Arquitecto de Tecnología digital verde”, tal como en su momento surgieron cursos para formarse como *chief digital officer*. De hecho, la experiencia internacional demuestra la necesidad de formar al personal involucrado en consultorías de TD, y ahora esa necesidad se extiende a competencias ambientales (Florek & Paszkowska & Ujwary-Gil, 2025). Los gobiernos y entidades como la CEPAL o el BID podrían apoyar en este aspecto mediante iniciativas de formación y creación de talento verde digital en la región.

En síntesis, el modelo de roles aquí discutido ofrece una respuesta estructurada al llamado por una transformación digital más sostenible ambientalmente. Reconfigurar los roles resulta ser mucho más que un ejercicio teórico: es una estrategia para dotar al proceso de TD de los atributos necesarios para generar valor en la era de la sostenibilidad (específicamente a la medioambiental). Las organizaciones que adopten un enfoque TDV (ya sea internamente o contratando TDVaaS) estarán mejor posicionadas para cumplir con regulaciones ambientales emergentes, para acceder a financiamiento verde y para atraer a consumidores conscientes. Además, al internalizar la colaboración entre áreas antes desconectadas (TI, medio ambiente, marketing digital, estrategia), desarrollarán una resiliencia superior frente a los retos del futuro.

4. Conclusiones

La Transformación Digital Verde como Servicio (TDVaaS) se configura como un enfoque emergente que articula de manera sistemática las agendas digital y ambiental, ofreciendo un marco operativo para promover la sostenibilidad empresarial. La propuesta desarrollada en este estudio identifica y caracteriza cuatro roles especializados — Estratega TDV, Arquitecto de Tecnología Digital Verde, Estratega de Marketing Digital y Experiencia Verde, y Especialista en Sistemas de Gestión Ambiental— que, en conjunto, conforman un ecosistema profesional orientado a integrar competencias digitales y ambientales en procesos de transformación organizacional.

Los resultados permiten extraer tres conclusiones principales. En primer lugar, se evidencia la necesidad de reconfigurar los modelos tradicionales de consultoría digital, incorporando perfiles con competencias ambientales que aseguren la coherencia entre innovación tecnológica y sostenibilidad. En segundo lugar, el enfoque TDV demuestra que la interacción interdisciplinaria entre áreas estratégicas, tecnológicas, ambientales y de marketing digital constituye un factor crítico para generar valor económico y ambiental de manera simultánea. En tercer lugar, la propuesta se alinea con lineamientos de organismos internacionales como BID, CEPAL y PNUMA, lo que refuerza su pertinencia para abordar la doble transición digital-verde en contextos regionales y globales.

En conjunto, estos hallazgos sugieren que TDVaaS ofrece un marco conceptual y operativo robusto para orientar a las organizaciones hacia modelos de transformación digital que integren explícitamente la sostenibilidad ambiental como eje estructurante.

4.1. Próximos pasos

A partir de las conclusiones obtenidas, se identifican diversas líneas de investigación y acción futura. Una primera línea consiste en realizar pilotos de 3-6 meses para validar TDVaaS en mipymes, midiendo impacto ambiental/económico (González et al., 2020) que permitan validar empíricamente la efectividad del modelo propuesto, así como identificar barreras operativas y medir su impacto en indicadores económicos y ambientales. Una segunda línea apunta al desarrollo de programas de formación y certificación profesional orientados a los roles definidos, lo que contribuiría a consolidar capacidades técnicas y estratégicas en el ámbito de la transformación digital verde. Una tercera línea de investigación sugiere ampliar el marco conceptual hacia una perspectiva más integral de sostenibilidad, incorporando dimensiones sociales y de gobernanza, lo que podría derivar en la redefinición o expansión de los roles propuestos hacia la transformación digital sostenible (TDS).

Finalmente, desde el ámbito de las políticas públicas, resulta pertinente explorar mecanismos de incentivo —como instrumentos fiscales verdes, subvenciones o programas de apoyo a mipymes— que faciliten la adopción de TDVaaS en sectores estratégicos y contribuyan a una transición económica más resiliente, inclusiva y ambientalmente responsable.

Referencias

- Abilakimova, A., Bauters, M., & Ogunyemi, A. A. (2024). Systematic literature review of digital and green transformation of manufacturing SMEs in Europe. *Production & Manufacturing Research*, 13(1), 2443166. <https://doi.org/10.1080/21693277.2024.2443166>
- Baier, H., Walsh, D., & Mulder, N. (2021). *La transformación digital de las PYMES exportadoras desde una perspectiva teórica y práctica (Documentos de Proyectos LC/TS.2021/156)*. CEPAL. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/47450>
- Banco Interamericano de Desarrollo & Organisation for Economic Co-operation and Development. (2020). *Políticas de transformación digital para América Latina y el Caribe*. https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Pol%C3%ADticas_de_transformaci%C3%B3n_digital_para_Am%C3%A9rica_Latina_y_el_Caribe.pdf
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2022). *Manual de transformación digital para mipymes*. <https://publications.iadb.org/es/manual-de-transformacion-digital-para-mipymes>
- Bednarčíková, D., & Repiská, R. (2021). Digital transformation in the context of the European Union and the use of digital technologies as a tool for business sustainability. *SHS Web of Conferences*, 115, 01001. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202111501001>
- Belyamani, I., Mfarrej, M. F. B., Ahmad, S. Z., & Bakar, A. R. A. (2025). Pathways linking green digital transformation to sustainable development through knowledge sharing and dynamic capabilities. *Discover Sustainability*, 6(1). <https://doi.org/10.1007/s43621-025-02075-y>
- Brazo, P., Martín-Velicia, F. A., & Palos-Sánchez, P. R. (2023). Digitalización del sector de la consultoría: Impulsores y facilitadores internos y externos. *Estudios Gerenciales*, 39(167), 5498. <https://doi.org/10.18046/j.estger.2023.167.5498>
- CEPAL. (2022). *Digitalización y sostenibilidad: Oportunidades y desafíos para América Latina y el Caribe*. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/47984-digitalizacion-sostenibilidad-oportunidades-desafios-america-latina-caribe>
- Díaz, P., & Maciá, M. E. (2024). Convergencias hacia la Industria 5.0 en Cuba. *Revista Cubana de Educación Superior*, 43(2), 214–229. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0257-43142024000200214
- Díaz, P., & Fuentes, M. J. (2025). Transformación digital para la exportación. *Revista Nueva Empresa*, 12(1), 3-7.
- Díaz González de Mendoza, P., Fuentes Prieto, M. J., & Díaz Manresa, K. (2025). Transformación digital sostenible: La convergencia de la innovación tecnológica y la sostenibilidad. *Revista RISTI*, 60(12). 96-120. <https://www.risti.xyz/issues/ristie60.pdf>

- Encinas-Grijalva, M. del S., Olivieri-Sangiacomo, F. A., Galván-Vela, E., & Ravina-Ripoll, R. (2024). Business readiness for dual transformation. *Discover Sustainability*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00370-8>
- Florek-Paszkowska, A., & Ujwary-Gil, A. (2025). The digital-sustainability ecosystem. *Journal of Entrepreneurship Management and Innovation*, 21(2), 116. <https://doi.org/10.7341/20252127>
- Gan, Y., Sun, T., Chen, Y., Wu, T., Liu, Y., Wang, S., Den, Z., & Zhang, J. (2023). The impact of corporate digital transformation on green technological innovation. *Advances in Economic Development and Management Research*, 1(1), 97. <https://doi.org/10.61935/aedmr.1.1.2023.p97>
- González, J. (2020). Hacia un modelo de madurez de transformación digital (MM-TD) para cooperativas de crédito. RISTI - Revista Ibérica de Sistemas y Tecnologías de Información, (E32), 622-634. <https://investigaciones-pure.udemedellin.edu.co/en/publications/hacia-un-modelo-de-madurez-de-transformación-digital-mmtd-p>
- Hein, N., Münter, M. T., & Zimmermann, V. (2025). Green, digital, or twin strategic orientation. *Journal of Innovation & Knowledge*, 12, 100896. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100896>
- Instituto de Estudios Económicos. (2025). *Caracterización de las mipymes en América Latina y el Caribe*. <https://www.ieemadrid.es/sites/ceoe-iee/files/content/file/2025/12/03/25/iee.-punto-de-vista-noviembre-2025.-caracterizacion-de-las-mipymes-en-america-latina-y-el-caribe.pdf>
- Múnera, L. (2021). Marketing sostenible: Cómo construir marcas con propósito en la era digital. *Ecoe Ediciones*.
- Pan, X., & Xiao, S. (2024). What drives firms to go green in China? *Sustainability*, 17(1), 234. <https://doi.org/10.3390/su17010234>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2021). *Oportunidades de negocios circulares: Innovación y tendencias*. <https://www.unep.org/es/node/39086>
- Red GEALC. (2024). *Transformación digital verde*. <https://www.redgealc.org/lineas-de-trabajo/transformacion-digital-verde/>
- Salazar-Xirinachs, J. M. (2021). *Digital transformation: Economic and employment reactivation in Latin America and the Caribbean post COVID-19*. Organization of American States. <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/en/biblio-1348132>
- Sotelo, M. K. S., & Velázquez, J. G. G. (2025). Algoritmos verdes. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 6(3). <https://doi.org/10.56712/latam.v6i3.4245>
- Sadgi Agarwal, A., & Jha, A. (2025). Synergy or struggle? *European Economic Letters*, 15(1), 1768–1776. <https://doi.org/10.52783/eel.v15i1.2560>

- Taşel, F., & Bayarçelik, E. B. (2023). A bibliometric analysis and review of green transformation. *Pressacademia*. <https://doi.org/10.17261/pressacademia.2023.1831>
- Teo, T. C., & Sulaymonov, A. (2024). Fostering synergies: The interplay of digital transformation and sustainability through dual innovation. *SSRN*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4963934>
- Westerman, G., Bonnet, D., & McAfee, A. (2014). Leading digital: Turning technology into business transformation. *Harvard Business Review Press*.
- World Bank. (2025). *Small and medium enterprises (SMEs) finance*. <https://www.worldbank.org>
- Yue, Y., & Luo, F. (2024). Unlocking corporate sustainability. *Systems*, 13(1), 13. <https://doi.org/10.3390/systems13010013>

Modelagem de Riscos em Projetos de IoT: Suporte à Decisão via Redes Bayesianas e Simulação de Monte Carlo

Erika Midori Kinjo¹, Fernando Manoel Alves dos Santos Junior¹, Fábio Cosme Rodrigues dos Santos¹, André Felipe Henriques Librantz¹, Edson Melo de Souza¹

midori.kinjo@gmail.com; fernandomsj@hotmail.com; fcrsantos77@gmail.com;
librantzandre@gmail.com; souzaem@uni9.pro.br

¹ Programa de Pós-graduação em Informática e Gestão do Conhecimento, Campus Vergueiro, Universidade Nove de Julho, 01525-000, Brasil

DOI: 10.17013/risti.61.80-97

Resumo: Este artigo apresenta uma abordagem quantitativa integrada para a gestão de riscos em projetos de Internet das Coisas, baseada na combinação de Redes Bayesianas e Simulação de Monte Carlo. A proposta supera limitações de métodos tradicionais ao modelar explicitamente a natureza sociotécnica da IoT, incorporando o comportamento humano e fatores éticos como variáveis endógenas que afetam a confiabilidade do sistema. A metodologia emprega o método Delphi para a elicitación de probabilidades *a priori* junto a especialistas e valida o modelo por meio da simulação de três cenários com níveis distintos de criticidade. Os resultados indicam que o modelo permite hierarquizar riscos de forma consistente, destacando o fator humano como elemento crítico. A abordagem oferece suporte quantitativo à tomada de decisão e à priorização de estratégias de mitigação em projetos complexos.

Palavras-chave: Internet das Coisas (IoT); Gestão de Riscos; Redes Bayesianas; Simulação de Monte Carlo; Suporte à Decisão.

Risk Modeling in IoT Projects: Decision Support via Bayesian Networks and Monte Carlo Simulation

Abstract: This paper presents an integrated quantitative approach for risk management in Internet of Things projects, combining Bayesian Networks and Monte Carlo Simulation. The proposal addresses limitations of traditional methods by explicitly modeling the sociotechnical nature of IoT systems, incorporating human behavior and ethical factors as endogenous variables affecting system reliability. The methodology applies the Delphi method to elicit *a priori* probabilities from experts and validates the model through the simulation of three scenarios with different levels of criticality. Results show that the model consistently ranks risks, identifying the human factor as a critical vulnerability. The approach provides quantitative decision support for risk mitigation and resource prioritization in complex projects.

Keywords: Internet of Things (IoT); Risk Management; Bayesian Networks; Monte Carlo Simulation; Decision Support.

1. Introdução

A evolução tecnológica das últimas décadas consolidou a Internet das Coisas (IoT) como um eixo central da digitalização de processos. Ao permitir a interconexão de dispositivos capazes de coletar, processar e transmitir dados de forma contínua, a IoT viabiliza automação, monitoramento em tempo real e suporte à decisão em setores como saúde, transporte, agricultura e indústria (Salih et al., 2022). Esse avanço decorre, em grande medida, da popularização de sensores de baixo custo, da expansão da conectividade sem fio e da disponibilidade de infraestruturas computacionais distribuídas.

Apesar dos benefícios, a ampliação do uso de IoT intensifica desafios associados à segurança (Adewole, 2025), à privacidade e à confiabilidade. Ambientes com grande quantidade de dispositivos heterogêneos, operando com diferentes protocolos, arquiteturas e níveis de maturidade tecnológica, tendem a exibir vulnerabilidades que afetam integridade, disponibilidade e confidencialidade de informações (Frustaci et al., 2018; Alwarafy et al., 2021). Esses riscos se agravam quando a IoT é empregada em contextos sensíveis, como sistemas de saúde, monitoramento ambiental e infraestruturas críticas.

A literatura recente também aponta taxas relevantes de insucesso em projetos de IoT, com falhas de planejamento, fragilidades em mecanismos de segurança e dificuldade de antecipar riscos operacionais ao longo do ciclo de vida do projeto (Olivero et al., 2024; Sharma & Bhushan, 2026). Parte desse problema é atribuída à predominância de avaliações qualitativas, baseadas em matrizes simplificadas ou julgamento subjetivo, que não representam adequadamente relações de causalidade complexas e incertezas típicas de sistemas IoT (NIST, 2012; Radanliev et al., 2020; Radanliev et al., 2024).

Nesse cenário, abordagens quantitativas baseadas em modelos probabilísticos têm sido empregadas para apoiar a gestão de riscos em sistemas complexos. Redes Bayesianas (*Bayesian Networks*, BN) permitem representar dependências causais entre variáveis técnicas e organizacionais e estimar probabilidades de eventos de falha a partir de evidências observadas (Lee, 2011; Kinjo et al., 2022). De forma complementar, a simulação de Monte Carlo (*Monte Carlo Simulation*, MCS) possibilita analisar cenários estocásticos e incorporar variabilidade e incerteza em parâmetros e entradas do modelo (Arias et al., 2019; Baranowski, 2022).

Embora existam contribuições relevantes, observa-se que muitos modelos adotam uma perspectiva predominantemente tecnocêntrica, tratando falhas de *hardware* e *software* como eventos isolados. Essa postura limita a análise, pois projetos de IoT são sociotécnicos por natureza e incluem fatores humanos, organizacionais e éticos que influenciam diretamente o desempenho e a confiabilidade do sistema (Verizon, 2023; Silva-Atencio, 2025). Em termos práticos, a ausência desses elementos no núcleo do modelo reduz a capacidade de explicar e priorizar riscos que emergem da interação entre tecnologia, pessoas e governança.

Diante dessa lacuna, este artigo propõe uma abordagem integrada para modelagem de riscos em projetos de IoT, combinando BN e MCS em um único arcabouço analítico. O projeto é descrito como um sistema sociotécnico complexo, no qual variáveis técnicas, de governança e de contexto de aplicação influenciam a probabilidade de falha e o nível de risco. A estrutura incorpora, de modo explícito, o componente social por meio de uma variável ética endógena ao grafo causal, de forma a refletir sua contribuição para a inferência probabilística e para a priorização final de riscos. O objetivo é apoiar a tomada de decisão com base quantitativa, permitindo hierarquização de riscos e priorização de estratégias de mitigação em diferentes cenários (Babatunde et al., 2024).

Ao inserir a variável ética como componente endógeno, o modelo se diferencia de abordagens em que fatores humanos, organizacionais e éticos permanecem apenas como premissas externas ou como discussão qualitativa, sem impacto direto no mecanismo de inferência e na ordenação final de criticidade.

No que se refere à análise de incerteza, a MCS não é empregada como repetição da inferência da BN, mas como mecanismo de propagação de variabilidade em parâmetros e entradas. A inferência bayesiana estima a probabilidade do evento final sob um conjunto de parâmetros, enquanto, neste desenho, tais parâmetros são obtidos por elicitación, por exemplo, via Delphi, e carregam variabilidade associada ao julgamento especializado. A MCS incorpora essa variabilidade ao amostrar entradas a partir de distribuições apropriadas e executar múltiplas iterações por cenário, resultando em uma distribuição do indicador de Risco de Perda de Privacidade e Segurança dos Dados (RPPSD), com intervalos de confiança e informação sobre estabilidade do ranqueamento entre cenários. Do ponto de vista decisório, esse procedimento distingue prioridades consistentemente dominantes daquelas, cuja hierarquização é sensível a variações plausíveis nos parâmetros, aspecto relevante quando cenários críticos apresentam níveis próximos de risco.

2. Análise da Solução

A literatura recente sobre gestão de riscos em projetos de IoT evidencia um crescimento significativo de abordagens voltadas à segurança, confiabilidade e desempenho desses sistemas. Contudo, observa-se que tais contribuições permanecem, em grande parte, fragmentadas, concentrando-se em componentes técnicos específicos ou em problemas isolados, sem oferecer uma visão integrada do projeto como um sistema sociotécnico complexo.

Diversos estudos exploram mecanismos formais para garantir a integridade e a rastreabilidade de dados em ambientes IoT. Trabalhos baseados em Redes de Petri têm sido empregados para modelar fluxos de dados e verificar propriedades formais em sistemas distribuídos, demonstrando eficácia no controle de eventos e na análise de consistência em camadas de enlace e transporte (Lomotey et al., 2017; Ghosh et al., 2019). Apesar de sua robustez técnica, essas abordagens apresentam limitações quando aplicadas à gestão de projetos, pois não contemplam explicitamente variáveis organizacionais nem a interação com usuários finais.

Outras contribuições utilizam Lógica Fuzzy (Fuzzy Logic, FL) e técnicas de Aprendizado de Máquina (Machine Learning, ML) para tratar incertezas e detectar padrões anômalos em dispositivos IoT. Abordagens Fuzzy têm sido aplicadas com sucesso em problemas de balanceamento de carga e eficiência energética (Campanile et al., 2020; Ntafloukas et al., 2022), enquanto modelos baseados em redes neurais e algoritmos de classificação são empregados na detecção de intrusões e anomalias (Pacheco et al., 2020; El-Gendy et al., 2023). Embora eficazes em contextos específicos, esses modelos tendem a operar de forma reativa e focada no dispositivo, sem integrar restrições de negócio, impactos organizacionais ou fatores humanos associados ao projeto.

No campo da governança e da gestão de riscos, alguns estudos propõem *frameworks* conceituais baseados em normas e boas práticas, como COBIT e ISO 27001, visando apoiar a mitigação de riscos em ambientes IoT (Valdivia & Miranda, 2020). Apesar de sua relevância normativa, essas propostas carecem de mecanismos quantitativos capazes de estimar probabilidades de falha ou simular cenários alternativos, limitando seu uso como ferramentas preditivas de apoio à decisão.

Abordagens probabilísticas baseadas em BN representam um avanço importante nesse contexto, ao permitirem a modelagem explícita de relações causais entre componentes do sistema. Estudos anteriores demonstraram a aplicabilidade dessas redes na análise de falhas e riscos em cadeias de suprimentos, sistemas de *software* e aplicações IoT, inclusive no domínio da saúde (Librantz et al., 2021; Kinjo et al., 2022; Baranowski, 2022). No entanto, a maioria dessas propostas restringe-se à inferência bayesiana estática, sem explorar de forma sistemática a variabilidade estocástica associada à execução de projetos complexos.

A MCS, por sua vez, tem sido utilizada para simular incertezas e gerar distribuições probabilísticas em contextos como otimização de recursos, avaliação de ataques ciberfísicos e estimativa de tempos de conclusão de projetos (Chen et al., 2016; Arias et al., 2019; Ntafloukas et al., 2022). Ainda assim, essas aplicações são geralmente pontuais e não integradas a modelos causais abrangentes que representem simultaneamente aspectos técnicos, organizacionais e sociais.

Em síntese, a análise da literatura revela três limitações recorrentes: a predominância de modelos tecnocêntricos, a ausência de integração entre inferência causal e simulação estocástica, e a negligência do fator humano como variável estruturante do risco (Verizon, 2023; Silva-Atencio, 2025).

Em comparação com as abordagens identificadas, o modelo proposto neste estudo apresenta características distintivas. Frameworks normativos (COBIT, ISO 27001) oferecem estrutura de governança, mas carecem de mecanismo quantitativo de estimação de probabilidades. Abordagens baseadas em Redes de Petri e ML proporcionam rigor formal em camadas técnicas específicas, mas não integram variáveis organizacionais ou humanas no mecanismo de inferência. Modelos BN existentes avançam na modelagem causal, porém restringem-se à inferência estática e tratam o fator humano como premissa externa. O presente estudo supera essas limitações ao tratar o projeto IoT como sistema sociotécnico, incorporar a variável ética como nó endógeno do grafo causal e combinar a inferência bayesiana com a MCS para propagação explícita de incerteza paramétrica.

3. Fundamentação Teórica

3.1. Privacidade e Segurança da Informação como Problema Sistêmico na IoT

O crescimento acelerado da IoT ampliou significativamente a superfície de ataque dos sistemas de informação, tornando a privacidade e a segurança de dados elementos centrais para a viabilidade técnica e organizacional desses projetos. Dispositivos IoT coletam e processam informações sensíveis, como dados biométricos, padrões comportamentais e localização, o que intensifica os riscos associados a vazamentos, usos indevidos e violações regulatórias (Tran-Dang, 2020; Nižetić et al., 2020).

Além dos aspectos técnicos, a segurança da informação em IoT possui implicações legais e sociais relevantes. Regulamentos como o GDPR e o CCPA impõem requisitos rigorosos de proteção de dados, cujo descumprimento pode resultar em sanções financeiras e danos reputacionais substanciais (Deng et al., 2017; Zaeem & Barber, 2020). Em contextos críticos, como saúde e energia, falhas de segurança extrapolam o domínio tecnológico e podem gerar impactos sociais severos, reforçando o caráter sistêmico do problema

3.2. A Dimensão Social e Ética como Vetor de Risco

Embora a arquitetura da IoT seja predominantemente técnica, evidências empíricas indicam que o comportamento humano constitui um dos principais vetores de falha em sistemas de informação contemporâneos. Relatórios de incidentes de segurança demonstram que ações como configuração inadequada, negligência operacional, ausência de treinamento e violações de protocolos éticos superam, em muitos casos, falhas puramente tecnológicas (Verizon, 2023).

Neste trabalho, o fator social não é tratado como uma externalidade abstrata, mas como um componente estruturante do risco. A dimensão ética e comportamental é operacionalizada como uma variável endógena do sistema, capaz de influenciar diretamente a probabilidade de falha global do projeto. Essa abordagem permite capturar a entropia introduzida pela interação entre agentes humanos e artefatos tecnológicos, característica fundamental de sistemas sociotécnicos complexos (Silva-Atencio, 2025).

Do ponto de vista preventivo, a modelagem explícita do componente ético permite identificar, *a priori*, configurações do sistema nas quais o risco associado ao fator humano supera limiares aceitáveis, orientando a adoção de contramedidas específicas. Entre as medidas aplicáveis destacam-se: programas de treinamento e capacitação operacional; políticas formais de privacidade com responsabilidades claramente atribuídas; mecanismos de auditoria e rastreabilidade de ações sobre dados sensíveis; e incentivos institucionais ao comportamento ético, alinhados às exigências regulatórias vigentes (GDPR, LGPD). A integração dessas medidas ao modelo de risco reforça sua utilidade prática, ao conectar a inferência quantitativa a ações gerenciais concretas de mitigação.

3.3. Redes Bayesianas como Modelo de Dependência Causal

As BN constituem modelos probabilísticos gráficos capazes de representar dependências causais entre variáveis por meio de estruturas direcionadas acíclicas. Cada nó da rede

representa uma variável aleatória, enquanto as arestas indicam relações de causa e efeito, permitindo a inferência probabilística a partir de evidências observadas (Librantz et al., 2021).

Em sistemas complexos, como projetos de IoT, as BN permitem integrar componentes técnicos, organizacionais e humanos em um único arcabouço analítico. Essa característica torna as BN particularmente adequadas para a modelagem de riscos, pois possibilita a atualização dinâmica das probabilidades de falha à medida que novas informações são incorporadas ao sistema (Lee, 2011; Kinjo et al., 2022).

Cada variável da rede pode assumir um conjunto finito de estados, e as dependências entre um nó e seus nós pais são formalizadas por meio de Tabelas de Probabilidade Condicional. Essas tabelas especificam a probabilidade de ocorrência de um determinado estado do nó filho dado o estado de seus nós pais, constituindo o núcleo matemático da inferência bayesiana (Zagorecki & Druzdzet, 2013).

A Figura 1 ilustra um exemplo genérico de uma RB, evidenciando a relação entre nós pais e nós filhos e a propagação de probabilidades ao longo da estrutura da rede.

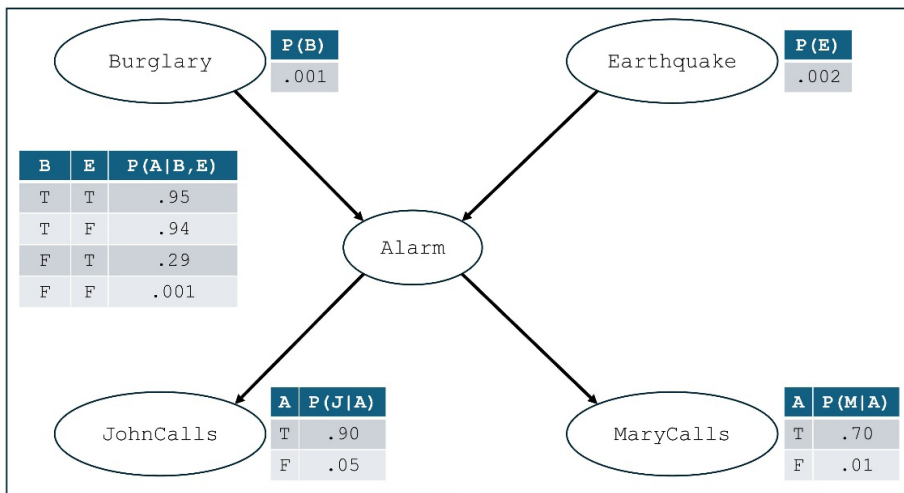


Figura 1 – Exemplo genérico de uma BN. Adaptado de Librantz et al. (2021)

A inferência probabilística em RB fundamenta-se no Teorema de Bayes, que estabelece a relação entre probabilidades condicionais e probabilidades *a priori*. Formalmente, o teorema pode ser expresso conforme a Equação (1):

$$P(H / E) = \frac{P(E / H) \cdot P(H)}{P(E)}, \quad (1)$$

Em que $P(H/E)$ é uma probabilidade do evento H dado que o evento E ocorreu, $P(E/H)$ é uma probabilidade do evento E dado que o evento H ocorreu, $P(H)$ é uma probabilidade do evento H e $P(E)$ é uma probabilidade do evento E .

No contexto da modelagem de riscos em projetos de IoT, esse formalismo permite atualizar continuamente as probabilidades de falha à medida que novas evidências são incorporadas ao sistema. Formalmente, ao se observar um evento E , como uma falha de dispositivo ou uma violação de protocolo, a probabilidade a posteriori $P(H|E)$ é recalculada via Teorema de Bayes, revisando a crença inicial $P(H)$ à luz da evidência. Esse mecanismo confere às BN a capacidade de incorporar dinamicamente dados empíricos coletados durante a operação, como logs de incidentes ou resultados de auditorias, aprimorando a precisão das estimativas de risco ao longo do ciclo de vida do projeto. No modelo proposto, as probabilidades *a priori* são definidas por elicitação Delphi; a atualização *a posteriori* constitui, portanto, uma extensão natural para cenários em que dados operacionais históricos se tornem disponíveis.

3.4. Método Monte Carlo e Tratamento da Incerteza

A MCS é amplamente empregada para a análise de sistemas sujeitos a incertezas e variabilidade estocástica (Arias et al., 2019; Baranowski, 2022). Em projetos de IoT, a MCS possibilita avaliar o impacto cumulativo de múltiplas fontes de incerteza, incluindo falhas técnicas, variações operacionais e comportamentos humanos não determinísticos. Dessa forma, o método complementa a inferência causal das BN ao capturar a variabilidade inerente à execução do projeto.

3.5. Síntese Conceitual e Integração dos Métodos

A análise das abordagens existentes evidencia que nem modelos causais isolados, nem simulações estocásticas independentes são suficientes para representar a complexidade dos projetos de IoT. As BN oferecem uma estrutura formal para modelar dependências e inferir probabilidades condicionais, enquanto a MCS permite explorar a incerteza associada a essas probabilidades.

A integração desses métodos viabiliza uma abordagem unificada de gestão de riscos, na qual aspectos técnicos, sociais e éticos são tratados de forma coerente. Essa síntese conceitual fundamenta o modelo proposto neste estudo e estabelece a base teórica para sua aplicação como ferramenta quantitativa de suporte à decisão em projetos de IoT.

4. Materiais e Métodos

O método proposto integra BN para representar dependências causais entre componentes do sistema e MCS para analisar a propagação estocástica de falhas sob incerteza.

4.1. Etapas da Pesquisa

O desenvolvimento do estudo seguiu um fluxo metodológico estruturado, composto pelas seguintes etapas: (i) identificação do problema, por meio de revisão da literatura, com seleção e análise de 391 artigos relevantes; (ii) modelagem conceitual do sistema IoT, incorporando componentes técnicos e sociais; (iii) elicitação das probabilidades *a priori*

por meio do método Delphi; (iv) implementação computacional do modelo bayesiano e das MCS; e (v) aplicação do modelo em cenários de projetos IoT com diferentes níveis de criticidade.

4.2. Modelagem do Sistema

A modelagem do sistema foi desenvolvida a partir de uma adaptação da arquitetura Open Systems Interconnection (OSI) tradicional, ampliada para contemplar explicitamente a dimensão social como um componente do sistema. Essa adaptação permitiu representar, em um único modelo, camadas técnicas da rede IoT e variáveis relacionadas ao comportamento humano e a aspectos éticos, conforme mostrado na Figura 2.

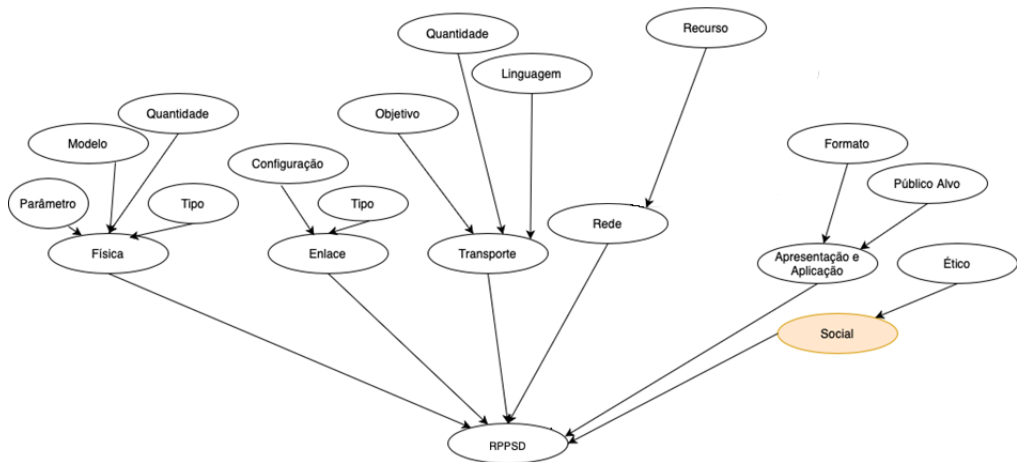


Figura 2 – Modelo proposto para análise de riscos em projetos IoT

A estrutura do modelo define cada camada como um conjunto de nós na RB, cujas interdependências refletem relações causais entre dispositivos, protocolos, provedores de serviço, aplicações e usuários finais. Essa representação possibilita avaliar como falhas locais podem propagar-se ao longo do sistema e impactar o risco global do projeto.

4.3. Definição da Probabilidade *a priori*

A definição das probabilidades *a priori* baseou-se na aplicação do método Delphi, conduzido com um painel de 12 especialistas com experiência mínima de dez anos em projetos de IoT. A seleção dos participantes foi intencional, priorizando diversidade de atuação profissional nos setores industrial, público e acadêmico, de modo a reduzir vieses associados a um único domínio. O Delphi foi aplicado em formato modificado de rodada única, por meio de formulário *online* (Google Forms), com respostas individuais e anônimas entre os participantes. A concordância do painel quanto à pertinência dos itens foi verificada via Índice de Validade de Conteúdo (IVC) e as avaliações linguísticas foram convertidas para escala numérica, sendo as probabilidades *a priori* consolidadas por média geométrica. Conforme discutido por Forza (2002) e Okoli & Pawlowski

(2004), painéis de especialistas selecionados de forma criteriosa tendem a produzir resultados confiáveis quando os participantes detêm domínio técnico expressivo e o objetivo investigativo é claramente delimitado.

As estimativas fornecidas pelos especialistas foram consolidadas por meio da média geométrica, método recomendado para agregação de julgamentos probabilísticos em contextos de incerteza, por preservar a proporcionalidade das estimativas e mitigar o impacto de valores extremos (Krejčí & Stoklasa, 2018). A agregação foi realizada conforme a Equação (2):

$$P = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i} = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n}, \quad (2)$$

Onde P representa o valor agregado do cenário (*Score Final*); n é o número total de componentes ou variáveis avaliadas (no caso, a quantidade de linhas da tabela); x_i representa o valor atribuído a cada variável individual.

A conversão de variáveis linguísticas em valores numéricos seguiu a escala proposta por Namazian (2019), garantindo uniformidade na interpretação dos julgamentos fornecidos, conforme mostrado na Tabela 1.

Escala	Valor
Muito Alta	0,9
Alta	0,7
Mediana	0,5
Baixa	0,3
Muito Baixa	0,1

Adaptado de Namazian (2019).

Tabela 1 – Escala de conversão de variáveis linguísticas para numéricas

Após a conversão da probabilidade de falha percebida pelos especialistas em valores numéricos, foi possível calcular a média e o desvio padrão para a geração da distribuição normal dos parâmetros de entrada. Essas etapas têm como objetivo reduzir a subjetividade inerente à amostra e aumentar a consistência estatística da percepção dos especialistas.

Para a modelagem das dependências nos nós intermediários e no nó final (RPPSD), onde múltiplos fatores de risco (pais) influenciam uma única variável de efeito, adotou-se o modelo canônico Noisy-OR. Esta abordagem assume que cada causa atua de forma independente para provocar o efeito, permitindo calcular a probabilidade condicional agregada conforme a Equação (3):

$$P(Y | X_i, \dots X_n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(Y | X_i)), \quad (3)$$

Onde $P(Y|X_i)$ representa a probabilidade causal simples de cada componente pai isolado. O uso do Noisy-OR simplificou a elicitación das probabilidades condicionais, reduzindo a complexidade da matriz de combinações e viabilizando a representação da incerteza causal no sistema sociotécnico proposto.

4.4. Simulação e Validação do Modelo

A implementação computacional do modelo e a execução das simulações estocásticas foram realizadas utilizando a linguagem de programação Python (versão 3.10.12). Para a modelagem estrutural e a inferência das BN, adotou-se a biblioteca científica PyAgrum (versão 1.1.0), escolhida por sua robustez na manipulação de modelos gráficos probabilísticos, permitindo a criação, o aprendizado e o cálculo de inferências complexas. Todo o desenvolvimento foi conduzido no ambiente Google Colab, selecionado por oferecer uma infraestrutura baseada em nuvem acessível e propícia à reprodutibilidade dos experimentos

Para capturar a variabilidade estocástica do sistema, a MCS foi configurada para executar 1.000 iterações independentes para cada um dos cenários avaliados. As variáveis de entrada foram amostradas a partir de distribuições normais truncadas (para garantir valores no intervalo $[0,1]$), cujos parâmetros de média e desvio padrão foram derivados diretamente da agregação dos julgamentos dos especialistas na fase Delphi. O volume de iterações foi definido para assegurar a convergência da média do RPPSD, garantindo um erro padrão da média desprezível e um intervalo de confiança de 95% para as estimativas de saída.

A validação do modelo envolveu análise de sensibilidade e verificação de axiomas teóricos e princípios das BN, assegurando a consistência lógica e estatística do sistema. Para avaliar a sensibilidade do modelo, foi analisada a variação do risco global em função de incrementos graduais na probabilidade de falha de componentes específicos. Essa análise permitiu verificar o comportamento esperado do sistema frente a perturbações controladas, conforme os princípios das BN. O código-fonte completo das simulações, incluindo a estrutura da BN e os scripts de MCS, está disponível publicamente em: <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/PEXCS>.

4.5. Aplicação em Cenários de Projetos IoT

Para demonstrar a aplicabilidade prática do modelo, foram simulados três cenários representativos de projetos IoT com níveis distintos de criticidade: monitoramento de sala climatizada, polissonografia em regime *home care* e controle de gotejamento de medicação. Cada cenário foi caracterizado quanto à probabilidade de falha e ao impacto associado aos seus componentes.

5. Análise e Discussão dos Resultados

Esta seção apresenta os resultados das inferências bayesianas e das simulações estocásticas realizadas, com foco na validação do modelo, na análise de sensibilidade e na comparação entre cenários. A discussão é organizada de modo a explicitar como a combinação de BN e MCS sustenta a hierarquização de riscos e o suporte quantitativo à decisão em projetos de IoT.

5.1. Validação do Comportamento do Risco Global

A validação do modelo considerou a consistência do comportamento do risco global frente a perturbações controladas nas probabilidades de falha de componentes selecionados. O objetivo foi verificar se a variação de uma probabilidade local produz alterações coerentes no risco global, conforme esperado pela estrutura causal da BN. A Figura 3 evidencia que o risco global cresce de forma monotônica à medida que a probabilidade de falha dos componentes analisados é incrementada.

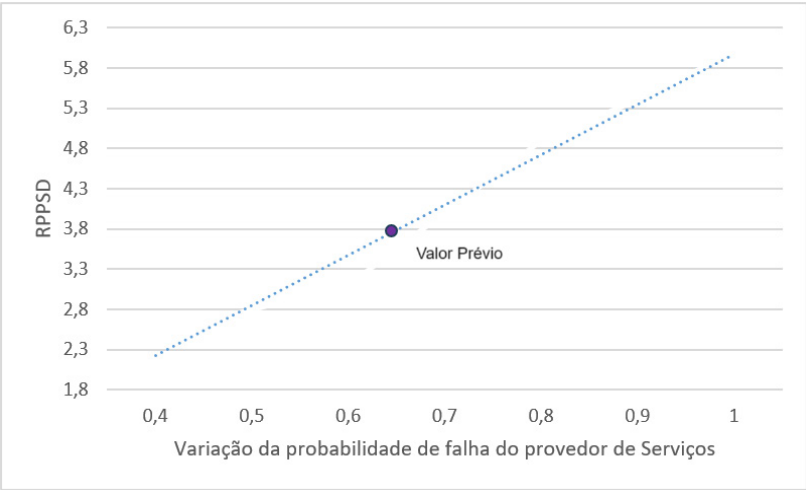


Figura 3 – Validação do Axioma 1 (Linearidade): Comportamento do RPPSD em resposta à variação linear da probabilidade de falha no nó Provedor de Serviços.

Esse comportamento é consistente com a propagação de probabilidades em BN e fornece um indício empírico de que o modelo preserva relações causais coerentes entre nós pais e nós filhos, evitando oscilações não justificadas do risco global.

5.2. Análise de sensibilidade e influência relativa dos componentes

A análise de sensibilidade quantificou o efeito de variações graduais nas probabilidades de falha sobre o risco global do sistema. Os resultados sintetizados na Tabela 2 mostram que o componente associado ao público-alvo e ao contexto de aplicação apresenta a maior variação relativa do risco global. Em seguida, destacam-se alterações relacionadas a recursos de sessão e a parâmetros físicos.

	Probabilidade (%)	Variação (%)
Prévia (Base)	0,80	0
Recurso (Rede)	0,83	1,3
Parâmetros (Física)	0,84	3,4

	Probabilidade (%)	Variação (%)
Recursos (Sessão)	0,84	5,2
Público-alvo (Apresentação/Aplicação)	0,85	6,8

Tabela 2 – Resultados da validação do Axioma 2 (Regra da Cadeia)

Esse resultado é relevante por duas razões. Primeiro, sugere que, mesmo em arquiteturas com componentes técnicos bem definidos, a variabilidade associada ao uso, à configuração e ao contexto humano pode dominar a dinâmica de risco. Segundo, indica que estratégias de mitigação estritamente tecnológicas podem ser insuficientes quando o componente social influencia de forma direta a probabilidade de falha global.

5.3. Comparação Entre Cenários e Hierarquização do Risco

A aplicação do modelo a três cenários com diferentes níveis de criticidade permitiu avaliar como probabilidades de falha e impacto se combinam para produzir o risco global. A Tabela 3, que caracteriza os cenários, sintetiza as estimativas de probabilidade de falha por componente, enquanto a Tabela 4 explicita a relevância do impacto relativo associado aos mesmos componentes em cada cenário.

Na BN, o nó final fornece a probabilidade de falha sistêmica $P_{falha_global} \in [0,1]$. O impacto do cenário é representado por um índice normalizado $I_{impacto} \in [0,1]$. O risco global é definido como $RPPSD = P_{falha_global} \times I_{impacto}$, portanto $RPPSD \in [0,1]$. Para fins de comunicação gerencial e hierarquização, reportamos $RPPSD_{10} = 10 \times RPPSD$, em escala 0–10. Foi aplicado um fator de calibração α no modelo para evitar saturação probabilística decorrente da combinação de múltiplos fatores com probabilidades moderadas.

Sistema	Classificação	Risco Calculado
Cenário 3 (Medicação)	1º (Mais Crítico)	8,91
Cenário 2 (Home Care)	2º	7,89
Cenário 1 (Climatização)	3º	3,16

Tabela 3 – Ranqueamento de riscos dos cenários simulados

Componente	Variável	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Dispositivo Sensor	Quantidade	Pouco relevante	Muito relevante	Muito relevante
	Parâmetro	Pouco relevante	Médio	Muito relevante
	Tipo	Médio	Muito relevante	Muito relevante
Gateway	Tipo	Muito relevante	Muito relevante	Muito relevante
Algoritmo	Quantidade	Pouco relevante	Médio	Médio
	Objetivo	Médio	Muito relevante	Muito relevante
Protocolo	Configuração	Pouco relevante	Muito relevante	Muito relevante

Componente	Variável	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Provedor	Recursos	Pouco relevante	Muito relevante	Muito relevante
Social	Ético	Muito relevante	Pouco relevante	Muito relevante
Aplicação	Formato	Médio	Médio	Muito relevante
	Público-alvo	Médio	Muito relevante	Muito relevante

Tabela 4 – Matriz de relevância dos componentes e variáveis por cenário

A comparação conjunta dessas duas dimensões evidencia que o risco global não depende apenas de probabilidades elevadas de falha, mas da interação entre probabilidade e impacto no contexto de aplicação. Em cenários com maior criticidade, componentes associados a provedores, gateways e ao fator social tendem a exercer maior pressão sobre o risco global, seja por concentrarem dependências causais, seja por ampliarem o impacto de falhas em cadeia.

5.4. Interpretação Gerencial e Implicações para Mitigação

Do ponto de vista de gestão de projetos, os resultados sugerem que a priorização de ações de mitigação deve considerar dois eixos. O primeiro eixo é técnico, envolvendo redundância, monitoramento, endurecimento de configuração e escolha de protocolos. O segundo eixo é sociotécnico, envolvendo treinamento, governança de privacidade, definição de responsabilidades operacionais e mecanismos de controle para reduzir falhas por uso indevido, negligência ou inadequação de processo. Por exemplo, para o Cenário 3 (Medicação, RPPSD = 8,91), a Tabela 4 indica que o componente “Provedor” é muito relevante. Uma estratégia de mitigação seria investir em redundância de provedor, estimando seu custo-benefício em relação à redução esperada de RPPSD.

Nesse sentido, o modelo proposto contribui ao oferecer uma forma quantitativa de identificar quais componentes têm maior capacidade de alterar o risco global sob incerteza. Esse tipo de evidência favorece a alocação racional de recursos e a justificativa de decisões perante *stakeholders*, sobretudo em ambientes nos quais o custo de falhas é elevado.

Em síntese, os resultados indicam que o modelo integrado permite. (i) validar comportamento esperado do risco global sob perturbações controladas. (ii) identificar componentes com maior influência relativa na variação do risco. (iii) comparar cenários e sustentar hierarquização baseada na interação entre probabilidade e impacto. (iv) reforçar empiricamente que o fator social, quando modelado como variável endógena, pode alterar de forma material o risco global em projetos de IoT.

6. Conclusão

Este estudo apresentou uma abordagem quantitativa integrada para a gestão de riscos em projetos de Internet das Coisas (IoT), combinando Redes Bayesianas (BN) e Simulação de Monte Carlo (MCS) em um único arcabouço analítico. Ao tratar o projeto de IoT como um sistema sociotécnico complexo, o modelo proposto incorporou

explicitamente variáveis técnicas, organizacionais e humanas, superando limitações recorrentes de métodos tradicionais baseados exclusivamente em avaliações qualitativas ou tecnocêntricas.

Os resultados obtidos demonstraram que a integração entre inferência causal e simulação estocástica permite não apenas estimar o risco global dos projetos, mas também compreender como variações localizadas em componentes específicos se propagam ao longo do sistema. A análise de sensibilidade evidenciou que fatores associados ao contexto de uso e ao público-alvo podem exercer influência significativa sobre o risco global, reforçando a relevância do fator humano como elemento estruturante na gestão de riscos em IoT.

A aplicação do modelo a diferentes cenários mostrou-se eficaz para a hierarquização de projetos segundo seu nível de criticidade, oferecendo subsídios quantitativos para a priorização de ações de mitigação e a alocação racional de recursos. Esses resultados indicam que a abordagem proposta pode apoiar decisões gerenciais mais informadas, especialmente em ambientes nos quais falhas podem gerar impactos operacionais, financeiros ou sociais elevados.

Do ponto de vista científico, a principal contribuição do trabalho reside na proposição de um modelo integrado que articula formalmente aspectos probabilísticos, causais e estocásticos, ampliando a compreensão sobre a dinâmica de riscos em sistemas IoT. Sob a perspectiva prática, o estudo fornece um instrumento analítico capaz de auxiliar gestores e engenheiros na identificação de componentes críticos e na definição de estratégias de mitigação mais eficazes.

Como limitações, destaca-se que a validação do modelo foi realizada por meio de simulações e cenários representativos, não contemplando ainda a aplicação em projetos reais em operação. Além disso, as probabilidades *a priori* foram estimadas com base em julgamento especializado, o que, embora metodologicamente controlado, pode introduzir vieses residuais. Estudos futuros podem explorar a aplicação do modelo em ambientes reais, a ampliação do painel de especialistas e a integração de dados históricos para o refinamento das distribuições probabilísticas. Adicionalmente, investigações que comparem sistematicamente a abordagem probabilística aqui proposta com métodos qualitativos tradicionais, como análise FMEA, árvores de falha e matrizes de risco, poderão evidenciar as condições sob as quais cada abordagem oferece maior suporte à decisão em projetos de IoT.

Em síntese, o trabalho contribui para o avanço da gestão de riscos em projetos de IoT ao oferecer uma abordagem quantitativa, integrada e sensível à dimensão sociotécnica desses sistemas, abrindo caminho para pesquisas futuras e aplicações práticas em contextos de crescente complexidade e incerteza.

Referências

- Adewole, K., Jacobsson, A., & Davidsson, P. (2025). RAM-IoT: Risk Assessment Model for IoT-Based Critical Assets: *Proceedings of the 10th International Conference on Internet of Things, Big Data and Security*, (pp. 191–198). <https://doi.org/10.5220/0013200800003944>

- Alwarafy, A., Al-Thelaya, K., Abdallah, M., Schneider, J., & Hamdi, M. (2021). A survey on security and privacy issues in edge-computing-assisted Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(6), 4004–4022. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3015432>
- Arias, J. A. C., Novaes, A. G. N., & Junior, O. F. L. (2019). A utilização da inferência bayesiana na previsão de atrasos em esquemas Milk-Run na era da Indústria 4.0. In Anais do 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET (pp. 1–12). ANPET. https://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019/Log%C3%ADstica/Modelagem%20em%20Log%C3%ADstica/1_298_AC.pdf
- Babatunde, G. O., Mustapha, S. D., Ike, C. C., & Alabi, A. A. (2024). Enhancing cyber risk decision-making with a quantified risk management model for U.S. and Canadian organizations. *GSC Advanced Research and Reviews*, 21(1), 481–502. <https://doi.org/10.30574/gscarr.2024.21.1.0400>
- Baranowski, J. (2022). Predicting IoT failures with Bayesian workflow. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 24(2), 248–259. <https://doi.org/10.17531/ein.2022.2.6>
- Campanile, L., Iacono, M., Marulli, F., Mastroianni, M., & Mazzocca, N. (2020). Toward a fuzzy-based approach for computational load offloading of IoT devices. *Journal of Universal Computer Science*, 26(11), 1455–1474. <https://doi.org/10.3897/jucs.2020.077>
- Chen, Q., Chen, L., Wang, H., Wu, L., Li, Y., Zhao, X., & Chen, M. (2016). Instruction-vulnerability-factor-based reliability analysis model for program memory. *Journal of Electronic Testing*, 32, 695–703. <https://doi.org/10.1007/s10836-016-5624-y>
- Deng, R., Zhuang, P., & Liang, H. (2017). CCPA: Coordinated cyber-physical attacks and countermeasures in smart grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(5), 2420–2430. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2702125>
- El-Gendy, S., Elsayed, M. S., Jurcut, A., & Azer, M. A. (2023). Privacy preservation using machine learning in the Internet of Things. *Mathematics*, 11(16), Article 3477. <https://doi.org/10.3390/math11163477>
- Forza, C. (2002). Survey research in operations management: a process-based perspective. *International Journal of Operations & Production Management*, 22(2), 152–194. <https://doi.org/10.1108/01443570210414310>
- Frustaci, M., et al. (2018). Evaluating critical security issues of the IoT world: Present and future challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(4), 2483–2495. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2767291>
- Ghosh, A., Khalid, O., Rais, R. N., Rehman, A., Malik, S. U., & Khan, I. A. (2019). Data offloading in IoT environments: modeling, analysis, and verification. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019(1), 53. <https://doi.org/10.1186/s13638-019-1358-8>

- Kinjo, E. M., Librantz, A. F. H., Souza, E. M., & Santos, F. C. R. (2022). Modelagem bayesiana aplicada para cálculo da probabilidade de falha em sistemas de saúde IoT. *RISTI – Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, (47), 87–108. <https://doi.org/10.17013/risti.47.87-108>
- Krejčí, J., & Stoklasa, J. (2018). Aggregation in the analytic hierarchy process: Why weighted geometric mean should be used instead of weighted arithmetic mean. *Expert Systems with Applications*, 114, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.06.060>
- Lee, S.-W. (2011). Probabilistic risk assessment for security requirements: A preliminary study. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Secure Software Integration and Reliability Improvement (SSIRI)* (pp. 11–20). <https://doi.org/10.1109/SSIRI.2011.12>
- Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. D. F. R., & Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0—A systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*, 55(12), 3609–3629. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>
- Librantz, A. F. H., Costa, I., Spinola, M. D. M., De Oliveira Neto, G. C., & Zerbinatti, L. (2021). Risk assessment in software supply chains using the Bayesian method. *International Journal of Production Research*, 59(22), 6758–6775. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1825860>
- Lomotey, R. K., Pry, J., & Sriramoju, S. (2017). Wearable IoT data stream traceability in a distributed health information system. *Pervasive and Mobile Computing*, 40, 692–707. <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2017.06.020>
- Namazian, A., Yakhchali, S. H., Yousefi, V., & Tamošaitienė, J. (2019). Combining Monte Carlo simulation and Bayesian networks methods for assessing completion time of projects under risk. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(24), 5024. <https://doi.org/10.3390/ijerph16245024>
- National Institute of Standards and Technology. (2012). *Guide for conducting risk assessments* (NIST Special Publication 800-30 Rev. 1). <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-30r1>
- Nžetić, S., Šolić, P., López-de-Ipiña González-de-Artaza, D., & Patrono, L. (2020). Internet of Things (IoT): Opportunities, issues and challenges towards a smart and sustainable future. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122877. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122877>
- Ntafloukas, K., McCrum, D. P., & Pasquale, L. (2022). A cyber-physical risk assessment approach for Internet of Things enabled transportation infrastructure. *Applied Sciences*, 12(18), 9241. <https://doi.org/10.3390/app12189241>
- Okoli, C., & Pawlowski, S. D. (2004). The Delphi method as a research tool: An example, design considerations and applications. *Information & Management*, 42(1), 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.im.2003.11.002>

- Olivero, M. A., et al. (2024). A systematic mapping study on security for systems of systems. *International Journal of Information Security*, 23(2), 787–817. <https://doi.org/10.1007/s10207-023-00757-0>
- Pacheco, J., Benitez Baltazar, V. H., Félix-Herrán, L. C., & Satam, P. (2020). Artificial neural networks-based intrusion detection system for Internet of Things fog nodes. *IEEE Access*, 8, 73907–73918. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988055>
- Radanliev, P. (2020). Dynamic real-time risk analytics of uncontrollable states in complex Internet of Things systems: Cyber risk at the edge. *Environment Systems and Decisions*, 41(2), 236–247. <https://doi.org/10.1007/s10669-020-09792-x>
- Radanliev, P. (2024). AI security and cyber risk in IoT systems. *Frontiers in Big Data*, 7, 1402745. <https://doi.org/10.3389/fdata.2024.1402745>
- Salih, K. (2022). A comprehensive survey on the Internet of Things with the industrial marketplace. *Sensors*, 22(3), 730. <https://doi.org/10.3390/s22030730>
- Sharma, A., & Bhushan, K. (2026). A comprehensive survey on IoT security: Challenges, security issues, and countermeasures. *Computer Science Review*, 59, 100839. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2025.100839>
- Silva-Atencio, G. (2025). Privacy risks in household IoT adoption: A quantitative study of data exposure in Costa Rica. *Archives of Advanced Engineering Science*, 1–15. <https://doi.org/10.47852/bonviewAAES52025635>
- Tran-Dang, H., Krommenacker, N., Charpentier, P., & Kim, D.-S. (2020). Toward the Internet of Things for physical Internet: Perspectives and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(6), 4711–4736. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2971736>
- Valdivia, E. J. S., & Miranda, J. M. (2020). Proposal of a intelligent agent for management and mitigation in cibersecurity risk for IoT environments. In *2020 9th International Conference on Software Process Improvement (CIMPS)* (pp. 148–154). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CIMPS52057.2020.9390114>
- Verizon. (2023). *2023 Data Breach Investigations Report*. Verizon Business. Recuperado de <https://www.verizon.com/business/resources/reports/2023-data-breach-investigations-report-dbir.pdf>
- Zaeem, R. N., & Barber, K. S. (2020). The effect of the GDPR on privacy policies: Recent progress and future promise. *ACM Transactions on Management Information Systems (TMIS)*, 12(1), 1–20. <https://doi.org/10.1145/3389685>
- Zagorecki, A., & Druzdzal, M. J. (2013). Knowledge engineering for Bayesian networks: How common are noisy-MAX distributions in practice? *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 43(1), 186–195. <https://doi.org/10.1109/TSMCA.2012.2189880>

Critérios Editoriais

A RISTI (Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação) é um periódico científico, que foca a investigação e a aplicação prática inovadora no domínio dos sistemas e tecnologias de informação.

O Conselho Editorial da RISTI incentiva potenciais autores a submeterem artigos originais e inovadores para avaliação pelo Conselho Científico.

A submissão de artigos para publicação na RISTI deve realizar-se de acordo com as chamadas de artigos e as instruções e normas disponibilizadas no sítio Web da revista (<http://www.risti.xyz/>).

Todos os artigos submetidos são avaliados por um conjunto de membros do Conselho Científico, não inferior a três elementos.

Em cada número da revista são publicados entre cinco a oito dos melhores artigos submetidos.

Criterios Editoriales

La RISTI (Revista Ibérica de Sistemas y Tecnologías de la Información) es un periódico científico, centrado en la investigación y en la aplicación práctica innovadora en el dominio de los sistemas y tecnologías de la información.

El Consejo Editorial de la RISTI incentiva autores potenciales a enviar sus artículos originales e innovadores para evaluación por el Consejo Científico.

El envío de artículos para publicación en la RISTI debe hacerse de conformidad con las llamadas de los artículos y las instrucciones y normas establecidas en el sitio Web de la revista (<http://www.risti.xyz/>).

Todos los trabajos enviados son evaluados por un número de miembros del Consejo Científico de no menos de tres elementos.

En cada número de la revista se publican cinco a ocho de los mejores artículos enviados.



Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação
Revista Ibérica de Sistemas y Tecnologías de Información

©ITMA 2026 <http://www.risti.xyz>

