

# Avaliação de modelos para sensores virtuais em sistemas IoT tolerantes a falhas

Wagner Loch, Júlio C. B. Mattos, Rafael I. Soares

Programa de Pós-Graduação em Computação

Centro de Desenvolvimento Tecnológico

Universidade Federal de Pelotas (UFPEL)

Pelotas, Brasil

{wloch, julius, rafael.soares}@inf.ufpel.edu.br

**Resumo**—Com a crescente evolução das tecnologias de informação surgem soluções mais eficientes e integradas tal como os sensores virtuais para dispositivos IoT. O sensor virtual é uma técnica que permite estimar dados de sensores físicos em dispositivos IoT de acordo com um contexto da aplicação. Essa técnica permite a redução de custos, de complexidade, além de uma maior flexibilidade e adaptabilidade a diferentes cenários de uso. Adicionalmente, os sensores virtuais também podem garantir tolerância a falhas em sistemas IoT, onde tradicionalmente explora-se a redundância de hardware e software. Diante desse cenário, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo sobre modelos de sensores virtuais dedicados a tolerância a falhas em sistemas IoT a fim de minimizar erros causados por falhas no sistema. O trabalho investiga 3 diferentes modelos de sensores virtuais, além de comparar com um modelo da literatura a fim de identificar e corrigir falhas. Os resultados obtidos mostram que os erros introduzidos pelos diferentes modelos de sensores virtuais investigados indicam que o uso de média móvel é mais preciso que o uso de replicação de sensores físicos em alguns cenários.

**Palavras-chave**—sensores virtuais, tolerância a falhas, IoT

## I. INTRODUÇÃO

A evolução da Internet permitiu o surgimento e a expansão vertiginosa da Internet das Coisas, onde objetos referenciados como dispositivos IoT interagem com o mundo físico produzindo dados e informações sobre seu contexto para serem processadas e armazenadas possivelmente em uma nuvem computacional. Com o aumento significativo do número de dispositivos conectados e o aumento da demanda por processamento em tempo real tem ascendido o interesse por computação de borda (em inglês, *Edge Computing*) e nuvem (em inglês, *Cloud Computing*) [1], [2], [3]. A eficiência de aplicações IoT pressupõe ambientes de execução confiáveis, onde atributos como disponibilidade e confiabilidade são alta prioridade quando relacionadas a qualidade de serviço em soluções IoT. Portanto, para garantir tais atributos durante a etapa de projeto de sistemas IoT é necessário pensar em estratégias a fim de tornar o sistema tolerante a falhas.

O projeto de sistemas IoT normalmente envolve vários níveis de abstração, desde o nível mais baixo de abstração envolvendo soluções para aquisição de sinais de sensores, controle de atuadores e infraestrutura de comunicação de objetos até os níveis mais altos de abstração onde o processamento da aplicação pode ocorrer em um servidor de

borda, em um nevoeiro (em inglês, *Fog Computing*) ou mesmo na nuvem computacional. Neste contexto, existe um grande espaço de projeto a ser explorado pelos projetistas, principalmente quando qualidade de serviço e tolerância a falhas são importantes para a aplicação tais como assistência médica [4].

Aplicações IoT tolerantes a falhas demandam um fluxo contínuo de dados produzidos a partir de sensores físicos, que geram um sinal elétrico por meio de perturbações provocadas pelo ambiente, sejam elas temperatura, umidade do ar, luminosidade entre outras. Para isso é importante garantir que amostras sejam produzidas independentemente se falhas acontecerem no sistema, de modo a garantir confiabilidade de informações. A redundância de sensores físicos idênticos pode ser usada para garantir a informação desejada, porém esta abordagem torna-se custosa pela replicação de hardware no sistema. Dessa forma, uma alternativa é o uso de sensores virtuais, os quais criam uma camada de abstração aos sensores físicos por meio de software a fim de melhorar a precisão dos sensores físicos e até mesmo criar sensores físicos durante um período de inoperabilidade [5] [6]. Os sensores virtuais permitem reduzir custos, complexidade e permitir uma maior flexibilidade e adaptabilidade em diferentes cenários de uso. Além disso, a utilização de sensores virtuais também pode contribuir para a tolerância a falhas em dispositivos IoT.

O objetivo deste trabalho é avaliar o uso de diferentes modelos de sensores virtuais para criar um sistema tolerante a falhas com baixo custo computacional para aplicações IoT. Para validação dos modelos de sensores investigados é proposto um sistema para monitoramento da qualidade do ar em ambientes acadêmicos a fim de identificar possíveis riscos à saúde em tempos de COVID-19.

O texto está organizado da seguinte maneira: Na Seção II é apresentada uma breve fundamentação teórica a respeito de sensores virtuais e métodos de tolerância a falhas. Na Seção III são apresentados alguns dos trabalhos relacionados. Já na Seção IV são apresentados os modelos utilizados para avaliação neste trabalho. A Seção IV-D apresenta um modelo que utiliza replicação de sensores como método de tolerância. Já na Seção V são apresentados os resultados e comparações entre os métodos. Por fim, a Seção VI apresenta as considerações finais e a conclusão do trabalho.

## II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### A. Sensor Virtual

Sensores virtuais são softwares que imitam funcionalidades de dispositivos físicos [7]. Podem ser usados para coletar dados de várias fontes e processá-los de forma a reproduzir o comportamento de um sensor físico. Também podem ser utilizados em vários cenários, como por exemplo, um sensor virtual de temperatura pode coletar dados de vários sensores físicos de temperatura e, em seguida, usar uma equação matemática para calcular a temperatura média de uma área específica. Portanto, um sensor virtual nada mais é do que uma abordagem que permite que os sensores sejam representados de uma forma digital, sem necessariamente possuir o dispositivo físico. Um sensor virtual pode ser visto como uma forma de simular o comportamento de um sensor físico através de modelos matemáticos, algoritmos e ou dados históricos. Então, o objetivo principal do uso de sensores virtuais é fornecer informações precisas e confiáveis sem necessariamente possuir o equipamento físico.

### B. Tolerância a Falhas

O objetivo principal de um sistema tolerante a falhas é garantir que o mesmo possa continuar operando mesmo quando falhas ocorrerem no sistema. Neste contexto, a principal estratégia usada é construir redundância no sistema ou mesmo redundância em elementos distribuídos de tal forma que, quando ocorrer uma falha em parte do sistema, a parte redundante possa assumir seu trabalho, permitindo que o sistema como um todo continue funcionando sem interrupções significativas [8]. Este conceito é amplamente utilizado em aplicações críticas, como sistemas de navegação aérea e sistemas financeiros, onde a disponibilidade e a confiabilidade são essenciais.

Os principais desafios encontrados na literatura para sistemas tolerantes a falhas são:

- Métodos para detecção de falhas em hardware e software;
- Métodos de paralelismo para evitar o comprometimento dos resultados no caso de falhas de hardware;
- Desenvolver dispositivos embarcados que tenham confiabilidade e segurança bem como reduzido consumo de potência;
- Conciliar alta disponibilidade e confiabilidade com alto desempenho.

Existem muitas técnicas diferentes de tolerância a falhas que podem ser usadas, dependendo da natureza do sistema ou processo e dos tipos de falhas esperados. Algumas técnicas comuns de tolerância a falhas incluem:

- Redundância: esta técnica envolve o uso de várias cópias ou componentes de backup, que podem ser usados para assumir o controle se um componente primário falhar. Por exemplo, um servidor com fontes de alimentação redundantes ou discos rígidos pode continuar operando mesmo se um dos componentes falhar.
- Detecção e correção de erros: Esta técnica envolve o uso de algoritmos ou hardware para detectar e corrigir

erros que ocorrem durante a operação de um sistema ou processo. Por exemplo, um sistema de computador pode usar um código de correção de erros para detectar e corrigir erros na transmissão de dados.

- Isolamento de falhas: Esta técnica envolve o uso de estratégias para evitar a propagação de falhas ou erros dentro de um sistema. Por exemplo, um sistema de software pode usar mecanismos de isolamento para evitar que uma falha em uma parte do sistema afete outras partes do sistema.
- Mecanismos de recuperação: Esta técnica envolve o uso de estratégias para restaurar um sistema ou processo à operação normal após a ocorrência de uma falha ou erro. Por exemplo, um sistema de banco de dados pode usar pontos de verificação e recuperação baseada em *logs* para restaurar o banco de dados a um estado consistente após uma falha.

No geral, as técnicas tolerantes a falhas são um aspecto importante para garantir a confiabilidade e a disponibilidade de sistemas e processos e são usadas em uma ampla variedade de setores, incluindo computação, telecomunicações e transporte. Estas técnicas devem garantir que o sistema continue operando mesmo na presença de anomalias. A maioria destas técnicas apostam na redundância de componentes e na utilização de algoritmos dedicados.

## III. TRABALHOS RELACIONADOS

Na literatura são encontrados trabalhos propondo diferentes abordagens para conceber sistemas IoT tolerantes a falhas usando para isso sensores virtuais, e assim reforçar a confiabilidade de sistemas.

Cristaldi [6], Peniak [9] e Zhou [10] são alguns desses trabalhos que propõem abordagens diferenciadas, como a utilização de técnicas de modelagem e simulação para identificar e corrigir falhas em tempo real. Outros exploram o uso de algoritmos avançados de detecção e diagnóstico de falhas, visando melhorar a precisão e a eficiência dos sistemas [11], [12]. Além disso, são encontrados estudos que investigam a aplicação de sensores virtuais em diferentes domínios, como automação industrial, monitoramento de ambientes e saúde [13], [14], [15]. Esses trabalhos contribuem significativamente para o avanço da área e fornecem ideias importantes para o desenvolvimento de sistemas tolerantes a falhas baseados em sensores virtuais.

No trabalho de Cristaldi [6], os autores propõem um modelo de sensor virtual obtido a partir de diferentes tipos de sensores físicos de modo a oferecer um serviço de monitoramento tolerante a falhas. O modelo proposto de sensor está baseado em dois sensores de temperatura situados em pontos diferentes no ambiente, um sensor de tensão elétrica e outro de corrente elétrica a fim de medir dissipação de potência. Os autores usam regressão não-linear para identificar falhas nos dados capturados pelos sensores. O estudo de caso é realizado em um inversor dedicado a geração de energia elétrica a partir de energia solar, monitorando temperatura no fluxo de ar de

entrada, de saída, tensão elétrica e dissipação de potência do dispositivo.

Já em Peniak [9] os autores propõem a criação de um modelo para sensores virtuais redundantes de modo que um serviço virtual a nível de computação em nuvem seja disponibilizado. Este serviço usa o conceito de gêmeos digitais, de modo a disponibilizar serviço em nuvem a partir de grupos de sensores físicos que compõem sensores virtuais redundantes e assim garantir serviços tolerantes a falhas. Os sensores virtuais disponibilizam dados a partir de dois modelos que dependem do grau de confiabilidade necessário: um modelo que usa 2 sensores físicos e outro com 3 sensores físicos. A integração dos sensores físicos com o sensor virtual ocorre via protocolos de rede IoT, como por exemplo MQTT.

No trabalho de Zhou [10], os autores propõem um esquema para adaptar a tolerância a falhas em sistemas IoT por meio de uma arquitetura orientada a serviços utilizando sensores virtuais. O esquema proposto explora a característica dos sistemas IoT possuírem vários sensores físicos com propósitos diversos, dependendo da aplicação, o que naturalmente proporciona redundância de informações desejadas para soluções tolerantes a falhas. Dessa forma, os autores apresentam serviços virtuais que utilizam dados de mais de um sensor físico, permitindo a substituição de um serviço real, ou seja, produzido por um conjunto pré-definido de elementos sensores físicos, caso ocorra falha em algum deles. Utilizam regressão linear para identificar e gerar os serviços virtuais a partir dos sensores físicos disponíveis. Dependendo do tipo de correlação existente entre os dados dos sensores utilizados para gerar o serviço, empregam-se mínimos quadrados recursivos (*recursive least squares* - RLS) ou regressão adaptativa multivariada (*multivariate adaptive regression splines* - MARS) para a geração de sensores virtuais. A correlação entre os sensores é avaliada a partir do histórico de medições obtidas por meio de um protótipo.

#### IV. MODELOS DE SENSOR VIRTUAL

Os modelos de sensor virtual aqui apresentados possuem flexibilidade para ser aplicados a diferentes tipos de sensores devido a sua baixa complexidade computacional. As soluções apresentadas são capazes de detectar e corrigir falhas nas leituras dos sensores de modo a garantir que os dados continuem sendo coletados e analisados mesmo se alguma anomalia ocorrer. Uma visão abstrata do sensor virtual proposto é apresentado na Figura 1, onde percebe-se que independentemente da origem, é possível realizar o mapeamento para um sensor virtual.

Neste trabalho são apresentadas 3 estratégias diferentes para o tratamento de falhas, sendo elas:

- Histórico de amostras;
- Regressão não-linear;
- Janela Flutuante.

Na Seção IV-D será apresentado um método comparativo que faz uso de replicação de sensores.

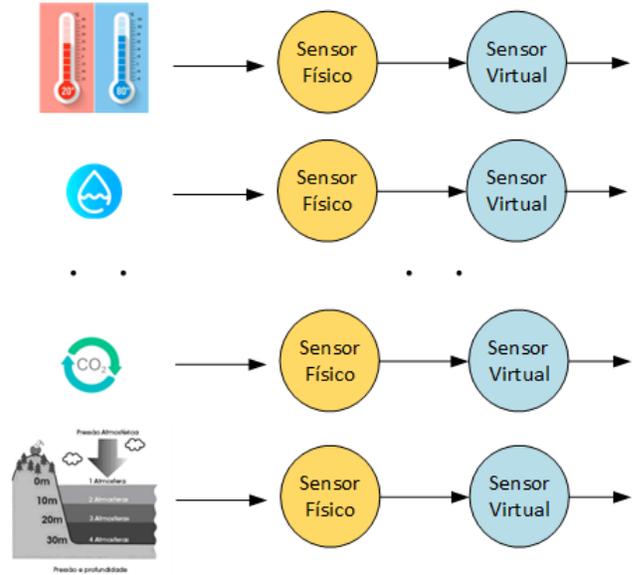


Fig. 1. Exemplo de obtenção de sensores virtuais a partir de diferentes sensores físicos.

##### A. Histórico de amostras

Este modelo utiliza as amostras dos últimos dias para realizar as previsões, ou seja, considera um histórico recente de dados para corrigir uma possível amostra com falha. Este é um modelo que leva em consideração as variações diárias que podem ocorrer em diferentes períodos. É importante destacar que, devido ao uso de um histórico de dias, variações climáticas ao longo do período são levadas em conta e minimizadas, como por exemplo diferenças de temperaturas de diferentes estações do ano. Em caso de detecção de uma falha, o valor detectado é substituído pela média das amostras registradas no mesmo instante de tempo nos últimos dias.

##### B. Regressão não-linear

Este modelo utiliza uma equação matemática não-linear, como por exemplo, um polinômio de grau 2, usada para estimar o comportamento das variáveis observadas. Para estimar a equação é preciso definir o conjunto de amostras a serem modeladas, que podem ser resultado de uma média histórica da variável medida, a média das curvas de máximo e mínimo dentro de um período de medição e também as amostras obtidas no último dia de medição. A Equação 1 é usada para definir o modelo sobre os dados analisados, onde  $x$  é uma amostra obtida ao longo do tempo e os coeficientes  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\alpha$  devem ser ajustados para reproduzir o comportamento dos dados em análise. O ajuste de coeficientes é realizado por aproximações sucessiva seguindo a somatório de erros entre amostras estimados pela Equação 1 e as amostras medidas  $STQ = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$ , onde  $STQ$  é a soma total dos quadrados, que representa o erro total gerado pela equação. Por aproximações sucessivas este erro deve ser minimizado, onde  $STQ = 0$  demonstra que a equação representa fielmente

o conjunto de dados modelados [16]. Este ajuste pode ser calculado de maneira automatizada por diferentes ferramentas como Matlab e Excel, por exemplo.

$$Y(x) = \beta_2 x^2 + \beta_1 x + \alpha \quad (1)$$

### C. Janela flutuante

O método de janela flutuante é uma técnica de identificação de falhas baseado em uma janela de tempo ou de valores ao redor de um respectivo dado. A técnica consiste em calcular uma média ou mediana dos valores dentro da janela e usar esse valor como uma estimativa de comparação para o dado. A janela pode ser definida com base no número de amostras coletadas imediatamente anteriores ao dado com falha, ou pode ser ajustada dinamicamente com base no período de amostragem dos dados. Por exemplo, se definirmos que determinado sensor utilizará uma janela com 10 amostras, o cálculo da média móvel deve considerar as 10 últimas amostras obtidas para corrigir a falha. Este método é geralmente mais preciso do que a técnica de média simples ou média retroativa [18], especialmente em dados com alta variabilidade.

O método da Janela Flutuante também pode ser utilizado como detector de erros numa determinada série de valores. A Equação 2 apresenta como é realizada a estimativa de erro com base em uma faixa de valores lidos anteriormente. Na Equação 2,  $\epsilon$  é o valor de erro da leitura atual que pretendemos descobrir,  $x$  é a leitura atual obtida através do sensor físico e  $m$  é o tamanho da janela que estamos usando como base de cálculo. Já a variável  $i$  representa a posição atual que a leitura se encontra no vetor representado por  $X$ . Com o valor calculado de erro, verificamos se a leitura atual está dentro de um padrão pré-estabelecido conforme a Tabela I [17]. Para não comprometer leituras futuras, podemos atribuir pesos para cada nível de acurácia no cálculo da nova média, ou seja, leituras com alta acurácia possuem grandes probabilidades de estarem corretas, já mudanças abruptas de valores que ocasionam baixas acurácias podem indicar níveis anormais e podem comprometer as análises. Nestes cenários podemos indicar pesos menores.

$$\epsilon = \left| \frac{x \times 100 \times m}{\sum_{i-m}^{i-1} X[i]} - 100 \right| \quad (2)$$

TABELA I  
ESTIMATIVAS DE ACURÁCIA E IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS COM BASE NO ERRO.

Nível de Acurácia	Erro (%)
Alta acurácia	$\epsilon \leq 10$
Boa acurácia	$10 < \epsilon \leq 20$
Baixa acurácia	$20 < \epsilon \leq 35$
Em Falha	$\epsilon \geq 35$

Para aplicar o método de janela flutuante, é necessário definir o tamanho da janela que será utilizada para calcular a média dos valores. Em seguida, a janela é deslizada sobre a série, e a média dos valores dentro da janela é calculada. Se

um valor fora da faixa esperada é encontrado, ele é corrigido utilizando a média dos valores dentro da janela. É importante ressaltar que a escolha do tamanho da janela pode afetar a eficácia da correção. Uma janela muito pequena pode não ser capaz de capturar as variações temporais dos valores, enquanto uma janela muito grande pode suavizar demais as variações e perder informações importantes.

O método de janela flutuante é útil em situações em que os valores da série apresentam variações temporais significativas, mas ainda seguem um padrão geral. Esta técnica pode ser aplicado em diversos campos, como na correção de dados meteorológicos ou financeiros por exemplo.

Apesar de ser um método simples, este método apresenta uma série de vantagens tais como a correção em tempo real, ou seja, os valores podem ser corrigidos assim que são coletados, sem a necessidade de armazenar uma grande quantidade de dados. O método também é altamente adaptável e pode ser aplicado em diferentes contextos, pois possui alta efetividade já que a correção utiliza os próprios dados gerados. Também é necessário destacar sua simplicidade de implementação e a economia de recursos computacionais gerados quando comparado com métodos mais complexos que demandam de grandes quantidades de dados para tratamentos.

### D. Método de Peniak

O Método proposto por Peniak [9] é uma técnica utilizada para corrigir possíveis falhas nos valores medidos por sensores. O método se baseia na replicação de sensores para obter uma medida mais precisa e confiável.

O processo faz uso de pelo menos três sensores para medir a mesma grandeza física. Em seguida, são coletados os valores obtidos por cada um desses sensores. Caso exista uma diferença significativa entre as medidas, ou seja, uma discrepância que possa indicar a falha de um dos sensores, o Método de Peniak busca identificar qual sensor está apresentando valores incorretos. Para isso, o método verifica a menor diferença entre os três sensores e para corrigir a falha utiliza a média dos valores obtidos. A Figura 2 apresenta de forma resumida como é a composição do sensor virtual.

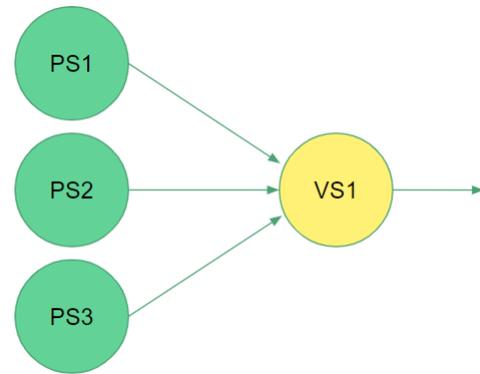


Fig. 2. Composição do sensor virtual no método de Peniak. Os dois sensores físicos com a menor diferença entre os três serão escolhidos para compor o sensor virtual cuja saída será a média simples destes dois.

## V. AVALIAÇÃO DOS MODELOS

### A. Sensores e dispositivos

Para coletar dados com o objetivo de testar e comparar os modelos foi construído um sistema com um microcontrolador **Arduino Nano** e dois sensores: **DHT11** para análise de temperatura e umidade e **MQ-135** para monitoramento de níveis de CO<sub>2</sub>. Além destes, foi instalado um leitor/gravador de cartão SD para armazenamento das leituras dos sensores e um LED para indicação de erros. A Figura 3 apresenta o conjunto com o sistema de sensores instalado na Universidade Federal de Pelotas (UFPel).

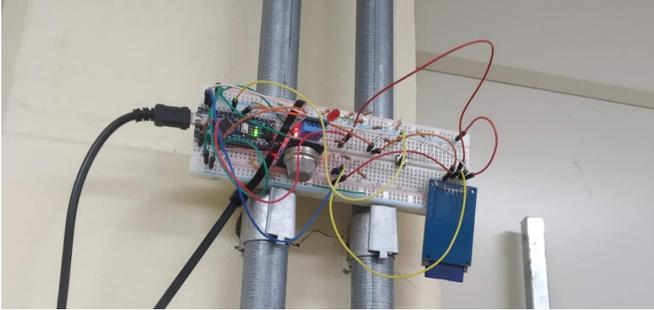


Fig. 3. Sistema de sensores instalado na Universidade Federal de Pelotas (UFPel).

Com estes sensores, temos a capacidade de mensurar a qualidade do ar no ambiente, considerando variáveis como temperatura, umidade e concentração de CO<sub>2</sub>. As análises dos dados aqui apresentados foram realizadas por meio da coleta de dados em diferentes horários do dia e em dias distintos da semana, a fim de verificar possíveis variações nos níveis de poluição do ar. Ao total foram 181.471 amostras no período de 09 de Junho de 2022 a 13 de Outubro de 2022, totalizando 126 dias contínuos de medições.

### B. Correlação entre as variáveis

A correlação entre variáveis é uma medida estatística que indica a relação entre duas ou mais variáveis. Quando duas variáveis estão correlacionadas, uma delas pode afetar o comportamento da outra, o que pode ser útil para entender o comportamento de um sistema complexo. A correlação pode ser positiva, quando as variáveis aumentam ou diminuem juntas, ou negativa, quando uma variável aumenta enquanto a outra diminui.

É importante lembrar que a correlação não implica causalidade, ou seja, apenas porque duas variáveis estão correlacionadas não significa necessariamente que uma cause efeito na outra.

Durante o período observado, foram escolhidos alguns dias aleatoriamente de modo a usar seus dados para análise segundo o método de Pearson [19] que avalia a correlação entre duas variáveis. Nestes dias o resultado do teste indicou que há pouca correlação entre CO<sub>2</sub> e os dados de temperatura e umidade. Quando analisamos a média geral dos dados o índice de correlação entre os dados aumenta significativamente. A Tabela II apresenta os índices de correlação encontrados.

TABELA II  
CORRELAÇÃO ENTRE CO<sub>2</sub>, TEMPERATURA E UMIDADE PELO MÉTODO DE PEARSON.

	12/07/2022	20/09/2022	Média Geral
CO <sub>2</sub> e Temperatura	-0.09719	-0.31611	0.615029
CO <sub>2</sub> e Umidade	0.091605	0.706015	-0.56477
Temperatura e Umidade	-0.80659	-0.80926	-0.98944

### C. Avaliação de falhas e erros dos modelos

Para testar o tratamento de falhas foram forçados erros nas leituras dos sensores, isto é, valores foram zerados para simular uma falha de sensor. A identificação da falha ocorre através do método proposto na Seção IV-C, que faz uso da janela flutuante. Ao identificar um valor anormal, os métodos de tratamento entram em ação.

Para realizar a avaliação de erros, utilizamos uma técnica para mensurar o desempenho dos modelos na tarefa de predição. O objetivo da avaliação de erros é estimar o quão bem o modelo está realizando suas predições em relação aos valores reais do conjunto de dados. Uma das métricas de avaliação mais comuns é o erro quadrático.

O erro quadrático é uma medida que calcula a média dos quadrados das diferenças entre os valores preditos pelo modelo e os valores reais do conjunto de dados. Essa medida é útil para avaliar a magnitude dos erros cometidos pelo modelo, pois ela aumenta proporcionalmente ao quadrado das diferenças entre o valor real e o valor predito.

A Equação 3 apresenta o cálculo do erro quadrático usado nas avaliações:

$$MSE = \frac{1}{N} \times \sum (y - \psi)^2 \quad (3)$$

onde MSE é o erro quadrático médio, N é o número de amostras no conjunto de dados, y é o valor real do conjunto de dados e  $\psi$  é o valor predito pelo modelo.

A Tabela III apresenta os valores encontrados com a aplicação dos modelos para cada sensor nos cenários de falhas. O fato do método de Peniak usar replicação de sensores físicos e isolar o elemento em falha leva a crer que este será o melhor método quando comparado com métodos que não possuem replicação. Entretanto, como podemos perceber pela Tabela III, o método da Média Móvel apresentou resultados significativamente positivos nos sensores de Temperatura e Umidade. O fato das leituras de CO<sub>2</sub> serem muito voláteis, isto é, há uma grande variação nos registros durante o dia, ora valores muito baixos e em seguida valores altos, torna a tarefa de correção complexa utilizando sensores puramente virtuais. Para este tipo de grandeza, demonstra-se que é recomendado a utilização de métodos que fazem uso de replicação, tais como Peniak. Grandezas como Temperatura e Umidade que não apresentam variações bruscas e são mais previsíveis, tornam possível a utilização de métodos puramente virtuais, tais como a Média Móvel, Regressão Não-Linear e o Vetor de Amostras, possibilitando a economia de recursos.

TABELA III  
COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS UTILIZANDO O CÁLCULO DO ERRO QUADRÁTICO NOS CENÁRIOS DE FALHAS.

Modelo	MSE Temp.	MSE Umid.	MSE CO2
Peniak	0.16487	0.161051	181.3371
Média Móvel	0.004033	0.039444	11931.67
Regressão Não-Linear	0.397797	2.463124	126757.42
Vetor de Amostras	0.197589	13.63248	93387.63

## VI. CONCLUSÃO

Este estudo apresentou diversas implementações de modelos de sensores virtuais, explorando seu potencial no contexto da tolerância a falhas e suas aplicações em um ambiente real. Os modelos foram minuciosamente avaliados em relação aos seus erros, sendo utilizado um conjunto de sensores em um ambiente real para monitorar a qualidade do ar e gerar dados, a fim de validar a eficácia dos modelos propostos.

Os resultados obtidos evidenciaram que sistemas que empregam sensores virtuais podem apresentar tolerância a falhas, representando uma ferramenta valiosa para garantir a confiabilidade de sistemas críticos. Essa abordagem reduz a probabilidade de falhas e aumenta a segurança e disponibilidade do sistema, características cruciais em diversas aplicações. No entanto, é fundamental ter em mente que os modelos utilizados possuem limitações, as quais devem ser cuidadosamente consideradas na implementação de sistemas de tolerância a falhas.

A utilização de sensores para monitorar a qualidade do ar foi adotada como uma estratégia para validar os modelos propostos, demonstrando que mesmo os modelos puramente virtuais foram capazes de detectar e corrigir falhas no sistema de monitoramento. Essa abordagem destaca a importância da combinação de diferentes tecnologias para aprimorar a confiabilidade e eficácia dos sistemas.

Durante o estudo, foi apresentado um método de identificação de falhas utilizando uma abordagem de Janela Flutuante. Esse método tem a capacidade de identificar valores anormais com base em dados anteriores e, utilizando um modelo apropriado, encontrar a melhor estimativa para um determinado momento. Essa implementação do modelo é simples e leve, podendo ser aplicada em uma ampla gama de sistemas e microcontroladores. Embora tenha sido aplicado em um único nó sensor, o método pode ser estendido para conjuntos de sistemas de sensores em diferentes ambientes, abrangendo desde contextos acadêmicos até residenciais e corporativos. Além de sua simplicidade e leveza, os modelos também são altamente adaptáveis e confiáveis, permitindo sua escalabilidade para operar com vários sensores em conjunto ou de forma independente.

Com base na análise dos erros após a execução dos tratamentos, conclui-se que os sensores virtuais propostos são viáveis para a criação de sistemas tolerantes a falhas, consolidando sua eficácia nesse contexto.

## REFERÊNCIAS

- [1] M. Mudassar, Y. Zhai, and L. Lejian, 'Adaptive Fault-Tolerant Strategy for Latency-Aware IoT Application Executing in Edge Computing Environment', *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 15, pp. 13250–13262, 2022.
- [2] A. U. Rehman, R. L. Aguiar, and J. P. Barraca, 'Fault-Tolerance in the Scope of Cloud Computing', *IEEE Access*, vol. 10, pp. 63422–63441, 2022.
- [3] B. K. Ray, A. Saha, S. Khatua, and S. Roy, 'Proactive Fault-Tolerance Technique to Enhance Reliability of Cloud Service in Cloud Federation Environment', *IEEE Transactions on Cloud Computing*, vol. 10, no. 2, pp. 957–971, 2022.
- [4] Lenka, Stitapragyan and Pradhan, Sateesh Kumar and Nanda, Arbind, 'QoS Enhancement of Hospital e-Healthcare Management using IoT', in *19th OITS International Conference on Information Technology (OCIT)*, 2021, pp. 460-465.
- [5] D. Martin, N. Kühn, and G. Satzger, 'Virtual Sensors', *Business & Information Systems Engineering*, vol. 63, no. 3, pp. 315–323, 2021.
- [6] L. Cristaldi, A. Ferrero, M. Macchi, A. Mehrafshan, and P. Arpaia, 'Virtual Sensors: a Tool to Improve Reliability', in *IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT*, 2020, pp. 142–145.
- [7] L. Liu, S. M. Kuo, and M. Zhou, 'Virtual sensing techniques and their applications', in *2009 International Conference on Networking, Sensing and Control*, 2009, pp. 31–36.
- [8] A. Avizienis, 'Infrastructure-based design of fault-tolerant systems', in *Proceedings of the IFIP International Workshop on Dependable Computing and its Applications*. DCIA, 1998, vol. 98, pp. 12–14.
- [9] P. Peniak, E. Bubeníková, and A. Kanáliková, 'The Redundant Virtual Sensors via Edge Computing', in *2021 International Conference on Applied Electronics (AE)*, 2021, pp. 1–5.
- [10] Zhou, S., Lin, K., Na, J., Chuang, C. & Shih, C. Supporting service adaptation in fault tolerant internet of things. *2015 IEEE 8th International Conference On Service-oriented Computing And Applications (SOCA)*. pp. 65-72 (2015)
- [11] Gaderer, G., Loschmidt, P., & Sauter, T. (2010). Improving fault tolerance in high-precision clock synchronization. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 6(2), 206-215.
- [12] Wunderlich, H. J., Braun, C., & Schöll, A. (2016, April). Fault tolerance of approximate compute algorithms. In *2016 IEEE 34th VLSI Test Symposium (VTS)* (pp. 1-1). IEEE.
- [13] Song, Y. Z., Bowen, C. R., Kim, A. H., Nassehi, A., Padget, J., & Gathercole, N. (2014). Virtual visual sensors and their application in structural health monitoring. *Structural Health Monitoring*, 13(3), 251-264.
- [14] Gupta, A., & Mukherjee, N. (2016, January). Implementation of virtual sensors for building a sensor-cloud environment. In *2016 8th international conference on communication systems and networks (COM-SNETS)* (pp. 1-8). IEEE.
- [15] Ahmed, Q., Bhatti, A. I., & Iqbal, M. (2011). Virtual sensors for automotive engine sensors fault diagnosis in second-order sliding modes. *IEEE Sensors Journal*, 11(9), 1832-1840.
- [16] N. M. B. Franco, *Cálculo Numérico*. Pearson, 2006.
- [17] Casado-Vara, R., Vale, Z., Prieto, J., & Corchado, J. M. (2018). Fault-tolerant temperature control algorithm for IoT networks in smart buildings. *Energies*, 11(12), 3430.
- [18] S. Hansun, 'A new approach of moving average method in time series analysis', in *2013 conference on new media studies (CoNMedia)*, 2013, pp. 1–4.
- [19] D. B. Figueiredo Filho and J. A. Silva Júnior, 'Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r)', *Revista Política Hoje*, vol. 18, no. 1, pp. 115–146, 2009.