

Uma Análise dos Efeitos de Falhas e Recuperação no Desempenho de Sensores LoRa

Luiz Nelson Lima¹, Arthur Sabino¹, Iure Fé¹
José Miqueias Pereira¹, Lucas Silva Lopes¹
Paulo Rego² e Francisco Airton Silva¹

¹Universidade Federal do Piauí (UFPI)

²Universidade Federal do Ceará (UFC)

{luiznelson, arthursabino, iure.fe}@ufpi.edu.br

{jmiqueias, lucaslopes092020, faps}@ufpi.edu.br

paulo@dc.ufc.br

Resumo. *Implantações com sensores LoRa (Long Range) e LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) são comuns em monitoramento e telemetria, com múltiplos dispositivos gerando pacotes de forma contínua ou periódica. Nesses cenários, carga e escala afetam métricas como vazão e perdas, enquanto falhas intermitentes e o tempo de recuperação introduzem períodos de indisponibilidade que alteram o comportamento do sistema. Ainda é difícil quantificar, de forma direta, como falhas e recuperação afetam a entrega de pacotes sob diferentes níveis de carga. Em especial, análises em regime permanente não capturam bem o comportamento transiente durante a indisponibilidade e a retomada, dificultando prever quedas de vazão e aumento de perdas. Este trabalho propõe um modelo analítico baseado em Redes de Petri Estocásticas que integra disponibilidade do sensor e fluxo de pacotes. A avaliação utiliza métricas transientes de vazão, pacotes enviados e pacotes perdidos sob dois cenários: variação da taxa de chegada ($\lambda = 1, 2$ e 3 pct/h) e variação do tempo de recuperação ($TTR = 100, 200$ e 300 h). Os resultados mostram que a carga controla a taxa de acúmulo de perdas durante a falha — chegando a $2,7\times$ mais perdas entre os extremos de carga analisados, enquanto o TTR define a duração do regime degradado, com impacto aproximadamente proporcional ao tempo de indisponibilidade.*

Abstract. *Deployments with LoRa (Long Range) and LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) sensors are common in monitoring and telemetry, with multiple devices generating packets continuously or periodically. In these scenarios, load and scale affect metrics such as throughput and losses, while intermittent failures and recovery time introduce periods of unavailability that alter system behavior. It is still difficult to directly quantify how failures and recovery affect packet delivery under different load levels. In particular, steady-state analyses do not accurately capture transient behavior during unavailability and recovery, making it difficult to predict throughput drops and increased losses. This work proposes an analytical model based on Stochastic Petri Nets that integrates sensor availability and packet flow. The evaluation uses transient metrics*

of throughput, packets sent, and packets lost across two scenarios: variation of the arrival rate ($\lambda = 1, 2$, and 3 pkt/h) and variation of the recovery time ($TTR = 100, 200$, and 300 h). Results show that load controls the rate of packet loss accumulation during failure — reaching up to $2.7\times$ more losses across the analyzed load range — while TTR defines the duration of the degraded regime, with impact approximately proportional to the unavailability window.

1. Introdução

Redes de sensores baseadas em LoRa/LoRaWAN têm sido amplamente empregadas em monitoramento e telemetria, especialmente em cenários com múltiplos dispositivos transmitindo medições de forma contínua ou periódica. Nesses ambientes, cada nó atua como fonte de tráfego e, de forma agregada, a rede opera como a superposição de várias fontes competindo por um meio compartilhado. Assim, o desempenho do sistema depende fortemente tanto do número de nós ativos quanto da intensidade de geração de pacotes [Bor et al. 2016, Santos Filho et al. 2020]. Estudos experimentais e analíticos mostram que, à medida que a densidade de dispositivos aumenta, também crescem os efeitos de contenção e colisões, reduzindo a probabilidade de entrega bem-sucedida e, consequentemente, a vazão efetiva [Ferré 2017, Jung and Lee 2021].

Sob a perspectiva operacional, carga e escala constituem dimensões dinâmicas, pois campanhas de medição mais frequentes, eventos no ambiente monitorado e a expansão da rede tendem a aumentar a taxa de chegada de pacotes e o número de transmissores atuando simultaneamente. Esse aumento de pressão sobre o canal pode comprometer metas de desempenho, como atraso aceitável e taxa mínima de entrega, tornando o planejamento mais sensível a picos de tráfego e a regimes de maior ocupação do meio [Bor et al. 2016, Ferré 2017]. Embora a literatura descreva como vazão e perdas variam com a carga oferecida [Jung and Lee 2021, Santos Filho et al. 2020], grande parte dessas análises considera condições fixas, o que limita a compreensão de cenários em que o comportamento do sistema varia ao longo do tempo.

Apesar dos avanços na caracterização do desempenho sob diferentes níveis de tráfego, ainda é difícil quantificar, de forma direta, o impacto de falhas intermitentes e do tempo de recuperação sobre a entrega de pacotes. Em cenários reais, sensores podem alternar entre operação e indisponibilidade devido a falhas de energia, degradação de hardware, problemas de enlace ou manutenção, fazendo com que métricas acumuladas dependam não apenas da carga, mas também do instante e da duração da falha. Modelos estacionários tendem a suavizar esses efeitos, enquanto a análise transiente permite observar explicitamente a evolução temporal das métricas durante e após eventos disruptivos [Lindemann 1999, German 1995]. Assim, permanece uma lacuna prática: falta um instrumento analítico que conecte a dinâmica de disponibilidade à dinâmica de tráfego, permitindo avaliar como falhas e recuperação afetam perdas e vazão ao longo do tempo.

Para enfrentar esse problema, este trabalho propõe um modelo analítico baseado em Redes de Petri Estocásticas (SPN), integrando o ciclo de disponibilidade do nó (estados operante e indisponível, governados por TTF e TTR) ao fluxo de pacotes (geração, fila e transmissão). As SPNs são adequadas por representarem explicitamente concorrência e eventos temporizados e, sob hipóteses markovianas, admitirem uma CTMC subjacente que viabiliza a avaliação transiente e o cálculo de métricas por recompensas

[Ajmone Marsan et al. 1991, Lindemann 1999]. Com esse acoplamento, o estudo avalia vazão, pacotes enviados e pacotes perdidos sob variações de carga e recuperação, medindo como e em que magnitude o impacto de falhas se manifesta ao longo do tempo [Jung and Lee 2021, Ferré 2017].

As principais contribuições deste trabalho são:

- A proposição de um modelo analítico em SPN que integra a disponibilidade do nó à dinâmica de entrega de pacotes, incluindo geração, fila e transmissão.
- A formulação, em regime transiente, das métricas de vazão, pacotes enviados e pacotes perdidos, permitindo observar o comportamento do sistema antes, durante e após a indisponibilidade.
- A análise quantitativa do impacto da taxa de chegada, do número de sensores e do tempo de recuperação sobre o desempenho, evidenciando a redução da vazão e o aumento das perdas em cenários de falha.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 discute trabalhos relacionados; A seção 3 detalha a arquitetura considerada; a Seção 4 detalha o modelo em SPN e as métricas; a Seção 5 apresenta a avaliação e discute os resultados; por fim, a Seção 6 conclui o trabalho e aponta direções futuras.

2. Trabalhos Relacionados

A literatura sobre *LoRa/LoRaWAN* oferece diferentes perspectivas para avaliar limitações de vazão e perdas em implantações densas, além de abordagens de modelagem estocástica para disponibilidade e tolerância a falhas em sistemas de IoT. Contudo, ainda há lacunas na quantificação *transiente* (ao longo do tempo) do impacto combinado entre (i) falhas/reparo no nó sensor e (ii) variação de carga e escala sobre a entrega de mensagens.

Para posicionar este estudo, a Tabela 1 compara trabalhos representativos por quatro dimensões: (1) relação com este trabalho (desempenho, disponibilidade ou performance); (2) foco do fenômeno (capacidade, colisões, duty cycle, energia, tolerância a falhas); (3) perfil temporal analisado (regime estacionário vs. transiente, carga constante vs. variável); e (4) método de avaliação (modelo analítico, modelo estocástico, simulação e/ou experimento).

Tabela 1. Comparação de trabalhos relacionados.

Ref.	Relação	Foco principal	Perfil temporal	Método
[Jung and Lee 2021]	Desempenho (LoRaWAN)	Vazão e perda (Classe A)	Estacionário	Analítico (MAC)
[Khan et al. 2019]	QoS, Eficiência	Atraso e energia (uplink confiável)	Paramétrico (cenários fixos)	Analítico + validação
[Cotrim and Margi 2024]	Filas/Restrições MAC	Duty cycle → atraso e descarte	Sob carga (degradação)	Modelagem de filas/análise
[Araujo et al. 2025b]	Robustez, Modelagem IoT	Modelos estocásticos em cenários LoRa/IoT	Dependente do cenário	Modelos estocásticos
[Araujo et al. 2025a]	Dependabilidade	Falha/reparo e impacto no desempenho	Eventos de falha (sensibilidade)	SPN (disponibilidade/desempenho)
[Bermudez and Maciel 2024]	Fundamentos (método)	Integração SPN-CTMC (disponibilidade)	Tipicamente estacionário	SPN/CTMC (formalismo)
Este trabalho	Performabilidade (LoRa)	Falha/reparo + tráfego/filas → vazão, enviados, perdidos	Transiente	Modelo hierárquico: CTMC (UP/DOWN) acoplado a filas

Relação com o presente estudo (desempenho, disponibilidade e performabilidade)

Os trabalhos relacionados podem ser organizados em três blocos. O primeiro trata do *desempenho* em redes LoRaWAN, com foco em vazão, atraso e perdas associadas ao acesso ao meio, colisões e carga oferecida. O segundo enfatiza *restrições operacionais*, como *duty cycle* e saturação de buffers, mostrando que a degradação não decorre apenas de colisões. O terceiro aborda *dependabilidade e disponibilidade*, geralmente por meio de Redes de Petri Estocásticas ou de cadeias de Markov em tempo contínuo, considerando falhas e reparos que afetam a capacidade efetiva do sistema. Nesse contexto, o presente trabalho se posiciona como uma análise de *performabilidade*, ao integrar, em um único modelo, a disponibilidade do nó sensor e o desempenho associado ao tráfego, à fila e à transmissão, permitindo quantificar diretamente os efeitos de falhas e da recuperação sobre a entrega de mensagens.

Fenômeno modelado e perfil temporal Grande parte dos estudos de desempenho em LoRaWAN assume nós sempre operacionais e concentra-se nos efeitos do acesso ao meio e da densidade de dispositivos sobre colisões e perdas. Por outro lado, trabalhos voltados à disponibilidade normalmente descrevem estados de operação e transições de falha e reparo sem acoplá-los à dinâmica de tráfego que determina a vazão observada. Assim, há espaço para modelos que representem simultaneamente o sensor como um subsistema com estados operacional e indisponível, e a cadeia de entrega composta por geração, fila, transmissão e recepção. Esse acoplamento é especialmente relevante em cenários com falhas intermitentes e recuperação não instantânea, nos quais o aspecto mais importante não é apenas o valor médio em regime, mas também o comportamento temporal do sistema, incluindo crescimento de filas, interrupções na transmissão, picos de perdas e tempo necessário para a recuperação da vazão.

Método de avaliação e contribuição Abordagens analíticas e estocásticas, como Redes de Petri Estocásticas e cadeias de Markov em tempo contínuo, são particularmente úteis por permitirem varredura paramétrica, reprodutibilidade e análise de cenários *what-if*, sem depender exclusivamente de experimentação em *testbeds* [Lindemann 1999]. O presente trabalho explora essas vantagens ao combinar um submodelo de disponibilidade, responsável pela alternância entre os estados de operação e indisponibilidade, com um submodelo de tráfego e desempenho, que contempla chegadas, fila e serviço. Sua principal contribuição é a **integração explícita** entre falha, recuperação e entrega de pacotes, com ênfase na **avaliação transiente**. Com isso, o modelo permite derivar diretamente a vazão ao longo do tempo, o número de pacotes enviados e o número de pacotes perdidos, quantificando como carga, escala e tempo de recuperação interagem para ampliar perdas e reduzir a vazão em janelas específicas de indisponibilidade.

3. Modelo Conceitual

Esta seção descreve o modelo conceitual utilizado para representar, de forma integrada, o fluxo de pacotes de sensores LoRa até o gateway LoRaWAN e o efeito de falhas intermitentes no enlace. A figura apresentada não constitui uma arquitetura implementável, mas uma abstração que apoia o modelo analítico proposto na Seção 4. A Figura 1 organiza o modelo em três elementos: (i) o conjunto de sensores como fonte de tráfego, (ii) o nó

sensor com seus módulos internos e o ciclo de falha/recuperação do transmissor, e (iii) o gateway LoRaWAN como destino da comunicação.

O processo inicia-se no conjunto de sensores, que gera pacote a uma taxa de chegada (pct/h). Cada mensagem é processada no nó sensor, composto por dois blocos funcionais: *Gerador de Pacote* e *Transmissor de Pacote*. O gerador encapsula a leitura em um pacote, enquanto o transmissor executa a tentativa de envio pelo enlace LoRa em direção ao gateway. A dinâmica de disponibilidade do enlace é representada por um mecanismo estocástico de dois estados associado ao transmissor: estado *ativo* (transmissão estável) e estado *em falha* (indisponível). A passagem do estado ativo para falha ocorre após um tempo até a falha, e o retorno ao estado ativo ocorre após um tempo de recuperação. Neste trabalho, falhas e recuperações representam eventos de indisponibilidade do serviço e são modeladas de forma abstrata, independentemente da causa. Na prática, podem decorrer, por exemplo, de quedas de energia no gateway, perda/intermitência do backhaul (4G/fibra), reinicializações/atualizações de firmware, degradação temporária por interferência intensa ou falhas de hardware. Quando o transmissor está ativo, os pacotes seguem pelo caminho de *sucesso* e são contabilizadas como enviadas/entregues. Quando ocorre falha, o envio é interrompido e os pacotes passam a seguir o caminho de *falha*, sendo contabilizadas como perdidas.

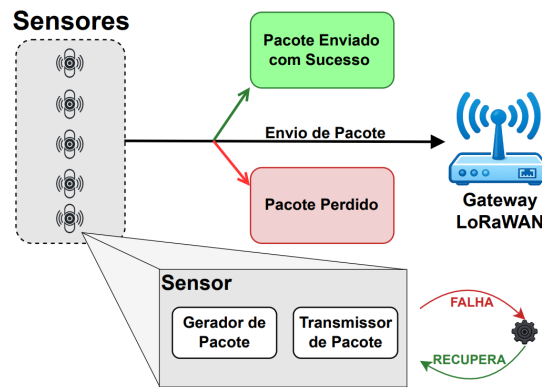


Figura 1. Arquitetura conceitual do nó sensor LoRa com dinâmica de falha/recuperação e caminhos de entrega (sucesso) e perda (falha) até o gateway LoRaWAN.

4. Modelo SPN

A Figura 2 apresenta o modelo proposto em Rede de Petri Estocástica (Stochastic Petri Net – SPN) para representar a dinâmica de entrega de pacotes em sensores LoRa/LoRaWAN, considerando geração de pacotes, transmissão, falha e recuperação. Os modelos foram desenvolvidos e analisados com a ferramenta Mercury (versão 5.0.1) [Maciel et al. 2017], já empregada na modelagem de diferentes aplicações computacionais [Silva et al. 2023, Fé et al. 2023, Correia et al. 2023].

Uma SPN representa o comportamento do sistema por meio de lugares, que descrevem estados e armazenam tokens, e transições, que representam eventos que alteram a marcação da rede. Transições temporizadas possuem atraso aleatório exponencial, permitindo modelar a evolução temporal do sistema; transições imediatas representam decisões

lógicas sem avanço de tempo. Sob hipóteses exponenciais, o modelo admite uma Cadeia de Markov em Tempo Contínuo (CTMC) subjacente, viabilizando a análise transiente e o cálculo de métricas por recompensas.

O modelo acopla dois comportamentos: disponibilidade do enlace e fluxo de pacotes. A disponibilidade é representada pelos lugares P_{up} e P_{down} , indicando os estados operacional e indisponível. A transição TTF desloca a marca de P_{up} para P_{down} , representando a falha, enquanto TTR modela a recuperação. Esses parâmetros são interpretados como tempos médios e convertidos em taxas $\lambda_f = 1/TTF$ e $\lambda_r = 1/TTR$.

O fluxo de pacotes inicia-se em P_{gs} . A geração é modelada pela transição T_{txs} com taxa λ , cujo disparo coloca um pacote em P_{ftr} (fila de espera). Com o enlace ativo (P_{up} marcado), o pacote avança para P_{ftrs} e é transmitido pela transição T_{ts} com taxa μ , sendo contabilizado em P_{pcte} (pacotes enviados). Com o enlace indisponível (P_{down} marcado), o pacote é descartado e contabilizado em P_{pctp} (pacotes perdidos). Em ambos os casos, a marca retorna a P_{gs} , permitindo a geração contínua de novos pacotes.

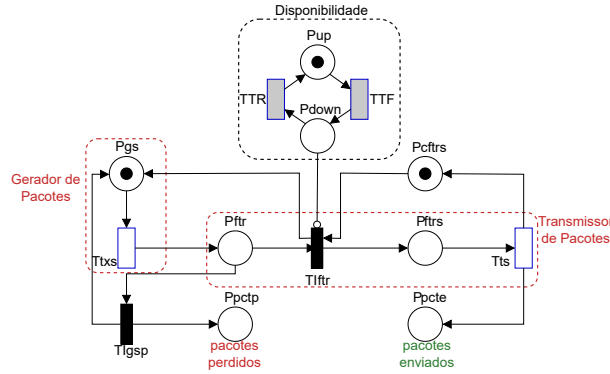


Figura 2. Modelo em SPN para disponibilidade e entrega de mensagens.

Para facilitar a leitura do modelo e a interpretação das métricas, a Tabela 2 resume os principais lugares, transições e definições empregadas. Em termos de parametrização, NS representa a quantidade de sensores ativos e é utilizado para escalar as contagens acumuladas do modelo para o comportamento agregado do sistema. O parâmetro TOA (Time-on-Air) representa a duração do pacote no meio e influencia diretamente a ocupação do canal e a vazão instantânea. Já TTF e TTR caracterizam, respectivamente, o tempo até a falha e o tempo até a recuperação, controlando a frequência e a duração das janelas de indisponibilidade. Por fim, os parâmetros de chegada e serviço, como λ e μ , definem a intensidade do tráfego e a capacidade de transmissão, permitindo analisar como carga, escala e recuperação afetam as métricas $LOST(t)$, $SENT(t)$ e $TP(t)$.

A avaliação do sistema é conduzida por métricas transientes diretamente associadas à entrega de mensagens. A quantidade de pacotes enviados até o instante t é obtida pelo contador acumulador $P_{pcte}(t)$, e a quantidade de pacotes perdidos até t é obtida por $P_{pctp}(t)$. Considerando uma implantação com N_S sensores ativos, as métricas agregadas são expressas por:

$$Pacotes\ Enviados(t) = P_{pcte}(t) \cdot N_S, \quad (1)$$

$$Pacotes\ Perdidos(t) = P_{pctp}(t) \cdot N_S. \quad (2)$$

Tabela 2. Componentes do Modelo em Rede de Petri Estocástica.

Símbolo	Componente	Descrição
Lugares		
P_{gs}	Geração de pacotes	Habilita a geração de um novo pacote pelo sensor.
P_{ftr}	Fila de transmissão	Buffer onde pacotes aguardam encaminhamento.
P_{ftrs}	Estado de transmissão	Pacotes em serviço (em transmissão).
P_{cftrs}	Capacidade de transmissão	Recurso/capacidade do canal para controlar transmissões.
P_{pcte}	Pacotes enviados	Contador acumulador de pacotes transmitidos com sucesso.
P_{pctp}	Pacotes perdidos	Contador acumulador de pacotes descartados por indisponibilidade/descarte.
P_{up}	Disponível (UP)	Enlace operacional (transmissão habilitada).
P_{down}	Indisponível (DOWN)	Enlace em falha/reparo (transmissão bloqueada).
Transições		
T_{tes}	Chegada/geração	Geração de pacotes com taxa λ (carga).
T_{ts}	Transmissão	Serviço de transmissão com taxa μ .
Definições		
N_S	-	Representa o número de sensores para parametrização.
TOA	-	Representa o tempo que o pacote fica no ar.
AR	-	<i>Arrival Rate</i> — Taxa de chegada de pacotes por sensor (λ).
AD	-	<i>Arrival Delay</i> — Tempo médio entre chegadas sucessivas por sensor (inverso de λ).
TTR	-	TIME TO REPAIR - Representa o tempo até o reparo.
TTF	-	TIME TO FAIL - Representa o tempo até a falha.

A vazão (*throughput*) representa a taxa efetiva de entrega ao longo do tempo. No modelo, $P_{ftrs}(t)$ representa o número esperado de pacotes em transmissão (no ar) no instante t e TOA o tempo médio de ocupação do canal por pacote (*Time-on-Air*). Assim, a vazão agregada do sistema é calculada por:

$$TP(t) = \frac{P_{ftrs}(t)}{TOA} \cdot N_S. \quad (3)$$

Essas métricas permitem quantificar, ao longo do tempo, o efeito combinado de carga λ , escala N_S e parâmetros de falha/recuperação (TTF e TTR) sobre a entrega de mensagens, evidenciando períodos de degradação durante falhas e o comportamento de recomposição após a recuperação. O método de solução adotado é a uniformização, aplicada sobre a CTMC subjacente para obtenção das probabilidades transientes. O horizonte de análise foi definido em 1.000 h, intervalo suficiente para cobrir as três fases de interesse: operação estável, indisponibilidade e recuperação. A parametrização completa está listada na Tabela 3, permitindo a replicação direta dos experimentos.

5. Avaliação

Esta seção apresenta cenários de avaliação para analisar, em regime transiente, como falhas e o tempo de recuperação influenciam métricas de entrega de pacotes em sensores LoRa. São consideradas três métricas ao longo do tempo: (i) quantidade de pacotes

perdidos (*LOST*), (ii) quantidade de pacotes enviados (*SENT*) e (iii) vazão (*TP*, em pacotes por hora). Em ambos os cenários, as curvas evidenciam três fases: (a) operação estável inicial, (b) intervalo de indisponibilidade associado ao evento de falha, no qual a vazão se reduz drasticamente e as perdas se acumulam, e (c) retorno à operação após a recuperação, quando o sistema volta a produzir e entregar mensagens.

A parametrização adotada nos estudos de caso é resumida na Tabela 3, que apresenta os tempos médios associados às transições temporizadas e as definições utilizadas na composição das métricas transientes. Em particular, *TTF* representa o tempo médio até a ocorrência da falha do enlace (transição $P_{up} \rightarrow P_{down}$), enquanto *TTR* representa o tempo médio até o reparo ou recuperação (transição $P_{down} \rightarrow P_{up}$), controlando diretamente a duração da indisponibilidade. O processo de transmissão é representado por T_{ts} , que define o tempo médio de serviço para que um pacote seja efetivamente enviado; sob hipótese exponencial, esse parâmetro pode ser expresso de forma equivalente pela taxa $\mu = 1/T_{ts}$.

O tráfego gerado pelo sensor é caracterizado por *AD*, correspondente ao tempo médio entre chegadas sucessivas por sensor, isto é, o inverso da taxa de chegada λ . Esse parâmetro é variado no Cenário 1 para representar diferentes níveis de carga. Por fim, *NS* define o número de sensores ativos na implantação, enquanto *TOA* representa o *Time-on-Air* do pacote, associado à duração da transmissão no meio e, consequentemente, ao cálculo da vazão ao longo do tempo.

Tabela 3. Parâmetros do modelo (transições e definições).

Categoria	Parâmetro(s)	Descrição	Valor
Transições	T_{ts}	Tempo médio para o pacote ser enviado (transição T_{ts}).	1 h
	<i>TTF</i>	Tempo médio até a falha (transição $TTF: P_{up} \rightarrow P_{down}$).	500 h
	<i>TTR</i>	Tempo médio até o reparo/recuperação (transição $TTR: P_{down} \rightarrow P_{up}$).	200 h
	T_{ts}	Taxa média de envio (parâmetro exponencial associado à transição T_{ts}).	1 h
Definições	<i>AD</i>	Tempo médio entre chegadas de pacotes por sensor (atraso entre gerações sucessivas).	0,5 h
	N_S	Número de sensores ativos na implantação.	100
	<i>TOA</i>	Tempo no ar (<i>Time-on-Air</i>) do pacote (duração da transmissão no meio). ¹	0,5 h

5.1. Cenário 1 - Variação da Carga (Taxa de Chegada de Pacotes)

Neste cenário, avalia-se o impacto da taxa de chegada de pacotes (λ) na entrega ao longo do tempo, considerando três níveis de carga: $\lambda = 1, 2$ e 3 pct/h. A Figura 3 apresenta a evolução temporal das métricas de Pacotes Perdidos *LOST(t)*, Pacotes Enviados *SENT(t)* e Vazão *TP(t)*.

A Figura 3(a) mostra o efeito da indisponibilidade no acúmulo de perdas. Até $t \approx 500$ h, *LOST(t)* permanece próximo de zero em todos os casos. Durante a falha, as perdas crescem de forma aproximadamente linear e atingem, ao final da indisponibilidade

($t \approx 700$ h), cerca de $22,5 \times 10^3$ pacotes para $\lambda = 1$, 40×10^3 para $\lambda = 2$ e 61×10^3 para $\lambda = 3$. Isso mostra que o aumento da carga amplifica diretamente o volume de pacotes perdidos durante a janela de falha. Após a recuperação, $LOST(t)$ tende à estabilização, indicando que a maior parte das perdas se concentra no período de indisponibilidade.

Na Figura 3(b), $SENT(t)$ cresce de forma aproximadamente linear enquanto o sistema permanece operacional e entra em platô durante a falha, refletindo a interrupção do envio. Imediatamente antes da falha ($t \approx 500$ h), os valores acumulados são da ordem de 35×10^3 pacotes para $\lambda = 1$, 43×10^3 para $\lambda = 2$ e 46×10^3 para $\lambda = 3$. Durante a indisponibilidade, as curvas permanecem praticamente constantes, retomando o crescimento após $t \approx 700$ h. Ao final do horizonte analisado ($t \approx 1000$ h), os totais acumulados alcançam aproximadamente 56×10^3 , 69×10^3 e 74×10^3 pacotes, respectivamente.

Conforme a Figura 3(c), após um curto período inicial de estabilização ($t \approx 50$ h), o sistema opera com vazão aproximadamente constante, em patamares próximos de 140 pct/h para $\lambda = 1$, 170 pct/h para $\lambda = 2$ e 185 pct/h para $\lambda = 3$. Esse comportamento se mantém até o início da indisponibilidade, quando a vazão cai abruptamente para próximo de zero. O intervalo degradado ocorre aproximadamente entre $t \approx 500$ h e $t \approx 700$ h, com retorno ao patamar anterior após a recuperação.

Em síntese, o Cenário 1 mostra que: (i) em operação normal, $TP(t)$ permanece estável e cresce com λ ; (ii) a falha introduz um intervalo em que $TP(t) \approx 0$, $SENT(t)$ se mantém constante e $LOST(t)$ se acumula; e (iii) quanto maior a carga, maior o volume de perdas durante a indisponibilidade, atingindo aproximadamente $2,7 \times$ mais perdas em $\lambda = 3$ do que em $\lambda = 1$ (cerca de 61×10^3 contra $22,5 \times 10^3$) no mesmo intervalo de falha.

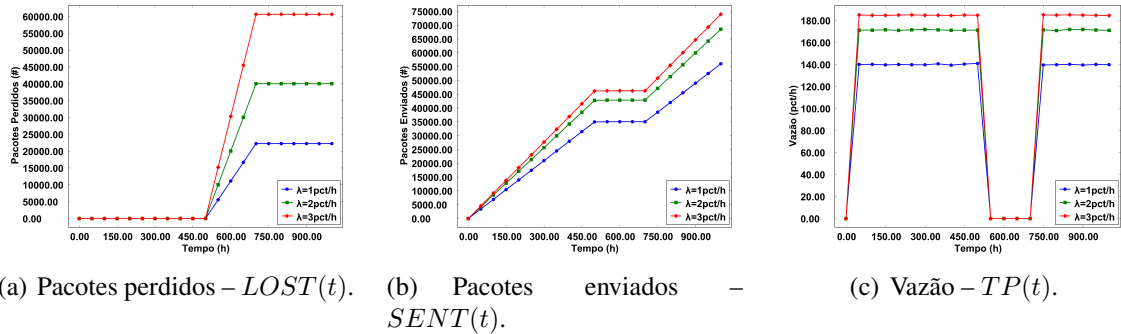


Figura 3. Efeito da taxa de chegada λ nas métricas transientes de entrega.

5.2. Cenário 2 - Variação do Tempo de Recuperação (TTR)

Neste cenário, avalia-se o efeito do tempo de recuperação (TTR) sobre as métricas de entrega, mantendo fixa a carga em $\lambda = 2$ pct/h. Foram considerados três valores: $TTR = 100$ h, 200 h e 300 h, conforme a Figura 4.

A Figura 4(a) mostra o impacto sobre as perdas. Observa-se que $LOST(t)$ permanece próximo de zero até o início da falha e passa a crescer de forma aproximadamente linear durante a indisponibilidade, estabilizando após a recuperação. Ao final de cada janela, as perdas acumuladas atingem cerca de 20×10^3 pacotes para $TTR = 100$ h, 40×10^3 para $TTR = 200$ h e 60×10^3 para $TTR = 300$ h. Mantida a carga constante, o resultado

indica comportamento aproximadamente proporcional ao tempo de recuperação: cada incremento de 100 h em TTR adiciona cerca de 20×10^3 pacotes perdidos no horizonte analisado.

Esse efeito também aparece em $SENT(t)$. Na Figura 4(b), a métrica cresce quase linearmente até instantes anteriores à falha ($t \approx 500$ h), atingindo cerca de 43×10^3 pacotes em todas as configurações. Durante a indisponibilidade, a curva entra em platô e só volta a crescer após a recuperação. Como consequência, ao final do horizonte analisado ($t \approx 1000$ h), os totais tornam-se distintos: aproximadamente 77×10^3 pacotes para $TTR = 100$ h, 69×10^3 para $TTR = 200$ h e 60×10^3 para $TTR = 300$ h. Assim, o aumento de TTR reduz o total enviado por diminuir o tempo efetivo de operação.

A Figura 4(c) mostra que, antes da falha, o sistema opera com vazão aproximadamente constante, em torno de 170–180 pct/h. Em seguida, há queda abrupta para valores próximos de zero por um intervalo cuja duração acompanha diretamente o TTR . O retorno ao patamar anterior ocorre em torno de $t \approx 650$ h para $TTR = 100$ h, $t \approx 750$ h para $TTR = 200$ h e $t \approx 850$ h para $TTR = 300$ h. Portanto, embora o desempenho fora da falha permaneça semelhante entre os casos, o tempo em regime degradado cresce proporcionalmente ao tempo de recuperação.

Em síntese, o Cenário 2 mostra que TTR é o fator dominante da degradação temporal durante a falha, pois define diretamente: (i) a duração do intervalo em que $TP(t) \approx 0$; (ii) o tempo em que $SENT(t)$ permanece estagnado; e (iii) o volume final de perdas acumuladas em $LOST(t)$, sem alterar de forma relevante o patamar de desempenho em regime fora da indisponibilidade.

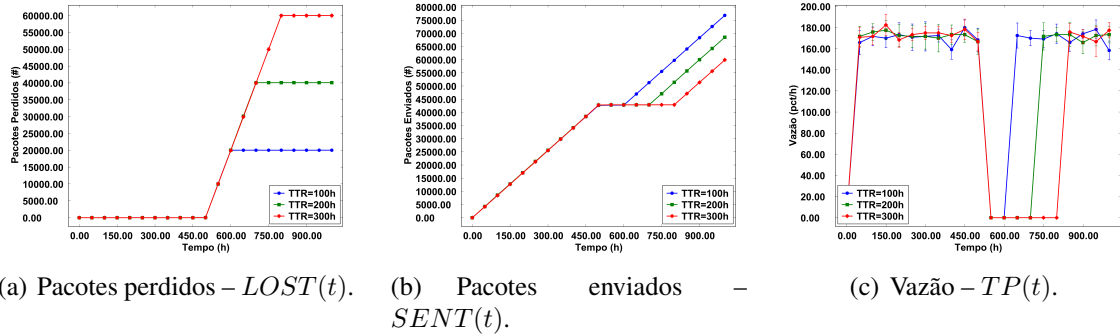


Figura 4. Efeito do tempo de recuperação nas métricas transientes de entrega.

5.3. Discussão de Resultados

As duas avaliações mostram que a degradação temporal decorre de um mecanismo direto: durante a indisponibilidade, a entrega é interrompida ($TP(t) \approx 0$), $SENT(t)$ deixa de crescer e $LOST(t)$ passa a se acumular, com intensidade determinada por λ e duração determinada por TTR . Em outras palavras, λ controla a taxa de perdas durante a falha, enquanto TTR define o tempo de permanência do sistema em regime degradado.

Do ponto de vista prático, o modelo oferece uma forma objetiva de estimar o impacto de diferentes políticas operacionais em implantações LoRa/LoRaWAN. Reduzir a carga efetiva, por exemplo, diminuindo a periodicidade de envio, escalonando transmissões ou limitando pacotes não críticos, tende a reduzir a inclinação de $LOST(t)$ du-

rante períodos de falha. De modo análogo, reduzir TTR , por meio de mecanismos de detecção, redundância, substituição rápida do nó ou procedimentos de manutenção mais eficientes, encurta a janela em que a vazão permanece próxima de zero. Assim, o modelo pode apoiar o planejamento operacional ao indicar combinações de λ e TTR capazes de manter as perdas dentro de limites aceitáveis em um dado horizonte de operação, além de permitir a comparação de estratégias de mitigação sob um mesmo critério temporal.

Do ponto de vista da validade do modelo, os resultados são mais aderentes a implantações de baixa a média densidade, nas quais colisões não constituem o fator dominante de perda e o canal opera próximo às condições nominais. Nesses cenários, o modelo isola e quantifica a contribuição específica de falhas e recuperação sobre a entrega de pacotes, servindo como *baseline* para comparação com modelos mais complexos. Em contrapartida, os resultados devem ser interpretados com cautela em cenários de alta densidade de dispositivos, uso intensivo de retransmissões ou operação próxima ao limite de *duty cycle*, pois esses fatores introduzem dinâmicas adicionais não capturadas pelo modelo atual.

6. Conclusão

Este artigo trata da análise do impacto de falhas e da recuperação no desempenho de sensores LoRa ao longo do tempo. Para isso, foi proposto um modelo analítico baseado em Redes de Petri Estocásticas, capaz de representar tanto o comportamento de geração e transmissão de pacotes quanto os períodos em que o sensor fica indisponível e depois volta a operar. Com esse modelo, foi possível observar de forma temporal como a entrega de mensagens é afetada em situações de falha, considerando métricas como vazão, quantidade de pacotes enviados e quantidade de pacotes perdidos. Os resultados mostraram que os períodos de indisponibilidade interrompem a transmissão de pacotes, reduzem a vazão para valores próximos de zero e aumentam a quantidade de pacotes perdidos. Dois fatores têm papel central: enquanto o aumento da carga eleva o volume de perdas durante a falha, tempos maiores de recuperação prolongam o intervalo de degradação. Assim, a combinação entre intensidade de envio e duração da indisponibilidade define a dimensão do impacto no desempenho da rede. Como limitação, o modelo não incorpora colisões, retransmissões, restrições de *duty cycle* e heterogeneidade entre nós, o que delimita sua validade a implantações de baixa a média densidade. Como continuidade, trabalhos futuros podem incluir esses mecanismos, explorar diferentes escalas e perfis de tráfego, e realizar validação experimental, de modo a ampliar a aderência e a aplicabilidade do modelo a cenários reais.

Referências

- Ajmone Marsan, M., Balbo, G., Conte, G., Donatelli, S., and Franceschinis, G. (1991). An introduction to generalized stochastic petri nets. *Microelectronics and Reliability*, 31(4):699–725.
- Araujo, I., Barbosa, V., Lima, L. N., Silva, L. G., Brito, C., Fé, I., Lopes, L., Andrade, E., Leao, E., and Silva, F. A. (2025a). Assessing the performance of a fault tolerant lorawan architecture with a focus on the sensor layer and data retransmission strategy. *Cluster Computing*, 28(4):275.

- Araujo, I., Silva, L. G., Brito, C., Min, D., Lee, J.-W., Nguyen, T. A., Leao, E., and Silva, F. A. (2025b). Dds-p: Stochastic models based performance of iot disaster detection systems across multiple geographic areas. *ICT Express*, 11(1):34–40.
- Bermudez, E. and Maciel, P. (2024). Assessing satellite resilience: Spn and ctmc models for availability evaluation. In *Proceedings of the 13th Latin-American Symposium on Dependable and Secure Computing*, pages 175–178.
- Bor, M., Roedig, U., Voigt, T., and Alonso, J. M. (2016). Do lora low-power wide-area networks scale? In *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM '16)*, pages 59–67. ACM.
- Correia, L. F., Dantas, J. R., and Silva, F. A. (2023). Blockchain as a service environment: a dependability evaluation. *The Journal of Supercomputing*, pages 1–25.
- Cotrim, J. R. and Margi, C. B. (2024). Make or break? how lorawan duty cycle impacts performance in multihop networks. *IEEE Access*.
- Fé, I., Nguyen, T. A., Soares, A., Son, S., Choi, E., Min, D., Lee, J.-W., and Silva, F. A. (2023). Model-driven dependability and power consumption quantification of kubernetes based cloud-fog continuum. *IEEE Access*.
- Ferré, G. (2017). Collision and packet loss analysis in a lorawan network. In *2017 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, pages 2586–2590.
- German, R. (1995). Transient analysis of deterministic and stochastic petri nets with timenet. In *Applications and Theory of Petri Nets 1995*. Springer.
- Jung, J.-Y. and Lee, J.-R. (2021). Throughput and packet loss probability analysis of long range wide area network. *Applied Sciences*, 11(17):8091.
- Khan, F. H., Jurdak, R., and Portmann, M. (2019). A model for reliable uplink transmissions in lorawan. In *2019 15th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, pages 147–156. IEEE.
- Lindemann, C. (1999). Transient analysis of deterministic and stochastic petri nets. *Performance Evaluation*, 36–37:151–179.
- Maciel, P., Matos, R., Silva, B., Figueiredo, J., Oliveira, D., Fé, I., Maciel, R., and Dantas, J. (2017). Mercury: Performance and dependability evaluation of systems with exponential, expolynomial, and general distributions. In *2017 IEEE 22nd Pacific Rim international symposium on dependable computing (PRDC)*, pages 50–57. IEEE.
- Santos Filho, F. H. C., Dester, P. S., Stancanelli, E. M. G., Cardieri, P., Nardelli, P. H. J., Carrillo, D., and Alves, H. (2020). Performance of lorawan for handling telemetry and alarm messages in industrial applications. *Sensors*, 20(11):3061.
- Silva, L. G., Cardoso, I., Brito, C., Barbosa, V., Nogueira, B., Choi, E., Nguyen, T. A., Min, D., Lee, J. W., and Silva, F. A. (2023). Urban advanced mobility dependability: A model-based quantification on vehicular ad hoc networks with virtual machine migration. *Sensors*, 23(23):9485.