

## Escalabilidade Uplink de Redes Industriais Sem Fio com Técnicas de Centralidade

Dylan M Timm\* Max Feldman\* Leandro B Becker\*\* Ivan Muller\*

\* Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Porto Alegre, RS (e-mail: dylanmtimm@gmail.com).

\*\* Universidade Federal de Santa Catarina, Depto de Automação e Sistemas, Florianópolis, SC

---

**Abstract:** This work evaluates uplink scalability of industrial wireless networks regarding centrality concepts. It applies simulations of centralized mesh-topology networks, taking WirelessHART networks as case study, in scenarios of high node density and varied quantities and distribution of access points. Performance criteria such as refresh rates, node buffer size and reliability are evaluated as varied project specifications. The study infers that the lowest end-to-end communication success rates are concentrated on chains which top nodes present higher degree and betweenness centrality, and the most faulty packages tend to be those generated on devices with lower proximity centrality.

**Resumo:** Este trabalho avalia a escalabilidade *uplink* de redes industriais sem fio em função de conceitos de centralidade. Emprega-se simulações de redes centralizadas com topologia de malha, tomando redes WirelessHART como estudo de caso, em cenários de alta densidade de nodos e de variadas quantidades e posicionamentos de pontos de acesso. Avaliam-se critérios de performance (como taxa de atualização, tamanho de *buffer* dos nodos e confiabilidade) como variadas especificações de projeto. O estudo infere que as menores taxas de sucesso em comunicação fim-a-fim concentram-se em cadeias cujos dispositivos de topo apresentam altas centralidades de grau e de intermediação, e pacotes gerados em dispositivos com menores centralidades de proximidade tendem a serem os mais faltosos.

*Keywords:* Scalability, industrial wireless networks, uplink, reliability, access points.

*Palavras-chaves:* Escalabilidade, redes industriais sem fio, *uplink*, confiabilidade, pontos de acesso.

---

### 1. INTRODUÇÃO

Redes industriais sem fio apresentam vantagens com relação a seus contrapontos cabeados como menor custo em infraestrutura e maior flexibilidade, mas sua performance é mais desafiada por problemas de interferência, coexistência e confiabilidade (Luvisotto et al., 2017). Em redes de alta escala (em geral, de cem a mil dispositivos), esses desafios se agravam, especialmente em operações como o *uplink*, onde muitos dispositivos visam se comunicar com um *sink* (como um ponto de acesso), gerando gargalos de tráfego de informação ao redor do destinatário final (Singh and Rishiwal, 2017). Em redes sem fio centralizadas, como o WirelessHART, o *uplink* é frequente, pois um único gerenciador de rede administra seu funcionamento e rotineiramente precisa coletar informações de todos os dispositivos através de seus pontos de acesso.

Em uma rede industrial, escalabilidade denota sua capacidade de manter relativos critérios de performance perante o aumento de sua escala, geralmente associada à quantidade de dispositivos presentes (Pister et al., 2011). Este trabalho analisa a correlação entre performance e escala de uma rede WirelessHART através de métricas de centralidade e avalia, através destas métricas, o impacto

das quantidades e distribuições espaciais dos pontos de acesso em redes com crescentes quantidades de dispositivos. Os critérios de performance avaliados são frequência de atualização (regido pelo *Time to Live* de cada pacote), tamanho de *buffer* de cada nodo (avaliado em quantidade máxima de pacotes *uplink* que podem ser armazenados) e nível de confiabilidade.

Os resultados apontam que as cadeias de *uplink* com maior tendência a apresentarem perda de pacotes fim-a-fim são as que apresentam maiores centralidades de grau e de intermediação, e que os pacotes com maior tendência a serem perdidos são aqueles gerados em dispositivos presentes nesta cadeia e que apresentam menores centralidades de proximidade.

### 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 2.1 Centralidade

Centralidade é um conceito de teoria de grafos e análise de redes que busca parametrizar o grau de relevância de cada vértice (ou nodo) com relação à rede como um todo (Bonacich, 1987). É um conceito amplamente empregado em teorias de redes sociais, transmissão e proliferação de

doenças, redes neurais, entre outros, com o intuito de identificar e classificar os indivíduos mais importantes na rede (Borgatti, 2005).

O trabalho de (Gaitan et al., 2021) buscou empregar os quatro conceitos clássicos de centralidade (grau, proximidade, intermediação e autovetor) para analisar seu impacto na performance de redes *ad hoc* durante a designação de *gateways* e *sinks*. Com isso mente, este trabalho avalia a aplicação da centralidade na distribuição espacial, de *links* e de carga dos pontos de acesso buscando melhoria de performance.

A seguir, descrevem-se as variantes de centralidade avaliadas neste trabalho, de acordo com as definições descritas em (Gaitan et al., 2021), (Bonacich, 1987) e (Borgatti, 2005).

**Centralidade de Grau:** Centralidade de Grau (CG) é considerada uma das mais simples centralidades (Gaitan et al., 2021). Sua definição envolve a determinação de quantos *links* diretos o nodo possui com relação à total quantidade de *links* que poderia possuir (se estivesse conectado a todos os dispositivos da rede, por exemplo). A equação 1 abaixo demonstra o método de cálculo da centralidade de grau para um nodo  $i$ , onde  $N$  é o número de nodos da rede e  $grau(i)$  indica a quantidade de *links* que o dispositivo  $i$  possui.

$$CG_i = \frac{grau(i)}{N - 1} \quad (1)$$

Durante os estudos de caso, busca-se avaliar o quanto a CG impacta a disponibilidade dos pontos de acesso e dos dispositivos ao seu redor (com distância de salto igual a um ou dois), estando diretamente relacionada à quantidade de vizinhos diretos desses dispositivos e na formação de gargalos de comunicação.

**Centralidade de Proximidade:** Centralidade de Proximidade (CP) avalia o quão perto um dispositivo está com relação a todos os demais. Proximidade usa como definição o inverso de distância geodésica do dispositivo com relação aos outros, como mostra a equação 2, sendo  $V$  o grafo que representa os nodos conectados (direta ou indiretamente) ao nodo  $i$  e  $a$  sendo qualquer nodo membro de  $V$ .

$$CP_i = \frac{1}{\sum_{a \in V} dist(i, a)} \quad (2)$$

Durante os estudos de caso, busca-se avaliar o quanto a CP de cada ponto de acesso impacta nos critérios de perda de pacotes por obsolescência (*Time to Live*) e *buffer* cheio, estando diretamente atrelada às métricas de distância média de saltos entre dispositivos.

Para este trabalho, substituiu-se a distância física entre dispositivos pela média de tentativas de transmissão por pacote para cada par de dispositivos, como será descrito em maiores detalhes na subseção 2.3, e avalia-se (por se tratar de uma análise exclusiva de *uplink*) primariamente a proximidade de dispositivos de campo com seus pontos de acesso.

**Centralidade de Intermediação:** Centralidade de Intermediação (CI) avalia o quão relevante é um nodo enquanto servindo como ponte entre dois outros nodos ou conjuntos de nodos. Neste trabalho, pode-se descrever a CI como a proporção de vezes que um dispositivo se encontra na rota primária determinada pelo algoritmo de roteamento. A equação 3 mostra como calcular a CI de um dispositivo  $i$ , sendo  $rotas_i(p, q)$  as rotas entre quaisquer dispositivos  $p$  e  $q$  que contenham  $i$  como um intermediário, e  $rotas(p, q)$  representando qualquer rota entre os dispositivos  $p$  e  $q$ .

$$CI_i = \sum_{p \neq q} \frac{rotas_i(p, q)}{rotas(p, q)} \quad (3)$$

## 2.2 Modelo de Friis e Interferências

O modelo de transmissão de Friis foi inicialmente proposto em (Friis, 1946) pelo engenheiro eletrônico Harald T. Friis. Seu propósito é equacionar a potência percebida por uma antena receptora em função da potência de emissão, dos ganhos das antenas, da frequência do sinal e da distância entre emissor e receptor. O modelo inicial considera um ambiente ideal com mesma polarização, alinhamento entre antenas permitindo máxima radiação, e ausência de perdas por obstáculos, obstruções ou reflexões em superfícies. A equação 4 (Saunders and Aragon-Zavala, 2007) expande o modelo de Friis para incluir estimativas referentes a perdas sistêmicas de sinal como ineficiências das antenas, atenuações de linhas de transmissão, filtros, entre outros (termo  $L$ ) e a perda de sinal em função de obstruções no meio (termo  $n$ ).

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi R^n} \right)^2 \frac{1}{L} \quad (4)$$

A partir do modelo expandido de Friis, usa-se a equação 4 neste estudo para se estimar qual o sinal percebido entre um par de dispositivos WirelessHART sabendo-se a distância entre eles na rede simulada e a potência de emissão igual a 10 dB. Empregam-se aleatórios valores de decréscimo de sinal entre pares de dispositivos para simular interferências físicas e eletromagnéticas comuns em um ambiente industrial.

## 2.3 RPL

A técnica de roteamento empregada para as simulações deste trabalho é baseada no algoritmo de RPL (*IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy Networks*) formalmente descrito em (Winter et al., 2012) mas já tendo sido empregado para análise de cargas de pontos de acesso em (Pister et al., 2011).

O algoritmo RPL, em especial sua versão *upstream* (dos dispositivos em direção ao ponto de acesso), é um algoritmo de minimização que atribui custos para cada *link* entre dispositivos de forma iterativa e determina a rota otimizada como a com a menor soma de custos desde o emissor até o destinatário final. No algoritmo, custo, apresentado na equação 5, está associado à probabilidade de perda de pacotes e à distância em saltos do dispositivo a um ponto de acesso, assim como a um termo proposto em (Pister et al., 2011) que realiza o balanceamento entre

as cargas de pontos de acesso de modo a buscar uma distribuição otimizada de suas disponibilidades.

$$Custo_{link} = Custo_{vizinho} + ETX_{vizinho} + \lambda * Carga_{PA} \quad (5)$$

Primariamente, precisa-se do PDP (*Packet Delivery Probability*, ou probabilidade de entrega de pacotes) entre cada par de dispositivos. Esse valor pode ser estimado inicialmente ou empregado a partir de valores reais do histórico da rede, caso já estivesse em operação. O PDP é um valor percentual que descreve a proporção média de pacotes entregues de forma bem-sucedida entre cada par de dispositivos ponto-a-ponto; ou seja, um par de dispositivos com PDP 80% perde, em média, um pacote a cada cinco tentativas. Neste trabalho, o PDP é arbitrado como proporcional ao sinal de potência percebido conforme estabelecido pelo modelo expandido de Friis.

A partir do PDP, estima-se o ETX (*Expected Transmission Count*, ou quantidade esperada de transmissões). O ETX é a variável que descreve a quantidade média de tentativas de transmissão que um par de dispositivos requer para ser bem sucedido na entrega de um pacote, sendo definido como o inverso do PDP: um par de dispositivos com PDP de 80% possui um ETX de 1,25; ou seja, são necessárias em média 1,25 tentativas de transmissão para que se concretize uma transmissão bem-sucedida. Como descrito na subseção 2.1, esta variável é utilizada como parâmetro da centralidade de proximidade.

O termo  $Carga_{PA}$  é uma proporção de quantos dispositivos estão conectados no ponto de acesso de uma determinada cadeia de dispositivos com relação ao total de dispositivos. Por exemplo, uma cadeia de 50 dispositivos conectados no mesmo ponto de acesso, em uma rede com 200 dispositivos de campo ao todo, teria uma carga adicional de  $Carga_{PA} = 50/200 = 0,25$  no ponto de acesso e, por conseguinte, em cada dispositivo da cadeia. Multiplicasse o termo  $Carga_{PA}$  por uma constante  $\lambda$  cuja finalidade é ponderar a relevância do balanceamento de pontos de acesso dentro do algoritmo RPL.

O algoritmo inicializa atribuindo custos de zero para pontos de acesso e tendendo a infinito para os dispositivos. Iterativamente até atingir regime permanente, os dispositivos de campo varrem vizinhos em busca de enlaces ótimos, caracterizados por terem o menor custo conforme regido pela equação 5.

### 3. CRITÉRIOS DE PERFORMANCE

#### 3.1 Confiabilidade

A confiabilidade de redes industriais sem fio, conforme (Pister et al., 2011), pode ser definida como a taxa de pacotes entregues de forma bem-sucedida a seus destinatários fim-a-fim com relação ao total de pacotes gerados pela rede (equação 6).

$$Confiabilidade = \frac{pacotes_{entregues}}{pacotes_{perdidos} + pacotes_{entregues}} \quad (6)$$

A perda de um pacote durante uma transmissão ponto-a-ponto não necessariamente acarreta em deterioração de confiabilidade, visto que o emissor pode buscar a retransmissão em oportunidades futuras fazendo uso de redundância de enlaces. Neste trabalho, a deterioração de confiabilidade ocorre quando a rede desiste de transmitir um dado ao seu destinatário final (o ponto de acesso) por um de dois motivos: o pacote se tornou obsoleto perante a demandada taxa de atualização da rede (determinado pelo TTL de cada pacote, descrito na subseção 3.2), ou um dispositivo precisou gerar um novo pacote mas sua memória não possuía disponibilidade para armazenar mais dados (determinado pelo limite de pacotes no *buffer* dos nodos, descrito na subseção 3.3).

#### 3.2 Time to Live

Em uma rede industrial aplicada a, por exemplo, uma rede de sensores em uma fábrica, a taxa de atualização refere-se à frequência com que os dados de sensoriamento são coletados pelos nodos, encaminhados ao gerenciador e efetivamente processados e disponibilizados para a aplicação. Diferentes aplicações requerem taxas de atualização consideravelmente diferentes. Via de regra, redes industriais sem fio IEEE 802.15.4 como o WirelessHART foram projetadas para atender aplicações de relativa baixa taxa de atualização e consequente baixo consumo energético (Gungor et al., 2010), tornando-as mais apropriadas para aplicações em automações de processo (Luvisotto et al., 2017).

A transmissão de pacotes ocupa recursos da rede, e continuar transmitindo dados obsoletos perante a demandada taxa de atualização seria um desperdício de recursos. Uma das ferramentas que ajuda uma rede como o WirelessHART a não desperdiçar recursos com dados obsoletos é o TTL (*Time to Live*). Cada pacote gerado pela rede possui uma estampa temporal que indica o ASN (*Absolute Slot Number*), ou seja, em qual *slot* de tempo esse pacote foi gerado. Com essa informação e sabendo qual o ASN atual, dispositivos são capazes de calcular a idade em *slots* de um pacote salvo em seu *buffer*. O TTL é uma informação associada a cada pacote que indica qual a idade máxima em que esse pacote ainda será considerado não-obsoleto. Comparando a idade atual do pacote contra seu TTL, dispositivos podem tomar a decisão de descartar pacotes com informações demasiadamente antigas e consequentemente deteriorar a confiabilidade da rede.

O TTL varia conforme o tipo de cada mensagem presente no pacote e conforme os critérios de performance demandados pela aplicação. Uma rede que requeira uma taxa de atualização maior pode apresentar TTLs menores, visto que, nesse caso, dados de processo se tornam obsoletos mais rapidamente. Nas simulações deste trabalho, o TTL é avaliado conforme *input* do usuário em termos da quantidade de ciclos de iteração da simulação, que leva em consideração o provisionamento de *slots* necessário para cada nodo e a redundância de enlace que cada par de dispositivos possui. Arbitram-se TTLs que simulem taxas de atualização entre 2 e 10 segundos para os variados cenários de escalabilidade, conforme valores usuais encontrados em aplicações industriais.

### 3.3 Buffer

A quantidade de memória RAM disponibilizada para cada dispositivo armazenar pacotes de dados é um critério que impacta diretamente o custo em *hardware* do projeto de automação. Projetar nodos com capacidade ilimitada de armazenamento seria um cenário idealizado de simulação que, além de não representar a realidade industrial, se mostra desnecessário tendo em vista as limitações de taxa de atualização - aumentar memória somente para armazenar pacotes obsoletos seria desperdício de recursos.

Desta forma, as simulações deste trabalho determinam a memória disponível de cada dispositivo em função da quantidade *buffer* de pacotes que cada nodo pode armazenar, conforme *input* do usuário. A tentativa de recebimento de novos pacotes enquanto o dispositivo receptor possui *buffer* cheio acarreta em uma falha automática de transmissão (cujo emissor pode buscar retransmissão posteriormente), mas a geração de um novo pacote por um dispositivo com *buffer* cheio acarreta em imediato descarte do pacote e conseqüente deterioração de confiabilidade. O tamanho de *buffer* é arbitrado como 10 de forma padrão para todos os cenários de simulação, por ser indicado como valor padrão conforme (Pister et al., 2011).

## 4. METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO

Para avaliar a performance de redes industriais sem fio sob influência de aumento de escala, este trabalho emprega simulações implementando características das camadas física, de enlace e de rede do protocolo WirelessHART. O algoritmo desenvolvido em *script* Matlab inicia a partir de parâmetros de entrada como quantidade de nodos, quantidade de pontos de acesso, área disponível para posicionamento dos nodos, e critérios de performance como taxa de atualização e mínimo grau de redundância. Estabelece-se também parâmetros como tamanho de *buffer* dos dispositivos (quantos pacotes cada um pode armazenar em sua memória RAM), *Time To Live* dos pacotes e quantidade de ciclos a serem operados.

Uma vez inicializada, a simulação distribui de forma randômica cada nodo e ponto de acesso dentro de coordenadas cartesianas bidimensionais dentro do limite de área indicado. A figura 1 mostra a representação de uma rede simulada com 400 dispositivos e 3 pontos de acesso, destacando as rotas de *uplink* primárias de cada nodo e destacam os enlaces de dispositivos com ligação direta a um ponto de acesso. Calcula-se o PDP entre cada par de dispositivos a partir do sinal percebido do modelo expandido de Friis, usando como parâmetros as distâncias cartesianas e as interferências aleatórias do ambiente industrial. A partir de então, o algoritmo RPL é executado até atingir um regime permanente onde todos os nodos possuam ao menos uma rota possível para um ponto de acesso.

A simulação em seguida realiza o escalonamento da rede. Provisiona-se uma quantidade de *slots* para cada dispositivo proporcional à quantidade de dispositivos abaixo de si na cadeia de *uplink*, assim como uma proporção adicional de *slots* referente à redundância de enlaces estabelecida pelo usuário. A ordenação sequencial de *slots* para cada par de nodos é randômica.

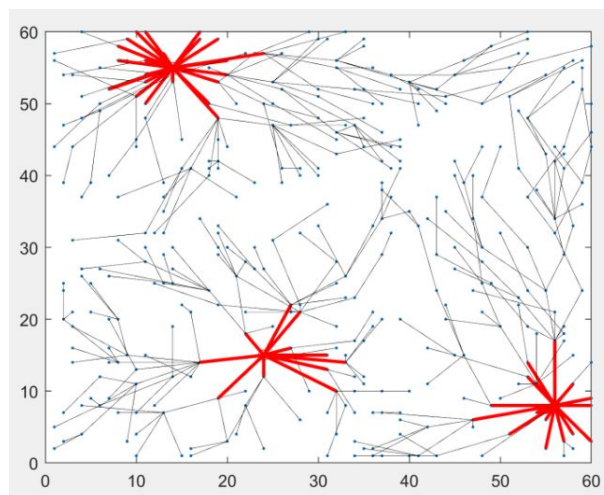


Figura 1. Representação de uma rede simulada.

Conforme *input* do usuário, por  $n$  ciclos de simulação opera-se a rede. A cada ciclo, cada dispositivo de campo gera um pacote a ser destinado ao ponto de acesso no topo de sua cadeia *uplink*. Varrem-se os *slots* arbitrando aleatoriamente se a troca de pacotes entre emissor e receptor foi bem-sucedida, de acordo com seu PDP. Após gerar ou receber dados, cada dispositivo pode armazenar um número de pacotes predeterminado pelo usuário, e estar com *buffer* cheio ao se receber ou gerar um novo pacote ocasiona em imediata falha. Além disso, a cada novo ciclo, cada dispositivo varre seu *buffer* para identificar e descartar pacotes com *Time To Live* obsoleto.

Por fim, calcula-se a confiabilidade geral da rede através do percentual de pacotes entregues de forma bem-sucedida aos pontos de acesso. A perda de pacotes fim-a-fim pode ser ocasionada por *buffer* cheio na geração ou por obsolescência de TTL. Todas as centralidades podem ser inferidas desde a etapa de roteamento, ao final do algoritmo RPL. As centralidades de grau e de intermediação levam em consideração as rotas primárias entre cada dispositivo e seu ponto de acesso primário, e a centralidade de proximidade leva em consideração o seu custo total no RPL como valor de distanciamento até um ponto de acesso.

## 5. RESULTADOS

Nesta seção, ilustra-se e analisa-se os resultados obtidos para os variados cenários de simulação, separando as análises em escalabilidade (subseção 5.1) e centralidades (subseção 5.2).

### 5.1 Escalabilidade

A figura 2 mostra o impacto em confiabilidade das redes aleatórias simuladas ao se variar as quantidades de dispositivos de campo ( $N$ ) e de pontos de acesso ( $NAP$ ). Para cada combinação de  $N$  e  $NAP$ , foram realizadas 100 simulações, cada uma com uma diferente distribuição espacial aleatória de nodos dentro da mesma área disponível (arbitrando-se uma proporção média de um nodo a cada nove metros quadrados). O gráfico superior indica o comportamento da média da confiabilidade, enquanto o gráfico inferior mostra o diagrama de caixa da confiabi-

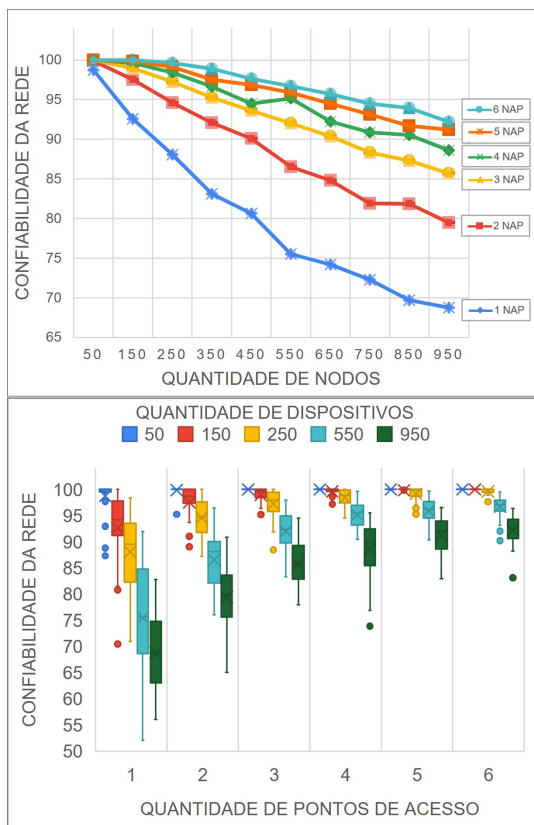


Figura 2. Escalabilidade da confiabilidade das redes simuladas.

lidade, realçando também a variabilidade de performance dos diferentes cenários.

A figura 2 expõe a escalabilidade da rede, evidenciando a relação entre a quantidade de nodos e a perda média de pacotes das redes simuladas. O impacto em confiabilidade ao se aumentar a quantidade de nodos é notável, visto que maiores quantidade e distância de nodos acarretam em mais saltos de transmissão necessários entre dispositivos e seus pontos de acesso, e quanto maiores essas cadeias de *uplink*, maior o impacto de mesmo uma única perda pontual de pacotes. Mesmo sendo possível retransmitir pacotes perdidos pontualmente em uma nova oportunidade apresentada por redundância de enlaces (arbitra-se para cada simulação que todos os enlaces possuem uma redundância de quatro *slots*, típico de redes WirelessHART), o efeito da perda ponto-a-ponto se repercute ao longo de toda a cadeia. Evidencia-se na subseção 5.2 que perdas pontuais criam maiores gargalos de transmissão em cadeias com maiores ramificações.

### 5.2 Centralidades

Para a avaliação de centralidade, coleta-se (a partir das mesmas simulações da subseção 5.1) quais dispositivos geraram algum pacote eventualmente descartado pela rede, seja por *buffer* cheio na geração desse pacote ou por obsolescência de TTL. Classificam-se esses dispositivos como “dispositivos faltosos”. A partir das métricas de centralidades destes dispositivos e dos dispositivos presentes em suas rotas primárias de *uplink*, observa-se o padrão de resultados mostrado na figura 3.

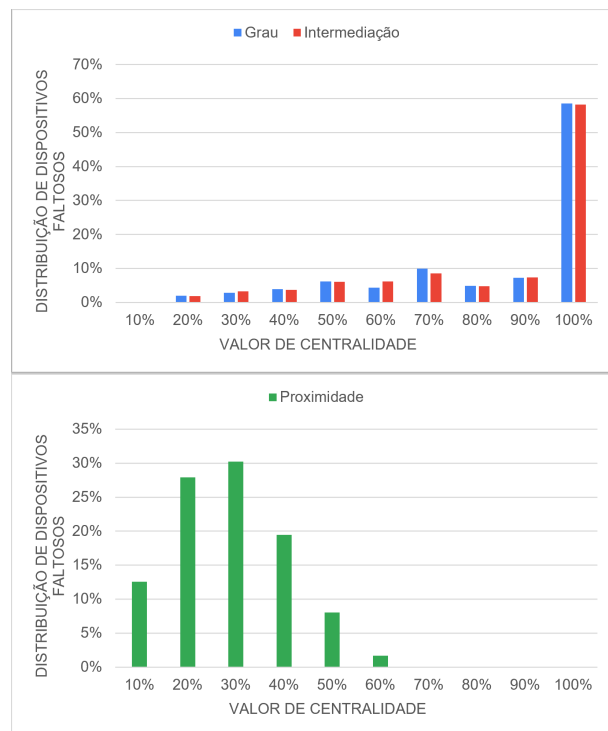


Figura 3. Distribuição das centralidades de dispositivos faltosos

O gráfico superior da figura 3 indica que, para aproximadamente 58% dos dispositivos faltosos, há algum dispositivo em sua cadeia de *uplink* que apresenta as maiores centralidade de grau e/ou de intermediação de toda a rede. Esse resultado implica que a maior reincidência de pacotes perdidos nas simulações se dá em cadeias que apresentam algum nodo com as maiores quantidades de vizinhos diretos (representado pela CG) e também do qual muitos outros nodos dependem para sua rota primária de *uplink* (representado pela CI). A semelhança da forma entre as distribuições de CG e CI também está correlacionada a este fenômeno: frequentemente o maior nodo da cadeia faltosa apresentava simultaneamente tanto os maiores valores de CG quanto os maiores valores de CI de toda a rede.

Como complemento, o gráfico inferior da figura 3 mostra a distribuição dos valores de centralidade de proximidade dos dispositivos faltosos. Infere-se pelo gráfico que não necessariamente os nodos com as maiores distância ETX da rede (indicados no gráfico como aqueles com as menores CP, entre 0 e 10%) são aqueles que mais reincidentemente geram pacotes que acabam perdidos. Em outras palavras, não há uma correlação explícita entre os nodos com maiores perdas pontuais e os nodos que mais impactam a confiabilidade da rede (perdas fim-a-fim).

Entretanto, cruzando os resultados de ambos os gráficos da figura 3 e observando as cadeias de *uplink*, percebe-se que os nodos que mais impactam confiabilidade são os nodos com maiores distâncias ETX que simultaneamente possuem em sua cadeia o(s) nodo(s) com maiores CG e CI. Dessa forma, a probabilidade de perda pontual se faz sim relevante à performance da rede, mas os impactos são consideravelmente mais acentuados em cadeias que possuem maior convergência de nodos, e os gargalos no

tráfego de comunicação tendem mais a se formar nos nodos convergentes.

Além disso, é possível inferir que o posicionamento dos pontos de acesso se mostra potencialmente mais relevante para a performance *uplink* das redes do que a sua quantidade, como mostrado no diagrama de caixa da figura 2. Uma distribuição de dispositivos que forme roteamentos com excessos de convergência de nodos tende a aumentar as incidências de formação de gargalos no fluxo de transmissão de dados, sendo que cadeias mais espaçadas, mesmo que com maiores perdas ponto-a-ponto, tenderão a apresentar menos perdas fim-a-fim e dar mais vazão aos pacotes.

A recorrência desses resultados permite deduzir que é possível buscar esse padrão de perdas em redes de forma preventiva, antes mesmo que as redes cheguem a entrar em operação, observação reforçada pelo fato que todas as centralidades podem ser calculadas assim que o algoritmo de roteamento está completo. Como trabalhos futuros, busca-se a criação de uma metodologia analítica que opere no algoritmo do gerenciador de uma rede centralizada de larga escala, que permita avaliar preventivamente os roteamentos calculados em busca de potenciais dispositivos faltosos a partir da avaliação das centralidades de grau, proximidade e intermediação, e sugira soluções como redistribuição espacial dos pontos de acesso para mitigar os gargalos de transmissão de pacotes.

## 6. CONCLUSÃO

Este trabalho avalia a escalabilidade de redes industriais sem fio centralizadas em termos da quantidade e da distribuição espacial de dispositivos de campo e pontos de acesso, mensurados a partir de critérios de centralidade de grau, de intermediação e de proximidade. Simula-se em *script* Matlab redes baseadas no protocolo WirelessHART, tomando-se como parâmetros a memória disponível no *buffer* dos nodos e a demanda usual de taxa de atualização, estabelecida pelo *Time to Live* de cada pacote. O principal critério de performance avaliado é a confiabilidade da rede, em termos de percentual de pacotes perdidos com relação ao total de pacotes gerados.

Os resultados mostram que as quantidades de nodos ( $N$ ) e de pontos de acesso ( $NAP$ ) são fatores de alta relevância para a performance média da rede, mas que redes com as mesmas combinações de  $N$  e  $NAP$  possuem alta variabilidade de performance em função também da distribuição espacial dos dispositivos. Através das análises de centralidade de grau, proximidade e intermediação, infere-se que há um padrão para a concentração de dispositivos faltosos (dispositivos que dão origem a ao menos um pacote perdido) presente na combinação entre cadeias *uplink* com altas quantidades de ramificações (representadas por dispositivos com altas centralidades de grau e intermediação) e dispositivos demasiadamente distantes em quantidade de saltos de seus pontos de acesso (representados por baixas centralidades de proximidade).

Os trabalhos futuros apontados a partir destas análises incluem a determinação de uma metodologia para a identificação preventiva de potenciais nodos faltosos com base na

análise de centralidades de seus roteamentos *uplink* antes de a rede ser posta em operação.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## REFERÊNCIAS

- Bonacich, P. (1987). *Power and Centrality: A Family of Measures*, volume 92. American Journal of Sociology.
- Borgatti, S.P. (2005). *Centrality and Network Flow*, volume 27. Social Networks.
- Friis, H.T. (1946). A note on a simple transmission formula. *Proceedings of the IRE*, 34.
- Gaitan, M.G., Almeida, L., Figueroa, A., and Dujovne, D. (2021). Impact of network centrality on the gateway designation of real-time tsch networks. *2021 17th IEEE International Conference on Factory Communication Systems (WFCS)*.
- Gungor, V.C., Lu, B., and Hancke, G.P. (2010). Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(10), 3557–3564.
- Luvisotto, M., Pang, Z., and Dzung, D. (2017). Ultra high performance wireless control for critical applications: challenges and directions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13, 1448–1459.
- Pister, K.J., Watteyne, T., Su, R., and Zats, S. (2011). Scalability of time synchronized wireless sensor networking. *IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*.
- Saunders, S. and Aragon-Zavala, A. (2007). *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*. Eds. Wiley, 2 edition.
- Singh, O. and Rishiwal, V. (2017). On the scalability of routing protocols in wsn. *2017 3rd International Conference on Advances in Computing, Communication and Automation*.
- Winter, T., Thubert, P., Brandt, A., Clausen, T., Hui, J., Kelsey, R., Levis, P., Pister, K., Struik, R., , and Vasseur, J.P. (2012). *IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy Networks*. IETF RFC 6550.