



# Desempenho de Redes Wi-SUN em Estruturas Verticais Longas: Estudo de Caso no Conjunto Residencial Yachthouse

**Tema:** Tecnologias Emergentes

**Autores:** Lígia May Taniguchi, Guilherme Nogueira, Francisco Agenario Vasconcelos Junior, Felipe Moreira Braga, Pierry Moreno Reinaldo, Joe Niehues Bett Junior, Eduardo Hampel

**Co-Autores:** -

**Empresa:** Eletra Energy Solutions

---

## Resumo

O avanço do uso de sistemas inteligentes de medição de energia elétrica, aliado a crescente urbanização e a densidade populacional em centros urbanos exigem soluções eficientes para a comunicação de dispositivos em estruturas verticais, como condomínios em substituição a sistema de telemedição convencionais, como o sistema baseado em redes RS-485. Este estudo analisa a aplicação de redes Mesh AMI (Advanced Metering Infrastructure) baseadas na tecnologia Wi-SUN em um dos maiores prédios residenciais da América Latina, e a necessidade da realização de adaptações técnicas para viabilizar a aplicação de soluções AMI em ambientes complexos e confinados para estabelecimento de redes RF Mesh. Este trabalho apresenta os resultados de testes reais de comunicação Wi-SUN realizados em um condomínio de duas torres na cidade de Balneário Camboriú, SC. Avaliamos inicialmente a performance de um ponto de acesso (AP) AMI com antena omnidirecional, identificando desafios como alta quantidade de saltos e baixa resiliência de rotas, particularmente na segunda torre. Após a substituição da antena por uma Yagi direcionada, observamos melhorias significativas na estabilidade e na redução de número de saltos na rede Mesh. O artigo também discute medições de sinal nos arredores da estrutura, explorando o impacto do uso de antenas direcionais em APs de redes AMI. Este trabalho contribui para o desenvolvimento de estratégias adaptativas para redes Mesh, considerando as dificuldades encontradas em ambientes desafiadores, onde as condições impõem a necessidade de soluções inovadoras e robustas.

## 1. Introdução

Nas últimas décadas, as redes inteligentes, conceituadas como Smart Grids, foram apresentadas como solução para uma medição de energia confiável e em tempo real. Um dos componentes fundamentais dessa infraestrutura é chamada de rede FAN (Field Area Network) na qual permite a coleta automática de dados dos medidores inteligentes em ambientes externos (FILGUEIRAS, 2023). Nesse cenário, as redes AMI, que utilizam a tecnologia Wi-SUN FAN, são fundamentais para a modernização dos sistemas de medição, garantindo alta eficiência e confiabilidade, principalmente em áreas urbanas (HIRAKAWA, 2023). As redes Mesh oferecem alto desempenho em cenários urbanos, mas enfrentam desafios significativos em edifícios com estruturas altas e densas, principalmente, encontradas em grandes centros urbanos.

Usualmente, em edifícios de grande porte, as Distribuidoras utilizam sistemas de telemedição baseado em redes RS-485. Como para esses empreendimentos os quadros de medidores estão distribuídos nos andares por conta de utilização de barramento blindado para distribuição de energia, junto a prumada é também lançada uma rede RS-485 para comunicação exclusiva dos medidores. Essa rede por ser cabeada, apresenta diversas dificuldades em sua implementação, bem como manutenção. Outro ponto limitante, é que por ser uma rede serial, o tráfego de dados é limitado, usualmente a rede é utilizada somente para coleta dos registradores de energia utilizados para faturamento dos clientes. Outro fator limitante, é em relação aos fabricantes de medidores, que possuem produção reduzida de medidores com portas de comunicação RS-485 e elevado custo. Neste sentido a aplicação de medidores inteligentes traz enormes benefícios quando comparado a este cenário, uma vez que estes medidores possuem diversos recursos como, memória de massa, dados de qualidade de energia, corte e religamento remoto, alteração tarifária remota. Desta forma, o ganho operacional para a concessionária é relevante quando comparado a medidores com porta de comunicação RS-485 e, além disso, elimina a necessidade de sua implementação. O cenário analisado neste artigo refere-se à otimização de uma rede Mesh AMI no Yachthouse, um dos maiores edifícios residenciais da América Latina, localizado em Balneário Camboriú, SC. O edifício possui duas torres com aproximadamente 281 metros de altura. Atualmente, há 182 medidores inteligentes instalados, com previsão de aumento à medida que o edifício se torne mais habitado. A instalação ocorre nos quadros de medidores localizados a cada três andares, o que agrava as dificuldades de comunicação devido à robustez da estrutura civil, composta majoritariamente por concreto armado e aço. Essas características resultam em alta atenuação do sinal RF e não possibilitam a flexibilidade de rotas da rede Mesh, se tornando um ambiente desafiador (SHEIKH, 2009 e DURANTE, 1973). Assim, este artigo tem como objetivo demonstrar que a otimização da comunicação em redes AMI, instaladas em edifícios residenciais de grande porte com configurações verticais e estruturas robustas, pode ser alcançada por meio de uma solução externa única. Essa abordagem elimina a necessidade de modificações individuais nos medidores inteligentes instalados em diferentes andares, simplificando a implementação, reduzindo custos e melhorando a eficiência da rede.

## 2. Desenvolvimento

### 1. Metodologia do Estudo

A avaliação foi realizada em um condomínio composto por duas torres, totalizando 182 medidores de energia conectados a um AP Wi-SUN. O estudo foi conduzido em dois cenários de teste, avaliando o desempenho da comunicação dos medidores ao substituir a antena do AP padronizada como omnidirecional por uma direcional. A seguir estão representadas a distribuição dos medidores e os dois cenários de teste.

#### Distribuição dos Medidores

- O condomínio possui 81 andares em ambas as torres, sendo 75 andares com medidores instalados;
- As instalações de medidores acontecem nos quadros de medição localizados a cada 3 andares, sendo o segundo o andar como o primeiro a conter medidores instalados;
- Os quadros de medição são compostos por caixas metálicas com visualização apenas para o display do medidor através de abertura fechada por vidro, como mostra a Figura 1, sendo que não há janelas ou aberturas no hall onde estão localizados os medidores;
- Os quadros seguem especificação da distribuidora: **E-321.0004**.



Figura 1: (a) Quadro de medição composto por seis medidores inteligentes com a caixa metálica aberta. (b) Caixa metálica fechada com a abertura fechada de vidro para a visualização do display. A tabela a seguir apresenta a disposição física dos medidores por andar, separados por torre, e o total geral:

Andares	Nº de Medidores		Total Geral
	Torre 1	Torre 2	
2	2	0	2
9	5	5	10
12	6	4	10
15	6	3	9
18	6	2	8
21	0	2	2
24	4	4	8
27	3	6	9
30	2	3	5
33	4	4	8
36	4	2	6
39	5	3	8
42	4	5	9
45	2	4	6
48	5	3	8
51	4	5	9
54	2	4	6
57	3	4	7
60	4	6	10
63	4	3	7
66	4	4	8
69	6	6	12
72	5	6	11
75	3	1	4
Total Geral	93	89	182

## Cenários: Configuração padrão e otimizada

Os cenários avaliados foram a Configuração Padrão e a Configuração Otimizada. Ambos os cenários foram analisados por meio da coleta das seguintes métricas: RSSI (Indicador de Intensidade do Sinal Recebido), LQI (Indicador de Qualidade do Link), o número de saltos (*hops*) e a taxa de sucesso na transmissão de pacotes.

No Cenário 1: Configuração Padrão, foi empregada uma antena omnidirecional com ganho de 2.5 dBi, posicionada verticalmente acima do AP. O AP foi instalado no poste da rede de distribuição mais próximo ao condomínio em torno de 30 metros à frente, utilizando o espaço disponível para sua fixação.

No Cenário 2: Configuração Otimizada, a antena omnidirecional foi substituída por uma antena direcional YAGI de 12 elementos, direcionada para o centro das torres. A antena possui ganho de 14 dBi e ângulo de meia potência de  $40^\circ$  na horizontal e  $44^\circ$  na vertical.

Abaixo são apresentadas as instalações do AP nos dois cenários, sendo ao fundo, o condomínio com os medidores instalados.

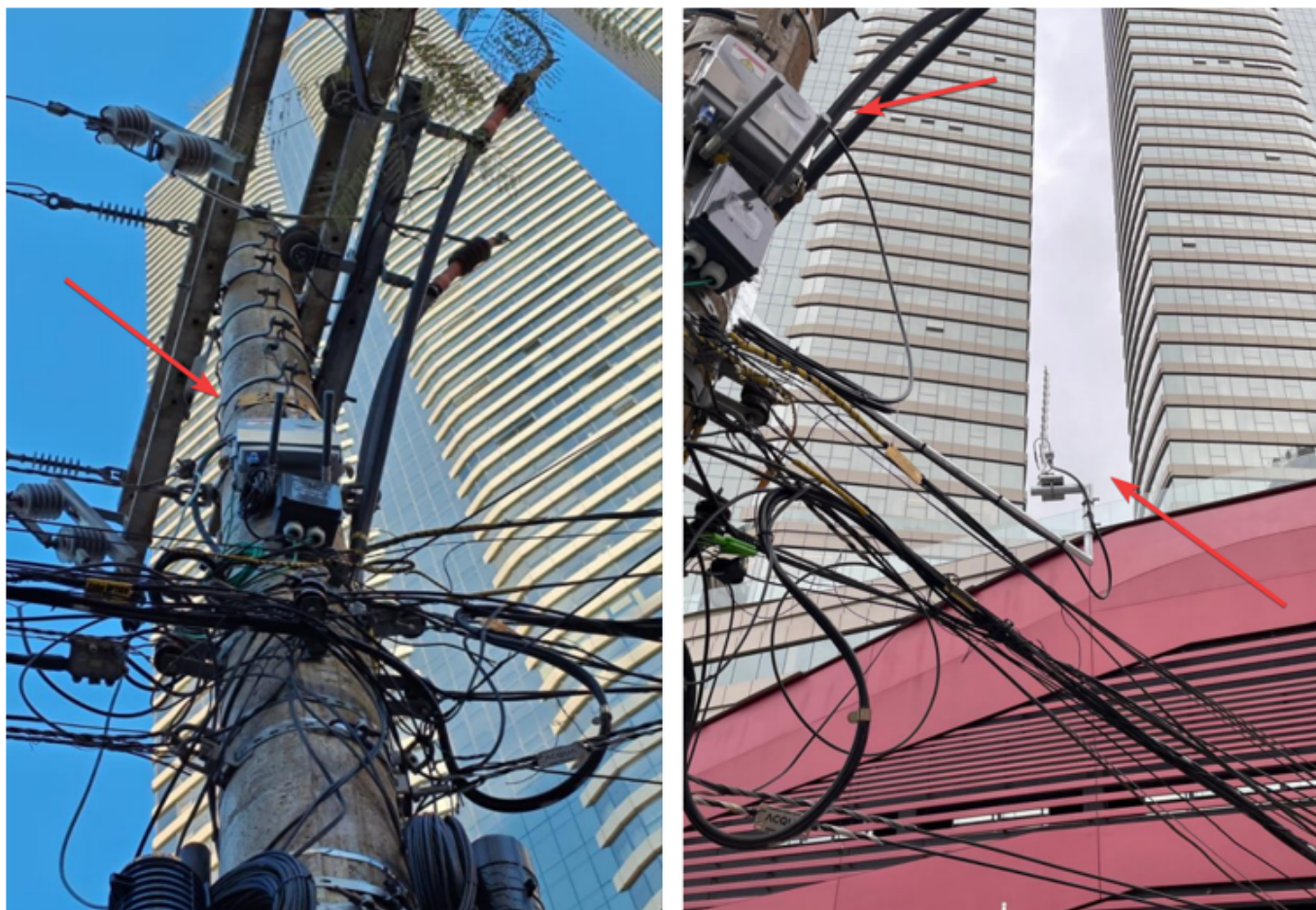


Figura 2: (a) AP com antena omnidirecional padrão. (b) AP com antena direcional YAGI.

## 2. Resultados e Discussões



Inicialmente, foram comparadas as topologias de rede de cada cenário. A topologia descreve o trajeto de comunicação entre o AP e cada medidor, ou seja, quanto maior o número de níveis, maior será o número de saltos necessários para que a comunicação entre o AP e o medidor seja estabelecida. Um número elevado de saltos indica uma dependência de um número maior de dispositivos, aumentando significativamente a latência e a taxa de erro na transmissão de pacotes entre o concentrador da rede AML e o medidor. Assim, o objetivo é reduzir o número de saltos, garantindo maior estabilidade e eficiência na comunicação.

No Cenário 1, com antena omnidirecional, observou-se que a topologia de rede segue um padrão em cascata (Figura 3), no qual, em alguns casos, um grupo de medidores filhos depende de apenas um medidor pai. Embora diferentes dias tenham sido analisados, a topologia não apresentava alterações significativas e com poucas opções de rotas de comunicação entre os medidores. Isso indica uma configuração limitada em termos de flexibilidade e redundância nas rotas de comunicação.

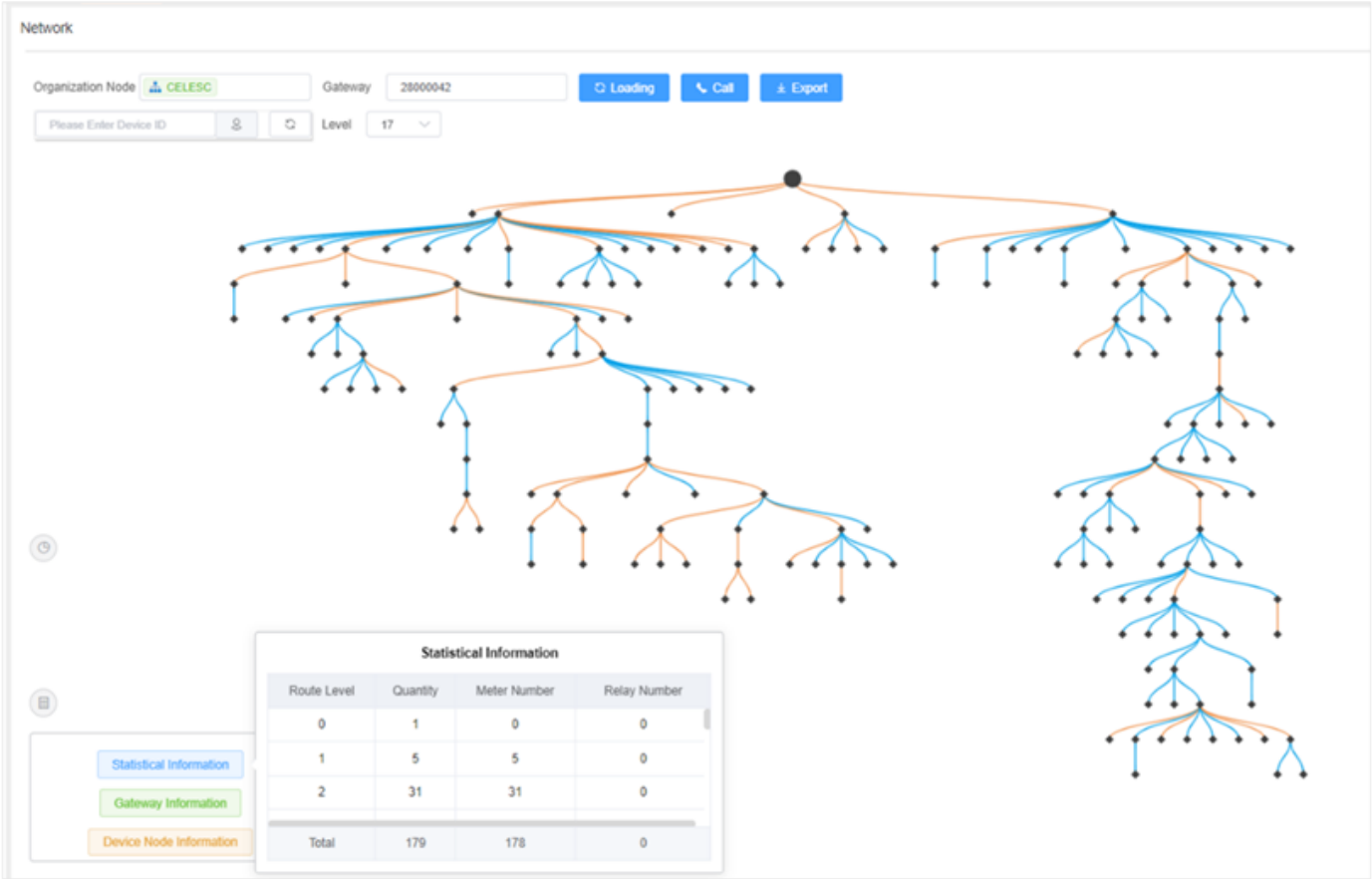


Figura 3: Topologia de rede do AP na data de 06/10/2024.

No Cenário 2, observou-se um aumento significativo no número de medidores conectados diretamente ao AP, como mostra a Figura 4. A estrutura de comunicação apresentou um padrão mais robusto e resiliente, onde o número de camadas na rede foi muito inferior ao cenário anterior. Os dispositivos com maior número de hops precisam de apenas 3 saltos para se conectarem ao AP. A redução da dependência de longas ramificações de medidores e proporciona uma rede mais eficiente e resiliente, com maior taxa de sucesso de comunicação e menor latência.

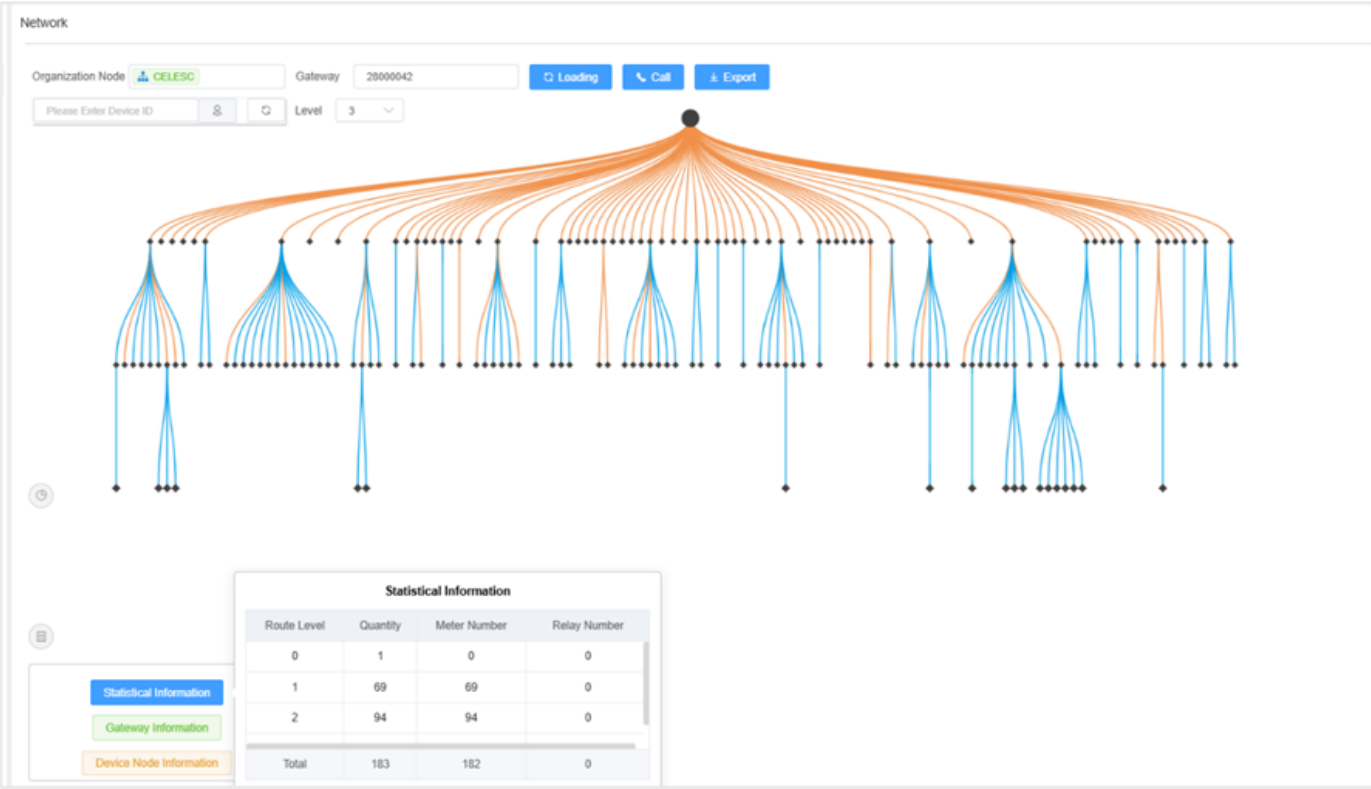


Figura 4: Topologia de rede do AP na data de 25/11/2024.

A seguir, foi realizada uma comparação entre os dias 01/10/2024 e 01/12/2024, abordando o número de medidores conectados, o número de saltos, as métricas de RSSI e LQI, e a taxa de sucesso na transmissão dos dados de energia.

A primeira análise revela um aumento no número de medidores conectados diretamente ao AP e uma redução significativa no número de saltos, resultando em uma rede mais eficiente e estável.

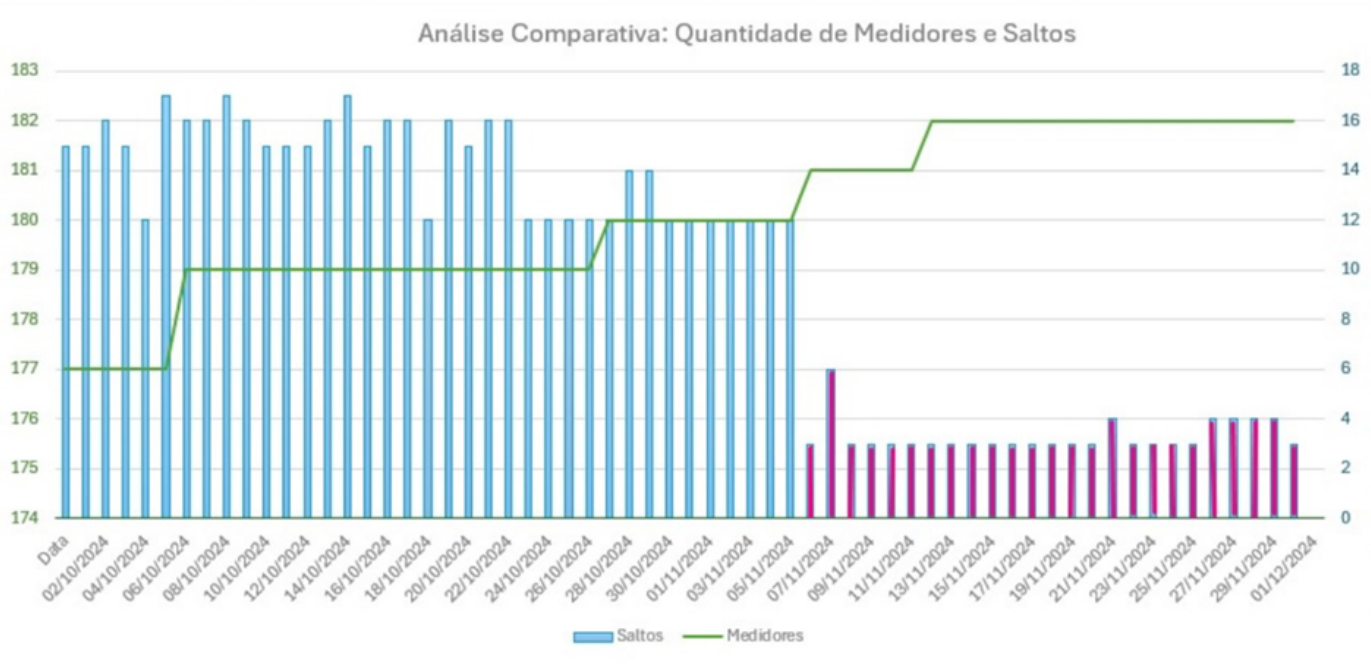


Figura 5: Análise Comparativa entre quantidade de medidores (eixo y – esquerda) e número de saltos (eixo y – direita), sendo a troca da antena realizada no dia 06/11.

Na Figura 6 é apresentada a comparação das medições de RSSI e LQI dos quatro medidores que permaneceram conectados diretamente ao AP depois da troca da antena, sendo os únicos a manterem essa conexão direta durante o período analisado e dispostos no segundo e décimo oitavo andar. Observou-se uma redução nos valores desses parâmetros, com os menores valores registrados sendo -86,75 dBm para o RSSI e 101,75 para o LQI. Apesar da diminuição, ambos os valores permanecem dentro do intervalo aceitável, garantindo uma comunicação eficaz entre os medidores. A redução ocorreu porque os medidores conectados diretamente à antena omnidirecional estavam localizados nos andares inferiores, e, com a substituição da antena, o feixe foi redirecionado para os andares centrais, alterando a distribuição do sinal.

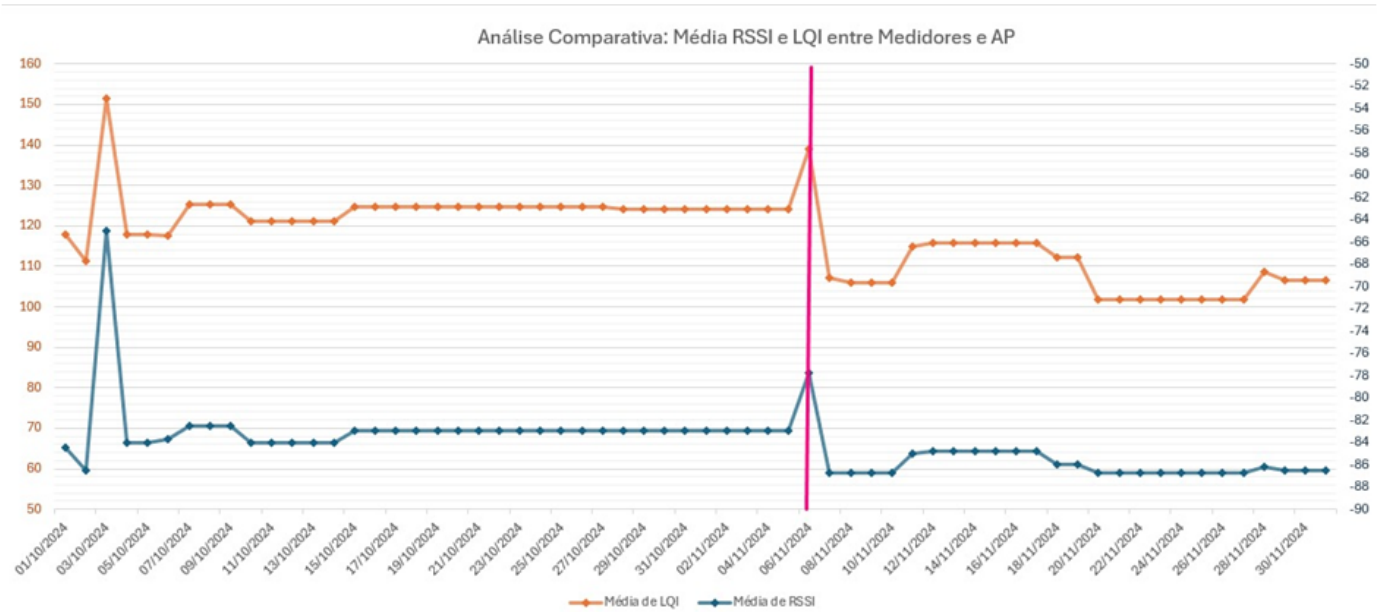


Figura 6: Análise Comparativa entre LQI (eixo y – esquerda) e RSSI (eixo y – direita), sendo a linha vertical evidenciando a data de troca da antena realizada no dia 06/11.

A terceira análise, ao comparar a taxa de sucesso no envio dos dados de energia, mostra um aumento significativo na recepção dos pacotes após a alteração da antena. Isso reflete uma melhoria na estabilidade da comunicação, crucial para garantir a confiabilidade e a precisão dos dados em sistemas de medição inteligente, além de assegurar a continuidade das operações de monitoramento.

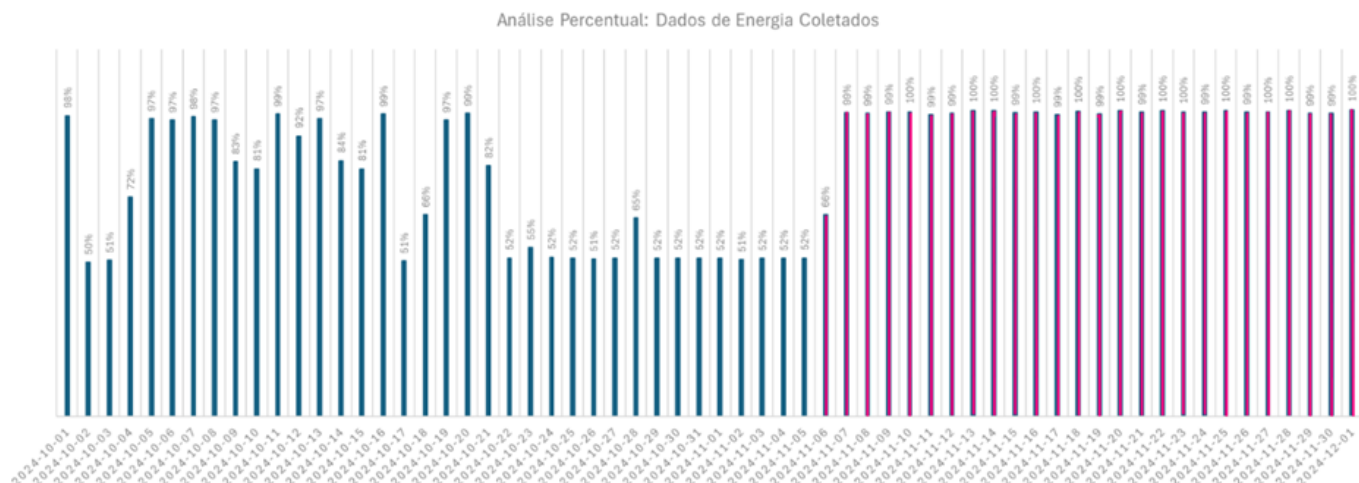


Figura 7: Análise Percentual de Pacotes de dados de Energia Coletados via Sistema de Monitoramento, sendo a troca da antena realizada no dia 06/11.

### 3. Avaliação Complementar

Considerando que a utilização de antenas direcionais poderia subutilizar o ponto de acesso (AP), devido à irradiação concentrada no lóbulo frontal da antena, o que resultaria em uma redução na cobertura horizontal nas demais direções azimutais, foi realizada uma série de medições práticas para avaliar o impacto dessa configuração em redes com topologia Mesh.

Apesar do uso de uma antena direcional, o sinal se propagou adequadamente ao redor do ponto de acesso (AP). Foram visitados 30 pontos de medição, utilizando um medidor de teste e um analisador de espectro. Os resultados foram representados por cores: verde, laranja e vermelha, indicando respectivamente valores de LQI ótimo, aceitável e sem comunicação.



Figura 8: Mapeamento da intensidade e qualidade do sinal entre o AP e um medidor de teste.



Ao compararmos os resultados do analisador de espectro, confirmamos as medições obtidas na imagem anterior. A análise entre os pontos 17 e 20 revela uma redução na intensidade do sinal entre os pontos, evidenciando a variação na propagação do sinal ao longo da área de cobertura.



Figura 9: Comparação da intensidade do sinal coletado no espectro de operação da comunicação, sendo o ponto 17 à esquerda e o ponto 20 à direita.

### 3. Conclusão

A implementação de medidores inteligentes com comunicação via rede Mesh Wi-SUN trouxe benefícios expressivos para as distribuidoras de energia, especialmente em edifícios de grande porte, ao eliminar a complexidade e os custos da infraestrutura cabeada RS-485. A rede Wi-SUN permitiu a coleta eficiente de dados para faturamento e habilitou funções avançadas, proporcionando ganhos operacionais, maior eficiência e redução nos custos de implementação e manutenção. A substituição da antena omnidirecional pela antena direcional YAGI resultou em melhorias notáveis na topologia da rede, otimizando a comunicação, reduzindo o número de saltos e aumentando a quantidade de medidores conectados diretamente ao AP. Isso indicou uma rede mais eficiente e estável, com maior flexibilidade nas rotas de comunicação e menor dependência de dispositivos intermediários. Além disso, como resultado da troca, observou-se a redução nos valores de RSSI e LQI dos quatro medidores que permaneceram conectados diretamente ao AP. Embora a redução fosse esperada devido à mudança na distribuição do sinal para os andares superiores, os valores permaneceram dentro dos limites aceitáveis, comprovando a qualidade da comunicação pela taxa de sucesso no envio dos pacotes de energia, que variou entre 99% e 100%. As medições adicionais sobre a possível subutilização do AP devido à irradiação da antena YAGI não mostraram impacto negativo significativo, com a cobertura geral do sinal sendo satisfatória em todas as direções relevantes, cobrindo uma região extensa da orla. Em suma, a utilização da antena direcional YAGI resultou em uma rede mais robusta e otimizada para redes de medição inteligente, melhorando a comunicação com uma substituição simples e externa ao condomínio. Esse estudo reforça a importância de escolhas estratégicas de infraestrutura, como a seleção de antenas adequadas para maximizar o desempenho das redes em ambientes com topologia Mesh.

## 4. Referências bibliográficas

1. Hirakawa, R., Mizutani, K., & Harada, H. (2023). Specification and performance analysis of Wi-SUN FAN. IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 4, 849-866. <https://doi.org/10.1109/OJVT.2023.3236592>
2. Filgueiras, A. Análise comparativa de redes FAN para telemedicação do Grupo B. Sendi, 2023.
3. J. M. Durante, "Building penetration loss at 900 MHz," 24th IEEE Vehicular Technology Conference, Cleveland, OH, USA, 1973, pp. 81-87, doi: 10.1109/VTC.1973.1622201.
4. A. U. H. Sheikh and Y. Al-Moallem, "Channel characterization in a tall building with an externally located transmitter," 2009 7th International Conference on Information, Communications and Signal Processing (ICICS), Macau, China, 2009, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICICS.2009.5397726.
5. **E-321.0004** - CAIXAS PARA APLICAÇÃO EM MEDIÇÃO DESCENTRALIZADA E COM UTILIZAÇÃO DE BARRAMENTO BLINDADO, <https://celesc.com.br/arquivos/normas-tecnicas/padrao-entrada/E-321.0004.pdf>