v7.n10.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

IMPACTOS DA MODERNIZAÇÃO DA COMUNICAÇÃO EM UMA REDE DE TELEMETRIA PARA BOMBEAMENTO DE VINHAÇA

IMPACTS OF COMMUNICATION MODERNIZATION ON A TELEMETRY NETWORK FOR VINASSE PUMPING

IMPACTOS DE LA MODERNIZACIÓN DE LAS COMUNICACIONES EN UNA RED DE TELEMETRÍA PARA EL BOMBEO DE VINAZA

Nayan Leite[1], Ronaldo Gomes Figueira[2]

e7109155

https://doi.org/10.47820/recima21.v7i10.9155

PUBLICADO: 10/2026

RESUMO

Este estudo analisa os impactos da modernização da comunicação em uma rede de telemetria aplicada ao bombeamento de vinhaça no setor sucroenergético. Comparou-se uma infraestrutura legada, baseada em rádios GE MDS TransNET 900 e comunicação predominantemente serial, com uma solução modernizada utilizando rádios Schneider Electric Trio JR900 e comunicação Ethernet baseada em TCP/IP. A pesquisa é aplicada, com abordagem qualitativa e quantitativa, desenvolvida por meio de estudo de caso, pesquisa bibliográfica e documental e medições em dois enlaces de rádio. Foram avaliados RSSI, potência de transmissão, VSWR, latência e falhas registradas pelo sistema supervisório. As condições foram observadas em janelas consecutivas de uma hora, mantendo-se os demais elementos físicos dos enlaces. Após a modernização, a taxa de falha caiu de 26,07% para 0,042% no enlace Indústria-Booster e de 15,00% para 0,087% no enlace Booster-Borsari, com taxas de sucesso superiores a 99,9%, mesmo com maior volume de transmissões no período. Também foram observados maiores níveis de sinal recebido e ampliação dos recursos de diagnóstico e integração. Os resultados evidenciam melhoria expressiva da comunicação nas condições avaliadas e maior capacidade de evolução da infraestrutura de controle e supervisão.

PALAVRAS-CHAVE: Automação industrial. Bombeamento de vinhaça. Comunicação por rádio. Modbus TCP. Modernização tecnológica. Telemetria industrial.

ABSTRACT

This study analyzes the impacts of communication modernization on a telemetry network used for vinasse pumping in the sugar-energy sector. A legacy infrastructure based on GE MDS TransNET 900 radios and predominantly serial communication was compared with a modernized solution using Schneider Electric Trio JR900 radios and Ethernet communication based on TCP/IP. The research is applied and adopts a qualitative and quantitative approach, combining a case study, bibliographic and documentary research, and measurements on two radio links. RSSI, transmission power, VSWR, latency, and communication failures recorded by the supervisory system were evaluated. The conditions were observed in consecutive one-hour windows while the remaining physical elements of the links were kept unchanged. After modernization, the failure rate decreased from 26.07% to 0.042% on the Industry-Booster link and from 15.00% to 0.087% on the Booster-Borsari link, with success rates above 99.9% despite a higher volume of transmissions during the period.

[1] Graduando em Engenharia Elétrica pela Universidade de Araraquara (UNIARA), com formação técnica em Automação Industrial e Eletrotécnica.

[2] Professor da Universidade de Araraquara (UNIARA), desenvolvendo atividades de ensino e capacitação nas áreas de Engenharia de Segurança do Trabalho, Eletroeletrônica e Automação Industrial.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Higher received signal levels and broader diagnostic and integration capabilities were also observed. The results indicate a marked improvement in communication under the evaluated conditions and greater capacity for future evolution of the control and supervisory infrastructure.

KEYWORDS: *Industrial automation. Industrial telemetry. Modbus TCP. Radio communication. Technological modernization. Vinasse pumping.*

RESUMEN
Este estudio analiza los impactos de la modernización de las comunicaciones en una red de telemetría aplicada al bombeo de vinaza en el sector sucroenergético. Se comparó una infraestructura heredada, basada en radios GE MDS TransNET 900 y comunicación predominantemente serial, con una solución modernizada que utiliza radios Schneider Electric Trio JR900 y comunicación Ethernet basada en TCP/IP. La investigación es aplicada y adopta un enfoque cualitativo y cuantitativo, combinando estudio de caso, investigación bibliográfica y documental y mediciones en dos enlaces de radio. Se evaluaron RSSI, potencia de transmisión, VSWR, latencia y fallas registradas por el sistema supervisor. Las condiciones se observaron en ventanas consecutivas de una hora, manteniéndose sin cambios los demás elementos físicos de los enlaces. Tras la modernización, la tasa de falla disminuyó de 26,07% a 0,042% en el enlace Industria-Booster y de 15,00% a 0,087% en el enlace Booster-Borsari, con tasas de éxito superiores al 99,9%, incluso con un mayor volumen de transmisiones durante el período. También se observaron mayores niveles de señal recibida y una ampliación de los recursos de diagnóstico e integración. Los resultados evidencian una mejora expresiva de la comunicación en las condiciones evaluadas y una mayor capacidad de evolución de la infraestructura de control y supervisión.

PALABRAS CLAVE: *Automatización industrial. Bombeo de vinaza. Comunicación por radio. Modbus TCP. Modernización tecnológica. Telemetría industrial.*

INTRODUÇÃO

A modernização da automação industrial está associada à necessidade de aumentar a confiabilidade, a integração e a disponibilidade de informações dos processos. Kagermann, Wahlster e Helbig (2013) relacionam esse movimento à integração entre sistemas físicos, comunicação e tecnologias digitais no contexto da Indústria 4.0.

Nesse cenário, a telemetria é fundamental em processos distribuídos geograficamente, pois permite adquirir, transmitir e supervisionar variáveis remotamente. Boyer (2009) destaca que sistemas de supervisão e aquisição de dados são empregados para acompanhar processos distribuídos e disponibilizar informações operacionais ao sistema de controle.

No setor sucroenergético, essa necessidade é relevante nas redes de bombeamento de vinhaça. A vinhaça é um subproduto líquido da produção de etanol amplamente empregado na fertirrigação, cujo armazenamento, transporte e aplicação devem observar critérios ambientais específicos (CETESB, 2015).

O transporte por bombeamento pode envolver grandes extensões territoriais e estações remotas, exigindo comunicação entre bombas, válvulas, instrumentos, controladores e sistemas

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

supervisórios. O monitoramento também possui importância ambiental, pois o manejo inadequado de efluentes com elevada carga orgânica pode comprometer o solo e os recursos hídricos (VON SPERLING, 2014).

Parte dessas redes ainda utiliza tecnologias legadas baseadas em comunicação serial, que podem limitar a capacidade de tráfego e a integração com equipamentos atuais. Arquiteturas baseadas em TCP/IP favorecem a interoperabilidade entre sistemas, e o Modbus TCP permite transportar mensagens Modbus em redes Ethernet/TCP/IP (MODBUS ORGANIZATION, 2006; TANENBAUM; WETHERALL, 2011).

Diante desse cenário, o objetivo geral deste trabalho é analisar a modernização do sistema de comunicação por rádio de uma rede de telemetria aplicada ao bombeamento de vinhaça, visando aumentar a confiabilidade da comunicação e possibilitar a atualização dos sistemas de controle e monitoramento.

Os objetivos específicos consistem em identificar as limitações da infraestrutura existente; caracterizar os requisitos da rede de telemetria; comparar as tecnologias de comunicação legada e modernizada; avaliar a migração para uma infraestrutura compatível com TCP/IP e Modbus TCP; e analisar indicadores como intensidade do sinal recebido, latência, falhas de comunicação e capacidade de transmissão de dados.

A justificativa concentra-se nos aspectos operacionais, tecnológicos e ambientais da modernização. Uma comunicação mais confiável pode reduzir indisponibilidades, facilitar o diagnóstico de falhas, ampliar as informações disponíveis ao supervisório e permitir a integração de equipamentos atuais. Eventuais reflexos econômicos associados à menor necessidade de intervenções corretivas e à maior agilidade de diagnóstico não foram quantificados neste estudo.

A partir dessas considerações, estabelece-se o seguinte problema de pesquisa: de que forma a modernização dos sistemas de comunicação por rádio pode melhorar a confiabilidade da telemetria e viabilizar a atualização dos sistemas de controle e monitoramento em uma rede de bombeamento de vinhaça?

Parte-se da hipótese de que a substituição de uma infraestrutura predominantemente serial por uma solução com maior capacidade de transmissão e suporte a TCP/IP pode aumentar a confiabilidade da comunicação, reduzir falhas na aquisição de dados e ampliar a integração com sistemas atuais de controle e supervisão. O trabalho foi desenvolvido como estudo de caso; portanto, seus resultados representam a instalação e as condições avaliadas e não devem ser interpretados como conclusões universais para sistemas de telemetria industrial.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico reúne conceitos de telemetria industrial, redes de comunicação, transmissão por rádio, tecnologias legadas, modernização da automação e aspectos ambientais do transporte de vinhaça, fornecendo a base para a comparação entre as infraestruturas estudadas.

1.1. Telemetria em sistemas industriais

A telemetria envolve a aquisição e a transmissão de informações provenientes de pontos geograficamente distantes, permitindo disponibilizar variáveis para acompanhamento e controle remoto. Boyer (2009) apresenta os sistemas SCADA como soluções para supervisão de processos distribuídos e centralização de informações de campo.

No bombeamento de vinhaça, a telemetria pode acompanhar pressão, vazão, temperatura, estados de bombas e válvulas, alarmes e outras condições operacionais, tornando a infraestrutura de comunicação essencial à continuidade do monitoramento.

1.2. Comunicação em redes industriais

Sistemas de automação dependem da comunicação entre instrumentos, controladores, interfaces homem-máquina e supervisórios. Tanenbaum e Wetherall (2011) apresentam o TCP/IP como arquitetura amplamente utilizada para interconexão de sistemas heterogêneos, característica relevante à integração de equipamentos industriais.

Entre os protocolos utilizados nesse ambiente está o Modbus. A especificação define uma estrutura de mensagens entre dispositivos, e sua implementação sobre TCP/IP permite o intercâmbio dessas mensagens em redes Ethernet (MODBUS ORGANIZATION, 2006, 2012).

A adoção de TCP/IP, entretanto, não garante isoladamente melhor desempenho: capacidade dos equipamentos, configuração, meio de transmissão e qualidade dos enlaces também influenciam a comunicação.

1.3. Sistemas de comunicação por rádio em telemetria

A comunicação sem fio é uma alternativa para interligar pontos nos quais a implantação de infraestrutura cabeada apresenta dificuldades técnicas ou econômicas, condição frequente em sistemas distribuídos por grandes extensões territoriais.

O desempenho de enlaces sem fio depende de potência, frequência, antenas, perdas, sensibilidade do receptor, interferências e condições de propagação (STALLINGS, 2005). Estudos recentes reforçam a necessidade de avaliar confiabilidade e ambiente de radiofrequência em aplicações industriais: Candell et al. (2023) destacam os efeitos de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

interferência e multipercurso, enquanto Tsallis et al. (2026) apontam confiabilidade, interoperabilidade e validação em campo como dimensões centrais das redes sem fio industriais.

Assim, a avaliação de uma rede de telemetria por rádio deve considerar não apenas o alcance físico, mas também a estabilidade e a capacidade de transportar o volume de informações requerido pelo sistema de controle e supervisão.

1.4. Limitações de tecnologias legadas

Sistemas de automação podem permanecer em operação por longos períodos, fazendo com que tecnologias legadas coexistam com equipamentos mais recentes. Essa condição pode gerar limitações de compatibilidade e capacidade de comunicação à medida que aumentam as necessidades de integração.

Em sistemas originalmente desenvolvidos com comunicação serial, a capacidade disponível pode tornar-se insuficiente com o aumento do número de variáveis, da frequência de atualização ou da quantidade de equipamentos conectados. Essa avaliação, contudo, deve considerar as características de cada tecnologia, não sendo adequado generalizar que toda comunicação serial apresenta desempenho insuficiente.

No sistema estudado, a questão central era a capacidade da infraestrutura legada de atender às novas necessidades de integração e tráfego impostas pela evolução dos controladores e sistemas de monitoramento.

1.5. Modernização de sistemas de comunicação

A evolução industrial tem ampliado a integração entre equipamentos de produção, redes de comunicação e tecnologias da informação. Kagermann, Wahlster e Helbig (2013) relacionam conectividade e integração à Indústria 4.0, e Venanzi et al. (2026) identificam as tecnologias de comunicação como dimensão central da convergência entre tecnologia operacional e tecnologia da informação.

Nesse contexto, modernizar uma rede industrial não significa apenas substituir equipamentos antigos: pode envolver mudanças de arquitetura, protocolos, capacidade de transmissão, recursos de diagnóstico e integração entre níveis de automação.

No sistema estudado, a atualização dos rádios de telemetria foi uma etapa necessária para reduzir limitações da infraestrutura e criar condições técnicas para futuras atualizações de controle e supervisão. A nova solução foi avaliada quanto à confiabilidade, capacidade de comunicação e possibilidades de integração.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1.6. Bombeamento de vinhaça e setor sucroenergético

A vinhaça é um efluente líquido da produção de etanol utilizado principalmente na fertirrigação. A CETESB (2015) estabelece critérios para seu armazenamento, transporte e aplicação no solo agrícola no Estado de São Paulo, atividades que podem envolver a movimentação do efluente entre a unidade industrial e áreas de aplicação.

Em redes de bombeamento, diferentes estações e equipamentos precisam operar de forma coordenada. Pressões, vazões, estados de bombas e válvulas e alarmes fornecem informações relevantes para acompanhar o processo e identificar condições anormais.

Von Sperling (2014) demonstra que o lançamento inadequado de efluentes com elevada carga orgânica pode comprometer a qualidade dos corpos hídricos, reforçando a importância de mecanismos de prevenção e rápida identificação de ocorrências durante o transporte.

1.7. Aspectos ambientais e regulamentação da CETESB

No Estado de São Paulo, a Norma Técnica P4.231 da CETESB estabelece critérios e procedimentos para o manejo e a aplicação da vinhaça no solo agrícola, com o objetivo de prevenir impactos ambientais decorrentes de sua utilização inadequada (CETESB, 2015). Em redes extensas, o acompanhamento das condições de transporte contribui para identificar mais rapidamente situações anormais.

Nesse contexto, a telemetria atua como ferramenta complementar de segurança operacional e ambiental ao disponibilizar variáveis e alarmes ao sistema supervisório, sem substituir medidas físicas de proteção e procedimentos operacionais de prevenção.

Esses fundamentos sustentam a avaliação do estudo de caso apresentada nas seções seguintes.

2. METODOLOGIA

2.1. Delineamento da pesquisa

A pesquisa caracteriza-se como aplicada, pois analisa uma solução implementada em um sistema industrial real. Adota-se uma abordagem qualitativa e quantitativa, combinando a caracterização técnica da infraestrutura com a avaliação de indicadores mensuráveis de desempenho.

Quanto aos procedimentos técnicos, foi realizado um estudo de caso em uma rede de telemetria aplicada ao bombeamento de vinhaça, complementado por pesquisa bibliográfica e documental. Gil (2017) fundamenta a estruturação da pesquisa, incluindo a definição do problema, o levantamento bibliográfico e a organização dos procedimentos de investigação. A

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

adoção do estudo de caso baseia-se em Yin (2015), que apresenta esse método como adequado para a investigação aprofundada de fenômenos contemporâneos inseridos em seu contexto real.

A coleta de dados compreendeu documentação técnica, registros operacionais do sistema supervisório e medições de parâmetros da rede de comunicação. Os resultados foram analisados comparativamente entre a infraestrutura legada e a modernizada.

2.2. Caracterização do sistema e da infraestrutura legada

O sistema estudado é uma rede de telemetria aplicada ao bombeamento de vinhaça, organizada em três enlaces principais: Indústria-Booster, Booster-Borsari e Borsari-Rancharia. A comparação quantitativa deste trabalho concentrou-se nos dois primeiros enlaces, que conectam estações remotas, instrumentos de campo, controladores, rádios e o sistema supervisório.

As estações remotas realizam a aquisição de variáveis de processo, como pressão, vazão, temperatura, estados de bombas e válvulas e alarmes, disponibilizando essas informações ao sistema de supervisão.

A interligação entre os pontos é realizada por rádio em razão das distâncias envolvidas e da complexidade técnica e econômica de implantação de infraestrutura física cabeada ao longo do percurso.

A infraestrutura originalmente instalada foi concebida para aplicações predominantemente seriais. Com a evolução dos controladores, sistemas supervisórios e protocolos industriais, passaram a ser necessários maior capacidade de tráfego, recursos de diagnóstico e integração com tecnologias baseadas em Ethernet e TCP/IP.

2.3. Modernização e caracterização técnica dos equipamentos

A modernização consistiu na substituição da infraestrutura de rádio predominantemente serial por uma solução com suporte a redes baseadas em TCP/IP. O objetivo foi aumentar a capacidade de integração entre equipamentos de campo, controladores e supervisório e viabilizar protocolos industriais em Ethernet, entre eles o Modbus TCP.

A modernização não foi considerada apenas como a substituição dos equipamentos de rádio. A avaliação também considerou que o desempenho do sistema depende do conjunto formado pelos transmissores e receptores, antenas, cabos, conectores, condições de propagação, configurações de rede e características dos protocolos utilizados.

A infraestrutura originalmente utilizada era baseada em rádios GE MDS TransNET 900. O equipamento opera na faixa ISM de 902 a 928 MHz e foi desenvolvido para aplicações de telemetria utilizando comunicação predominantemente serial. A interface de dados permite comunicação por RS-232 e RS-485, com velocidades de porta entre 1,2 e 115,2 kbps e

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

transferência utilizável de até 115,2 kbps. O transmissor apresenta potência configurável de até 1 W, correspondente a 30 dBm (MICROWAVE DATA SYSTEMS INC., 2002).

Ressalta-se que o valor de 115,2 kbps corresponde à interface de dados do equipamento e não deve ser interpretado diretamente como taxa de transmissão no enlace de radiofrequência. Embora o MDS TransNET 900 apresente características adequadas às aplicações para as quais foi originalmente desenvolvido, a ausência de interface Ethernet nativa tornou-se uma limitação diante da necessidade de integração com equipamentos e sistemas de controle baseados em redes TCP/IP.

A modernização foi realizada com a utilização de rádios Schneider Electric Trio JR900. O equipamento dispõe de interfaces Ethernet 10/100 Mbps e comunicação serial, permitindo a integração entre dispositivos legados e arquiteturas baseadas em redes IP. Na camada de radiofrequência, o JR900 permite taxas configuráveis de 64, 128, 256 e 512 kbps, possibilitando selecionar a taxa de acordo com as características do enlace (SCHNEIDER ELECTRIC, 2024).

A taxa de transmissão selecionada possui relação com a sensibilidade do receptor. Conforme as especificações do fabricante, considerando BER inferior a 1×10^{-6}, o JR900 apresenta sensibilidade aproximada de -106 dBm para 64 kbps, -104 dBm para 128 kbps, -102 dBm para 256 kbps e -92 dBm para 512 kbps (SCHNEIDER ELECTRIC, 2024).

O JR900 também disponibiliza parâmetros de diagnóstico como potência de transmissão, intensidade do sinal recebido, tensão de alimentação, temperatura interna, erro de frequência e relação de onda estacionária de tensão (VSWR). O equipamento dispõe ainda de recursos para comunicação baseada em TCP/IP e integração entre Modbus TCP e Modbus RTU, ampliando as possibilidades de diagnóstico e integração da rede (SCHNEIDER ELECTRIC, 2024).

No primeiro enlace da infraestrutura modernizada, entre a indústria e a estação Booster, foram utilizados rádios Trio JR900 associados a antenas direcionais Aquário CF-917, com ganho nominal de 17 dBi e operação na faixa de 900 MHz (AQUÁRIO, [s.d.]). A distância aproximada entre os pontos é de 2,5 km. No lado da indústria, o rádio é conectado à antena por aproximadamente 10 m de cabo RGC-213, enquanto na estação Booster são utilizados aproximadamente 15 m de cabo RGC-58.

O segundo enlace, entre a estação Booster e a estação Borsari, possui distância aproximada de 13 km. No lado da estação Booster, são utilizados aproximadamente 15 m de cabo RGC-58 entre o rádio e a antena, enquanto na estação Borsari são utilizados aproximadamente 35 m de cabo RGC-213. A diferença entre os comprimentos e tipos de cabos

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

foi considerada durante a caracterização da infraestrutura, juntamente com conectores, ganho das antenas, distância e condições de propagação.

2.4. Indicadores de desempenho

Para avaliar os efeitos da modernização, foram definidos indicadores capazes de representar o desempenho da comunicação nos diferentes enlaces. A utilização de parâmetros mensuráveis permitiu comparar as condições existentes antes e após a atualização tecnológica. A Tabela 1 apresenta os indicadores empregados na avaliação.

Tabela 1. Indicadores de avaliação da comunicação

Indicador	**Parâmetro analisado**	**Finalidade da avaliação**
RSSI	Intensidade do sinal recebido	Avaliar a qualidade do sinal no receptor
VSWR	Condição do sistema de RF	Verificar antenas, cabos e casamento de impedância
Latência	Tempo de resposta da comunicação	Avaliar o desempenho da transmissão de dados
Falhas de comunicação	Transmissões não concluídas pelo driver MBE	Avaliar a confiabilidade da comunicação
Taxa de transmissão	Capacidade configurada do enlace	Avaliar a relação entre capacidade e condições do enlace
Estabilidade	Comportamento durante a janela de ensaio	Identificar oscilações e falhas no período observado

Fonte: os autores, 2026.

2.5. Procedimentos de teste, coleta e análise dos dados

Os ensaios comparativos foram realizados em 13 de março de 2023, durante o período de entressafra. A infraestrutura legada foi observada das 15h às 16h e, após a substituição dos rádios, a infraestrutura modernizada das 16h às 17h. Os enlaces Indústria-Booster e Booster-Borsari foram avaliados dentro do mesmo ensaio. Não havia bombeamento de vinhaça durante o período, porém as variáveis permaneciam disponíveis para aquisição pelo sistema supervisório. Em ambas as janelas, foi observada condição meteorológica de tempo limpo.

Foram registrados RSSI, potência de transmissão, VSWR e comportamento da comunicação. Na infraestrutura modernizada, testes ICMP com o comando ping também foram utilizados para verificar conectividade e latência; esse procedimento não era aplicável nas mesmas condições à infraestrutura predominantemente serial baseada nos rádios GE MDS TransNET 900.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Para a comparação de confiabilidade, utilizaram-se os registros de transmissões realizadas pelo sistema supervisório por meio do driver MBE. Não foram alterados o conjunto de variáveis monitoradas nem as configurações de aquisição entre as duas condições. Em cada janela de uma hora, foram contabilizadas as transmissões e as ocorrências não concluídas com sucesso, a partir das quais foram calculadas as taxas de falha e de sucesso.

A quantidade de transmissões foi maior na infraestrutura modernizada porque a nova solução permitiu maior volume de trocas de dados dentro da mesma janela de uma hora, sem mudança do período de observação. Por essa razão, a comparação de confiabilidade foi realizada principalmente pelas taxas percentuais de falha e de sucesso, e não apenas pelos valores absolutos. Como foi utilizada uma única janela por condição, os resultados caracterizam os períodos de ensaio e não representam, isoladamente, disponibilidade de longo prazo. A opção por uma única janela decorreu da disponibilidade operacional para intervenção e da necessidade de testar, validar e liberar a nova infraestrutura para operação.

Para reduzir fatores intervenientes, foram mantidos antenas, cabos, conectores, posicionamento e frequência de operação, sendo a substituição dos rádios a única alteração física realizada nos enlaces avaliados. Não foi efetuada caracterização espectral específica do ambiente de radiofrequência; portanto, eventuais variações temporais de interferência não puderam ser quantificadas.

Os ensaios foram realizados de forma consecutiva, e não simultânea, de modo que não se presume identidade absoluta do ambiente de radiofrequência entre as duas janelas. Além disso, quando as tecnologias apresentaram grandezas ou interfaces distintas, essas diferenças foram explicitadas para evitar comparações diretas entre parâmetros tecnicamente não equivalentes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados comparativamente para os dois enlaces avaliados, considerando RSSI, VSWR, potência de transmissão, taxa de comunicação, latência e falhas registradas pelo supervisório. Também são discutidos os efeitos da modernização sobre diagnóstico e integração da infraestrutura.

3.1. Comparação do desempenho da comunicação nos enlaces

A comparação quantitativa abrangeu dois dos três enlaces da rede: Indústria-Booster, com aproximadamente 2,5 km, e Booster-Borsari, com aproximadamente 13 km. O trecho Borsari-Rancharia não integrou esta etapa experimental. A Tabela 2 apresenta os principais parâmetros obtidos nos ensaios.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 2. Comparação dos parâmetros de comunicação nos enlaces avaliados

Indicador	Indústria-Booster MDS	Indústria-Booster Trio	Booster-Borsari MDS	Booster-Borsari Trio
RSSI	-98 dBm	-81 dBm	-100 dBm	-86 dBm
Potência de transmissão	30 dBm	30 dBm	30 dBm	30 dBm
VSWR	< 2,0:1	< 1,5:1	< 2,0:1	< 1,5:1
Taxa de comunicação*	115,2 kbps	512 kbps	115,2 kbps	256 kbps
Latência por ping	Não mensurável por ICMP	40 ms	Não mensurável por ICMP	20 ms
Transmissões MBE em 1 h	30.000	50.000	10.000	15.000
Falhas de comunicação	7.822	21	1.500	13
Taxa de falha	26,07%	0,042%	15,00%	0,087%
Taxa de sucesso	73,93%	99,958%	85,00%	99,913%

Fonte: os autores, 2026.

*No MDS TransNET 900, o valor corresponde à taxa da interface de dados; no Trio JR900, os valores correspondem à taxa configurada no enlace de radiofrequência. Portanto, os valores não representam grandezas diretamente equivalentes.

No enlace entre a indústria e a estação Booster, o sistema legado apresentou RSSI de aproximadamente -98 dBm, enquanto, após a substituição pelo Trio JR900, foi registrado valor de aproximadamente -81 dBm. A diferença observada foi de 17 dB, indicando maior nível de sinal recebido na condição modernizada. No enlace Booster-Borsari, o RSSI passou de aproximadamente -100 dBm para -86 dBm, representando uma diferença de 14 dB.

Em ambos os enlaces, a potência de transmissão permaneceu configurada em 30 dBm e não foram realizadas alterações nos demais elementos físicos da instalação durante a comparação. Dessa forma, não houve aumento da potência nominal transmitida para obtenção dos resultados observados. Entretanto, como se trata de equipamentos distintos, devem ser consideradas possíveis diferenças nos circuitos internos e nos métodos utilizados por cada rádio para indicação do RSSI.

A relação de onda estacionária de tensão também apresentou diferença entre as duas tecnologias. Nos equipamentos MDS, foram observados valores inferiores a 2,0:1, enquanto os rádios Trio apresentaram indicações inferiores a 1,5:1. Os valores demonstram condição

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

operacional do sistema de radiofrequência, sendo a indicação registrada no sistema modernizado mais favorável. Da mesma forma que ocorre com o RSSI, a comparação deve considerar que os equipamentos possuem métodos próprios de medição.

Quanto às taxas de comunicação, o GE MDS TransNET 900 utilizava interface de dados configurada em 115,2 kbps nos enlaces avaliados. Após a modernização, o Trio JR900 foi configurado para uma taxa de radiofrequência de 512 kbps no enlace Indústria-Booster e de 256 kbps no enlace Booster-Borsari. Esses valores correspondem a características distintas das respectivas tecnologias e não devem ser interpretados como uma comparação direta de velocidade entre os equipamentos.

A arquitetura predominantemente serial utilizada pelos rádios MDS não permitia a realização de testes de latência por meio do protocolo ICMP. Com a implantação da infraestrutura baseada em TCP/IP, tornou-se possível utilizar o comando ping como recurso adicional de diagnóstico. Foram registrados aproximadamente 40 ms no enlace Indústria-Booster e 20 ms no enlace Booster-Borsari. Esses valores caracterizam a infraestrutura modernizada, não sendo possível estabelecer uma comparação direta com o sistema anterior utilizando o mesmo método de medição.

A evidência quantitativa central foi a redução das falhas registradas pelo driver MBE do sistema supervisório iFIX. No enlace Indústria-Booster, durante a janela de uma hora da infraestrutura legada, foram registradas 30.000 transmissões, das quais 7.822 não foram concluídas com sucesso, correspondendo a 26,07% de falha e 73,93% de sucesso.

Na infraestrutura modernizada, em uma janela de igual duração, foram registradas 50.000 transmissões e 21 falhas, equivalentes a 0,042% de falha e 99,958% de sucesso. Apesar do maior volume de transmissões realizado pelo supervisório no período, a ocorrência de falhas foi substancialmente menor.

No enlace Booster-Borsari, o sistema legado registrou 10.000 transmissões em uma hora, com 1.500 falhas, correspondendo a 15,00% de falha e 85,00% de sucesso. Com o Trio JR900, foram registradas 15.000 transmissões, das quais 13 falharam, resultando em 0,087% de falha e 99,913% de sucesso. Como não houve alteração do período, das variáveis monitoradas ou das configurações de aquisição, o maior volume de transmissões observado após a modernização é compatível com a maior capacidade de troca de dados da nova infraestrutura.

Nos dois enlaces avaliados, portanto, a modernização foi acompanhada por maior nível de sinal recebido e redução expressiva das falhas registradas pelo sistema supervisório, apesar das diferenças de distância e de taxa configurada entre os trechos.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

3.2. Análise dos impactos da modernização

Os resultados indicam que a modernização foi acompanhada por mudanças relevantes no desempenho da rede de telemetria nas condições avaliadas. Como os demais elementos físicos foram mantidos, a substituição dos rádios constituiu a principal alteração entre as duas condições de ensaio.

O efeito mais expressivo foi observado na confiabilidade da comunicação com o supervisório: as taxas de falha passaram de 26,07% para 0,042% no enlace Indústria-Booster e de 15,00% para 0,087% no enlace Booster-Borsari. As taxas de sucesso superaram 99,9% na infraestrutura modernizada, mesmo com maior número de transmissões MBE durante a janela avaliada, favorecendo maior continuidade na atualização das variáveis remotas.

A modernização também ampliou a capacidade de comunicação disponível. Embora 115,2 kbps no MDS e 512/256 kbps no Trio não sejam grandezas diretamente equivalentes, em razão das diferenças entre interface serial e taxa de radiofrequência, a nova infraestrutura passou a atender maior atividade de comunicação e a oferecer recursos compatíveis com redes Ethernet.

Os valores de RSSI também foram mais favoráveis nos dois enlaces. Entretanto, como os modelos de rádio possuem arquiteturas e métodos internos de medição distintos, esse indicador não deve ser analisado isoladamente, devendo ser interpretado em conjunto com as taxas de falha, potência, VSWR e demais resultados observados.

No bombeamento de vinhaça, a maior continuidade de comunicação favorece o acompanhamento operacional e a disponibilização de condições anormais ao supervisório. Essa contribuição é complementar aos sistemas físicos de proteção e aos procedimentos operacionais e ambientais.

3.3. Impactos na atualização dos sistemas de controle e supervisão

A modernização também alterou a capacidade de integração da rede. Na infraestrutura anterior, a comunicação predominantemente serial limitava a incorporação direta de equipamentos Ethernet e aumentava a dependência de interfaces ou conversões adicionais.

Com os rádios Schneider Electric Trio JR900, passaram a estar disponíveis interfaces Ethernet e comunicação baseada em TCP/IP, criando condições técnicas mais adequadas para futuras atualizações de controladores, sistemas supervisórios e dispositivos associados ao processo.

A arquitetura modernizada também permitiu utilizar ferramentas convencionais de diagnóstico de redes TCP/IP, como testes de conectividade e latência, auxiliando a diferenciação

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

entre falhas de comunicação e problemas associados a controladores, supervisório ou equipamentos de campo.

Mesmo com o aumento das transmissões realizadas pelo supervisório por meio do driver MBE, os dois enlaces modernizados mantiveram taxas de sucesso superiores a 99,9%. A Tabela 3 sintetiza as principais diferenças observadas quanto à integração e aos recursos disponíveis nas duas arquiteturas.

Tabela 3. Comparação das características de integração entre a infraestrutura legada e a modernizada

Característica	Infraestrutura legada	Infraestrutura modernizada
Comunicação predominante	Serial	Ethernet/TCP/IP
Integração com equipamentos Ethernet	Limitada	Disponível
Diagnóstico por ping	Não disponível	Disponível
Avaliação de latência por ICMP	Não disponível	Disponível
Capacidade de expansão do tráfego	Mais restrita	Ampliada
Integração com sistemas atuais de automação	Dependente de interfaces/conversões	Facilitada pela comunicação em rede

Fonte: os autores, 2026.

Em conjunto, os resultados mostram que a modernização reduziu limitações da infraestrutura de comunicação e aumentou a flexibilidade para intervenções futuras nos sistemas de controle e supervisão.

Esses resultados indicam condições técnicas mais adequadas para a modernização dos demais sistemas, mas não significam que todos os controladores, instrumentos ou componentes do supervisório tenham sido substituídos. Essa distinção mantém as conclusões restritas ao que foi efetivamente avaliado.

3.4. Síntese dos resultados e verificação da hipótese

A análise dos dois enlaces mostra que a substituição dos rádios GE MDS TransNET 900 pelos Schneider Electric Trio JR900 foi acompanhada por redução expressiva das falhas de comunicação registradas pelo sistema supervisório.

No enlace Indústria-Booster, a taxa de falha passou de 26,07% para 0,042%; no Booster-Borsari, de 15,00% para 0,087%. Em ambos os casos, as taxas de sucesso ultrapassaram 99,9%. Também foram observadas diferenças de 17 dB e 14 dB nos níveis de sinal recebido, respectivamente.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A infraestrutura modernizada passou ainda a oferecer comunicação Ethernet/TCP/IP, taxas de radiofrequência configuráveis conforme as condições dos enlaces e recursos adicionais de diagnóstico por conectividade e latência.

Os resultados sustentam a hipótese de que, nas condições avaliadas, a modernização da infraestrutura de comunicação esteve associada à maior confiabilidade da telemetria e à ampliação das possibilidades de integração com sistemas atuais de controle e monitoramento.

A interpretação deve permanecer restrita às condições do estudo de caso: uma única janela de uma hora por condição, ensaios realizados em entressafra e análise quantitativa de dois dos três enlaces da rede. Não houve caracterização espectral específica do ambiente de radiofrequência. Assim, as taxas obtidas não constituem índices de disponibilidade de longo prazo e não devem ser generalizadas de forma absoluta para outras redes de telemetria.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho analisou os impactos da modernização da comunicação em uma rede de telemetria aplicada ao bombeamento de vinhaça, comparando a infraestrutura legada baseada nos rádios GE MDS TransNET 900 com a infraestrutura modernizada utilizando Schneider Electric Trio JR900.

Nas condições avaliadas, os resultados evidenciaram melhoria expressiva da comunicação. A taxa de falha passou de 26,07% para 0,042% no enlace Indústria-Booster e de 15,00% para 0,087% no enlace Booster-Borsari, com taxas de sucesso superiores a 99,9%. Esses resultados foram obtidos mesmo com maior número de transmissões realizadas pelo supervisório por meio do driver MBE na infraestrutura modernizada.

Também foram observados níveis de sinal recebido 17 dB e 14 dB superiores nos enlaces Indústria-Booster e Booster-Borsari, respectivamente. Como a potência permaneceu em 30 dBm e antenas, cabos, conectores, posicionamento e frequência de operação foram mantidos, a alteração dos rádios foi a principal mudança física do ensaio. Ainda assim, RSSI e VSWR devem ser interpretados em conjunto com os demais indicadores devido às diferenças entre as tecnologias.

A adoção de Ethernet e TCP/IP ampliou os recursos de diagnóstico e as possibilidades de integração da infraestrutura, permitindo testes de conectividade e latência por ICMP e criando condições técnicas mais adequadas para futuras atualizações dos sistemas de controle e supervisão.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

No contexto do bombeamento de vinhaça, a maior continuidade na atualização das informações favorece o acompanhamento operacional e a identificação de condições anormais, sem substituir sistemas físicos de proteção ou procedimentos ambientais. Embora não tenha sido realizada análise financeira, a redução de falhas e a maior disponibilidade de recursos de diagnóstico podem produzir reflexos econômicos indiretos associados à manutenção corretiva e ao tempo de diagnóstico; esses efeitos não foram quantificados.

Os resultados devem ser interpretados considerando as limitações do estudo: foi utilizada uma única janela de uma hora para cada condição, os ensaios ocorreram durante a entressafra, sem bombeamento ativo, a avaliação quantitativa concentrou-se em dois dos três enlaces da rede e não houve caracterização espectral específica do ambiente de radiofrequência. Como continuidade, recomenda-se ampliar o período de monitoramento, repetir as medições em diferentes condições operacionais, incluindo períodos de safra com bombeamento em funcionamento, e estender a avaliação ao enlace Borsari-Rancharia. Estudos posteriores também podem incorporar a caracterização espectral do ambiente de radiofrequência, permitindo uma avaliação mais abrangente da disponibilidade e da estabilidade da comunicação em longo prazo.

Conclui-se que, nas condições avaliadas, a modernização esteve associada a resultados positivos quanto à confiabilidade da transmissão e à capacidade de evolução tecnológica da rede analisada. A redução expressiva das falhas, associada aos recursos adicionais de diagnóstico, transmissão e integração, demonstrou o atendimento ao objetivo proposto, considerando as condições e limitações deste estudo de caso.

REFERÊNCIAS

AQUÁRIO. *Antena celular externa 900 MHz 3G e 2G ganho de 17 dBi: CF-917*. Maringá, PR: Aquário, [s.d.]. Disponível em: https://www.aquario.com.br/antena-celular-900mhz-17dbi-cf-917/p. Acesso em: 10 abr. 2026.

BOYER, S. A. *SCADA*: supervisory control and data acquisition. 4. ed. Research Triangle Park, NC: ISA, 2009.

CANDELL, R.; HANY, M. K.; PEREZ-RAMIREZ, J.; CONCHAS, J. An IEEE standard for industrial wireless performance evaluation. *IEEE Internet of Things Magazine*, v. 6, n. 1, p. 82-88, 2023. DOI: https://doi.org/10.1109/IOTM.001.2200069.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). *P4.231: vinhaça: critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola*. 3. ed., 2. versão. São Paulo: CETESB, 2015. Disponível em: https://www.cetesb.sp.gov.br/dx/api/dam/v1/collections/a2ab60c5-4b23-4aad-a9c0-5e83893192fc/items/7537ffbe-5a63-4697-802b-71c1b19ff907/renditions/38231250-b000-43c3-a959-cbf44eedde2f?binary=true. Acesso em: 1 set. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0*: securing the future of German manufacturing industry: final report of the Industrie 4.0 Working Group. Frankfurt am Main: Forschungsunion; Acatech, 2013.

MICROWAVE DATA SYSTEMS INC. *MDS TransNET 900*: Model EL805 spread spectrum data transceiver: installation and operation guide. Rev. B. Rochester, NY: Microwave Data Systems Inc., 2002.

MODBUS ORGANIZATION. *MODBUS messaging on TCP/IP implementation guide V1.0b*. [S.l.]: Modbus Organization, 2006. Disponível em: https://www.modbus.org/file/secure/messagingimplementationguide.pdf. Acesso em: 25 maio 2026.

MODBUS ORGANIZATION. *MODBUS application protocol specification V1.1b3*. [S.l.]: Modbus Organization, 2012. Disponível em: https://www.modbus.org/file/secure/modbusprotocolspecification.pdf. Acesso em: 1 jun. 2026.

SCHNEIDER ELECTRIC. *Trio J-Series Ethernet Data Radio User Manual*. Version 12-13. [S.l.]: Schneider Electric, 2024. Disponível em: https://www.se.com/us/en/download/document/Trio_JSeries_User_Manual/. Acesso em: 20 jan. 2026.

STALLINGS, W. *Wireless communications and networks*. 2. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2005.

TANENBAUM, A. S.; WETHERALL, D. J. *Redes de computadores*. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

TSALLIS, C.; PAPAGEORGAS, P.; PIROMALIS, D.; MUNTEANU, R. A. Industrial wireless networks in Industry 4.0: a systematic review. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, v. 15, n. 1, art. 7, 2026. DOI: https://doi.org/10.3390/jsan15010007.

VENANZI, R.; DI MODICA, G.; FOSCHINI, L.; BELLAVISTA, P. Towards IT/OT integration in industry digitalization: a comprehensive survey. *Journal of Network and Computer Applications*, v. 245, art. 104373, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jnca.2025.104373.

VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

YIN, R. K. *Estudo de caso*: planejamento e métodos. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.