



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS
CATEGORIA 3

INTEGRAÇÃO DE REDES OPERACIONAL E ADMINISTRATIVA EM AMBIENTES

METROFERROVIÁRIOS

INTRODUÇÃO

De um lado estão as tecnologias corporativas que impulsionam a gestão dos negócios: pacote Office, sistemas ERP como o SAP, plataformas de análise de dados como o Power BI, a internet e, mais recentemente, os inúmeros recursos proporcionados pela Inteligência Artificial. Do outro lado encontram-se os sistemas responsáveis pela operação dos ativos críticos: Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), sensores, intertravamentos, supervisórios SCADA e demais tecnologias que garantem o funcionamento seguro e eficiente da infraestrutura metroferroviária.

A integração entre esses dois universos tornou-se um dos principais desafios e, ao mesmo tempo, uma das maiores oportunidades para as empresas do setor. A questão que se impõe é: como conectar esses ambientes de forma a garantir os requisitos



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

fundamentais de segurança, disponibilidade e confiabilidade das operações, sem renunciar aos benefícios e facilidades oferecidos por cada um deles?

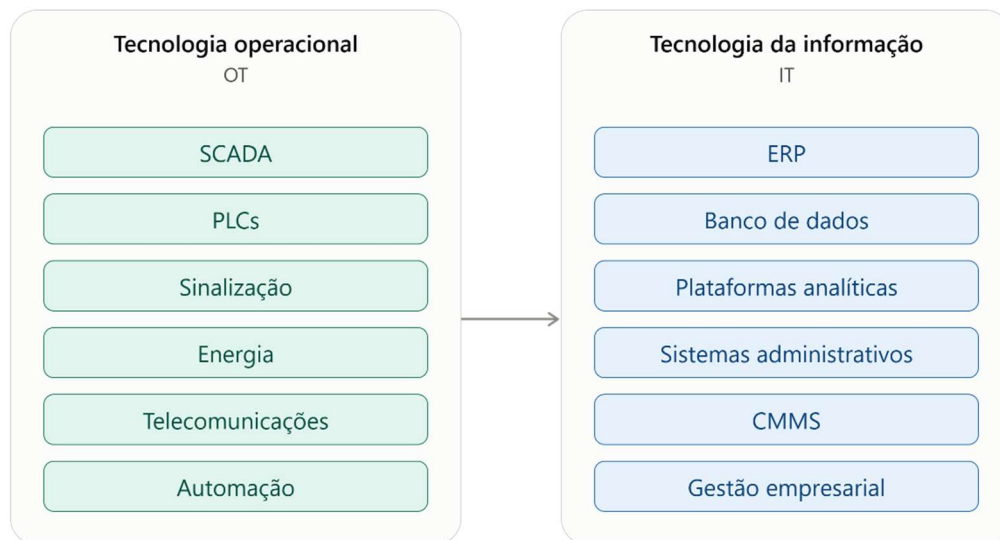


Figura 1 – Comparativo de ambientes OT e IT

Diante desse contexto, torna-se fundamental estabelecer arquiteturas que permitam a convergência entre OT e IT sem comprometer os elevados requisitos de segurança e confiabilidade característicos do transporte metroferroviário.

O objetivo desta aplicação é apresentar diretrizes e melhores práticas para promover essa integração de maneira segura e sustentável. Em termos mais técnicos, trata-se de estabelecer a convergência entre as redes de Tecnologia Operacional (Operational Technology – OT) e as redes de Tecnologia da Informação (Information Technology – IT), preservando as características e necessidades específicas de cada ambiente.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Este guia é fundamentado em anos de experiência prática nas áreas de OT e IT, incluindo projetos que enfrentaram desafios significativos e outros que alcançaram resultados de destaque. Somam-se a essa experiência as recomendações de normas, padrões e referências internacionais amplamente reconhecidas no mercado. A partir dessa combinação entre teoria e prática, serão apresentadas recomendações que poderão auxiliar profissionais e organizações na concepção de arquiteturas de rede mais robustas, seguras e preparadas para os desafios da transformação digital no setor metroferroviário.

O desenvolvimento deste projeto foi baseado em três etapas complementares.

Na primeira etapa foi realizado levantamento bibliográfico e normativo envolvendo as principais referências internacionais relacionadas à integração de ambientes industriais e corporativos, incluindo IEC 62443, NIST SP 800-82, ISA-95 e Purdue Enterprise Reference Architecture.

Na segunda etapa foram analisados os requisitos típicos dos sistemas metroferroviários, com foco em disponibilidade operacional, controle de ativos críticos, manutenção, rastreabilidade e segurança cibernética.

Por fim, foi elaborada uma arquitetura de referência para convergência OT/IT, associando conceitos de segmentação de rede, Industrial DMZ, controle de acessos e centralização de dados operacionais para suporte às atividades de operação, manutenção e engenharia.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

A metodologia adotada busca conciliar os requisitos de proteção dos sistemas críticos com a crescente necessidade de compartilhamento de informações entre ambientes operacionais e corporativos.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

DIAGNÓSTICO

REDES OT E IT NO CONTEXTO METROFERROVIÁRIO

As redes OT (Operational Technology) e IT (Information Technology) possuem funções diferentes dentro do ambiente metroferroviário, porém cada vez mais dependentes entre si. Enquanto os sistemas IT são voltados para processamento e gerenciamento de informações corporativas, os sistemas OT são responsáveis pelo funcionamento da operação metroferroviária, atuando diretamente no controle de equipamentos e processos críticos.

Essa convergência permite que informações operacionais sejam compartilhadas em tempo real com sistemas corporativos, trazendo ganhos importantes para operação, manutenção e tomada de decisão.

Dados gerados por sistemas SCADA, sensores, PLCs e equipamentos de campo podem ser integrados a plataformas analíticas e utilizados para monitoramento operacional, acompanhamento de desempenho e análise de falhas.

Um dos principais benefícios dessa integração é a criação de ambientes centralizados de dados, como *Data Lakes*, capazes de consolidar informações vindas de diversos sistemas OT.

Eventos operacionais, alarmes, históricos de falhas, medições elétricas, registros de sinalização e dados de telecomunicações podem ser armazenados e correlacionados em



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

uma única plataforma. Isso permite uma visão mais ampla da operação e facilita análises históricas e preditivas.

Com os dados centralizados, torna-se possível identificar padrões de degradação de ativos antes que ocorram falhas críticas. Sistemas de análise podem, por exemplo, detectar comportamentos anormais em equipamentos de energia, climatização ou sinalização metroferroviária, permitindo atuação preventiva das equipes de manutenção. Esse tipo de abordagem reduz indisponibilidades e melhora a confiabilidade operacional do sistema metroferroviário.

Outro ganho importante está na integração entre os sistemas OT e plataformas de manutenção, como os sistemas CMMS (*Computerized Maintenance Management System*). Alarmes gerados no ambiente operacional podem abrir automaticamente ordens de serviço para as equipes de manutenção, reduzindo o tempo entre a identificação da falha e o início da atuação técnica.

Na prática, uma ocorrência detectada em um sistema SCADA pode gerar notificações automáticas, registro do evento, abertura de chamado técnico e direcionamento da equipe responsável. Isso acelera o processo de resposta operacional e melhora o controle sobre os ativos da infraestrutura.

Além disso, a integração entre OT e IT permite análises mais rápidas sobre causas de falhas operacionais. O cruzamento entre dados históricos, eventos de campo, registros



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

de manutenção e informações operacionais aumenta a capacidade de diagnóstico e contribui para tomadas de decisão mais objetivas.

Sistemas industriais antes isolados passam a se comunicar com redes corporativas e, em alguns casos, com serviços externos e ambientes em nuvem. Isso amplia a superfície de ataque e aumenta a necessidade de mecanismos robustos de proteção.

Por esse motivo, a integração OT/IT deve ser realizada de forma segmentada e controlada, utilizando arquiteturas seguras, como Industrial DMZ, segmentação baseada no modelo Purdue, firewalls industriais, controle de acesso e monitoramento contínuo do tráfego de rede. Dessa forma, é possível obter ganhos operacionais sem comprometer a disponibilidade e a segurança dos sistemas metroferroviários.

Embora essa integração proporcione ganhos significativos para a operação metroferroviária, sua implementação exige cuidados específicos relacionados à segurança cibernética, uma vez que sistemas historicamente isolados passam a compartilhar informações com ambientes corporativos.

RISCOS DE SEGURANÇA CIBERNÉTICA NA INTEGRAÇÃO ENTRE REDES OT E IT

Embora a integração entre redes OT e IT traga diversos benefícios operacionais para o ambiente metroferroviário, a ausência de uma arquitetura segura pode introduzir riscos significativos para a operação e para a segurança da infraestrutura crítica. Quando essa convergência ocorre sem segmentação adequada, controles de acesso ou mecanismos



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

de monitoramento, os sistemas industriais passam a ficar mais expostos às ameaças normalmente presentes nos ambientes corporativos de IT.

Um dos principais impactos está relacionado à propagação de malware e ransomware entre os ambientes IT e OT. Em muitos casos, um ataque iniciado por meio de um computador corporativo comprometido pode se movimentar pela rede até alcançar sistemas industriais críticos, como servidores SCADA, sistemas de sinalização ou plataformas de supervisão operacional. Esse tipo de cenário pode causar indisponibilidade de serviços, paralisação de operações e impactos diretos na circulação metroferroviária.

Outro risco importante é o acesso remoto indevido aos sistemas operacionais. Com a necessidade crescente de integração, manutenção remota e compartilhamento de dados, muitos ambientes OT passaram a possuir conexões externas ou comunicação direta com sistemas corporativos. Quando essas conexões não são protegidas adequadamente, invasores podem explorar credenciais comprometidas, vulnerabilidades ou acessos mal configurados para atingir sistemas industriais.

A movimentação lateral dentro da rede também representa uma ameaça relevante. Sem segmentação adequada, um invasor que consiga acesso inicial a um ambiente corporativo pode alcançar outros segmentos da infraestrutura até atingir ativos críticos da operação metroferroviária. Em sistemas metroferroviários, isso pode impactar



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

equipamentos de energia, telecomunicações, ventilação, supervisão de estações e até sistemas relacionados à sinalização.

Além dos ataques externos, erros de configuração e falhas internas também podem gerar impactos operacionais significativos. Uma integração mal planejada pode permitir excesso de tráfego entre ambientes, gerar indisponibilidade em sistemas críticos ou até comprometer o desempenho de redes industriais sensíveis à latência. Em ambientes OT, pequenos atrasos de comunicação podem afetar diretamente a estabilidade operacional de determinados sistemas, principalmente em tempo real.

Outro ponto crítico está relacionado à visibilidade e monitoramento da infraestrutura. Muitas redes industriais antigas não foram originalmente projetadas para operar conectadas a ambientes corporativos ou à internet. Dessa forma, a ausência de monitoramento contínuo pode dificultar a identificação de comportamentos anormais, acessos indevidos e tentativas de intrusão.

No contexto metroferroviário, os impactos de um incidente cibernético podem ir além da indisponibilidade tecnológica. Uma falha em sistemas críticos pode afetar diretamente a continuidade do transporte, a segurança operacional e a experiência dos passageiros. Por esse motivo, a integração entre OT e IT precisa ser conduzida com foco em segmentação, controle de acesso, monitoramento contínuo e aplicação das boas práticas previstas em normas como IEC 62443, NIST SP 800-82 e ISA-95.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

A utilização de arquiteturas segmentadas, Industrial DMZ, firewalls industriais e políticas restritivas de comunicação reduz significativamente a superfície de ataque e contribui para aumentar a resiliência cibernética dos sistemas metroferroviários.

Como reduzir esses riscos?

A resposta será dada nos capítulos seguintes aonde será exibida a metodologia adotada para aplicar a solução.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

NORMAS E SEGMENTAÇÕES A SEREM SEGUIDAS

Os sistemas OT possuem características significativamente distintas dos ambientes tradicionais de TI.

Enquanto os sistemas corporativos priorizam confidencialidade, flexibilidade e atualização constante de recursos tecnológicos, os sistemas operacionais priorizam disponibilidade contínua, previsibilidade e estabilidade dos processos controlados.

Essa diferença faz com que soluções amplamente utilizadas em ambientes corporativos nem sempre sejam adequadas aos sistemas industriais.

Em ambientes metroferroviários, qualquer indisponibilidade pode impactar diretamente a circulação de trens, os sistemas de energia, os recursos de telecomunicações e a segurança operacional.

A integração inadequada desses ambientes pode resultar em:

- propagação de malware;
- ataques ransomware;
- acessos não autorizados;
- movimentação lateral de ameaças;
- degradação de desempenho operacional;
- indisponibilidade de sistemas críticos.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Por esse motivo, a integração deve ser tratada como um processo estruturado de governança tecnológica e não apenas como uma simples interligação de redes.

IEC 62443

A IEC 62443 é uma norma internacional voltada à segurança cibernética de sistemas de automação e controle industrial. Seu principal objetivo é estabelecer diretrizes para proteger ambientes OT contra ameaças que possam comprometer a operação industrial, especialmente em cenários onde há integração com redes corporativas de IT.

A norma aborda aspectos como segmentação de rede, controle de acesso, gerenciamento de riscos e proteção de dispositivos industriais, incluindo PLCs, sistemas SCADA e servidores de supervisão.

Um dos conceitos centrais da IEC 62443 é a divisão da rede em “zonas e conduítes”. As zonas representam grupos de ativos com requisitos de segurança semelhantes, enquanto os conduítes correspondem aos canais de comunicação entre essas zonas. Essa abordagem permite que a integração entre IT e OT ocorra de forma controlada, reduzindo a possibilidade de propagação de ataques entre ambientes distintos.

Além disso, a norma recomenda a utilização de firewalls industriais, DMZs industriais e políticas de menor privilégio como mecanismos fundamentais de proteção.

Outro ponto importante tratado pela IEC 62443 é a necessidade de equilibrar segurança e disponibilidade operacional. Em ambientes industriais, a continuidade do processo



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

produtivo é considerada crítica, o que exige que os controles de segurança sejam implementados sem comprometer a operação.

NIST SP 800-82

A NIST SP 800-82 é uma publicação desenvolvida pelo National Institute of Standards and Technology (NIST) com foco na segurança de sistemas de tecnologia operacional.

O documento fornece orientações técnicas para proteção de ambientes industriais, incluindo sistemas SCADA, DCS e ICS, abordando principalmente os riscos associados à integração entre redes corporativas e redes de automação industrial.

A norma destaca que a convergência entre IT e OT traz benefícios operacionais importantes, como maior visibilidade dos processos, integração de dados em tempo real e melhoria na tomada de decisões. Entretanto, o NIST enfatiza que essa integração também amplia significativamente a superfície de ataque, tornando os sistemas industriais mais expostos a ameaças cibernéticas.

Entre as principais recomendações apresentadas pela NIST SP 800-82 está a utilização do Purdue Model como referência arquitetural para separação dos níveis industriais e corporativos. O guia também reforça a importância da implementação de uma Industrial DMZ entre as redes IT e OT, funcionando como uma camada intermediária de proteção e monitoramento.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Além disso, o NIST recomenda monitoramento contínuo, controle restritivo de acessos remotos, inspeção de protocolos industriais e aplicação do princípio do menor privilégio em todos os níveis da infraestrutura.

ISA-95

A ISA-95 é uma norma internacional voltada à integração entre sistemas corporativos e sistemas de controle industrial. Diferentemente da IEC 62443, seu foco principal não está diretamente relacionado à cibersegurança, mas sim à padronização da comunicação e interoperabilidade entre os ambientes IT e OT.

A norma estabelece modelos de integração que permitem o fluxo eficiente de informações entre sistemas empresariais, como ERP, e sistemas industriais, como MES, SCADA e PLCs.

A ISA-95 propõe uma arquitetura hierárquica dividida em níveis operacionais, organizando desde os processos físicos de campo até os sistemas corporativos de gestão. Essa estrutura facilita a integração de dados industriais com plataformas de negócio, permitindo maior sincronização entre produção, planejamento, logística e gerenciamento empresarial.

Outro aspecto relevante da ISA-95 é a padronização da troca de informações entre diferentes fabricantes e tecnologias industriais. A norma incentiva o uso de interfaces



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

padronizadas e modelos de dados comuns, reduzindo dependências de soluções proprietárias e facilitando a integração entre diferentes sistemas.

ARQUITETURAS DE INTEGRAÇÃO APLICADAS E SEGURANÇA

A integração entre ambientes de Tecnologia Operacional (OT) e Tecnologia da Informação (IT) exige uma arquitetura capaz de conciliar requisitos de segurança cibernética, disponibilidade operacional, desempenho e governança tecnológica. Em sistemas metroferroviários, onde a continuidade dos serviços é fundamental para a operação segura e confiável do transporte, a convergência entre esses ambientes deve ocorrer de forma controlada e estruturada.

A arquitetura a ser implantada baseia-se em referências amplamente adotados no setor industrial e em infraestruturas críticas, incluindo a Purdue Enterprise Reference Architecture (PERA), o modelo de segmentação Zones and Conduits, estabelecido pela norma IEC 62443, e os princípios de integração definidos pela ISA-95. Esses modelos fornecem as diretrizes necessárias para organizar os diferentes domínios tecnológicos, estabelecer limites de comunicação e reduzir os riscos associados à integração entre sistemas operacionais e corporativos.

A implementação dessa arquitetura está fundamentada em quatro elementos principais. O primeiro é a segmentação em níveis operacionais, responsável por organizar os ativos conforme suas funções e criticidade. O segundo é a utilização de



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

uma Industrial DMZ, que estabelece uma camada intermediária de proteção entre os ambientes corporativos e operacionais. O terceiro é a aplicação dos conceitos de Zones and Conduits, permitindo o controle e a inspeção das comunicações entre diferentes segmentos da infraestrutura. Por fim, o monitoramento contínuo proporciona visibilidade operacional, rastreabilidade dos eventos e suporte às atividades de cibersegurança, operação, manutenção e engenharia.

Em conjunto, esses componentes criam uma base tecnológica capaz de suportar a troca segura de informações entre OT e IT, permitindo que os benefícios da digitalização e da inteligência operacional sejam alcançados sem comprometer a segurança, a disponibilidade e a confiabilidade dos sistemas metroferroviários.

PURDUE ENTERPRISE REFERENCE ARCHITECTURE

A Purdue Enterprise Reference Architecture (PERA) constitui uma das principais referências para a integração segura entre ambientes de Tecnologia Operacional (OT) e Tecnologia da Informação (IT). Sua estrutura organiza a infraestrutura em camadas hierárquicas, permitindo a separação lógica entre os sistemas corporativos e os sistemas responsáveis pelo controle e operação dos processos industriais.

A adoção do modelo Purdue contribui para reduzir a exposição dos ativos críticos, estabelecer fluxos controlados de comunicação e facilitar a implementação de mecanismos de segurança compatíveis com os requisitos de cada nível operacional.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

Em ambientes metroferroviários, essa abordagem permite preservar a disponibilidade e a confiabilidade dos sistemas operacionais, ao mesmo tempo em que viabiliza a integração com plataformas corporativas, analíticas e de gestão.

Os principais níveis considerados na arquitetura são:

- Nível 0 – Processo Físico: sensores, atuadores e equipamentos de campo;
- Nível 1 – Controle Básico: PLCs, controladores e dispositivos de automação;
- Nível 2 – Supervisão e Controle: sistemas SCADA, IHMs e servidores de supervisão;
- Nível 3 – Gestão da Operação: servidores operacionais, historiadores, aplicações de manutenção e engenharia;
- Nível 3.5 – Industrial DMZ: camada intermediária destinada ao intercâmbio seguro entre OT e IT;
- Nível 4 – Sistemas Corporativos: ERP, BI, gestão documental e demais aplicações administrativas;
- Nível 5 – Serviços Externos e Nuvem: plataformas SaaS, serviços em nuvem e integrações externas.

A utilização dessa arquitetura, associada aos conceitos de Industrial DMZ e Zones and Conduits, estabelece uma base sólida para a convergência entre OT e IT, garantindo



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

que o compartilhamento de informações ocorra de forma controlada, segura e aderente às melhores práticas internacionais de cibersegurança industrial.

INDUSTRIAL DMZ

A Industrial DMZ é uma zona intermediária posicionada entre a rede corporativa e a rede OT.

Seu principal objetivo é impedir comunicação direta entre os ambientes IT e OT, funcionando como uma camada de proteção e monitoramento.

Na IDMZ normalmente são posicionados:

- Historian;
- Jump servers;
- Servidores de atualização;
- Proxies industriais;
- Servidores de autenticação;
- Ferramentas de monitoramento.

Essa arquitetura reduz significativamente o risco de propagação de ataques vindos da rede corporativa.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

ZONES AND CONDUITS

O modelo Zones and Conduits, definido pela norma IEC 62443, propõe a segmentação lógica da infraestrutura industrial com o objetivo de elevar o nível de segurança cibernética dos ambientes OT. Essa arquitetura é amplamente adotada em sistemas industriais críticos, incluindo ambientes metroferroviários, devido à necessidade de proteger os sistemas operacionais contra acessos indevidos e reduzir a propagação de ameaças cibernéticas.

Nesse modelo, as zonas representam agrupamentos de ativos que compartilham requisitos semelhantes de segurança, criticidade operacional e função dentro da infraestrutura. Essas zonas podem englobar servidores SCADA, PLCs, sistemas de sinalização metroferroviária, sistemas de energia, telecomunicações operacionais, estações de supervisão e até mesmo ambientes corporativos de IT.

Os conduítes, por sua vez, representam os canais de comunicação responsáveis pela troca de informações entre as diferentes zonas. Esses canais devem incorporar mecanismos de controle e inspeção capazes de restringir, validar e monitorar o tráfego entre os ambientes. Entre as tecnologias mais utilizadas estão firewalls industriais, listas de controle de acesso (ACLs), VPNs, proxies industriais, sistemas de detecção de intrusão e ferramentas de monitoramento contínuo da rede.

Os principais componentes são:

- Zonas Operacionais;



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

- Zonas de Supervisão;
- Zonas Corporativas;
- Firewalls Industriais;
- Listas de Controle de Acesso (ACL);
- VPNs e Proxies de Comunicação;
- Sistemas de Monitoramento e Inspeção.

A principal vantagem dessa arquitetura está na redução do risco de movimentação lateral de ameaças dentro da infraestrutura industrial. Em ambientes sem segmentação adequada, um ataque iniciado na rede corporativa pode alcançar sistemas críticos da operação metroferroviária. Com a implementação do modelo Zones and Conduits, as comunicações passam a ser rigorosamente controladas entre os segmentos da rede, dificultando a propagação de malware, ransomware e acessos não autorizados.’

Em ambientes metroferroviários, essa arquitetura pode ser aplicada para segregar sistemas críticos de sinalização, supervisão operacional, telecomunicações, energia e sistemas administrativos. Dessa forma, mesmo que um ambiente corporativo seja comprometido, os mecanismos de segmentação reduzem significativamente os impactos sobre os sistemas responsáveis pela operação metroferroviária.

Essa estrutura também possibilita a centralização de servidores de banco de dados e plataformas de monitoramento de ativos, facilitando a implementação de políticas de



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

segurança dedicadas para o controle de fluxos específicos de comunicação, incluindo portas e protocolos definidos conforme a necessidade operacional. Com isso, é possível disponibilizar os acessos necessários sem expor integralmente o ambiente e seus ativos, reduzindo a superfície de ataque e minimizando a exposição de vulnerabilidades presentes nos ambientes de IT.

Além disso, o modelo permite a aplicação de políticas de segurança diferenciadas para cada segmento da infraestrutura, garantindo níveis adicionais de proteção aos sistemas mais críticos. Essa abordagem contribui diretamente para o aumento da disponibilidade, da continuidade operacional e da resiliência cibernética dos sistemas metroferroviários.

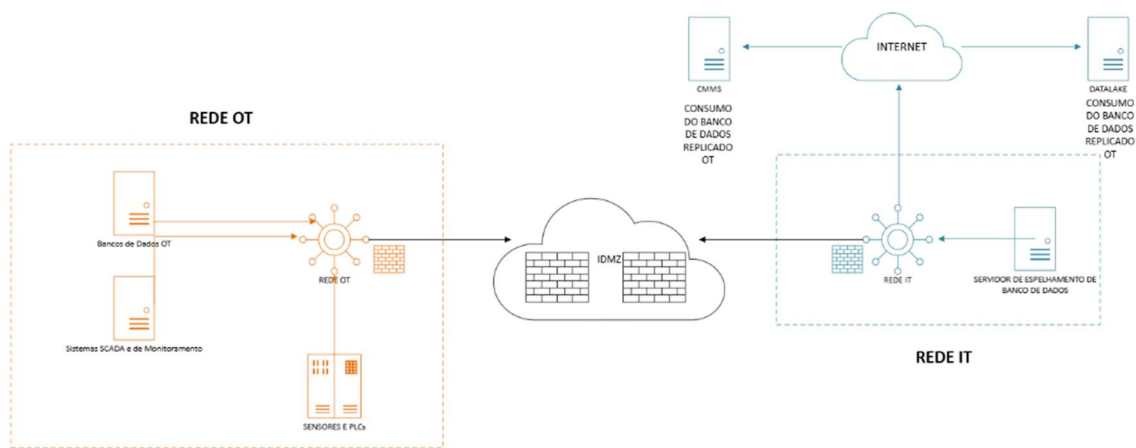


Figura 2 - Exemplo de integração de redes OT IT

Monitoramento Contínuo

A implementação de mecanismos de monitoramento contínuo representa um dos elementos mais importantes para garantir a segurança, a disponibilidade e a



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

confiabilidade da integração entre os ambientes OT e IT. Entretanto, seu papel vai muito além da simples detecção de eventos de segurança cibernética. Em sistemas metroferroviários, o monitoramento deve ser entendido como uma ferramenta estratégica para apoio à operação, manutenção, engenharia e gestão de ativos.

Em um ambiente integrado, cada dispositivo conectado à infraestrutura passa a gerar informações capazes de contribuir para uma visão mais abrangente do desempenho operacional. Eventos provenientes de sistemas de energia, telecomunicações, sinalização, controle de estações, redes de dados e plataformas de supervisão podem ser coletados e analisados de forma centralizada, permitindo identificar alterações de comportamento, degradação de desempenho e tendências que normalmente passariam despercebidas em análises isoladas.

Nesse contexto, soluções de monitoramento de infraestrutura, como o Zabbix, desempenham papel fundamental ao possibilitar o acompanhamento contínuo da saúde de servidores, equipamentos de rede, sistemas operacionais e serviços críticos. A capacidade de consolidar métricas, gerar alertas automáticos e manter históricos detalhados permite que as equipes técnicas atuem de forma proativa, reduzindo o tempo de resposta a falhas e aumentando a disponibilidade dos sistemas.

Complementando essa abordagem, plataformas de visualização e análise de dados, como o Grafana, permitem transformar grandes volumes de informações operacionais em painéis intuitivos e indicadores gerenciais. A consolidação de dados provenientes de



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

sistemas OT e IT em dashboards unificados facilita a correlação de eventos, a identificação de padrões e o acompanhamento em tempo real dos principais indicadores de desempenho da infraestrutura metroferroviária.

No âmbito da gestão de redes corporativas e operacionais, soluções como o Cisco DNA Center ampliam significativamente a capacidade de observabilidade da infraestrutura. Além do monitoramento tradicional, a plataforma fornece análises de performance, saúde dos dispositivos, identificação automática de anomalias e visibilidade completa do comportamento da rede. Essa abordagem permite detectar degradações antes que impactem os serviços e contribui para uma gestão mais eficiente dos ambientes convergentes de OT e IT.

Outro benefício relevante está relacionado à rastreabilidade das ocorrências. A manutenção de registros históricos detalhados possibilita reconstruir eventos com precisão, facilitando investigações técnicas, análises de causa raiz e avaliações de eficácia das ações implementadas. Em ambientes complexos, nos quais diversos sistemas interagem simultaneamente, essa capacidade de reconstrução torna-se essencial para compreender a sequência de eventos que resultou em determinada falha operacional.

Sob a perspectiva da segurança cibernética, o monitoramento contínuo deve estar integrado às atividades de um Security Operations Center (SOC), permitindo a detecção precoce de comportamentos anômalos, tentativas de acesso indevido e movimentações



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

incompatíveis com as políticas de segurança estabelecidas. Nesse cenário, soluções como o Cisco Identity Services Engine (ISE) agregam uma camada adicional de proteção ao fornecer controle de acesso baseado em identidade, autenticação centralizada, segmentação dinâmica e visibilidade sobre todos os dispositivos conectados à rede. Essa capacidade é particularmente importante em ambientes OT, onde a identificação e o controle dos ativos conectados representam um desafio constante.

Da mesma forma, ferramentas de observabilidade de experiência digital, como o Cisco ThousandEyes, permitem ampliar o monitoramento para além do ambiente interno da rede, fornecendo visibilidade ponta a ponta sobre aplicações, serviços em nuvem, conexões WAN e provedores externos. Essa capacidade torna-se extremamente relevante em arquiteturas modernas, nas quais sistemas operacionais, plataformas analíticas, serviços corporativos e aplicações hospedadas em nuvem precisam coexistir de forma transparente e confiável.

À medida que a maturidade da infraestrutura evolui, os dados coletados passam a alimentar modelos analíticos mais sofisticados, permitindo a identificação antecipada de tendências de degradação e o desenvolvimento de estratégias de manutenção baseadas em condição. Dessa forma, o monitoramento deixa de possuir caráter exclusivamente reativo e passa a atuar como um habilitador para ações preventivas e preditivas, contribuindo diretamente para o aumento da confiabilidade dos ativos e para a redução de falhas operacionais.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Dessa forma, o monitoramento contínuo deve ser tratado como um componente estratégico da arquitetura de integração OT/IT. Mais do que identificar incidentes ou indisponibilidades, ele permite transformar dados operacionais em conhecimento, fornecendo às equipes de operação, manutenção, engenharia e cibersegurança as informações necessárias para uma gestão mais eficiente, segura e orientada por evidências. Em um ambiente metroferroviário cada vez mais conectado, a capacidade de enxergar, correlacionar e interpretar informações em tempo real deixa de ser um diferencial e passa a ser um requisito fundamental para a sustentabilidade e evolução dos sistemas operacionais.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

INTELIGÊNCIA OPERACIONAL OBTIDA COM A INTEGRAÇÃO OT/IT

Os capítulos anteriores trataram dos riscos da convergência entre redes OT e IT e das arquiteturas capazes de conter esses riscos. Os verdadeiros ganhos ocorrem quando a integração é devidamente aplicada e bem executada, vai muito além de apenas conectividade, vai muito além disso. A mudança de fundo é que a informação operacional deixa de morrer dentro do sistema que a gerou e passa a circular, cruzar-se com outros dados e sustentar decisões em escalas que vão do chão da estação até o planejamento estratégico da concessionária.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

Consolidação dos Dados Operacionais

O primeiro efeito prático da integração é reunir, num só lugar, dados que antes ficavam presos em sistemas isolados — SCADA, PLCs, historiadores, energia, telecomunicações, sinalização. Cada um desses sistemas foi projetado para cumprir sua função local, sem qualquer preocupação em conversar com os demais; um PLC de sinalização não foi concebido pensando em dialogar com o sistema de energia da estação vizinha, por exemplo. Quando essa barreira é rompida por meio de uma arquitetura segura, os dados passam a alimentar um repositório único, geralmente estruturado como um Data Lake operacional. O ganho aqui não é apenas de organização: é de contexto. Um evento de sinalização, analisado isoladamente, diz pouco. O mesmo evento, correlacionado com uma variação de tensão na subestação próxima e com um registro de manutenção da semana anterior, começa a contar uma história. É essa capacidade de contextualizar — e não apenas armazenar — que justifica o investimento em consolidação de dados, e é ela que sustenta praticamente todos os ganhos descritos nos tópicos seguintes.

Automatização dos Processos de Manutenção

Alarmes operacionais podem ser automaticamente convertidos em ordens de serviço, reduzindo o tempo entre detecção e tratamento da falha.

Além da redução do tempo de resposta, a automação melhora a rastreabilidade e a padronização das informações registradas.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Uma vez que os dados operacionais estão disponíveis fora do ambiente OT, a integração com sistemas CMMS deixa de depender de um operador identificando manualmente uma ocorrência e abrindo, horas depois, um chamado técnico. Um alarme gerado no SCADA, ao ser padronizado por um middleware de integração ou diretamente pelo historiador de dados, pode disparar automaticamente uma ordem de serviço no CMMS, já carregando informações mínimas de diagnóstico — identificação do ativo, código do alarme, criticidade associada e carimbo de tempo do evento. Esse encadeamento reduz diretamente o intervalo entre detecção e atendimento, métrica que a engenharia de confiabilidade costuma acompanhar como parte do MTTR (tempo médio de reparo), e que num sistema metroferroviário se traduz em menos tempo de exposição da via a uma condição degradada.

O ganho menos evidente, mas talvez mais duradouro, está na padronização do registro. Quando a ordem de serviço nasce automaticamente a partir de um evento do sistema, ela carrega sempre o mesmo formato de campos, evitando a variação que normalmente existe quando cada técnico descreve a ocorrência à sua maneira — um mesmo tipo de falha registrado de formas diferentes por pessoas diferentes é um dos maiores obstáculos para qualquer análise histórica confiável. Além disso, a automação permite priorizar o despacho de equipes com base numa matriz de criticidade dos ativos, de forma que um alarme num sistema de sinalização de linha principal seja tratado com



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

prioridade distinta de um alarme num sistema auxiliar de conforto, algo que a triagem manual nem sempre consegue aplicar de forma consistente sob pressão operacional.

Inteligência Operacional e Apoio à Tomada de Decisão

A criação de ambientes centralizados de dados permite consolidar informações provenientes de:

- SCADA;
- Sistemas de Energia;
- Telecomunicações;
- Sinalização;
- Plataformas de Manutenção;
- Sistemas Operacionais.

Essa consolidação cria uma visão unificada da infraestrutura e possibilita análises multidisciplinares antes inviáveis.

Com os dados consolidados e os processos de manutenção parcialmente automatizados, abre-se espaço para uma camada de análise que combina informações operacionais e administrativas em painéis e indicadores acessíveis ao Centro de Controle Operacional. O valor desse tipo de aplicação está em transformar uma operação reativa — que responde ao que já aconteceu — numa operação capaz de



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

reconhecer padrões que só emergem quando se olha para um horizonte de tempo maior que um único turno.

Na prática, isso se materializa em indicadores como MTBF (tempo médio entre falhas) e disponibilidade por sistema, cruzados com dados de headway (intervalo entre trens) e de pontualidade, permitindo identificar se determinada degradação de ativo está de fato impactando a operação percebida pelo passageiro ou se permanece dentro de margem tolerável. Mapas de calor de ocorrências por trecho da linha, construídos sobre o histórico consolidado, revelam concentrações de falha que passariam despercebidas em relatórios isolados por sistema — um trecho que acumula recorrência de falhas de sinalização e de energia no mesmo período, por exemplo, pode indicar uma causa comum ainda não identificada, como uma condição ambiental específica daquele segmento. Da mesma forma, comparar indicadores entre diferentes turmas de manutenção ou entre lotes de equipamentos do mesmo fabricante, com base em dados reais e não em percepção subjetiva das equipes de campo, sustenta decisões de alocação de recursos e de revisão de contratos de manutenção com evidência técnica concreta.

Apoio à Manutenção Preditiva

A análise contínua de parâmetros operacionais permite identificar tendências de degradação antes da ocorrência de falhas funcionais.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

Essa abordagem contribui para:

- redução de indisponibilidades;
- aumento da confiabilidade;
- melhor aproveitamento dos recursos de manutenção;
- aumento da vida útil dos ativos.

É aqui que a integração OT/IT entrega talvez seu resultado mais tangível para a confiabilidade da operação metroferroviária. Com histórico consolidado e monitoramento contínuo, torna-se possível identificar tendências de degradação num ativo antes que evoluam para uma falha funcional. A lógica é simples de entender, mesmo sendo tecnicamente sofisticada: praticamente todo equipamento eletromecânico apresenta algum sinal de desgaste antes de falhar completamente — variação de corrente elétrica, aumento de vibração, mudança no tempo de resposta de um atuador. Isoladamente, esses sinais costumam ser sutis demais para chamar atenção de um operador humano. Quando o histórico desses sinais é armazenado e analisado de forma sistemática, no entanto, padrões de degradação se tornam identificáveis, e a intervenção pode ser planejada no momento tecnicamente mais adequado, em vez de ser feita às pressas depois que o equipamento já parou. Para um sistema metroferroviário, isso significa reduzir falhas inesperadas — que costumam ser as mais custosas, tanto financeiramente quanto em termos de impacto sobre a circulação de trens — e otimizar a alocação das equipes de manutenção, que passam a atuar onde a



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

evidência técnica indica necessidade real, e não apenas seguindo um calendário fixo de inspeções.

Apoio à Engenharia de Manutenção Corretiva e Estudos de Causa Raiz

A disponibilidade de dados históricos centralizados permite reconstruir eventos com maior precisão.

Ferramentas como:

- Linha do Tempo;
- 5 Porquês;
- Ishikawa;
- Análise de Árvore de Falhas;

passam a ser suportadas por evidências operacionais reais, reduzindo subjetividades e aumentando a confiabilidade das conclusões.

Talvez seja neste ponto que a integração OT/IT mais dialogue com a rotina de quem investiga falhas no dia a dia. Um Relatório de Análise de Falhas depende de reconstruir o que aconteceu a partir de fragmentos: um alarme aqui, um registro de manutenção ali, um evento de campo que ninguém documentou a tempo. Quando esses fragmentos estão espalhados por sistemas que não se comunicam, a reconstrução da causa raiz vira um exercício de memória e de sorte — depende de quem estava de plantão naquele dia



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

se lembrar de um detalhe relevante. Com os dados centralizados, esse projeto passa a se apoiar em evidência rastreável. As metodologias clássicas de investigação, como os 5 Porquês, o Diagrama de Ishikawa e a Análise de Árvore de Falhas, continuam sendo o arcabouço metodológico da investigação; o que muda é a qualidade da matéria-prima sobre a qual essas ferramentas operam. Um Ishikawa construído a partir de suposições da equipe tende a refletir o que os técnicos acham que aconteceu. Um Ishikawa construído a partir de dados correlacionados — alarme, condição elétrica, histórico de manutenção, registro de operação — tende a refletir o que de fato aconteceu. Essa diferença, num ambiente de infraestrutura crítica, é o que separa uma causa raiz bem investigada de uma causa raiz presumida. E há um efeito cumulativo importante: cada RAF bem documentado, apoiado em dados reais, vira insumo de comparação para a próxima falha semelhante, formando ao longo do tempo uma base de conhecimento técnico que reduz a reincidência e acelera investigações futuras.

Evolução para uma Operação Baseada em Dados (Data-Driven Operation)

A maturidade da integração OT/IT possibilita a evolução para um modelo operacional orientado por dados.

Nesse cenário, decisões relacionadas a manutenção, investimentos e operação deixam de se basear exclusivamente em percepção operacional e passam a utilizar evidências coletadas continuamente pelos sistemas.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

O ponto de chegada natural desse processo é uma operação que trata dado como ativo estratégico, não como subproduto técnico. À medida que o Data Lake operacional amadurece — com mais sistemas integrados, mais histórico acumulado, mais processos automatizados —, ele deixa de servir apenas para consultas pontuais e passa a sustentar camadas mais sofisticadas de análise.

No nível mais simples, isso significa modelos baseados em limiar (threshold), que disparam alerta quando uma variável de campo ultrapassa uma faixa historicamente associada a falha. Num nível intermediário, entram modelos de regressão treinados sobre séries temporais de vibração, corrente ou temperatura, capazes de detectar desvio gradual em relação ao comportamento normal do ativo — o que a literatura de confiabilidade chama de drift. Num nível mais avançado, modelos de classificação treinados sobre o próprio histórico de falhas rotuladas passam a estimar a probabilidade de um ativo específico falhar dentro de determinada janela de tempo, com base em combinações de variáveis que um analista humano dificilmente conseguiria correlacionar manualmente. Paralelamente, a representação digital de ativos ou trechos da infraestrutura, alimentada continuamente pelos mesmos dados operacionais, permite simular o impacto de diferentes cenários de manutenção antes de executá-los em campo — por exemplo, comparar o efeito esperado de duas estratégias distintas de intervenção sobre a vida útil restante de um mesmo grupo de ativos.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Esse tipo de evolução não acontece de uma vez, nem depende de um único projeto grande — é cumulativa, e cada um dos ganhos descritos nos tópicos anteriores (consolidação, automação, apoio à decisão, manutenção preditiva, investigação de falhas) é, na prática, um degrau necessário para que essa maturidade seja alcançada. É o fechamento do ciclo que este capítulo se propôs a descrever: a arquitetura segura discutida nos capítulos anteriores não é o objetivo final da integração OT/IT, mas a condição que torna essa evolução possível sem comprometer a segurança da operação.

CONCLUSÕES

A integração entre redes de Tecnologia Operacional (OT) e Tecnologia da Informação (IT) deixou de ser uma tendência e passou a representar uma necessidade estratégica para organizações metroferroviárias que buscam maior eficiência operacional, melhor gestão de ativos e suporte à transformação digital. Entretanto, os benefícios dessa convergência somente podem ser alcançados de forma sustentável quando segurança cibernética, disponibilidade operacional e governança tecnológica são tratadas como requisitos fundamentais desde a concepção da arquitetura.

Ao longo deste trabalho foi demonstrado que a simples conectividade entre ambientes corporativos e operacionais não é suficiente para gerar valor. O verdadeiro potencial está na capacidade de transformar dados operacionais isolados em informações estruturadas e acessíveis, capazes de apoiar processos de manutenção, análises de



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

desempenho, investigações de falhas e tomadas de decisão em todos os níveis da organização.

Também foram apresentados os principais riscos associados à convergência desses ambientes, destacando-se a ampliação da superfície de ataque, a possibilidade de movimentação lateral de ameaças e os impactos que incidentes cibernéticos podem causar sobre a continuidade do transporte e a segurança operacional. Nesse contexto, normas e referências consolidadas, como IEC 62443, NIST SP 800-82 e ISA-95, fornecem diretrizes fundamentais para a implementação de arquiteturas resilientes e adequadamente segmentadas.

Modelos como Purdue Enterprise Reference Architecture, Industrial DMZ e Zones and Conduits demonstram que é possível promover o intercâmbio seguro de informações entre OT e IT sem comprometer a confiabilidade dos sistemas críticos. Essas abordagens permitem estabelecer controles adequados de comunicação, monitoramento e acesso, reduzindo significativamente os riscos inerentes à integração.

A análise dos resultados evidenciou ainda que os maiores ganhos dessa convergência vão além da cibersegurança. A consolidação de dados em ambientes centralizados, a automação de processos de manutenção, o apoio à engenharia de falhas, a implantação de estratégias preditivas e a evolução para operações orientadas por dados constituem benefícios concretos que contribuem para aumentar a disponibilidade dos ativos, otimizar recursos e elevar a qualidade dos serviços prestados aos passageiros.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

Por fim, conclui-se que a integração OT/IT deve ser encarada não apenas como um projeto tecnológico, mas como um processo contínuo de evolução organizacional. Quando conduzida com planejamento, segmentação adequada e aderência às melhores práticas de mercado, essa integração torna-se um importante habilitador para a construção de sistemas metroferroviários mais seguros, resilientes, eficientes e preparados para os desafios impostos pela digitalização e pela crescente demanda por inteligência operacional baseada em dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IEC. *IEC 62443 – Industrial Communication Networks – Network and System Security.*

Geneva: International Electrotechnical Commission, diversos volumes da série IEC 62443. Disponível em: <<https://www.iec.ch>>. Acesso em: 10 jul. 2026. [\[isa.org\]](https://www.iec.ch), [\[pilz.com\]](https://www.pilz.com)

ISA – International Society of Automation. *ISA/IEC 62443 Series of Standards.* Durham,

NC: ISA, 2025. Disponível em: <<https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-iec-62443-series-of-standards>>. Acesso em: 10 jul. 2026. [\[isa.org\]](https://www.isa.org)

NIST – National Institute of Standards and Technology. STAUFFER, K.; PEASE, M.; TANG,

C.; et al. *Guide to Operational Technology (OT) Security.* NIST Special Publication 800-82 Revision 3. Gaithersburg, MD: NIST, 2023. DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-82r3>. [\[csrc.nist.gov\]](https://csrc.nist.gov), [\[nvlpubs.nist.gov\]](https://nvlpubs.nist.gov)



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

ISA – International Society of Automation. *ISA-95 Series of Standards: Enterprise-Control System Integration.* Durham, NC: ISA, 2025. Disponível em: <<https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-95-standard>>.

Acesso em: 10 jul. 2026. [\[isa.org\]](https://www.isa.org)

IEC. *IEC 62264 – Enterprise-Control System Integration.* Geneva: International Electrotechnical Commission. Norma internacional equivalente à ISA-95. [\[isa.org\]](https://www.isa.org), [\[siemens.com\]](https://www.siemens.com)

WILLIAMS, Theodore J. *The Purdue Enterprise Reference Architecture (PERA) and Methodology.* West Lafayette: Purdue Laboratory for Applied Industrial Control, Purdue University. Referência clássica para a arquitetura Purdue utilizada em ambientes industriais. [\[en.wikipedia.org\]](https://en.wikipedia.org), [\[pera.net\]](https://pera.net)

CISA – Cybersecurity and Infrastructure Security Agency. *Layering Network Security Through Segmentation.* Washington, DC: CISA, 2022. Disponível em: <<https://www.cisa.gov>>. Acesso em: 10 jul. 2026. [\[cisa.gov\]](https://www.cisa.gov)

ISA – International Society of Automation. *ISA95, Enterprise-Control System Integration – Standards Committee Scope and Purpose.* Durham, NC: ISA. Disponível em: <<https://www.isa.org>>. Acesso em: 10 jul. 2026. [\[isa.org\]](https://www.isa.org)

KUROSE, James F.; ROSS, Keith W. *Redes de computadores e a Internet: uma abordagem top-down.* 8. ed. São Paulo: Pearson, 2022.