

Industria 4.0 e Produção enxuta

Sistemas Ciberfísicos desenvolvidos para apoio na manutenção centrada em confiabilidade: uma aplicação em subestações de energia e central de compressores

Samuel Ribeiro Brando* 

Ivandro Ceconello 

Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul-RS, Brasil

*Autor correspondente: srbrando1@ucs.br

Recebido: 9 de abril de 2023
Aceito: 22 de junho de 2023
Publicado: 26 de junho de 2023

Sistemas Ciberfísicos desenvolvidos para apoio na manutenção centrada em confiabilidade(RCM):
uma aplicação em subestações de energia e central de compressores

Desenvolvimento de ferramentas digitais para monitoramento em tempo real



Resumo: A Indústria 4.0 e as tecnologias relacionadas a *Internet of Things* (IoT) têm avançado dentro das organizações e em ambientes industriais diversificados, trazendo consigo inovações disruptivas e transformações na gestão industrial destes cenários. O setor de manutenção tem papel importante como habilitador e desenvolvedor de recursos, dispositivos e ferramentas digitais tanto para processos de manufatura quanto para os seus processos internos relacionados a disponibilidade, confiabilidade, capacidade e manutenibilidade dos ativos geridos. A partir disso, o presente artigo é baseado em um estudo de caso de observação e experimentação, demonstrando os processos, a implementação e os resultados obtidos no desenvolvimento de ferramentas digitais, dispositivos de monitoramento em tempo real e supervisórios para o gerenciamento remoto dos ativos críticos (subestações elétricas e compressores) de uma empresa do segmento metalmeccânico da serra gaúcha. Os resultados demonstraram as seguintes vantagens: menor tempo para tomada de decisão por parte da gestão, os custos de manutenção são reduzidos, o risco de paradas nas operações é minimizado, além da otimização da manutenibilidade e economia de energia.

Palavras-chave: Manutenibilidade, confiabilidade, diagnóstico em tempo real.

Industry 4.0 and Lean Production

Cyberphysical Systems developed to support reliability-centric maintenance: an application in power substations and compressor centers

Abstract: Industry 4.0 and Internet of Things (IoT) related technologies have advanced within organizations and in diverse industrial environments, bringing with them disruptive innovations and transformations in the industrial management of these scenarios. The maintenance sector plays an important role as an enabler and developer of resources, devices and digital tools both for manufacturing processes and for its internal processes related to the availability, reliability, capability and maintainability of managed assets. From this, the present article is based on a case study of observation and experimentation, demonstrating the processes, the implementation and the results obtained in the development of digital tools, devices for monitoring in real time and supervisory for the remote management of critical assets (electrical substations and compressors) of a company in the metalworking sector in the mountain region. The results showed the following advantages: less time for management to make a decision, maintenance costs are reduced, the risk of stoppages in operations is minimized, in addition to optimizing maintainability and energy savings.

Keywords: Maintainability, reliability, real-time diagnostics.

Introdução

A crescente necessidade de aumento da produção, eficiência e qualidade dos produtos industriais levou os humanos a desenvolverem um conjunto de novas tecnologias capazes de acompanhar a evolução tecnológica exponencial que vivemos atualmente nos processos de produção [1]. Efetivamente as tecnologias da Indústria 4.0 empregadas na manutenção e as possíveis inovações resultantes nas políticas de manutenção,

gestão de fabricação e as tendências mais relevantes nas atuais políticas de manutenção, como a manutenção remota e a atraente possibilidade de uma automanutenção [2], estabelecem um novo campo para aplicação de recursos que possibilitem a integração digital de equipamentos com a gestão de manutenção. Estima-se que até 2025, os processos relacionados a indústria 4.0 poderão reduzir custos de manutenção de equipamentos entre 10% e 40%, reduzir o consumo de energia entre 10% e 20% e aumentar a eficiência de trabalho entre 10% e 25% [3].

A manutenção tem sido por muito tempo uma das áreas focais de pesquisa em digitalização. Dentro de todos os tipos de trabalho de manutenção, deve ser possível descobrir

© O(s) autore(s) 2023. Este é uma publicação de acesso livre publicado sob os termos e condições da licença [Creative Commons Attribution International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), a qual permite uso, distribuição e reprodução desta obra de forma irrestrita, desde que os autores e a fonte sejam creditados. O(s) autore(s) concederam os direitos de publicação à *Scientia cum Industria*.

rapidamente as razões dos erros, soluções e melhorias para produtos futuros [4]. A maioria das empresas considera a gestão da manutenção um dos passos iniciais a serem aplicados no contexto da Indústria 4.0, implementando uma importante transição da quebra e manutenção periódica para políticas de manutenção preditiva e proativa, com o objetivo de obter vantagens econômicas e técnicas [5]; e a manutenção digital pode ser descrita como a área de manutenção em que a tecnologia é usada para fornecer suporte à decisão para operações e manutenção, através da aplicação de tecnologia de informação avançada [6]. Neste contexto entende-se que a introdução de dispositivos *Internet of things* (IoT), integração dos sistemas e computação em nuvem, são fundamentais para a digitalização dos processos da manutenção, sendo que, um dos objetivos da manutenção 4.0 é obter formas de moderar e reprimir os eventos de manutenções corretivas e direcionar seus esforços e recursos para procedimentos baseados em condições para economizar tempo e dinheiro para as organizações.

Em indústrias onde ocorrem trabalhos de manutenção, é fundamental determinar rapidamente a causa das falhas e realizar a manutenção preventiva [4]. Os dados coletados de vários sensores em ambientes da Indústria 4.0 fornecem novas oportunidades para soluções de previsão de vida restante de um ativo [7]. Coleta e análise de dados em tempo real permitem que as empresas melhorem a disponibilidade dos equipamentos, habilitando a manutenção a trabalhar de forma preditiva, reduzindo assim o tempo em que os equipamentos não estão funcionando. No entanto, as dificuldades com esses sistemas incluem a capacidade de filtrar todos os dados disponíveis para discernir o que é relevante [8].

O novo ambiente digitalizado, promovido pela introdução das inovações da Indústria 4.0, pode trazer grandes vantagens à gestão da manutenção em todas as suas atividades relevantes. A conexão em tempo real de ativos e disponibilidade de dispositivos móveis pode melhorar tanto o controle quanto a execução da manutenção, melhorando a constante conscientização do real estado de saúde dos ativos [2]. Ao mostrar quais recursos importantes devem ser desenvolvidos para implementar a manutenção digital, o gerenciamento pode saber no que focar e também ver os efeitos de sinergia entre os recursos, o que fornece uma visão geral melhor [9]. Porém, os modelos de análise direcionados a conjuntos de dados heterogêneos são limitados por grandes incertezas e informações conflitantes. Isso decorre do fato de que, quando apenas modelos parciais estão disponíveis para sintetizar análises de suporte, a entrada humana ainda é necessária para identificar correlações sutis e decisões finais [10].

A manutenção digital é uma área relativamente jovem para a qual pouca pesquisa foi realizada. Há muita pesquisa dentro, por exemplo, da Indústria 4.0, ou seja, digitalização de linhas de produção, mas pouca em relação à manutenção digital. As pesquisas existentes abordam os resultados que a manutenção digital possibilita, mas o caminho para isso, ou seja, a implementação real, é frequentemente destacado como uma área que requer mais pesquisas [11].

A partir do contexto apresentado, o objetivo desse estudo foi implementar um sistema ciberfísico, como ferramenta de apoio a tomada de decisão para o setor de manutenção, de uma empresa

de autopeças do setor automotivo.

Indústria 4.0 e IoT

Em meados de 2011, na Feira de Hannover, o termo Indústria 4.0 foi criado, derivado de um projeto estratégico para aumentar a produtividade da indústria alemã fazendo uso de inovações de alta tecnologia. Em 2012 o grupo responsável pelo projeto e liderado por Siegfried Dais, Robert Bosch GmbH, Henning Kagermann, apresentaram um relatório ao governo alemão traçando estratégias para a implementação da Indústria 4.0. Em 2013 o trabalho do grupo foi apresentado na feira de Hannover com o título: *Recomendações estratégicas para a implementação da Indústria 4.0*, onde listava os passos necessários para a implementação de uma indústria no formato 4.0 [12]. Segundo recomendações para a implementação da iniciativa estratégica 4.0, os pontos chave para o sucesso do projeto são: normatização e referência arquitetural, infraestrutura de comunicação para o setor industrial, segurança da informação, reorganização do trabalho, regulamentação e utilização eficiente dos recursos [13]. A alta produtividade e eficiência dos recursos, são algumas das resultantes do processo evolutivo da indústria 4.0.

As tecnologias básicas atuais e a experiência terão que ser adaptadas aos requisitos específicos da engenharia de fabricação e soluções inovadoras. Essas inovações compreendem algumas tecnologias habilitadoras, que podem ser agrupadas em físicas (veículos autônomos, impressão 3D ou manufatura aditiva, robótica avançada, novos materiais, etc.), digitais (IoT, *big data*, *blockchain*, etc) e biológicas (biotecnologia e genética). Todos estes tipos de tecnologias estão interligados por uma base principal: as tecnologias digitais [14]. IoT referem-se amplamente à extensão da conectividade de rede e capacidade de computação para objetos, dispositivos, sensores e itens normalmente não considerados como computadores. Esses objetos inteligentes requerem intervenção humana mínima para gerar, trocar e consumir dados; eles geralmente apresentam conectividade para coleta de dados remotos, análise e capacidade de gerenciamento [15].

Com o desenvolvimento da tecnologia de sensores, tecnologia de computação, tecnologia de inteligência artificial, o sistema de monitoramento de condição gradualmente se torna um sistema aberto que inclui módulo de monitoramento de condição, módulo de avaliação de saúde, módulo de predição de condição e módulo de tomada de decisão. O sistema monitora, coleta, registra e analisa dinamicamente os parâmetros característicos do equipamento para realizar o diagnóstico de falhas e a previsão de falhas; também realiza a análise das tendências de mudança dos parâmetros de falha para determinar a extensão da degradação e a localização da falha [16].

A IoT é a principal base da Indústria 4.0 por permitir a interação entre objetos, sistemas, plataformas e aplicativos, fazendo com que esses possam trabalhar em conjunto com objetivos em comum [17]. “A IoT representa um cenário em que cada objeto ou ‘coisa’ é incorporado a um sensor e é capaz de comunicar automaticamente seu estado com outros objetos e sistemas automatizados no ambiente. Cada objeto representa um nó em uma rede virtual, transmitindo continuamente um grande volume de dados sobre si mesmo e seus arredores...” [18].

Sistemas Ciberfísicos (CPS)

Em 2006, nos Estados Unidos, foi anunciado um novo projeto de pesquisa sobre “sistemas ciberfísicos” (CPS). Essa foi a primeira vez que esse termo foi usado. De acordo com a Dra Helen Gill, os CPS não são sistemas tradicionais embutidos em tempo real, são entidades inteligentes que integram dinamicamente computação e software com processos físicos de uma forma que é considerada como uma interseção entre o ciber e o físico mais do que apenas uma união, o que requer um profundo entendimento da dinâmica entre computadores, redes e sistemas físicos. No decorrer dos anos, investimento em fundos foram concedidas para pesquisas sobre CPS, tornando-as prioridades nacionais de pesquisa em vários países ao redor do mundo, de forma que, hoje, os CPS são considerados os elementos-chave que estão garantindo e consolidando uma transição bem-sucedida para a próxima revolução industrial: a indústria 4.0 [19].

Atualmente os Sistemas Ciberfísicos compreendem máquinas inteligentes, sistemas de armazenamento e instalações de produção que foram desenvolvidos digitalmente e apresentam integração de ponta a ponta baseada em Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC), desde logística de entrada até produção, marketing, logística de saída e serviço. Isso não apenas permite que a produção seja configurada de forma mais flexível, mas também aproveita as oportunidades oferecidas por processos de gerenciamento e controle muito mais diferenciados [13].

Os CPS, são sistemas capazes de integrar o ambiente físico com infraestruturas de computação e comunicação automatizada, ou seja, é um ambiente virtual capaz de gerar respostas automáticas a partir do monitoramento virtual do processo real. Eles são

compostos por subsistemas que controlam sensores e atuadores, tecnologias de identificação, mecanismos de armazenamento e análises dos dados [20]. Portanto, consiste em uma unidade de controle capaz de lidar com sensores e atuadores, que interagem com o mundo físico, processando os dados obtidos e trocando-os com outros sistemas e/ou serviços em nuvem por meio de uma interface de comunicação [1]. Todas as aplicações que utilizam as arquiteturas CPS são formadas por duas camadas: camadas de tecnologia operacional (física); e camada virtual, de aplicações de tecnologia da informação (ciber). No entanto, os protocolos de comunicação nessas arquiteturas podem diferir de modelos de informações usados na tecnologia da informação, sendo mais próximas dos protocolos de automação [31].

Evolução da Manutenção

Na perspectiva histórica, é difícil dizer ao certo quando começou a manutenção. Desde a criação de ferramentas ou utensílios, o homem precisou de alguma forma mantê-los. Contudo, na literatura acadêmica, considera-se o surgimento (pelo menos formal) da manutenção no final da Revolução Industrial, no século XVIII [21], embora ainda seja discutível a época exata, pode-se classificar a história da manutenção em quatro gerações (Figura 1), do qual cada uma abrange a um tipo de modelo predominante [20,22].

Primeira Geração (Corretiva)

Originada por volta da década de 30 e sua maior característica era de caráter corretivo, se quebrar, conserte. A primeira geração corresponde a um período anterior a Segunda Guerra Mundial, no qual a indústria ainda não apresentava equipamentos complexos e mesma demanda de produção como teria nos



Figura 1. Evolução da Manutenção. Adaptado de [33].

próximos anos. A limpeza e lubrificação de equipamentos eram as únicas práticas gestoras que se teria nesse período [22]. Uma estratégia de manutenção corretiva, a deterioração gradativa de todos os sistemas e equipamento ao longo de sua utilização, gera um custo de manutenção mais baixo em curto prazo, não sendo vantajoso devido ao custo ao longo prazo e perdas produtivas ou falhas críticas de qualidade, podendo colocar o cliente final em risco de segurança ou até mesmo uma catástrofe ambiental. Geralmente podendo ser utilizada em sistema onde é mais barato aguardar a sua falha para posterior recuperação e em sistemas que não gerem risco a segurança, produtividade ou qualidade do produto [23].

Segunda Geração (Preventiva)

Da segunda guerra mundial à meados dos anos 60, a segunda geração deu início a manutenção sistemática ou planejada. O aumento do uso de máquinas novas e complexas também aumentou o número de falhas. A linha de produção estava cada vez mais dependente de máquinas. O planejamento então se tornou necessário [22]. A segunda geração se caracterizou por uma carência maior de disponibilidade e confiabilidade. O conceito de manutenção preventiva foi desenvolvido graças a grande dependência do bom funcionamento das máquinas e o maquinário ocioso que poderia causar grandes prejuízos à indústria [24]. A manutenção preventiva são todas as manutenções realizadas em processos e equipamentos que estão ainda em operação, podendo o mesmo possuir ou não um defeito [23]. Existem inúmeras técnicas preditivas como análise de vibração, temperatura, inspeção visual, detecção de vazamento, ensaios não destrutivos, medição de espessura, ferrografia, termografia, análise de óleo, entre outras [25]. Esta estratégia de manutenção, acaba tendo consequências negativas no sistema financeiro da manutenção, pois são direcionadas horas de técnicos e máquinas paradas para revisão e troca de componentes que ainda estão em plena operação devido a oportunidade, a fim de se evitar falhas mais onerosas para o sistema. O sistema é baseado em um calendário anual, e não são levados em consideração a vida útil real dos componentes, como tempo de operação ou número de ciclos, gerando uma troca desnecessária no momento incorreto [23].

Terceira Geração (Preditiva)

Seu período foi dos anos 70 aos anos 2000, neste espaço de tempo foram desenvolvidos novos procedimentos para serem empregados juntamente com a manutenção preventiva. Foi neste período que evidenciou o conceito de manutenção preditiva.

E é através da manutenção preditiva é possível monitorar as condições reais de funcionamento dos equipamentos, com o acompanhamento de fenômenos físicos e químicos como vibração, temperatura, variação em harmônicas de correntes elétricas, análises físico químicas de óleos entre outros. Com a inspeção periódica destes fenômenos poderemos planejar a execução no momento correto para substituição ou correção do componente que apresenta defeito [26].

Quarta Geração (RAM)

Em meados dos anos 90 surge a análise RAM que é a sigla em inglês para *Reliability, Availability e Maintainability*.

A transformação no campo social, com a dependência de sistemas automatizados, exigiu uma mudança de conceitos e técnicas para atendimento destas necessidades cada vez maiores em torno de segurança, utilização de recursos naturais, transparência e meios auditáveis de execução. Através desta evolução se desenvolveu a metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade [27]. A RCM foi resultante de alguns fatores pretendidos durante a terceira geração e também justificam a consolidação da Engenharia da Manutenção dentro da estrutura organizacional da manutenção. Os mesmos autores citam que há a tendência de utilização de práticas de manutenção preditiva e monitoramento de condições de equipamentos e processos com o objetivo de minimizar as interferências na planta. Portanto, as manutenções preventivas e programadas que interfiram na produção tendem a ser cada vez menores. E a manutenção corretiva não planejada torna-se um indicador da ineficiência da manutenção. Os novos projetos devem alinhar as áreas de engenharia, manutenção e operação, para que desta forma se privilegie os aspectos de confiabilidade, disponibilidade e custo do ciclo de vida da instalação e ativos [22].

Manutenção centrada na Confiabilidade (RCM)

Após a Segunda Guerra Mundial, o estudo de confiabilidade de projetos e sistemas se tornou cada vez mais latente para redução de falhas prematuras. Com exigências cada vez maiores e a crescente complexidade em sistemas eletrônicos, os problemas necessitam de diferentes abordagens, exigindo uma sistemática maior que a atual [28].

Em 1952, o Departamento de Defesa americano iniciou os estudos em confiabilidade através da criação do *Advisory Group on Reability of Eletronic Equipment* (AGREE), focado em pesquisa e trabalhos relacionados com confiabilidade de equipamentos eletrônicos militares. Após a visualização dos benefícios dos estudos, as aplicações não ficaram apenas no âmbito militar, mas se espalharam pelas indústrias de bens e serviços, principalmente no Japão [28]. A transformação no campo social, com a dependência de sistemas automatizados, exigiu uma mudança de conceitos e técnicas para atendimento destas necessidades cada vez maiores em torno de segurança, utilização de recursos naturais, transparência e meios auditáveis de execução. Através desta evolução se desenvolveu a metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade. Trazendo assim benefícios para economia e satisfação do cliente [27].

O termo vem do inglês, *Reliability Centered Maintenance* (RCM), traduzido para o português, manutenção centrada em confiabilidade. Essa ferramenta define as ações de manutenção demandada por um sistema ativo em um contexto operacional, com o intuito de definir e programar o que deve ser feito para garantir que ele continue a fornecer as suas funções pretendidas [29]. A RCM é um processo usado para determinar os requisitos de manutenção de qualquer ativo físico em seu contexto operacional [20], e tem por objetivo fornecer um método de forma estruturada para especificar e selecionar o tipo de manutenção correta e na periodicidade correta de execução, para que um equipamento mantenha a sua função e atinja os

resultados requeridos [27]. A estrutura é definida por três pilares principais: confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade.

Confiabilidade: que é a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo. **Disponibilidade:** que é a capacidade de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados. **Manutenibilidade:** que é a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos [30].

Como já referido a manutenção é uma importante atividade, que envolve múltiplas tarefas, no sentido de preservar e garantir um estado confiável dos equipamentos. As atividades podem ser: inspeção, calibração, ajustes, substituições, reparações, revisões e renovações. A regularidade da manutenção, aumenta o tempo útil de vida, a confiabilidade dos sistemas, reduz a dimensão, a escala e o número de reparações, assim como a necessidade de reparações de emergência. Por outra perspectiva, os custos envolventes são mais controlados, aumentando a segurança dos equipamentos e das pessoas [32].

Materias e Métodos

Este trabalho apresenta o processo para implementação de um sistema ciberfísico para ser utilizado como ferramenta de apoio a tomada de decisão do setor de manutenção, os objetos escolhidos para o estudo foram as subestações elétricas e QGBT's (quadro geral de baixa tensão) com estrutura física já existente e a central de compressores de uma empresa do segmento automotivo de comandos e virabrequins. A Figura 2 mostra as etapas realizadas no estudo.

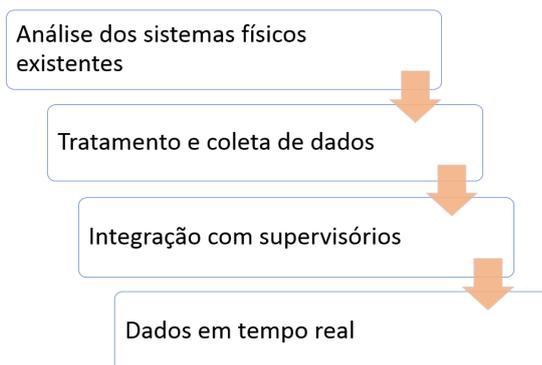


Figura 2. Etapas da metodologia aplicada

Nestes sistemas, os elementos virtuais de monitoramento e gerenciamento, Figuras 3 e 4, são conectados ao meio físico por sensores e atuadores, o que possibilita seu controle remoto e permitem tomadas de decisões descentralizadas, decisões mais assertivas e a cooperação em tempo real com os equipamentos inteligentes.

Na implementação, os equipamentos foram selecionados por serem de alta criticidade para a operação da planta e por

não conterem nenhum sistema monitorado e gerenciado digitalmente pela manutenção, cuja análise de dados é realizada individualmente, desconsiderando outros dados relevantes. Qualquer parada não programada destes equipamentos, gera uma perda aproximada de R\$ 41.000,00 por hora produtiva, dado este que foi mensurado dividindo-se a média de faturamento bruto mensal pelo número de horas trabalhadas, além de outros impactos e custos relacionados a parada de máquinas durante o processo produtivo.

A empresa a qual esse trabalho foi realizado fica localizado na Serra Gaúcha, segundo polo metalomecânico do Brasil. A referida empresa fabrica autopeças para o mercado automotivo original e reposição. Conta com um moderno parque fabril, especialmente focado na usinagem de comandos e virabrequins.

CPS Subestações

Para a coleta e gerenciamento de dados das subestações o sistema conta com o gerenciador de energia multifuncional CCK 6700E. O gerenciador suporta até dois medidores de energia, possui *hardware* que possibilita a integração dos equipamentos já existentes na planta (medidores Embrasul e controladores Thermtronic). O mesmo *hardware* tem a possibilidade de expansão para mais controles do sistema, como por exemplo: controle de demanda, controle de fator de potência, programação

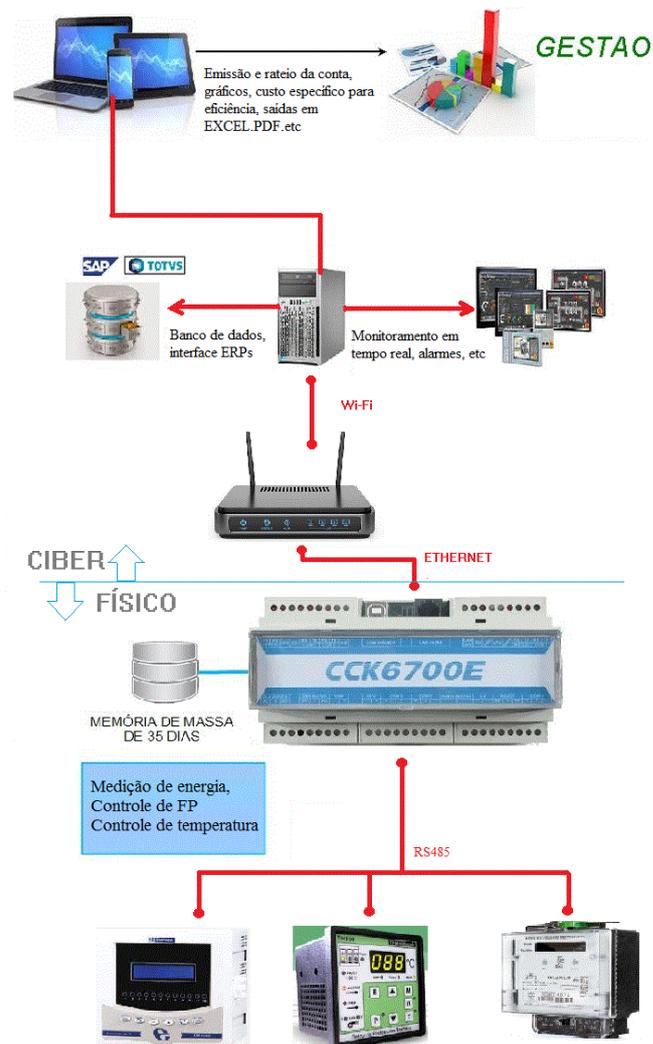


Figura 3. Estrutura atual e expansão CPS

horária e acionamentos manuais, conforme Figura 4. A comunicação com seu supervisor se faz pela porta *ethernet* ligada a um modem Wi-Fi e acessados pelo *software* dedicado da CCK instalado no computador de supervisão, localizado estrategicamente na sala da gestão da manutenção. O controlador também possui portas de comunicação serial de uso simultâneo, registro em memória de massa de até 32 grandezas obtidas a partir das leituras, podendo ser utilizado para monitorar outros equipamentos críticos.

O CPS desenvolvido tem à disposição as seguintes configurações de dados coletados para cada subestação monitorada: tensão de fase, corrente, demanda atual, média e reativa, fator de potência e temperatura dos transformadores. Estes dados compilados e gerenciados pelo supervisor permitem seu monitoramento em tempo real, diminuindo consideravelmente os riscos de paradas por distúrbios ou falhas dos componentes do sistema, além de disponibilizar dados importantes relacionados as manutenções preventivas periódicas. A Figura 3 mostra a estrutura física existente (Físico) e a sua expansão implementada para CPS (Ciber).

O gerenciamento possibilita ainda, a seleção ou configuração de funções requeridas de cada componente monitorado, podendo classificar funções primárias e secundárias.

CPS Central de compressores (CP)

A estrutura física instalada na planta industrial possui quatro equipamentos, sendo eles: Compressor Atlas GA 45FF, GA 45VSD FF, GA 55VSD FF e um compressor Ingersoll rand SSR-EP. Esta estrutura compõe a CP e não dispõe de nenhuma forma de monitoramento ou controle remoto, os equipamentos apenas possuem um controle básico de partidas e paradas (controlador horário) e o revezamento do compressor reserva é realizado periodicamente de forma manual. No setor de manutenção um alarme dispara quando a pressão da rede atinge um nível crítico, monitorado por um pressostato mecânico. Analisando por esta perspectiva, entende-se que instalações e estruturas neste modelo, sem controle e/ou monitoramento, uma parte significativa da energia utilizada para operar estes sistemas é desperdiçada. Isto é devido principalmente as suas características apresentadas a seguir: operação de compressores a mais do que o necessário, operação da combinação errada de compressores e/ou à manutenção de pressão de sistema elevada. Para a implementação de monitoramento e gerenciamento da central de compressores, foi designado três equipamentos e supervisor da Ingersoll, além de o sistema ser complementado com sensoriamento mais confiável. Os componentes formam a estrutura CPS mostrada na Figura 4.

A coleta de dados inicia-se no transmissor de pressão Danfoss MBS 1700, foi designado pela simplicidade, baixo custo e alto grau de confiabilidade nas medições, por estar monitorando a pressão a uma distância elevada dos componentes de controle, ele foi instalado em local estratégico da rede de ar comprimido. Seus dados são analógicos e a conectividade com o controlador X8I é feita via cabo dedicado. O X8I é um controlador de sistema avançado projetado para fornecer gerenciamento seguro, confiável e com eficiência energética do sistema de ar comprimido, foi escolhido por atender as especificações da aplicação e pelo seu desempenho e funcionalidades. Dentre estas, destacam-se: interface universal, programação em tempo

real, controle de sequência de prioridade e controle de até oito equipamentos de qualquer potência e de outros fabricantes. Estas características incorporadas ao CPS de monitoramento remoto aumentam a eficiência, reduzem custos de energia e o principal, proporcionam confiabilidade ao sistema. A conectividade com a supervisor é feita por rede Lan local de fácil configuração.

O supervisionamento remoto é realizado através da plataforma *X-Series System Visualization*. O supervisor é acessado e navegado como um site da web. Com o módulo VX adicionado à rede de controle da série X e se comunicando diretamente com um PC ou uma LAN por conectividade *Ethernet*, a visualização do sistema da série X pode ser acessada usando um navegador da *Web* padrão e este, permite uma visão geral da CP, visão geral de cada equipamento individualmente e visualização de configurações. O status geral do sistema e as informações de controle podem ser facilmente acessados por meio de registros de eventos e ferramentas de relatórios gráficos.

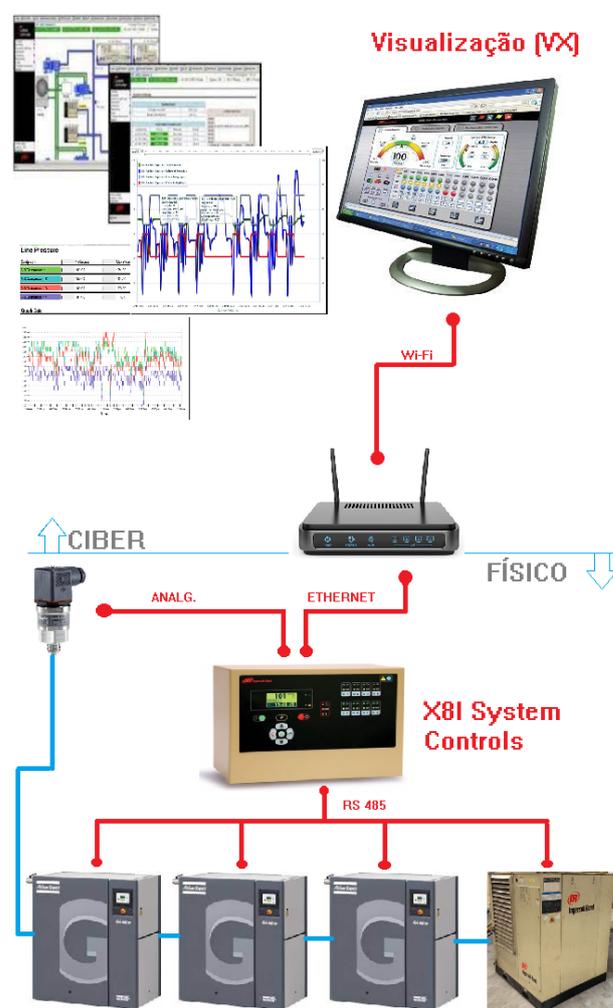


Figura 4. Implementação CPS

Resultados e Discussão

A implementação de recursos digitais de monitoramento e gerenciamento remoto para apoio a tomada de decisão, irá considerar seus resultados avaliando os principais aspectos, que são: a relevância dos dados coletados e o impacto destas informações dentro do aspecto RCM.

Relevância dos dados coletados

A metodologia apresentada converge para o gerenciamento a partir dos dados obtidos em tempo real. Os componentes de monitoramento enviam dados periodicamente conforme configuração do operador ou a qualquer momento sob comando do mesmo. Esses dados que são obtidos das subestações e compressores possibilitam uma análise ampla sobre estes ativos monitorados. Os supervisórios viabilizam a verificação das funções e padrões de desempenho, se o equipamento está falhando em cumprir qualquer função principal ou periférica e quando e o que causa alguma falha deste ativo.

A importância dos dados coletados permite ao usuário identificar, registrar e classificar qualquer possível falha que poderá incapacitar o equipamento de desempenhar suas funções. Dentre estas podemos destacar: as falhas parciais, que são aquelas que ocorrem, mas o equipamento segue funcionando; as falhas totais, que são as que ocasionam algum dano fatal no componente; as falhas de limites inferiores e superiores, que são aquelas que mostram se algum parâmetro de trabalho está fora de tolerância pré-estabelecida; e as falhas de contexto operacional, que são aquelas que conduzem a várias outras falhas, danificando as funções do ativo.

As Figuras 5 e 6 apresentam algumas telas de monitoramento remoto.

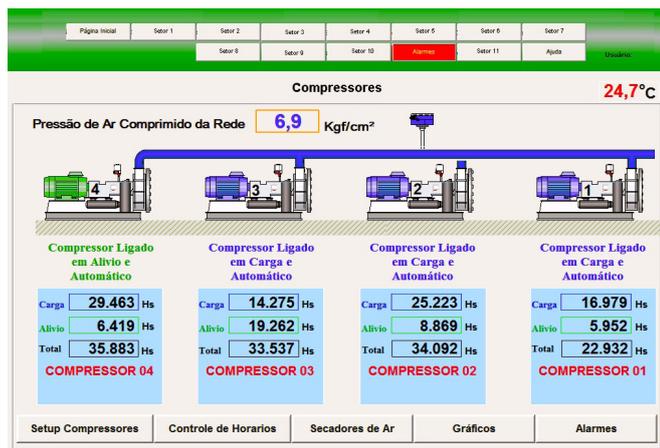


Figura 5. Supervisorio Compressores

CPS e RCM

A coleta destes dados permite para a gestão uma análise precisa dos ativos monitorados e evita com que seja necessário o deslocamento de um profissional para realizar verificações nos equipamentos e componentes com mal funcionamento ou algum distúrbio. Isso reduz o tempo da identificação de problemas, evitando que alguma anormalidade pequena se torne um problema maior. Além disso, a gestão pode dedicar-se a programação estratégica e bem estruturada de paradas, trocas, reparos e substituições nos equipamentos monitorados e outros ativos do sistema. Assim, podendo selecionar as atividades de manutenção necessárias para manter a disponibilidade e a confiabilidade dos ativos da organização. A alta capacidade em gerar dados ao usuário faz dos CPS ótimos aliados nas decisões estratégicas, pois os CPS proporcionam aos usuários e a metodologia RCM dados que possibilitam melhorias e otimização dos ativos, previsibilidade orçamentária, diminuem

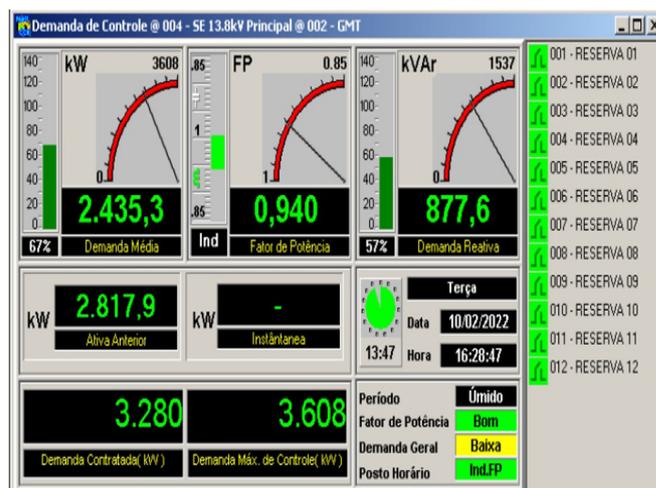


Figura 6. Supervisorio Subestação 1

riscos relacionados à segurança e contribuem para a elaboração de planos com as melhores técnicas de manutenção.

Em relação a efetividade do CPS das subestações, o principal resultado se dá no tempo de resposta aos distúrbios relacionados a consumo e correção de fator de potência, o sistema permite a tomada de decisão em minutos após a identificação da falha e o reparo instantâneo conforme a disponibilidade de componentes. Ao contrário de um sistema sem o CPS, este tempo de resposta levaria em torno de 30 dias ou até a análise da conta de energia e multas relacionadas ao fator de potência. Também podemos citar que o gerenciador forneceu dados de consumo que possibilitou a análise de perfil de consumo, ajudando nos processos de contratação de energia.

O gerenciador dos compressores permitiu a análise de consumo e padrões durante os turnos, e com estes dados possibilitou a identificação de consumo excessivo resultante de vazamentos (5% do consumo) e que anualmente podem chegar a desperdiçar em torno de 34 Mega watts de energia.

Conclusão

O presente artigo explorou a análise de campo, a busca por tecnologias e a implementação de ferramentas digitais que possam ser integradas a estrutura de gestão voltada a manutenção centrada na confiabilidade, produzindo indicadores que podem ser medidos por meio dos sistemas ciberfísicos.

Com relação aos CPS, que foram implementados para o gerenciamento dos dados coletados (CCK e *X-Series System Visualization*) estes sistemas atenderam as necessidades de coleta e transmissão de dados dos ativos monitorados e integração física entre os componentes e seus subsistemas.

O sensoriamento, integração, comunicação e os gerenciadores, permitem ao operador o acesso, visualização, configuração e alguns controles remotamente. Possui uma estrutura intuitiva nas suas telas de navegação e funções específicas que possibilitam ao usuário final o monitoramento em tempo real sobre os ativos e a tomada de decisão com resposta rápida, além de proporcionar a criação de um histórico com tendências de falhas e distúrbios ocorridos no funcionamento dos ativos supervisionados.

Em relação ao aspecto RCM, o sistema produz uma quantidade de dados relevantes para que a gestão da

manutenção possa analisar, programar e selecionar as atividades necessárias para manter a disponibilidade e a confiabilidade de qualquer ativo monitorado, estendendo a vida útil e reduzindo consideravelmente os custos de ciclo de vida dos equipamentos.

No que tange a estrutura macro de integração e a organização dos sistemas físicos, para que estes possam transmitir os dados para as ferramentas digitais, uma série de detalhes precisam ser considerados. Para chegar a esta digitalização foi necessária uma demanda considerável de recursos tecnológicos (Sensores, controladores, *softwares*, etc.) e humanos (manutenção eletrônica, TI, fornecedores, etc.). E que pode variar de acordo com o ativo e do nível da digitalização existente no equipamento a ser gerenciado. Com a finalidade de evoluir os CPS, os níveis e quantidades de ativos devem estar em constante desenvolvimento tecnológico, por intermédio de recursos IoT, sensores inteligentes, e dispositivos que sejam direcionados à indústria 4.0.

Em relação aos custos relacionados a aquisição dos supervisórios, instalação dos sensores e componentes de monitoramento, da mesma maneira que as funções específicas, e configurações, um novo estudo poderá ser produzido com os dados e comparativos em outros trabalhos. Encontram-se no mercado, outros supervisórios e sistemas similares que produzem dados e/ou funções similares ao proposto, como por exemplo os sistemas *optimizer 4.0* e *equalizer 4.0* da Atlas Copco.

A utilização, portanto, dos sistemas CPS, deverá ser avaliada e implementada seguindo a relevância de criticidades dos ativos de cada empresa, para que garanta a disponibilidade e confiabilidade destes equipamentos e o retorno do investimento se dá em um curto prazo, tendo em vista que, para alguns equipamentos, uma parada gera uma reação negativa na cadeia dos processos produtivos.

Percebe-se que para as empresas se manterem competitivas e em desenvolvimento tecnológico, aplicações como estas, são necessárias e fundamentais tanto para seus processos internos, como para a inserção no contexto da Indústria 4.0.

Para aplicações futuras, sugere-se o desenvolvimento de estudos sobre a viabilidade técnica e econômica para a ampliação de ativos com CPS e a expansão da utilização de dispositivos IoT para complementação de dados nos gerenciadores, como por exemplo: sensores de vibração e temperatura para a supervisão remota dos motores dos compressores e para monitoramento dos barramentos *bus-way*.

Contribuição dos autores

S. R. Brando: conceitualização e redação do manuscrito original; I. Ceconello: Pesquisa, Redação - revisão e edição. Todos os autores aprovaram a versão final do artigo.

Conflitos de Interesses

Os autores declaram que não há conflitos de interesses.

Referências

- [1] D. G. S. Pivoto, L. F. F. Almeida, R. R. Rigui, J. J. P. C. Rodrigues, A.B. Lugli. Cyber-physical systems architectures for industrial internet of things applications in Industry 4.0: A literature review. *Journal of Manufacturing Systems*. v. 58, p. 176-192, 2021. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.11.017.
- [2] L. Silvestri, A. Forcina, V. Introna, A. Santolamazza, V. Cesarotti. Maintenance transformation through Industry 4.0 technologies: A systematic literature review. *Computers in industry*, v. 123, p. 103335, 2020. DOI: 10.1016/j.compind.2020.103335.
- [3] McKinsey Global Institute. The Internet of Things: Mapping the Value Beyond the Hype. p. 66-73, 2015.
- [4] U. Kumar, D. Galar, A. Parida, C. Stenström, L. Berges. Maintenance performance metrics: a state-of-the-art review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 19(3), p. 233-277, 2013. DOI: 10.1108/JQME-05-2013-0029.
- [5] A. Mosyurchak, V. Veselkov, A. Turygin, M. Hammer. Prognosis of behaviour of machine tool spindles, their diagnostics and maintenance. *MM Science Journal*, v. 5, p. 2100-2104, 2017. DOI: 10.17973/MMSJ.2017-12-201794.
- [6] L. Technical. Guidelines for Asset Management of digital assets (Cyber Asset). University: Luleå, Sweden, 2018.
- [7] J. Yan, Y. Meng, L. Lu, L. Li. Industrial big data in an industry 4.0 environment: Challenges, schemes, and applications for predictive maintenance. *IEEE Access*, v. 5, p. 23484-23491, 2017. DOI:10.1109/ACCESS.2017.2765544.
- [8] M. E. Porter, J. E. Heppelmann. How Smart, Connected Products Are Transforming Competition. *Harv. Bus.* v. 92, p. 64-88, 2014.
- [9] N. Johansson, E. Roth, W. Reiw. Smart and Sustainable eMaintenance: Capabilities for Digitalization of Maintenance. Sustainability. *MDPI*. p.16, 2019. DOI:10.3390/su11133553.
- [10] S. Khan, M. Farnsworth, R. McWilliam, J. Erkoyuncu. On the requirements of digital twin-driven autonomous maintenance. *Annual Reviews in Control. Elsevier*, p.17, 2020. DOI:10.1016/j.arcontrol.2020.08.003.
- [11] T. Stock, G. Selinger. Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. *Procedia Cirp*, v. 40, p. 536-541, 2016. DOI:10.1016/j.procir.2016.01.129.
- [12] H. Kagermann, W. Wahlster, J. Helbig. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group Disponível em: <<https://en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-working-group/>>. Acesso em: 05 jan.2023.
- [13] M. O. Cardoso "Indústria 4.0: a quarta revolução industrial." 2016. Monografia de especialização.
- [14] M. Hermann; T. Pentek, B. Otto. Design Principles for industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. Dortmund: Technische Universität Dortmund, Working Paper, n. 1, 2015. DOI: 10.13140/RG.2.2.29269.22248.
- [15] K. Rose, S. Eldridge, L. Chapin. "The internet of things: An overview." *The Internet Society*, v. 80, p. 1-50, 2015. DOI:10.14236/ewic/HCI2018.97.
- [16] Martins, Flavia Justina; FABRO, Elton. Uso do sensor inteligente na manutenção preditiva do motor de uma extrusora. *Scientia cum Industria*, v. 8, n. 2, p. 1-9, 2020. DOI: 10.18226/23185279.
- [17] Federação das indústrias do estado do Rio de Janeiro (FIRJAN). Panorama da inovação: indústria 4.0. Rio de Janeiro: Firjan, abr. 2016.
- [18] H. Boyes, B. Hallaq, J. Cunningham, T. Watson. The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Computers in industry*, v. 101, p. 1-12, 2018. DOI: 10.1016/j.compind.2018.04.015.

- [19] Khezami, Nadhira; Kessentini, Marouane; Ferreira, Thiago Do N. A Systematic Literature Review on Software Maintenance for Cyber-Physical Systems. *IEEE Access*, v. 9, p. 159858-159872, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3126681.
- [20] J. Moubray, *Reliability-centred maintenance*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997.
- [21] M. A. Costa. *Gestão estratégica da manutenção: uma oportunidade para melhorar o resultado operacional*. Monografia de graduação. Juiz de Fora: UFJF, 2013.
- [22] A. K. Pinto, J. Nascif. *Manutenção: Função Estratégica*. Rio de Janeiro: Qualimark: Petrobras, 2009.
- [23] G. B. Filho. *A Organização, o Planejamento e o Controle da Manutenção*. Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda, 2008.
- [24] M. V. A. Soeiro, A. Olivio, A. V. R. Lucato. *Gestão da Manutenção*. Editora e Distribuidora Educacional SA, 2017.
- [25] De Souza, Valdir Cardoso et al. Utilização das tecnologias da indústria 4.0 na manutenção preditiva através do monitoramento de equipamentos e instalações. *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. 1, p. 7063-7083, 2022. DOI:10.34117/bjdv8n1-478.
- [26] P. S. Almeida, J.E.Rocca. 1ª. ed. Saraiva Educação AS, 2015.
- [27] I. P. Siqueira. *Manutenção centrada na confiabilidade: manual de implantação*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2014.
- [28] G. Piazza. *Introdução à engenharia da confiabilidade*. Caxias do Sul: EDUCS, 2000.
- [29] A. C. Márquez, P. M. León, J. G. Fernandez, C. P. Márquez, M. L. Campo. The maintenance management framework: A practical view to maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 15, n. 2, p. 167-178, 2009. DOI: 10.1108/13552510910961110.
- [30] C. R. Vishnu, V. Regikumar. Reliability based maintenance strategy selection in process plants: a case study. *Procedia technology*, v. 25, p. 1080-1087, 2016. DOI: 10.1016/j.protcy.2016.08.211.
- [31] O. Givehchi, K. Landsdorf, P. Simoens, A. W. Colombo. Interoperability for industrial cyber-physical systems: an approach for legacy systems. *IEEE, Transactions on Industrial Informatics*, v. 13, n. 6, p. 3370-3378, 2017. DOI: 10.1109/TII.2017.2740434.
- [32] N. Wiener. Sistemas ciber-físicos: o futuro da Manutenção Industrial? INETE, Nota técnica M 130,131. p.66-68., 2020.
- [33] A. M. Gutiérrez. *Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicios: enfoque sistémico kantiano*. 1ª. ed. Colômbia: AMG, 2005.