

Proposta de desenvolvimento de sistema de monitoramento e diagnóstico para máquina ferramenta na Indústria 4.0

Adriano Jotadiemel Masi (UFMG) adrianomasi@yahoo.com.br

Breno Ferreira Lizardo (UFMG) bflizardo@gmail.com

Juan Carlos Campos Rubio (UFMG) juan@ufmg.br

Paulo Eustáquio de Faria (UFMG) paulofaria@ufmg.br

Resumo:

O rápido desenvolvimento de sistemas de informação e comunicação e suas aplicações na indústria possibilitam a implementação de sistemas de fabricação inteligentes e capazes de responder aos desafios atuais tais como aumento da personalização dos produtos, redução do tempo de mercado, melhoria na qualidade e nos processos e aumento da eficiência. A este novo conceito de indústria é dado o nome de Indústria 4.0 e às máquinas ferramentas, Máquinas Ferramentas 4.0. A aplicação de sistemas embarcados conectados diretamente a Internet permitem a comunicação entre dispositivos e destes com sistemas remotos. A computação em nuvem, sistemas de processamento e banco de dados em larga escala e algoritmos de inteligência artificial, tais como lógica Fuzzy e Redes Neurais, podem, dessa forma, ser aplicados aos dados enviados em tempo real pelas máquinas ferramentas. É apresentada a arquitetura de um sistema para máquina ferramenta 4.0 composta por sistema embarcado para aquisição e envio dos dados pela Internet e o processamento em servidor remoto (Cloud computing). As informações obtidas podem ser utilizadas para diagnóstico de operação da máquina em tempo real.

Palavras chave: Monitoramento, Diagnóstico, Indústria 4.0, Máquina ferramenta, Computação em nuvem.

Development proposal of monitoring and diagnostic system for machine tool in Industry 4.0

Abstract

The rapid development of information and communication systems and their applications in the industry enables the implementation of intelligent manufacturing systems capable of responding to current challenges such as increased product customization, reduced time to market, improved quality and processes and increased efficiency. This new industry concept is given the name of Industry 4.0 and the machine tools, Machine Tools 4.0. The application of embedded systems directly connected to the Internet allows the communication between devices and of these with remote systems. Cloud computing, large-scale database and processing systems, and artificial intelligence algorithms such as Fuzzy Logic and Neural Networks can thus be applied to data sent in real time by machine tools. It presents the architecture of a system for machine tool 4.0 composed by embedded system for acquisition and sending of data over the Internet and processing on remote server (Cloud computing). The information obtained can be used to diagnose the operation of the machine in real time.

Key-words: Monitoring, Diagnostics, Industry 4.0, Machine tool, Cloud computing.

1. Introdução

A introdução de sensores para monitoramento de equipamentos em ambiente industrial tem papel fundamental na implementação de sistemas de manufatura inteligente. A aquisição dos dados e as informações obtidas a partir do processamento destes dados em tempo real permitem, aos operadores das máquinas ou à supervisão de uma planta industrial, a otimização dos processos de produção, aumento de eficiência dos equipamentos, redução de paradas para manutenção não previstas e tempos de resposta menores para tomadas de decisões. As características e benefícios de sistemas desenvolvidos para a Indústria 4.0 como o proposto neste projeto vem sendo apresentados por diversos autores, nos últimos anos. Zheng et al. (2018), Liu e Xun (2017) e Hermann et al. (2015) apresentam os conceitos de máquinas ferramenta 4.0 e da Indústria 4.0 e a proposta de desenvolvimento está alinhado com as características pretendidas para as máquinas e processos na indústria. A Figura 1 mostra algumas das tecnologias envolvidas no conceito de Indústria 4.0.

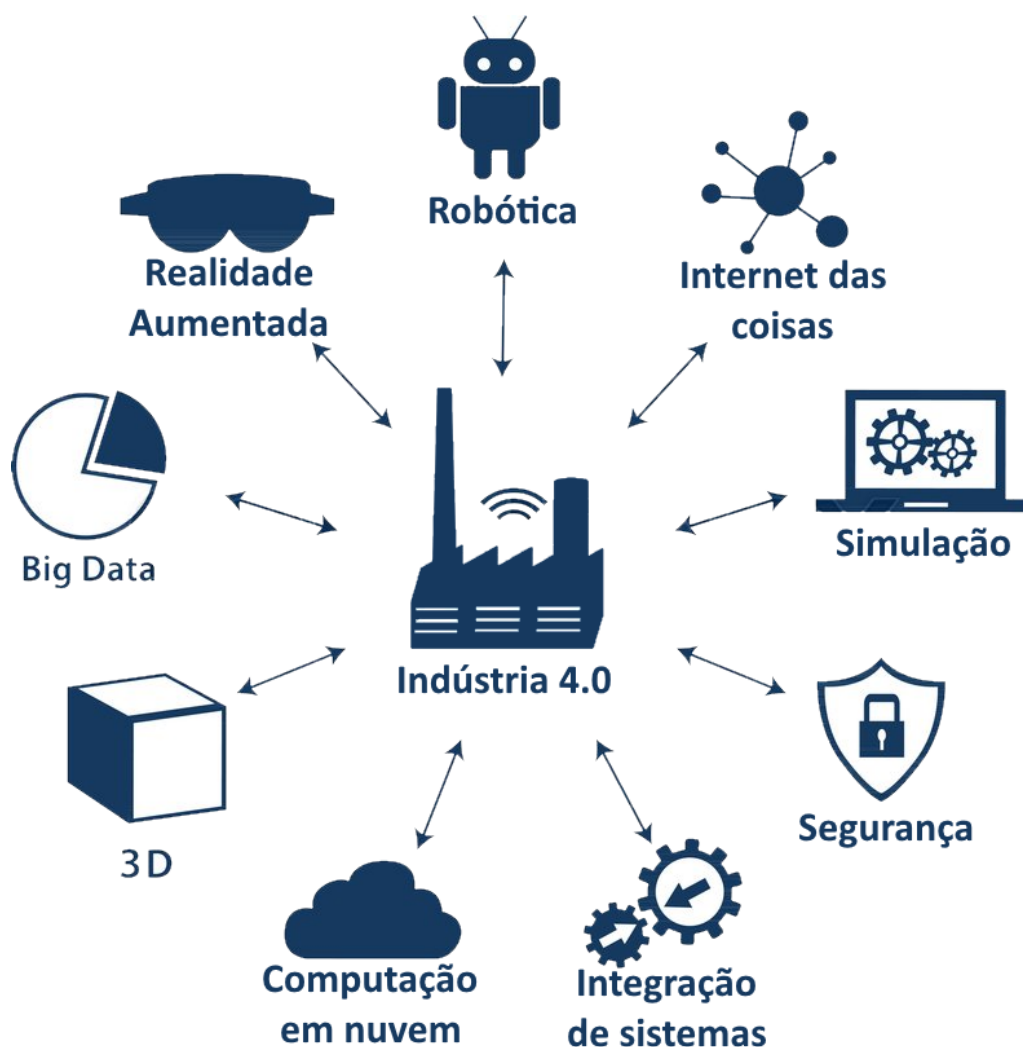


Figura 1. Exemplo de tecnologias envolvidas na indústria 4.0. Fonte: Colourbox.

O aumento de produtividade e da eficiência de processos e equipamentos são obtidos em um grande número de empresas (MARILUNGO et al., 2017) (ALBERS et al., 2016). O planejamento e execução de manutenção podem ser auxiliadas por sistemas de realidade aumentada (MASONI et al., 2017) e as tomadas de decisão também são otimizadas pela disponibilização de informações em tempo real (LEE et al., 2014) (CONSTANTINESCU et al., 2014). O monitoramento das condições de operação da máquina ferramenta (CAO et al., 2017) (ATLURU et al., 2012) permitem aumentar sua produtividade, melhorar a qualidade dos produtos (RIDWAN e XU, 2013) e diagnosticar problemas.

Akbaripour et al. (2018) citam que a manufatura na nuvem surgiu como um novo modelo de manufatura orientada a serviço e utiliza a Internet, big data, Internet das Coisas e computação em nuvem para integrar recursos de manufatura e gerenciá-los a partir de uma plataforma centralizada inteligente. Neste sentido, este trabalho visa unir conceitos de usinabilidade de materiais, operação de máquinas ferramentas, computação em nuvem e implementação de algoritmos de controle baseados em inteligência artificial como um sistema que pode ser inserido nos novos processos de manufatura inteligente.

2. Revisão bibliográfica

2.1 Internet das Coisas

A *internet of things* (IoT), internet das coisas, refere-se a um mundo inter-redes em que vários objetos são incorporados com sensores eletrônicos, atuadores ou outros dispositivos digitais para que possam ser conectados em rede e conectados com a finalidade de coletar e trocar dados (XIA et al., 2012). Em geral, a IoT é capaz de oferecer conectividade avançada de objetos, sistemas e serviços físicos, permitindo a comunicação entre objetos e o compartilhamento de dados. Em várias indústrias, o controle e a automação para iluminação, aquecimento, usinagem, vácuos robóticos e monitoramento remoto podem ser obtidos pela IoT.

A tecnologia *Radio-Frequency IDentification* (RFID), Identificação por radiofrequência, fornece um exemplo disso. Foi relatado que quase 20,8 bilhões de dispositivos estarão conectados e fazendo uso total de RFID até 2020 (LUND et al., 2014). Tal mudança influenciará a maior parte da indústria e, especialmente, os setores manufatureiros. A tecnologia RFID tem sido usada para identificar vários objetos em armazéns, fábricas de produção, empresas de logística, centros de distribuição, varejistas e estágios de descarte / reciclagem (WANG et al., 2010). Após a identificação, esses objetos têm habilidades sensoriais inteligentes para que possam se conectar e interagir uns com os outros através de formas específicas de interconectividade, que podem criar uma enorme quantidade de dados a partir de seus movimentos ou comportamentos sensoriais. A interconectividade entre objetos inteligentes é predefinida; tais objetos recebem aplicações ou lógicas específicas, como procedimentos de fabricação, que seguem após serem equipados com leitores e etiquetas RFID (GUO et al., 2015). As instalações de RFID não apenas ajudam os usuários finais a realizar suas operações diárias, mas também capturam dados relacionados a essas operações, para que o gerenciamento da produção seja realizado em tempo real. As tecnologias de IoT tem sido amplamente utilizada em diferentes campos, como cidades inteligentes, manufatura e saúde. Os objetivos diferem para aplicações específicas, para que melhorias possam ser alcançadas. Países desenvolvidos, como a França e países em desenvolvimento, como a China e a Índia, estão trabalhando em colaboração para empregar a IoT em projetos específicos. Essas colaborações não apenas aprimoram o desenvolvimento de tecnologias IoT, mas também abordam questões globais, uma vez que é necessário que os países e distritos trabalhem de forma colaborativa, especialmente ao adotar uma tecnologia de ponta, como a IoT.

2.2 Análise de Big Data

Com um impulso agressivo em direção à Internet e às tecnologias IoT, os dados estão se tornando cada vez mais acessíveis e onipresentes em muitos setores, resultando na emissão de big data (MANYIKA et al., 2011). A *big data* (Big Data) é a análise e a interpretação de grandes volumes de dados de grande variedade, normalmente é proveniente de vários canais, incluindo sensores, dispositivos, vídeo / áudio, redes, arquivos de log, aplicativos transacionais, a Web e feeds de mídia social. Sob essas circunstâncias, um “ambiente de big data” gradualmente tomou forma no setor manufatureiro. Embora o avanço da IoT (por exemplo, sensores inteligentes) tenha simplificado a coleta de dados, permanece a questão de saber se esses dados podem ser processados adequadamente para fornecer as informações corretas para a finalidade correta no momento certo (LEE et al., 2013). Em um ambiente de big data, os conjuntos de dados são muito maiores e podem ser muito complexos para softwares analíticos de dados convencionais. Portanto, para organizações e fabricantes com uma abundância de dados operacionais e de chão de fábrica, as técnicas avançadas de análise são críticas para descobrir padrões ocultos, correlações desconhecidas, tendências de mercado, preferências do cliente e outras informações comerciais úteis.

Pesquisas na academia e na indústria mostram que os varejistas podem alcançar até 15% a 20% de aumento no retorno sobre o investimento, introduzindo tecnologias da Big Data (PERREY et al., 2013). Na maioria das indústrias, colocar os dados do GRC (gerenciamento de relacionamento com o cliente) em análise é considerado uma maneira eficaz de aumentar o engajamento e a satisfação do cliente (FOSSO et al., 2015). Uma análise mais profunda de vários dados de máquinas e processos pode alavancar a produtividade e a competitividade das empresas. Por exemplo, no fluxo de produção da produção biofarmacêutica, centenas de variáveis devem ser monitoradas para garantir a precisão, a qualidade e o rendimento. Ao processar grandes volumes de dados, um fabricante pode descobrir parâmetros críticos que tenham o maior impacto na qualidade ou variação de rendimento.

2.3 Tecnologia da informação e comunicação

A *information and communication technology* ICT referem-se a uma tecnologia da informação (TI) ampliada que destaca as comunicações unificadas e a integração de telecomunicações, bem como outras tecnologias capazes de armazenar, transmitir e manipular dados ou informações (HASHIM, 2007). As ICT abrangem uma ampla gama de técnicas de ciência da computação e processamento de sinais, como sistemas sem fio, middleware corporativo e sistemas audiovisuais. Ele se concentra na transferência de informações através de vários meios eletrônicos, como padrões de comunicação com ou sem fio, e é crucial na manufatura inteligente, onde as operações de produção e a tomada de decisões dependem fortemente dos dados. Verificou-se que as ICT têm um impacto distinto na organização das empresas, de tal forma que uma melhor ICT para os gerentes e trabalhadores das fábricas está associada a mais autonomia e a uma maior amplitude de controle (BLOOM et al., 2014). Por exemplo, as ICT são consideradas um dos fatores de sucesso na competência de fabricação da Europa, pois ajudam as empresas a melhorar sua agilidade, flexibilidade e produtividade nos negócios.

Para uma PME, a ICT provou ser essencial para a competitividade, uma vez que permite respostas rápidas a um mercado dinâmico. O uso de ICT facilita o manuseio de recursos de informação e resulta na redução de custos e no aumento da conformidade do cliente (COLIN et al., 2015). Na era moderna de fabricação, bilhões de dispositivos digitais têm acesso a redes baseadas na Internet. Esse rápido crescimento fez com que as ICT se tornassem uma pedra

angular dos sistemas de manufatura, onde o design, a produção e a entrega rápida e adaptável de produtos altamente personalizados são possibilitados pelo suporte de ferramentas de produção, modelagem, simulação e apresentação digitais e virtuais.

Aplicações de ICT têm sido amplamente relatadas em um grande número de áreas, como educação, turismo, manufatura, implementações de ciências sociais, telecomunicações, saúde, telemedicina e aplicações clínicas. Sobre a Indústria 4.0, pode-se prever que as ICT serão mais utilizadas para integrar as tecnologias emergentes, a fim de enfrentar os desafios futuros em vários setores.

2.4 Sistema ciber-físico

Um *cyber-physical system* (CPS), sistema ciber-físico, é um mecanismo através do qual objetos físicos e software estão intimamente interligados, permitindo que diferentes componentes interajam entre si, com uma infinidade de maneiras de trocar informações (BAHETI, 2011). Uma CPS envolve um grande número de metodologias transdisciplinares, como a teoria da cibernética, engenharia mecatrônica, ciência de projeto e processo, sistemas de manufatura e ciência da computação. Um dos principais métodos técnicos são os sistemas embarcados, que permitem uma relação altamente coordenada e combinada entre objetos físicos e seus elementos ou serviços computacionais (TAN et al., 2008). Um sistema habilitado para CPS, diferentemente de um sistema embarcado tradicional, contém interações em rede que são projetadas e desenvolvidas com entrada e saída físicas, juntamente com seus serviços cybertwined, como algoritmos de controle e capacidades computacionais. Assim, um grande número de sensores desempenha papéis importantes em um CPS. Por exemplo, vários dispositivos sensoriais são amplamente usados no CPS para atingir diferentes propósitos, como telas de toque, sensores de luz e sensores de força. No entanto, a integração de vários subsistemas diferentes é demorada e dispendiosa, e todo o sistema deve ser mantido operacional e funcional. A heterogeneidade e a complexidade das aplicações do CPS resultam em vários desafios no desenvolvimento e projeto de sistemas e metodologias de controle altamente confiáveis, seguros e certificáveis.

2.5 Computação em nuvem

A *cloud computing*, computação em nuvem, é um termo geral que se refere à entrega de serviços computacionais por meio de recursos visualizados e escalonáveis pela Internet (ARMBRUST et al., 2010). A escalabilidade dos recursos torna a computação em nuvem interessante para os proprietários de empresas, já que ela permite que as organizações comecem pequenas e invistam em mais recursos somente se houver aumentos na demanda por serviços adicionais. Com base nas recomendações do *National Institute of Standards and Technology* (NIST), Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia, uma nuvem ideal deve ter cinco características: autoatendimento sob demanda, amplo acesso à rede, pool de recursos, elasticidade rápida e serviço medido. Esse modelo de nuvem é composto de quatro modelos de implantação - público, privado, comunitário e híbrido - e três modelos de fornecimento - “software como serviço”, “plataforma como serviço” e “infraestrutura como um serviço” (MELL et al., 2011). Organizações de todos os tipos e tamanhos estão adotando a computação em nuvem para aumentar sua capacidade com um orçamento mínimo e sem investir no licenciamento de novos softwares, incorporando nova infraestrutura ou treinando novos funcionários.

Apesar dos benefícios significativos da computação em nuvem, os desafios críticos afetam a confiabilidade desse conceito em andamento. Pesquisadores e prestadores de serviços

realizaram inúmeros estudos para identificar e classificar questões relacionadas à computação em nuvem. Com base na literatura, a preocupação mais significativa sobre a computação em nuvem está relacionada a assuntos de privacidade e segurança (BANYAL et al., 2013). Outros desafios, como gerenciamento de dados e alocação de recursos, balanceamento de carga, escalabilidade e disponibilidade, migração para nuvens e compatibilidade e interoperabilidade e comunicação entre nuvens reduzir a confiabilidade e a eficiência dos sistemas baseados em nuvem.

Tudo, desde software genérico de processamento de texto até programas empresariais personalizados, projetados e desenvolvidos para uma organização, pode potencialmente ser executado em um sistema em nuvem. Acredita-se que a computação em nuvem tenha aumentado a competitividade por meio de maior flexibilidade, redução de custos, elasticidade e ótima utilização de recursos.

2.6 Fabricação inteligente

A manufatura inteligente é um conceito amplo de manufatura com o objetivo de otimizar a produção e as transações de produtos, fazendo pleno uso de informações avançadas e tecnologias de fabricação (KUSIAK, 1990). É considerado como um novo modelo de fabricação baseado em ciência e tecnologia inteligentes que aprimora bastante o projeto, produção, gerenciamento e integração de todo o ciclo de vida de um produto típico. Todo o ciclo de vida do produto pode ser facilitado usando vários sensores inteligentes, modelos adaptativos de tomada de decisão, materiais avançados, dispositivos inteligentes e análise de dados (LI et al., 2017). A eficiência da produção, a qualidade do produto e o nível de serviço serão melhorados (DAVIS et al., 2012). A competitividade de uma empresa de manufatura pode ser aprimorada com sua capacidade de enfrentar a dinâmica e as flutuações do mercado global.

Uma forma de realização desse conceito é o *intelligent manufacturing system* (IMS), sistema inteligente de manufatura, que é considerado o sistema de manufatura de última geração obtido com a adoção de novos modelos, novas formas e novas metodologias para transformar o sistema tradicional de manufatura em um sistema inteligente. Na era da Indústria 4.0, um IMS usa a *service-oriented architecture* (SOA), arquitetura orientada a serviços, via Internet para fornecer serviços colaborativos, customizáveis, flexíveis e reconfiguráveis para usuários finais, permitindo assim um sistema altamente integrado de fabricação (FEENEY et al., 2015). Essa alta integração visa estabelecer um ecossistema dos vários elementos de manufatura envolvidos no IMS, de modo que os níveis organizacionais, gerenciais e técnicos possam ser perfeitamente combinados. Um exemplo do IMS é a fábrica ciber-física da Festo Didactic, que oferece treinamento técnico e qualificação para grandes fornecedores, universidades e escolas como parte da iniciativa estratégica Platform Industrie 4.0 do governo alemão (FESTO, 2017).

A *artificial intelligence* (AI), inteligência artificial, desempenha um papel essencial em um IMS, fornecendo recursos típicos como aprendizado, raciocínio e atuação. Com o uso da tecnologia AI, o envolvimento humano em um IMS pode ser minimizado. Por exemplo, materiais e composições de produção podem ser organizados automaticamente, processos de produção e operações de fabricação podem ser monitorados e controlados em tempo real (OZTEMEL, 2010)(KOREN, 2017). À medida que a Indústria 4.0 continua a ganhar reconhecimento, a detecção autônoma, a interconexão inteligente, a análise de aprendizado inteligente e a tomada de decisões inteligentes acabarão sendo realizadas. Por exemplo, um sistema inteligente de agendamento pode permitir que os trabalhos sejam agendados com base

em técnicas de AI e solucionar problemas, e podem ser oferecidos a outras empresas como serviços em uma plataforma habilitada para Internet (BARBOSA et al., 2015).

2.7 Manufatura habilitada para IoT

A manufatura habilitada para IoT refere-se a um princípio avançado no qual os recursos de produção típicos são convertidos em objetos de manufatura inteligente (SMOs) que são capazes de detectar, interconectar e interagir entre si para realizar de forma automática e adaptativa as lógicas de manufatura (ZHONG, 2013). Em ambientes de fabricação habilitados para IoT, as conexões entre humanos e máquinas são realizadas para a percepção inteligente (TAO et al., 2014). Portanto, o uso sob demanda e o compartilhamento eficiente de recursos podem ser ativados pela aplicação de tecnologias IoT na manufatura. A IoT é considerada um conceito moderno de fabricação sob a Indústria 4.0 e adotou avanços recentes, como infraestrutura de tecnologia da informação (TI) de ponta para aquisição e compartilhamento de dados, que influenciam muito o desempenho de um sistema de manufatura.

A manufatura habilitada para IoT oferece coleta e compartilhamento de dados em tempo real entre vários recursos de manufatura, como máquinas, trabalhadores, materiais e trabalhos (BI et al., 2014). A coleta e o compartilhamento de dados em tempo real são baseados em tecnologias-chave, como identificação por radiofrequência (RFID) e padrões de comunicação sem fio. Utilizando a tecnologia RFID, os fluxos físicos de fabricação, como os movimentos de materiais e fluxos de informações associados, como a visibilidade e a rastreabilidade de várias operações de fabricação, podem ser perfeitamente integrados. Etiquetas e leitores RFID são implantados em locais de fabricação típicos, como o “chão de fábrica”, linhas de montagem e depósitos, onde os objetos inteligentes são criados ao equipar objetos de fabricação com dispositivos RFID. Isso permite que as perturbações do chão de fábrica sejam detectadas e devolvidas ao sistema de manufatura em tempo real (HUANG et al. 2008), melhorando, assim, a eficácia e a eficiência da tomada de decisões de manufatura e produção.

2.8 Fabricação em nuvens

A fabricação em nuvem refere-se a um modelo avançado de fabricação sob o suporte da computação em nuvem, IoT, virtualização e tecnologias orientadas a serviços, que transforma os recursos de manufatura em serviços que podem ser amplamente compartilhados e distribuídos (XU, 2012). Abrange todo o ciclo de vida estendido de um produto, desde o projeto, simulação, fabricação, testes e manutenção, sendo, portanto, geralmente considerado como um sistema de fabricação paralelo, em rede e inteligente (a “nuvem de fabricação”) onde os recursos de produção e as capacidades podem ser gerenciadas de maneira inteligente. Assim, o uso sob demanda de serviços de fabricação pode ser fornecido a partir da nuvem de fabricação para todos os tipos de usuários finais (ZHANG et al., 2014).

Na fabricação em nuvem, vários recursos e capacidades de produção podem ser inteligentemente detectados e conectados à nuvem. As tecnologias de IoT, como RFID e códigos de barras, podem ser usadas para gerenciar e controlar automaticamente esses recursos, de modo que eles possam ser digitalizados para compartilhamento. As tecnologias orientadas a serviços e a computação em nuvem são os suportes subjacentes para esse conceito. Como resultado, os recursos e capacidades de manufatura podem ser virtualizados, encapsulados e distribuídos em vários serviços que podem ser acessados, invocados e implementados. Esses serviços podem ser categorizados e agregados, de acordo com regras específicas predefinidas. Existem muitos tipos diferentes de nuvens de manufatura que lidam com vários serviços de

manufatura (LU e XU, 2017). Diferentes usuários podem pesquisar, acessar e chamar os serviços qualificados por meio de um ambiente ou plataforma de produção virtual. Os modos de implantação na nuvem, a modelagem de recursos de fabricação e a correspondência de requisitos e serviços são as principais preocupações na fabricação de nuvens. Como um ambiente de fabricação virtual ou uma solução deve ser estabelecida para o compartilhamento de serviços, abordagens de implantação na nuvem, como nuvens públicas, privadas, comunitárias e híbridas, são necessárias para que um acesso uniforme e onipresente possa ser fornecido aos usuários finais.

3. Metodologia

As tecnologias e conceitos apresentados na seção anterior podem ser integrados para o desenvolvimento de sistemas de manufatura inteligente. Nesta seção, serão apresentados como os conceitos de sistemas embarcados, internet das coisas, computação em nuvem, inteligência artificial e big data podem ser aplicados para o desenvolvimento da indústria 4.0.

A figura 2 apresenta uma arquitetura de sistema para monitoramento e diagnóstico de máquinas ferramenta. Ele é composto por um módulo de aquisição de dados identificado como “AQD”, um servidor remoto no qual são armazenados e processados os dados, interfaces de usuário para acesso às informações de diagnóstico e uma estrutura de conexão de dados utilizando a Internet.

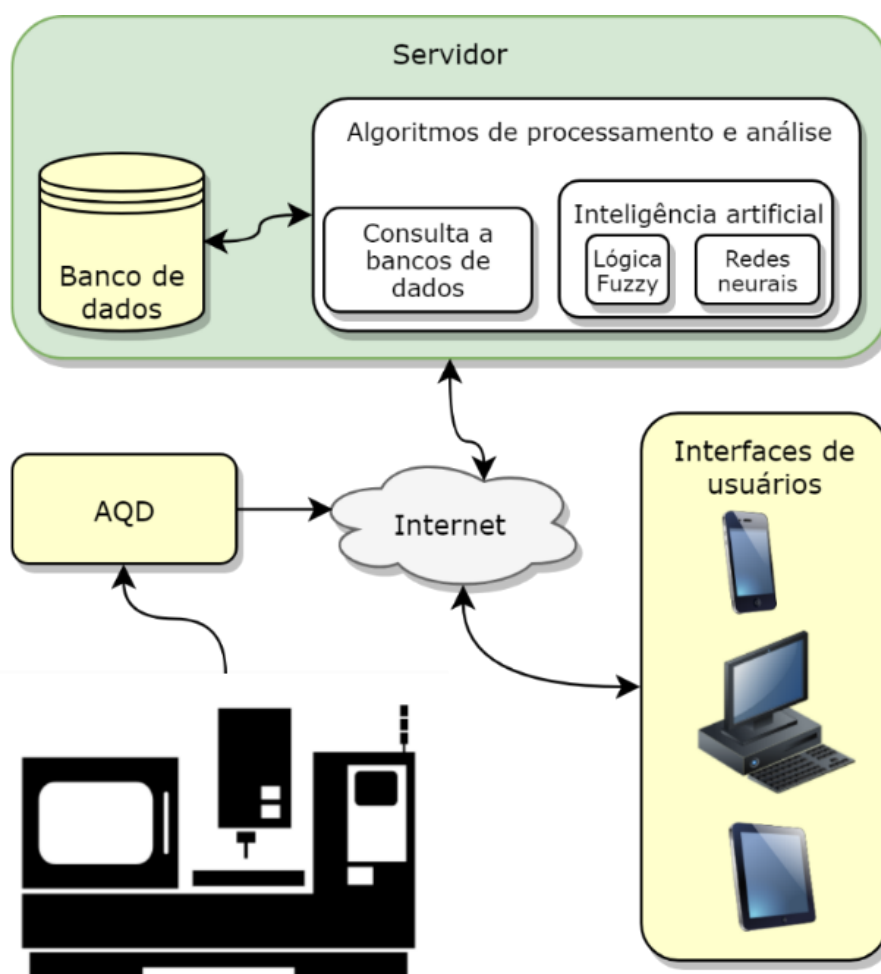


Figura 2. Arquitetura do sistema de monitoramento e diagnóstico

O desenvolvimento do módulo de aquisição de dados AQD leva em consideração o estudo das características de operação de máquinas ferramentas com o objetivo de determinar os parâmetros monitorados. Podem ser monitorados parâmetros como temperatura, força, rotação, vibração e emissão acústica. Uma vez determinados os parâmetros, os sistemas para medição e envio para um servidor central via conexão de Internet devem ser especificados e projetados. Neste sistema embarcado, a aquisição dos dados é comumente feita por conversores analógico-digitais e a transmissão dos dados pode ser feita com ou sem fio. Dessa forma, a máquina ferramenta passa a estar conectada à internet e atua como uma fonte de dados para um servidor remoto.

No servidor, os parâmetros podem ser processados utilizando-se algoritmos de inteligência artificial, por exemplo, lógica Fuzzy e redes neurais, e armazenados em bancos de dados. Os resultados do processamento podem ser disponibilizados em tempo real para o usuário do sistema como um relatório de diagnóstico de operação da máquina ferramenta. A partir deste diagnóstico, é possível fazer alterações nos parâmetros de fabricação para manter a qualidade ou mesmo indicar a necessidade de manutenção ou substituição de ferramentas.

4. Resultados

O desenvolvimento destes tipos de projetos pretende, como esperado no conceito de Indústria 4.0, obter um sistema de monitoramento e controle de máquinas ferramenta em tempo real a partir do uso de dispositivos embarcados conectados à Internet e, com base no processamento dos dados adquiridos, determinar o estado de operação e a necessidade de manutenção. As informações disponibilizadas permitem a melhoria dos processos de fabricação e, conseqüentemente, da qualidade e produtividade da indústria.

5. Considerações finais

A arquitetura proposta realiza somente o monitoramento e apresentação dos resultados aos operadores ficando a cargo destes a atuação nas variáveis dos processos. O ajuste, em tempo real, dos parâmetros de fabricação por um sistema automático é uma evolução deste projeto e proporcionará processos de fabricação ainda mais integrados.

A aplicação dos conceitos apresentados não se restringe somente a máquinas ferramentas. Todos os processos na indústria podem ser otimizados com o uso destas tecnologias.

Referências

- Akbaripour, H.; Houshmand, M.; van Woensel, T.; Mutlu, N.** *Cloud manufacturing servisse selection optimization and scheduling with transportation considerations: mixed-inter programming models* – The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2018) 95:43-70
- Albers, A.; Gladysz, B., Pinner, T.; Butenko, V.; Stürmlinger, T.** *Procedure for defining the system of objectives in the initial phase of na industry 4.0 project focusing on intelligent quality control systems* - Procedia CIRP 52 (2016) 262 – 267
- Armbrust M, Fox A, Griffith R, Joseph AD, Katz R, Konwinski A, et al.** *A view of cloud computing.* Commun ACM 2010;53(4):50–8
- Atluru, S.; Huang, S. H.; Snyder, J. P.** *A smart machine supervisory system framework* - The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2012) 58:563-572
- Baheti R, Gill H.** *Cyber-physical systems. In: Samad T, Annaswamy AM, editors The impact of control technology: Overview, success stories, and research challenges.* New York: IEEE Control Systems Society; 2011. p. 161–6..

- Banyal RK, Jain P, Jain VK.** *Multi-factor authentication framework for cloud computing.* In: Al-Dabass D, Babulak E, Kim D, Shin DR, Kim HS, editors *Proceedings of the 5th International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation*; 2013 Sep 24–26; Seoul, Korea. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2013. p. 105–10.
- Barbosa J, Leitão P, Adam E, Trentesaux D.** *Dynamic self-organization in holonic multi-agent manufacturing systems: The ADACOR evolution.* *Comput Ind* 2015;66:99–111.
- Bi Z, Xu LD, Wang C.** *Internet of Things for enterprise systems of modern manufacturing.* *IEEE Trans Ind Inform* 2014;10(2):1537–46.
- Bloom N, Garicano L, Sadun R, Van Reenen J.** *The distinct effects of information technology and communication technology on firm organization.* *Manage Sci* 2014;60(12):2859–85.
- Cao, H.; Zhang, X.; Chen, X.** *The concept and progress of intelligent spindles: A review - International Journal of Machine Tools & Manufacture* 112 (2017) 21–52
- Colin M, Galindo R, Hernández O.** *Information and communication technology as a key strategy for efficient supply chain management in manufacturing SMEs.* *Procedia Comput Sci* 2015;55:833–42.
- Constantinescu, C.L.; Francalanza, E.; Matarazzo, D.; Balkan, O.** *Information support and interactive planning in the Digital Factory: Approach and industry-driven evaluation - Procedia CIRP* 25 (2014) 269 – 275
- Davis J, Edgar T, Porter J, Bernaden J, Sarli M.** *Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance.* *Comput Chem Eng* 2012;47:145–56.
- Feeney AB, Frechette SP, Srinivasan V.** *A portrait of an ISO STEP tolerancing standard as an enabler of smart manufacturing systems.* *J Comput Inf Sci Eng* 2015;15(2):021001.
- Festo Group.** *Qualification for Industry 4.0.* Denkendorf: Festo Didactic SE; 2017.
- Fosso Wamba S, Akter S, Edwards A, Chopin G, Gnanzou D.** *How “big data” can make big impact: Findings from a systematic review and a longitudinal case study.* *Int J Prod Econ* 2015;165:234–46.
- Guo ZX, Ngai EWT, Yang C, Liang X.** *An RFID-based intelligent decision support system architecture for production monitoring and scheduling in a distributed manufacturing environment.* *Int J Prod Econ* 2015;159:16–28.
- Hashim J.** *Information communication technology (ICT) adoption among SME owners in Malaysia.* *Int J Bus Inform* 2007;2(2):221–40.
- Hermann, M.; Pentek, T.; Otto, B.** *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review - Working Paper No. 01 / 2015 - Technische Universität Dortmund - Fakultät Maschinenbau - Audi Stiftungslehrstuhl Supply Net Order Management*
- Huang GQ, Zhang YF, Chen X, Newman ST.** *RFID-enabled real-time wireless manufacturing for adaptive assembly planning and control.* *J Intell Manuf* 2008;19(6):701–13.
- Koren Y, Wang W, Gu X.** *Value creation through design for scalability of reconfigurable manufacturing systems.* *Int J Prod Res* 2017;55(5): 1227–42.
- Kusiak A.** *Intelligent manufacturing systems.* Old Tappan: Prentice Hall Press; 1990
- Lee, J.; Kao, H.; Yang, S.** *Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment - Procedia CIRP* 16 (2014) 3 – 8
- Lee J, Lapira E, Bagheri B, Kao H.** *Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment.* *Manuf Lett* 2013;1(1):38–41.
- Li B, Hou B, Yu W, Lu X, Yang C.** *Applications of artificial intelligence in inteligente manufacturing: A review.* *Front Inform Tech El* 2017;18(1):86–96.
- Liu, C.; Xun, X.;** *Cyber-Physical Machine Tool – the Era of Machine Tool 4.0 - Procedia CIRP* 63 (2017) 70 – 75
- Lu YQ, Xu X.** *A semantic web-based framework for service composition in a cloud manufacturing environment.* *J Manuf Syst* 2017;42:69–81.
- Lund D, MacGillivray C, Turner V, Morales M.** *Worldwide and regional Internet of Things (IoT) 2014–2020*

forecast: A virtuous circle of proven value and demand. Framingham: International Data Corporation; 2014 May. Report No.: IDC #248451.

Manyika J, Chui M, Brown B, Bughin J, Dobbs R, Roxburgh C, et al. *Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity*. New York: McKinsey Global Institute; 2011.

Marilungo, E.; Papetti, A.; Germani, M.; Peruzzini, M. *From PSS to CPS design: a real industrial use case toward Industry 4.0* – Procedia CIRP 64 (2017) 357 – 362

Masoni, R.; Ferrise, F.; Bordegoni, M.; Gattulo, M.; Uva, A. E.; Fiorentino, M.; Carrabba, E.; Di Donato, M. *Supporting remote maintenance in industry 4.0 through augmented reality* – Procedia Manufacturing 11 (2017) 1296 – 1302

Mell P, Grance T. *The NIST definition of cloud computing*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology; 2011.

Oztemel E. *Intelligent manufacturing systems*. In: Benyoucef L, Grabot B, editors *Artificial intelligence techniques for networked manufacturing enterprises management*. London: Springer; 2010. p. 1–41.

Perrey J, Spillecke D, Umblijs A. *Smart analytics: How marketing drives shortterm and long-term growth*. In: Court D, Perrey J, McGuire T, Gordon J, Spillecke D *Big data, analytics, and the future of marketing & sales*. New York: McKinsey & Company; 2013.

Ridwan, F.; Xu, X. *Advanced CNC system with in-process feed-rate optimisation* - Robotics and Computer - Integrated Manufacturing 29 (2013) 12–20

Tao F, Cheng Y, Xu LD, Zhang L, Li BH. *CCIoT-CMfg: Cloud computing and Internet of Things-based cloud manufacturing service system*. IEEE Trans Ind Inform 2014;10(2):1435–42.

Wang YM, Wang YS, Yang YF. *Understanding the determinants of RFID adoption in the manufacturing industry*. Technol Forecast Soc 2010;77(5):803–15.

Xia F, Yang LT, Wang L, Vinel A. *Internet of Things*. Int J Commun Syst 2012;25(9):1101–2.

Xu X. *From cloud computing to cloud manufacturing*. Robot Com-Int Manuf 2012;28(1):75–86.

Zhang L, Luo Y, Tao F, Li BH, Ren L, Zhang X, et al. *Cloud manufacturing: A new manufacturing paradigm*. Enterp Inf Syst—UK 2014;8(2):167–87.

Zheng, P.; Wang, H.; Sang, Z.; Zhong, R. Y.; Liu, Y.; Liu, C.; Mubarak, K.; Yu, S.; Xu, X.; *Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives* - Frontiers of Mechanical Engineering (2018)

Zhong RY, Dai QY, Qu T, Hu GJ, Huang GQ. *RFID-enabled real-time manufacturing execution system for mass-customization production*. Robot Com-Int Manuf 2013;29(2):283–92.