



INTEGRAÇÃO DO SISTEMA CIBER-FÍSICO PARA SISTEMA DE PROGRAMAÇÃO, INTERTRAVAMENTO E CONTROLE DE UM REATOR BATELADA

CYBER PHYSICAL INTEGRATION PROGRAMMING, INTERLOCKING AND CONTROL SYSTEM FOR A BATCH REACTOR

R. S. SOUSA^{1,*}, G. R. TAIRA¹ e S. W. PARK¹

¹ Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Química, São Paulo, São Paulo, Brasil

I Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Química, São Paulo, São Paulo, Brasil, Telefone: +55 11 984495330
e-mail: renatasousa@usp.br (R.S. Sousa).

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2019-10-01

Accepted 2019-12-20

Available online 2019-12-20

palavras-chave

Indústria 4.0

CPS

Elementos Inteligentes

Batelada

Arquitetura

keywords

Industry 4.0

CPS

Smart elements

Batch

Architecture

ABSTRACT

This paper is aimed to clarify the concept of industry 4.0 to process control systems in the chemical engineering field maintaining established techniques and bringing them to a cyber physical context, integrating the information system, virtual model and physical process. After the elaboration of a control module architecture, including a virtual observer and an interlocking control application in a batch reactor the authors show the functionalities of a cyberphysical automation when compared to the complexity of traditional control systems hardwares.

RESUMO

O presente trabalho destina-se a esclarecer o conceito de Indústria 4.0 para sistemas de controle industrial de Engenharia Química, não abandonando as técnicas consagradas e colocando-as no contexto ciber-físico através da integração entre sistema de informação, modelo virtual e o processo físico. Após a elaboração da arquitetura e programação dentro de cada módulo de sistema de controle, incluindo um observador virtual, é realizada a aplicação de intertravamento no controle de um reator de batelada, mostrando as funcionalidades de automação ciberfísica quando comparada à complexidade de hardwares em sistemas tradicionais.

1. INTRODUÇÃO

O conceito “*Indústria 4.0*”, também chamado de “*Cyber Physical Integration*”, ou “Quarta Revolução Industrial”, foi concebido em 2011 na feira de Hannover, na Alemanha, e surgiu como uma estratégia para o desenvolvimento da economia do país. Apesar da sua relevância, ainda é algo que não está claramente definido. Existem algumas características que são admitidas como pertencentes a esse contexto, como a internet (Roblek et al., 2016), que serão discutidas ao longo do trabalho. No Brasil, o termo designado para descrever tal conjunto de tecnologias disruptivas é “transformação digital” e tem como proposta a integração de vários setores, tais como infraestrutura, tecnologias, negócios, leis e ética com um forte impacto econômico e social. Ichimura et al. (2016) chamam atenção para o cenário da Indústria 4.0 no país e levantam os impactos previstos no cenário industrial onde surgem desafios para a aplicação de novas tecnologias.

Um sistema ciber-físico (CPS) pode ser descrito como sendo um conjunto de sistemas físicos conectados a uma rede (sistemas embarcados e internet) que detêm um alto nível de integração entre produtos e processos, onde os elementos da cadeia produtiva têm a característica “*smart*” como um pré-requisito. Ou seja, a descentralização da hierarquia de controle faz com que seja gerada uma habilidade de comunicação além da vertical. Isso possibilita que tais elementos tenham autonomia para a tomada de decisão e não dependam de uma única central (Meissner, 2017).

Grande parte dos conceitos e tecnologias habilitadoras atuais já estão descritos antes de 2011, sem que sejam mencionadas palavras “*Cyber-Physical*” ou “*Industry 4.0*”. Como escrevem Lepuschitz et al. (2015), os conceitos gerais de tecnologia de agentes para aumentar a flexibilidade da produção vêm sendo abordados há décadas. Desde o advento de sistemas digitais de controle e de disponibilidade da capacidade computacional, há cerca de meio século, sistemas baseados em informações são utilizados para explorar dados e modelos, visando habilitar a capacidade de interpretação de dados e atuação nos processos através da tomada de decisões e controle avançado. Muñoz et al. (2010), que comentam sobre a infraestrutura para processos em batelada, e em Natarajan et al. (2012) que trazem a supervisão distribuída de processos de larga escala, descrevem exemplos acerca disso.

De modo geral, a indústria ainda não adotou essas ideias como sendo plenamente viáveis. Diferente do nível corporativo, é mais fácil descrever a maturidade e prontidão de controle de processos para Indústria 4.0 em uma unidade fabril específica do que descrever as tecnologias disponíveis dos fornecedores (*suppliers*). Ou seja, é mais difícil definir se o setor de tecnologia de automação está pronto para transformação digital pois sensores inteligentes (Schültze et al., 2018), CLPs (Vogel-Heuser et al., 2018), arquiteturas e *hardwares* (Lu, 2017) estão em constante e rápido desenvolvimento, e existem vários grupos e companhias que propõem diferentes modelos de maturidade para automação industrial.

Para que se configure uma proposta de controle de processos no contexto da Indústria 4.0 em processos químicos de batelada, é preciso analisar as seguintes condições:

1. As tecnologias e as quantidades da instrumentação no chão da fábrica estão prontas para Indústria 4.0?
2. As comunicações e seus protocolos estão adequados?
3. Consegue-se integrar vertical e horizontalmente as informações e as atuações das decisões?
4. A capacidade computacional e os softwares operacionais estão prontos para Indústria 4.0?
5. É possível dissolver as ilhas ciber funcionais mantendo conceitualmente esses subsistemas como modulares? (flexibilidade e interoperabilidade)
6. Há quantidade e variedade suficiente das variáveis do processo disponíveis como dados, de modo a levantar as relações entre essas variáveis e seus atributos para diagnosticar, e tomar ações de controle de modo diferente do tradicional?
7. Existe um planejamento claro do que se deseja com a transformação digital?
8. Há arquitetura física e virtual robusta em termos de segurança?

Para ilustrar as ideias da transformação digital em controle de processos, foi selecionado um reator batelada com seu sistema tradicional. Os conceitos latentes para Indústria 4.0 são discutidos na sessão seguinte. Esse trabalho está na sua fase inicial e é desenvolvido em paralelo com outro, também em construção, relativo ao controle global (*plant wide control*), usando como exemplos em definição de “*Roadmap for Continuous Process Industry 4.0*”.

2. SISTEMA DE CONTROLE DE REATOR BATELADA

O sistema para o presente artigo tem três níveis de automação, são eles: Controle do Reator, *Scheduling*, (procedimento de ciclos de operação) e o Sistema de Intertravamento. O modelo do processo e sua reação química seguem Luyben (1996). A simulação, apresentada na figura 1, foi realizada através de *Simulink/Matlab*® e incluiu o controle em *split-range* para a camisa de aquecimento/resfriamento do reator.

O ciclo de operação segue a seguinte ordem:

- Enchimento dos reagentes;
- Partida do agitador;
- Seguimento do tempo (curva) de aquecimento de controle de processo;
- Parada de agitador;
- Esvaziamento;
- Preparação de um novo ciclo.

O sistema de intertravamento deve checar as seguintes condições:

- Se toda a instrumentação está desenergizada na partida, a parada de emergência;
- Se o tanque está vazio;
- Se a drenagem está fechada;
- Se totalizador de vazão de carga está reinicializada;
- Se o nível da carga está adequado;
- Se a válvula de alimentação está fechada para iniciar agitação;

- Se sistema está pronto para a curva de aquecimento;
- Verificar esquema de curva;
- Checar a parada de agitador;
- Conferir se o sistema está pronto para a drenagem.

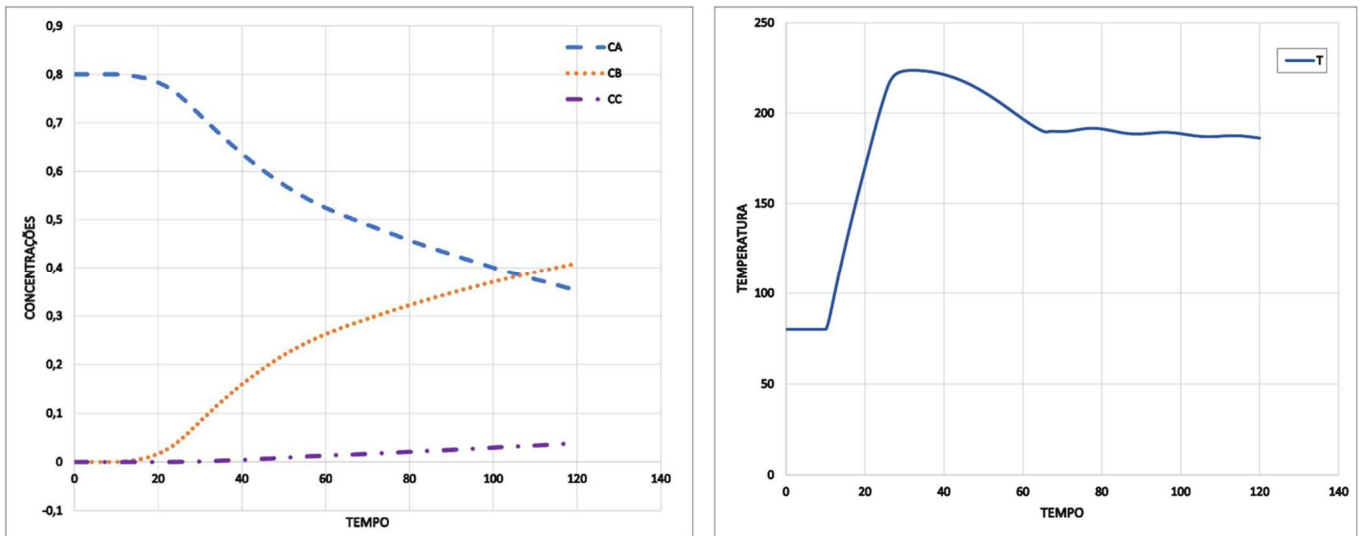


Figura 1 – Curva de aquecimento e esfriamento pelo controle split-range e a evolução da conversão química.

Ao contrário do controle tradicional baseado apenas em feedback e estruturas hierarquizadas em camadas com diferentes protocolos de comunicação entre elas, tal tecnologia permite que uma maior quantidade de dados passados seja utilizada. Ou seja, há uma capacidade de comunicação (*Internet of Things* - IoT) e cooperação (CPS) onde dispositivos autônomos podem tomar decisões baseados nas informações adquiridas. Sendo assim, devido à grande quantidade de informação gerada e a necessidade de interpretação e seleção desses dados, tais sistemas são relacionados à *Big Data Analytics*, o que faz com que estimadores e observadores de processo mais elaborados possam ser obtidos quando se faz uma comparação com a virtualização do processo (*Digital Twin*) (Kusmin, 2017).

Em um CLP (Controlador Lógico Programável) usual, o sistema de *scheduling* e sistema de intertravamento, que seguem Zoss (1979), dependem um do outro na sua lógica. O ambiente em *Simulink/Matlab®* é muito útil para ilustração de sistemas ciber físicos já que todas as informações estão disponíveis, assumindo que são cumpridos os protocolos de comunicação, como em Cai e Qi (2017), por exemplo. Um sistema tradicional de reator em batelada, ilustrado na figura 2, foi simplificado para que houvesse apenas uma entrada de reagente e serve para ilustrar a estrutura lógica de controle e intertravamento antigo (figura 3 – lado esquerdo) quando comparado com a nova estrutura utilizando CPS (figura 3- lado direito). A implementação de sistemas de intertravamento e de *scheduling* da batelada, em código de programação, não é mostrada nessa figura.

Ainda na figura 3, características como a flexibilidade e o sequenciamento de ciclos de operação e curva de processo passam a ser perceptíveis enquanto na figura 2 a troca de informação ocorre de maneira menos flexível, visto que mesmo em tempos de controle DCSS (*Distributed Computer Control System*), a configuração antiga oferece soluções em ilhas com funções específicas e suas extensões, interconectividades e modularidades limitadas. A comunicação antiga entre as

camadas de informação utilizadas em nível corporativo e “chão da fábrica” dificultava as mudanças rápidas em estratégias de novas produções, exigindo mais custos e tempos para mudanças em arquiteturas de controle. Além de modelos e observadores, a nova arquitetura permite uma expansão em conceitos de *digital twin* e *machine learning*, localmente no “chão da fábrica”.

Isto não significa que se deixará de utilizar o controle avançado e sim que haverá uma expansão do controle moderno através da integração ciberfísica entre o processo industrial, sistemas de controle, o sistema de decisão e o banco de dados PHD (*Process Historical Data*).

Atualmente, há várias propostas de arquitetura para sistemas ciber físicos. Uma delas é ilustrada na figura 4, que mostra todas as funcionalidades tradicionais com as características de flexibilidade e interoperabilidade na nova configuração.

Na primeira camada da figura 4, encontram-se todos os elementos que constituem o processo físico e precisam ser monitorados, junto com os seus respectivos transdutores, sensores e atuadores que podem ser considerados como parte integrante do processo físico (comparar com o lado direito da figura 3).

As informações são enviadas para a camada de controle de processos que, por sua vez, gerencia a aquisição de dados vindos do sistema através de um protocolo de comunicação como, por exemplo, o OPC que é amplamente usado em ambientes industriais. Essas camadas se tornam integradas e auto gerenciáveis quando se considera a próxima geração de infraestrutura de tecnologias, ou seja, o uso de *smart devices*.

Para que os dados cheguem até a camada de *Data Analytics*, que é responsável pela extração de conhecimento por meio da grande quantidade de informação que está disponível no processo, tornando possível a identificação de padrões, a arquitetura proposta por Sanchez et al (2016) possui um *middleware* baseado na publicação de eventos, onde uma API

(Application Programming Interface) é utilizada.

A tomada de decisão se dá através da camada de modelo global que, ao receber os eventos (decisões empresariais), deve gerar ações ou atividades para sair de um estado de produção ou entrar em outro, de maneira robusta, para todo o sistema subjacente da infraestrutura de produção nessas atividades.

Na última camada (*expertise*), é possível que sistemas especialistas modelem de maneira detalhada uma sequência de estados, de acordo com o tipo de indústria. Nessa camada, encontra-se ilustrada a interação do consumidor com a cadeia produtiva. Mais detalhes da arquitetura são discutidos em Sanchez et al. (2016).

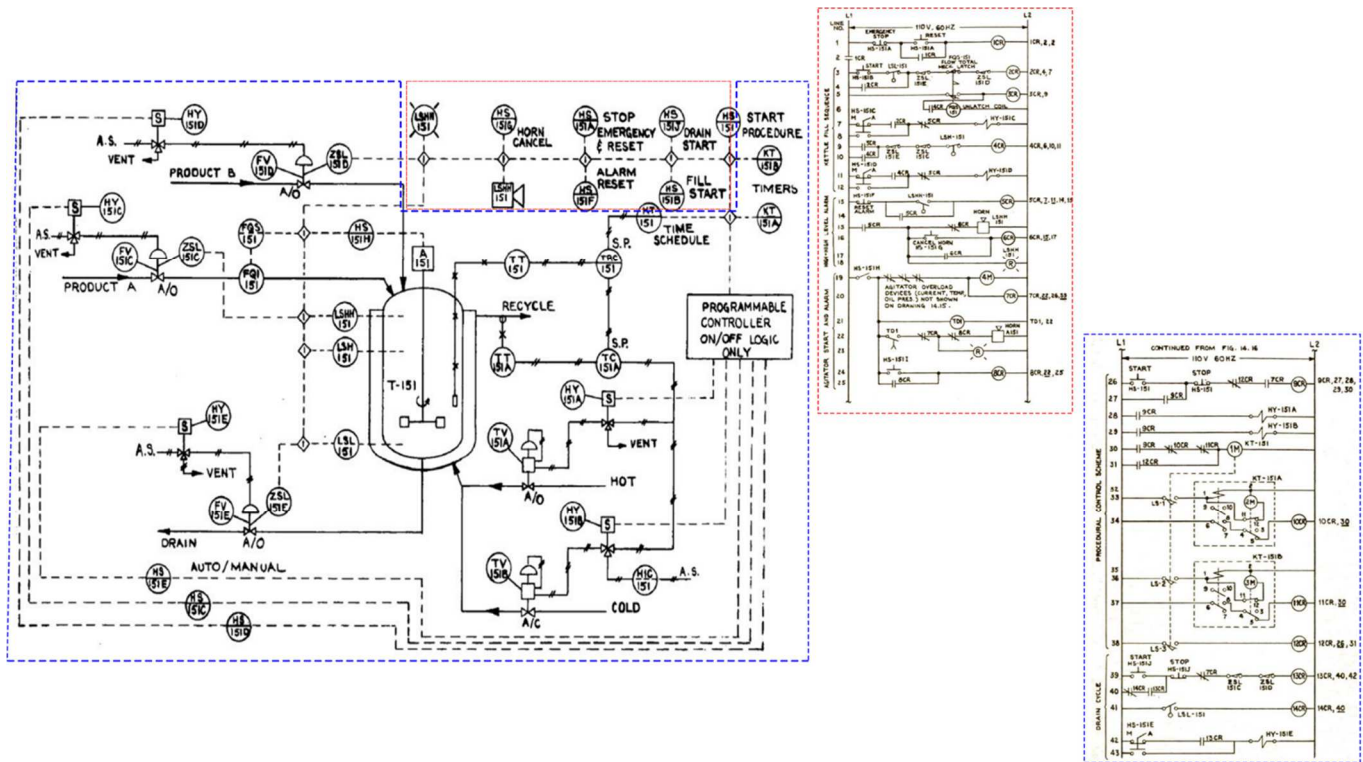


Figura 2 – Esquema do sistema de controle de reator em batelada tradicional de Zoss (1979) e diagrama Ladder do CLP.

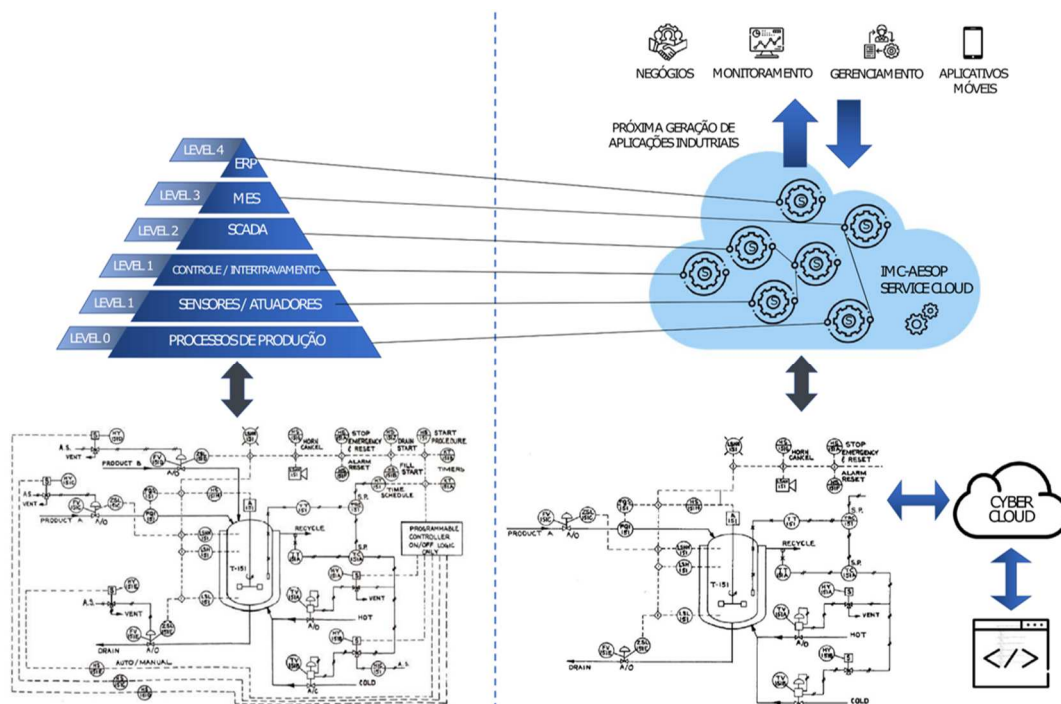


Figura 3 – Migração do controle tradicional para ciber-físico adaptado de Leitão et al. (2016) e sua realização em sistema de reator de batelada.

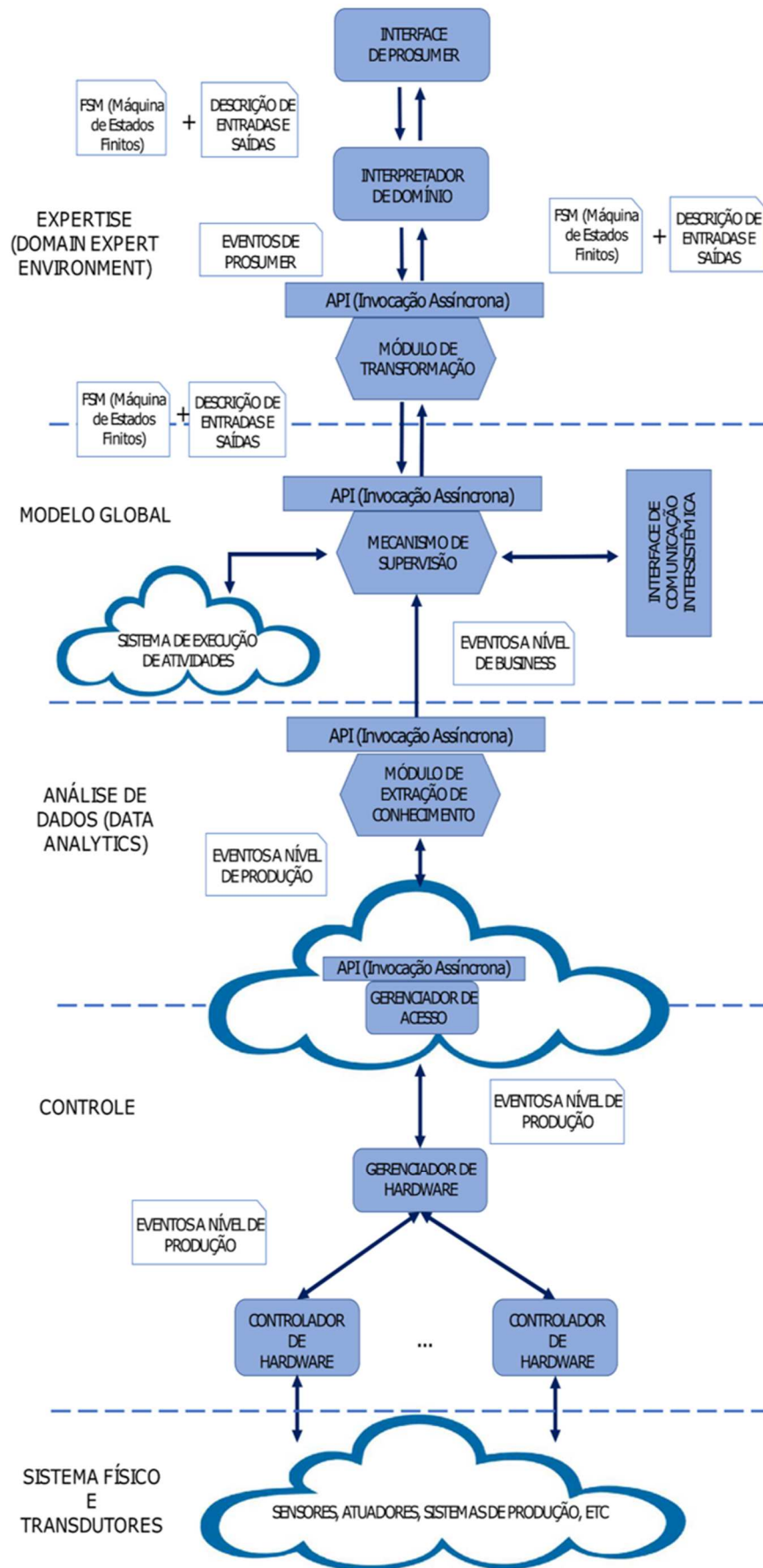


Figura4 – Detalhes funcionais de uma Arquitetura Ciberfísica (Adaptado de Sanchez et al., 2016).

3. DISCUSSÃO SOBRE INDÚSTRIA 4.0 EM CONTROLE DE PROCESSOS EM BATELADA

As funcionalidades típicas de um sistema de controle de um processo em batelada ultrapassam as chamadas variáveis locais usuais e devem atender a (1) análise de qualidade, (2) gerenciamento de qualidade, (3) gerenciamento de materiais e recursos, (4) planejamento e *scheduling* de produção, (5) gerenciamento de receituários, (6) manutenção, (7) interface homem-máquina, (8) sistemas de alarme e diagnóstico de falhas, e (9) controle de processos (usualmente em CLP).

Diferentemente do controle de processos químicos contínuos, cujo item (9) tem um enfoque maior no chão de fábrica, sistemas que funcionam em batelada necessitam de uma integração maior entre todos os níveis das funcionalidades. Portanto, mesmo um SCADA necessita de uma flexibilidade maior do que a usualmente encontrada em CLP ou DCSS. Lepuschitz et al. (2015) traz em seu trabalho uma discussão útil sobre as normas: IEC 61512, ANSI/ISA-88, IEC 62264, ANSI/ISA-95, ISO 15926, IEC 62424 e IEC 62714. Normas para arquiteturas de sistemas ciber-físicos em geral e os cinco componentes da arquitetura 5c (conexão, conversão, ciber, cognição e configuração) estão bem explicados em Ahmadi et al. (2017).

Processos químicos em batelada atualmente são muito utilizados como unidades multipropósito. Atividades múltiplas e inter-relacionadas com diferentes durações exigem fluxo de informação e da sua análise desde vendas até produção, com as questões de *scheduling*, configuração da disponibilidade dos equipamentos, receitas de produção múltipla, diagnóstico de ocorrências que interrompem a campanha, desvios e outros aspectos que obrigam a readequação dos requisitos da unidade fabril. Os requisitos da receita de produção envolvem informações sobre as formulações e de procedimentos de ciclos de produção, já os requisitos de controle de processos são os usuais de controle, de preferência em estrutura supervisória, incluindo controle avançado. Nota-se que na Indústria 4.0 não se propõe a substituição de CLP ou DCSS, e sim que o fluxo de informações permita que estes executem as tarefas robustas, e que as tarefas de difícil programação nas nove funcionalidades citadas anteriormente, ou de análise, ou aprendizado com IA (Inteligência Artificial), funções auto-otimizantes que aumentam a utilização efetiva da unidade sejam deixadas para os novos conceitos ciber-físicos.

Visto que flexibilidade e interoperabilidade são algumas das peças chaves para integração ciberfísica, o tráfego de informações se torna peça fundamental na estrutura do sistema, conseqüentemente, o uso industrial de *wireless network* (IWS - *Industrial Wireless Network*) será uma das tecnologias habilitadoras importantes. Isso significa que para a arquitetura dessas redes, itens como a disponibilidade (*reability*), topologias dinâmicas, mobilidade, interferência dos sinais e perdas, validação e segurança, terão grande impacto em controle de processos em batelada, mas são aspectos para além do presente trabalho (Li et al., 2017) e (Marcon et al., 2017). Por

isso, remete-se a leitura de Lucas-Estañ et al. (2018) sobre os requisitos da comunicação, lembrando que os protocolos de comunicação para controle de processo sofrerão rapidamente readequação para Indústria 4.0

A *Indústria 4.0* representa a quarta revolução industrial a caminho da internet das coisas, dados e serviços. A inteligência descentralizada ajuda a criar redes de objetos inteligentes e gerenciamento de processos independente, com a interação dos mundos real e virtual representando um novo aspecto crucial do processo de fabricação e produção. Um extrato do lançamento original do conceito de indústria inteligente ou "*Industrie 4.0*" refere-se à evolução tecnológica de sistemas embarcados para sistemas ciber-físicos.

De uma forma mais elaborada, os sistemas ciber-físicos constituem uma tecnologia disruptiva que traz a inovação devido ao seu potencial para integrar tecnologias de vários setores, com forte impacto nas economias e nos processos sociais. Suas aplicações ocorrem em muitos domínios, da manufatura à agricultura e da infraestrutura crítica da assistência à vida, desafiarão a tecnologia, os negócios, a lei e a ética. Ou seja, um CPS precisa se ajustar e operar de maneira confiável e previsível, tendo a segurança como prioridade principal, especialmente em ambientes onde condições perigosas podem ocorrer. A próxima fase da revolução digital diz respeito a plataformas, automação, crescimento, segurança e emprego.

Integração de sistemas e auto otimização são os dois principais mecanismos usados na organização industrial. A total integração e automação digital dos processos de fabricação nas dimensões vertical e horizontal implica também uma automação da comunicação e cooperação, especialmente ao longo de processos padronizados. Dispõem-se através de CPSs a *Integração Horizontal* em toda a rede de criação de valor, a *Integração vertical* de sistemas de manufatura em rede e a *Integração de* ponta a ponta* em todo o ciclo de vida do produto. Um exemplo de arquitetura nesse modelo é a RAMI 4.0 (*Reference Architectural Model Industrie 4.0*), proposta pela Associação Alemã de Fabricantes de Elétricos e Eletrônicos (ZVEI), detalhes são encontrados em Schweichhart (2016)*.

Indústria 4.0 redefine a manufatura na Indústria Química porque:

1. Os "*insights*" em tempo real sobre o desempenho das operações baseadas em sensores baseados em equipamentos ("*Analytics Intelligence*") aprimoram a velocidade e a qualidade das decisões;
2. A rastreabilidade, e o controle da produção até o cliente, economizam horas;
3. A manutenção preditiva é antecipada e redefine o modelo de Manutenção, Reparo e Revisão como um negócio lucrativo;
4. A gestão de ativos e o sistema de execução são redefinidas e aceleradas;
5. A produtividade de vários centros interligados é melhorada;
6. O despacho, a conformidade corporativa, e o desempenho do gerenciamento da qualidade são

* <https://www.amnytt.no/getfile.php/3901260.2265.akzillq17uupz/RAMEI+4.0.pdf>

melhoradas;

7. Oferece-se produtos “customizados” “em massa” (internos e em “*front-end*”).

Sistemas ciber-físicos estão intimamente relacionados à *big data* por natureza: geram continuamente uma grande quantidade de dados, o que requer que tais técnicas processem e ajudem a melhorar a escalabilidade, segurança e eficiência do sistema (Xu e Duan., 2019) e (Park e Almeida, 2017). Realidade virtual e “*visual analytics*” são outras áreas de crescente importância para CPS de sistemas químicos (Almeida e Park, 2017).

Portanto as características de interoperabilidade, gêmeo digital, descentralização, computação em nuvem (*cloud computing*) e em névoa (*fog computing*), otimização em tempo real, modularidade, aprendizagem de máquina, *Blockchain* e 5G trarão profundas mudanças e redefinirão o modelo de negócios na Indústria Química.

As técnicas avançadas de observadores, estimadores de estado, controle preditivo, “*soft-sensors*”, diagnóstico avançado de falhas e muitas outras, já estão disponíveis para o ambiente de Indústria 4.0, advindas do desenvolvimento para processos industriais químicos contínuos. Atualmente, sua utilização em processos de batelada tem um horizonte de grande potencial, principalmente quando aliadas aos sistemas de receitas (*scheduling*), intertravamento e operação com otimização. O presente artigo visa ilustrar tal conceito de modo que a junção de todas essas atividades sem a estrutura da Indústria 4.0 se tornaria complexa no aspecto de arquitetura física.

Em contrapartida, existem duas linhas de desenvolvimento que se diferenciam entre processos químicos de batelada e processos contínuos. A primeira, denominada “ontologia” (ferramentas de representação, compartilhamento e reuso de conhecimento e informações), quando se trata de sistemas em batelada, está muito relacionada à integração com as demais atividades de análise de desempenho, gestão de qualidade e de materiais e produtos, planejamento de produção e receitas (*scheduling*), manutenção, interface homem-máquina (HMI), alarmes e controle direto do processo (Lepuschitz et al., 2015), (Munõz et al., 2010). Já para sistemas de controle de processos contínuos complexos (*mill wide control*) há várias camadas funcionais, onde cada uma das atividades citadas para ontologia tem seu campo específico de desenvolvimento. Quanto à parte de controle direto de processos contínuos, a ontologia ainda se encontra em desenvolvimento, utilizando os conhecimentos advindos de segmentação e reagrupamentos funcionais empregues na modelagem e simulação de PFD (*Process Flow Diagram*). Entretanto a formalização de implementação na camada de controle de processos complexos contínuos está em avanço constante (Schneider et al., 2019) e será objeto de uma publicação posterior dos presentes autores.

A segunda linha que diferencia aplicação de CPS de processos em batelada dos processos contínuos é a PAT (*Process Analytical Technology*) cuja definição é dada, pelo US FDA (2004), como sendo um *sistema para análise e controle de processos de manufatura baseado em medições durante processos, a tempos adequados, de parâmetros críticos de qualidade e de atributos de desempenho de matérias primas, insumos e processos, para assegurar qualidade aceitáveis dos produtos finais ao completar o processo de produção.*

O uso das técnicas de análise estatística multivariada em

processos químicos pode ser traçado desde 50 anos atrás, devido ao interesse da área de análise de espectros em instrumentos químicos (“*chemometrics*”) (Wise, 1993). Com o advento da disponibilidade, tanto os dados de qualidade pelo LIMS (*Laboratory Information Management System*) quanto os dados de PHD pelo PIMS (*Process Information Management System*), fizeram com que a utilização das técnicas de “*Big Data Analytics*” se tornassem adequadas. (Adamo et al., 2016), (Lee et al., 2015), (Park e Almeida, 2014). A base para PAT sempre foi Estatística Multivariada (Tomita et al., 2002), (Yasumura et al., 2012), (Pomerantsev; Rodionova, 2012) e sua área é fortemente baseada em dados de LIMS (*Laboratory Information Management System*) e suas diversas técnicas instrumentais, principalmente as que resultam de espectros, como NIR, Raman, IR, XPS, Cromatografias e todas as outras comuns a área de bio-fármacos.

A aplicação de PAT em processos em batelada será objeto de outra publicação posterior dos autores e de outros itens relevantes relacionados à aplicação de CPS no contexto de sistemas químicos em batelada, como os vários citados ao longo do presente texto estão em desenvolvimento pelos autores.

4. CONCLUSÕES

Cyber-Physical Systems são vistos como desenvolvimentos de *backbone* (suporte) e *Industry 4.0* como aplicações nos setores econômicos de diversas disciplinas e tecnologias de inteligência artificial, simulação, automação, robótica, *IIoT*, sensores, sistemas de dados massivos, redes de comunicação, e outros de modo que se tenha uma produção industrial sustentável, colaborativa e eficiente entre as antigas “ilhas” funcionais. É usual incluir o termo “*smart*” para que haja uma diferenciação das técnicas tradicionais no sentido de integrar, monitorar, controlar e coordenar operações (processos), a partir do sistema de acesso (comunicação) e de processamento computacional, devido ao advento das tecnologias novas que habilitam o diagnóstico, prognóstico e prescrição em tempo real com ferramentas que anteriormente eram utilizadas *off-line*.

As tecnologias habilitadoras da transformação digital atual e o ambiente de entusiasmo propiciado pelos conceitos de Indústria 4.0, trazem possibilidades que muitos pesquisadores e fornecedores de tecnologia veem como animadoras para aplicar as teorias de controle em áreas não imaginadas antes. Tais com: aplicações em cadeia de suprimentos, integração de planejamento e *scheduling* corporativo ao meio produtivo, sistemas de gestão e outros aspectos empresariais de negócios (Ivanov et al., 2018).

No presente trabalho, é ilustrada uma direção reversa. Pois, para processos químicos em batelada já existiam tecnologias disponíveis. Estas serão apenas readequadas para Indústria 4.0, e outras tecnologias habilitadoras, como por exemplo, realidade aumentada e comunicação *wireless* 5G, que terão avanços disponibilizados por outros setores econômicos, de interesse da transformação digital.

Uma vez explicado que, para processos químicos em batelada, o conceito de controle é mais amplo do que em processos contínuos, as questões-chave para Indústria 4.0 são a flexibilidade, a interoperabilidade e a comunicação entre as diferentes funcionalidades empresariais. O problema principal a

ser colocado será a seguinte questão: “Qual o objetivo no chão da fábrica para se implantar Indústria 4.0?”, visto que a eficiência e melhoria de produção, apesar de quantificáveis, são uma ideia difusa em relação aos ganhos e custos.

A melhor resposta é que, ao fazer a transformação digital, se possibilita a inovação. Não que o controle de processos no chão da fábrica se torne necessariamente inovativo, e sim que a própria empresa se torna inovativa, estando pronta para mudanças rápidas, melhor tomada de decisões e execução de aprimoramentos em ambiente de incertezas. Antigamente, empresas que se atrasavam simplesmente encerravam suas atividades, hoje, em qualquer setor não está definido o ganhador e a informação é uma *commodity*. Saber fazer as perguntas e estruturar o conhecimento, ou seja, ser inovador, está no centro da agenda.

Cada um dos aspectos de pesquisa que são relevantes para a área, tais como as particularidades de processos contínuos, tanto conceitos similares quanto diferentes para processos químicos industriais, *machine learning*, definições de ontologias para arquiteturas de diversas tecnologias, *big data* e *visual analytics*, *digital twin*, auto otimização e autodiagnóstico avançados, estão em andamento com os autores.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, processo 88887.336319/2019-00 e FAPESP processo 17/50343-2.

REFERÊNCIAS

- ADAMO, A., BEINGESSNER, R. L., BEHNAM, M., CHEN, J., JAMISON, T. F., JENSEN, K. F., STELZER, T. On-demand continuous-flow production of pharmaceuticals in a compact, reconfigurable system. *Science*, 352 (6281), 61-67. 2016
- AHMADI, A., CHERIFI, C., CHEUTET, V., OUZROUT, Y.; A review of CPS 5 components architecture for manufacturing based on standards. In 2017 11th Int. Conf. on Software, Knowledge, Information Management and Applications. IEEE. 2017. p. 1-6.
- ALMEIDA, G.M.; PARK, S.W. Visual Analytics- Buscando o desconhecido. *Revista Brasileira de Engenharia Química*. Vol. 33, n.1, p.27-35. 2017
- CAI, Y., QI, Y; Physical control framework and protocol design for cyber-physical control system. *Int. J Dist Sensor Networks*. 3(7), 2017
- ICHIMURA Get al., Panorama de Inovação: indústria 4.0. Relatório FIRJAN SENAI de Inovação. Disponível em: <https://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-de-inovacao/industria-4-0-1.htm#pubAlign>, 2016. Acessado em 30/02/2019.
- IVANOV, D., SETHI, S., DOLGUI, A., SOKOLOV, B.; A survey on control theory applications to operational systems, supply chain management, and Industry 4.0. *Annual Reviews in Control*. 2018
- KUSMIN K.; Industry 4.0. Analytical Article -Information Society Approaches and ICT Processes, 2017.
- LEE, S. L., O'CONNOR, T. F., YANG, X., CRUZ, C. N., CHATERJEE, S., MADURAWA, R. D., WOODCOCK, J. Modernizing pharmaceutical manufacturing: from batch to continuous production. *Journal of Pharmaceutical Innovation*, 10(3), 191-199. 2015
- LEES, M.; A maturity model for Control and Automation in environmental impact. 2016 Australian Control Conf (AuCC). p. 299-304. 2016
- LEITÃO, P.; COLOMBO, A. W.; KARNOUSKOS, S. “Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges”. *Computers in Industry* 81, pp. 11-25. 2016
- LEPUSCHITZ, W., LOBATO-JIMENEZ, A., AXINIA, E., MERDAN, M.; A survey on standards and ontologies for process automation. In *Int Conf Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (2015, September, Cham) Springer*. 2015. p. 22-32.
- LI, X., LI, D., WAN, J., VASILAKOS, A. V., LAI, C. F., WANG, S.; A review of industrial wireless networks in the context of Industry 4.0. *Wireless networks*, 23(1), p. 23-41. 2017.
- LU, Y.; Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *J. Ind. Information Integration*, 6, 1-10. 2017.
- LUCAS-ESTAN, M. C., RAPTIS, T. P., SEPULCRE, M., PASSARELLA, A., REGUEIRO, C., LAZARO, O.; A software defined hierarchical communication and data management architecture for Industry 4.0. In 2018 14th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS). IEEE. p. 37-44. 2018
- LUYBEN, W. L., Process modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers. 2nd Ed. McGraw-Hill. 1996
- MARCON, P., ZEULKA, F., VESELY, I., SZABO, Z., ROUBAL, Z., SAJDL, O., GESCHIEDTOVA, E., DOHNAL, P.; Communication technology for industry 4.0. In 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS) IEEE.p. 1694-1697. 2017.
- MEISSNER H, ILSEN R, AURICH, J.C.; Analysis of control architectures in the context of Industry 4.0. 10th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '16, p. 165 – 169. 2017.
- MUÑOZ, E., ESPUÑA, A., & PUIGJANER, L.; Towards an ontological infrastructure for chemical batch process management. *Computers & Chemical Engineering*, 34(5). p. 668-682. 2010.
- NATARAJAN, S.; GHOSH, K.; SRINIVASAN, R.; An ontology for distributed process supervision of large-scale chemical plants. *Computers and Chemical Engineering*, 46. p. 124-140. 2012.
- PARK, S.W.; ALMEIDA, G.M. Utilization of process historical data in recovery boilers. In: Vakkilainen, E., Lampinen, P., Nieminen, M. (eds.), *Continuous development of recovery boiler technology – 50 years of cooperation in Finland*, FRBC, chapter 6, 77-92, 2014.
- PARK, S.W.; ALMEIDA, G.M. Big Data Analytics em Engenharia Química. *Revista Brasileira de Engenharia Química*. Vol. 33, n.1, p.15-20. 2017.
- POMERANTSEV, A. L.; RODIONOVA, O. Y. Process analytical technology: a critical view of the chemometricians. *Journal of Chemometrics*, v. 26, n. 6, p. 299-310, 2012
- ROBLEK V, MESKO M, KRAPEZ A, A complex view of Industry 4.0. *SAGE Open* 6 (2), 2016

- SÁNCHEZ, B. B.; ALCARRIA, R.; SÁNCHEZ-DE-RIVERA, D.; SÁNCHEZ-PICOT, A. "Enhancing Process Control in Industry 4.0 Scenarios using Cyber-Physical Systems". *Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications*, 7:4, pp. 41-64. 2016
- SCHNEIDER, G. F., WICAKSONO, H., OVTCHAROVA, J. Virtual engineering of cyber-physical automation systems: The case of control logic. *Advanced Engineering Informatics*, 39, 127-143. 2019
- SCHÜLTZE, A., HELWIG, N., SCHNEIDER, T. Sensors 4.0—smart sensors and measurement technology enable Industry 4.0. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 7(1), 359-371. 2018
- SCHWEICHHART, K., Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0). An Introduction. 2016
- TOMITA, R. K.; PARK, S. W.; SOTOMAYOR, O. A. Z. Analysis of activated sludge process using multivariate statistical tools—a PCA approach. *Chemical Engineering Journal*, v. 90, n. 3, p. 283-290, 2002
- U.S. Food and Drug Administration, Guidance for Industry, PAT – a framework for innovative pharmaceutical development, manufacturing, and quality assurance, September 2004
- VOGEL-HEUSER, B., FISCHER, J., NEUMANN, E. M., DIEHM, S. Key maturity indicators for module libraries for PLC-based control software in the domain of automated Production Systems. *IFAC-Papers On-line*, 51(11). p. 1610-1617. 2018.
- WISE, B.M. Using the PLS Toolbox in PAC applications. *Process Control and Quality*, vol. 5, p. 73-85. 1993
- XU, L. D.; DUAN, L. Big data for cyber physical systems in industry 4.0: A survey. *Enterprise Information Systems*, 13(2), 148-169. 2019.
- YASUMURA, P. K.; DALMEIDA, M. L. O.; PARK, S. W. Multivariate statistical evaluation of physical properties of pulps refined in a PFI mill. *O Papel*, v. 73, n. 3, p. 59-65, 2012.
- ZOSS L. *Applied Instrumentation in the Process Industries*. Gulf Publ. 1979.