

Arquitetura para aquisição e análise de dados de um eletrolisador PEM em regime dinâmico utilizando PI System

Julián Gutiérrez^{a*}, Federico Belén^b, Sergio Neiro^c, Heleno Bispo^d

^aDepartamento de Ingeniería Eléctrica y Computadoras, ICIC-CONICET, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca-BA, Argentina

^bDepartamento de Química, INQUISUR-CONICET, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca-BA, Argentina

^c Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, Brasil

^d Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, Brasil

*julian.gutierrez@eq.ufcg.edu.br

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma arquitetura integrada para aquisição, armazenamento e análise de dados de um eletrolisador PEM em regime dinâmico, utilizando uma planta virtual implementada no AVEVA Dynamic Simulation. A comunicação entre o modelo e a infraestrutura de dados foi realizada via OPC UA, com armazenamento no PI System e visualização em tempo real através do PI Vision. Para avaliar o comportamento dinâmico do sistema, foram introduzidas perturbações controladas na alimentação elétrica, permitindo a análise da propagação dessas variações ao longo do processo. Os resultados evidenciaram uma relação direta entre a corrente elétrica e a produção de hidrogênio, bem como o efeito de amortecimento dos separadores sob condições de baixa variabilidade. Em cenários mais instáveis, observaram-se oscilações nas correntes de saída e aumento do esforço de controle. A abordagem proposta demonstra o potencial da integração entre simulação dinâmica e plataformas de dados para análise de sistemas complexos e suporte ao desenvolvimento de estratégias baseadas em dados.

Palavras-chave: Eletrolisador PEM; OPC UA; PI System; Aquisição em tempo real; Análise baseada em dados

1. Motivação e objetivo

A crescente demanda por hidrogênio como vetor energético tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias de produção mais eficientes e sustentáveis, dentre as quais se destacam os eletrolisadores do tipo PEM (Proton Exchange Membrane). Esses sistemas apresentam elevada eficiência e rápida resposta dinâmica [1], porém sua operação envolve forte acoplamento entre variáveis elétricas, térmicas e de processo, o que torna a análise de seu comportamento dinâmico um aspecto crítico para operação segura e eficiente.

Nesse contexto, a digitalização de processos industriais e o uso de plataformas de aquisição e gerenciamento de dados em tempo real têm se consolidado como ferramentas relevantes para o monitoramento e análise de sistemas complexos [2, 3]. No entanto, a disponibilidade de dados provenientes de plantas reais para o desenvolvimento e validação dessas estratégias é frequentemente limitada, o que motiva o uso de plantas virtuais em regime dinâmico como alternativa para a geração controlada de dados operacionais.

Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma arquitetura integrada para aquisição, armazenamento e visualização de dados de um eletrolisador PEM, utilizando uma planta virtual implementada no AVEVA Dynamic Simulation (DYNSIM). A comunicação dos dados é realizada por meio do protocolo OPC UA, com armazenamento no PI System e visualização através do PI Vision, permitindo o acompanhamento em tempo real das variáveis do processo.

Adicionalmente, são introduzidas perturbações controladas na variável elétrica de alimentação do eletrolisador, com o objetivo de gerar cenários dinâmicos representativos de operação. A partir desses cenários, busca-se analisar a resposta do sistema, a propagação das perturbações ao longo do processo e a relevância das variáveis monitoradas para a caracterização do comportamento dinâmico do sistema. Dessa forma, o trabalho contribui para o desenvolvimento de estratégias de monitoramento e análise baseadas em dados, em consonância com os conceitos de Engenharia de Sistemas em Processos.

2. Metodologia

2.1. Modelo dinâmico do eletrolisador

O sistema estudado corresponde a um eletrolisador do tipo PEM (Proton Exchange Membrane), modelado em regime dinâmico no ambiente DYN SIM. O modelo representa uma configuração típica de produção de hidrogênio por eletrólise da água, incluindo os subsistemas elétrico, de processo e de controle.

O fornecimento de energia elétrica ao eletrolisador é realizado por meio de uma fonte elétrica conectada a um transformador e a um barramento (bus), sendo este responsável por alimentar a célula eletrolítica. A alimentação do processo consiste em água, que é introduzida no eletrolisador sob controle de vazão.

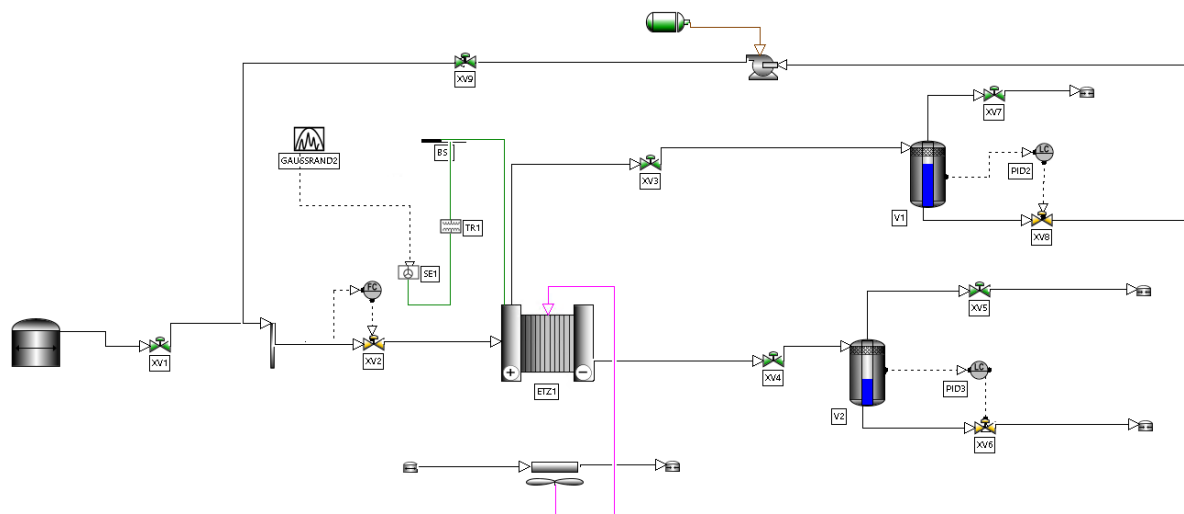
A partir do eletrolisador, são geradas duas correntes gasosas, uma rica em hidrogênio (lado catódico) e outra rica em oxigênio (lado anódico). Cada uma dessas correntes é encaminhada a um separador líquido-vapor, onde ocorre a separação das fases, permitindo a obtenção dos produtos gasosos e a recuperação da fase líquida.

A corrente líquida proveniente do separador do lado anódico é recirculada ao sistema, sendo bombeada e misturada com a alimentação de água antes de retornar ao eletrolisador. Adicionalmente, o sistema conta com um aerofriador acoplado ao eletrolisador, responsável pela remoção de calor gerado durante a operação.

O modelo inclui ainda a implementação de controladores de processo, incluindo um controlador de vazão na alimentação do eletrolisador, atuando sobre uma válvula na linha de entrada, e controladores de nível nos separadores, que atuam sobre as correntes líquidas de saída.

Com o objetivo de analisar o comportamento dinâmico do sistema, foi introduzida uma perturbação na fonte elétrica, modelada como um ruído gaussiano, permitindo a geração de cenários dinâmicos representativos de flutuações no fornecimento de energia e a avaliação da resposta do processo a essas variações.

Figura 1. Diagrama do sistema do eletrolisador PEM implementado no AVEVA Dynamic Simulation.



2.2. Arquitetura de aquisição e gerenciamento de dados

A integração entre o modelo dinâmico e a infraestrutura de dados foi estruturada fisicamente em duas máquinas distintas, separando o ambiente de simulação operativo do servidor PI System, conforme ilustrado na Figura 2.

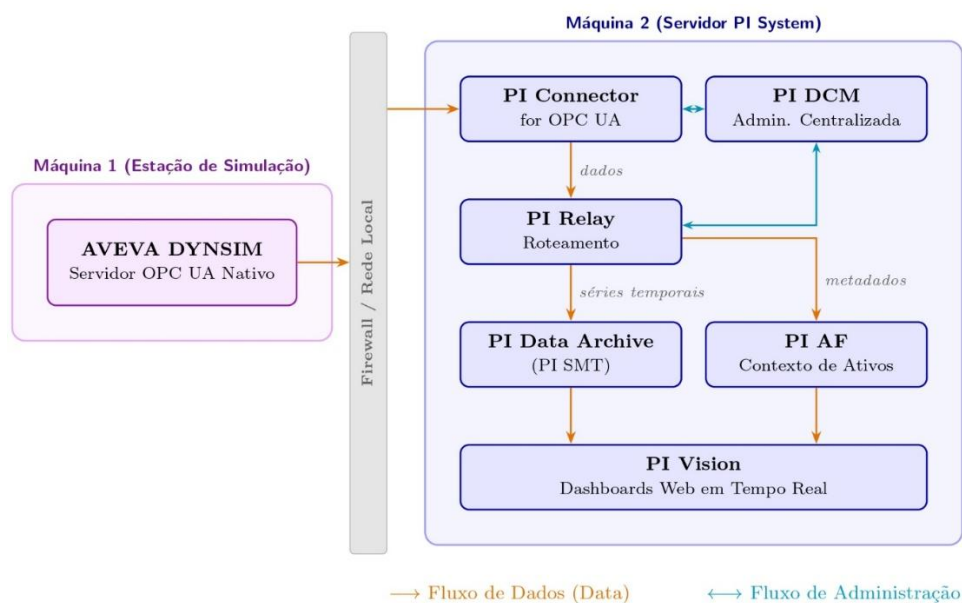
Na Máquina 1 (Estação de Simulação), executa-se o ambiente AVEVA Dynamic Simulation. Este software atua nativamente como um servidor OPC UA, expondo de forma padronizada todas as variáveis de processo, elétricas e de controle geradas durante a simulação do eletrolisador.

O tráfego de dados atravessa a rede local (protegida por *firewall*) até a Máquina 2 (Servidor PI System), onde se concentram todos os serviços de conectividade, armazenamento e contextualização. O fluxo de informações nesta máquina ocorre em etapas definidas:

1. **Coleta e Roteamento:** O *PI Connector for OPC UA* atua como cliente, subscrevendo-se às variáveis do simulador. Os dados coletados são enviados ao *PI Connector Relay*, que serve como uma ponte segura para rotear as informações para os bancos de dados finais. O gerenciamento e a configuração remota desses dois componentes são centralizados pelo *PI Data Collection Manager (DCM)*.

2. **Armazenamento e Contexto:** O fluxo de dados é então bifurcado. As séries temporais (valores contínuos de tensão, vazão, etc.) são armazenadas no *PI Data Archive*, o qual é administrado localmente através do *PI System Management Tools (PI SMT)*. Simultaneamente, os metadados são enviados ao *PI Asset Framework (PI AF)*, responsável por estruturar as variáveis isoladas em uma hierarquia lógica de ativos (ex.: Planta → Eletrolisador → Separador).
3. **Visualização:** Por fim, a camada de consumo de dados é provida pelo *PI Vision*. Esta ferramenta web consome o contexto de ativos do PI AF e os dados históricos do PI Data Archive para renderizar *dashboards* interativos, permitindo o monitoramento em tempo real do comportamento dinâmico do sistema frente às perturbações impostas.

Figura 2. Arquitetura em duas máquinas para aquisição, gerenciamento e visualização de dados via OPC UA e PI System.



2.3. Seleção das variáveis monitoradas

As variáveis monitoradas foram definidas com base na capacidade de representar a resposta dinâmica do sistema frente à perturbação introduzida na fonte elétrica do eletrolisador, bem como na sua visualização e análise através da plataforma PI Vision.

Foram consideradas inicialmente variáveis elétricas, incluindo corrente, tensão e potência associadas ao eletrolisador, permitindo acompanhar diretamente a variável manipulada do sistema e sua influência sobre o processo.

No domínio de produção, foram monitoradas as vazões de hidrogênio e oxigênio geradas no eletrolisador, bem como as vazões de saída após os separadores. Adicionalmente, foram incluídas as frações molares das correntes gasosas, permitindo a avaliação indireta da pureza dos produtos e possibilitando o cálculo das vazões efetivas de saída.

Também foram incluídas variáveis de estado do eletrolisador, como temperaturas e pressões nos compartimentos anódico e catódico, com o objetivo de acompanhar possíveis efeitos térmicos e operacionais decorrentes da perturbação elétrica.

Para a análise de resposta em malha fechada, foram selecionadas variáveis associadas ao controle de nível do separador de hidrogênio, incluindo a variável de processo (PV), o setpoint (SP) e o sinal de controle (MV). Essa escolha permite avaliar a capacidade do sistema de controle em rejeitar perturbações e restabelecer as condições operacionais.

A combinação dessas variáveis permite observar a propagação da perturbação elétrica desde sua origem até os efeitos sobre a produção de hidrogênio e o comportamento do sistema de controle, possibilitando uma análise integrada do comportamento dinâmico do processo.

2.4. Estratégia de perturbação

Com o objetivo de avaliar a robustez da arquitetura de monitoramento e do sistema de controle, foi definida uma estratégia de perturbação contínua aplicada à fonte elétrica de alimentação (750 V nominal). A implementação foi realizada no ambiente DYNMOS através do bloco de geração de números aleatórios com distribuição gaussiana (GAUSSRAND), conectado à fonte antes do transformador e do barramento (bus).

A escolha de perturbar a tensão da fonte permite que a corrente absorvida pelo eletrolisador varie dinamicamente de acordo com a sua curva de polarização e resistência interna, reproduzindo a física de um sistema industrial real. Para simular a transição de um ambiente elétrico conservador para um cenário de alta variabilidade, o ensaio foi estruturado em duas etapas consecutivas:

- **Fase Inicial (Operação em Rede Estável):** Utilizou-se um ruído gaussiano com valor médio de 750 V e desvio padrão (σ) de 20 V. Esta etapa estabelece uma linha de base, simulando as flutuações típicas de uma rede elétrica comercial estável, resultando em variações de corrente contidas entre 3700 A e 4200 A.
- **Transição para Intermitência Severa (Fontes Renováveis):** Durante a simulação, o desvio padrão (σ) do ruído foi elevado abruptamente para 50 V. Esta alteração visa mimetizar o acoplamento direto do sistema a fontes eólicas ou solares altamente instáveis, submetendo os controladores e os vasos separadores a um estresse dinâmico através de transientes agressivos de carga.

A aplicação deste perfil contínuo de perturbação permite avaliar, em uma única janela temporal, a propagação das flutuações desde a entrada elétrica até as variáveis de produção, verificando o limite de resiliência do processo e a capacidade da infraestrutura PI System em capturar essas transições de regime em tempo real.

2.5. Estratégia de análise dos dados

A análise dos dados foi realizada a partir das séries temporais armazenadas no PI System. A estratégia baseou-se na utilização do PI AF para a organização lógica das variáveis, o que permitiu correlacionar rapidamente os dados elétricos de entrada com as respostas dinâmicas do processo. A avaliação foi conduzida por meio da inspeção contínua das tendências temporais consolidadas no PI Vision.

Foram analisadas, em particular, as relações entre a corrente elétrica e as variáveis de saída do eletrolisador, bem como o comportamento do sistema de controle de nível do separador de hidrogênio, avaliando a capacidade de rejeição da perturbação e o retorno às condições operacionais. Esta abordagem permitiu estabelecer relações qualitativas diretas de causa e efeito entre a perturbação aplicada na fonte e a resposta do sistema em malha fechada, validando tanto o modelo de simulação quanto a resiliência da arquitetura de monitoramento.

3. Resultados

3.1. Comportamento dinâmico do sistema e monitoramento em tempo real

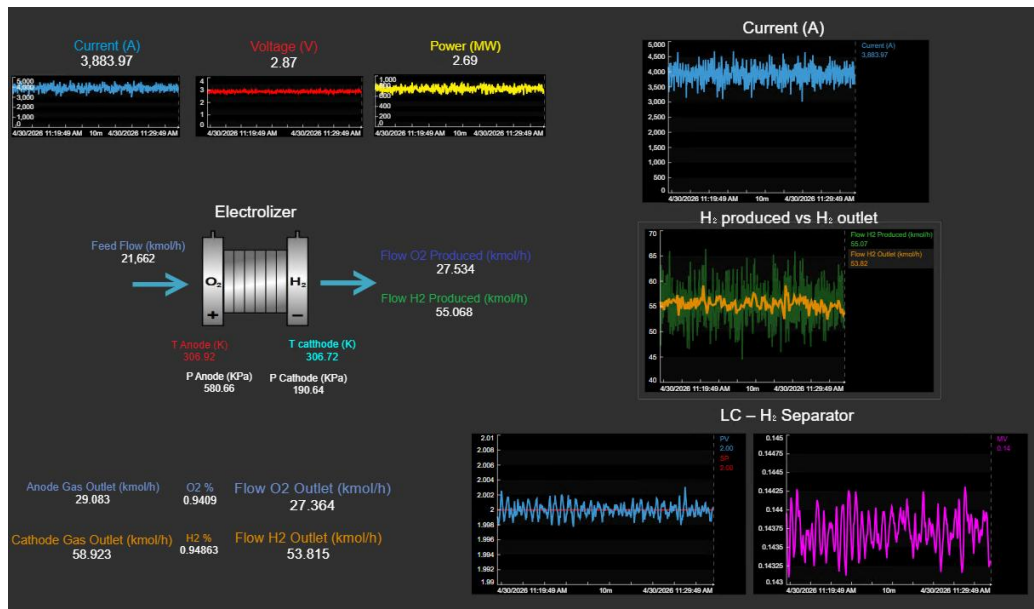
A eficácia da arquitetura proposta foi inicialmente validada através da construção de um dashboard abrangente no PI Vision, apresentado na Figura 3. Esta interface centraliza as variáveis críticas do eletrolisador, demonstrando a capacidade da infraestrutura em sincronizar dados elétricos (tensão, corrente, potência), de processo (temperaturas, pressões, vazões) e de controle em uma única plataforma de visualização em tempo real.

Para analisar a resposta dinâmica e a robustez do sistema, avaliou-se a propagação da perturbação de forma contínua, transitando de um cenário de flutuação moderada (desvio padrão de 20 V) para um cenário de alta instabilidade (desvio padrão de 50 V), simulando a conexão a uma fonte renovável altamente intermitente. A Figura 4 detalha o comportamento temporal das variáveis durante este ensaio.

Na primeira metade do painel superior (Fig. 4a), a corrente elétrica oscila de forma contida entre 3700 A e 4200 A. Após a intensificação da perturbação, a amplitude do ruído aumenta drasticamente, com picos variando de 3100 A a 4800 A. Essa instabilidade propaga-se imediatamente para a taxa de geração de gás (H_2 produced, em verde na Fig. 4b). Observa-se que, durante a fase moderada, o volume do vaso separador atua como um filtro eficiente, mantendo a vazão de saída (Flow H_2 outlet, em laranja) praticamente constante. Contudo, ao entrar na fase de alta instabilidade, a capacitância do tanque atinge seu limite de amortecimento, e a vazão de saída passa a apresentar oscilações visíveis.

O impacto mais significativo ocorre na malha de controle de nível do separador (Fig. 4c). Sob o desvio de 20 V, o controlador mantém a variável de processo (PV, em azul) rigorosamente no SP de 2.0, exigindo uma oscilação suave da válvula de saída (MV, em magenta). No entanto, após a transição para 50 V, o controlador é levado a uma condição de estresse. A variável manipulada passa a oscilar agressivamente para tentar compensar

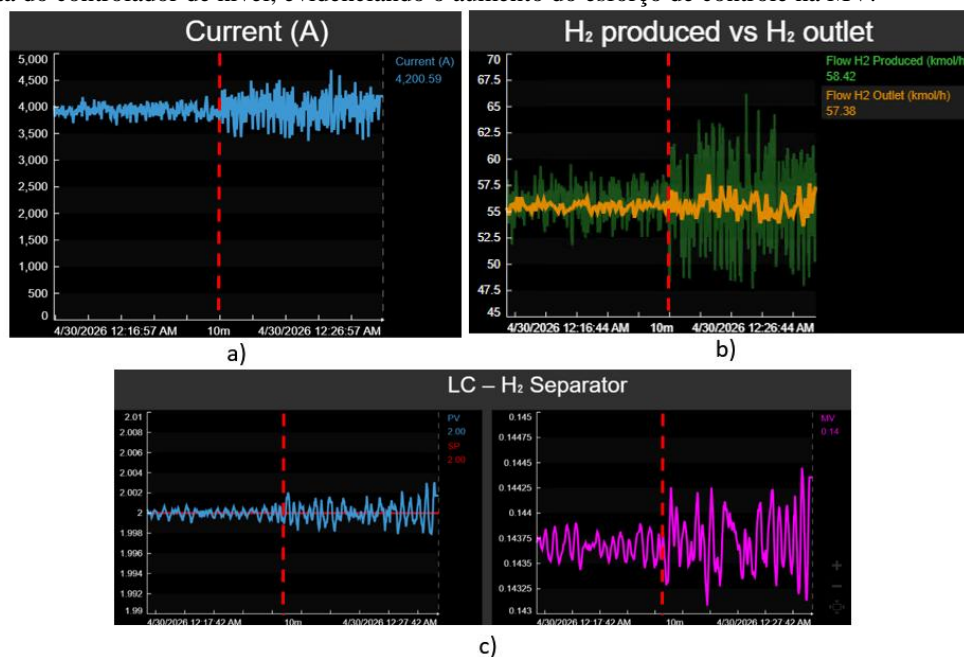
Figura 3. Interface de monitoramento em tempo real no PI Vision, integrando o sinótico do processo e as tendências dinâmicas das variáveis críticas.



o balanço de massa errático. Como consequência dessa dinâmica extrema, a válvula não consegue rejeitar totalmente o distúrbio, e a variável de processo começa a apresentar pequenos desvios em relação ao SP.

Estes resultados validam a eficácia da arquitetura PI System para o monitoramento em tempo real e demonstram que, embora a estratégia de controle atual seja robusta para pequenas variações, a integração direta com fontes renováveis de alta variabilidade exigiria um redimensionamento físico dos vasos ou a implementação de estratégias de controle avançado para evitar o desgaste mecânico dos atuadores.

Figura 4. Avaliação de robustez do sistema em regime contínuo. A linha tracejada indica o instante em que a perturbação na fonte elétrica foi intensificada (aumento do desvio padrão de 20 V para 50 V). (a) Flutuação da corrente elétrica. (b) Taxa de geração de hidrogênio (verde) e vazão de saída amortecida pelo separador (laranja). (c) Resposta do controlador de nível, evidenciando o aumento do esforço de controle na MV.



4. Conclusão

A arquitetura proposta demonstrou ser eficaz para a aquisição, armazenamento e visualização integrada de dados dinâmicos de um eletrolisador PEM. A comunicação via OPC UA e a utilização do PI System permitiram a integração estruturada entre o ambiente de simulação e a infraestrutura de dados, enquanto o PI Vision viabilizou a visualização em tempo real das variáveis e a análise integrada do comportamento do sistema.

O uso de uma planta virtual possibilitou a geração controlada de cenários de operação, permitindo a análise da resposta do sistema a perturbações na alimentação elétrica. Os resultados evidenciaram uma relação direta entre a corrente elétrica e a produção de hidrogênio, bem como a propagação dessas variações ao longo do processo. Observou-se que os separadores atuam como elementos de amortecimento em condições de baixa variabilidade, enquanto em regimes mais instáveis esse efeito se torna limitado.

A análise do sistema de controle indicou bom desempenho em condições moderadas, com aumento do esforço de controle sob maior instabilidade. De forma geral, o trabalho demonstra o potencial da integração entre simulação dinâmica e plataformas de dados como ferramenta para análise do comportamento dinâmico e suporte ao desenvolvimento de estratégias baseadas em dados.

Agradecimentos: J. Gutiérrez e F. Belén agradecem ao Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET, Argentina). F. Belén também agradece ao CiMol-CNPq. H. Bispo agradece à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). S. Neiro agradece à Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

Referências

- [1] Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., & Stolten, D. (2013). *A comprehensive review on PEM water electrolysis*. International Journal of Hydrogen Energy, 38(12), 4901–4934.
- [2] Tao, F., Qi, Q., Liu, A., & Kusiak, A. (2018). *Data-driven smart manufacturing*. Journal of Manufacturing Systems, 48, 157–169.
- [3] Tao, F., Zhang, M., Liu, Y., & Nee, A. Y. C. (2019). *Digital twin driven smart manufacturing*. CIRP Annals, 68(2), 653–676.