

Relatório Integrador: Conexão entre Teoria de Controle e Tecnologias da Indústria 4.0

Alunos: *Alessandro Lucas de Arruda Santos, Demétrio de Luna Gurgel*

Contents

1	Introdução	3
2	Fundamentos de Controle e sua Relevância na Indústria 4.0	4
2.1	Vantagens do Feedback e Sensibilidade (Capítulo 4)	4
2.2	Desempenho Transiente e em Regime Permanente (Capítulo 5)	4
2.3	Estabilidade e Robustez (Capítulo 6)	5
2.4	Lugar das Raízes e Projeto de Compensadores (Capítulo 7)	6
2.5	Projeto de Sistemas de Controle com Realimentação (Capítulo 10)	6
2.6	Controle Digital, ADC/DAC e ZOH (Capítulo 13)	8
3	Conexão com Tecnologias da Indústria 4.0	8
3.1	Controle e MES (Manufacturing Execution Systems)	8
3.2	Controle e PIMS (Plant Information Management Systems)	9
3.3	APC e MPC	9
3.4	RTO (Real-Time Optimization)	10
3.5	IIoT e Digital Twin	10
4	Integração TI–TO	11
5	Protocolos de Nuvem: MQTT e OPC-UA	12
5.1	MQTT	12
5.2	OPC-UA	13
6	Impacto em Sistemas Críticos: DCS e SIS	14
6.1	DCS (Distributed Control Systems)	14
6.2	SIS (Safety Instrumented Systems)	14
7	Simulações com Conectividade IIoT	15

1 Introdução

A Indústria 4.0 representa uma convergência inédita entre teoria de controle, integração digital e sistemas industriais avançados. Neste relatório, busca-se integrar de maneira abrangente os fundamentos da teoria clássica e moderna de controle — conforme apresentados nos capítulos 4, 5, 6, 7, 10 e 13 — com tecnologias contemporâneas como MES, PIMS, APC, MPC, RTO, IIoT, Digital Twins e comunicação industrial baseada em nuvem. Em vez de tratar cada elemento como um objeto isolado, procura-se demonstrar como os princípios matemáticos da teoria de controle sustentam, de forma direta, a operação inteligente, conectada e otimizada dos sistemas industriais modernos.

No contexto de processos industriais, a teoria de controle não é apenas uma ferramenta analítica, mas um elemento estruturante da arquitetura de automação. Os mesmos conceitos de estabilidade, sensibilidade, desempenho, polos e zeros, discretização e compensação que fundamentam malhas de controle locais também servem para garantir a confiabilidade de sistemas mais amplos. Exemplos disso incluem a integração entre o controle regulatório realizado no chão de fábrica e os sistemas corporativos de execução e otimização, como o MES, responsável por coordenar ordens de produção e rastreabilidade, e o PIMS, que armazena, processa e analisa historicamente grandes volumes de dados industriais. Dessa forma, percebe-se que a teoria de controle permeia toda a hierarquia produtiva — desde o nível de campo até os sistemas de nuvem que alimentam algoritmos de inteligência artificial e gêmeos digitais.

A proposta deste relatório inclui ainda a exploração prática de intercâmbio de dados industriais utilizando protocolos modernos de comunicação baseados em nuvem, como MQTT e OPC-UA. Esses protocolos representam um marco na evolução das arquiteturas IIoT, pois permitem que controladores digitais, sensores inteligentes e plataformas cloud estabeleçam comunicação bidirecional de forma leve, padronizada e escalável. A possibilidade de enviar dados de simulação para plataformas como Azure IoT Hub, AWS IoT Core e Google Cloud IoT ao mesmo tempo em que se mantém o controle local em tempo real ilustra a transição entre sistemas isolados e sistemas industrialmente conectados. Essa integração exige precisão temporal, estabilidade digital e mecanismos de robustez, todos fundamentados nos princípios estudados ao longo dos capítulos teóricos.

Assim, a Introdução organiza o propósito central do relatório: demonstrar de que maneira os conceitos clássicos de controle, desenvolvidos inicialmente para lidar com problemas bem definidos de estabilidade e desempenho, tornaram-se ainda mais importantes no cenário de automação avançada. A Indústria 4.0 não substitui a teoria de controle; ao contrário, amplia seu papel e revela novas demandas, como tolerância a atrasos de rede, sincronização entre sistemas físicos e virtuais, modelagem preditiva, adaptabilidade e conectividade entre dispositivos heterogêneos. Desse modo, a teoria estudada ao longo dos capítulos mencionados fornece a base matemática e conceitual para todas as camadas

da automação contemporânea — da malha individual de controle até plataformas de otimização em tempo real baseadas em nuvem.

2 Fundamentos de Controle e sua Relevância na Indústria 4.0

2.1 Vantagens do Feedback e Sensibilidade (Capítulo 4)

O feedback é o alicerce da teoria de controle moderna e uma das principais ferramentas responsáveis pela robustez dos sistemas industriais. Em qualquer sistema realimentado, a relação entre a entrada de referência $R(s)$, a saída $Y(s)$ e a função de transferência de malha aberta $L(s) = C(s)G(s)$ é dada por:

$$Y(s) = \frac{L(s)}{1 + L(s)}R(s) + \frac{1}{1 + L(s)}D(s),$$

onde $D(s)$ representa perturbações do processo.

A sensibilidade é definida como:

$$S(s) = \frac{1}{1 + L(s)},$$

e quantifica a influência das incertezas e perturbações no sistema. Por sua vez, a função de sensibilidade complementar,

$$T(s) = \frac{L(s)}{1 + L(s)},$$

descreve a capacidade de seguimento de referência e a resposta dinâmica geral.

Em ambientes conectados via IIoT, atrasos de rede podem ser representados por exponenciais complexas:

$$e^{-s\tau},$$

que modificam diretamente o comportamento de $L(s)$ e, consequentemente, de $S(s)$ e $T(s)$. Assim, o feedback permanece essencial para compensar incertezas, variações dinâmicas e degradações provocadas pela conectividade distribuída da Indústria 4.0.

2.2 Desempenho Transiente e em Regime Permanente (Capítulo 5)

A resposta temporal de sistemas de segunda ordem é um modelo fundamental na indústria. Um sistema com função de transferência:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2},$$

possui indicadores de desempenho diretamente associados aos parâmetros ω_n (frequência natural) e ζ (fator de amortecimento). O sobressinal máximo, amplamente utilizado em projeto de controladores, é dado por:

$$M_p = e^{\left(-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)}.$$

O tempo de acomodação aproximado é:

$$t_s \approx \frac{4}{\zeta\omega_n}.$$

Já o erro estacionário é determinado com base no tipo do sistema e nas constantes de erro:

$$e_{ss} = \frac{1}{1+K_p} \quad (\text{entrada degrau}).$$

Tais expressões são utilizadas diretamente em controle preditivo (MPC), otimização de processos e calibração de Digital Twins, que exigem modelagem precisa tanto no transiente quanto no regime permanente.

2.3 Estabilidade e Robustez (Capítulo 6)

A estabilidade absoluta pode ser analisada pelo critério de Routh-Hurwitz. Para um sistema descrito por um polinômio característico:

$$a_0s^n + a_1s^{n-1} + \cdots + a_{n-1}s + a_n = 0,$$

a condição necessária e suficiente de estabilidade é que todos os elementos da primeira coluna da tabela de Routh sejam positivos.

Além disso, a margem de fase (MF) e a margem de ganho (MG), extraídas da resposta em frequência, são dadas por:

$$\text{MF} = 180^\circ + \angle L(j\omega_{cg}),$$

$$\text{MG} = \frac{1}{|L(j\omega_{cp})|},$$

onde ω_{cg} e ω_{cp} são, respectivamente, a frequência de cruzamento de ganho e de fase.

Na Indústria 4.0, atrasos de rede podem ser modelados por:

$$L(s) = C(s)G(s)e^{-s\tau},$$

o que reduz as margens e pode levar à instabilidade. Assim, estabilidade relativa torna-se tão importante quanto estabilidade absoluta.

2.4 Lugar das Raízes e Projeto de Compensadores (Capítulo 7)

O método do Lugar das Raízes analisa como os polos de malha fechada evoluem conforme o ganho K varia na equação:

$$1 + KG(s) = 0.$$

Os polos de malha fechada são obtidos por:

$$s = \text{raízes de } 1 + KG(s) = 0.$$

Um compensador em avanço de fase típico possui:

$$C_{av}(s) = K \frac{s + z}{s + p}, \quad z > p,$$

que aumenta a margem de fase, desloca polos para regiões mais desejáveis e acelera a resposta.

Já um compensador em atraso de fase possui:

$$C_{at}(s) = K \frac{s + z}{s + p}, \quad z < p,$$

e melhora erro estacionário sem alterar de forma significativa a dinâmica.

Esses elementos matemáticos são fundamentais para preparar plantas para algoritmos de MPC, Digital Twins e otimização em tempo real (RTO).

2.5 Projeto de Sistemas de Controle com Realimentação (Capítulo 10)

O Capítulo 10 trata do projeto sistemático de sistemas de controle com realimentação, consolidando os conceitos de estabilidade, desempenho transitório, sensibilidade e erro em regime permanente apresentados nos capítulos anteriores. Em aplicações industriais reais, o simples ajuste de ganho frequentemente não é suficiente para atender simultaneamente às especificações de desempenho e robustez, tornando necessária a inserção de compensadores na malha direta, caracterizando a chamada compensação em cascata.

O projeto pode ser conduzido tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. No domínio do tempo, utilizam-se índices como tempo de subida, sobressinal máximo e tempo de acomodação, enquanto no domínio da frequência priorizam-se margens de ganho e fase, largura de banda e comportamento em baixa frequência. Duas

abordagens clássicas destacam-se nesse contexto: o método do Lugar das Raízes, que permite posicionar polos dominantes no plano- s com base em critérios de amortecimento e frequência natural, e o projeto via resposta em frequência, que busca moldar diretamente o comportamento do sistema por meio de diagramas de Bode, Nyquist ou Nichols.

Os compensadores de primeira ordem em cascata, descritos por

$$G_c(s) = K \frac{s + z}{s + p},$$

constituem a base prática do projeto. Quando configurados como compensadores de avanço de fase ($z < p$), aumentam a margem de fase, aceleram a resposta dinâmica e elevam o amortecimento do sistema, sendo particularmente úteis para atender requisitos de desempenho transitório. Por outro lado, os compensadores de atraso de fase ($z > p$) são empregados principalmente para aumentar o ganho em corrente contínua, reduzindo o erro estacionário sem causar impactos significativos na fase próxima à frequência de cruzamento. O projeto desses compensadores pode ser conduzido tanto via Lugar das Raízes quanto por métodos analíticos no domínio da frequência, ajustando parâmetros como ganho, posições de polos e zeros e frequência de cruzamento desejada.

Outro aspecto relevante abordado no capítulo é o uso de compensadores com integração, como os controladores PI. A introdução de um integrador eleva o tipo do sistema, permitindo eliminar o erro em regime permanente para entradas do tipo degrau, desde que a planta seja estável. Contudo, essa melhoria vem acompanhada de desafios adicionais de estabilidade, exigindo cuidados na escolha dos ganhos para preservar margens adequadas e evitar oscilações excessivas.

No contexto da Indústria 4.0, o projeto de sistemas de controle descrito no Capítulo 10 assume papel estratégico, pois fornece a base para camadas superiores de automação, como Advanced Process Control (APC), Model Predictive Control (MPC) e otimização em tempo real (RTO). Compensadores corretamente projetados garantem que a planta apresente comportamento previsível, estável e bem condicionado, requisito essencial para modelos utilizados em Digital Twins, algoritmos preditivos e sistemas de otimização econômica. Além disso, o uso de pré-filtros, discutido no capítulo, permite moldar a resposta à referência sem alterar a estrutura interna da malha, recurso amplamente utilizado em aplicações industriais para melhorar a qualidade da resposta percebida sem comprometer a robustez do controle.

Assim, o Capítulo 10 representa o elo entre análise e síntese na teoria de controle, conectando diretamente os fundamentos matemáticos ao projeto prático de sistemas industriais modernos e habilitando sua integração com arquiteturas digitais avançadas características da Indústria 4.0.

2.6 Controle Digital, ADC/DAC e ZOH (Capítulo 13)

A modelagem digital de sistemas contínuos envolve a aplicação da transformada Z. O retentor de ordem zero (ZOH) possui função de transferência:

$$G_{\text{ZOH}}(s) = \frac{1 - e^{-sT_s}}{s},$$

e a discretização de um sistema contínuo é obtida por:

$$G(z) = \mathcal{Z}\{G(s)G_{\text{ZOH}}(s)\}.$$

A condição de estabilidade digital exige que todos os polos satisfaçam:

$$|z_i| < 1.$$

A relação entre polos contínuos s_i e discretos z_i é dada por:

$$z_i = e^{s_i T_s}.$$

A introdução de atrasos de comunicação, comuns em IIoT, altera efetivamente o período de amostragem:

$$T'_s = T_s + \tau_{\text{rede}},$$

o que pode deslocar polos para fora do círculo unitário, produzindo instabilidade. Assim, o domínio z torna-se fundamental na análise de sistemas conectados e distribuídos.

3 Conexão com Tecnologias da Indústria 4.0

3.1 Controle e MES (Manufacturing Execution Systems)

A relação entre sistemas de controle e plataformas MES é fundamental para o funcionamento coordenado de plantas industriais modernas. O sistema de controle opera diretamente na camada operacional do processo, onde manipula variáveis físicas como temperatura, vazão, pressão e composição química. Já o MES atua como uma camada intermediária entre o nível supervisório e o nível corporativo, sendo responsável por traduzir os acontecimentos do chão de fábrica em informações operacionais que auxiliam o planejamento, a tomada de decisões e o cumprimento de objetivos de produção.

Essa integração ocorre de forma contínua: o controlador, ao regular a dinâmica do processo, gera dados que são enviados ao MES, permitindo acompanhamento em tempo real das condições da planta. Tendências de qualidade, tempos de ciclo, alarmes, desvios operacionais e estatísticas de processo só são úteis ao MES se forem provenientes de

um sistema de controle estável, confiável e com boa rejeição a perturbações. Por isso, os conceitos apresentados nos capítulos 4 a 7 — em especial sensibilidade, análise de desempenho, estabilidade e projeto de compensadores — garantem que as informações transmitidas ao MES representem fielmente o comportamento da planta. Em outras palavras, o MES depende de um sistema de controle robusto para executar funções como rastreabilidade, coordenação de ordens de produção, cálculo de eficiência global (OEE) e gestão de recursos produtivos.

3.2 Controle e PIMS (Plant Information Management Systems)

Os sistemas PIMS têm como principal objetivo a coleta, consolidação e historização de dados industriais ao longo do tempo. Diferentemente do MES, que opera com foco na produção, o PIMS se concentra na criação de uma base histórica confiável para análises aprofundadas. A comunicação entre o controle e o PIMS ocorre normalmente a partir de protocolos como OPC-UA ou MQTT, que transportam de forma estruturada grandes volumes de dados capturados por PLCs, sensores e sistemas de supervisão.

A qualidade dos dados armazenados em um PIMS depende diretamente das características do sistema de controle. Por exemplo, um processo que apresente grandes erros estacionários tende a gerar registros históricos distorcidos, comprometendo análises posteriores de desempenho ou eficiência. Da mesma forma, se o sistema for muito sensível a perturbações, as séries temporais armazenadas refletirão oscilações artificiais que não necessariamente se correlacionam com fenômenos reais do processo. Assim, conceitos fundamentais como estabilidade, rejeição a perturbações e controle de desempenho, discutidos nos capítulos 4, 5 e 6, são essenciais para garantir que o PIMS disponha de dados consistentes, confiáveis e adequados para análises de longo prazo, detecção de anomalias, identificação de tendências e suporte a Digital Twins.

3.3 APC e MPC

Os sistemas de controle avançado (APC) surgiram da necessidade de lidar com processos complexos, multivariáveis e altamente interativos — características típicas de plantas químicas, petroquímicas, metalúrgicas e de energia. Entre as diferentes técnicas de APC, o Model Predictive Control (MPC) se destaca por incorporar explicitamente um modelo interno da planta, otimizar a ação de controle com base na previsão do comportamento futuro do processo e lidar naturalmente com restrições de operação.

A teoria clássica de controle apresentada nos capítulos 4 a 7 é a base sobre a qual o MPC e todo o APC são construídos. A modelagem baseada em polos e zeros, por exemplo, é essencial para obter representações lineares que o MPC utiliza em suas predições. Sem estabilidade garantida — seja absoluta ou relativa — o modelo interno não seria capaz de prever adequadamente a evolução do processo, comprometendo toda a estratégia de

predição e otimização. Além disso, as metas de desempenho discutidas no Capítulo 5, como tempo de subida, sobressinal e erro estacionário, tornam-se critérios explícitos na formulação do problema de otimização do MPC. Da mesma forma, a análise de sensibilidade e rejeição de perturbações, derivada do Capítulo 4, influencia diretamente a robustez do controlador preditivo, permitindo-lhe agir mesmo diante de variações não modeladas ou de comportamento estocástico.

Assim, o APC representa uma evolução direta dos conceitos fundamentais de controle, incorporando-os a um arcabouço matemático mais sofisticado que permite maximizar eficiência, reduzir variabilidade e operar processos industriais mais próximos de seus limites econômicos.

3.4 RTO (Real-Time Optimization)

O RTO constitui um nível hierárquico acima do APC, responsável por calcular o ponto ideal de operação de uma planta, com o objetivo de maximizar lucro, minimizar custos energéticos, aumentar rendimento ou garantir conformidade ambiental. No entanto, para que o RTO funcione adequadamente, ele depende profundamente da estabilidade e previsibilidade garantidas pelo sistema de controle.

Os modelos utilizados pela otimização — sejam eles empíricos, fenomenológicos ou híbridos — devem representar corretamente a dinâmica do processo, o que exige que a planta esteja bem compensada e livre de instabilidades ou comportamentos caóticos. Se a planta não for estável (Capítulo 6), a convergência da otimização torna-se incerta, podendo gerar valores de setpoint inviáveis ou até perigosos. Da mesma forma, sem compensadores adequados (Capítulo 7), a dinâmica do processo pode ser lenta demais, altamente oscilatória ou ruidosa, dificultando a implementação prática das recomendações de otimização.

Por fim, como o RTO envia continuamente novos setpoints ao nível APC, e este os repassa ao sistema de controle digital (Capítulo 13), torna-se evidente que toda a cadeia — da planta física ao algoritmo de otimização — precisa estar alinhada em termos de precisão, estabilidade e capacidade de resposta.

3.5 IIoT e Digital Twin

O conceito de Digital Twin, amplamente difundido na Indústria 4.0, baseia-se na existência de um modelo virtual capaz de reproduzir com alta fidelidade o comportamento dinâmico da planta física. Para que essa representação seja válida, o gêmeo digital precisa receber continuamente dados confiáveis coletados em campo por sensores, PLCs e dispositivos IIoT, transmitidos através de protocolos como MQTT ou OPC-UA.

A qualidade do Digital Twin, no entanto, não depende apenas da infraestrutura de comunicação: depende principalmente do sistema de controle. Modelos virtuais só são

úteis se a planta real operar de maneira estável, previsível e suficientemente próxima do regime nominal. Caso contrário, o gêmeo digital não conseguirá reproduzir corretamente a dinâmica do processo, resultando em simulações imprecisas e decisões equivocadas. É necessário, por exemplo, que o sistema real apresente comportamento estável (Capítulo 6), coerência dinâmica (polos próximos entre planta e modelo, Capítulo 7) e operação com baixo erro estacionário (Capítulo 5), garantindo correspondência entre o físico e o virtual.

Além disso, a baixa sensibilidade a perturbações, explicada no Capítulo 4, assegura que pequenas flutuações ou ruídos de medição não comprometam o sincronismo com o Digital Twin. Dessa forma, o gêmeo digital torna-se uma ferramenta confiável para monitoramento avançado, simulações preditivas, otimização de processos e antecipação de falhas.

4 Integração TI–TO

A integração entre Tecnologia da Informação (TI) e Tecnologia Operacional (TO) constitui um dos pilares centrais da Indústria 4.0. Tradicionalmente, a TO é responsável pelo controle direto de processos físicos, englobando sensores, atuadores, PLCs, sistemas DCS e dispositivos de automação que atuam sobre variáveis como temperatura, pressão, vazão e nível. Já a TI concentra-se no processamento, armazenamento e análise de informações, além da gestão corporativa, dos sistemas de banco de dados e das aplicações analíticas utilizadas para suporte à decisão. Ao longo dos últimos anos, esses dois domínios, antes independentes, passaram a operar de forma integrada, possibilitando que informações originadas no chão de fábrica sejam distribuídas para toda a organização e utilizadas tanto para otimização operacional quanto para planejamento estratégico.

Essa integração, no entanto, não é apenas uma questão de conectar redes industriais a sistemas corporativos; ela envolve desafios técnicos diretamente relacionados aos fundamentos da teoria de controle. A presença de atrasos de comunicação, perdas de pacotes e variações temporais introduz perturbações que afetam dinamicamente os controladores digitais. Conceitos como estabilidade, margem de ganho e margem de fase tornam-se essenciais para garantir que a inclusão de camadas de TI não comprometa a estabilidade de malhas de controle. Pequenas latências podem deslocar polos do sistema no domínio discreto, colocando em risco a robustez da operação, o que reforça a importância dos princípios apresentados no Capítulo 6 sobre estabilidade absoluta e relativa.

A digitalização do controle discutida no Capítulo 13 também desempenha papel decisivo nessa integração. Como controladores modernos já operam em regime discreto, utilizando conversores ADC/DAC e retentores ZOH, sua interface com sistemas baseados em redes digitais torna-se natural. Isso facilita o uso de protocolos padronizados como OPC-UA, MQTT e REST APIs, que permitem interoperabilidade entre dispositi-

tivos industriais e plataformas de TI, viabilizando arquiteturas de IIoT com alto grau de conectividade. Dessa forma, sinais que antes permaneciam restritos ao ambiente físico do controlador passam a circular por toda a infraestrutura digital da empresa, ampliando o alcance das informações de processo.

Outro aspecto relevante é o trânsito de modelos matemáticos entre as camadas TI e TO. Os modelos utilizados para estratégias de APC e MPC, frequentemente baseados em representações lineares por polos e zeros, podem ser desenvolvidos no ambiente de TI, validados na área operacional e posteriormente utilizados simultaneamente nas duas camadas. Essa circulação de modelos é ainda mais evidente no contexto de Digital Twins, que dependem de sincronização constante com o processo físico e utilizam dados recebidos via IIoT para representar com fidelidade a dinâmica da planta. A TI processa esses modelos para fins analíticos, enquanto a TO utiliza as mesmas estruturas para controle preditivo em tempo real.

Assim, a integração TI–TO pode ser entendida como uma convergência entre dados, modelos matemáticos, algoritmos de controle e infraestruturas digitais. Essa convergência possibilita que informações operacionais se tornem inteligência corporativa, permitindo automação avançada, monitoramento distribuído e otimização contínua dos processos. Tal integração não apenas sustenta, mas também habilita os conceitos da Indústria 4.0, nos quais a conectividade e a interoperabilidade tornam-se elementos fundamentais para a evolução das plantas industriais modernas.

5 Protocolos de Nuvem: MQTT e OPC-UA

A comunicação entre sistemas industriais e plataformas de computação em nuvem é um componente fundamental da Indústria 4.0. Protocolos modernos permitem que dados provenientes de sensores, atuadores, PLCs, sistemas de controle distribuído (DCS) e aplicações de supervisão sejam transmitidos com segurança e eficiência para serviços de análise, armazenamento, otimização e visualização. Entre os protocolos mais utilizados nesse contexto destacam-se o MQTT e o OPC-UA, que desempenham papéis complementares na integração entre processos físicos e arquiteturas digitais corporativas.

5.1 MQTT

O MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) é um protocolo leve desenvolvido originalmente para aplicações com recursos limitados e comunicação intermitente. Sua arquitetura baseada no modelo *publish/subscribe* permite que dispositivos industriais enviem informações a um broker central, que distribui os dados para todos os clientes interessados. Essa abordagem desacopla remetentes e destinatários e facilita a escalabilidade, tornando o MQTT especialmente adequado para redes com grande número de sensores,

dispositivos embarcados e sistemas de aquisição distribuídos.

No ambiente industrial, o MQTT desempenha um papel decisivo na comunicação entre dispositivos IIoT e plataformas de computação em nuvem. Dados provenientes de simulações, como respostas dinâmicas de sistemas modelados em Python, podem ser publicados em tópicos MQTT e recebidos por dashboards, Digital Twins ou algoritmos de aprendizado de máquina executados na nuvem. Da mesma forma, controladores digitais e equipamentos de borda podem transmitir continuamente variáveis de processo, diagnósticos, alarmes e indicadores de desempenho para serviços como Azure IoT Hub, AWS IoT Core e Google Cloud IoT. Sua leveza garante baixa latência e reduzido consumo de banda, viabilizando aplicações em tempo quase real e operações contínuas de longa duração.

5.2 OPC-UA

Em contraste com a simplicidade e leveza do MQTT, o OPC-UA (OPC Unified Architecture) foi projetado para atender a requisitos de interoperabilidade, segurança e estruturação de dados em sistemas industriais complexos. Diferentemente de protocolos que se limitam a transmitir valores numéricos, o OPC-UA organiza informações de forma orientada a objetos, permitindo representar não apenas variáveis de processo, mas também atributos, métodos, hierarquias, estados e eventos de um sistema completo. Controladores industriais e sistemas DCS podem expor via OPC-UA não só suas variáveis de operação, mas toda sua estrutura de blocos e parâmetros internos de controle.

Essa capacidade confere ao OPC-UA um papel estratégico na Indústria 4.0. Em simulações e aplicações de controle avançado, é possível exportar modelos de sistemas, malhas fechadas e parâmetros de compensadores para servidores OPC-UA, que os disponibilizam para supervisórios, algoritmos de MPC ou Digital Twins executados em nuvem. A robustez do protocolo, aliada a mecanismos avançados de criptografia e autenticação, torna-o adequado para aplicações críticas, nas quais a integridade dos dados influencia diretamente a segurança e a continuidade operacional da planta.

Assim, enquanto o MQTT se destaca na comunicação leve e distribuída entre dispositivos IIoT e serviços em nuvem, o OPC-UA se estabelece como uma solução abrangente e estruturada para representação completa de sistemas industriais. Ambos constituem ferramentas essenciais na integração entre Tecnologia Operacional (TO) e Tecnologia da Informação (TI), permitindo que o ambiente industrial se conecte de forma eficiente, segura e inteligentemente à infraestrutura digital da Indústria 4.0.

6 Impacto em Sistemas Críticos: DCS e SIS

Os sistemas de automação responsáveis por controlar e proteger plantas industriais possuem exigências rigorosas de estabilidade, precisão e confiabilidade. Nesse contexto, destacam-se dois grupos fundamentais de sistemas: os Distributed Control Systems (DCS), responsáveis pela operação contínua do processo, e os Safety Instrumented Systems (SIS), cuja função é proteger a planta contra eventos potencialmente perigosos. Embora ambos utilizem princípios de controle, suas finalidades e requisitos apresentam diferenças significativas, especialmente no que se refere à aplicação rigorosa dos conceitos de estabilidade, robustez e controle digital.

6.1 DCS (Distributed Control Systems)

O DCS é o núcleo operacional de uma planta industrial, encarregado de manter o processo dentro de condições adequadas de desempenho e qualidade. Para cumprir essa função, ele depende diretamente de uma base sólida de estabilidade robusta, conforme discutido no Capítulo 6. A presença de margens adequadas de ganho e fase, bem como a localização dos polos do sistema, garante que o controle possa lidar com variações naturais da planta, atrasos de comunicação e incertezas inerentes ao processo industrial. Além disso, a rejeição eficiente de perturbações, tema abordado no Capítulo 4, é essencial para que flutuações em variáveis externas, ruídos de medição ou influências ambientais não comprometam a operação.

Outro aspecto central no funcionamento do DCS é a confiabilidade dos controladores digitais discutidos no Capítulo 13. A discretização, a escolha do período de amostragem e a estabilidade no domínio z influenciam diretamente a resposta das malhas distribuídas. Como a Indústria 4.0 introduz comunicação em rede, integração com IIoT e transmissão de dados para sistemas em nuvem, torna-se ainda mais importante garantir que o sistema digital seja robusto a atrasos, perdas de pacote e jitter. Uma falha nesses fundamentos pode ocasionar desde perda de qualidade e variação excessiva do processo até eventos mais graves, como desligamentos automáticos não planejados ou instabilidades amplificadas pelo sistema de controle.

6.2 SIS (Safety Instrumented Systems)

Diferentemente do DCS, cujo foco é o desempenho operacional, o SIS tem a finalidade exclusiva de proteger a planta e os operadores em situações anormais. Isso implica que o sistema deve operar segundo critérios extremamente rígidos de estabilidade e confiabilidade. A estabilidade absoluta discutida no Capítulo 6 é indispensável, pois o SIS não pode tolerar comportamentos marginalmente estáveis ou dinâmicas oscilatórias. Qualquer indício de instabilidade pode comprometer a eficácia das ações de segurança, resultando

em atrasos inaceitáveis no acionamento de válvulas de emergência, alarmes ou procedimentos de desligamento seguro.

O SIS também depende fortemente do comportamento do sistema sob perturbações, conforme discutido no Capítulo 4. Um sistema de segurança não pode ser excessivamente sensível a ruídos ou pequenas variações operacionais, sob pena de gerar falsos alarmes ou desligamentos indevidos. Ao mesmo tempo, deve ser capaz de responder rapidamente a mudanças significativas que representem riscos reais, exigindo tempos de resposta curtos e alta confiabilidade dos controladores digitais envolvidos, conforme apresentado no Capítulo 13.

Com a crescente integração entre sistemas de controle e tecnologias digitais da Indústria 4.0, os SIS passaram a operar também em ambientes mais conectados, onde diagnósticos avançados, redundância digital e comunicação segura desempenham papéis essenciais. Contudo, essa conectividade aumenta a necessidade de que os princípios fundamentais da teoria de controle sejam aplicados com rigor ainda maior, assegurando que atrasos de rede, tratamento de dados ou falhas de comunicação não comprometam a função primordial do SIS: garantir a segurança da planta e das pessoas.

7 Simulações com Conectividade IIoT

A utilização de simulações em Python integradas a plataformas de conectividade IIoT representa uma das principais formas de aproximar a teoria de controle da prática industrial moderna. No contexto da Indústria 4.0, não basta compreender a dinâmica de um sistema ou projetar um controlador adequado; torna-se igualmente essencial garantir que esses dados, muitas vezes gerados em tempo real, possam ser compartilhados com arquiteturas superiores, como dashboards de supervisão, serviços em nuvem e algoritmos de inteligência artificial ou otimização. Dessa forma, a simulação computacional deixa de ser uma ferramenta isolada e passa a integrar um ecossistema digital distribuído, no qual a circulação de dados é tão importante quanto a modelagem do sistema físico.

O fluxo geral de desenvolvimento de uma simulação conectada à nuvem por meio de protocolos IIoT inicia-se pela implementação de um modelo dinâmico. Esse modelo pode representar, por exemplo, a resposta ao degrau de um sistema de segunda ordem, cuja expressão matemática é amplamente utilizada em análise de desempenho de controladores. Depois de gerados os sinais simulados — normalmente vetores que contêm o tempo, a saída do sistema e, eventualmente, variáveis intermediárias — é necessário convertê-los para um formato padronizado que permita transmissão entre diferentes plataformas. O formato JSON (JavaScript Object Notation) é comumente adotado devido à sua simplicidade, independência de linguagem e compatibilidade com praticamente todas as tecnologias de nuvem disponíveis.

Uma vez estruturados, esses dados precisam ser transmitidos de forma eficiente e

confiável. Nesse ponto, o protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) desempenha um papel crucial. Trata-se de um protocolo de comunicação leve, orientado a publicações e assinaturas (publish/subscribe), projetado especificamente para ambientes com restrições de largura de banda, latência variável e dispositivos de baixo consumo energético — características encontramos em soluções IIoT industriais e em sistemas embarcados distribuídos. Em Python, o envio dos dados pode ser realizado com a biblioteca `paho-mqtt`, que permite conectar-se a um broker MQTT e publicar mensagens em tópicos específicos. O broker atua como intermediário, recebendo mensagens dos produtores (como a simulação em Python) e entregando-as aos consumidores (como dashboards, CLPs digitais simulados, Digital Twins ou plataformas de nuvem).

O código a seguir ilustra esse processo, mostrando uma simulação simples que gera a resposta exponencial típica de um sistema de primeira ou segunda ordem e publica seus dados periodicamente em um tópico MQTT.

```
import numpy as np
import paho.mqtt.client as mqtt
import time
import json

client = mqtt.Client()
client.connect("broker.hivemq.com", 1883)

t = np.linspace(0, 10, 100)
y = 1 - np.exp(-t)

for i in range(len(t)):
    payload = {"time": float(t[i]), "value": float(y[i])}
    client.publish("meu_processo/sinal", json.dumps(payload))
    time.sleep(0.1)
```

Nesse exemplo, cada par (`tempo`, `valor`) é transmitido em intervalos regulares, simulando uma coleta de dados em tempo real de um sensor ou de uma malha de controle industrial. Essa estrutura permite reproduzir, em ambiente laboratorial ou acadêmico, a dinâmica típica de sistemas SCADA, DCS e até mesmo arquiteturas mais avançadas baseadas em nuvem. Os dados publicados no tópico MQTT podem ser consumidos por diversas interfaces e ferramentas, tais como Node-RED, Grafana, Azure IoT Hub, AWS IoT Core ou Google Cloud IoT, permitindo visualização em dashboards, armazenamento em bancos de dados industriais, integração com pipelines de machine learning e utilização em Digital Twins baseados em modelos matemáticos ou aprendizado de máquina.

Mais do que uma demonstração prática, essa integração entre simulação, comunicação IIoT e plataformas de análise evidencia como a teoria de controle não se limita ao domínio matemático, mas se integra diretamente à infraestrutura digital que sustenta sistemas industriais modernos. A capacidade de coletar, transmitir, visualizar e analisar dados de forma distribuída e em tempo real é essencial para qualquer arquitetura de Indústria 4.0, e o uso de simulações conectadas prepara o ambiente acadêmico para compreender e projetar soluções alinhadas com essas exigências tecnológicas.

8 Conclusão

A evolução da automação industrial rumo à Indústria 4.0 não elimina a importância da teoria clássica e moderna de controle; ao contrário, reforça sua necessidade como fundamento para todas as tecnologias avançadas emergentes. Conceitos como estabilidade, margens de robustez, desempenho transiente, compensação por polos e zeros, modelagem no domínio z e discretização tornam-se ainda mais relevantes quando a planta física passa a interagir com ambientes computacionais distribuídos, sistemas de otimização em tempo real, gêmeos digitais e redes IIoT.

A integração entre simulação e conectividade através de protocolos modernos como MQTT demonstra, de maneira prática, como o fluxo de dados se tornou o novo eixo central da automação industrial. A capacidade de enviar sinais de processo gerados em Python para plataformas em nuvem, dashboards ou sistemas de inteligência computacional permite construir arquiteturas industriais inteligentes, altamente conectadas e capazes de tomar decisões com base em dados atualizados e confiáveis. Assim, unir teoria de controle e infraestrutura digital representa um passo essencial para viabilizar sistemas industriais mais seguros, eficientes, otimizados e adaptáveis às demandas contemporâneas.