

# RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)  
autor(a), o texto completo desta  
tese será disponibilizado  
somente a partir de  
10/02/2024.

LUCAS BORGES RODRIGUES DE SÁ

**PID 4.0: CONTROLADOR REDUNDANTE DE PROCESSOS PARA A  
INDÚSTRIA 4.0 BASEADO EM MICROSSERVIÇOS**

Sorocaba

2023

LUCAS BORGES RODRIGUES DE SÁ

**PID 4.0: CONTROLADOR REDUNDANTE DE PROCESSOS PARA A  
INDÚSTRIA 4.0 BASEADO EM MICROSSERVIÇOS**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Interunidades, entre o Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba e o Campus de São João da Boa Vista da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Área de concentração: Automação

Orientador: Prof<sup>o</sup> Dr. Eduardo Paciência Godoy

Sorocaba

2023

S111p

Sá, Lucas Borges Rodrigues de

PID 4.0: Controlador Redundante de Processos para a Indústria 4.0  
Baseado em Microsserviços / Lucas Borges Rodrigues de Sá. --  
Sorocaba, 2023

67 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),  
Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba

Orientador: Eduardo Paciência Godoy

1. Arquitetura Orientada a Serviços. 2. Redundância de  
Controladores. 3. Sistemas de Controle via rede. 4. Internet das Coisas  
Industrial. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de  
Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: PID 4.0: Controlador Redundante de Processos para a Indústria 4.0 Baseado em Microsserviços

**AUTOR: LUCAS BORGES RODRIGUES DE SÁ**

**ORIENTADOR: EDUARDO PACIÊNCIA GODOY**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, área: Automação pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. EDUARDO PACIÊNCIA GODOY (Participação Presencial)

Departamento de Engenharia de Controle e Automacao / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba



Assinado de forma digital por  
Eduardo Paciência  
Godoy:29137583808  
Dados: 2023.02.10 16:08:52  
-03'00'

Prof. Dr. EDUARDO VERRI LIBERADO (Participação Presencial)

Departamento de Engenharia de Controle e Automacao / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba

Eduardo Verri

Liberado:33018491807

Assinado de forma digital por Eduardo  
Verri Liberado:33018491807  
Dados: 2023.02.10 16:03:43 -03'00'

Prof. Dr. GUILHERME SERPA SESTITO (Participação Virtual)

Departamento Acadêmico de Elétrica - CP - DAELE-CP / Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio

GUILHERME SERPA  
SESTITO:34604351  
864

Assinado de forma digital por  
GUILHERME SERPA  
SESTITO:34604351864  
Dados: 2023.02.10 15:49:46  
-03'00'

Sorocaba, 10 de fevereiro de 2023

LUCAS BORGES RODRIGUES DE SÁ

**PID 4.0: CONTROLADOR REDUNDANTE DE PROCESSOS PARA A  
INDÚSTRIA 4.0 BASEADO EM MICROSSERVIÇOS**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Interunidades, entre o Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba e o Campus de São João da Boa Vista da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Comissão Examinadora

Profº Dr. Eduardo Paciência Godoy  
UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba  
Orientador

Profº Dr. Guilherme Serpa Sestito  
UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Profº Dr. Eduardo Verri Liberado  
UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba

Sorocaba  
2023

**"O preço da liberdade é a eterna vigilância"**

**Thomas Jefferson**

## **AGRADECIMENTOS**

*Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por me permitir mais essa conquista em minha vida.*

*Aos meus pais pela educação, carinho e valores que fizeram a diferença em minha vida me deixando preparado para assumir novos desafios e conquista-los.*

*A minha esposa e filhas pelo amor incondicional e compreensão nos momentos difíceis que a vida nós apresenta, sem isso não seria possível se levantar quando caímos.*

*A Marinha do Brasil por ser uma instituição que acredita e valoriza sua força de trabalho investindo em seu desenvolvimento pessoal e técnico.*

*Ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Paciência Godoy por ter sabedoria em compartilhar seu vasto conhecimento, por sua paciência e dedicação.*

*Ao apoio na realização dessa pesquisa pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo n° 2018/19984-4.*



## RESUMO

A Indústria 4.0 iniciou um processo de digitalização e para isso vêm utilizando novas tecnologias como a Internet das Coisas, Computação em Nuvem, Arquitetura Orientada a Serviços e Sistemas de Controle em Rede. O uso integrado dessas tecnologias em aplicações recentes de automação e controle de processos proporcionam vantagens, como a interoperabilidade vertical e a padronização da comunicação, através do compartilhamento de serviços em rede. Redundância, na automação industrial, significa manter sistemas duplicados ou triplicados para garantir a disponibilidade de processos e dispositivos críticos. Tendo em vista o contexto da Indústria 4.0 este trabalho desenvolveu uma nova abordagem para se fazer redundância de controladores de processo na indústria. O objetivo foi desenvolver um controlador redundante usando uma arquitetura de automação orientada a microsserviços. O controlador redundante PID4.0 é baseado em uma modificação do algoritmo PIDPlus para controle de processos em rede e operação como um microsserviço. Adicionalmente, uma aplicação de redundância (orquestrador) é responsável pela orquestração dos microsserviços e o registro das variáveis de controle, permitindo o compartilhamento de dados das variáveis de processo entre os controladores redundantes (em réplica). O PID 4.0 pode ser alocado em diferentes *hardwares*, no computador ou até mesmo em nuvem industrial, fornecendo versatilidade a este tipo de solução. O projeto foi desenvolvido em uma planta piloto de controle de processos industriais orientada a microsserviços. Resultados experimentais relacionados ao desempenho de controle e ao tempo de resposta da malha de controle em diferentes cenários demonstram a viabilidade e robustez da implementação do controlador PID4.0 redundante como um serviço. Adicionalmente, um estudo do impacto da forma de comunicação entre os serviços e controladores redundantes no desempenho de controle foi realizado. Essa abordagem tem uma promissora redução de custos e tempo de desenvolvimento das aplicações utilizando a virtualização de controladores, além de redução de *hardware* utilizado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Indústria 4.0. Sistemas de Controle. Arquitetura Orientada a Serviços. Redundância de controlador. Hardware.

## ABSTRACT

Industry 4.0 starts the digitalization process and for this they have been using new technologies as Industrial Internet of Things (IIoT), Cloud Computing, Service Oriented Architectures and Networked Control Systems. The integrated use of these technologies in recent applications of automation and process control provide advantages, such as vertical interoperability and standardization of communication, through the sharing of networked services. Redundancy, in the automation industry, means keeping systems duplicate or triplicate in order to ensure availability for processes and critical devices. In view of the Industry 4.0 context, this work has developed a new approach to making redundancy of process controllers in the industry. The goal was to develop a redundant controller using a microservice-oriented automation architecture. The redundant controller (PID4.0) is based on modification of the PIDPlus algorithm for network process control and operation such as a microservice. Additionally, a redundancy application (orchestrator) is responsible for orchestrating microservices and recording control variables, allowing the sharing of data from process variables among redundant controllers (in replica). PID 4.0 can be allocated on different hardware, on the computer, or even on industrial cloud, providing versatility to this type of system. The project was developed in a microservice-oriented industrial process control pilot plant. Experimental results related to control performance and control mesh response time in different scenarios demonstrate the feasibility and robustness of implementing the redundant PID4.0 controller as a service. Additionally, a study of the impact of the way of communication between the services and the redundant controllers on control performance was carried out. This approach has a promising reduction in costs and development time of applications using controller virtualization, in addition to hardware reduction utilized.

**KEYWORDS:** Industry 4.0. Control Systems. Service Oriented Architectur. Controller Redundancy. Hardware.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	As Revoluções Industriais . . . . .	14
Figura 2	Integração de Processos na Indústria 4.0 através de Tecnologias de IoT e Serviços. . . . .	15
Figura 3	(a) Redundância de Controladores, (b) Localização de Controladores em Nuvem. . . . .	16
Figura 4	SOA Aplicada na Automação de um Processo. . . . .	17
Figura 5	Representação das intersecções entre IoT, IIoT, CPS e Indústria 4.0 . . . .	19
Figura 6	Esquemático da composição dos microsserviços. . . . .	23
Figura 7	Comparativo entre orquestração e coreografia de serviços . . . . .	24
Figura 8	PLC 4.0. . . . .	27
Figura 9	Modelo de controlador redundante utilizado na indústria e baseado em microsserviços. . . . .	29
Figura 10	Diagrama do PID4.0: Controlador Redundante de Processos como um Serviço. . . . .	30
Figura 11	Arquitetura Orientada a Microserviços do Molecular. . . . .	31
Figura 12	Microserviço <i>Transporter</i> da Arquitetura MOA. . . . .	35
Figura 13	Exemplo de configuração de Latência ( <i>Latency-based strategy</i> ). . . . .	37
Figura 14	Planta piloto industrial. . . . .	37
Figura 15	Legenda do PI&D da planta piloto industrial. . . . .	38
Figura 16	Raspberry Pi 3B+ e MegaIO Industrial. . . . .	39
Figura 17	Estrutura do controlador <i>PIDPlus</i> . . . . .	41
Figura 18	Diagrama sequencial de orquestração PID4.0 e PIDPlus. . . . .	44
Figura 19	Disposição dos serviços. . . . .	46
Figura 20	Sequência de comunicação dos Microsserviços. . . . .	48
Figura 21	Controle malha de pressão. . . . .	49
Figura 22	Comparação PID4.0 e PIDPlus. . . . .	51
Figura 23	Malhas de controle. . . . .	52
Figura 24	Controle de duas malhas ao mesmo tempo. . . . .	52
Figura 25	Comparação de tempo dos Controladores . . . . .	55
Figura 26	Comparação de tempo do ciclo de controle . . . . .	56
Figura 27	Estratégia Round-Robin e Random. . . . .	58
Figura 28	Estratégia CPU Usage . . . . .	59
Figura 29	Comparação de tempo entre as estratégias de requisição . . . . .	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Desempenho dos controladores . . . . .	54
Tabela 2 – Desempenho das Estratégias de Requisição . . . . .	60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMQP	<i>Advanced Message Queuing Protocol</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
CLP	<i>Controlador Lógico Programável</i>
CPS	<i>Cyber-physical system</i>
DAQ	<i>Data Acquisition</i>
DPWS	<i>Device Profile for Web Services</i>
HTTP	<i>Hyper Text Transfer Protocol</i>
HTTPS	<i>Hyper Text Transfer Protocol Secure</i>
I2C	<i>Inter Integrated Circuit</i>
I4.0	<i>Industry 4.0</i>
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISA	<i>International Society of Automation</i>
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
MOA	<i>Microservice Oriented Architecture</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
MV	<i>Manipulated Variable</i>
NATS	<i>Messaging System</i>
NPM	<i>Node Package Manager</i>
PID	<i>Proportional Integral Derivative</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
PV	<i>Process Variable</i>

REST	<i>Representational State Transfer</i>
RPC	<i>Remote Procedure Call</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SOA	<i>Service Oriented Architecture</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TA	<i>Tecnologia da Automação</i>
TI	<i>Tecnologia da Informação</i>
URL	<i>Uniform Resource Locator</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA</b>	<b>14</b>
1.1	Objetivo	18
1.2	Estrutura do Trabalho	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>19</b>
2.1	Indústria 4.0	19
2.2	Arquitetura Orientada a Serviços (Microserviços)	21
<b>2.2.1</b>	<b>Microserviços</b>	<b>22</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Composição de Serviços</b>	<b>23</b>
2.3	Aplicações Industriais usando Serviços	25
2.4	Virtualização de Controle e Redundância	26
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>29</b>
3.1	Proposta do Trabalho	29
3.2	Framework Molecular	30
<b>3.2.1</b>	<b><i>Service Broker</i></b>	<b>33</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Serviço (<i>Service</i>)</b>	<b>33</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Transporter</b>	<b>35</b>
<b>3.2.4</b>	<b><i>Gateway (API)</i></b>	<b>35</b>
<b>3.2.5</b>	<b><i>Load Balancing</i></b>	<b>36</b>
3.3	Planta Piloto	36
<b>3.3.1</b>	<b>Serviços</b>	<b>39</b>
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS</b>	<b>43</b>
4.1	Microserviço PID4.0	43
4.2	Testes e Validação da Redundância	46
<b>4.2.1</b>	<b>Comparação de desempenho dos controladores PIDPlus e PID4.0</b>	<b>53</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Comparação do tempo de Controle do PIDPlus e PID4.0</b>	<b>54</b>
4.3	Estratégias de Balanceamento de Requisição de Serviços Redundantes	57
<b>4.3.1</b>	<b>Comparação de desempenho e tempo entre as estratégias de balanceamento de Requisição de serviços</b>	<b>60</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>62</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>64</b>

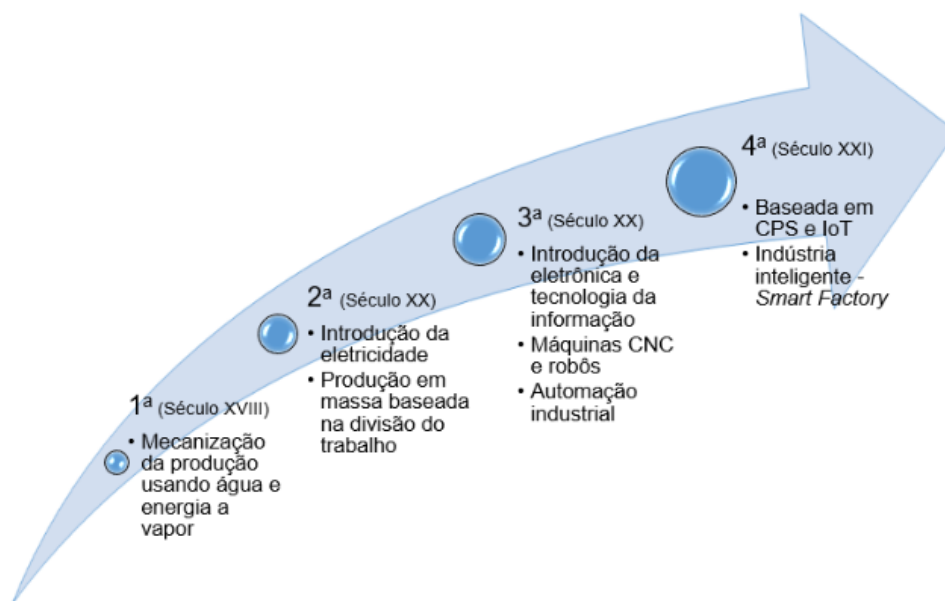
## 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A automação industrial está evoluindo rapidamente chegando em uma nova revolução chamada Indústria 4.0, e para isso vem integrando novas tecnologias com o intuito de aumentar a eficiência e produtividade, com a convergência entre tecnologias da automação (TA) e tecnologia da informação (TI). Para melhorar os processos industriais é fundamental utilizar tecnologias de automação, que com sua alta capacidade em acelerar processos de manufatura e produção, obtém maior eficiência e qualidade com menores custos e tempos. Dessa forma, a indústria tem evoluído de forma a incorporar novas tecnologias e conseqüentemente obter maior produtividade (Sauter et al., 2011; Bangemann et al., 2014).

O desenvolvimento e evolução das tecnologias digitais contribuíram para a criação de novos métodos de produção industrial baseados na automação, robótica, inteligência artificial, Internet das Coisas e inteligência de dados, dentre outras inovações. Dentro da indústria a utilização dessas tecnologias de forma coordenada a fim de aumentar a competitividade dos negócios, otimizar a eficiência da cadeia produtiva, agregar valor ao produto, utilizar os recursos de forma mais sustentável e customizar as soluções tecnológicas é chamada de Indústria 4.0.

Chamada de quarta revolução industrial a I4.0, é um novo conceito que representa uma evolução dos sistemas produtivos atuais a partir da convergência entre TA e TI. (BLANCHET et al., 2014; Lu, 2017) como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 – As Revoluções Industriais



Fonte: Pisching (2017).

A integração entre todas essas tecnologias é o grande desafio da I4.0, tendo como meta uma



nova realidade produtiva, onde tudo estará conectado permitindo melhores decisões de produção, custo e segurança, tudo sob demanda em tempo real. Neste sentido, diversos trabalhos são desenvolvidos buscando soluções que agreguem essas tecnologias e permitam a integração dos processos produtivos e equipamentos de automação a serviços de TI que estão armazenados na nuvem, conforme Figura 2.

Figura 2 – Integração de Processos na Indústria 4.0 através de Tecnologias de IoT e Serviços.

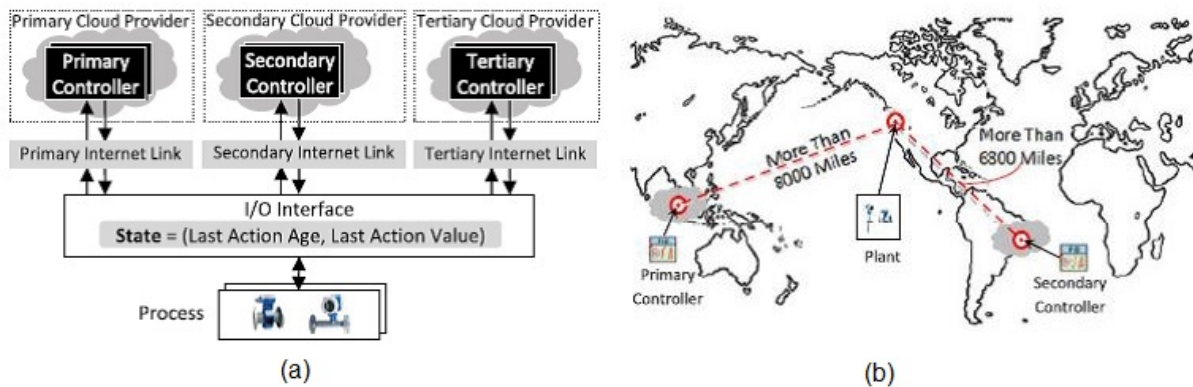


Fonte: Pisching (2018).

Um novo serviço em nuvem é defendido por Hegazy e Heffeda (2015), “automação industrial como serviço”. Conforme apresentado na Figura 3 é proposto pelos autores colocar dois controladores hospedados em nuvem e fisicamente separados. Com essa proposta traria inúmeros benefícios, como redução de custos e tempo de desenvolvimento das aplicações utilizando a virtualização de controladores, além de redução de *hardware* utilizado. É apresentada uma implementação de redundância em nuvem de controladores industriais atuando no controle de uma planta utilizando a nuvem comercial *Amazon Web Services*.

Delsing (2017) apresenta uma Arquitetura Orientada a Serviços (SOA) como infraestrutura de integração e comunicação, utilizando o conceito de nuvem em uma rede local, desta forma os componentes e dispositivos de automação são disponibilizados como serviços, provendo interoperabilidade total entre as aplicações industriais e desta forma propõe um modelo de arquitetura de automação em nuvem local para substituir o antigo ISA-95, trazendo maior flexibilidade entre os dispositivos IoT (Internet of Things).

Figura 3 – (a) Redundância de Controladores, (b) Localização de Controladores em Nuvem.



Fonte: Hegazy e Hefeeda (2015).

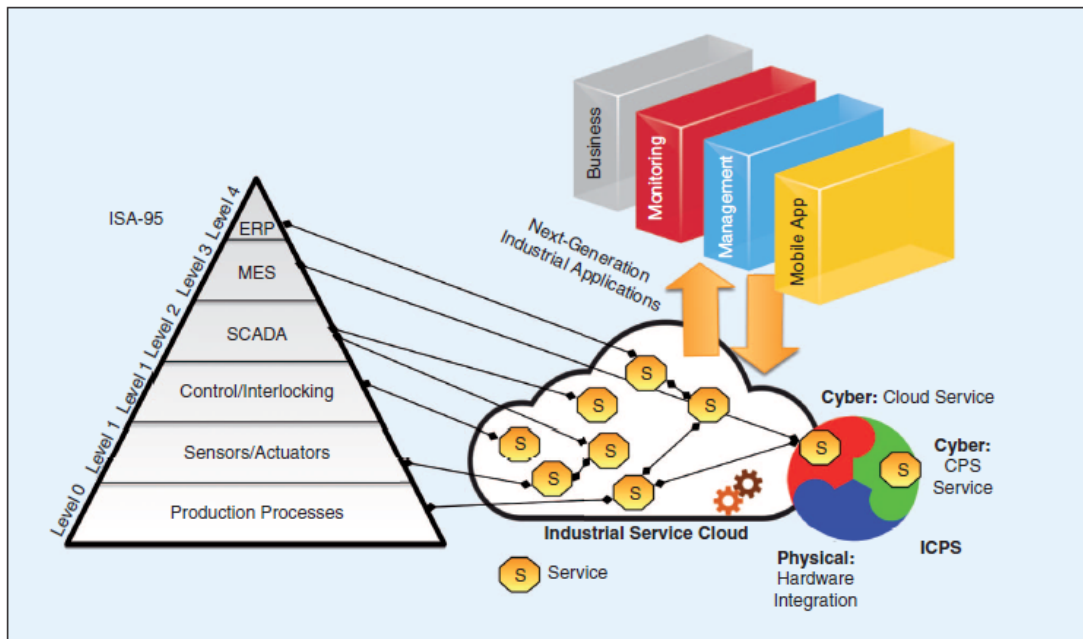
Por fim Colombo et al. (2017) afirmam que através do SOA um *hardware* programável tem grandes chances de se tornar um serviço virtualizado, o que permitiria sua configuração ou programação por aplicativos. Sendo assim, as funcionalidades dos dispositivos podem ser operadas por diferentes módulos, com sistemas independentes da heterogeneidade do *hardware/software*, permitindo a interoperabilidade dos sistemas como mostrado na Figura 4. É possível observar nessa figura que novos serviços poderão ser criados a partir de serviços que já existem utilizando o método de orquestração ou coreografia, também é possível observar que com isso teremos uma migração da arquitetura ISA-95 tradicional para uma arquitetura SOA em nuvem mais flexível onde todos os recursos, sistemas e equipamentos são disponibilizados em uma mesma infraestrutura em nuvem de forma padronizada e interoperável.

Diante deste contexto da I4.0, buscou-se uma forma de utilizar essas tecnologias em sistemas de redundância em aplicações de automação e controle de processos que tem fundamental importância na indústria. Para aplicações críticas, uma falha que implique na parada da planta pode resultar em um considerável prejuízo para a empresa. Processos de alta disponibilidade como os encontrados em negócios de Óleo & Gás, Açúcar & Etanol, Usinas Hidrelétricas, Usina Nuclear, Agroindústria, entre outros, demandam a utilização de sistemas redundantes para evitar que a planta pare de funcionar caso um equipamento fique indisponível.

A utilização desse tipo de arquitetura praticamente elimina a necessidade de parada do sistema para manutenção, ampliando a segurança operacional, aumentando a confiabilidade do sistema de automação e otimizando os custos e o desempenho do negócio. No trabalho de Liu et al. (2013) é apresentado uma forma de se fazer redundância em processos que não podem ser interrompidos, onde a redundância do controlador é feita por dois *CLPs* sincronizados.

Redundância, na automação industrial, significa manter sistemas duplicados ou triplicados para garantir a disponibilidade de processos e dispositivos críticos, sendo assim no trabalho Li, Xue e Gai (2014) é apresentado um sistema específico para fazer a votação entre os dados dos dispositivos de um sistema de controle de processos que possui redundância tripla. Existem

Figura 4 – SOA Aplicada na Automação de um Processo.



Fonte: Colombo et al. (2017).

diversos motivos para se utilizar sistemas de arquitetura redundante, mas é senso comum de que robustez, disponibilidade e segurança formam o tripé deste tipo de sistema:

- Robustez - capacidade de tolerar falhas e continuar operando o processo;
- Disponibilidade - como a própria denominação deixa claro, trata-se de todo o potencial do sistema estar disponível sempre que necessário;
- Segurança - mais do que apenas proteção de dados, a palavra segurança aqui se dá no contexto da segurança funcional, que resguarda a integridade física tanto dos operadores do processo quanto do patrimônio da empresa.

A utilização de redundância de hardware (ou de equipamentos) é um dos recursos mais empregados quando tolerância a falhas é requerida. Maior tolerância a falhas corresponde a maior disponibilidade da planta e maior segurança operacional e ambos os aspectos são importantes. A disponibilidade está diretamente relacionada ao tempo em operação e à lucratividade do negócio. E a segurança operacional diz respeito à preservação dos ativos e da vida das pessoas próximas ao processo.

Entre os tipos de redundância mais utilizadas na indústria está o hot stand-by, apresentado em Zhao e Liu (2004), técnica em que um ou mais módulos ficam em modo de espera enquanto o equipamento principal está operacional. Neste tipo de arquitetura, os módulos em espera funcionam em sincronia com o equipamento ativo e, caso uma falha seja detectada, o mesmo está pronto para se tornar operacional imediatamente. Para que não haja nenhum tipo de perda

entre a troca de equipamentos, o módulo em stand-by precisa estar sincronizado e atualizado com as mesmas configurações do equipamento principal.

## 1.1 Objetivo

O trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e avaliação de uma nova abordagem para fazer o controle de processos de forma redundante como um serviço. O controlador redundante PID4.0 é baseado em uma modificação do algoritmo PIDPlus, para controle de processos em rede, para operação como um microsserviço.

## 1.2 Estrutura do Trabalho

Este trabalho de mestrado possui mais quatro capítulos, além deste capítulo introdutório. No Capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura sobre a revolução industrial e aplicações relacionadas à Indústria 4.0. É apresentado também as arquiteturas SOA, MOA e composição de serviços com orquestração, além de aspectos relacionados a virtualização de controladores e redundância em arquiteturas baseadas em serviços.

O Capítulo 3 apresenta o Material e Métodos, com a descrição das principais ferramentas utilizadas para a criação de microsserviços na plataforma *Node.js*. Abordaremos seus principais pontos como: o que é um serviço; finalidade do transportador de mensagens; Serviço *api gateway* padrão; Ações, métodos e eventos de um microsserviço. Além de uma breve descrição da Planta Piloto 4.0 utilizada, dos serviços e o desenvolvimento do serviço de controle PID4.0.

No Capítulo 4 é descrita a proposta desse trabalho, que tem como foco a realização de testes com o serviço de controle redundante PID4.0 para sua validação. A base de dados e monitoramento de processo é detalhado, além de como fazer a replicação dos serviços. Por fim no Capítulo 5 apresentamos as conclusões e por último estão as referências bibliográficas.

## 5 CONCLUSÃO

A indústria 4.0 é uma realidade que irá fazer parte de nossas vidas em um futuro muito próximo e para isso é essencial que tenhamos interoperabilidade e interação vertical de sistemas e dispositivos, com uma arquitetura distribuída e modular. Neste contexto este trabalho demonstrou que a Arquitetura Orientada a Microsserviços atende a esses quesitos essenciais para a indústria 4.0.

Foi apresentado diversos conceitos de sistemas que utilizam arquiteturas orientadas a serviço (SOA e MOA), demonstrando através de aplicações sua importância para a estrutura da Indústria 4.0. Esse tipo de arquitetura está se consolidando no setor industrial, gerando interesses em pesquisas e desenvolvimento, com o foco no desenvolvimento de ferramentas promissoras que deem suporte ao desenvolvimento da indústria 4.0.

Este trabalho apresentou a utilização e desenvolvimento de microsserviços como DAQ e *PID4.0*, além das aplicações de controle e monitoramento com orquestração dos serviços. O microsserviço DAQ faz uma operação de uma remota I/O em rede, tendo como vantagem a possibilidade de ser programável podendo ser adaptado e customizado para diversos tipos de aplicação, além de permitir uma réplica o que geraria redundância, tornando o sistema resiliente a falhas. O microsserviço de controle *PID4.0*, foco de estudo deste trabalho, flexibiliza o desenvolvimento de aplicações através do algoritmo de controle que permite ser adequado a necessidade da aplicação.

A motivação deste trabalho foi o desenvolvimento do microsserviço de controle *PID4.0* com o intuito de permitir a redundância deste tipo de controle, gerando uma grande economia de controladores físicos na planta e outros dispositivos, além de diminuir a complexidade do sistema de redundância. O microsserviço de controle flexibiliza e otimiza o desenvolvimento de algoritmo de controle conforme a necessidade do projeto, podendo ser adaptado com pequenas alterações. A malha de processo de pressão se mostrou adequada para o controle *PID4.0* redundante via rede, assim como as demais malhas disponíveis na planta piloto.

Com os experimentos realizados na planta piloto, conseguimos comprovar a efetividade da aplicação e validação do controlador redundante como um microsserviço. Os resultados apresentados demonstram que o conceito de controlador *PID4.0* redundante desenvolvido também pode ser usado para implementação de outros tipos de controladores e processos. Para este trabalho, utilizamos até 3 serviços de controle redundantes funcionando ao mesmo tempo em *Hardware*s diferentes, podendo esse ser de maior número ou menor dependendo da aplicação.

Outra contribuição importante foi a utilização das ferramentas de balanceamento de rede disponíveis no *framework Molecular*, o que permite uma personalização do projeto de automação, permitindo uma configuração conforme a necessidade do projeto. Além disso com a análise

de desempenho e de tempo dos controladores foi possível comprovar que o PID4.0 mantém as mesmas características do PIDPlus, porém com uma vantagem, pode ser utilizado de forma redundante.

## REFERÊNCIAS

- AZARMIPOUR, M. et al. Plc 4.0: A control system for industry 4.0. **IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**, 2019. DOI: 10.1109/IECON.2019.8927026. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8927026>>.
- BANGEMANN, T. et al. State of the art in industrial automation. **Industrial cloud-based cyber-physical systems**, p. 23–47, 2014. DOI: 10.1007/978-3-319-05624-1\_2.
- BASSI, L. Industry 4.0: hope, hype or revolution? **2017 IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI)**, 2017. DOI: 10.1109/RTSI.2017.8065927. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8065927>>.
- BELTRÁN, J. V.; IGLESIAS, V. G.; FERNÁNDEZ, D. R. Enabling distributed manufacturing resources through soa: The rest approach. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 46, p. 156–165, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.09.007>>.
- BELTRÁN, J. V. E.; IGLESIAS, V. G.; FERNÁNDEZ, D. R. Enabling distributed manufacturing resources through SOA: The REST approach. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing - Elsevier**, v. 46, p. 156–165, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.09.007>>.
- BIGHETI, J. A. **Arquitetura de Automação e Controle Orientada a Microserviços para a Indústria 4.0**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, São Paulo - Brasil, 2020.
- BIGHETI, J. A.; FERNANDES, M. M.; GODOY, E. P. Control as a Service: A Microservice Approach to Industry 4.0. **2019 II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4.0&IoT)**, 2019. DOI: 10.1109/METROI4.2019.8792918. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8792918>>.
- BLANCHET, M. et al. **Industry 4.0 The new industrial revolution**. 2014. Disponível em: <[http://www.iberglobal.com/files/Roland\\_Berger\\_Industry.pdf](http://www.iberglobal.com/files/Roland_Berger_Industry.pdf)>. Acesso em: Abril, 2022.
- BORANGIU, T. et al. Digital transformation of manufacturing through cloud services and resource virtualization. **Computers in Industry**, v. 108, p. 150–162, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361519300107>>.
- BUTZIN, B.; GOLATOWSKI, F.; TIMMERMANN, D. Microservices Approach for the Internet of Things. **IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)**, 2016. DOI: 10.1109/ETFA.2016.7733707. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7733707>>.
- CARLSSON, O. et al. Migration of industrial process control systems to service-oriented architectures. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 31, n. 2, p. 156–165, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/0951192X.2017.1392615>>.

COLOMBO, A. W. et al. Industrial Cyberphysical Systems: A Backbone of the Fourth Industrial Revolution. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, 2017. DOI: 10.1109/MIE.2017.2648857. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7883993>>.

DELSING, J. Local Cloud Internet of Things Automation. **IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS MAGAZINE**, v. 11, p. 8–21, 2017. DOI: 10.1109/MIE.2017.2759342. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8241149>>.

DUSTDAR, S.; PAPAZOGLU, M. P. Services and Service Composition – An introduction. **Information Technology**, v. 50, n. 2, p. 86–92, 2008.

FERNANDES, M. M. et al. Controlador Lógico Programável como um Serviço: Uma Proposta para a Indústria 4.0. **Sociedade Brasileira de Automática**, v. 2, n. 1, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.48011/asba.v2i1.1740>>.

FERNANDES, M. M. et al. Industrial Automation as a Service: A New Application to Industry 4.0. **IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS**, v. 19, n. 12, p. 2046 – 2053, 2021. DOI: 10.1109/TLA.2021.9480146. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9480146>>.

FOWLER, M.; LEWIS, J. **Microservices a definition of this new architectural term**. 2014. Disponível em: <<https://martinfowler.com/articles/microservices.html>>. Acesso em: Maio, 2022.

GIVEHCHI, O. et al. Control-as-a-Service from the Cloud: A Case Study for using Virtualized PLCs. **2014 10th IEEE Workshop on Factory Communication Systems (WFCS 2014)**, 2014. DOI: 10.1109/WFCS.2014.6837587. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6837587>>.

HEGAZY, T.; HEFFEDA, M. Industrial Automation as a Cloud Service. **IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems**, v. 26, n. 10, p. 2750 – 2763, 2015. DOI: 10.1109/TPDS.2014.2359894. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6908023>>.

JAMMES, F. et al. Promising Technologies for SOA-Based Industrial Automation Systems. **Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems**, p. 89–109, 2014. DOI: 10.1007/978-3-319-05624-1\_4. Disponível em: <[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-05624-1\\_4](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-05624-1_4)>.

JAZDI, N. Cyber Physical Systems in the Context of Industry 4.0. **2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics**, 2014. DOI: 10.1109/AQTR.2014.6857843. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6857843>>.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0**. Frankfurt: Acatech, 2013.

LI, Y.; XUE, J.; GAI, Q. Design for input and output card of triple redundant control system. **Symposium on Computer Applications and Communications**, 2014. DOI: 10.1109/SCAC.2014.28. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6913176>>.



- LIU, G. et al. EPICS DRIVER FOR PHOENIX CONTACT REDUNDANT PLC. **Proceedings of IPAC2013**, 2013. Disponível em: <<https://accelconf.web.cern.ch/ipac2013/papers/thpea016.pdf>>.
- LU, Y. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 6, p. 1–10, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>>.
- MELLADO, J.; NÚÑEZ, F. Design of an IoT-PLC: A containerized programmable logical controller for the industry 4.0. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 25, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100250>>.
- MOLECULER. **Fast & powerful microservices framework for Node.js**. 2021. Disponível em: <<https://moleculer.services/>>. Acesso em: Abril, 2022.
- MOREIRA, P. F. M.; BEDER, D. M. Desenvolvimento de Aplicações e Micro Serviços: Um estudo de caso. **Revista T.I.S.**, v. 4, p. 209–215, 2015. Disponível em: <<http://revistatis.dc.ufscar.br/index.php/revista/article/view/364/127>>.
- MUBEEN, S. et al. Delay Mitigation in Offloaded Cloud Controllers in Industrial IoT. **IEEE Access**, v. 5, p. 4418 – 4430, 2017. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2682499. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7879156>>.
- NEWMAN, S. **Building Microservices**. Sebastopol, CA - Canada: O'Reilly Media, 2021.
- OLLINGER, L. et al. SOA-PLC – Dynamic Generation and Deployment of Web Services on a Programmable Logic Controller. **The International Federation of Automatic Control**, v. 47, n. 3, p. 2622–2627, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.02189>>.
- ORDANINI, A.; PASINI, P. Service co-production and value co-creation: The case for a service-oriented architecture (SOA). **European Management Journal**, v. 26, n. 5, p. 289–297, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.emj.2008.04.005>>.
- PONTAROLLI, R. P. **Composição de Serviços e Mecanismos de Segurança para Arquiteturas Orientadas a Microserviços na Indústria 4.0**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, São Paulo - Brasil, 2020.
- PONTAROLLI, R. P. et al. Planta Piloto 4.0: Uma Abordagem para a Automação e Controle de Processos Orientada a Serviços. **Congresso Brasileiro de Automática - CBA**, v. 2, n. 1, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.48011/asba.v2i1.1741>>.
- RICHARDS, M. **Microservices vs. service-oriented architecture**. 2016. Disponível em: <<https://www.oreilly.com/radar/microservices-vs-service-oriented-architecture/>>. Acesso em: Abril, 2022.
- SAUTER, T. et al. The Evolution of Factory and Building Automation. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 5, n. 3, p. 35–48, 2011. DOI: 10.1109/mie.2011.942175. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6042563>>.

SHENG, Q. Z. et al. Web services composition: A decade's overview. **Information Sciences**, v. 280, p. 218–238, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.04.054>>.

SISINNI, E. et al. Industrial Internet of Things: Challenges, Opportunities, and Directions. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS**, v. 14, n. 11, p. 4724 – 4734, 2018. DOI: 10.1109/TII.2018.2852491. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8401919>>.

SONG, J. et al. Improving PID Control with Unreliable Communications. **ISA EXPO 2006**, 2006.

THEORIN, A.; HAGSUND, J.; JOHNSON, C. Service Orchestration with OPC UA in a Graphical Control Language. **IEEE Emerging Technology and Factory Automation**, p. 1–6, 2014. DOI: 10.1109/ETFA.2014.7005351. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7005351>>.

WOLLSCHLAEGER, M.; SAUTER, T.; JASPERNEITE, J. The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0. **Industrial Electronics Magazine**, v. 11, n. 1, p. 17–27, 2017. DOI: 10.1109/MIE.2017.2649104. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7883994>>.

XIAO, Z.; WIJEGUNARATNE, I.; QIANG, X. Reflections on SOA and Microservices. **International Conference on Enterprise Systems**, p. 60–67, 2016. DOI: 10.1109/ES.2016.14. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7880473>>.

ZHAO, Y.; LIU, F. The implementation of a dual-redundant control system. **Control Engineering Practice**, v. 12, n. 4, p. 445–453, 2004. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(03\)00118-7](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(03)00118-7)>.