RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 04/05/2021.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Bauru

MICHEL DE MATTOS FERNANDES

Controle de Processos como um Serviço: Uma Abordagem para a Indústria 4.0

Bauru

2020

MICHEL DE MATTOS FERNANDES

CONTROLE DE PROCESSOS COMO UM SERVIÇO: UMA ABORDAGEM PARA A INDÚSTRIA 4.0

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação

Linha de Pesquisa: Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Paciência Godoy

Bauru 2020

F363c

Fernandes, Michel de Mattos
Controle de processos como um serviço: uma abordagem para a indústria 4.0 / Michel de Mattos Fernandes. -- Bauru, 2020
87 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru
Orientador: Eduardo Paciência Godoy

1. Arquitetura Orientada a Microserviços (MOA). 2. Framework Moleculer. 3. Internet das Coisas Industrial (IIoT). 4. Sistema de Controle via Rede. 5. Eletrônica Embarcada. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE MICHEL DE MATTOS FERNANDES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 04 dias do mês de novembro do ano de 2020, às 09:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de MICHEL DE MATTOS FERNANDES, intitulada **CONTROLE DE PROCESSOS COMO UM SERVIÇO: UMA ABORDAGEM PARA A INDÚSTRIA 4.0**. A Comissão Examinadora foi constituida pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDUARDO PACIÊNCIA GODOY (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba, Prof. Dr. ANDRE LUIZ ANDREOLI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. BRUNO AUGUSTO ANGÉLICO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle / Escola Politécnica da USP. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: **APROVADO**. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. EDUARDO PACIÊNCIA GODOY

"A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo"

(Albert Einstein)

À Deus, aos meus pais que sempre me apoiaram e me incentivaram, aos meus familiares e amigos

AGRADECIMENTOS

À Deus por me dar capacidade e forças em todos os momentos da minha vida.

À minha família, em especial minha mãe Tereza e meu pai Oziel, que se dedicaram para que eu pudesse estudar, me ajudando no que fosse preciso.

À Yoko Arimoto que me incentivou e apoiou durante esta etapa da minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Paciência Godoy por todos os ensinamentos, amizade e dedicação. É um professor que além de possuir um enorme conhecimento nos inspira a sermos cada vez melhores no que fazemos.

Aos meus colegas de pós-graduação que me ajudaram, em especial ao Jeferson André Bigheti, que além de um grande amigo também foi um professor.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio para o desenvolvimento desse trabalho: Processo 2018/19984-4.

RESUMO

A necessidade de viabilizar e padronizar o acesso às informações do chão de fábrica pelos sistemas de gerenciamento e tomada de decisões têm norteado o desenvolvimento de tecnologias flexíveis e adaptáveis às mudanças da indústria. A Indústria 4.0 (I4.0) surge como a evolução dos sistemas produtivos através da interconexão e integração entre sistemas e equipamentos, promovendo a disponibilização das informações necessárias para as melhores decisões de produção e gerenciamento industrial. Para o desenvolvimento da I4.0, é necessária a aplicação de tecnologias recentes como a Internet das Coisas Industrial (IIoT), os Sistemas de Controle via Redes, a Computação em Nuvem, entre outras. O grande desafio da I4.0 é promover a integração entre essas tecnologias, equipamentos e sistemas alocados em diferentes níveis hierárquicos dos sistemas industriais. Nesse sentido, um paradigma recente tem sido o da automação colaborativa por meio do uso e compartilhamento de serviços para obtenção de uma arquitetura flexível, distribuída e totalmente integrada através de redes de comunicação. Diante desse contexto, este trabalho desenvolveu uma nova abordagem para o controle de processos industriais com foco na I4.0. O objetivo foi o estudo e implementação de controle de processos como um serviço. Essa nova arquitetura de controle orientada a serviços é baseada no uso do *framework* Moleculer e plataforma *Node.js*. Os serviços desenvolvidos foram: o serviço Controlador Lógico Programável (CLP), o serviço de Aquisição de Dados (DAQ) e o serviço de Controle PIDPlus, os quais podem ser executados em diferentes plataformas como computadores, sistemas embarcados e em nuvem. Uma descrição do desenvolvimento dos serviços DAQ, Controle PIDPlus e CLP, bem como da composição desses serviços por orquestração para criação de uma aplicação de Controle e Supervisão são apresentados. Para validação experimental, uma malha de controle de um motor de corrente contínua e a automação discreta de uma planta industrial virtual usando os serviços foram implementadas. Resultados relacionados ao desempenho de controle e tempo de resposta da malha de controle demonstram a viabilidade da implementação do controle de processos como um serviço. Os resultados também demonstram que essa nova abordagem de controle de processos e automação fornece modularidade, escalabilidade e interoperabilidade para aplicações de controle com foco na I4.0.

Palavras-chave: Serviços, *Framework* Moleculer, Internet das Coisas Industrial, Manufatura Avançada.

ABSTRACT

The need to enable and standardize access to the factory floor information by management and decision-making systems has guided the development of flexible technologies that are adaptable to evolution of industry. Industry 4.0 (I4.0) emerges as the evolution of productive systems through the interconnection and integration between systems and equipment, promoting the availability of necessary information for the best production decisions and industrial management. For the development of I4.0, it is necessary to apply recent technologies such as the Industrial Internet of Things (IIoT), Network Control Systems, Cloud Computing, among others. The major challenge of I4.0 is to promote the integration among these technologies, equipment and systems allocated at different hierarchical levels of industrial systems. In this sense, a recent paradigm has been the collaborative automation through the use and sharing of services to achieve a flexible, distributed and fully integrated networked architecture. In this context, this work developed a new approach for the control of industrial processes with a focus on I4.0. The objective was the study and implementation of process control as a service. This new service-oriented control architecture is based on the use of the Moleculer framework and Node.js platform. The services developed were: the Programmable Logic Controller (PLC) service, the Data Acquisition service (DAQ) and the PIDPlus Control service, which can be run on different platforms such as computers, embedded systems, and in cloud. A description of the development of the DAQ, PIDPlus Control and PLC services, as well as the composition of these services by orchestration for creating a Control and Supervision application are presented. For experimental validation, a control loop for a direct current motor and the discrete automation of a virtual industrial plant using the services were implemented. Results related to control performance and control response time demonstrate the feasibility of implementing processes control as services. The results also demonstrate that this new approach to process control and automation provides modularity, scalability and interoperability for control applications with a focus on I4.0.

Keywords: Services; Moleculer Framework; Industrial Internet of Things; Advanced Manufacturing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – As Revoluções Industriais. 12
Figura 2 – Integração de Processos na Industria 4.0 através de Tecnologias de IoT e Serviços. 13
Figura 3 – Sistema de Controle em Nuvem: (a) Redundância de Controladores, (b) Localização de Controladores em Nuvem. 14
Figura 4 – Arquitetura SOA Aplicada na Automação de um Processo. 15
Figura 5 – Representação das intersecções entre IoT, IIoT, CPS e Indústria 4.0. 17
Figura 6 – Comparativo entre orquestração e coreografia de serviços. 21
Figura 7 – Esquemático da composição dos microserviços. 23
Figura 8 – Arquitetura típica de microserviços. 24
Figura 9 – Arquitetura Orientada a Microserviços do Moleculer. 27
Figura 10 – Exemplo de Interconexão de Serviços do Moleculer. 28
Figura 11 – Estrutura do *ServiceBroker*. 31
Figura 12 – Configuração padrão do *ServiceBroker*. 31
Figura 13 – Configuração personalizada do *ServiceBroker*. 31
Figura 14 – Modelo de microserviço do Moleculer. 32
Figura 15 – Esquema de serviço simples para definir duas ações. 33
Figura 16 – Método de comunicação RPC das chamadas externas de ações. 33
Figura 17 – Exemplo de chamada de ação "*math*" via *broker.call* de um microserviço do Moleculer. 34
Figura 18 – Exemplo da propriedade *Methods* de um microserviço do Moleculer. 35
Figura 19 – Diagrama de evento balanceado para microserviço no Moleculer. 36
Figura 20 – Exemplo da propriedade do grupo do método evento de um microserviço do Moleculer. 36
Figura 21 – Exemplo da função *broker.emit* de um microserviço do Moleculer. 37
Figura 22 – Exemplo do método *broker.broadcast* de um microserviço do Moleculer. 37
Figura 23 – Diagrama de um evento *Broadcast* de um microserviço no Moleculer. 37
Figura 24 – Exemplo de configuração de um *ServiceBroker* com registrador de *logs*. 38
Figura 25 – Microserviço *Transporter* da Arquitetura MOA. 39
Figura 26 – Configuração do REPL no Moleculer 40
Figura 27 – Opções do REPL no Moleculer 40
Figura 28 – Diagrama da Arquitetura MOA com *framework* Moleculer para Aplicações de IIoT e I4.0. 41

Figura 29 – Microserviço DAQ. 43
Figura 30 – Estrutura de Implementação do Nó e Serviço DAQ. 43
Figura 31 – Microserviço Controle PIDPlus. 45
Figura 32 – Estrutura do controlador PIDPlus. 45
Figura 33 – Microserviço CLP. 47
Figura 34 – Aplicação Interna do Moleculer por Orquestração de Serviços. 49
Figura 35 – Aplicação Externa no Moleculer por Orquestração de Serviços. 50
Figura 36 – Sistema DAQ. 52
Figura 37 – Trecho de código JavaScript de um microserviço do Moleculer. 53
Figura 38 – Esquema de ligação para testes do microserviço DAQ 54
Figura 39 – Estrutura de Implementação do Nó e Serviço Controle PIDPlus. 55
Figura 40 – Esquema de ligação simplificado do controle em malha fechada 57
Figura 41 – Estrutura do Experimento de Controle de Processo Usando Serviços com Planta Didática. 58
Figura 42 – Resposta do Experimento de Controle de Processo usando Serviços. 59
Figura 43 – Sinal de Controle do Experimento de Controle de Processo usando Serviços. 60
Figura 44 – Histograma do Experimento de Controle usando Serviços - Tempo da Orquestração 61
Figura 45 – Estrutura de implementação do microserviço CLP 63
Figura 46 – Placa UniPi 1.1 64
Figura 47 – Esquema de ligação para o teste do microserviço CLP 65
Figura 48 – Esquema simplificado da planta de controle em malha fechada 66
Figura 49 – Planta Industrial em Simulação no *software* Factory I/O 67
Figura 50 – MOA da aplicação do microserviço CLP 68
Figura 51 – Estrutura de *hardware* e *software* para experimento do CLP como um Serviço 69
Figura 52 – *Dashboard* de monitoramento e controle desenvolvido no Node-RED 70
Figura 53 – Fluxo para supervisão das entradas digitais construído no Node-RED 80
Figura 54 – Parâmetros do bloco *inject* Node-RED 81
Figura 55 – Configuração do Broker do Moleculer no Node-RED 81
Figura 56 – Configuração de acesso à ações do Moleculer através do Node-RED 82
Figura 57 – *Dashboard* desenvolvido no Node-RED 83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Experimento de Análise de Tempo para o Controle como um Serviço 62

LISTA DE SIGLAS

AC	*Alternating Current* (Corrente Alternada)
ADC	*Analog Digital Converter* (Conversor Analógico Digital)
AMQP	*Advanced Message Queuing Protocol* (Protocolo Avançado de Filas de Mensagem)
API	*Application-Programming Interface* (Interface de Programação de Aplicativos)
ARUM	*Adaptive Production Management* (Gerenciamento Adaptativo de Produção)
AS-i	*Actuator Sensor Interface* (Interface Sensor Atuador)
CAN	*Controller Area Network*
CC	Corrente Contínua
CLP	Controlador Lógico Programável
CNC	*Computer Numeric Control* (Controle Numérico Computadorizado)
CoAP	*Constrained Application Protocol* (Protocolo de Aplicação Restrita)
CPS	*Cyber Physical Systems* (Sistemas Cyber Físicos)
CSS	*Cascading Style Sheets* (Folha de Estilo em Cascatas)
DAQ	*Data Acquisition* (Aquisição de Dados)
DC	*Direct Current* (Corrente Contínua)
DCS	*Distributed Control System* (Sistemas de Controle Distribuído)
DPWS	*Device Profile for Web Services* (Perfil de Dispositivos para Serviços *Web*)
ERP	*Enterprise Resource Planning* (Planejamento de Recursos Empresariais)
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FBD	*Function Block Diagram* (Diagrama de Blocos Funcionais)
GPIO	*General Purpose Input/Output* (Entrada/Saída de Uso Geral)
GRACE	*inteGration of pRocess and quAlity Control using multi-agEnt technology* (Integração do controle de processos e qualidade usando a tecnologia multi-agent)
HTTP	*Hypertext Transfer Protocol* (Protocolo de Transferência de Hipertexto)
I/O	*In/Out* (Entradas/Saídas)
I2C	*Inter-Integrated Circuit* (Circuito Inter-Integrado)
I4.0	Indústria 4.0
IEC	*International Electrotechnical Commission* (Comissão Eletrotécnica Internacional)
IIoT	*Industrial Internet of Things* (Internet das Coisas Industrial)
IL	*Instruction List* (Lista de Instruções)

IMC-AESOP	*Architecture for Service-Oriented Process Monitoring and Control* (Arquitetura para Monitoramento e Controle de Processos Orientados a Serviços)
IoT	*Internet of Things* (Internet das Coisas)
IP	*Internet Protocol* (Protocolo de Internet)
IPV6	*Internet Protocol Version 6* (Protocolo de Internet Versão 6)
ISA	*International Society of Automation* (Sociedade Internacional de Automação)
JSON	*JavaScript Object Notation* (Notação de Objetos JavaScript)
LD	*Ladder Diagram* (Diagrama *Ladder*)
LED	*Light Emitting Diode* (Diodo Emissor de Luz)
M2M	*Machine-to-Machine* (Máquina a Máquina)
MES	*Manufacturing Execution System* (Sistema de Execução de Manufatura)
MOA	*Microservices Oriented Architecture* (Arquitetura Orientada a Microserviços)
MQTT	*Message Queuing Telemetry Transport* (Transmissão de Telemetria de Espera de Mensagens)
MV	*Manipulated Variable* (Variável Manipulada)
NCS	*Networked Control Systems* (Sistema de Controle em Rede)
NPM	*Node Package Manager* (Gerenciador de Pacotes do Node)
OPC UA	*Open Platform Communications Unified Architecture* (Plataforma Aberta de Comunicação – Arquitetura Unificada)
PaaS	*Platform as a Service* (Plataforma como serviço)
PC	*Pessoal Computer* (Computador Pessoal)
PCI	*Peripheral Component Interconnect* (Interconector de Componentes Periféricos)
PID	*Proportional Integral Derivative* (Proporcional Integral Derivativo)
PLC	*Programmable Logic Controller* (Controlador Lógico Programável)
PV	*Process Variable* (Variável de Processo)
PWM	*Pulse Width Modulation* (Modulação Por Largura De Pulso)
RaaS	*Robot as a Service* (Robô como serviço)
REPL	*Read-Eval-Print Loop* (Loop de Leitura, Avaliação e Impressão)
REST	*Representational State Transfer* (Transferência Representacional de Estado)
RFID	*Radio-Frequency Identification* (Identificação por radiofrequência)
RPC	*Remote Procedure Call* (Chamada Remota de Procedimento)
RPM	Rotações Por Minuto
RTC	*Real-Time Clock* (Relógio De Tempo Real)

SCADA	*Supervisory Control and Data Acquisition* (Controle de Supervisão e Aquisição de Dados)
SFC	*Sequential Function Chart* (Sequenciamento Gráfico de Funções)
SOA	*Service Oriented Architecture* (Arquitetura Orientada a Serviço)
SOCRADES	*Service-oriented cross-layer infrastructure for distributed smart embedded systems* (Infraestrutura de camada cruzada orientada a serviços para sistemas embarcados inteligentes distribuídos)
ST	*Structured Text* (Texto Estruturado)
TA	Tecnologia de Automação
TCP	*Transmission Control Protocol* (Protocolo de Controle de Transmissão)
TI	Tecnologia da Informação
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação
UART	*Universal Asynchrounous Receiver/Transmiter* (Receptor/Transmissor Universal Assíncrono)
UDP	*User Datagram Protocol* (Protocolo de datagrama do usuário)
URL	*Uniform Resource Locator* (Localizador Padrão de Recursos)
USB	*Universal Serial Bus* (Barramento Serial Universal)
VDC	*Voltage Direct Current* (Tensão Corrente Contínua)
XML	*Extensible Markup Language* (Linguagem de Marcação Estendida)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA 12

1.1 JUSTIFICATIVA 12

1.2 OBJETIVO 15

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO 16

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17

2.1 INDÚSTRIA 4.0 17

2.2 ARQUITETURA ORIENTADA A SERVIÇOS (SOA) 19

2.2.1 Composição de Serviços 20

2.2.2 Microserviços 22

2.3 APLICAÇÕES INDUSTRIAIS USANDO SERVIÇOS 24

3 *FRAMEWORK* MOLECULER 27

3.1 *SERVICE BROKER* 30

3.2 SERVIÇO (*SERVICE*) 31

3.3 *GATEWAY* (API) 38

3.4 *TRANSPORTER* 39

3.5 REPL CONSOLE 40

4 PROPOSTA DO TRABALHO 41

4.1 MICROSERVIÇO DAQ 42

4.2 MICROSERVIÇO CONTROLE PIDPLUS 44

4.2.1 Algoritmo de Controle PIDPlus 45

4.3 MICROSERVIÇO CLP 47

4.4 APLICAÇÕES INTERNAS E EXTERNAS 48

5 DESENVOLVIMENTO DOS SERVIÇOS E RESULTADOS 51

5.1 DESENVOLVIMENTO DO MICROSERVIÇO DAQ 51

5.2 DESENVOLVIMENTO DO MICROSERVIÇO CONTROLE PIDPLUS 55

5.3 APLICAÇÃO EXTERNA DE CONTROLE DE PROCESSO USANDO SERVIÇOS DAQ E CONTROLE PIDPLUS 56

5.4 DESENVOLVIMENTO DO MICROSERVIÇO CLP 62

5.5 APLICAÇÃO INTERNA DE MONITORAMENTO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS USANDO O MICROSERVIÇO CLP 65

5.6 DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS 70

6 CONCLUSÕES **73**

REFERÊNCIAS **75**

APÊNDICES **80**

CRIAÇÃO DE UMA APLICAÇÃO INTERNA NO NODE-RED 80

6 CONCLUSÕES

O uso de arquiteturas orientadas a serviços em aplicações industriais relacionadas à Industria 4.0 é uma realidade necessária para a promoção da interoperabilidade e interação vertical de dispositivos e sistemas, além da habilitação de uma arquitetura distribuída e modular.

Este trabalhou apresentou conceitos sobre sistemas que integram as arquiteturas orientadas a serviços (SOA e MOA), bem como suas aplicações e importância na estrutura da Indústria 4.0. O uso de arquiteturas orientadas a serviços empregadas para o uso industrial tem se consolidado, despertando grande interesse em pesquisas e desenvolvimentos recentes, tendo como foco principal a promoção da interoperabilidade e interação vertical de dispositivos e sistemas, além do uso de dispositivos de forma distribuída e modular dentro de um ambiente industrial.

As funcionalidades e os benefícios de uma arquitetura industrial orientada a microserviços (MOA) voltada para aplicações no contexto da I4.0 foram discutidas. Detalhes operacionais da arquitetura e da estrutura utilizada, bem como a comunicação e composição dos serviços foram apresentados. O desenvolvimento dos microserviços e aplicações propostas neste trabalho foram apresentados, sendo que o ponto chave foi a utilização do *framework* Moleculer, que simplifica a implantação de uma arquitetura orientada a microserviços, uma vez que toda a infraestrutura computacional de SOA não precisou ser desenvolvida, como visto em trabalhos na literatura, reduzindo o tempo de desenvolvimento da arquitetura e permitindo que o foco fosse dado ao desenvolvimento dos serviços e aplicações voltadas para automação e controle.

Este trabalho discutiu a criação e uso dos microserviços DAQ, CLP e Controle PIDPlus e de aplicações de Controle e Monitoramento via orquestração dos serviços. Considerando O microserviço CLP, a possibilidade de se ter um controlador programável como um serviço em nuvem é indicada para aplicações em que não se exige determinismo e é vantajosa por não ser necessária a implantação de controladores físicos na planta. O microserviço DAQ se assemelha à operação de uma remota de I/O em rede, com a vantagem de ser programável e poder incorporar funcionalidades customizadas pra cada aplicação. O microserviço de Controle flexibiliza o desenvolvimento e aplicação de algoritmos de controle conforme a necessidade da aplicação. Nesse trabalho, o uso do algoritmo de controle PIDPlus, usado em controle via rede, se mostrou adequado para controlar as malhas de processo que se comunicam em rede através do serviço de comunicação (*transporter*). Além disso, todos os microserviços apresentaram tempo de resposta compatíveis com as aplicações de controle de processos e automação.

Dois experimentos foram realizados buscando a validação da arquitetura proposta para aplicações industriais, onde um apresentou o controle de velocidade de um motor CC implementado como serviço. Para este experimento, vários microserviços foram utilizados (DAQ, Controle, *Transporter* e *Gateway*). Os resultados operacionais demonstraram a viabilidade e o potencial das arquiteturas baseadas em serviços para suportar aplicações de automação e controle de processos no contexto da I4.0. A arquitetura MOA usada na implementação da malha de controle como um serviço provou ser vantajosa no sentido de prover desacoplamento entre os níveis de dispositivo e aplicação, além de promover interoperabilidade e interação vertical para a solução de controle de processos.

O outro experimento envolveu os microserviços CLP, *Transporter* e a aplicação de Monitoramento em aplicações de controle de processo e automação. Nesse experimento uma planta industrial virtual foi controlada e monitorada, onde foi possível verificar em tempo real a atualização do estado logico das variáveis de entradas e saídas do CLP. Também foi realizado o controle de velocidade de um motor CC utilizando o PID nativo do OpenPLC em conjunto com os microserviços, onde a resposta de velocidade do motor em relação ao ponto de ajuste, bem como o sinal da variável manipulada puderam ser monitorados através do *Dashboard*. Além do monitoramento, por meio do *Dashboard* foi possível também enviar os parâmetros para o controlador e definir o ponto de ajuste de velocidade do motor.

As aplicações apresentadas nesse trabalho mostram que a Arquitetura Orientada a Microserviços é promissora quanto ao desenvolvimento de soluções para a I4.0. Temas relacionados à segurança e redundância, que não foram abordadas nesse trabalho, oferecem possibilidades para pesquisas futuras.

REFERÊNCIAS

BANGEMANN, T. et al. State of the art in industrial automation. Industrial cloud-based cyber-physical systems. *In*: COLOMBO A. W. et al**. Industrial cloud-based cyber-physical systems**. Cham: Springer, 2014. p. 23-47. DOI: 10.1007/978-3-319-05624-1_2.

BASSI, L. Industry 4.0: Hope, hype or revolution?. *In*: INTERNATIONAL FORUM ON RESEARCH AND TECHNOLOGIES FOR SOCIETY AND INDUSTRY (RTSI), 3., 2017, Modena. **Proceedings [...]**. Piscataway: IEEE, 2017. p. 1-6. DOI: 10.1109/RTSI.2017.8065927. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8065927. Acesso em: 08 fev. 2019.

BEREMIZ. Disponível em: <http://www.beremiz.org/>. Acesso em: Janeiro, 2019.

BIGHETI J. A.; FERNANDES M. M.; RISSO S. L.; ARÃO D. P.; GODOY E. P. Controle de Processos baseado em Serviços para a Indústria 4.0. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE INSTRUMENTAÇÃO, SISTEMAS E AUTOMAÇÃO, 2019, Campinas. **Anais** [...] Campinas: GALOÁ, 2019. Disponível em: https://proceedings.science/cobisa-2019/papers/controle-de-processos-baseado-em-servicos-para-a-industria-4-0. Acesso em: 11 jul. 2019.

BIGHETI, J. A.; FERNANDES, M. M.; GODOY, E. P. Control as a service: a microservice approach to industry 4.0. *In*: WORKSHOP ON METROLOGY FOR INDUSTRY 4.0 AND IOT, 2., 2019, Naples. **Proceedings** [...]. Piscataway: IEEE, 2019. p. 438-443. DOI: 10.1109/METROI4.2019.8792918. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8792918. Acesso em: 12 ago. 2019.

BIGHETI, J. A.; RISSO, S. L.; CALDIERI, M. R.; GODOY, E. P. Proposta de arquitetura orientada a microserviços para aplicações de internet das coisas industrial. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 22, 2018, João Pessoa, **Anais** […]. João Pessoa: SWGE, 2018. Disponível em: https://plataforma.swge.com.br/PROCEEDINGS/PDF/CBA2018-0971.pdf. Acesso em: 20 jan. 2019.

BLANCHET, M. et al. **Industry 4.0 The new industrial revolution.** Munich: Roland Berger, 2014. Disponível em: http://www.iberglobal.com/files/Roland_Berger_Industry.pdf. Acesso em: 08 fev. 2019.

BORANGIU, T.; TRENTESAUX, D.; THOMAS, A.; LEITÃO, P.; BARATA, J. Digital transformation of manufacturing through cloud services and resource virtualization. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 108, p. 150-162, Jun. 2019. DOI: 10.1016/j.compind.2019.01.006. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361519300107. Acesso em: 09 set. 2019.

BUTZIN, B.; GOLATOWSKI, F.; TIMMERMANN, D. Microservices approach for the internet of things. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING TECHNOLOGIES AND FACTORY AUTOMATION, 21., 2016, Berlin. **Proceedings** [...]. Piscataway: IEEE, 2016. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/7733707. Acesso em: 10 out. 2018.

CALDIERI, M. R.; BIGHETI, J. A.; GODOY, E. P. Implementação do Modbus para aplicação em sistema de controle via rede sem fio. 2016. *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 21., 2016, Vitória. **Anais** [...]. Vitória, [*s. n.*], 2016 p.219-224. Disponível em: https://ssl4799.websiteseguro.com/swge5/PROCEEDINGS/PDF/CBA2016-0070.pdf. Acesso em: 13 mai. 2019.

CARLSSON, O.; DELSING, J.; ARRIGUCCI, F.; COLOMBO, A.W.; BANGEMANN, T.; NAPPEY, P. Migration of industrial process control systems to service-oriented architectures. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, Vol. 31, No. 2, pp. 175-198, 2018.

CHEN, Y.; DU, Z.; GARCÍA-ACOSTA, M. Robot as a service in cloud computing. Proceedings. IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SERVICE-ORIENTED SYSTEM ENGINEERING, SOSE, 5., 2010. **Proceedings** [...]. Piscataway: IEEE, 2010. p. 151–158. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/5570010. Acesso em: 14 mai. 2019.

CIAVOTTA, M.; ALGE, M.; MENATO, S.; ROVERE, D.; PEDRAZZOLI, P. A Microservice-based Middleware for the Digital Factory. Procedia Manufacturing, Vol. 11, 2017, pp. 931-938.

COLOMBO, A. W. et al. Industrial cyberphysical systems: a backbone of the fourth industrial revolution. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, Piscataway, v. 11, n. 1, p. 6–16, 2017. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7883993. Acesso em: 10 out. 2018.

COLOMBO, A. W.; KARNOUSKOS, S.; BANGEMANN, T. Towards the next generation of industrial Cyber-Physical Systems. *In:* COLOMBO, A. W. et al. (ed.). **Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems**. Cham: Springer International Pub, 2014. p. 1–22.

DELSING, J. et al. A migration approach towards a SOA-based next generation process control and monitoring. *In*: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY IECON, 37., 2011, Melbourne. **Proceedings** [...]. Piscataway, IEEE, 2011. p. 4472–4477. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/6120045 Acesso em: 10 out. 2018.

DUSTDAR, S.; PAPAZOGLOU, M. P. Services and Service Composition – An introduction (Services und Service Komposition – Eine Einführung). **it - Information Technology**, Muenchen, v. 50, n. 2, p. 86–92, 2008. Disponível em: https://pdfs.semanticscholar.org/422b/e74a233ca10c0fd93e453da06cda22fed7a8.pdf . Acesso em: 15 out. 2018.

ESPÍ-BELTRAN, J.V.; GILART-IGLESIAS, V.; RUIZ-FERNANDEZ, D. **Enabling distributed manufacturing resources through SOA**: The REST approach. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 46, 2017, pp. 156-165.

GIRBEA, A.; SUCIU, C.; NECHIFOR, S.; SISAK, F. Design and Implementation of a Service-Oriented Architecture for the Optimization of Industrial Applications. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, vol. 10, no. 1, pp. 185-196, Feb. 2014.

HEGAZY, T.; HEFEEDA, M. Industrial automation as a cloud service. **IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems**, Piscataway, v. 26, n. 10, p. 2750–2763, 2015. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/6908023. Acesso em: 22 out. 2018.

IMC-AESOP Project. **IMC-AESOP Project**, 2011. Disponível em: http://www.imcaesop.eu. Acesso em: Julho, 2019.

INNERBICHLER, I.; GONUL, S.; DAMJANOVIC-BEHRENDT, V.; MANDLER, B.; STROHMEIER, F. NIMBLE collaborative platform: Microservice architectural approach to federated IoT. Global Internet of Things Summit (GIoTS), Geneva, 2017, pp. 1-6.

JAMMES, F. et al. Promising technologies for SOA-based industrial automation systems. *In:* COLOMBO, A. W. et al. (ed.). **Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems**. Cham: Springer International Pub, 2014. p. 89–109.

JAZDI, N. Cyber physical systems in the context of Industry 4.0. *In:* IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATION, QUALITY AND TESTING, ROBOTICS, AQTR, 2014, Cluj-Napoca. **Proceedings** [...]. Piscataway: IEEE, 2014. p. 1–4. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6857843. Acesso em: 24 nov. 2018

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

KARNOUSKOS, S.; COLOMBO, A.W.; BANGEMANN, T.; MANNINEN, K.; CAMP, R.; TILLY, M.; SIKORA, M.; JAMMES, F.; DELSING, J.; ELIASSON, J.; NAPPEY, P.; HU, J.; GRAF, M. The IMC-AESOP **Architecture for Cloud-Based Industrial Cyber-Physical Systems**. In: Colombo A. et al. (eds) Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems. Springer, Cham, 2014.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A. A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, v. 3, p. 18–23, 2015.

LEITÃO, P.; COLOMBO, A.W.; KARNOUSKOS, S. **Industrial automation based on cyber-physical system Technologies:** Prototype implementations and challenges. Computers in Industry. Vol. 81, pp. 11-25, 2016.

LEWIS, J.; FOWLER, M. **Microservices**: a definition of this new architectural term. Chicago: martinFowler.com, 2014. Disponível em: https://martinfowler.com/articles/microservices.html. Acesso em: 20 jan. 2019

LIAN, F. L.; MOYNE, J.; TILBURY, D. Network design consideration for distributed control systems. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 10, n. 2, p. 297, 2002

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.

MOLECULER. **What is moleculer?**. [*S. l.*], c2016-2019. Disponível em: https://moleculer.services/docs/0.13/. Acesso em: 5 abr. 2018.

MORAES, E.C. **Desenvolvimento de padrões de interfaces para integração de sistemas heterogêneos na manufatura**. 247 f. Tese de Doutorado, Engenharia Industrial, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017.

MOREIRA, P. F. M.; BEDER, D. M. Desenvolvimento de aplicações e microserviços: um estudo de caso. **Revista T.I.S.**, v. 4, n. 3, p. 209–215, 2016.

NEWMAN, S. **Building Microservices**. Sebastopol: O'Reilly Media, 2015.

NIKOLAIDIS, P.; DIDIC, A.; MUBEEN, S.; PEI-BREIVOLD, H.; SANDSTRÖM, K.; BEHNAM, M. Applying mitigation mechanisms for cloud-based controllers in industrial IoT applications. *In*: Internet-of-Things Symposium IoT Symposium, 15, 2015, Amsterdam, **Proceedings** [...]. Amsterdam: [s. n], 2015. Disponível em: http://www.es.mdh.se/pdf_publications/4023.pdf. Acesso em: 8 ago. 2018.

NPM. **PM2**, 2020. Disponível em: https://www.npmjs.com/package/pm2. Acesso em: 19 jul. 2020.

OLLINGER, L.; ABDO, A.; ZÜHLKE, D.; HEUTGER, H. SOA-PLC – Dynamic Generation and Deployment of Web Services on a Programmable Logic Controller. *In*: IFAC World Congress, 19, 2014, Cape Town, **Proceedings** […]. Cape Town: Elsevier Ltd, 2014. p 2622-2627, DOI: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.02189. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016420057. Acesso em: 10 out. 2018.

OPEN PLC. 2019. Disponível em: https://www.openplcproject.com. Acesso em: 5 maio 2019.

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. DOI: 10.1016/j.emj.2008.04.005. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263237308000431. Acesso em: 16 ago. 2018.

PISCHING, M. A. **Arquitetura para descoberta de equipamentos em processos de manufatura com foco na Indústria 4.0**. 2018. 189 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3152/tde-05032018-133720/publico/MarcosAndrePischingCorr18.pdf. Acesso em: 20 jan. 2019.

RAJKUMAR, R.; LEE, I.; L.; SHA, L.; STANKOVIC, J. Cyber-physical systems: The next computing revolution. *In*: DESIGN AUTOMATION CONFERENCE, 2010, Anaheim, **Proceedings** […]. Anaheim: IEEE, 2014. p. 731-736. DOI: 10.1145/1837274.1837461. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/5523280. Acesso em: 22 fev. 2019.

RICHARDS, M. **Microservices vs. service- oriented architecture**. Sebastopol: O'Reilly Media, 2016.

SAUTER, Thilo et al. The Evolution of Factory and Building Automation. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, Piscataway, v. 5, n. 3, p.35-48, set. 2011. DOI: 10.1109/mie.2011.942175. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6042563. Acesso em: 22 mai. 2019.

SHENG, Quan Z. et al. Web services composition: A decade's overview. **Information Sciences**, Amsterdam: Elsevier BV, v. 280, p .218-238, Out. 2014. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2014.04.054. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025514005428. Acesso em: 22 mai. 2019.

SISINNI, Emiliano et al. Industrial internet of things: challenges, opportunities, and directions. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, Piscataway, v. 14, n. 11, p. 4724-4734, 2018. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/tii.2018.2852491. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/8401919 Acesso em: 16 ago. 2018.

SONG, J. et al. Improving PID control with unreliable communications. *In*: ISA EXPO, 2006, Houston, **Proceedings** [...]. Durham: ISA, 2006. p. 105–116. Disponível em: https://www.automation.com/pdf_articles/10_improving_pid.pdf.Acesso em: 22 abr. 2019

SOUIT, S.; FATTORI, C. C.; JUNQUEIRA, F.; D. J. S. FILHO, D. J. S.; MIYAGI, P, E. Orchestrating dispersed productive systems. CONFERENCE ON EMERGING TECHNOLOGIES & FACTORY AUTOMATION (ETFA), 18., 2013, Cagliari, **Proceedings** […]. Cagliari: IEEE, 2013. p. 1-4. DOI: 10.1109/ETFA.2013.6648132. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6648132. Acesso em: 22 abr. 2019.

STANKOVIC, J. A. Research directions for the internet of things. **IEEE Internet of Things Journal**, Piscataway, v. 1, n. 1, p. 3–9, 2014. DOI: 10.1109/JIOT.2014.2312291. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/6774858. Acesso em: 05 jun. 2019.

THEORIN, A.; HAGSUND, J.; JOHNSSON, C. Service orchestration with OPC UA in a graphical control language. *In:* **IEEE EMERGING TECHNOLOGY AND FACTORY AUTOMATION (ETFA)**, 2014, Barcelona. **Proceedings** [...]. Piscataway: IEEE, 2014. p.1-

6. DOI: 10.1109/etfa.2014.7005351. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7005351. Acesso em: 17 mai. 2019.

UNIPI. **UniPi Technology**. Disponível em: <https://www.unipi.technology/>. Acesso em: 12 out. 2020.

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. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, [s.l.], v. 11, n. 1, p.17-27, mar. 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/mie.2017.2649104.

WU, D.; GREER, M. J.; ROSEN, D. W.; SCHAEFER, D. Cloud manufacturing: Strategic vision and state-of-the-art. **Journal Of Manufacturing Systems**, [s.l.], v. 32, n. 4, p.564-579, out. 2013. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.jmsy.2013.04.008.

XIAO, Z.; WIJEGUNARATNE, I.; QIANG, X. Reflections on SOA and microservices. INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENTERPRISE SYSTEMS: ADVANCES IN ENTERPRISE SYSTEMS, 4., 2016, Melbourne, **Proceedings** […]. Melbourne: IEEE, 2016 p. 60–67. DOI: 10.1109/ES.2016.14.

ZUEHLKE, D. SmartFactory: towards a factory-of-things. **Annual Reviews In Control**, Amsterdam, v. 34, n. 1, p. 129-138, Abr. 2010. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2010.02.008. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578810000143. Acesso em: 17 mai. 2019.

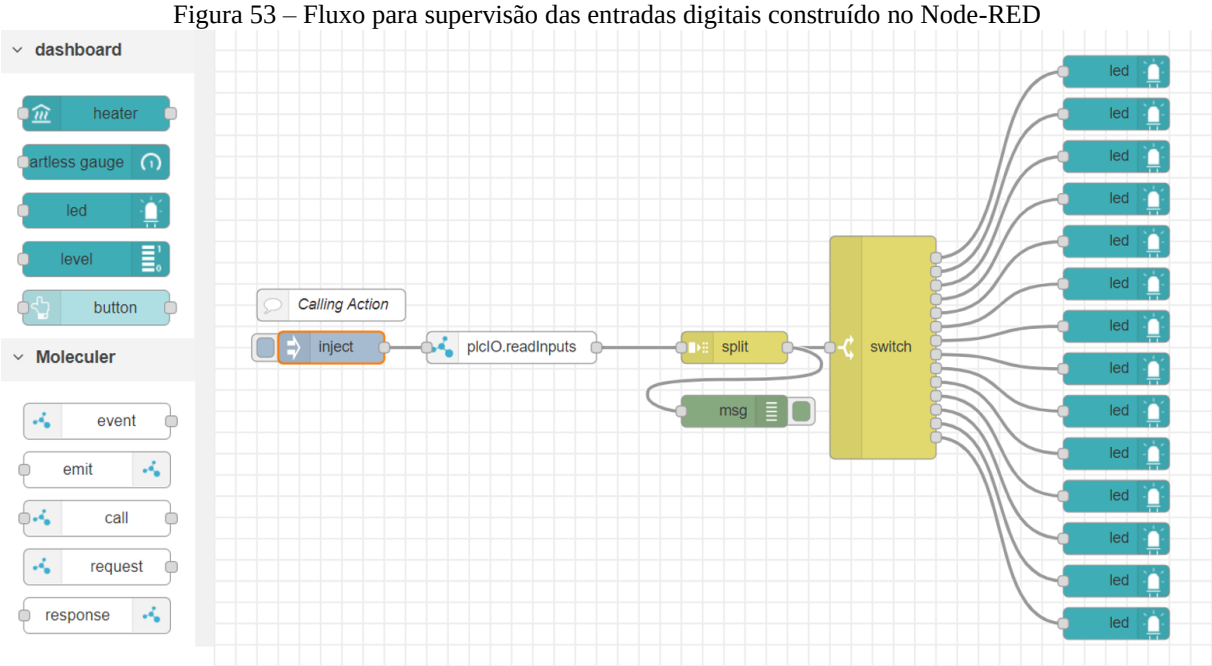
APÊNDICES

Criação de uma Aplicação Interna no Node-RED

Três bibliotecas foram instaladas no Node-RED para a construção da Aplicação de Monitoramento. A primeira contém ferramentas especificas para a construção de *dashboard* denominada *node-red-dashboard*. A segunda contém blocos com funções do *framework* Moleculer denominada *node-red-contrib-moleculer*. A terceira é um complemento para o desenvolvimento do *dashboard*, denominada *node-red-contrib-ui-led*, que simula LEDs que podem ser configurados com diversas cores, indicando o estado lógico de uma variável digital.

A Aplicação de Monitoramento basicamente faz requisições ao microserviço CLP em ciclos predeterminados para obter os dados das variáveis e demonstrá-las graficamente. A Figura 53 ilustra o fluxo construído no Node-RED para o sistema de supervisão das entradas digitais do microserviço CLP.

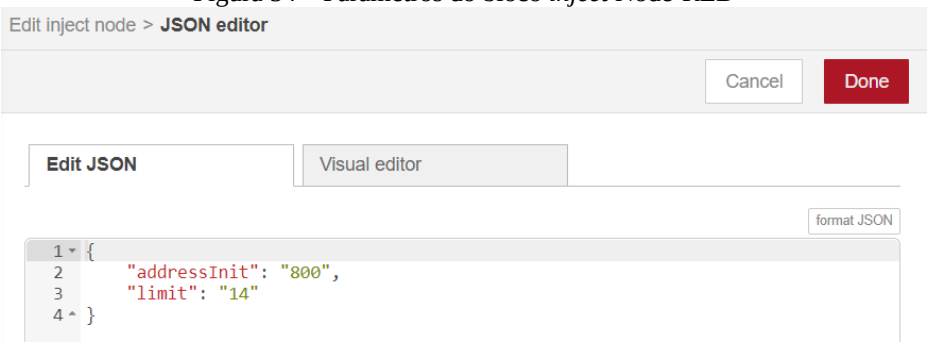
Figura 53 – Fluxo para supervisão das entradas digitais construído no Node-RED



Fonte: Autor

O bloco *inject* dispara as requisições ao microserviço CLP. Ele pode ser configurado para que dispare somente quando acionado, ou em intervalos de tempo, como o caso aqui apresentado. Nesse bloco são inseridos os parâmetros que direcionam ao endereço de monitoramento das entradas digitais do OpenPLC pelo protocolo Modbus TCP. Esses parâmetros são configurados no campo de edição da mensagem (*Payload*) do bloco *inject* em formato JSON, como é apresentado na Figura 54.

Figura 54 – Parâmetros do bloco *inject* Node-RED

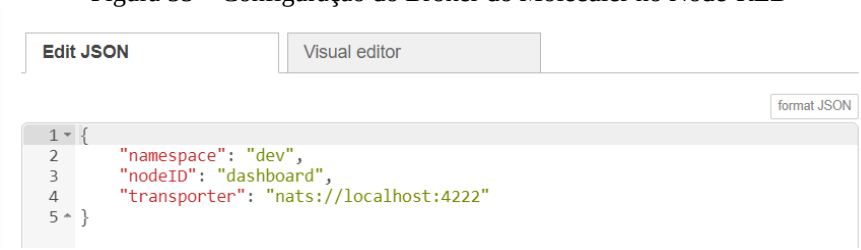


Fonte: Autor

O termo “addressInit” determina o endereço inicial de leitura dos dados das entradas do OpenPLC, e o termo “limit” define a quantidade de endereços a serem lidos a partir do endereço inicial. Isso quer dizer que, a leitura dos dados se inicia no endereço %IX800.0 e termina no endereço %IX800.13, percorrendo, portanto, 14 endereços. É importante observar que os endereços utilizados para a leitura dos dados transmitidos pelo protocolo Modbus TCP no OpenPLC iniciam a partir de 800.0.

O bloco *call* do Moleculer é responsável por fazer chamadas internas aos microserviços. Portanto, através desse método acessamos a rota da ação desejada, que é a ação de leitura das entradas digitais do OpenPLC, de acordo com a Figura 53. Nesse bloco também são configurados os parâmetros do broker para a construção da aplicação, como mostra a Figura 55.

Figura 55 – Configuração do Broker do Moleculer no Node-RED



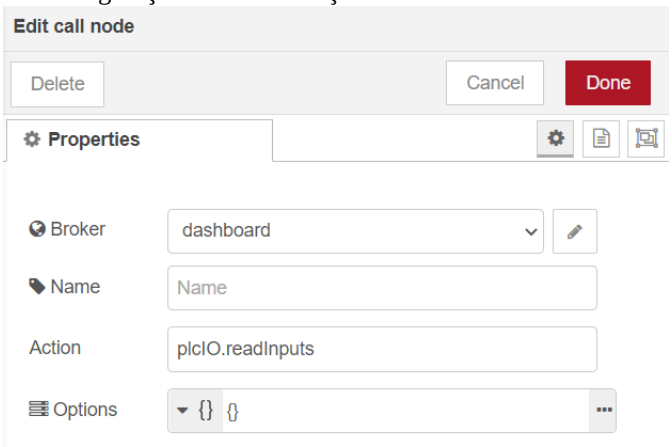
Fonte: Autor

Na configuração do broker “namespace” é o espaço de nome para segmentar os nós na mesma rede (por exemplo: "desenvolvimento", "preparo", "produção"). O termo “*nodeID*” pode possuir qualquer identificação. É importante que essa identificação dos nós nunca seja igual à de outro microserviço, pois isso causaria conflito na operação do sistema.

O termo "*Transporter*" determina qual o tipo de sistema de envio de mensagens será utilizado. Figura 55 é indicado que o *Transporter* é o NATS e a porta de comunicação padrão é a 4222.

Para realizar a leitura das entradas digitais do microserviço CLP é necessário acessar a ação readInputs, portanto, no campo *Action* do bloco *call*, deve ser inserido o nome do microserviço seguido da ação desejada, conforme indica a Figura 56.

Figura 56 – Configuração de acesso à ações do Moleculer através do Node-RED



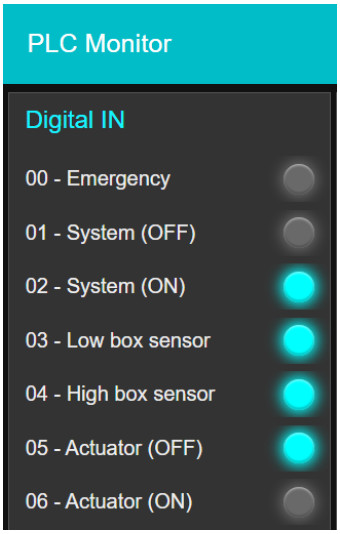
Fonte: Autor

A resposta enviada pela ação readInputs retorna um *array*, contendo os valores das entradas de 0 a 13 do microserviço CLP. O bloco split tem a função de dividir os dados contidos no *array* disponibilizado pelo microserviço CLP. Isso é necessário nessa aplicação para demonstrar o estado lógico das entradas do OpenPLC individualmente em um *dashboard*, através da representação gráfica de LEDs.

O bloco switch está conectado após o bloco split. O switch tem a função de distribuir os dados recebidos do bloco split de forma separada, um dado em cada saída. Portanto os 14 dados vindos do *array* disponibilizado pelo microserviço CLP, dividido pelo bloco split, serão distribuídos 1 em cada saída do switch, sendo assim possível exibir o estado logico de cada entrada do OpenPLC separadamente.

Os blocos led são utilizados para representar graficamente o estado das variáveis de entrada do microserviço CLP no *dashboard*. Esses LEDs gráficos podem ser configurados com diversas cores, que são definidas seguindo o padrão de formatação CSS, sendo uma cor para cada nível lógico. A Figura 57 apresenta o *dashboard* criado para a leitura das entradas do microserviço CLP.

Figura 57 – *Dashboard* desenvolvido no Node-RED



Fonte: Autor