



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

Aplicação da Tecnologia IO-link como Base para a Indústria 4.0 no Contexto de uma Siderúrgica

Leonardo Pessoa Freitas e Silva

João Monlevade, MG
2019

Leonardo Pessoa Freitas e Silva

**Aplicação da Tecnologia IO-link como Base
para a Indústria 4.0 no Contexto de uma
Siderúrgica**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Márcio Feliciano Braga

**Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2019**

S586a Silva, Leonardo Pessoa Freitas e.
Aplicação da tecnologia IO-link como base para a Indústria 4.0 no contexto de uma siderúrgica [manuscrito] / Leonardo Pessoa Freitas e Silva. - 2019.

33f.:

Orientador: Prof. Dr. Márcio Feliciano Braga.
Coorientador: Lucas Roger Corrêa.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Automação industrial. 2. Indústria . 3. Siderurgia. 4. Comunicação e tecnologia. I. Braga, Márcio Feliciano. II. Corrêa, Lucas Roger. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 681.5

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Leonardo Pessoa Freitas e Silva

**Aplicação da Tecnologia IO-link como Base
para a Indústria 4.0 no Contexto de uma
Siderúrgica**

Membros da banca

Márcio Feliciano Braga - Doutorado - Universidade Federal de Ouro Preto
Lucas Roger Corrêa - Graduação - Empresa ArcelorMittal
Marcelo Moreira Tiago - Doutorado - Universidade Federal de Ouro Preto
Wendy Yadira Eras Herrera - Doutorado - Universidade Federal de Ouro Preto

Versão final
Aprovado em 18 de dezembro de 2019.

De acordo

Prof. Dr. Márcio Feliciano Braga



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Feliciano Braga, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2019, às 16:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0029386** e o código CRC **FDD7A929**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.204099/2019-22

SEI nº 0029386

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: - www.ufop.br

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por aumentar a minha fé nos momentos de dúvida e fraqueza, por me manter firme nos momentos de insegurança. Aos meus pais, Vicente de Paula e Maria Inês, por todo apoio, amor e carinho. Vocês são o motivo principal dessa conquista, minha gratidão eterna por tudo. Aos meus padrinhos, sou grato por todo amor e carinho, além de todo suporte prestado ao longo da minha caminhada. Vocês são a razão pela qual o caminho até aqui tornou-se mais fácil. Dedico também a todos os outros familiares e amigos que estiveram sempre por perto, me ajudando, incentivando e compartilhando momentos.

Agradecimentos

Agradeço o professor orientador Márcio Feliciano Braga por todos os ensinamentos transmitidos durante o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço o meu colega de trabalho e co-orientador Lucas Roger Corrêa, por todo conhecimento e experiências compartilhadas.

Agradeço também a toda equipe do departamento de manutenção elétrica do alto forno, por me proporcionar uma experiência engrandecedora ao longo dos últimos anos.

"Cada sonho que você deixa pra trás, é um pedaço do seu futuro que deixa de existir"
– Steve Jobs

Resumo

Os avanços nas tecnologias de informação e a incorporação da digitalização à atividade industrial resultaram no conceito da Indústria 4.0, em referência ao que seria a Quarta Revolução Industrial. A Indústria 4.0 é considerada um novo estágio industrial no qual a integração dos processos de manufatura vertical e horizontal e a conectividade de produtos podem ajudar as empresas a alcançar um nível industrial mais alto. No entanto, pouco se sabe sobre a forma com que as indústrias veem a contribuição potencial das tecnologias relacionadas ao setor 4.0 para o desempenho industrial, especialmente em países emergentes. Nesse contexto, as tecnologias e padrões de comunicação apropriados desempenham um papel vital para realizar as múltiplas melhorias no processo de produção. Um desses padrões é o IO-Link. Neste trabalho discute-se, a partir das aplicações desenvolvidas em uma usina siderúrgica, como a utilização da tecnologia IO-Link pode ser capaz de suprir a demanda crescente por mais flexibilidade nas soluções de automação e, ao mesmo tempo, servir como base para a aplicação dos conceitos da Indústria 4.0. Além disso, outro objetivo deste trabalho é apresentar, com maiores detalhes, o denominador comum desses aprimoramentos, a coleta e análise de dados, ou seja, como essas informações são cruciais para a Indústria 4.0, trazendo novas vantagens e desafios.

Palavras-chave: Indústria 4.0, IO-Link, Siderurgia.

Abstract

The advances in information technologies and the incorporation of the digitalization to the industrial activity resulted in the concept of Industry 4.0, in reference to what would be the Fourth Industrial Revolution. Industry 4.0 is considered a new industrial stage in which vertical and horizontal manufacturing process integration and product connectivity can help companies to achieve higher industrial performance. However, just few information is available about how industries see the potential contribution of industry-related technologies 4.0 to industrial performance, especially in emerging countries. In this context, appropriate communication standards and technologies play a vital role to perform the manifold potential improvements in the production process. One of these communication standards is IO-Link. This work discusses how the use of IO-Link technology can be able to supply the growing demand for more flexibility in automation solutions and, at the same time, to serve as the basis for Industry 4.0 concept application. Additionally, another objective of this work is to present, in more details, the common denominator of these improvements, data collection and analysis, that is, how this information is crucial for Industry 4.0, bringing new advantages and challenges.

Keywords: Industry 4.0, IO-Link, Siderurgy.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Cronologia das Revoluções Industriais.	5
Figura 2 – Os pilares da Indústria 4.0.	6
Figura 3 – Migração da pirâmide clássica da automação para o modelo dos CPS.	9
Figura 4 – IO-Link: definição dos pinos.	10
Figura 5 – Exemplo de arquitetura de um sistema IO-Link.	11
Figura 6 – Característica de detecção do sensor de proximidade IO-Link.	13
Figura 7 – Sequência do processo de produção da US.	15
Figura 8 – Representação dos circuitos do sistema de refrigeração.	17
Figura 9 – Topologia do Circuito A do sistema de refrigeração.	19
Figura 10 – Topologia do Circuito B do sistema de refrigeração (as configurações dos circuitos C e D são idênticas).	19
Figura 11 – Topologia do Circuito Secundário do sistema de refrigeração.	20
Figura 12 – Comparativo entre as fontes convencionais e em IO-Link.	24
Figura 13 – Visão geral do painel com as novas fontes instaladas.	24
Figura 14 – Fonte de alimentação e acessório para comunicação em IO-Link.	25
Figura 15 – Mestre IO-Link Balluff BNI006A.	25
Figura 16 – AOI do Mestre IO-Link.	26
Figura 17 – <i>Controller Tags</i> do Mestre IO-Link.	27
Figura 18 – AOI do Fonte IO-Link.	27
Figura 19 – <i>Controller Tags</i> da fonte IO-Link.	28

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivos Gerais	2
1.1.2	Objetivos Específicos	2
1.2	Justificativa e Relevância	3
2	REFERENCIAL TEÓRICO	5
2.1	Indústria 4.0	5
2.1.1	Internet of Things (IoT)	7
2.1.2	Big Data	7
2.1.3	Sistemas Integrados	8
2.2	IO-Link	9
2.2.1	Descrição do Sistema	10
2.2.2	IO-Link na Hierarquia de Automação	11
2.2.3	Ambiente IO-Link	12
2.2.4	IO-Link para Manutenção Preditiva	12
3	DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DA APLICAÇÃO	14
3.1	Empresa em Estudo	14
3.1.1	Localização e Histórico	14
3.1.2	Departamento em Análise	15
3.2	Aplicações Desenvolvidas	16
3.2.1	Primeira Aplicação: Sistema de Refrigeração	16
3.2.2	Segunda Aplicação: Injeção de Carvão Pulverizado — ICP	22
4	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
4.1	Recomendações para trabalhos futuros	31
	REFERÊNCIAS	32

1 Introdução

Na última década, a Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) e os Sistemas Ciber-Físicos (CPS, do inglês *Cyber Physical Systems*) tornaram-se difundidos e causaram impacto em muitos aspectos da vida cotidiana: conceitos como *Smart Home*, *Smart Car* e *Smart City* também se tornaram familiares mesmo a usuários não técnicos. A integração de sistemas embarcados, o acesso onipresente à Internet e as comunicações M2M (do inglês, *Machine-to-Machine*) abriram caminho para a introdução de IoT e CPS também em ambientes industriais, sob as formas da Internet Industrial das Coisas (IIoT, do inglês *Industrial Internet of Things*) e dos Sistemas de Produção Ciber-Físicos (CPPS, do inglês *Cyber Physical Production Systems*). Como consequência, a Quarta Revolução Industrial, ou seja, a Indústria 4.0, está rapidamente remodelando os processos industriais tradicionais.

A Indústria 4.0 é considerada um novo estágio industrial no qual a integração dos processos de manufatura vertical e horizontal e a conectividade de produtos podem ajudar as empresas a alcançar um desempenho mais alto. Entretanto, algumas pesquisas indicam que os países emergentes, como o Brasil, apresentam uma baixa maturidade no que diz respeito à automação e uso de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC). Dessa forma, pouco se sabe sobre a forma com que as indústrias veem a contribuição potencial das tecnologias relacionadas ao setor 4.0 para o desempenho industrial, especialmente em países emergentes.

Nesse contexto, as tecnologias e padrões de comunicação apropriados desempenham um papel vital para realizar as múltiplas melhorias no processo de produção. Um desses padrões é o IO-Link. Ele é visto como uma tecnologia capaz de realizar serviços em rede altamente descentralizada, oferecendo capacidade total de comunicação vertical dos sensores e atuadores do chão de fábrica até o Planejamento de Recursos da Empresa (ERP, do inglês *Enterprise Resource Planning*) via SCADA (do inglês, *Supervisory Control and Data Acquisition*) / HMI (do inglês, *Human-machine interface*) e o MES (do inglês, *Manufacturing Execution Systems*) e, horizontalmente, por meio das várias plataformas *fieldbus* com base em um padrão de comunicação estabelecido internacionalmente.

Neste trabalho discute-se como a utilização da tecnologia IO-Link pode ser capaz de suprir a demanda crescente por mais flexibilidade nas soluções de automação e, ao mesmo tempo, servir como base para a aplicação dos conceitos da Indústria 4.0 no contexto de uma usina siderúrgica. Nessa vertente, a iniciativa foi mapear os processos atuais de um dos departamentos da usina, a fim de encontrar oportunidades de melhoria que poderiam ser supridas com a utilização da tecnologia IO-Link. No entanto, para o desenvolvimento do trabalho, foram escolhidos dois cenários distintos de aplicação com o objetivo de apresentar uma abordagem completa a respeito das características e vantagens da tecnologia.

A estrutura do trabalho está dividida em 5 capítulos distintos, mas que convergem para os mesmos objetivos propostos. No primeiro capítulo é realizada a caracterização cronológica do processo de evolução da indústria e são apresentados os principais conceitos sobre em que consiste a Quarta Revolução Industrial, também conhecida como Indústria 4.0. No segundo capítulo, são apresentadas as definições e características da tecnologia IO-Link a fim de trazer o conhecimento necessário para a sua utilização. No terceiro capítulo, descreve-se o procedimento metodológico utilizado e abordam-se as principais características das pesquisas realizadas, como também os procedimentos utilizados. A conceituação do processo siderúrgico é realizada no quarto capítulo, apresentado para criar um panorama sobre o tipo de atividade industrial que envolve a dinâmica deste trabalho. Por fim, no quinto e último capítulo, são descritas as aplicações desenvolvidas para os dois cenários diferentes, apontando os resultados obtidos em cada um dos casos e a viabilidade da utilização da tecnologia IO-Link.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

Propor a utilização da tecnologia IO-Link em processos do departamento de redução, mais precisamente no setor do alto forno de uma usina siderúrgica, a fim de trazer melhorias aos sistemas e atender aos requisitos base da Indústria 4.0. Para tal proposta, pretende-se apresentar dados e informações que permitam, a partir de um embasamento técnico, a verificação de viabilidade da sua aplicação.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Mapear o sistema atual do alto forno, identificando as limitações dos processos e apresentando oportunidades de melhoria.
- Aplicar a tecnologia IO-Link em partes dos processos do alto forno a fim de verificar a viabilidade de sua aplicação no contexto de uma siderúrgica.
- A partir da coleta de dados e informações necessárias, realizar um estudo comparativo entre os resultados obtidos pelo modelo em que se utiliza a tecnologia IO-Link e o modelo convencional.
- Apresentar uma metodologia que aborde a forma com que esses novos dados obtidos podem ser levados a níveis superiores de forma autônoma, aproximando-se dos conceitos da Indústria 4.0.

1.2 Justificativa e Relevância

As tecnologias digitais que caracterizam a nova fase industrial, conhecida como Indústria 4.0, tiveram início em países desenvolvidos, como a Alemanha, que atualmente lideram a difusão do conceito (KAGERMANN *et al.*, 2013). Uma característica importante desses países, que possibilitou a implantação dessas tecnologias de forma consistente, foi a eficiência dos estágios industriais anteriores no que diz respeito à automação e ao uso da TIC, dois conceitos da terceira revolução industrial que convergem para a Indústria 4.0. Quando analisam-se os países emergentes, como o Brasil, o que se percebe é uma baixa maturidade desses estágios anteriores, os quais acabam enfrentando uma lacuna importante para a adoção da Indústria 4.0 (DALENOGARE *et al.*, 2018).

O desenvolvimento da Indústria 4.0 no Brasil envolve desafios que vão desde os investimentos em equipamentos que incorporem essas tecnologias, à adaptação de *layouts*, adaptação de processos e das formas de relacionamento entre empresas ao longo da cadeia produtiva, criação de novas especialidades e desenvolvimento de competências, entre outras (CNI, 2016). Analisando uma pesquisa realizada pela Confederação Nacional das Indústrias — CNI (2016), torna-se notável que o conhecimento da indústria brasileira sobre tecnologias digitais e a sua incorporação à produção, pré-condições para avanço da Indústria 4.0, ainda é pouco difundido. A pesquisa, realizada com um total de 2225 empresas, mostrou que 42% desconhecem a importância das tecnologias digitais para a competitividade da indústria e, além disso, 52% não utilizam nenhuma tecnologia digital em uma lista de 10 opções apresentadas.

Segundo Purdy e Davarzani (2015), a implementação das tecnologias ligadas à IoT — um dos pilares da nova era — nos diversos setores da economia deverá impactar o PIB brasileiro em aproximadamente US\$ 39 bilhões até 2030. Considerando que o país crie condições para acelerar a absorção das tecnologias relacionadas, o que depende de melhorias no ambiente de negócios, na infraestrutura, programas de difusão tecnológica, aperfeiçoamento regulatório, entre outros, o ganho pode alcançar até US\$ 210 bilhões. Outro dado importante, apresentado pela Chui Peter Bisson e Aharon (2015) é que, até 2025, os processos relacionados à Indústria 4.0 poderão reduzir custos de manutenção de equipamentos entre 10% e 40%, reduzir o consumo de energia entre 10% e 20% e aumentar a eficiência do trabalho entre 10% e 25%.

De acordo com as informações e os dados apresentados anteriormente, percebe-se a importância e a necessidade de adaptação, por parte das empresas em geral, às mudanças impostas pelo mercado e pelas transformações das gerações ao longo do tempo. Portanto, as novas tecnologias digitais aparecem para atender aos requisitos da Indústria 4.0, garantindo mais rapidez, flexibilidade e eficiência aos processos. Com a utilização dos dispositivos habilitados em IO-Link, além de aumentar a quantidade de informações obtidas do sistema, é possível transportar dados por todo o processo de fabricação, trazendo maior benefício em termos de desenvolvimento de produção e engenharia.

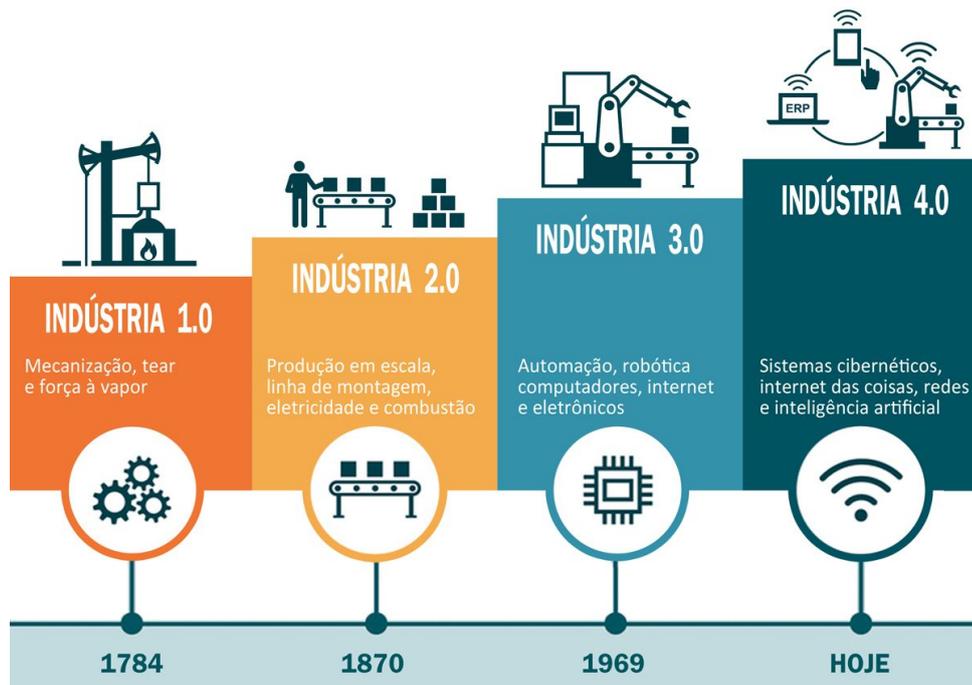
Por meio da comunicação IO-Link, por exemplo, os operadores podem ser alertados com antecedência sobre a necessidade de limpeza de um sensor, antes mesmo que ocorra uma falha. Além disso, com o IO-Link, os usuários também podem rastrear o tempo de execução do sensor para estimar a necessidade de manutenção ou substituição, para que os problemas possam ser resolvidos durante uma parada programada de manutenção. Os dados do dispositivo também podem ser registrados para análise de longo prazo, incluindo cálculos de eficiência global como o OEE (do inglês, *Overall Equipment Effectiveness*).

2 Referencial Teórico

2.1 Indústria 4.0

As três primeiras Revoluções Industriais foram caracterizadas por inovações tecnológicas que visavam melhorar a eficiência da produção: a Primeira Revolução Industrial foi desencadeada com a introdução de equipamentos de manufatura mecânica no final do século XVIII, quando máquinas revolucionaram a forma como os bens eram feitos; a eletricidade e as linhas de montagem permitiram a produção em massa na Segunda Revolução Industrial que começou por volta da virada do século XX; a Terceira Revolução Industrial, no início dos anos 70, empregou a eletrônica e a TIC para alcançar uma maior automação dos processos de fabricação. A introdução da automação de controle e dos Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) impulsionaram a produção da fábrica (KAGERMANN *et al.*, 2013; PILLONI, 2018). A Quarta Revolução Industrial ou Indústria 4.0, como é conhecida, é entendida como um novo estágio industrial em que se tem uma interação entre sistemas de operação de fabricação e TIC formando os CPS (DALENOGARE *et al.*, 2018). A Figura 1 apresenta um diagrama que representa a evolução ao longo do tempo do cenário industrial assim como as características que marcam cada época.

Figura 1 – Cronologia das Revoluções Industriais.



Fonte – Retirado de Netscan (2019).

Indústria 4.0 é uma iniciativa estratégica desenvolvida pelo governo alemão por meio de um programa chamado “*High-Tech Strategy 2020*” (KAGERMANN *et al.*, 2013), segundo o qual as tecnologias baseadas na *Internet* são usadas para melhorar todos os processos industriais, da fabricação à distribuição, das vendas ao pós-venda (PILLONI, 2018). Outros países também criaram programas para melhorar o desenvolvimento e adoção das tecnologias da Indústria 4.0. Nos Estados Unidos, foi estabelecida a “*Advanced Manufacturing Partnership*”, na China, o “*Made in China 2025*” e, na França, o “*La Nouvelle France Industrielle*” (DALENOGARE *et al.*, 2018). No Brasil, o programa foi chamado de “Rumo à Indústria 4.0” criado pela Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) juntamente com outras instituições e pelas iniciativas do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC) (ABDI, 2017).

As inovações tecnológicas que modelam a indústria avançada atualmente têm em sua base novos processos digitais, altamente integrados e intensivos em automação. Em torno desse tripé, diferentes tecnologias com origens e funções diversas, interagem e se agregam em blocos que podem ser classificados de acordo com suas relações funcionais (ARBIX *et al.*, 2017). Esse enlace permite que as empresas tenham processos flexíveis de manufatura e analisem grandes quantidades de dados em tempo real, melhorando a tomada de decisões estratégicas e operacionais (PORTER; HEPPELMANN, 2015). A Figura 2 apresenta algumas dessas tecnologias, caracterizadas como os pilares dessa nova fase, que ajudaram a impulsionar a evolução da Indústria 4.0.

Figura 2 – Os pilares da Indústria 4.0.



Fonte – Adaptado de Pollux (2018).

2.1.1 Internet of Things (IoT)

Grandes avanços nos Sistemas Microeletromecânicos (MEMS) impulsionaram a criação de dispositivos embarcados, como sensores e atuadores. A capacidade de comunicação desses dispositivos os transformaram em objetos inteligentes de tal maneira que conseguem interagir com o mundo virtual. Desse modo, tem-se boas razões para considerar esses objetos como a “base da internet futura”, ao invés de meros complementos para as redes de comunicação atuais. A internet resultante agora é chamada IoT (TEKLEMARIAM *et al.*, 2013).

Quando se discute o conceito da IoT, percebe-se que alguns estudos, realizados há algumas décadas, abordavam características que a definiam. O fato é que devido às limitações existentes, como por exemplo em redes sem fio, *hardwares*, sensores e equipamentos, a IoT não recebeu atenção suficiente no início. Com o avanço constante dessas tecnologias, agora a IoT poderia fornecer uma oportunidade promissora de construir sistemas e aplicativos industriais poderosos com infraestrutura de informação baseadas na Internet (TAO *et al.*, 2014).

A IoT representa um novo paradigma tecnológico que engloba máquinas e dispositivos capazes de interagir entre si. O seu valor verdadeiro para empresas pode ser totalmente percebido quando os dispositivos conectados conseguem comunicar entre si e, além disso, se integram a sistemas gerenciados por fornecedores, sistemas de suporte ao cliente e aplicativos de análise e gerenciamento de informações (*Business Intelligence* e *Business Analytics*) (LEE; LEE, 2015).

2.1.2 Big Data

O potencial das novas tecnologias para impactar a gestão de organizações, inclusive nos níveis mais altos, tem sido notado por muitos estudiosos. Um exemplo claro desse efeito é o papel desafiador desempenhado pelo “Big Data” para diretores e tomadores de decisão. O aumento súbito de dados como uma nova fonte de conhecimento fez com que os níveis corporativos tomassem decisões de forma rápida, a fim de moldar suas capacidades para abordar proativamente as mudanças ambientais (MERENDINO *et al.*, 2018).

IBM *et al.* (2011) define Big Data por meio de três principais características, conhecida como os 3 V’s: Volume, Variedade e Velocidade. Quanto à Variedade, isso significa que o tamanho, o conteúdo, o formato e os aplicativos dos dados são diversificados. A variedade de informações é escalonada por dados: estruturados (armazenados em bancos de dados, sequenciados em tabelas), semi-estruturados (acompanham padrões heterogêneos, são mais difíceis de serem identificados pois podem seguir diversos padrões) e dados não estruturados (uma mistura de dados com fontes diversificadas como imagens, áudios e documentos *online*). Velocidade significa que a geração de dados é rápida e o processamento de dados requer alta pontualidade. A velocidade com a qual a informação é obtida se torna

uma vantagem competitiva das empresas. Por Valor, entende-se que apesar da quantidade massiva de dados, é necessário entender a maneira correta de extrair o seu valor e além disso, realizar as perguntas certas no início de todo processo de análise.

Por meio da análise dos dados obtidos, baseada na computação em nuvem, os fabricantes puderam encontrar os gargalos dos processos de fabricação, perceber as causas e os impactos dos problemas. A partir dessas informações é possível encontrar as soluções para que os processos de fabricação sejam aprimorados para aumentar a eficiência da fabricação, tornando-a cada vez mais enxuta e competitiva. Todas as informações valiosas da fabricação de Big Data são o *feedback* para o *design* do produto, manufatura, MRO (Manutenção, Reparo e Operação) etc. A manufatura agora pode alcançar um novo patamar, a manufatura inteligente (QI; TAO, 2018).

2.1.3 Sistemas Integrados

Um dos conceitos da Indústria 4.0 consiste nas trocas rápidas e eficientes de informações para tomadas precisas de decisão. Nesse sentido, integração entre sistemas e os setores das fábricas se torna um ponto chave para impulsionar os processos, diminuindo perdas e otimizando recursos. No entanto, é necessário que haja uma integração entre computação e processos físicos, de forma que os computadores e redes estejam incorporados, monitorando e controlando processos físicos, formando os CPS. Como os processos são diversos e envolvem diferentes agentes em uma fábrica, o conceito de integração alinhado à Indústria 4.0 é dividido em duas vertentes: a integração horizontal e a vertical.

- **A Integração Horizontal** refere-se à integração dos vários sistemas de TI utilizados nas diferentes etapas dos processos de planejamento de negócios e fabricação que envolvem uma troca de materiais, energia e informações dentro de uma empresa (por exemplo, logística de entrada, produção, logística de saída, marketing) e entre várias empresas diferentes (redes de valor). O objetivo dessa integração é fornecer uma solução de ponta a ponta (KAGERMANN *et al.*, 2013).
- **A Integração Vertical** refere-se à integração dos diversos sistemas de TI nos diferentes níveis hierárquicos (por exemplo, os níveis de atuador e sensor, controle, gerenciamento de produção, fabricação e execução e planejamento corporativo) e entrega uma solução de ponta a ponta (KAGERMANN *et al.*, 2013).

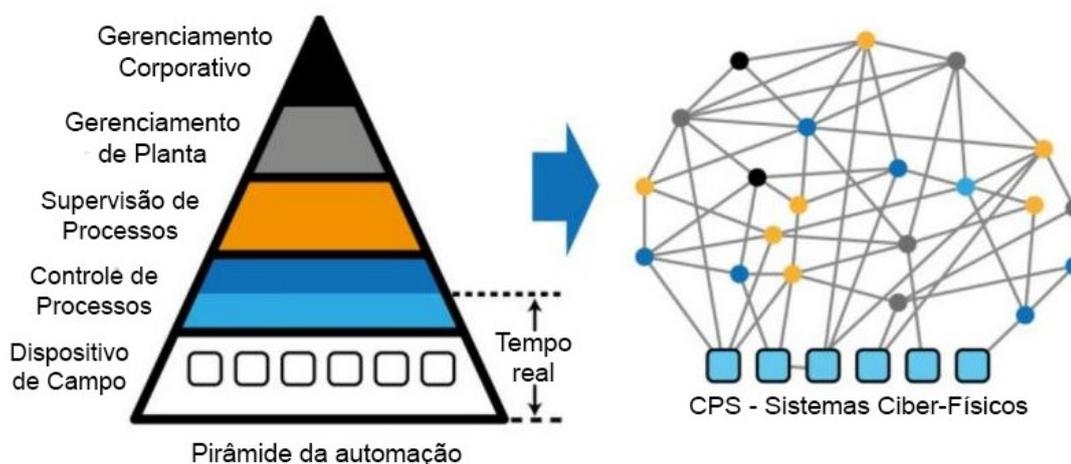
Nos CPS, dados, serviços e funções são mantidos, chamados e executados, o que traz o maior benefício em termos de desenvolvimento flexível e eficiente (incluindo design, engenharia e produção). Isso não estará mais necessariamente nos níveis clássicos de automação. Por exemplo, os dados do processo também podem ser obtidos na chamada “nuvem de automação” por meio de serviços no nível de campo. Isso leva à hipótese de que a pirâmide de automação ainda predominantemente existente será gradualmente resolvida

pela introdução de sistemas descentralizados em rede e que os vários níveis deixarão de existir para a estrutura de *hardware* e redes, bem como para processamento de informação e engenharia. Serviços, dados e componentes de *hardware* podem ser distribuídos para qualquer nó da rede emergente e, assim, formar módulos funcionais abstratos que compõem o sistema de automação.

Na Figura 3, apresentam-se as diferenças entre as configurações da pirâmide da automação e o modelo baseado nos CPS. A base do processo (nível de campo) se mantém como fonte primária de informação, porém agora, os dados coletados podem ser tratados, analisados e armazenados, de maneira que possam ser levados para os diferentes níveis dos sistemas.

Por enquanto, controles e regulamentações críticas em tempo real permanecem inicialmente no nível de campo próximo ao processo. No futuro, também é concebível que os requisitos relevantes em tempo real possam ser atendidos por novas arquiteturas distribuídas no CPS.

Figura 3 – Migração da pirâmide clássica da automação para o modelo dos CPS.



Fonte – Adaptado de VDI/VDE (2013).

2.2 IO-Link

Uma chave para tornar a IoT e as fábricas inteligentes uma realidade é a comunicação bidirecional entre sensores e atuadores do chão-de-fábrica e controladores de nível superior, sistemas de automação e sistemas de execução de manufatura. Os dispositivos habilitados com padrão IO-Link são capazes de fazer exatamente isso, pois, não apenas transmitem dados da máquina para sistemas de gerenciamento de fábrica, como permitem que um sistema de controle atualize parâmetros diretamente no dispositivo que, por sua vez, pode enviar informações de *status* de volta para o controlador. Assim, os dispositivos IO-Link

facilitam o comissionamento e a inicialização da máquina, podem fazer ajustes durante a execução de uma máquina e fornecem recursos de monitoramento e diagnóstico. O resultado final é uma maior flexibilidade de máquina e processo, melhor produtividade geral e menos tempo de inatividade.

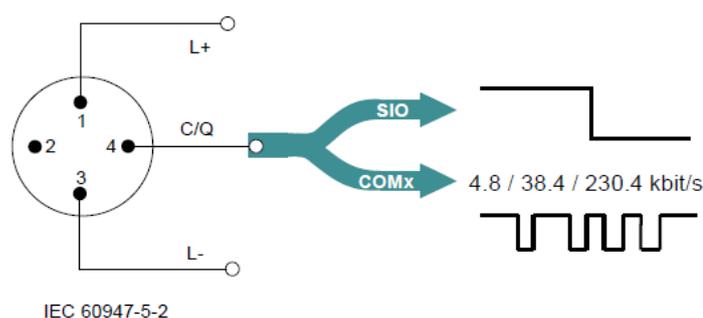
O IO-Link é a primeira tecnologia mundialmente padronizada (IEC 61131-9) que se comunica do controlador até o nível mais baixo de automação. Sua interface pode ser usada universalmente e é uma conexão ponto-a-ponto independente do *fieldbus* utilizado. O IO-Link fornece uma infraestrutura poderosa para gerenciar com segurança o crescente volume de dados. Ele transporta seus dados por todo o processo de fabricação e permite a comunicação contínua do sensor na Internet, tornando o IO-Link um facilitador ideal para a Indústria 4.0 (IO-LINK COMMUNITY, 2013).

2.2.1 Descrição do Sistema

Conforme descrito na IEC 61131-9, o sistema IO-Link transmite todos os sinais do sensor ao controlador e, por outro lado, transfere os dados de controle para o nível do sensor/atuador, simplificando toda a topologia da rede. Foi projetado para funcionar com a infraestrutura de sensor e atuador de 3 fios padrão e é composto pelos dispositivos IO-Link e por um Mestre IO-Link.

Os sensores IO-Link têm os melhores recursos dos sensores binários enquanto adicionam capacidade da troca de dados de forma bidirecional. Os mestres podem interagir tanto com sensores binários quanto IO-Link, permitindo que a tecnologia seja facilmente adicionada a um sistema existente. De acordo com o padrão IO-Link, os cabos que estabelecem a conexão entre os dispositivos e o mestre devem possuir comprimento máximo de 20 metros, utilizando conectores padrão, comuns aos sistemas industriais. Os conectores M8 e M12 são os mais predominantes. A comunicação é ponto a ponto e requer uma interface de 3 fios (L+, C/Q e L-). A comunicação entre dispositivos mestre e escravo é *half-duplex* com 3 taxas de transmissão: COM1 4,8 kbaud, COM2 38,4 kbaud, COM3 230,4 kbaud (Figura 4).

Figura 4 – IO-Link: definição dos pinos.



Fonte – Retirado de IO-Link Community (2018).

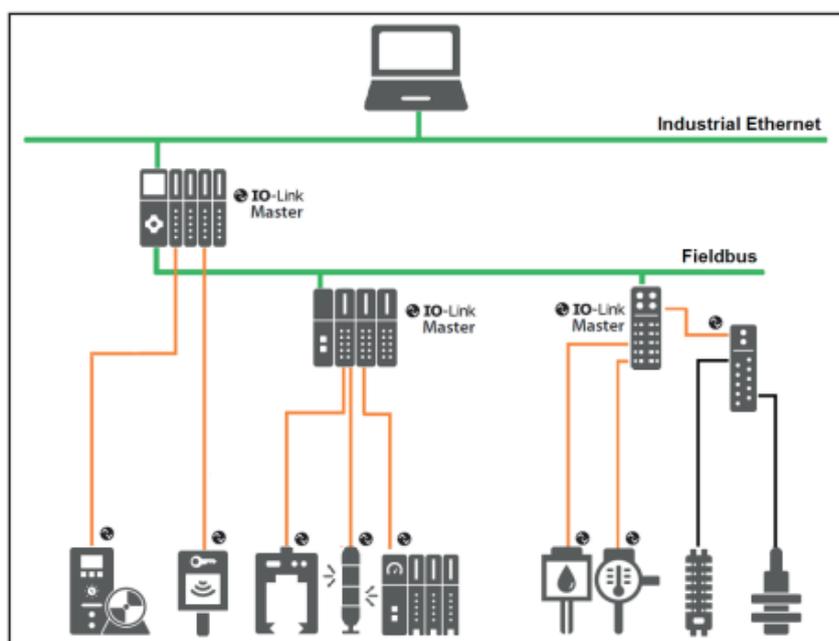
São estabelecidos dois modos de comunicação: o E/S padrão (SIO) e o IO-Link. No modo SIO, a compatibilidade com versões anteriores é garantida com os sensores existentes no campo, usando 0 V ou 24 V para sinalizar OFF ou ON para o mestre IO-Link. No modo IO-Link, a comunicação é bidirecional em uma das três taxas de dados. O dispositivo IO-Link suporta apenas uma taxa de dados, enquanto o mestre IO-Link deve suportar todas as três taxas. A comunicação usa um quadro UART (INSTRUMENTS, 2010) composto por 11 bits = 1 bit inicial + 8 bits de dados + 1 bit de paridade + 1 bit de parada. As durações são definidas pela taxa de transmissão que depende do dispositivo.

A faixa de fornecimento em um sistema IO-Link é de 20 V a 30 V para o mestre ou 18 V a 30 V para o dispositivo (sensor ou atuador). O dispositivo IO-Link deve funcionar dentro de 300 ms após L+ exceder o limite de 18V. Outra informação relevante é que um sinal IO-link deve estar acima de 13 V para ser registrado como um nível alto e abaixo de 8 V para ser registrado como um nível baixo (INTEGRATED, 2017).

2.2.2 IO-Link na Hierarquia de Automação

Um dispositivo IO-Link é conectado ponto a ponto a uma porta em um mestre IO-Link. Se implementado como um módulo *plug-in* no CLP, ele não possui funcionalidade de *gateway* e, como tal, não é um barramento de campo. O mestre IO-Link é exatamente essa interface, responsável pelo estabelecimento da comunicação usando *fieldbuses* ou algum outro tipo de *backplane*, permitindo que os dispositivos IO-Link se tornem nós de E/S de barramento de campo (Figura 5).

Figura 5 – Exemplo de arquitetura de um sistema IO-Link.



Fonte – Adaptado de IO-Link Community (2018).

Como parte integrante do módulo de E/S, o mestre IO-Link é instalado no painel de controle ou diretamente no campo como uma remota E/S de classificação IP 65/67. Os dispositivos IO-Link, acoplados ao mestre, podem ser sensores, atuadores ou uma combinação dos dois, gerando e recebendo sinais (comutação binária, analógica, entrada e saída) que são transmitidos diretamente via IO-Link em um formato digitalizado.

O IO-Link permite que parte da inteligência seja movida do CLP para mais perto dos sensores no chão de fábrica. Por exemplo, usando o pino 2 (I/Q) como DI/DO, além da linha C/Q, o usuário pode receber sinais de entrada digital de um sensor binário e acionar uma lâmpada com o DO (para indicar, por exemplo, se um limite tiver sido ultrapassado). Isso pode ser feito a partir do próprio sensor (INTEGRATED, 2017).

2.2.3 Ambiente IO-Link

Toda troca de dados do IO-Link é baseada em mestre-escravo, de forma que o mestre IO-link envia uma solicitação e o dispositivo precisa respondê-la. A camada de enlace gerencia a troca de mensagens entre o mestre e o dispositivo IO-Link. As mensagens são chamadas sequências M, que são quadros de comprimento entre 1 a 66 palavras UART (INSTRUMENTS, 2010). De acordo com IO-Link Community (2018), as mensagens são classificadas em três diferentes formatos:

- **Process Data:** Os dados do processo dos dispositivos que, por padrão, são transmitidos ciclicamente com até 32 bytes.
- **Value Status Data:** Indicam se os dados do processo são válidos ou não, que também são trocados ciclicamente.
- **Parameter and Diagnostic Data:** Informações de identificação, configurações, avisos e erros, que são trocados mediante solicitação.

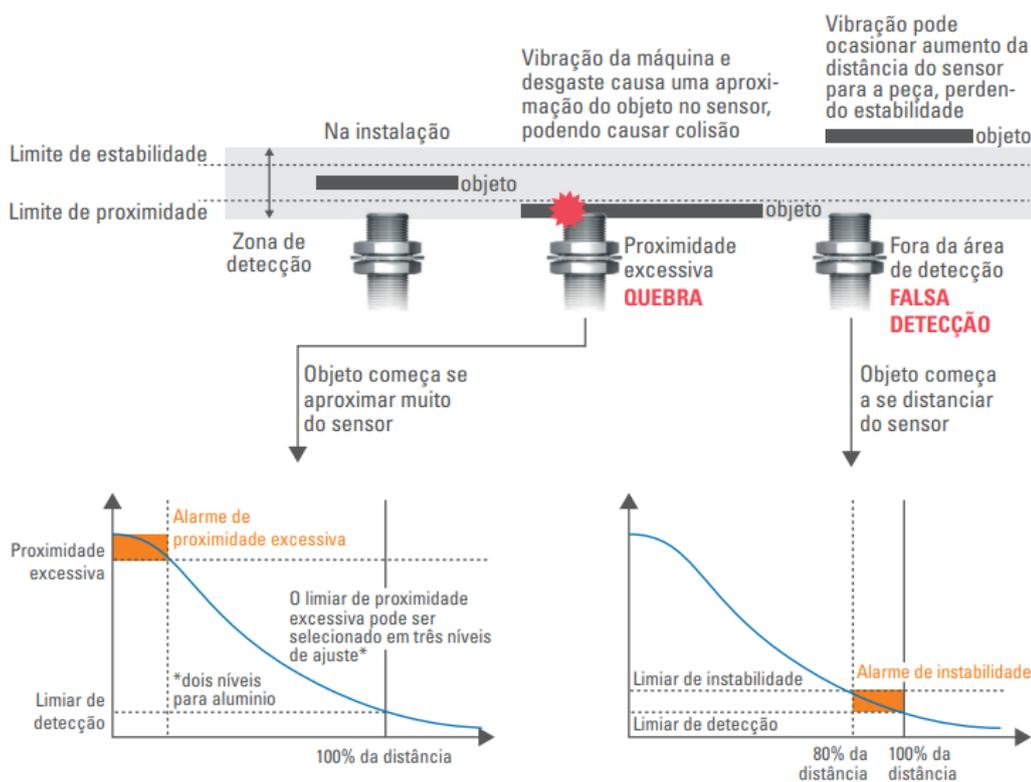
Um manipulador especial da camada de enlace gerencia os modos de operação no mestre e lida com erros e solicitações de ativação. O manipulador de dados do processo garante a troca cíclica de dados do processo, enquanto o manipulador sob solicitação gerencia a troca acíclica de dados de eventos, controle e parâmetros.

2.2.4 IO-Link para Manutenção Preditiva

Como discutido anteriormente, a ascensão das novas tecnologias industriais digitais pretende tornar a fábrica capaz de permitir processos mais rápidos, mais flexíveis e mais eficientes para fabricar produtos de maior qualidade a custos reduzidos. Nessa vertente, a manutenção preditiva tem sido apresentada como um tema-chave na Indústria 4.0 e, ao mesmo tempo, inseparável dos temas sobre Internet das Coisas e Big Data.

A necessidade de informações para a aplicação do conceito da manutenção preditiva pode ser atendida com a utilização da tecnologia IO-Link, a partir de algumas características que foram apresentadas anteriormente. Por exemplo, devido a uma vibração mecânica, um sensor de proximidade pode gerar uma falsa detecção por um distanciamento anormal em relação ao atuador ou até mesmo uma colisão. Um sensor de proximidade IO-Link é capaz de detectar mudanças de posição durante a operação; o sensor monitora constantemente a posição do objeto alvo, notificando se ele está saindo da zona de detecção estável, ou muito próximo, o que poderia levar a uma colisão com o sensor (Figura 6). A tecnologia do sensor IO-Link permite parametrizar o dispositivo por meio do próprio controlador, ou seja, é possível definir previamente os valores dos alcances desta zona de detecção estável para gerar um alerta ou uma ação de acordo com cada situação e característica dos processos. Além disso, com o IO-Link, os usuários também podem rastrear o tempo de execução do sensor para estimar quando um sensor exigirá manutenção ou substituição, para que os problemas possam ser resolvidos durante uma parada programada de manutenção, por exemplo. Os dados do dispositivo também podem ser registrados para análise de longo prazo, incluindo cálculos de eficiência global como o OEE (do inglês, *Overall Equipment Effectiveness*).

Figura 6 – Característica de detecção do sensor de proximidade IO-Link.



Fonte – Retirado de OMRON (2016).

3 Desenvolvimento e Análise da Aplicação

Como discutido nas seções anteriores, o trabalho consiste na aplicação de uma tecnologia digital, denominada IO-Link, com a proposta de trazer melhorias para parte do processo do alto forno de uma usina siderúrgica e, ao mesmo tempo, atender às necessidades básicas dessa nova fase industrial, conhecida como Indústria 4.0. Contudo, fez-se necessário a busca por um maior conhecimento a respeito das características do setor em estudo, das tecnologias atuais aplicáveis e dos pilares que fortalecem os conceitos da Indústria 4.0. Os resultados obtidos com base nesta pesquisa, de caráter exploratório, contribuíram para uma boa organização e um bom planejamento da pesquisa que seria realizada posteriormente, a descritiva. Como comentado, pode-se dizer que o trabalho trata também de uma pesquisa descritiva, uma vez que se pretende observar fatos, registrá-los, analisá-los, classificá-los e interpretá-los. Além disso, esse estudo descritivo permite diagnosticar situações, explorar alternativas e descobrir novas ideias.

Portanto, a partir das características apresentadas para o desenvolvimento do trabalho, percebe-se que foi utilizado um conjunto de diversos procedimentos: bibliográfico e documental, uma vez que se fez necessário a busca de novos conhecimentos por meio de referências importantes para o conteúdo tratado; experimental, por apresentar como finalidade os testes de hipóteses e a comparação de resultados (dados, gráficos e tabelas) a fim de justificar o objeto em estudo, empregando uma abordagem tanto qualitativa quanto quantitativa; estudo de caso, pois trata-se de uma análise profunda de uma ferramenta, com o objetivo de indicar sua importância e compreender o seu significado dentro do contexto tratado.

3.1 Empresa em Estudo

3.1.1 Localização e Histórico

A empresa analisada neste trabalho, onde será desenvolvido o estudo e as aplicações, não terá seu nome citado diretamente, sendo aqui retratada como US (Unidade Siderúrgica). A US, localizada no estado de Minas Gerais, região sudeste do país, é uma das empresas que compõe o grupo do seguimento de aços longos, o qual é composto por outras quatro unidades, tendo uma capacidade de produção atual da ordem de 3,9 milhões de toneladas de aço bruto no Brasil por ano.

O fio-máquina representa o produto final dessa unidade, sendo fabricado em variados diâmetros e classes a partir do processo de conformação mecânica de laminação a quente. Representa um dos produtos básicos e matéria-prima para vários segmentos de mercado, tais como construção civil, automobilístico e indústrias.

Os setores necessários ao processo de produção de fio-máquina estão dispostos quase em sua totalidade no mesmo parque produtivo, sendo a etapa de extração (mineração) a única localizada fora do setor, porém na mesma cidade. Seguindo uma ordem de precedência, o processo produtivo segue um fluxo contínuo, podendo ser estabelecida uma sequência do processo de produção, como ilustrado na Figura 7. Como um sistema encadeado, cada um dos setores desempenha uma função no processo de produção e carrega características distintas nas etapas siderúrgicas.

Figura 7 – Sequência do processo de produção da US.



Fonte – Elaborada pelo autor.

3.1.2 Departamento em Análise

O desdobramento deste trabalho teve como referência o departamento de Redução da US, mais precisamente no setor do alto forno, sendo analisadas inicialmente as atividades e os processos de forma geral.

Entre as etapas do processo, está o Soprador, responsável pela captação e compressão do ar atmosférico até os Regenerados, que por sua vez, aquecem e fornecem o ar quente resultante para o alto forno. O ar entra em contato com o pó de carvão proveniente da ICP (Injeção de Carvão Pulverizado), onde ocorre o processo de combustão para transformar as matérias-primas em ferro gusa líquido. As matérias-primas necessárias para o abastecimento do alto forno são preparadas na área do Carregamento, de forma que, após o peneiramento e a pesagem, são transportadas por correias até a área de recepção no topo do forno. A etapa final acontece na Área de Corrida, região onde se extrai ferro gusa líquido de dentro do alto forno mediante a utilização de uma perfuratriz e conduzido pelo canal refratário, direcionando-o para os carros-torpedo. Esses veículos transportam o material final do processo do alto forno para a Aciaria, dando prosseguimento às etapas necessárias até a formação do produto final da US, o fio-máquina.

A sinergia entre todos os processos que compõe o alto forno reflete no desempenho da área de Redução e impacta no andamento da cadeia produtiva da US. Analisar os sistemas de controle e automação dos processos é o foco deste trabalho. No entanto, o estudo desses processos contribui para o entendimento dos pontos de melhoria e na capacidade de reestruturação dos sistemas para eficiência e aproximação dos conceitos da Indústria 4.0.

3.2 Aplicações Desenvolvidas

Com o objetivo de apresentar uma abordagem completa a respeito das características e vantagens da tecnologia IO-Link, optou-se por realizar sua aplicação em dois cenários diferentes, cada um trazendo uma verificação específica.

O primeiro cenário consiste na aplicação da tecnologia IO-Link para o sistema de refrigeração do alto forno, a fim de avaliar, principalmente, as características da parte estrutural do modelo. Nesse sentido, a abordagem utilizada possibilita a comparação entre o modelo implementado em IO-Link e a forma convencional para o projeto. Além disso, para fim de análise, alguns pontos importantes são levados em consideração no desenvolvimento dessa etapa, como por exemplo, estratégia de manutenção, praticidade e custo de montagem do projeto.

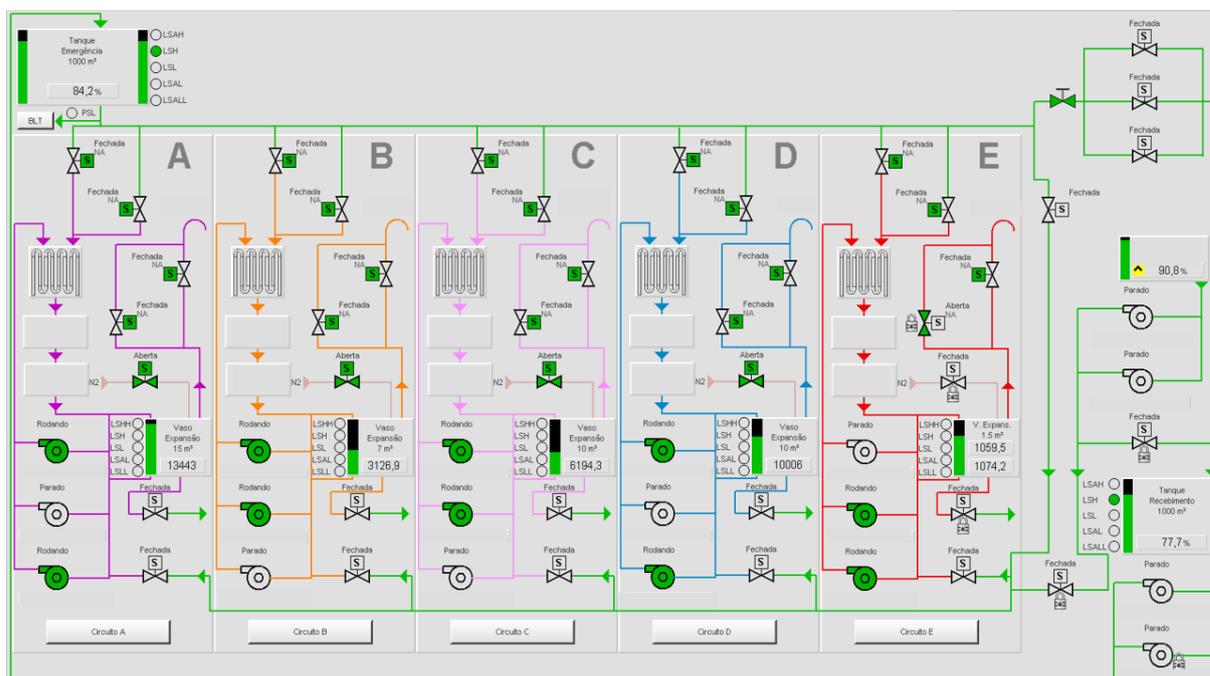
O segundo cenário tem como local de aplicação a ICP e, diferente do primeiro, apresenta uma abordagem pontual, preocupando-se mais com as informações disponibilizadas pelo modelo e a importância que elas trazem para o processo. A justificativa da característica pontual desse novo cenário se dá pelo fato de que se espera instalar em campo a estrutura física para comunicação em IO-Link. A partir dessa implementação e com a utilização de um *software* adequado, é possível realizar uma análise detalhada da tecnologia, a fim de entender o significado e importância dos resultados para o contexto abordado.

3.2.1 Primeira Aplicação: Sistema de Refrigeração

Além dos sistemas voltados diretamente para o processo do alto forno, existem também outros responsáveis pela garantia do aumento da vida útil dos equipamentos. Dentre os sistemas característicos do alto forno, tem-se o sistema de refrigeração, que está diretamente relacionado com a vida útil dos refratários expostos a altas temperaturas. Nas etapas de produção de gusa em um alto forno, implica-se a utilização de temperaturas elevadas para que o processo de redução ocorra. Nesse sentido, uma deficiência no sistema de refrigeração pode acarretar instabilidade ou mesmo uma descontinuidade do processo.

Para garantir a refrigeração de todo o alto forno, o sistema de refrigeração é composto por um total de 7 circuitos independentes, divididos de forma estratégica em 5

Figura 8 – Representação dos circuitos do sistema de refrigeração.



Fonte – Elaborada pelo autor.

circuitos fechados e 2 circuitos semiabertos. Os circuitos fechados (A, B, C, D e E) são operados por duas bombas em funcionamento e uma bomba em *stand-by* a qual tem as mesmas características das bombas em operação (Figura 8). Cada um desses circuitos é responsável pela refrigeração de diferentes setores do alto forno. Um dos circuitos semiabertos, o secundário, é operado por três bombas em funcionamento e uma bomba em *stand-by*, sendo responsáveis por garantir o resfriamento dos próprios circuitos primários de refrigeração. O outro circuito semiaberto, o de emergência, é responsável por suprir o sistema de refrigeração em caso de falha dos circuitos principais.

Após apresentadas as principais características do sistema de refrigeração, é possível compreender a sua importância para a garantia de funcionamento do alto forno. No entanto, a medição e o controle dos processos são fundamentais para gerar, em última análise, os melhores resultados possíveis quanto à utilização de recursos, máquinas, desempenho, rentabilidade, proteção ambiental e segurança em uma unidade de produção. Pensando nisso, foi realizado um estudo para avaliar quais informações são coletadas e, ao mesmo tempo, a maneira com que são realizadas as medições do sistema analisado.

Atualmente, a verificação de temperatura e vibração das bombas do sistema de refrigeração é realizada pelo turno de manutenção. Usualmente, o mecânico leva uma caneta de vibração e um radiômetro para realizar a inspeção. O fato de não existir o monitoramento *online* das variáveis (vibração e temperatura) não garante confiabilidade das informações coletadas ou mesmo a garantia de que este processo de inspeção diária esteja sendo realmente realizado. O método manual pode trazer uma variação das medições

durante a coleta de dados, uma vez que cada pessoa responsável pela atividade pode realizar as medições em pontos distintos. Além disso, no momento em que o funcionário faz a leitura, o equipamento pode não apresentar variação na medição, aparentando bom funcionamento. Porém, se for analisado um conjunto de dados mais robusto, ou ainda, com menor espaçamento entre as leituras ou mesmo leitura *online*, a falha seria identificada. A medição em tempo real também eliminaria a condição da atividade de inspeção diária, permitindo alocar as horas de trabalho do profissional de maneira mais eficiente.

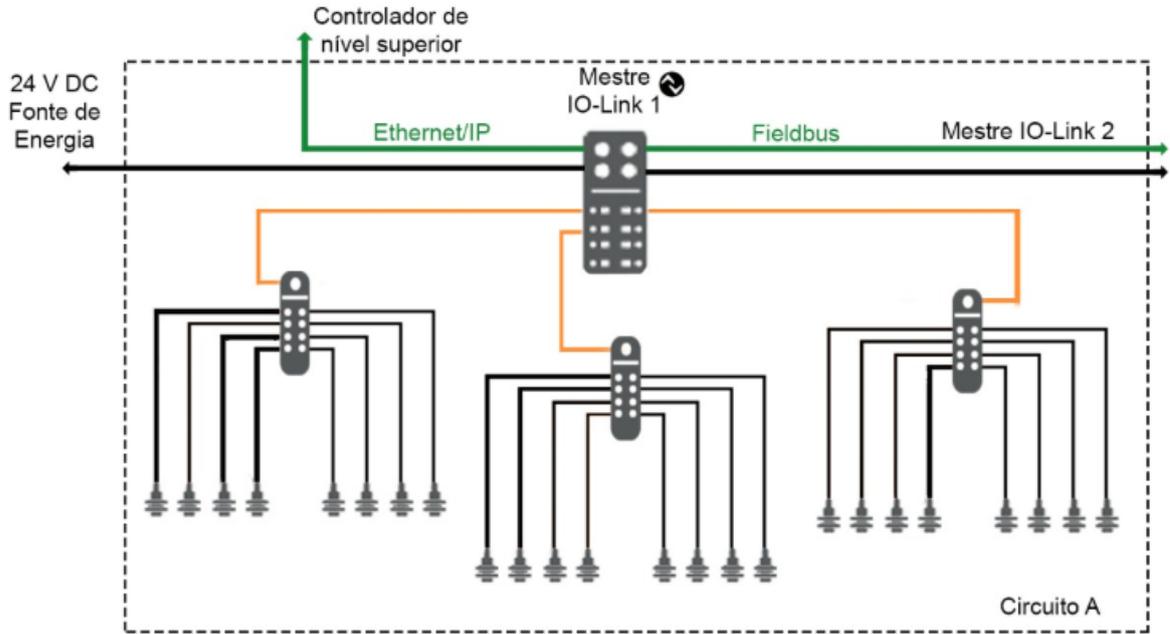
A partir das informações levantadas sobre a situação atual dos processos e realizada a seleção de fatos relevantes aos aspectos abordados, foram identificadas oportunidades de mudanças no processo atual. Sendo assim, a partir dos fatores pertinentes apontados, foi proposta a utilização da tecnologia IO-Link para realizar o monitoramento em tempo real de vibração e temperatura para as bombas do sistema de refrigeração e, ao mesmo tempo, fazer um comparativo com a aplicação do modelo convencional de infraestrutura de medição.

Após avaliação das características do sistema de refrigeração, algumas considerações foram feitas para o desenvolvimento do projeto referente ao primeiro cenário. Considerando o espaço físico, a estrutura local e as estratégias de manutenção, foram desconsiderados dois dos circuitos do sistema, o circuito E e o circuito de emergência, por estarem em áreas distintas do local de aplicação da tecnologia. Após realizadas as considerações, o primeiro passo foi a montagem do *layout* do projeto, com o objetivo de identificar os componentes necessários, de acordo com as especificações da tecnologia IO-Link.

Considerando a arquitetura da tecnologia, foi avaliado a necessidade de 1 mestre IO-Link para cada um dos circuitos de refrigeração. Além do mestre, para cada circuito (A, B, C e D), são necessários 3 HUBs analógicos IO-Link e 8 sensores (4 de temperatura e 4 de vibração). Os HUBs conectam-se diretamente aos mestres por meio da comunicação IO-Link, enquanto os sensores estabelecem uma conexão analógica (4-20 mA) diretamente com os HUBs. Análogo aos circuitos anteriores, o circuito secundário apresenta a mesma topologia, porém, contempla uma bomba a mais. Contudo, o secundário possui um acréscimo de mais 1 HUB e 8 sensores referentes à bomba a mais do circuito.

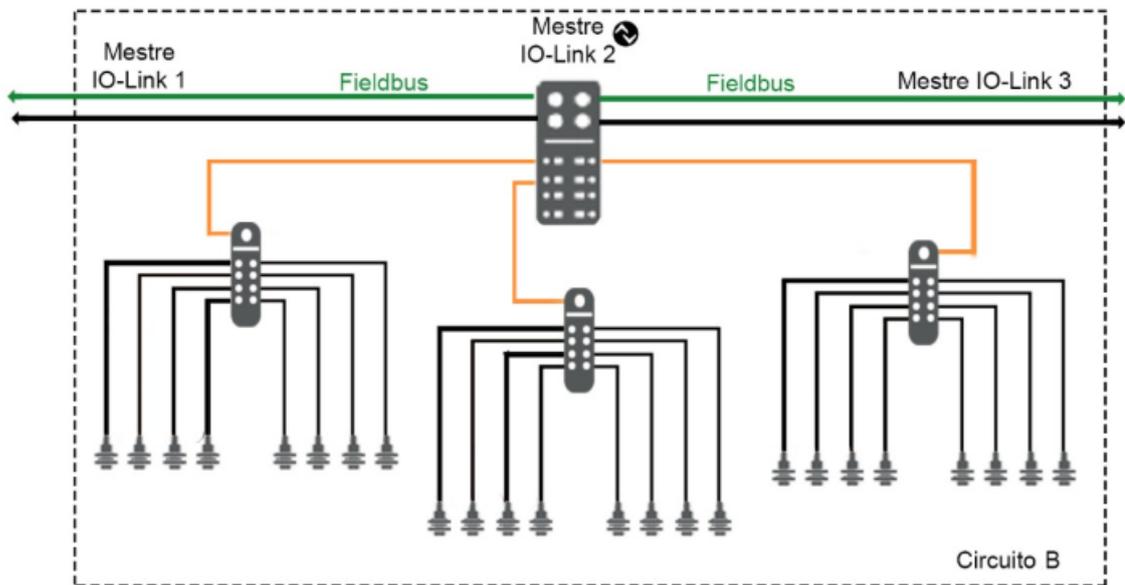
Nas figuras de 9 a 11, apresenta-se o *layout* para o projeto do sistema de refrigeração do alto forno. A parte inicial da topologia desenvolvida é representada na Figura 9 (Circuito A), indicando a alimentação do mestre IO-Link por meio de uma fonte 24 Vcc e a sua conexão com a rede a partir do CLP. Os módulos mestre IO-Link, relativos a cada circuito, estabelecem uma topologia de ligação em anel (DLR, do inglês *Device Level Ring*), ou seja, todos os módulos estão conectados entre si, apresentando, portanto, uma redundância no processo de comunicação. A representação dos circuitos C e D são idênticas à do circuito B (Figura 10), alterando apenas as posições na sequência de comunicação e, portanto, são omitidas. O único circuito que apresenta uma diferença entre os demais é o circuito de fechamento, o secundário (Figura 11), contemplando uma bomba a mais que os anteriores.

Figura 9 – Topologia do Circuito A do sistema de refrigeração.



Fonte – Elaborada pelo autor.

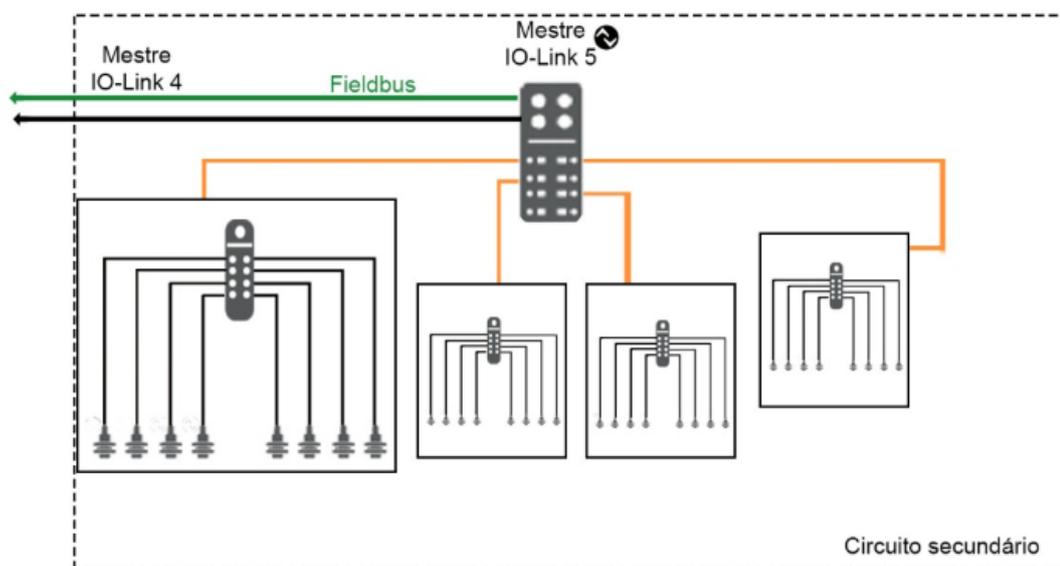
Figura 10 – Topologia do Circuito B do sistema de refrigeração (as configurações dos circuitos C e D são idênticas).



Fonte – Elaborada pelo autor.

O módulo mestre, por característica, permite configurar suas portas para funcionamento em diferentes modos, seja no modo SIO para processar sinais binários ou no modo de comunicação IO. Isso permite uma flexibilidade para o projeto, podendo ser escolhidos os dispositivos de acordo com a necessidade da aplicação. Por outro lado, diferente do

Figura 11 – Topologia do Circuito Secundário do sistema de refrigeração.



Fonte – Elaborada pelo autor.

mestre, o HUB não permite a conexão de dispositivos IO-Link, servindo apenas como um caminho para a conexão de dispositivos analógicos utilizados, limitando sua utilização para algumas situações.

Considerando que a proposta deste primeiro projeto possui um foco maior na parte estrutural da tecnologia, optou-se pela utilização de sensores de temperatura e vibração convencionais, justificando assim a escolha pelo *layout* apresentado anteriormente.

Outra observação relevante sobre a estrutura do projeto é com relação à escolha individual do mestre IO-Link para cada circuito. Mesmo existindo a possibilidade de utilizar 1 mestre para 2 circuitos ao mesmo tempo, seria inviável do ponto de vista da manutenibilidade, uma vez que, caso ocorra alguma falha ou defeito no módulo mestre, implicaria na parada simultânea dos 2 circuitos, o que seria crítico para o processo.

Como parte da proposta do trabalho, foram listados os materiais utilizados e o preço individual e total dos produtos, tanto para o modelo em IO-Link quanto para o convencional. Na Tabela 1 apresenta-se a lista com as informações dos materiais de necessidade comum entre os dois projetos. Na Tabela 2 expõe-se a mesma relação de materiais e custos, mas nesse caso, apenas para a instalação do modelo convencional. Paralelamente, na Tabela 3 mostram-se os materiais e os valores referente ao que seria o projeto realizado para um sistema em IO-Link. As tabelas não incluem os custos da mão de obra do serviço para cada caso mas, ainda assim, pode-se afirmar que o custo da mão de obra do serviço para realização da atividade do modelo convencional é bem maior do que para o modelo IO-Link. Isso se deve principalmente pela topologia do sistema que reduz drasticamente a quantidade de cabos utilizados para as conexões.

Ao analisar as informações das tabelas 2 e 3 é possível perceber que a topologia

e a arquitetura do projeto em que se utiliza a tecnologia IO-Link é bem simplificada quando comparado com o sistema convencional. A primeira observação a respeito das diferenças apresentadas, são os cartões de entrada analógica do controlador que são substituídos pelos módulos mestre IO-Link e pelos HUBs analógicos. Em um primeiro momento, não há tanta diferença com relação ao custo para essa modificação. Entretanto, o modelo convencionalmente utilizado necessita de uma comunicação ponto-a-ponto entre os dispositivos de campo e o controlador, o que demanda uma quantidade enorme de cabos (ultrapassa os 10 mil metros), considerando o grande número de medições necessárias. Por outro lado, a posição do mestre e do HUB IO-Link em campo, próximo aos pontos de medição, reduz o volume de cabos necessários, uma vez que apenas uma conexão entre o controlador e o mestre é necessária.

Tabela 1 – Materiais e custo fixo para ambos projetos.

Materiais	Quantidade	Custo Unitário	Custo Total
Eletrocalha 150mm x 50mm	9	R\$ 115,22	R\$ 1.036,98
Prensa cabo 3/4"	10	R\$ 4,90	R\$ 49,00
Cabo 4 x 6 mm ²	100	R\$ 16,78	R\$ 1.678,00
Disjuntor bipolar 10A	4	R\$ 30,75	R\$ 123,00
Disjuntor bipolar 40A	1	R\$ 43,35	R\$ 43,35
Caixas de passagem 200x300x400	2	R\$ 275,05	R\$ 550,10
Trilho	2	R\$ 15,07	R\$ 30,14
ETAP	2	R\$ 1.300,00	R\$ 2.600,00
Borne	128	R\$ 3,24	R\$ 414,72
Sensor de vibração (Analógico)	64	R\$ 1000,00	R\$ 64.000,00
Sensor de temperatura (Analógico)	64	R\$ 420,00	R\$ 26.800,00
Custo Fixo			R\$ 97.377,13

Tabela 2 – Materiais e custo do projeto por um sistema convencional.

Materiais	Quantidade	Custo Unitário	Custo Total
Cabo blindado 2x1,5 mm ²	10240	R\$ 3,60	R\$ 36.864,00
Cartão 1756 - IF16H	5	R\$ 8.692,36	R\$ 43.461,80
Cartão 1756 - IT61	5	R\$ 5.252,56	R\$ 26.262,80
BLOCO TBCH	5	R\$ 204,76	R\$ 1.023,80
BLOCO TBNH	5	R\$ 165,11	R\$ 825,55
Custo Convencional			R\$ 108.437,95

Tabela 3 – Materiais e custo do projeto por um sistema em IO-Link.

Materiais	Quantidade	Custo Unitário	Custo Total
Caixas de passagem 120x200x200	5	R\$ 182,70	R\$ 913,50
Conectores de alimentação de rede	10	R\$ 84,67	R\$ 846,70
Conector de alimentação	5	R\$ 118,80	R\$ 594,00
Cabo BCC0F0E	60	R\$ 35,00	R\$ 2.100,00
Cabo BCC039J	84	R\$ 200,00	R\$ 16.800,00
Mestre IO-Link BNI006A	4	R\$ 3.100,51	R\$ 12.402,04
HUB Entrada Analógica	18	R\$ 1.500,00	R\$ 27.000,00
Custo IO-Link			R\$ 60.656,24

Os resultados obtidos para esse primeiro cenário apontam que a utilização da tecnologia IO-Link, além de simplificar a estrutura de rede e trazer maior flexibilidade nas soluções de automação, apresenta um custo total de projeto menor que o modelo convencionalmente utilizado. A diferença entre os dois modelos, considerando a dimensão do projeto desenvolvido, é de aproximadamente R\$48.000 (uma redução de quase 44% do custo para o projeto convencional). Todas essas vantagens garantem a viabilidade de utilização dessa tecnologia, sem contar os ganhos com a qualidade das medições e a quantidade de dados e informações disponíveis pelo padrão IO-Link.

3.2.2 Segunda Aplicação: Injeção de Carvão Pulverizado — ICP

O sistema da ICP é responsável por fornecer carvão pulverizado para o alto-forno, contribuindo para reduzir o custo na produção de gusa e o aumento da produtividade. Isso acontece pois o coque, matéria-prima responsável pela combustão, apresenta um custo bastante elevado com relação ao carvão utilizado na ICP. No entanto, o processo de injeção de carvão pulverizado faz com que a quantidade consumida de coque seja reduzida, trazendo benefícios com relação ao custo e à produtividade.

Para garantir que o carvão esteja com as especificações adequadas a ser fornecido ao forno é necessário, anteriormente, passar por algumas etapas. O primeiro processo realizado na ICP consiste na moagem e secagem do carvão. Para realização da primeira parte, a moagem, um moinho é alimentado por um duto que descarrega o material no centro de uma mesa, onde é distribuído para as pistas de moagem por meio de uma força centrífuga, associada à rotação. Um fluxo de gás quente, proveniente de um gerador, é distribuído dentro do moinho, transportando o material moído para a parte superior, onde acontece a classificação do material fino e grosso, devolvendo os grossos para o centro da mesa.

Ao final do processo de moagem, o material passa por novas etapas de classificação até a sua chegada no silo de carvão preparado. Por fim, o material disponível neste silo

é distribuído para três vasos que, de forma alternada, realizam o processo de injeção do carvão pulverizado através de 21 linhas existentes.

Tendo em vista a importância da ICP para o processo de redução, foi realizado um mapeamento do sistema atual, com o objetivo de buscar pontos de melhoria em que poderiam ser utilizadas a tecnologia IO-Link. Além de identificar e propor uma aplicação de melhoria utilizando dispositivos IO-Link, o objetivo dessa etapa desenvolvida é apresentar as vantagens das informações disponibilizadas pelos dispositivos em IO-Link e mostrar o caminho e a forma com que essas informações podem ser visualizadas, analisadas e levadas a níveis superiores na hierarquia da automação.

A primeira proposta avaliada foi a substituição das fontes que fornecem alimentação de 24 Vcc para os instrumentos de medição do local e para os cartões do CLP. Atualmente existem 4 fontes convencionais interligadas em paralelo (duas duplas), em que cada conjunto é responsável pelo fornecimento de energia dos dispositivos de uma parte do processo: um conjunto para moagem e outro para injeção. As fontes atuais, além de ocuparem maior espaço físico, possuem limitações quanto a diagnósticos. Por exemplo, em caso de falha, não há possibilidade de extração de informação remotamente. Além disso, as fontes existentes estão sobredimensionadas, com capacidade de fornecimento de até 50 A, porém a corrente necessária para a alimentação está próxima de 9 A.

Tendo feito o levantamento dessas informações, verificou-se a relevância da troca das fontes existentes pelo modelo em IO-Link e, posteriormente, foi realizada a substituição. Levando em consideração as informações da Seção 2.2.1, de acordo com a configuração e arquitetura do sistema, foi instalado um módulo mestre IO-Link juntamente às fontes. De forma geral, o mestre IO-Link recebe a conexão de rede Ethernet/IP do CLP, enquanto cada fonte é conectada diretamente a uma porta habilitada em IO-Link do mestre. A partir das figuras 12a, 12b e 13 é possível visualizar a estrutura implementada. Além disso, pode-se perceber o espaço disponibilizado com a nova configuração.

As duas fontes posicionadas à esquerda, na Figura 13, estão conectadas em paralelo para fornecer alimentação de 24 Vcc aos dispositivos do sistema de moagem, enquanto as duas fontes da direita, também conectadas em paralelo, servem de alimentação para os dispositivos do sistema de injeção da ICP. Para a alimentação do módulo mestre IO-Link foi utilizada uma fonte de 24 Vcc distinta do sistema, que também pode ser vista na mesma figura.

O modelo das fontes utilizadas no projeto é o BAE00M3 da empresa Balluff (BALLUFF, 2019b) e, por possuírem a tecnologia IO-link como protocolo de comunicação, a coleta e disponibilidade de dados e informações das fontes são mais robustas. Por característica elas são capazes de indicar os seguintes parâmetros:

- **Parâmetros de status:** Indicação dos valores de corrente, tensão, nível de *stress* (nível de tensão fornecida), tempo de vida útil, nível de carga, entre outros.

Figura 12 – Comparativo entre as fontes convencionais e em IO-Link.



(a) Fontes utilizadas anteriormente



(b) Fontes IO-Link instaladas

Fonte – Elaborada pelo autor.

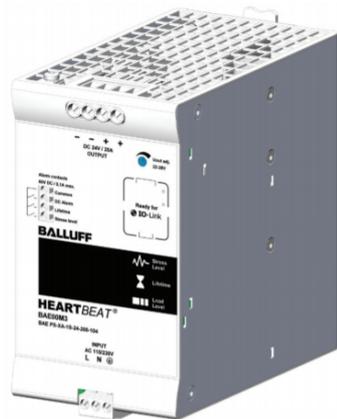
Figura 13 – Visão geral do painel com as novas fontes instaladas.



Fonte – Elaborada pelo autor.

- **Parâmetros de eventos:** Indicação de sobretensão, sobrecarga, mau funcionamento, conexões com anormalidades, entre outros.
- **Parâmetros de erros:** Acesso negado, índice não disponível, valor de parâmetro fora do limite, entre outros.

Figura 14 – Fonte de alimentação e acessório para comunicação em IO-Link.



(a) Fonte Balluff BAE00M3



(b) Dispositivo IO-Link Balluff BAE00TF

Fonte – Retirado de Balluff (2019b).

Entretanto, é necessário realizar a conexão de um dispositivo (*Clip-On*) IO-Link para que a fonte possa estabelecer sua conexão específica. Considerando o modelo da fonte utilizada no projeto, o dispositivo adequado é o BAE00TF da Balluff (BALLUFF, 2019b). Este dispositivo é um terminal IO-Link *plug-in* que tem a função de transmitir os dados do processo da fonte de alimentação para um controlador via IO-Link. Portanto, ao conectar o dispositivo à fonte, todas as informações e parametrizações disponíveis da tecnologia são habilitadas. Nas figuras 14a e 14b apresentam-se, respectivamente, a fonte de tensão e o dispositivo (*Clip-On*) para conexão em IO-Link.

Como discutido na Seção 2.2.1, a interface entre os dispositivos e o CLP acontece por meio do módulo mestre IO-Link. Para o projeto desenvolvido, o modelo utilizado é o BNI006A tipo A (BALLUFF, 2019a), apresentado na Figura 15, também da empresa Balluff.

Figura 15 – Mestre IO-Link Balluff BNI006A.



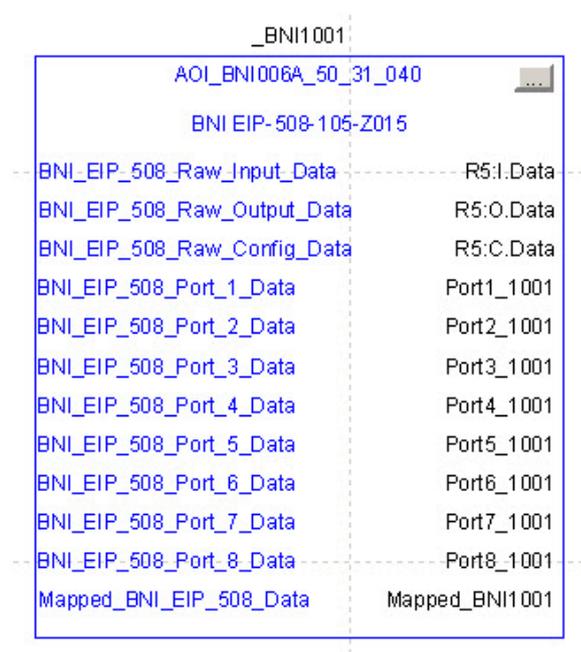
Fonte – Retirada de Balluff (2019a).

Tendo finalizado a etapa de montagem da parte estrutural do projeto proposto, a próxima etapa consiste em realizar a comunicação do mestre IO-Link com o CLP e, posteriormente, a comunicação da fonte 24 Vcc com o mestre. Para isso, foram utilizados o CLP *ControlLogix* e o software *Studio 5000*, ambos da *Rockwell Automation*.

Após realizado a comunicação dos dispositivos com o controlador, o próximo passo consistiu em configurá-los e a programá-los. Para essa etapa foram utilizadas instruções adicionais disponibilizadas pela plataforma *Rockwell*. Essas instruções adicionais (do inglês, *Add-On Instructions — AOI*) desempenham um papel crítico na programação do CLP. Elas oferecem ao programador a capacidade de definir instruções personalizadas para maximizar a reutilização do código e simplificar o desenvolvimento. Uma AOI é basicamente uma função que é definida pelo programador e funciona da mesma maneira que as fornecidas pela *Rockwell*. Além disso, fornece uma API (do inglês, *Application Program Interface*) para os usuários que desejam trabalhar com seu sistema.

A fonte e o mestre utilizados para o projeto possuem uma AOI específica, personalizadas e disponibilizadas pela empresa. Esses “blocos” AOI trazem uma facilidade para a programação e análise das informações dos dispositivos. Na Figura 16 apresenta-se o bloco do Mestre IO-Link utilizado para o desenvolvimento do programa. Como pode ser visto na imagem, algumas informações como a definição do nome para os parâmetros de entrada, saída, configuração, portas e o mapeamento do bloco devem ser, por característica, realizados previamente para a validação do AOI. Outras informações ou atribuições de leitura e escrita, aquelas disponibilizadas pela tecnologia IO-Link, são realizadas internamente no bloco.

Figura 16 – AOI do Mestre IO-Link.



Fonte – Elaborada pelo autor.

Ao acessar o *Controller Tags* do *Studio 5000* é possível visualizar todas as *tags* geradas pelo programa. Portanto, ao buscar pelo nome criado para o mapeamento do bloco mestre (Mapped_BNI1001) teremos informações de status, diagnóstico e dos dados de processo. Além disso, é possível realizar parametrizações remotamente a partir de uma configuração de escrita, como pode ser visto na Figura 17, em que as linhas de 1 a 4 indicam um valor em hexadecimal, caracterizando que a função para comunicação IO-Link está habilitada, enquanto as linhas de 5 a 8 mostram que o modo IO-Link está desativado para as respectivas portas.

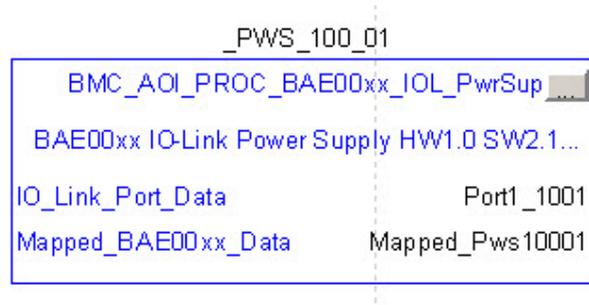
Figura 17 – *Controller Tags* do Mestre IO-Link.

	Vis	Name	Value
		[-] Mapped_BNI_EIP_508_Data.C	{...}
1		[+] Mapped_BNI_EIP_508_Data.C.Port_1_Function	16#01
2		[+] Mapped_BNI_EIP_508_Data.C.Port_2_Function	16#01
3		[+] Mapped_BNI_EIP_508_Data.C.Port_3_Function	16#01
4		[+] Mapped_BNI_EIP_508_Data.C.Port_4_Function	16#01
5		[+] Mapped_BNI_EIP_508_Data.C.Port_5_Function	16#00
6		[+] Mapped_BNI_EIP_508_Data.C.Port_6_Function	16#00
7		[+] Mapped_BNI_EIP_508_Data.C.Port_7_Function	16#00
8		[+] Mapped_BNI_EIP_508_Data.C.Port_8_Function	16#00

Fonte – Elaborada pelo autor.

Na sequência, tem-se a AOI para a fonte IO-Link, representado pela Figura 18. Como pode ser visto na imagem, o bloco necessita de algumas informações prévias para sua validação. A primeira delas é o apontamento para a porta do mestre em que a fonte estará conectada, nesse caso, pode ser visto que a fonte será conectada à porta 1 do mestre (Port1_1001). Além disso, deve ser definido um nome para a *tag* que representa o mapeamento da fonte, análogo ao procedimento realizado para validação da AOI do mestre.

Figura 18 – AOI do Fonte IO-Link.



Fonte – Elaborada pelo autor.

Da mesma forma, para buscar as informações disponibilizadas pelo dispositivo, basta acessar o *Controller Tags* e buscar pela *tag* do mapeamento da fonte (Mapped_Pws10001). A Figura 19 apresenta algumas dessas informações disponíveis diretamente na AOI. As linhas de 1 a 7 indicam os dados do processo, como por exemplo, a leitura de tensão e corrente da fonte, enquanto que as linhas 8 a 14 mostram as condições do dispositivo, como por exemplo, um curto circuito ou mesmo um dado inválido de processo.

Figura 19 – *Controller Tags* da fonte IO-Link.

	Vis	Name	Value	Data Type
1	<input type="checkbox"/>	EnableIn	1	BOOL
0	<input type="checkbox"/>	EnableOut	1	BOOL
10	<input checked="" type="checkbox"/>	+ IO_Link_Port_Data	{...}	IO_Link_Port_Data
10	<input checked="" type="checkbox"/>	- Mapped_BAE00xx_Data	{...}	BMC_UDT_PRO...
1		-Mapped_BAE00xx_Data.Overload	0	BOOL
2		-Mapped_BAE00xx_Data.Over_Voltage	0	BOOL
3		-Mapped_BAE00xx_Data.Over_Temperature	0	BOOL
4		-Mapped_BAE00xx_Data.Output_Drop	0	BOOL
5		-Mapped_BAE00xx_Data.PSU_ON	0	BOOL
6		-Mapped_BAE00xx_Data.Output_Current	6.1	REAL
7		-Mapped_BAE00xx_Data.Output_Voltage	24.0	REAL
		- Mapped_BAE00xx_Data.Diag	{...}	BMC_UDT_DIAG...
8		-Mapped_BAE00xx_Data.Diag.DeviceOK	1	BOOL
9		-Mapped_BAE00xx_Data.Diag.MismatchFault	0	BOOL
10		-Mapped_BAE00xx_Data.Diag.CommFault	0	BOOL
11		-Mapped_BAE00xx_Data.Diag.ValidationFailed	0	BOOL
12		-Mapped_BAE00xx_Data.Diag.ProcessDataInvalid	0	BOOL
13		-Mapped_BAE00xx_Data.Diag.DSValidationFailure	0	BOOL
14		-Mapped_BAE00xx_Data.Diag.IOLShortCircuit	0	BOOL

Fonte – Elaborada pelo autor.

Como a AOI é personalizável, é certo que nem todas as informações estão de forma direta no bloco, entretanto é possível obter quaisquer informações disponíveis nos dispositivos por meio do *Parameter Data*. Contudo, além das informações apresentadas pelas figuras 17 e 19, muitos outros parâmetros podem ser configurados e utilizados para monitoramento e controle, garantindo mais rapidez, flexibilidade e eficiência aos processos.

Verifica-se então que a tecnologia IO-Link fornece uma infraestrutura que garante, com segurança, a aquisição de um crescente volume de dados. Além disso, permite a comunicação contínua do sensor na rede de comunicação, tornando o IO-Link um facilitador ideal para atender aos conceitos base da Indústria 4.0.

Após verificado a viabilidade de sua aplicação no contexto de uma siderúrgica e tendo em mãos os dados provenientes da tecnologia, é importante entender a maneira com que essas informações dos dispositivos podem ser levadas a níveis superiores por meio de serviços em rede descentralizados. Para que isso se torne possível, é necessário que haja uma integração entre sistemas que, como discutido na Seção 2.1.3, se torna um ponto

chave para impulsionar os processos, diminuindo perdas e otimizando recursos. Nesse caso, trata-se de uma integração vertical, em que existe compartilhamento das informações em cadeia do chão de fábrica até os níveis de execução e planejamento corporativo da empresa.

Um dos caminhos para essa integração e até mesmo uma proposta de aplicação da empresa em estudo, é a integração entre o sistema de gerenciamento da planta (PIMS, do inglês *Plant Information Management System*) e o sistema SAP ERP utilizado. O objetivo dessa integração é permitir que as áreas de manutenção executem serviços de manutenção preventiva com base no desempenho dos equipamentos, através do monitoramento das condições do equipamento pelo sistema PIMS. Empregando uma interface computacional, os dados provenientes do PIMS, são enviados para o SAP, o qual permitiria, por exemplo, uma abertura automática de notificações para manutenção do equipamento mediante identificação da condição de mau funcionamento.

Como um exemplo de aplicação, pode-se pensar no sensor de proximidade IO-Link citado na Seção 2.2.4. Devido a uma vibração mecânica, o sensor pode ter sua medição falseada, provocada por um distanciamento anormal em relação à área monitorada. Sensores embarcados com a tecnologia IO-Link são capazes de detectar mudanças de posição durante o seu funcionamento, uma vez que não utilizam apenas sinais discretos (0 ou 1), mas fazem o monitoramento em valores contínuos. Baseado nesse princípio, é possível definir uma faixa de valores aceitáveis e, caso ultrapassem os limites preestabelecidos, a informação de *status* coletada poderia ser enviada para o CLP que, por sua vez, disponibiliza os dados para o PIMS. Considerando a interação com o PIMS, o SAP poderia processar essas informações e gerar alarmes, notas de mau funcionamento ou ordem preventiva de forma automática, por exemplo, solicitando o inspetor responsável o aperto do sensor. Neste sentido, pode ser percebida a completa interação entre os sistemas, desde o sensoriamento em campo até a contextualização dos dados como uma informação no sistema de gestão. Essa característica demonstra a integração dos níveis hierárquicos da automação e como a tecnologia IO-Link está alinhada com os conceitos propostos pela Indústria 4.0.

4 Conclusões e Considerações Finais

A integração de sistemas embarcados, o acesso onipresente à Internet e as comunicações M2M abriram caminho para a introdução de IoT e CPS também em ambientes industriais, sob as formas da IIoT e CPPS. Como consequência, a Quarta Revolução Industrial, ou seja, a Indústria 4.0, está rapidamente remodelando os processos industriais tradicionais.

A abordagem deste trabalho teve sua construção baseada a partir de observações da realidade do processo do alto forno de uma unidade siderúrgica e do entendimento das suas possibilidades de melhorias e adesão aos conceitos base para a Indústria 4.0 por meio do uso de uma nova tecnologia. Dessa forma, foi possível verificar os cenários em que a utilização da tecnologia IO-Link poderia ser inserida e como ela contribuiria para uma maior flexibilidade nas soluções de automação e ao mesmo tempo atenderia às necessidades da Indústria 4.0.

Com o objetivo de apresentar uma abordagem completa a respeito das características e vantagens da tecnologia IO-Link, foram realizadas aplicações em dois cenários diferentes, cada um trazendo uma verificação específica. A primeira aplicação desenvolvida teve como objetivo a construção de um projeto para monitoramento de vibração e temperatura do sistema de refrigeração de um alto forno. A escolha desse processo, baseado em oportunidades de melhorias encontradas, foi realizada de uma forma macro para que fosse possível mostrar principalmente as características da topologia da tecnologia IO-Link e, além disso, as principais diferenças existentes com relação ao modelo convencionalmente utilizado. Como resposta, além do aumento de informações e simplificação da instalação, o projeto para o modelo em IO-Link representou uma redução de aproximadamente 44% do custo total comparado às técnicas convencionais utilizadas.

Para a segunda aplicação foi desenvolvido um projeto para a substituição de fontes convencionais de 24 Vcc que alimentavam os dispositivos dos processos da ICP por fontes em IO-Link. Diferentemente da primeira etapa, esta apresentou características pontuais, a qual foi apresentado de forma detalhada a grande quantidade de informações disponibilizadas pela tecnologia IO-Link e a importância que elas trazem para o processo. Como resultado, foi verificado que o uso da tecnologia é capaz de simplificar a instalação, flexibilizar as soluções de automação, aumentar a quantidade e a qualidade de dados coletadas e permite a descentralização das informações. Contudo, pode-se afirmar que a utilização da tecnologia IO-Link aplicada ao contexto de uma siderúrgica é bastante satisfatória.

4.1 Recomendações para trabalhos futuros

A tecnologia IO-Link tem contribuído muito para alavancar o potencial e o desempenho das indústrias nesse momento em que a Indústria 4.0 está rapidamente remodelando os processos industriais tradicionais. Existe uma demanda cada vez maior por mais flexibilidade nas soluções de automação e, uma das maneiras de atender a essa necessidade é através da utilização da tecnologia *wireless* IO-Link. Recomenda-se então a aplicação dessa tecnologia, a fim de verificar a viabilidade da sua aplicação em setores industriais e quais as vantagens e limitações quando comparadas ao modelo utilizado neste trabalho.

Em função da indisponibilidade de algumas informações e do tempo para novas avaliações, sugere-se também um estudo posterior à aplicação das tecnologias, com o objetivo de analisar e tratar o grande volume de dados gerados pelos dispositivos e, além disso, verificar o impacto causado na manutenção, principalmente com relação à manutenção preventiva e prescritiva.

Referências

- ABDI. *Inovação, Manufatura Avançada e o Futuro da Indústria*. 2017. Disponível em: <https://old.abdi.com.br/Estudo/ABDI_Inovacao_Manufatura_Vol01.pdf>. Acesso em: 21/05/2019.
- ARBIX, G.; SALERNO, M. S.; ZANCUL, E.; AMARAL, G.; LINS, L. M. O Brasil e a nova onda de manufatura avançada: O que aprender com Alemanha, China e Estados Unidos. *Novos estudos CEBRAP*, scielo, v. 36, p. 29 – 49, 11 2017.
- BALLUFF. *BNI EIP-502-105-Z015*. 2019. Disponível em: <https://assets.balluff.com/WebBinary1/MAN_BNI_EIP_50x_105_Z015_EN_F17_DOK_933690_01_000.pdf>. Acesso em: 12/09/2019.
- BALLUFF. *Switching power supplies IO-Link ready MAN-SHG BAE PS-XA-1S-24-200-104*. 2019. Disponível em: <https://assets.balluff.com/WebBinary1/MAN_SHG_BAE_PS_XA_1S_24_200_104_X_G15_DRW_915948_00_000.pdf>. Acesso em: 12/09/2019.
- CHUI PETER BISSON, J. W. R. D. J. B. J. M. M.; AHARON, D. *Unlocking the potential of the Internet of Things*. 2015. Disponível em: <<https://www.mckinsey.com/business-functions/digital-mckinsey/our-insights/the-internet-of-things-the-value-of-digitizing-the-physical-world>>. Acesso em: 21/05/2019.
- CNI. *Desafios para a Indústria 4.0 no Brasil*. 2016. Disponível em: <<http://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2016/8/desafios-para-industria-40-no-brasil/>>. Acesso em: 21/05/2019.
- DALENOGARE, L. S.; BENITEZ, G. B.; AYALA, N. F.; FRANK, A. G. The expected contribution of industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of Production Economics*, v. 204, p. 383 – 394, 2018.
- IBM; ZIKOPOULOS, P.; EATON, C. *Understanding Big Data: Analytics for Enterprise Class Hadoop and Streaming Data*. 1st. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Osborne Media, 2011.
- INSTRUMENTS, T. *KeyStone Architecture: Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART)*. 2010. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ug/sprugp1/sprugp1.pdf>>. Acesso em: 21/05/2019.
- INTEGRATED, M. *IO-Link : Handbook*. 2017. Disponível em: <<https://www.maximintegrated.com/en/products/interface/io-link-transceivers.html>>. Acesso em: 16/11/2019.
- IO-LINK COMMUNITY. *IO-Link Interface and System – Specification Version 1.1.2*. 2013. Disponível em: <https://io-link.com/share/Downloads/Spec-Interface/IOL-Interface-Spec_10002_V112_Jul13.pdf>. Acesso em: 21/05/2019.
- IO-LINK COMMUNITY. *IO-Link System Description: Technology and Application*. 2018. Disponível em: <https://io-link.com/share/Downloads/At-a-glance/IO-Link_System_Description_eng_2018.pdf>. Acesso em: 21/05/2019.

- KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0 – Securing the Future of German Manufacturing Industry*. München, 2013. Disponível em: <http://forschungsunion.de/pdf/industrie_4_0_final_report.pdf>. Acesso em: 21/05/2019.
- LEE, I.; LEE, K. The internet of things (iot): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons*, v. 58, n. 4, p. 431 – 440, 2015.
- MERENDINO, A.; DIBB, S.; MEADOWS, M.; QUINN, L.; WILSON, D.; SIMKIN, L.; CANHOTO, A. Big data, big decisions: The impact of big data on board level decision-making. *Journal of Business Research*, v. 93, p. 67 – 78, 2018.
- NETSCAN. 2019. Disponível em: <<https://netscandigital.com/blog/o-que-a-digitalizacao-de-documentos-e-a-industria-4-0-tem-em-comum/>>. Acesso em: 02/03/05/2019.
- OMRON. *Levando mais inteligência para os sensores no chão de fábrica*. 2016. Disponível em: <http://industrial.omron.com.br/media/2016/11/Folder_I_O_Link.pdf>. Acesso em: 16/06/2019.
- PILLONI, V. How data will transform industrial processes: Crowdsensing, crowdsourcing and big data as pillars of industry 4.0. *Future Internet*, v. 10, n. 3, 2018.
- POLLUX. 2018. Disponível em: <<https://www.pollux.com.br/blog/resumo-sobre-industria-4-0-entenda-rapidamente-os-conceitos-e-beneficios/>>. Acesso em: 07/03/05/2019.
- PORTER, M. E.; HEPPELMANN, J. E. How smart, connected products are transforming companies. *Harvard Business Review*, v. 93, n. 10, p. 53–71, out. 2015.
- PURDY, M.; DAVARZANI, L. *The Growth Game-Changer: How the Industrial Internet of Things can drive progress and prosperity*. 2015. Disponível em: <https://www.accenture.com/_acnmedia/Accenture/Conversion-Assets/DotCom/Documents/Global/PDF/Dualpub_18/Accenture-Executive-Summary-Growth-Game-Changer-Industrial-Internet.pdf#zoom=50>. Acesso em: 21/05/2019.
- QI, Q.; TAO, F. Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison. *IEEE Access*, v. 6, p. 3585–3593, 2018.
- TAO, F.; ZUO, Y.; XU, L.; ZHANG, L. Iot-based intelligent perception and access of manufacturing resource toward cloud manufacturing. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 10, p. 1547–1557, 2014.
- TEKLEMARIAM, G.; HOEBEKE, J.; MOERMAN, I.; DEMEESTER, P. Facilitating the creation of iot applications through conditional observations in coap. *EURASIP J. Wireless Comm. and Networking*, v. 2013, p. 177, 2013.
- VDI/VDE, V. D. I. e.V. *Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation*. 2013. Acesso em: 13/03/2019.



TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “Aplicação da Tecnologia IO-Link como Base para a Indústria 4.0 no Contexto de uma Siderúrgica” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 18 de dezembro de 2019.

Leonardo Pessoa Freitas e Silva
Leonardo Pessoa Freitas e Silva