



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO - CEAU



JOÃO PEDRO BRAGA DE OLIVEIRA

AUTOMAÇÃO DE CÉLULA PARA PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS DE
MINÉRIO DE FERRO PARA ANÁLISES LABORATORIAIS
UTILIZANDO CLP E ROBÔ INDUSTRIAL

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO

Ouro Preto, 2024

JOÃO PEDRO BRAGA DE OLIVEIRA

**AUTOMAÇÃO DE CÉLULA PARA PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS DE
MINÉRIO DE FERRO PARA ANÁLISES LABORATORIAIS
UTILIZANDO CLP E ROBÔ INDUSTRIAL**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Profa. Adrielle de Carvalho Santana, Dra.

**Ouro Preto
Escola de Minas – UFOP
2024**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E
AUTOMACAO



FOLHA DE APROVAÇÃO

João Pedro Braga de Oliveira

Automação de Célula para Preparação de Amostras de Minério de Ferro para Análises Laboratoriais Utilizando PLC e Robô Industrial

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação

Aprovada em 09 de outubro de 2024

Membros da banca

Dra. Adrielle de Carvalho Santana - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Dra. Karla Boaventura Pimenta Palmieri - Convidada - Universidade Federal de Ouro Preto
MSc. Regiane de Sousa e Silva Ramalho - Convidada - Universidade Federal de Ouro Preto

Adrielle de Carvalho Santana, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 09/10/2024



Documento assinado eletronicamente por **Adrielle de Carvalho Santana, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/10/2024, às 15:57, 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 **0790869** e o código CRC **A61B55E1**.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à minha mãe e à minha avó Maria, que sempre estiveram presentes e ao meu lado, incentivando-me em todos os momentos da minha vida. Um agradecimento especial ao meu irmão, por toda a força e incentivo para trilhar um caminho proveitoso, especialmente durante a graduação.

Muito obrigado à minha família como um todo, que sempre esteve presente e me incentivou a ser uma pessoa dedicada aos estudos. Isabela, obrigado por estar comigo neste momento e pelo apoio constante na busca pelos meus objetivos.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha orientadora, Adrielle, e aos demais professores que, ao longo da minha jornada acadêmica, me ensinaram tanto do que hoje sei. Agradeço também às pessoas com quem tive a oportunidade de trabalhar e aprender ao longo dos últimos quatro anos de profissão, em especial Bruno, Fernando e Leonardo; parte do meu conhecimento e deste trabalho devo a vocês, e serei eternamente grato.

Por fim, a todos que de alguma forma contribuíram para este projeto e para a minha evolução acadêmica e profissional, meu sincero obrigado!

RESUMO

Este trabalho se fundamenta na crescente necessidade de aprimorar a segurança e a eficiência operacional em ambientes industriais de mineração, onde tarefas repetitivas e fisicamente exigentes, como a preparação e quarteamento de amostras de minério de ferro, podem representar riscos significativos à saúde dos trabalhadores. A preparação e quarteamento de amostras de minério de ferro, quando realizada manualmente, impõe uma carga significativa sobre os trabalhadores responsáveis por essa atividade. Diante desse cenário, o presente trabalho propõe a implementação de uma célula automatizada com o objetivo de reduzir substancialmente o esforço físico e repetitivo dos colaboradores de uma empresa de mineração durante o processo de separação e preparação da amostra global para futuras análises químicas e físicas das alíquotas geradas. O projeto envolve a integração de diversos equipamentos e dispositivos automatizados, tais como, um controlador lógico programável (CLP), um braço robótico industrial, inversores de frequência, esteiras transportadoras, um disco giratório, sensores indutivos, atuadores pneumáticos, travas magnéticas, botoeiras de emergência e uma cortina de luz. A previsão de redução de 90% no esforço físico dos operadores, decorrente da automação, não apenas melhora as condições de trabalho, mas também pode contribuir para a diminuição de afastamentos médicos relacionados a lesões por esforços repetitivos (LER) e outras condições ocupacionais. Em última análise, este projeto não só promove a inovação tecnológica na indústria de mineração, mas também reforça o compromisso com a sustentabilidade social e operacional, ao proteger a saúde dos trabalhadores e aumentar a eficiência dos processos produtivos.

Palavras-chave: automação industrial, braço robótico, segurança no trabalho, eficiência operacional, mineração.

ABSTRACT

This work is based on the growing need to enhance safety and operational efficiency in industrial mining environments, where repetitive and physically demanding tasks, such as the preparation and quartering of iron ore samples, pose significant health risks to workers. When performed manually, these tasks place a considerable physical strain on the personnel responsible. In response to this challenge, this study proposes the implementation of an automated cell designed to substantially reduce the repetitive and strenuous workload on mining company employees during the process of separating and preparing the bulk sample for subsequent chemical and physical analyses of the generated aliquots. The project integrates various automated equipment and devices, including a programmable logic controller (PLC), an industrial robotic arm, frequency inverters, conveyor belts, a rotary table, inductive sensors, pneumatic actuators, magnetic locks, emergency stop buttons, and a light curtain. The anticipated 90% reduction in the operators' physical effort due to automation not only improves working conditions but also contributes to a decrease in medical leave associated with repetitive strain injuries (RSIs) and other occupational conditions. Ultimately, this project fosters technological innovation in the mining industry while reinforcing a commitment to social and operational sustainability by protecting workers' health and increasing process efficiency.

Keywords: industrial automation, robotic arm, workplace safety, operational efficiency, mining.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Método Chevron	13
Figura 2	– Disco Rotativo	15
Figura 3	– Rede PROFINet e PROFIBus	17
Figura 4	– CLP	18
Figura 5	– IHM KTP 700 BASIC PN SIEMENS	19
Figura 6	– Robô articulado ABB IRB6620	20
Figura 7	– Sensor fotoelétrico difuso	21
Figura 8	– Sensor indutivo	21
Figura 9	– Sensor magnético para cilindro	22
Figura 10	– Atuadores pneumáticos	23
Figura 11	– Cortina de luz	24
Figura 12	– Arquitetura de rede	28
Figura 13	– Configuração dos parâmetros de rede.....	29
Figura 14	– Trecho do código de programação.....	29
Figura 15	– Fluxograma da troca de dados entre robô e CLP	30
Figura 16	– Conjunto Chevron.....	31
Figura 17	– Conjunto RSD	32
Figura 18	– Fluxograma 01 do processo.....	35
Figura 19	– Fluxograma 02 do processo	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Escopo do projeto. Fonte: Autor.....	26
Tabela 2 – Capacidade de projeto da célula. Fonte: Autor.....	27
Tabela 3 – Capacidade real da célula. Fonte: Autor.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLP	Controlador lógico programável
RRR	Robô articulado com três juntas rotacionais
IHM	Interface Homem Máquina
I/O	Entradas e saídas que compõem um controlador lógico programável
IRC5	Controlador do braço robótico

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	10
1.1.	Contextualização.....	10
1.2.	Objetivos.....	11
1.2.1.	Objetivo Geral.....	11
1.2.2.	Objetivo Específico.....	11
1.3.	Estrutura do trabalho.....	11
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1.	Robotização para realização de tarefas exaustivas.....	12
2.2.	Métodos de homogeneização de amostras.....	13
2.3.	Disco Rotativo.....	14
2.4.	Arquitetura.....	16
2.4.1.	Redes industriais.....	16
2.4.2.	CLP.....	17
2.4.3.	IHM.....	18
2.4.4.	Robôs industriais.....	19
2.4.5.	Sensores.....	20
2.4.6.	Atuadores.....	22
2.4.7.	Dispositivos de segurança.....	23
3	DESENVOLVIMENTO.....	25
3.1	Metodologia.....	25
3.2	Projeto.....	26
3.3	Montagem.....	27
3.4	Controle e Automação.....	28
4	RESULTADOS.....	37
5	CONCLUSÃO.....	39
	REFERÊNCIAS.....	40

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

A análise laboratorial de minério de ferro assume uma posição crucial na viabilização da comercialização e exploração desse recurso mineral. A qualidade e representatividade das amostras são fatores determinantes para as decisões estratégicas na indústria, e é nesse cenário que a automação emerge como uma ferramenta indispensável para aprimorar a eficiência e precisão desse processo.

Quando uma amostra de minério de ferro adentra o ambiente laboratorial, submete-se a um processo crucial de redução e divisão, visando análises químicas e físicas em ensaios e testes diversos. “O quarteamento é uma técnica que visa à redução de massa das amostras – divisão da amostra global em alíquotas com massa menor, para obtenção da amostra final de acordo com o planejamento inicial”¹, possibilitando dividir uma amostra global em alíquotas menores para serem analisadas em processos distintos. Em ambientes nos quais o quarteamento é conduzido manualmente, o operador enfrenta desafios significativos. Na mineradora contemplada para a implementação do processo automatizado, o técnico responsável recebe cerca de 450kg de amostras por hora e os operadores realizam a preparação dessas amostras, demandando manipulação, preparação e quarteamento manuais, o que pode causar a longo prazo prejuízos significativos a saúde dos colaboradores devido à carga excessiva e resíduos gerados pelo processo.

Cada preparação de amostra de minério de ferro realizada manualmente que adentra o laboratório exige o esforço e dedicação do operador responsável durante um tempo de 30 minutos a 1 hora, durante a preparação o operador é submetido a esforços físicos e atividades repetitivas consideráveis. A automação pode ser utilizada, nesse caso, para otimizar a produtividade e preservar a saúde dos colaboradores envolvidos na operação, otimizar a operação e processo de preparação de amostra de minério de ferro e melhorar a qualidade da preparação das amostras para futuras análises e testes químicos e físicos. Dessa forma, a transferência do ônus físico para máquinas e equipamentos, que incluem correias e braço robótico, não apenas promete redefinir a dinâmica operacional, eliminando a exaustão física humana, mas também visa aprimorar a eficiência global do processo laboratorial, promovendo assim um avanço significativo na análise laboratorial de minério de ferro.

¹ <https://www.institutominere.com.br/blog/amostragem-na-mineracao-o-que-e-qual-e-sua-importancia>

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e implementar uma célula de preparação de amostras de minério de ferro totalmente automatizada, controlada por um CLP e um braço robótico, visando reduzir o esforço físico do operador, mitigar riscos e aprimorar a qualidade e precisão na preparação de amostras.

1.2.2. Objetivo Específico

No escopo dos objetivos específicos, buscar-se-á:

- Projetar e implementar a célula de preparação de amostras;
- Analisar a eficiência do método Chevron e quarteamento utilizando disco rotativo na homogeneização;
- Avaliar a precisão do disco rotativo na divisão das amostras;
- Desenvolver um sistema para monitorar e controlar o processo.

O objetivo vai além da otimização operacional; busca-se garantir a qualidade das análises e obter um avanço significativo na melhora da saúde ocupacional e bem-estar dos colaboradores, que têm impacto direto nas transações comerciais e nas estratégias de exploração mineral.

1.3. Estrutura do trabalho

Este trabalho segue uma estrutura composta por quatro seções principais. Na primeira, a introdução, contextualiza-se a importância da automação na análise laboratorial de minério de ferro para a comercialização e exploração, além de apresentar os objetivos. A segunda seção consiste em uma fundamentação teórica que explora estudos relacionados à automação, à automação na mineração, arquiteturas de rede, dispositivos e métodos de preparação de amostras. A terceira seção aborda o desenvolvimento do projeto, detalhando o desenvolvimento e construção do controle e da automação do processo. Na quarta seção, são apresentados resultados e discussões oriundos da aplicação prática do projeto. Por fim, a conclusão sintetiza os resultados e discute as contribuições do trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Robotização para realização de tarefas exaustivas

A evolução da automação industrial ao longo da história é intrinsecamente ligada à necessidade de aprimorar ambientes fabris onde o esforço físico é substancial e as condições de trabalho são frequentemente desafiadoras para os operários. Os braços robóticos foram criados para auxiliar em funções repetitivas dentro de indústrias e para realizarem movimentos complexos com precisão e velocidade (SOUZA, 2020). No âmbito do projeto em destaque, que tem como objetivo a automatização da preparação de amostras de minério de ferro, a robotização emerge como uma solução notável para enfrentar tarefas exaustivas. A adoção de robôs industriais busca não apenas otimizar a eficiência operacional, mas também criar um ambiente laboral mais seguro e propício à saúde dos trabalhadores.

O papel da robotização vai além da simples substituição de tarefas manuais, estendendo-se à capacidade intrínseca de executar operações precisas e repetitivas, resultando em uma melhoria substancial na consistência e qualidade do processo. Além disso, a introdução estratégica de robôs industriais proporciona a execução de tarefas em ambientes hostis, característicos das operações de mineração, nos quais condições adversas podem representar riscos significativos à saúde humana.

São vários os benefícios de utilizar-se robôs nas indústrias, tais como o aumento da produtividade, a melhoria, a consistência no resultado final e na qualidade, a minimização da necessidade de operações adicionais, a confiabilidade, a operação em processos hostis e perigosos e em tarefas desagradáveis e repetitivas para o ser humano (BASTOS, 2014).

Nesse contexto, a robotização se apresenta como um catalisador para a modernização do setor industrial, transformando não apenas a eficiência operacional, mas também redefinindo os padrões de segurança e bem-estar no trabalho. A precisão milimétrica dos braços robóticos não só aprimora a qualidade do processo de preparação de amostras de minério de ferro, mas também reduz a probabilidade de erros associados à fadiga humana, comuns em tarefas repetitivas e exaustivas.

Os benefícios da robotização vão além da esfera operacional, influenciando positivamente a qualidade final do produto e, por conseguinte, a competitividade da indústria mineradora. A capacidade dos robôs em operar em ambientes desafiadores, muitas vezes inacessíveis ou perigosos para os trabalhadores humanos, proporciona uma nova fronteira na exploração de recursos minerais. A robotização não apenas visa otimizar o presente, mas também moldar o futuro da indústria, oferecendo soluções inovadoras para os desafios intrínsecos à atividade mineradora.

Dessa forma, a incorporação da robotização na automação industrial não apenas moderniza as práticas existentes, mas inaugura uma era de transformação na qual a tecnologia se torna uma aliada essencial na busca por operações mais eficientes, seguras e sustentáveis. O projeto de automação da preparação de amostras de minério de ferro, com seu enfoque na

robotização, reflete não apenas uma resposta pragmática às demandas presentes, mas também uma visão de futuro para uma indústria mineradora mais resiliente e inovadora.

2.2. Métodos de homogeneização de amostras

Na complexa tarefa de preparar amostras de minério de ferro para análises laboratoriais, a homogeneização emerge como um elemento crucial para assegurar a fidedignidade dos resultados obtidos.

“No método Chevron a empilhadeira pode ser com torre fixa, com sua lança tendo menor comprimento, resultando numa empilhadeira de peso relativamente menor, e com um custo total de instalação mais baixo” (FERREIRA, 1989). Dentre os diversos métodos empregados, o método Chevron destaca-se como uma abordagem amplamente adotada. Esse método envolve a construção de pilhas de homogeneização em camadas longitudinais, onde o material é depositado em longas camadas ao longo do eixo da pilha. A principal vantagem desse método é a capacidade de misturar diferentes qualidades de minério de forma eficiente, resultando em um produto final mais homogêneo (SILVA, 2023). A Figura 1 ilustra as pilhas obtidas pelo método Chevron.

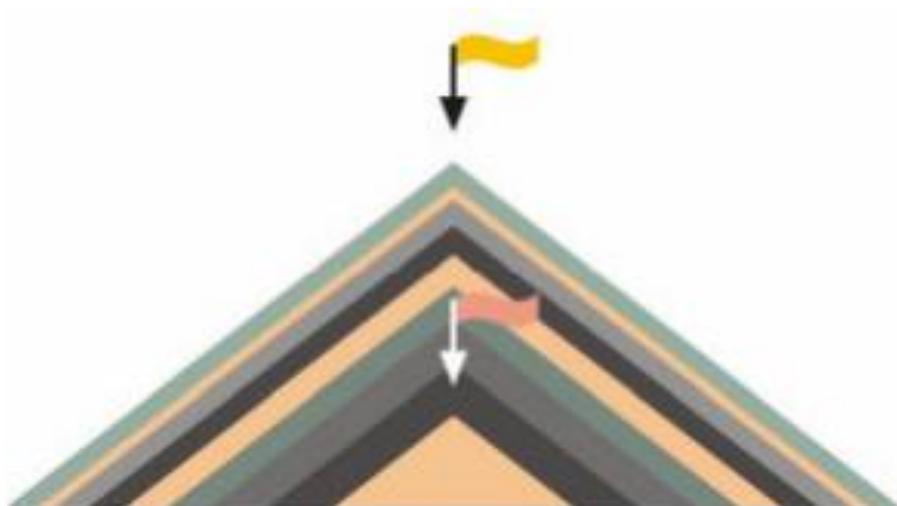


Figura 1 – Método Chevron. Fonte: MACIEL,2013

Esta operação pode ser manual ou mecânica. Contudo, é essencial reconhecer que essas abordagens podem apresentar limitações na obtenção de uma homogeneização verdadeiramente representativa. A escolha do método adequado deve ser meticulosamente ponderada, levando em consideração a natureza intrínseca do minério em questão e os requisitos específicos das análises laboratoriais a serem realizadas. A possibilidade de utilizar um ou mais métodos deve ser avaliada ao considerar a necessidade de obtenção de uma amostra representativa.

O método Chevron, com sua abordagem de divisão e reunião alternada, proporciona uma homogeneização eficaz, mas é imperativo considerar os desafios específicos relacionados à variabilidade do minério de ferro. A natureza heterogênea das amostras muitas vezes requer estratégias adicionais para garantir uma representatividade verdadeira. O quarteamento, que,

segundo Brisola (2008) é “o processo de redução da amostra a pequenas porções representativas da amostra inicial”, divide a amostra em frações menores que são, então, novamente combinadas. Ambos os métodos, embora amplamente utilizados, podem apresentar desafios na obtenção de uma homogeneização completa, especialmente em casos de minérios com variações significativas.

A escolha do método de homogeneização torna-se uma decisão estratégica, envolvendo uma análise criteriosa das características do minério, incluindo sua granulometria, composição mineralógica e distribuição de impurezas. A variabilidade natural do minério de ferro, associada às particularidades de cada método, exige uma abordagem personalizada para cada situação. A seleção criteriosa do método de homogeneização não apenas impacta a precisão das análises laboratoriais, mas também desempenha um papel crucial na representatividade dos resultados e na confiabilidade das conclusões obtidas.

Portanto, ao explorar os métodos de homogeneização de minério de ferro, é essencial considerar não apenas as técnicas disponíveis, mas também adaptá-las de maneira inteligente às características específicas de cada amostra. A busca contínua por aprimoramentos nesse processo contribui não apenas para a eficiência das análises laboratoriais, mas também para a evolução constante das práticas na indústria de mineração. Dessa forma, a investigação e a aplicação adequada desses métodos de homogeneização são cruciais para a obtenção de resultados confiáveis e representativos, influenciando diretamente a qualidade das informações que fundamentam as decisões no setor minerário.

2.3. Disco Rotativo

Sabendo que o método Chevron é o método mais comumente empregado na indústria e que tem como vantagem a instalação e a facilidade na automação dos movimentos, bem como a capacidade de homogeneização, mas que possui como desvantagem a segregação do material com partículas finas na parte central da pilha e partículas grossas na superfície e no fundo da pilha (MARQUES, 2014), o disco rotativo, semelhante ao da Figura 2, torna-se uma figura central na etapa de divisão e homogeneização de amostras no projeto em destaque, desempenhando um papel de suma importância ao incorporar uma abordagem mecânica especializada. Esse dispositivo rotativo, dotado de compartimentos simétricos, foi projetado meticulosamente para realizar a divisão da amostra em alíquotas menores de maneira controlada e precisa.



Figura 2 – Disco rotativo²

O cerne de seu funcionamento reside na rotação cuidadosamente controlada do disco, cujos compartimentos simétricos exercem um papel crítico ao receber diferentes porções da amostra e repousá-las, efetuando assim a divisão almejada. Este dispositivo mecânico atua como mestre do processo de divisão, proporcionando uma homogeneização ímpar na separação das amostras. Essa homogeneização é de extrema relevância, uma vez que assegura a representatividade necessária para conduzir análises laboratoriais confiáveis.

Ao considerar a aplicação prática do disco rotativo, torna-se evidente que sua contribuição vai muito além da mera funcionalidade mecânica. Ele desempenha um papel crítico na garantia da precisão e confiabilidade das análises laboratoriais, promovendo a obtenção de resultados representativos. A capacidade de controlar e ajustar as velocidades dos dispositivos que compõem o disco conforme necessário adiciona uma camada de flexibilidade ao processo, permitindo a adaptação a diferentes características e composições das amostras de minério de ferro.

Essa abordagem mecânica, ao empregar um dispositivo tão intrincado quanto o disco rotativo, alinha-se com a busca constante por aprimoramentos tecnológicos na indústria de mineração. A precisão na divisão e homogeneização das amostras não apenas melhora a confiabilidade das análises laboratoriais, mas também influi diretamente na qualidade das informações utilizadas para tomada de decisões em operações mineradoras.

Ademais, o disco rotativo, ao ser integrado ao processo de preparação de amostras, não só atende às exigências técnicas, mas também se destaca como uma peça-chave na otimização da eficiência operacional. Sua capacidade de realizar a divisão controlada de amostras em alíquotas menores não apenas agiliza o processo, mas também minimiza possíveis erros associados à manipulação manual, ressaltando a importância da automação e da precisão

² <https://www.brastorno.com.br/quarteador-amostras>

mecânica em operações dessa magnitude.

Portanto, o disco rotativo transcende sua função mecânica primária ao se tornar um componente essencial na maquinaria intrincada da preparação de amostras de minério de ferro. Sua presença não apenas aprimora a eficiência operacional, mas também eleva os padrões de precisão e confiabilidade, solidificando-se como um exemplo tangível de como a tecnologia e a engenharia podem convergir para impulsionar a indústria mineradora rumo a práticas mais inovadoras.

2.4. Arquitetura

A arquitetura de automação no âmbito deste projeto revela-se como uma engrenagem complexa, composta por diversos componentes essenciais que atuam de maneira integrada, visando a eficiência operacional na célula de preparação de amostras. Cada elemento desempenha um papel crucial, contribuindo para o funcionamento sincronizado e aprimorado do sistema automatizado. Os próximos tópicos detalham esses elementos.

2.4.1. Redes industriais

As redes industriais estabelecem a espinha dorsal da comunicação entre os dispositivos na célula de preparação de amostras. Sua função é facilitar a troca eficiente de dados entre o CLP, IHM, sensores, atuadores, inversores de frequência, controlador e o robô industrial antropomórfico de 6 eixos. Essa interconectividade é vital para a fluidez do processo automatizado, garantindo que cada componente esteja sincronizado e operado em conjunto.

Os protocolos de rede PROFINet e PROFIBus apresentadas na Figura 3 são dois protocolos de redes amplamente utilizados no âmbito da automação e também são utilizados neste projeto, sendo os responsáveis por garantir a comunicação entre os dispositivos de campo, controladores e equipamentos. PROFINet é um protocolo de comunicação ethernet industrial e é baseado no padrão ethernet, oferecendo velocidade, flexibilidade e interoperabilidade, já o PROFIBus é um protocolo de comunicação serial de campo e é um dos protocolos mais populares e utilizados quando se trata de barramento de campo (AMINAIE, 2020).

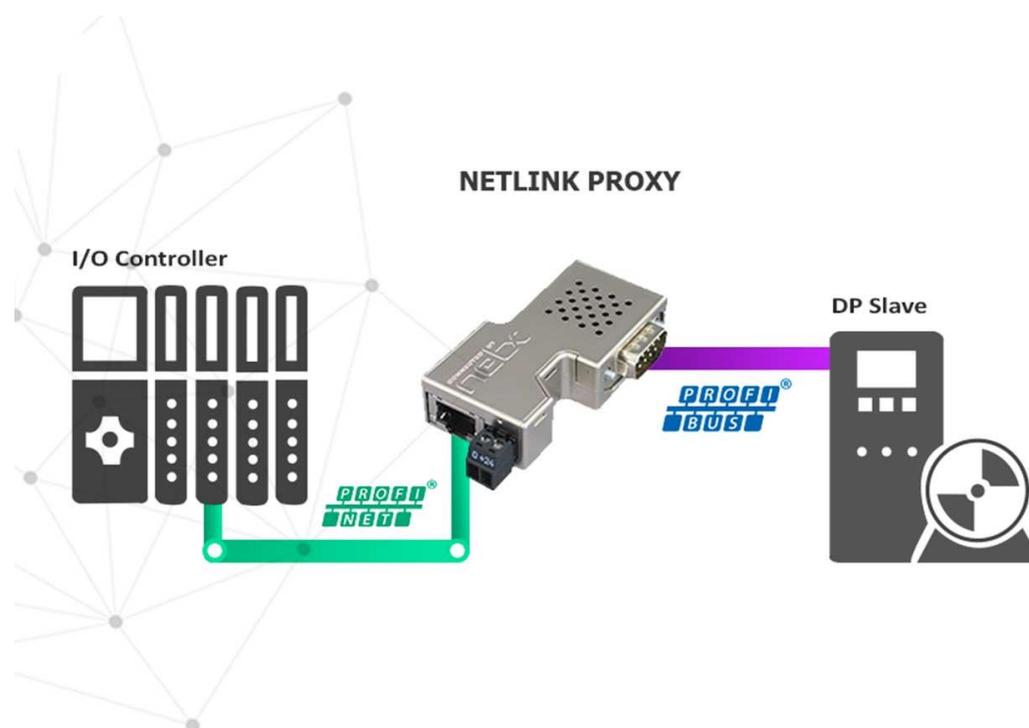


Figura 3 – Rede PROFInet e PROFIBus³

2.4.2. CLP

O controlador lógico programável (CLP) emerge como o cérebro da automação, assumindo a responsabilidade de controlar e coordenar todas as operações na célula. Recebendo informações dos sensores, processando dados e emitindo comandos aos atuadores, inversores e controladores o CLP é fundamental para assegurar a sincronia e eficiência do processo. Sua capacidade de tomar decisões em tempo real contribui para a agilidade e adaptação do sistema às demandas variáveis do ambiente (SILVA, 2018).

De acordo com Siemens (2024):

“Os controladores SIMATIC S7-1200 são a escolha ideal quando se trata de executar tarefas de automação de forma flexível e eficiente na faixa de desempenho inferior a médio. Eles apresentam uma ampla gama de funções tecnológicas e comunicação integrada, bem como design especialmente compacto e que economiza espaço.”

O CLP da SIEMENS S71200 possui conectividade com as redes PROFInet e PROFIBus que garantem a comunicação com os inversores de frequência e controlador do braço robótico antropomórfico e possui entradas e saídas digitais para enviar comandos aos atuadores e receber sinais de estado dos sensores. Isso possibilita abrir e fechar comportas, acionar ou desacionar motores, posicionar equipamentos, controlar velocidades dos motores, controlar partidas dos motores, movimentar o braço robótico e enviar requisições ao seu controlador, intertravar equipamentos, enviar sinais e receber comandos da IHM, sinalizar falhas e gerar defeitos. A robustez do equipamento garante confiabilidade e segurança, além de velocidade para tratativas

³ <https://www.envisia.com.br/2019/06/14/netlinkproxy/>

de eventos e controle do processo. A Figura 4 ilustra um CLP da Siemens S71200.



Figura 4 – CLP⁴

2.4.3. IHM

A interface homem-máquina (IHM) desempenha o papel crucial de proporcionar uma interface intuitiva entre o operador e o sistema automatizado. Neste projeto, ela permite monitorar o processo, visualizar dados em tempo real e realizar intervenções quando necessário. A clareza e acessibilidade da IHM contribuem para a eficácia do operador no controle e supervisão das operações da célula de preparação de amostras.

Por meio da IHM o operador tem a possibilidade de realizar o cadastro inicial das amostras, acompanhar o processo, verificar o status das sequências automáticas, observar os estados dos equipamentos, executar comandos manuais nos equipamentos e dispositivos quando necessário, verificar entradas e saídas digitais, certificar valores de processo, cancelar sequências em execução, buscar históricos de entrada, acompanhar falhas e intertravamentos ativos (individualizado em telas separadas) e monitorar o processo como um todo. Como ilustra a Figura 5, a IHM oferece uma gama de funções e possibilidades.

⁴ <https://www.siemens.com/br/pt/produtos/automacao/controladores/s7-1200.html>



Figura 5 – IHM KTP 700 BASIC PN SIEMENS⁵

2.4.4. Robôs industriais

Os robôs industriais de 6 eixos, assumem tarefas específicas de manipulação e movimentação na célula de preparação de amostras. “O IRB 6620, utilizado no projeto, é um robô flexível e ágil com um grande envelope de trabalho, este robô abre oportunidades para novos conceitos de linha flexíveis e aprimorados” (ABB, 2024). Sua programação integrada ao CLP garante uma coordenação eficiente com outros componentes do sistema, proporcionando precisão e eficiência na execução de tarefas especializadas. Essa sinergia entre o robô e o controle lógico contribui para a excelência operacional.

O robô industrial ABB, ilustrado pela Figura 6, é controlado pelo seu controlador ABB IRC5 que comunica com o CLP SIEMENS S71200 via rede PROFINet.

⁵ <https://mall.industry.siemens.com/mall/pt/pt/Catalog/Product/6AV2123-2GB03-0AX0>



Figura 6 – Robô articulado ABB IRB6620⁶

2.4.5. Sensores

Os sensores desempenham um papel-chave na coleta de dados do ambiente e do processo. Neste projeto, sensores de posição e detecção de presença são empregados para fornecer informações precisas ao CLP. A precisão desses dados é fundamental para garantir que o sistema automatizado opere com base em informações confiáveis, contribuindo para a qualidade das análises laboratoriais.

Os sensores utilizados neste projeto verificam posições dos dispositivos de intertravamento, posições dos cilindros pneumáticos utilizados nos equipamentos, estado de portas, posição do disco rotativo, limites das correias, rotação dos motores, enclausuramento e afins. A Figura 7 ilustra um sensor fotoelétrico difuso que é utilizado para verificar a presença de objetos.

⁶ <https://new.abb.com/products/pt/3HAC024583-001/irb-6620>



Figura 7 – Sensor fotoelétrico difuso⁷

O sensor fotoelétrico difuso da Figura 7 funciona emitindo um feixe de luz por meio de seu emissor que ao entrar em contato com um objeto é refletido e direcionado ao seu receptor, identificando assim a presença do objeto que está a sua frente (MAZZAROPPI, 2007).

A Figura 8 ilustra um sensor indutivo, este que é utilizado para detectar objetos metálicos. Apesar dos sensores indutivos não apresentarem larga escala de detecção, eles oferecem condições de operação que alguns outros tipos de sensores não oferecem devido à baixa resistência (SOUSA, 2017).



Figura 8 – Sensor indutivo⁸

⁷ <https://www.rhmateriaiseletricos.com.br/sensor-fotoeletrico-difuso-obd1000-r100-2ep-io-267075-100037>

⁸ <https://www.eletopecas.com/sensor-indutivo-tubular-tecnotron-ib-5m-18sa-prxl/p>

A Figura 9 ilustra um sensor magnético que é utilizado para verificar a posição do êmbolo de um cilindro pneumático, usualmente são utilizados dois sensores magnéticos em cada cilindro pneumático de forma a viabilizar o monitoramento do atuador quando este estiver aberto e quando estiver fechado.



Figura 9 – Sensor magnético para cilindro⁹

2.4.6. Atuadores

“Um atuador é um dispositivo que converte energia (geralmente elétrica, pneumática ou hidráulica) em movimento mecânico. Ele é usado para mover ou controlar um mecanismo ou sistema. Atuadores podem produzir movimentos lineares ou rotativos e são essenciais em diversas aplicações industriais, automotivas, e de robótica. Eles operam válvulas, levantam cargas, posicionam peças e realizam outras funções automáticas com precisão e controle, baseando-se em sinais de controle e sistemas de *feedback* para ajustar o desempenho conforme necessário.” (FESTO, 2024). Os atuadores representam os braços executivos do sistema, realizando ações físicas com base nos comandos do CLP.

Na célula de preparação de amostras, esses dispositivos controlam comportas, indexadores e dispositivos de limpeza que compõem o disco rotativo, desempenhando funções essenciais no processo automatizado. Sua precisão e resposta rápida são vitais para assegurar a eficácia e a fluidez das operações, consolidando assim a importância dos atuadores no contexto da automação industrial.

A Figura 10 ilustra alguns dos cilindros pneumáticos utilizados no projeto.

⁹ https://www.festo.com/br/pt/p/sensor-magnetico-de-proximidade-id_SMT_8M/



Figura 10 – Atuadores pneumáticos¹⁰

2.4.7. Dispositivos de segurança

Os dispositivos de segurança emergem como requisitos e elementos fundamentais para operação da célula de preparação inicial de amostras de minério de ferro. Os dispositivos de segurança garantem o bem-estar, a confiabilidade do processo e a saúde dos colaboradores da empresa mineradora em questão.

Cortinas de luz são utilizadas para parar o processo caso estas sejam acionadas, inibindo a movimentação do braço robótico e inviabilizando o acionamento dos equipamentos que não são enclausurados. Além da cortina de luz, ilustrada pela Figura 11, em cada uma das duas paredes da célula que são opostas entre si contém uma botoeira de emergência que caso acionada, para o processo como um todo.

¹⁰ <https://solutionautomacao.com.br/produtos/atuadores-pneumaticos-ipatinga/>



Figura 11 – Cortina de luz¹¹

¹¹ <https://automation.omron.com/pt/br/products/family/F3SG-RA>

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Metodologia

A realização deste projeto demandou uma abordagem que se desdobrou de maneira sistemática nas etapas cruciais de infraestrutura, projeto, e montagem da célula robótica. A essência do trabalho concentrou-se na automação do processo de preparação de amostras de minério de ferro, objetivando não apenas a eficiência operacional, mas também a precisão e confiabilidade nas análises laboratoriais.

Na fase inicial, dedicada ao projeto, focou-se na configuração física do ambiente destinado à célula robótica. Desde onde seria instalado as esteiras até a disposição estratégica do disco rotativo, robô e demais componentes, cada detalhe foi considerado para assegurar uma integração coesa e eficiente dos equipamentos, incorporando ajustes à infraestrutura elétrica e mecânica conforme necessário.

A segunda etapa concentrou-se na montagem da célula de preparação de amostras, considerando especificações técnicas dos equipamentos para garantir a sinergia entre o CLP, IHM, sensores, atuadores, periféricos e o braço robótico de 6 eixos. A montagem física seguiu um plano estratégico, garantindo não apenas a funcionalidade individual dos componentes, mas também a interação harmoniosa entre eles.

A fase de desenvolvimento da automação, o cerne do projeto, envolveu a elaboração da lógica de programação para o CLP, contemplando as intrincadas operações do robô industrial, acionamento de motores, controle das esteiras, comportas e, principalmente, do disco rotativo. A instrumentação foi cuidadosamente planejada, com a escolha e implementação de sensores para garantir o monitoramento preciso e confiável do processo.

A colocação dos equipamentos em rede foi essencial para assegurar uma comunicação fluida entre os dispositivos envolvidos. As redes industriais foram implementadas para estabelecer uma conexão eficaz entre o CLP, IHM, sensores, atuadores, e o robô industrial, possibilitando a troca rápida e confiável de dados durante a operação.

A criação de receitas específicas para o processo foi uma etapa crítica, considerando que cada tipo de amostra demanda uma abordagem diferenciada. As receitas desenvolvidas, inseridas no sistema, permitiram a automação personalizada do processo de preparação de amostras, levando em conta as características específicas do minério de ferro em questão.

A fase de testes foi conduzida com uma abordagem abrangente, implementando testes unitários, de integração, e de desempenho para garantir que cada componente da célula robótica operasse conforme as especificações técnicas. O comissionamento marcou o momento em que todos os sistemas estavam prontos para operar em plena capacidade, representando um marco significativo na implementação do projeto.

A análise exaustiva dos resultados obtidos encerrou o ciclo do projeto, avaliando a eficácia do método chevron, a precisão do disco rotativo e a performance global da célula. A operação assistida foi iniciada, permitindo que o operador monitorasse o sistema por meio da

IHM, intervindo quando necessário para garantir a continuidade operacional e aprimorar ainda mais o processo automatizado. Esta fase não apenas marcou o final da implementação, mas também inaugurou uma fase contínua de otimização e refinamento do sistema automatizado, visando a excelência contínua. A Tabela 1 resume as etapas do projeto que serão detalhadas nos próximos subcapítulos.

Escopo		
Item	Etapa	Descrição
1	Projeto	Configuração física do ambiente destinado à célula robótica
2	Montagem	Montagem física do ambiente e equipamentos
3	Programação	Desenvolvimento da lógica de programação
4	Colocação em rede	Colocação dos equipamentos e dispositivos em rede
5	Receitas	Criação de receitas e adição à lógica de programação desenvolvida
6	Testes	Testes da programação e demais itens
7	Comissionamento	Start-up, comissionamento e operação assistida

Tabela 1 – Escopo do projeto. Fonte: Autor.

3.2 Projeto

O projeto da célula robótica de preparação de amostras de minério de ferro foi meticulosamente desenvolvido com a colaboração de uma equipe multidisciplinar e a utilização de ferramentas de modelagem e simulação avançadas. O *layout* da célula foi projetado utilizando o *software* SketchUp, que permitiu a visualização tridimensional e o ajuste preciso de todos os componentes e equipamentos envolvidos. Esse planejamento inicial foi fundamental para garantir a eficiência e a segurança da operação automatizada.

Os equipamentos que compõem a célula robótica foram selecionados e montados em parceria com fornecedores especializados. A escolha dos itens foi baseada em critérios rigorosos de qualidade, desempenho e compatibilidade com as especificações do projeto. Todos os elementos foram pensados previamente à aquisição, levando em consideração as necessidades operacionais e os requisitos técnicos do sistema automatizado.

A equipe mobilizada para o projeto contou com a participação de um programador, três eletromecânicos, um engenheiro supervisor e um operador. O programador foi responsável pelo desenvolvimento do *software* de controle e automação, incluindo a programação do CLP e a integração dos dispositivos via rede PROFINet. Os eletromecânicos atuaram na montagem e instalação dos equipamentos, assegurando o correto funcionamento de todos os componentes eletromecânicos. O engenheiro supervisor garantiu a conformidade com os padrões técnicos e as normas de segurança, além de coordenar a integração dos sistemas. O operador, por sua vez, teve a função de repassar o processo e realizar testes, assegurando a validação e o comissionamento do sistema.

A célula robótica foi concebida para operar de maneira autônoma, desde o cadastro dos dados pelo operador via IHM até a execução completa do processo de homogeneização e divisão de amostras. A escolha dos componentes, como o braço robótico ABB de seis eixos e

os equipamentos de movimentação de materiais, foi crucial para atender às exigências de precisão e repetibilidade do processo. Além disso, sensores e dispositivos de monitoramento foram integrados ao sistema para garantir a segurança e a qualidade do processo, possibilitando a detecção de falhas e a implementação de ações corretivas imediatas.

Todo o sistema foi projetado para operar em conformidade com as normas e procedimentos da empresa do setor de mineração, garantindo a qualidade e a confiabilidade dos resultados obtidos. A integração de tecnologias avançadas de automação e controle possibilitou a criação de um ambiente de trabalho seguro e eficiente, com capacidade de adaptação a diferentes tipos de amostras e requisitos operacionais.

Projetou-se a capacidade de atendimento para a realização de 43 ensaios ao dia, este valor foi obtido estimando 30 minutos para realização de cada preparação/ensaio e prevendo 150 minutos de manutenção preventiva e corretiva diária, totalizando 1440 min. A Tabela 2 mostra as capacidades de atendimento que foi projetada para a célula robótica.

Especificações	
Número máx. de amostras por equipamento:	1
Número máx. de ensaios cadastrados e em execução na célula:	1
Tipos de materiais permitidos:	L.O, SINTER-FEED, CORSE SINTER-FEED, HEMATITINHA, PFF
Número médio de ensaios/dia:	43
Massa máxima:	300kg

Tabela 2 – Capacidade de projeto da célula. Fonte: Autor

3.3 Montagem

A fase de montagem da célula robótica de preparação de amostras de minério de ferro foi executada com precisão e atenção aos detalhes, seguindo rigorosamente o projeto desenvolvido. A equipe técnica, composta por três eletromecânicos, um programador e um engenheiro supervisor, desempenhou um papel crucial nesse processo, garantindo que todos os componentes fossem instalados e integrados de acordo com as especificações estabelecidas.

Inicialmente, foi realizada a montagem da estrutura física da célula, incluindo a instalação de bases, suportes e estruturas metálicas necessárias para acomodar os equipamentos. Utilizando o modelo tridimensional desenvolvido no *software*, a equipe assegurou que todos os elementos estivessem posicionados corretamente, de forma a otimizar o espaço e garantir a acessibilidade para manutenção e operação.

Os equipamentos principais, como o braço robótico ABB de seis eixos, o sistema de transportadores e os dispositivos de dosagem e homogeneização, foram instalados em etapas subsequentes. Cada equipamento foi fixado e conectado de acordo com as diretrizes dos fabricantes, garantindo a estabilidade e a segurança operacional. A integração desses dispositivos foi um processo meticuloso, que envolveu a conexão de cabos de alimentação, redes de comunicação (PROFINet) e sistemas pneumáticos.

Os eletromecânicos desempenharam um papel essencial na instalação e ajuste dos

motores, inversores e sensores, assegurando que todos os sistemas estivessem devidamente alinhados e calibrados. A configuração dos inversores de frequência, que controlam a velocidade dos motores, foi realizada para atender às necessidades específicas de cada etapa do processo automatizado.

O programador foi responsável por integrar todos os sistemas ao CLP, desenvolvendo os códigos necessários para o controle dos equipamentos e a comunicação entre eles. Testes de integração foram realizados para verificar a comunicação eficiente e a coordenação entre os diferentes componentes do sistema. Esse processo garantiu que todos os equipamentos pudessem operar de forma sincronizada e responder adequadamente aos comandos enviados pela IHM.

O engenheiro supervisor acompanhou todas as etapas de montagem, assegurando que os procedimentos de segurança fossem rigorosamente seguidos e que todos os equipamentos estivessem em conformidade com as normas técnicas aplicáveis. Além disso, ele supervisionou a execução dos testes iniciais de operação, que envolveram a verificação de movimentos, respostas de sensores e funcionamento dos sistemas de segurança.

Uma vez concluída a montagem a equipe realizou uma série de testes finais para validar o funcionamento dos dispositivos individualmente para então iniciar a fase de desenvolvimento do controle e da automação do sistema.

3.4 Controle e Automação

3.4.1 CLP SIEMENS S71200 e arquitetura de rede

Para garantir que a comunicação entre os equipamentos funcione adequadamente fez-se necessário a instalação dos arquivos GSDML para configuração. Utilizando-se da interface do TIA PORTAL, instalou-se os arquivos GSDML referentes aos inversores utilizados, terminal da balança, IHM e controlador do braço robótico no CLP S71200 e configurou-se as palavras de dados utilizados nos telegramas para comunicação com os dispositivos. A Figura 12 ilustra a arquitetura de rede e os dispositivos que comunicam entre si via PROFINet.

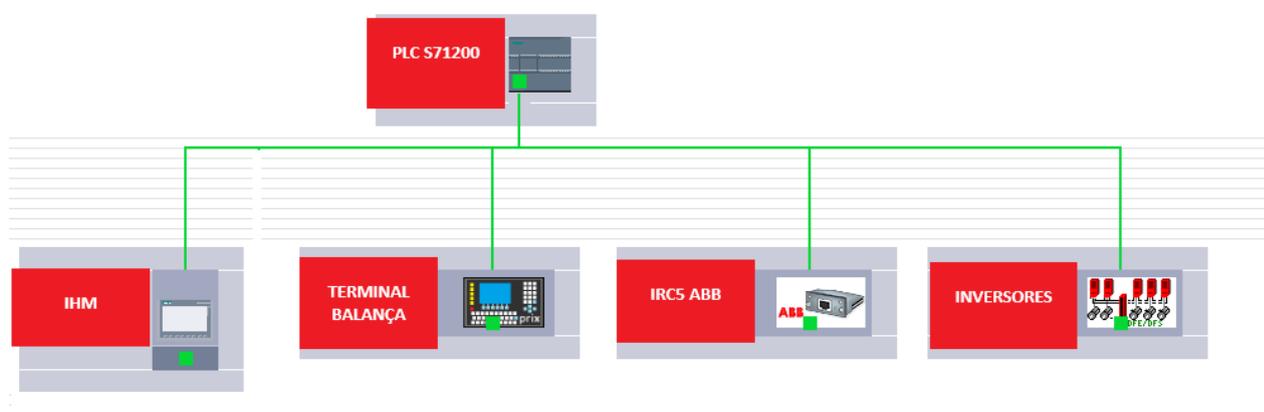


Figura 12 – Arquitetura de rede. Fonte: Autor

Após a instalação dos arquivos GSDML de cada um dos dispositivos conectados a rede, fez-se necessário a configuração de cada um deles, para isso foram configurados por meio do *software* TIA PORTAL os nomes dos dispositivos(1), os endereços de ip(2) e as palavras de dados(3) conforme ilustrado na Figura 13.

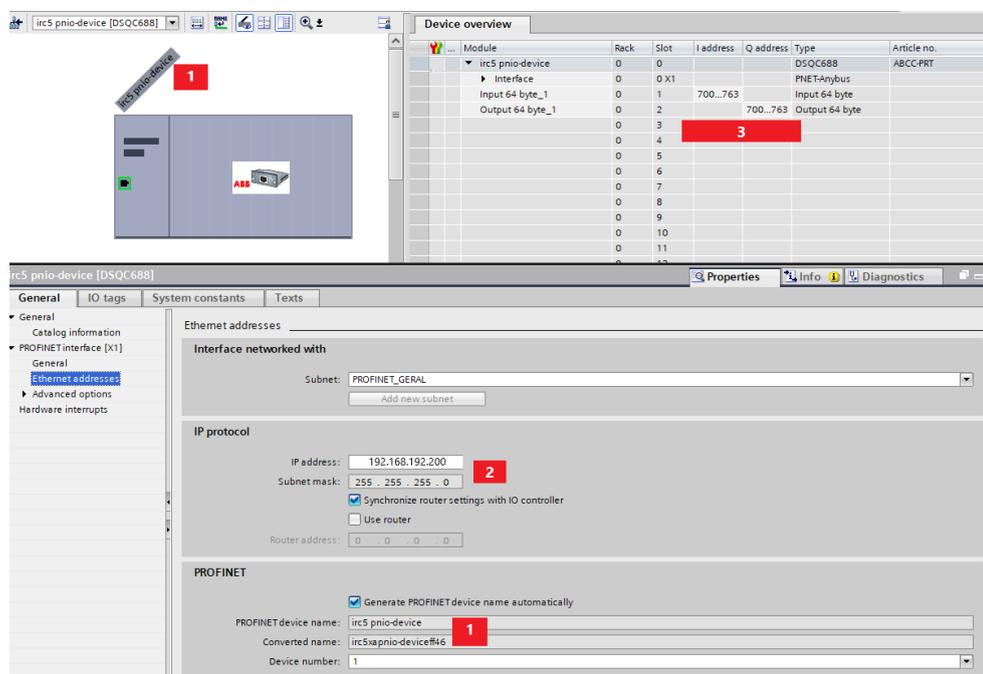


Figura 13 – Configuração dos parâmetros de rede. Fonte: Autor

Também no *software* TIA PORTAL é realizado toda a programação do CLP, a Figura 14 ilustra um trecho de um código de programação da etapa de montagem de caçambas no disco rotativo pelo braço robótico.

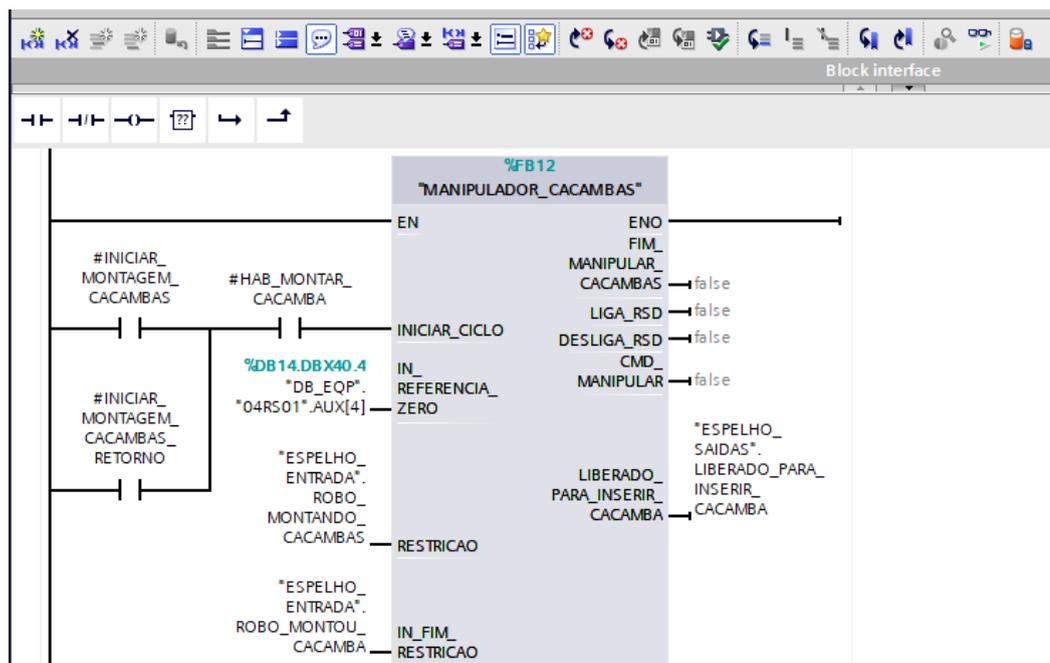


Figura 14 – Trecho do código de programação. Fonte: Autor

3.4.2 Controlador IRC5 do robô e braço robótico

O CLP, atuando como mestre, envia todas as requisições ao controlador do braço robótico por meio da rede PROFINet, garantindo que as tarefas desejadas sejam executadas no momento exato. Quando uma palavra de dados é enviada ao controlador IRC5, essa informação é processada e uma rotina previamente programada é acionada. Sempre que o controlador do robô recebe uma solicitação do CLP, ele verifica as condições para a execução da rotina. Caso sejam atendidas, o sistema entra em uma estrutura de controle do tipo IF-ELSE-END IF, na qual a trajetória a ser seguida pelo braço robótico é definida. Durante a execução da trajetória e ao final da tarefa, o controlador IRC5 envia de volta ao CLP uma palavra de dados que contém informações detalhadas sobre o status da requisição, a execução da tarefa e sua conclusão. Por meio das palavras de dados recebidas é possível que o CLP monitore com precisão o progresso da operação realizada pelo braço robótico, assegurando um controle eficaz e em tempo real do processo. A troca de informações entre os controladores e o braço robótico é ilustrada no fluxograma da Figura 15.



Figura 15 – Fluxograma da troca de dados entre robô e CLP. Fonte: Autor

3.4.3 Descritivo operacional e programação

O controle e a automação da célula de preparação de amostras de minério de ferro foram desenvolvidos para que, à partir dos dados cadastrados pelo operador via IHM e inserção da amostra no ponto inicial do processo, o braço robótico e os equipamentos automatizados possam funcionar de forma a dividir e homogeneizar a amostra conforme determinam as normas e procedimentos da empresa do ramo de mineração para o qual o projeto foi desenvolvido.

O processo se inicia no momento do cadastro, realizado via IHM pelo operador, no qual são inseridos todos os dados importantes para a correta execução do processo automatizado, como massa total da amostra de entrada, tipo de material (*sinter feed*, *coarse pallet feed*, *lump ore* ou *hematitinha*), ponto de coleta (amostra de produção, carregamento de trem, geologia ou de processo) e se a amostra que será analisada foi extraída de uma mina dessa própria empresa ou se essa amostra analisada foi adquirida de uma mineradora externa. Todos os dados inseridos são importantes para definição da correta receita que será utilizada durante execução do processo.

Efetuada o cadastro, é habilitado o início do processo por meio de um comando em um botão da IHM. Após a execução do comando ‘START’ na IHM e após o operador ter despejado o material no primeiro equipamento (um silo com um moto vibrador acoplado), o processo automatizado é iniciado. O processo acontece em quatro conjuntos de equipamentos, sendo eles:

1. Chevron: Composto por um moto vibrador acoplado a um silo (1), uma comporta reguladora de material (2), uma esteira inclinada que realiza a alimentação de uma segunda esteira (3) e uma segunda esteira horizontal que realiza movimentos alternados em direções opostas (vai e vem) (4), totalizando quatro motores acionados por quatro inversores que são controlados pelo CLP via rede PROFInet. A Figura 16 ilustra as posições e os quatro equipamentos que compõem o conjunto Chevron.

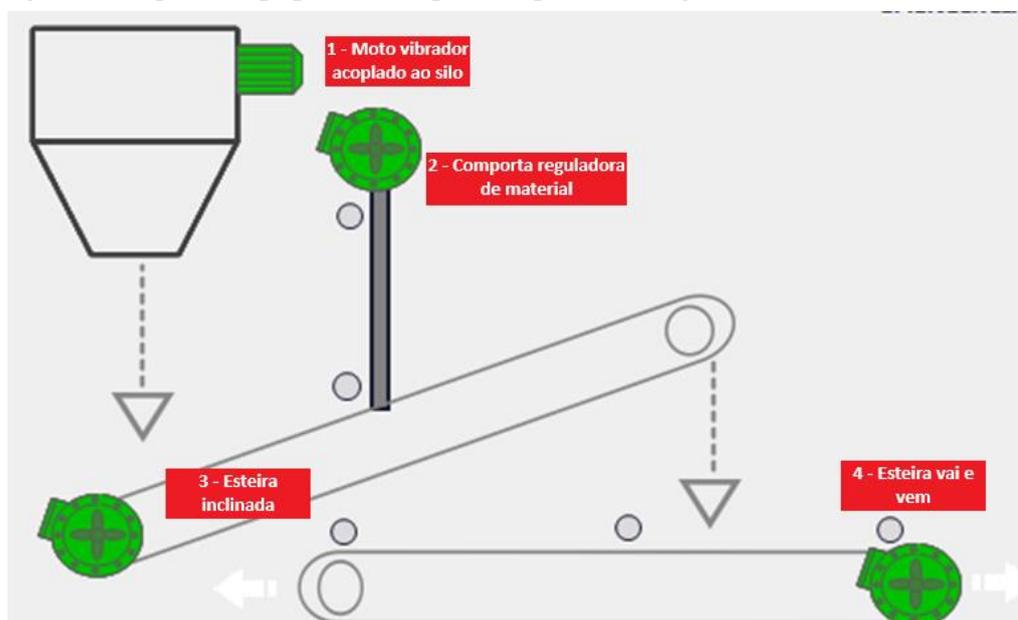


Figura 16 – Conjunto Chevron. Fonte: Autor

2. RSD: Composto por um moto vibrador acoplado a um silo (1), uma comporta reguladora de material (2), uma esteira inclinada que realiza a alimentação de um disco rotativo (3) e um disco rotativo (4), totalizando quatro motores acionados por quatro inversores que são controlados pelo CLP via rede PROFINet. A Figura 17 ilustra as posições e os equipamentos que compõem o conjunto RSD.



Figura 17 – Conjunto RSD. Fonte: Autor

3. Braço robótico ABB de 06 eixos (RRR) com controlador IRC5 que comunica pelo modelo mestre-escravo com CLP via rede PROFINet;
4. Rifles para transferência de amostra de minério de ferro automatizado

Durante a execução de toda a sequência, todos os equipamentos são posicionados e parametrizados conforme valores de *set-point* definidos na memória do CLP para cada um dos conjuntos de configurações possíveis, baseados nos dados de entrada inseridos na IHM.

Inicialmente, no conjunto 1, ilustrado na Figura 16, o moto vibrador, a comporta reguladora de material, a correia inclinada e a correia vai e vem, ligam na velocidade e posição definida em receita específica para aquela amostra. Para que o moto vibrador e a correia inclinada liguem, é necessário que os dados referentes a posição da comporta e o retorno de funcionamento do motor da correia vai e vem sejam enviados ao CLP, evitando problemas na realização do ensaio e funcionamento do processo como um todo. Com todas as condições satisfeitas, o moto vibrador e a esteira inclinada ligam e o material começa a ser despejado na esteira vai e vem, essa qual fará o empilhamento do material que está sendo despejado, assim homogeneizando o material.

Simultaneamente, o controlador do braço robótico, em posse dos dados de entrada da amostra, envia comandos ao braço robótico para fazer a montagem de caçambas no disco rotativo do conjunto 02, ilustrado na Figura 17, retirando-as da posição de descanso do gaveteiro posicionado ao lado do disco. A montagem de caçambas é realizada conforme define a receita específica referente à amostra que está sendo preparada na célula, podendo ser montadas simetricamente no disco 4, 8 ou 16 unidades.

Após a montagem pelo robô (conjunto 3) no disco (conjunto 2) e a homogeneização

pelo método Chevron (conjunto 1), o sistema está apto para iniciar a etapa de divisão de amostras. Se todos os equipamentos do conjunto 2 estiverem funcionando corretamente, a esteira vai e vem do conjunto 1 liga em direção aos equipamentos do conjunto 2 para descarregar o material homogeneizado em seu moto vibrador. Com todos os equipamentos do conjunto 2 em pleno funcionamento, a esteira inclinada e o moto vibrador deste conjunto de equipamentos transferem o material de forma a alimentar o disco rotativo que agora é composto pelas caçambas que foram montadas pelo braço robótico. Dado o fim do tempo de alimentação do disco pré-estabelecido e definido conforme receita selecionada automaticamente pelo CLP, os equipamentos desligam e a etapa de divisão da amostra no disco (alimentação do disco) se encerra, passando para a próxima etapa que é a etapa de divisão de amostras em bandejas utilizando o equipamento do conjunto 04 (rifles para transferência de amostra de minério de ferro automatizado).

Na etapa de divisão de amostras em bandejas, o braço robótico inicia o processo de retirada de caçambas do disco rotativo e transferência para o rifles automatizado. No interior do rifles existe um sistema mecânico que realiza a transferência e divisão da amostra despejada em três bandejas, posicionadas na parte inferior do equipamento. Em sequência da transferência da caçamba para o rifles, o braço robótico guarda a caçamba em sua posição de repouso (gaveteiro).

Para alcançar o objetivo de dividir de forma homogênea a amostra de minério de ferro, é necessário que um número específico de caçambas sejam invertidas no rifles de transferência e as bandejas sejam retiradas do equipamento para serem entregues ao operador após o número exatos de caçambas transferidas, conforme definido na receita referente àqueles dados de entrada inseridos no início do processo pelo operador.

Primeiramente o braço robótico realiza a retirada das caçambas voltados ao ensaio granulométrico e sequencialmente entrega as bandejas em uma janela para o operador, secundamente o braço robótico retira as caçambas voltadas ao ensaio químico e sequencialmente entrega as bandejas em um janela para o operador, terceiramente o braço robótico retira as caçambas voltadas ao ensaio de umidade e sequencialmente entrega as bandejas em uma janela e, por fim, o braço robótico retira do disco as caçambas que servirão como reserva para uma possível repetição de testes e sequencialmente entrega as bandejas em uma janela para o operador. Realizado todas as entregas das bandejas, repouso de todas as caçambas no gaveteiro e desligado todos os equipamentos; a sequência automática é encerrada.

Para o correto funcionamento da sequência, a posição do disco é monitorada fazendo uso de sensores fotoelétricos difusos para contar as posições que são identificadas realizando uma leitura de chapas metálicas soldadas ao disco. Na parte inferior do disco existe um cilindro pneumático com um indexador cônico que é responsável por indexar ao disco e garantir a exata posição do equipamento para possibilitar referência durante a manipulação das caçambas pelo braço robótico.

Resíduos podem ser gerados e fragmentos podem ser acumulados no disco, principalmente nas sequências que têm como receitas a montagem inferior ao total de caçambas (abaixo de 16), portanto, entre as etapas e ao fim da sequência ciclos de limpeza utilizando rodos de borracha e ar comprimido são executados.

Todos os inversores, dispositivos e equipamentos são monitorados. Todos os dados relevantes são utilizados para gerar falhas e prevenir problemas no processo. Caso um dispositivo ou equipamento não performe conforme deveria, todo o processo é pausado até que reestabelecido e tratado o problema. O equipamento é completamente sensorizado e controlado. As Figuras 18 e 19 ilustram o fluxograma que descreve a sequência de operação da célula de preparação de amostras robotizada.

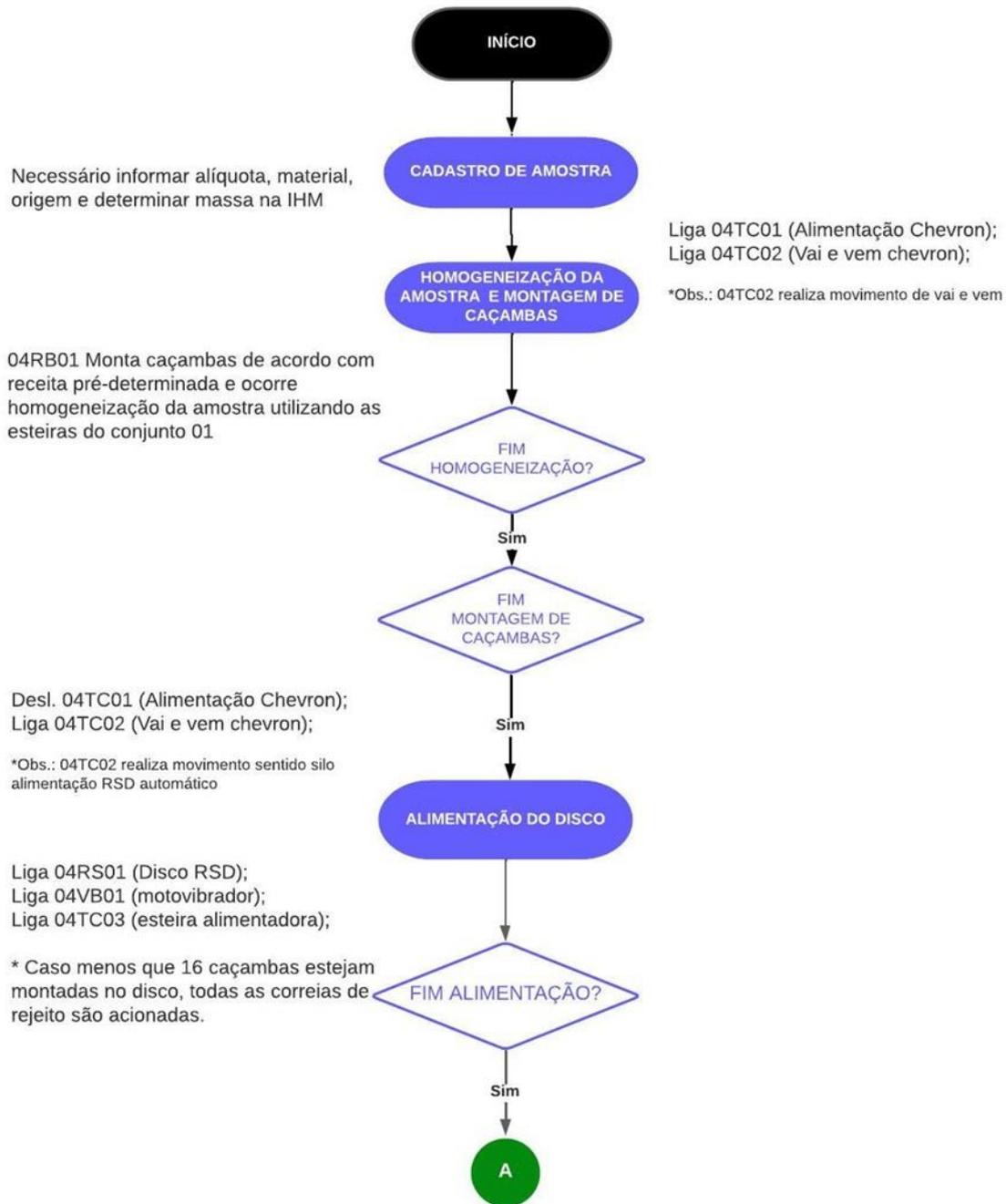


Figura 18 – Fluxograma 01 do processo. Fonte: Autor

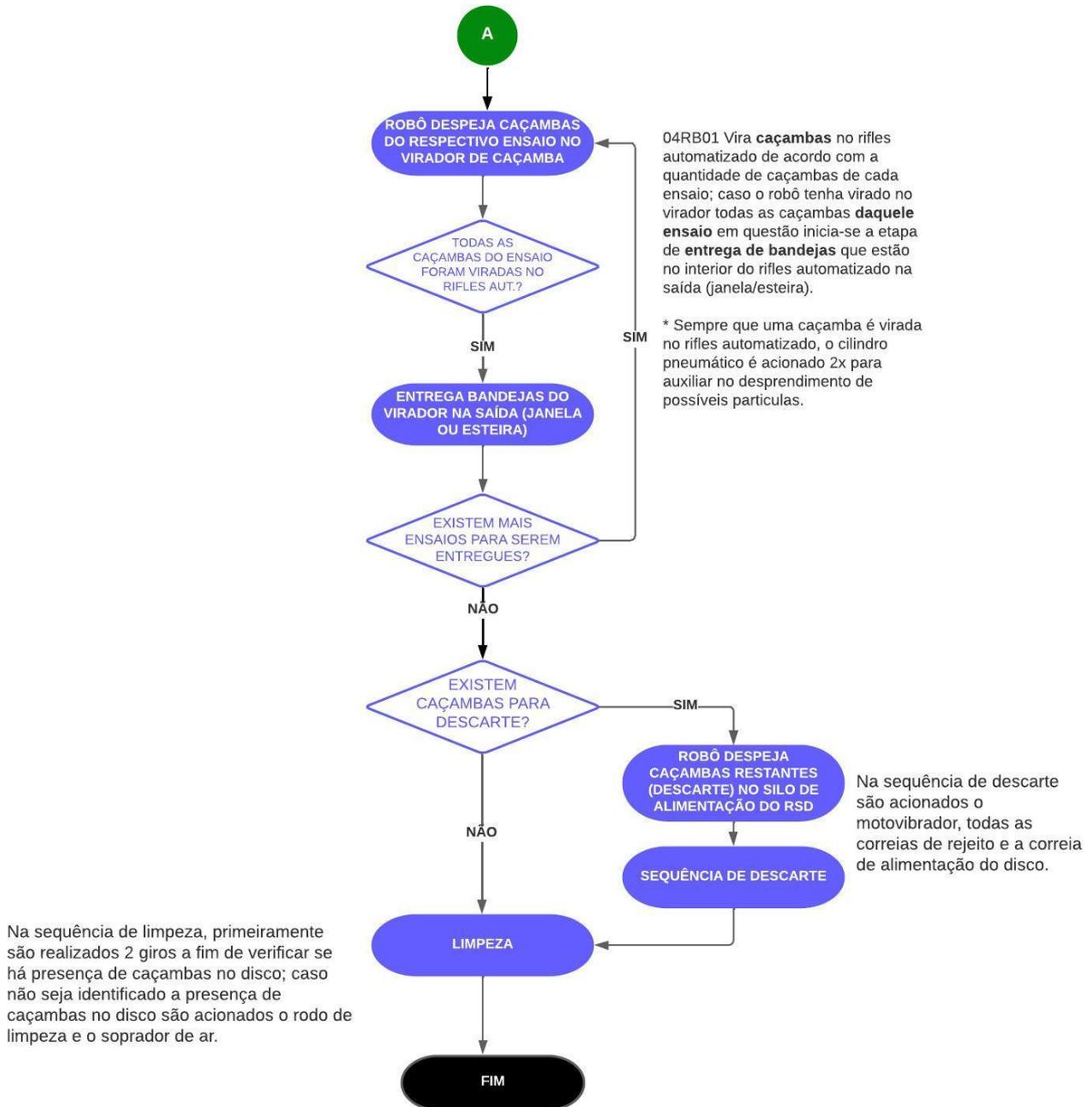


Figura 19 – Fluxograma 02 do processo. Fonte: Autor

4 RESULTADOS

A implementação da célula automatizada de preparação de amostras de minério de ferro alcançou os objetivos propostos, resultando em um processo altamente eficiente e funcional. A automação, permitiu a realização dos processos de homogeneização e divisão das amostras com uma precisão significativa, conforme regido pelas normas globais e pelos procedimentos estabelecidos pela empresa de mineração.

Com o desenvolvimento do processo automatizado tornou-se possível realizar a preparação de amostras de minério de ferro e a divisão da amostra em alíquotas menores a partir do cadastro de dados pelo operador via IHM, permitindo ao sistema prosseguir com a execução dos procedimentos de homogeneização e divisão conforme a receita específica para cada amostra. A utilização do método Chevron para a homogeneização e o disco rotativo para a divisão foram comprovadamente eficazes, resultando em uma preparação uniforme das amostras.

A capacidade de projeto não foi atendida, mas foi possível chegar próximo aos valores estimados. O tempo médio final para a realização de cada ensaio de preparação de amostra foi de 34,5 min. Considerando 150 minutos de manutenção preventiva e corretiva diária a capacidade real da célula obtida foi de 37 ensaios ao dia, conforme evidenciado na Tabela 03.

Especificações	
Número máx. de amostras por equipamento:	1
Número máx. de ensaios cadastrados e em execução na célula:	1
Tipos de materiais permitidos:	L.O, SINTER-FEED, CORSE SINTER-FEED, HEMATITINHA, PFF
Número médio de ensaios/dia:	37
Massa máxima:	300kg

Tabela 3 – Capacidade real da célula. Fonte: Autor

Todos os conjuntos de equipamentos, incluindo os moto vibradores, as comportas, as esteiras, o disco rotativo e o braço robótico, foram controlados e monitorados com sucesso pelo CLP via rede PROFINet. A automação garantiu que cada etapa do processo fosse realizada com precisão, desde a homogeneização até a divisão das amostras em bandejas.

A automação resultou em uma significativa redução do esforço físico e das atividades repetitivas enfrentadas pelos operadores. Com a transferência do esforço físico realizados pelos operadores para os equipamentos automatizados, o projeto contribuiu para a preservação da saúde ocupacional e bem-estar dos colaboradores, minimizando o risco de lesões e fadiga associados ao trabalho manual intenso. Um estudo detalhado ainda não foi realizado para determinar valores e percentuais, mas, se levado em consideração o tempo de exposição do colaborador durante a atividade e a quantidade de carga erguida, o ganho estimado é de

aproximadamente 90% da redução do esforço físico total, tal como o esperado.

As funções e telas desenvolvidas na IHM funcionaram conforme o esperado, permitindo um monitoramento eficaz e a controle do processo automatizado.

A implementação de ciclos de limpeza para a manutenção dos equipamentos e a monitorização constante dos inversores e dispositivos garantiram o bom desempenho do sistema ao longo do processo.

A célula automatizada conseguiu garantir a qualidade e representatividade das amostras preparadas, fator essencial para a precisão das análises laboratoriais e para a tomada de decisões estratégicas na indústria mineral em questão.

5 CONCLUSÃO

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver e implementar uma célula de preparação de amostras de minério de ferro totalmente automatizada, controlada por um CLP e um braço robótico, visando reduzir o esforço físico do operador, mitigar riscos e aprimorar a qualidade e precisão na preparação de amostras.

No escopo dos objetivos específicos, buscou-se:

- Projetar e implementar a célula de preparação de amostras;
- Analisar a eficiência do método chevron e quarteamento utilizando disco rotativo na homogeneização;
- Avaliar a precisão do disco rotativo na divisão das amostras;
- Desenvolver um sistema para monitorar e controlar o processo.

Sendo assim, pode-se concluir que o desenvolvimento e a implementação da célula automatizada de preparação de amostras de minério de ferro cumpriram plenamente os objetivos estabelecidos, demonstrando a eficácia da automação na melhoria dos processos laboratoriais. A integração bem-sucedida do CLP, do braço robótico e dos diversos conjuntos de equipamentos possibilitou a realização de tarefas complexas de maneira eficiente e com alta precisão.

Além dos benefícios operacionais, a automação trouxe avanços significativos na saúde ocupacional, reduzindo o esforço físico exigido dos operadores e promovendo um ambiente de trabalho mais seguro e confortável. O processo de automação não apenas otimizou a eficiência e a precisão das análises, mas também contribuiu para o bem-estar dos colaboradores, alinhando-se às melhores práticas de saúde e segurança no ambiente industrial.

A realização deste projeto evidencia a importância da automação na indústria de mineração, mostrando como tecnologias avançadas podem transformar processos laborais, promover a saúde dos trabalhadores e melhorar a qualidade das análises. O sucesso desta implementação serve como modelo para futuras inovações na automação de processos industriais e laboratoriais e sugestão para implantação de processos robotizados que propiciem avanços na saúde ocupacional e que promova um ambiente que possua como pré-requisito a segurança e a confiabilidade.

Como sugestão de trabalho futuro, propõe-se o desenvolvimento de uma célula robótica que realize a inserção automática de amostras no início do processo, visando reduzir ainda mais o esforço físico dos operadores e otimizar o abastecimento do processo, alinhando-se com os objetivos de melhoria contínua da eficiência e segurança no ambiente industrial.

REFERÊNCIAS

- MACIEL, G. S.; DOS GUARANYNS, C. A. L. B.; PESSANHA, R. R.; DE FARIA, R. M.; DE MATTOS MORGADES, R. F. K. Principais métodos de estocagem de minério de ferro: uma abordagem teórica. *Exatas & Engenharias*, v. 3, n. 06, 2013. Citado na página 13.
- FERREIRA, F. M.; CHAVES, A. P.; DELBONI, H. Conditional simulation method for design of blending piles. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTER APPLICATIONS IN THE MINERAL INDUSTRIES, 23., 1992, Phoenix. *Proceedings*. Phoenix: [editora], 1992. p. 615–623. Citado na página 13.
- SILVA, Dirceu Mateus da; SILVA, Wesley Nunes da; NASCIMENTO, Daniel Junior Ferreira. Utilização do CLP para Realização de Controle Automático em Processos Industriais. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, ano 03, ed. 06, v. 02, p. 56-83, junho 2018.
- SILVA, João. Aperfeiçoamento da estratégia de homogeneização em pilhas chevron utilizando simulação geoestatística. *Revista Escola de Minas*, v. 73, n. 2, p. 123-134, 2023. Citado na página 13.
- SILVA, J. R.; PEREIRA, M. L. Quarteamento de amostras: técnicas e importância. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 50, n. 2, p. 123-130, 2023.
- MARQUES, Diego Machado. Métodos estocásticos aplicados a definição de estratégias de amostragem e homogeneização. 2014.
- SIEMENS. CLP SIMATIC S7 1200. Siemens, 2024. Disponível em: <<https://www.siemens.com/br/pt/produtos/automacao/controladores/s7-1200.html>>. Citado na página 16.
- ABB. ROBÔ ABB 6620. Abb, 2024 Disponível em: <<https://new.abb.com/products/robotics/robots/articulated-robots/irb-6620>>. Citado na Página 18.
- FESTO. ATUADORES. Festo, 2024. Disponível em: <https://www.festo.com/br/pt/c/produtos/atuadores-id_pim5/>. Citado na página 20.
- BASTOS FILHO, Teodiano Freire; FERRARI, Av Fernando. **Aplicação de Robôs nas Indústrias**. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES. Disponível em: <<http://www2.ele.ufes.br/~tfbastos/RobMov/robosindustriais.pdf>>. Citado na página 14.
- DE SOUZA LARA, Gabriel; DALLAZEN, Henrique Begnini. **Braços robóticos**. *Revista Tecnológica da UniFatec-PR*, v. 2, n. Edição Especial, 2020.
- AMINAIE, Pouya; AMINAIE, Poorya. Profinet vs Profibus. arXiv preprint arXiv:2011.14167, 2020.
- BRISOLA, Daisiana Frozi. Otimização no preparo de amostras para análise em espectrofotômetro de fluorescência de raios X. 2008.
- MAZZAROPPI, Marcelo. Sensores de movimento e presença. 2007.
- DE BEM SOUSA, Vinicius et al. SENSOR INDUTIVO. In: 6º SICT-Sul-Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense. 2017.