

# Automação do Teste de Compressão de Pelotas de Minério de Ferro Verdes usando Visão Computacional

Janderson Antonio Ferreira dos Santos  
Antonione da Silva Mascarenhas Pinho  
Caio Lopes de Oliveira  
Marco Antônio de Souza Leite Cuadros  
Gustavo Maia de Almeida  
Ricardo Olympio de Freitas

*janderson.eng.mec@gmail.com*

*antonione@gmail.com*

*caio.lopes.oliveira22@gmail.com*

*marcoantonio@ifes.edu.br*

*gmaia@ifes.edu.br*

*ricardo.olympio@vale.com*

*PROPECAUT- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Controle e Automação – Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)*

*ES-010 Km 6,5 – UFES-CEP 29173-087, Manguinhos, Serra – ES, Brasil*

**Resumo:** Pelotas de minério são um insumo essencial na produção de aço, matéria-prima de extrema importância na produção de diversos produtos em nossa sociedade

Pelotas de minério são fabricadas a partir do processo de pelotização de minério e sinter, produto de grande importância na cadeia mundial da produção de aço atualmente. Durante o processo de fabricação, ainda em seu estágio inicial, as denominadas pelotas cruas passam por um controle de resistência mecânica e dimensional para determinar se são aprovados ou não para uso, assim prosseguindo para próxima etapa da produção, onde são aquecidas em um forno com atmosfera oxidante para adquirir suas propriedades finais, quando passam a ser denominadas pelotas queimadas. Este artigo discute o desenvolvimento de um teste automatizado de compressão de pelotas cruas usando sistema de visão computacional para localizar as pelotas e o deslocamento necessário para a zona de compressão. Este artigo apresenta os resultados preliminares sobre o algoritmo em desenvolvimento, focados principalmente ao algoritmo de localização das pelotas usando visão computacional.

**Palavras-chaves:** Análise pelotas verdes, Automático, Inteligente, Visão computacional.

## 1 Introdução

Com a grande evolução da área tecnológica, onde podemos controlar basicamente tudo a partir de um celular, os processos industriais também acompanham essa grande tendência através da implementação da indústria 4.0, chamada também da quarta revolução industrial. Este conceito está relacionado a análise de dados, Inteligência Artificial, Big Data, Internet das Coisas - IOT, Visão Computacional, Computação na Nuvem entre outros, gerando maior acessibilidade e controle da indústria em qualquer local, garantido maior assertividade nas tomadas de decisões e atingindo um alto padrão de eficiência. Na área da metalurgia, especificamente no processo de pelotização, temos como exemplo ([1] e [2]) a aplicação da visão computacional para monitoramento e dimensionamento de pelotas verdes, o que poderia possibilitar a automação do disco de pelotização de pelotas de minérios verdes, garantindo maior eficiência no processo e garantido um grande geração de dados reutilizáveis imprescindíveis para aprimoramento do processo de pelotização e fabricação do aço.

No Brasil o marco da pelletização teve início no final da década de 60, com a Companhia Vale do Rio Doce sendo pioneira na produção de pelotas na América do Sul [3]. Atualmente, o Brasil é o segundo maior produtor de minério de ferro do mundo, com cerca de 235 milhões de toneladas, sendo extraídas do Quadrilátero Ferrífero, em Minas, na Serra dos Carajás, no Pará, e no Maciço do Urucum, no Mato Grosso do Sul [4].

A produção de pelotas, traz uma uniformidade física e química, convencionalmente após a pelletização nos altos-fornos, onde as pelotas alcançam no mínimo 65% de teor de ferro [5]. No processo, o calor é utilizado para realizar a fundição do ferro, assim diminuindo consideravelmente o consumo de combustíveis. Destaca-se também na pelletização o tamanho uniforme médio de 12mm [6], com uma forma esférica e ausência de escórias. A pelota tem características físicas permeáveis para transposição de gases na coluna do alto forno, assim diminuindo também as perdas.

Os testes para verificar a resistência das pelotas ainda é feito de forma manual. Após a saída das pelotas por lote, é extraída uma pequena porção para análise tátil visual e para o teste de resistência mecânica através da aplicação de uma força de compressão, sendo realizada por técnicos da área de qualidade. Tal procedimento pode não apresentar a confiabilidade necessária por ser feito manualmente, logo, correndo o risco de não apresentar repetibilidade. O estado do Espírito Santo é o maior exportador de pelotas de minério de ferro do mundo [7], com empresas como a Vale e Samarco. Sendo este um fator motivacional para realização deste projeto.

Dessa forma, este estudo propõe automatizar o teste de compressão de pelotas cruas, utilizando visão computacional para localização das pelotas e o seu deslocamento para a zona de compressão. Neste trabalho são apresentados resultados do algoritmo de localização, e resultados preliminares do desenvolvimento do protótipo. O artigo está dividido em 4 seções, na segunda são apresentados os conceitos básicos de pelletização e sua produção, a terceira seção trata sobre a proposta e os resultados, e finalmente na quarta seção são descritas as conclusões.

## 2 Pelotização

A pelletização é o processo de aglomeração das finas partículas de minério de ferro ( $< 0,150\text{mm}$ ) denominadas *pellet feed*, sendo o minério um insumo vital para garantir a qualidade física e química da pelota após o processo de endurecimento térmico [8]. O processo consiste [5] na geração de aglomerados esféricos, denominados como pelotas de minério de ferro, fabricados a partir da união de finos de minério de ferro e sinter, seguindo as seguintes características: Dimensões contidas na faixa de 8 a 16 milímetros; Elevada resistência mecânica; Porosidade alta e uniforme entre 25% a 30%; Resistência a fratura no transporte e abração nos altos fornos; Teor de ferro na proporção de 63% a 64%.

### 2.1 Processo de formação das pelotas verdes(cruas)

Etapa de aglomeração de toda matéria prima em forma esférica, com características dimensionais na faixa de 8 a 16mm de espessura e com propriedades físicas de resistência mecânica que devem suportar uma força de compressão entre 10N a 20N para as etapas posteriores de transporte e endurecimento nos fornos, sendo de vital importância para atingir a qualidade final esperada do produto [5]. Dentre os equipamentos para produção das pelotas destacam-se: o disco de pelletização e os tambores; sendo o disco de pelletização mais favorável em decorrência dos fatores operacionais à rotação das pelotas deixando-as mais arredondadas. O fluxo do processo de pelletização usando o disco de pelletização pode ser observado na Fig. 1.

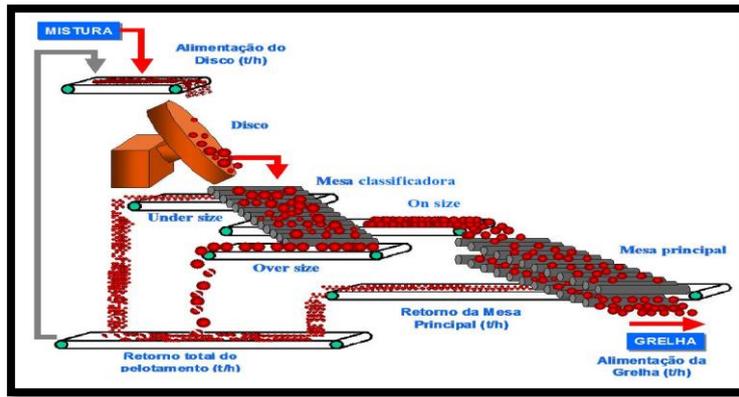


Figura 1. Fabricação de pelotas utilizando discos. Adaptado de [9].

Depois do disco de pelotização as pelotas são transportadas por correias até mesas vibratórias e rolos separadores, para descartar pelotas com dimensões menores às especificadas, e as pelotas rejeitadas retornam ao disco para sua correção dimensional.

## 2.2 Pelota secas

Finalizando o processo de fabricação de pelotas de minério de ferro, após a separação nos rolos e mesas vibratórias, as pelotas cruas são levadas através de correia transportadoras até o forno de pelotização com objetivo de fazer a cura por aquecimento, o que dará maior resistência mecânica as mesmas para suportarem tanto o manuseio de transporte, como as cargas operacionais no alto forno nas operações de redução. A temperatura realizada durante o tratamento térmico varia entre 1300 a 1350 graus Celsius, abaixo da temperatura de fusão do minério de ferro. Para a produção do aço as pelotas devem apresentar como valor mínimo de resistência à compressão, 210 kgf, garantindo uma alta produção decorrente da boa permeabilidade no leito[10], sendo recolhida de forma aleatória amostras para análise do produto final e o atendimento de suas propriedades exigidas para serem comercializadas. Podemos visualizar a seguir na Fig. 2 o fluxograma da empresa Vale onde podemos observar todos os processos mencionados.

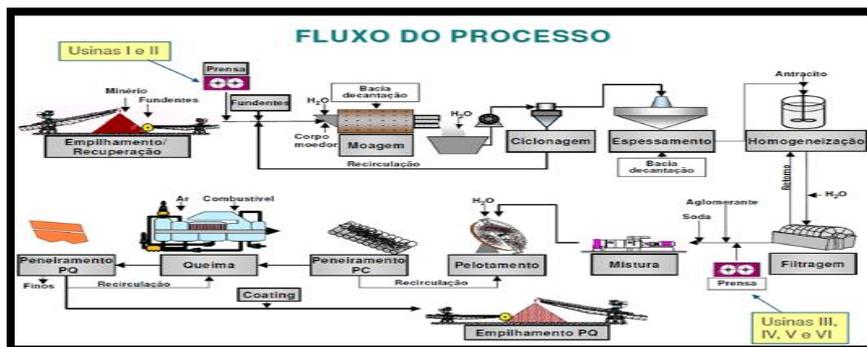


Figura 2 – Fluxograma do processo pelotização. Adaptado de [3]

## 3 Proposta e Resultados

Sendo a proposta apresentada neste estudo o desenvolvimento de dispositivo automático para análise de pelotas de minério de ferro. O protótipo consistira por 4 partes principais, que são: Disco alimentador de pelotas (este receberá as pelotas de análise); Câmera (a qual fornecerá o monitoramento constante do processo, que servirá de base para o fornecer o posicionamento das pelotas em tempo real e seu deslocamento); Máquina de ensaio

universal (realiza o ensaio de compressão na pelota até sua fratura); Proteção externa (servindo para o isolamento dos componentes, assim, garantindo a segurança do operador e de interferências nas análises). A figura 3 representa a ideia dessa proposta.

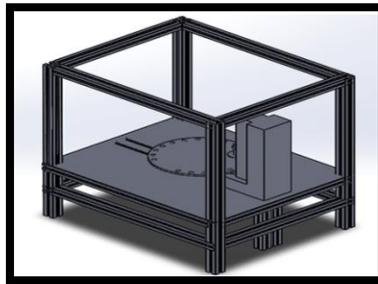


Figura 3. Modelo protótipo em desenvolvimento.

### 3.1 Hardware

O hardware proposto para o protótipo será multithreading e possuirá parte do software controlado pelo computador e outra parte pela MyRIO, placa de avaliação embarcada em tempo real fabricada pela National Instruments. O computador, além de fornecer informações de extrema importância para que a MyRIO execute o seu processo com êxito, também será o responsável por atuar na imagem gerada pela câmera do protótipo, uma Logitech BRIO 4k, dessa forma fazendo com que seja possível verificar cada frame do vídeo em tempo real e identificar o exato momento em que a pelota de minério se encontra abaixo do compressor, para então iniciar a compressão. Vale ressaltar que após cada remessa de testes, este também irá gerar um relatório com dados cruciais para que a análise do material seja feita.

Por outro lado, a MyRIO atua nos motores de passo responsáveis pela movimentação do disco de pelotas e do compressor, além de ser a responsável por tratar os dados de leitura da célula de carga, que são lidos por um Arduino Uno. Após receber os dados necessários do computador, a placa de avaliação embarcada passa a enviar pulsos aos motores de passo, movendo assim o disco de pelotas ou fazendo com que o material responsável por comprimir se mova pela torre do compressor, sendo que no segundo caso ela também checa os sensores de fim de curso durante todo o movimento para evitar que ocorra algum acidente que possa ocasionar um defeito na máquina. Na Fig. 4 foram demarcados os principais componentes instalados no protótipo, sendo de nomencladora 1 -para a Câmera, 2 - Célula de carga, 3 - Fonte 12 volts, 4 - Drive, 5 e 6 -Motores, sendo os outros componentes com MyRio, Arduino e computador ainda não instalados ainda na estrutura do protótipo, que se encontram as espera da chegada dos componentes estruturais.

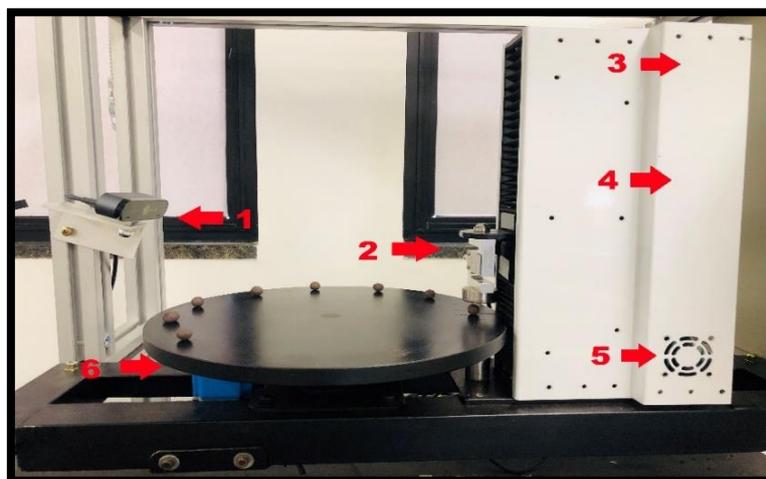


Figura 4. Estado atual do protótipo para teste de compressão

### 3.2 Software

Através do algoritmo construído é possível acessar estados que movimentam o compressor para qualquer posição e também o disco de pelotas, além de possuir casos que tratam situações onde o compressor atinge o limite de subida (fim de curso mais alto) e o limite de decida (fim de curso localizado na parte mais baixa da estrutura do compressor) e também que atua na limpeza da máquina. O software escolhido para a implementação desse código de programação foi o LabVIEW, o mesmo possui uma linguagem de programação gráfica e foi desenvolvido pela National Instruments. Seus principais campos de aplicação são realizações de medições e processos de automação. Como sua programação é feita de acordo com o modelo de fluxo de dados, essa linguagem apresenta vantagens para aquisição de dados, bem como para o tratamento dos mesmos.

Os programas em LabVIEW são chamados de instrumentos virtuais ou, simplesmente, IV's. São compostos pelo painel frontal, que contém a interface, e pelo diagrama de blocos, que contém o código gráfico do programa. O programa não é processado por um interpretador, mas sim compilado. Deste modo a sua performance é comparável à exibida pelas linguagens de programação de alto nível. A linguagem gráfica do LabVIEW é chamada "G".

Dessa forma, optamos por criar diferentes programas ou instrumentos virtuais, no software, tornando o projeto mais organizado e conseqüentemente aumentando também sua viabilidade. Sendo um IV responsável por controlar a máquina de estados de todo o processo e também efetuar a leitura da célula de carga e os fins de curso do compressor, outro para fazer a geração do relatório com os dados mais relevantes do teste, e também um programa para efetuar a aquisição das imagens, bem como o processamento das mesmas. Assim, trabalhamos com variáveis globais, que são variáveis que estão presentes em dois ou nos três códigos e fazem a comunicação entre eles. Trabalhando dessa forma, conseguimos alcançar o objetivo de identificar o momento em que a pelota se encontra abaixo do compressor, para acionar o mesmo e também guardar os dados gerados nessa compressão, como a força suportada pela pelota, o momento de sua ruptura e o deslocamento do compressor durante esse processo.

O painel de controle responsável por atuar na máquina de estados do protótipo consiste em alguns botões que enviam ordens para os motores do compressor e do disco de pelotas, também pode iniciar o teste autônomo com a remessa de pelotas, e nos mostra alguns dados importantes para a avaliação do teste, como a medição da célula de carga, a posição do compressor baseada na contagem dos pulsos enviados pra ele, além do atual estado em que o código está operando, sendo visualizado na Fig. 5 com enumeração 1 o painel de controle e com enumeração 2 o modelo de relatório proposto.



Figura 5. Modelo painel controle atual e relatório proposto

### 3.3 Módulo visão utilizado

O módulo de visão do protótipo é um dos mais importantes para que o teste obtenha êxito. O mesmo também

apresenta uma certa dificuldade para identificar as pelotas na posição de interesse 100 por cento das vezes em que o teste ocorre. Sendo assim, é crucial a necessidade de trabalhar nas variáveis do processo de aquisição das imagens, assim como o processamento das mesmas. Para então, diminuir bastante as chances de uma falsa detecção ou de uma não detecção equivocada. Sendo assim, é fundamental preparar um bom ambiente, com iluminação controlada e pouca poluição na imagem, como excesso de cores ou objetos, e também utilizar equipamentos de cores diferentes às das pelotas na área próxima à zona de compressão. Segue abaixo as principais etapas da aquisição e do tratamento das imagens, sendo na Fig. 6 o painel do processo de filtros utilizados no vision assistant.

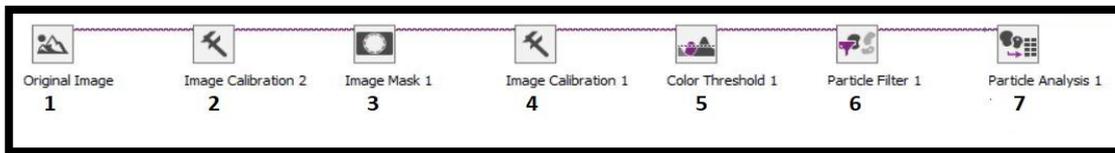


Figura 6. Etapas recursos imagens utilizados

A primeira etapa do módulo de visão é a aquisição da imagem. Após tratar variáveis que influenciam diretamente na qualidade de cada frame que será analisado, como a quantidade de brilho, o valor do foco, a nitidez e até mesmo a temperatura da luz, é possível obter a melhor imagem e assim começar o processamento da mesma, como mostrado na imagem capturada pelo software e demonstrada na Fig. 7 com enumeração 1. Vale ressaltar também, a importância da iluminação do ambiente para o aprimoramento da aquisição. Na etapa 2 realizamos o Roi, ferramenta que permite selecionar parte da imagem fornecida, para dessa forma focar na região de interesse da imagem, que nesse caso é a parte que se encontra abaixo do compressor, na zona de compressão, como mostra a Fig. 7 abaixo com enumeração 2 a posição do Roi na imagem capturada pelo algoritmo. Na etapa 3 realizamos o processo de calibração da imagem, responsável por fornecer a distância de cada pixel em centímetros, assim, possibilitando que sejam feitos filtros relacionados a medida real da área dos objetos da imagem e também relacionado a distância deles para o centro do eixo cartesiano gerado, demonstrado na Fig. 7 com enumeração 3 o processo. Na etapa 4 não foi feito nada nesta etapa. Na etapa 5 realizamos o *threshold*, processo que possibilita a separação dos objetos encontrados na imagem baseado nas faixas dos tons das cores, vermelho, verde e azul. Dessa forma, eliminando os objetos que não se encontram na faixa de cor desejada e não são de interesse, visto na Fig. 7 com enumeração 4 a aplicação deste filtro e imagem de saída. Na etapa 6 e 7 são realizados alguns ajustes que diminuem ainda mais a chance de erro no módulo de visão. Trabalhamos em cima da imagem da pelota gerada após a execução do *threshold* para eliminar alguma partícula que não é de interesse mas ainda é sinalizada pela câmera, e após filtrar a imagem começamos a trabalhar no aprimoramento da mesma, utilizando recursos que tornam a imagem da pelota gerada mais compacta, sem falhas e se necessário até mesmo mais enxuta. Assim tornando a visão da pelota ideal para a sua verificação.

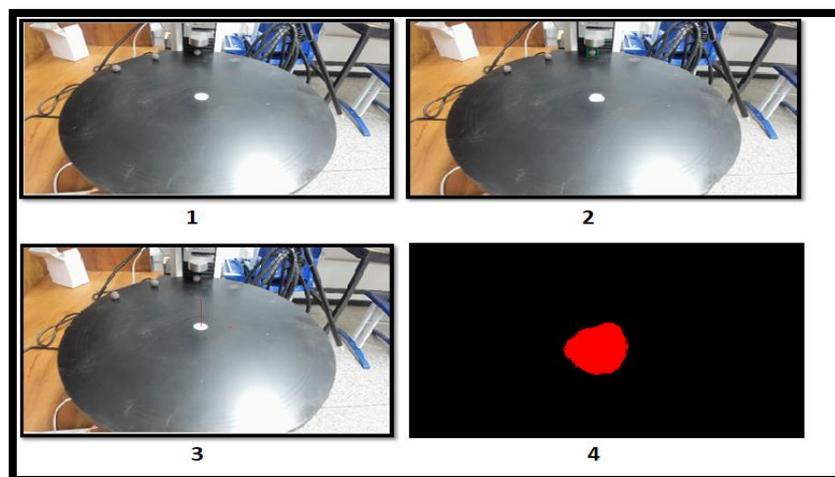


Figura 7. Filtros aplicados e suas saídas. 1) Imagem; 2) ROI; 3) Calibração; 4) Pelota segmentada

## 4 Conclusões

É possível concluir que o protótipo apresentado neste trabalho tem grande potencial para aprimorar o teste de compressão de pelotas, que atualmente é feito com muita intervenção humana, porém é preciso bastante cuidado em seu processo de automatização, visto que a detecção de pelotas através das imagens fornecidas pela câmera necessita de um ambiente com iluminação controlada. Pelos resultados apresentados pode-se concluir que é possível realizar a segmentação das pelotas usando algoritmos tradicionais de processamento de imagens e com essa informação controlar o giro do disco. Entretanto, sugere-se criar um ambiente com iluminação controlada para não ter problemas de interferência externa e o equipamento possa trabalhar sem problemas em diferentes horários e ambiente.

Neste trabalho foi apresentada uma versão inicial de um protótipo para ensaios de compressão de pelotas verdes de minério de ferro, como o objetivo de facilitar o teste e produzir um relatório personalizado com dados de interesse deste ensaio. Assim, são mostrados os resultados prévios da segmentação das pelotas no disco, que servirão para localizar as pelotas pelo algoritmo de localização, assim controlando o giro do disco e o acionamento do teste de resistência mecânica realizado pela máquina de compressão, comprimento a pelota até a sua ruptura. Sendo os dados de resistência da pelota de minérios verdes demonstrado em um relatório final personalizado.

### Agradecimentos.

Os autores agradecem o engrandecedor apoio da FAPES (Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo), ao IFES (Instinto Federal do Espírito Santo) e a empresa VALE.

### Declaração de autoria.

Os autores confirmam que são as únicas pessoas responsáveis pela autoria deste trabalho e que todo material que foi incluído aqui como parte do presente artigo é de propriedade (e autoria) dos autores ou tem a permissão dos proprietários para serem incluídos aqui.

## Referências

- [1] V. Subramanyam, P. Patra, and M. K. Singh, "Automatic image processing based size characterization of green pellets," *Int. J. Autom. Smart Technol.*, 2017, doi: 10.5875/ausmt.v7i3.1133.
- [2] M. Heydari, R. Amirfattahi, B. Nazari, and P. Rahimi, "An industrial image processing-based approach for estimation of iron ore green pellet size distribution," *Powder Technol.*, 2016, doi: 10.1016/j.powtec.2016.09.020.
- [3] "Vale.com," 2020. <http://www.vale.com/brasil/pt/paginas/default.aspx> (accessed Aug. 12, 2020).
- [4] P. S. Landim De Carvalho, M. Machado Da Silva, M. Aurélio, R. Rocio, and J. Moszkowicz, "Minério de ferro," 2014. Accessed: Aug. 12, 2020. [Online]. Available: [www.rc.unesp.br/museudpm/banco/grm.html](http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/grm.html).
- [5] K. Meyer, *Pelletizing of Iron Ores*. 1980.
- [6] J. M. Mourão, "ASPECTOS CONCEITUAIS RELATIVOS AO CONSUMO DE CALOR NA PELOTIZAÇÃO DE MINÉRIO HEMATÍTICO," 2017, doi: 10.5151/2594-357x-30064.
- [7] "SEDES - Mineração e Siderurgia," 2020. <https://sedes.es.gov.br/mineracao-e-siderurgia> (accessed Aug. 12, 2020).
- [8] L. M. M. Tavares *et al.*, "DEGRADAÇÃO MECÂNICA DE PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO DURANTE O MANUSEIO E TRANSPORTE. PARTE I: MODELO MATEMÁTICO E SIMULADOR," 2017, doi: 10.5151/2594-357x-26788.
- [9] P. Sérgio, A. Dias, and M. E. De Confiabilidade, "UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE," 2019.
- [10] T. Umadevi, P. P. Kumar, P. Kumar, N. F. Lobo, and M. Ranjan, "Investigation of factors affecting pellet strength in straight grate induration machine," *Ironmak. Steelmak.*, vol. 35, no. 5, pp. 321–326, Jul. 2008, doi: 10.1179/174328108X295730.