Desenvolvimento do protótipo de equipamento para a remoção partículas ferromagnéticas no processamento de açúcar utilizando campo magnético.

Danilo Vinicius dos Santos; Denis Barbosa de Araujo; Tonny Fernandes da Silva Costa; Vitor Moreira Domenici (tonny.fernandes07@gmail.com; v.danilo968@gmail.com; domenicivitor@gmail.com;)
Orientador: Dr. Rogério Issamu Yamamoto

Resumo: Neste artigo, visa-se criar uma solução e discussão para o problema de contaminação de alimentos com materiais ferrosos, será abordada a contaminação do açúcar com fragmentos ferrosos, a ingestão excessiva de partículas ferrosas pode trazer intoxicação, causando reações gástricas que resultam desde diarreia, vômito, dores abdominais e até internações hospitalares. A partir das informações obtidas a respeito do processo de fabricação do açúcar e a importância da quantidade de partículas ferrosas presentes, desenvolvemos um protótipo que faz a separação magnética do metal, através do Arranjo Halbach utilizando ímãs de Ferrite montado a um tambor giratório fixado sobre uma estrutura metálica. Nos testes foram utilizados três tipos de grãos, e materiais metálicos de diferentes massas. Os resultados mostraram que o protótipo é capaz de fazer a separação do material ferro magnético mesmo utilizando imãs de baixo custo.

Palavras-chave: Magnetismo, Açúcar, Contaminação.

Development of a prototype of equipment for the removal of ferromagnetic particles in sugar processing using a magnetic field.

Abstract: In this article, we aim to create a solution and discussion for the problem of contamination of food with ferrous materials, the contamination of sugar with ferrous fragments will be addressed, the excessive ingestion of ferrous particles can bring intoxication, causing gastric reactions that result from diarrhea, vomiting, abdominal pain and even hospital admissions. From the information obtained about the sugar manufacturing process and the importance of the amount of ferrous particles present, we developed a prototype that performs the magnetic separation of the metal, through the Halbacharray using Ferrite magnets mounted on a rotating drum fixed on a metal structure. In the tests, three types of grains and metallic materials of different masses were used. The results showed that the prototype is capable of separating ferromagnetic material even using low-cost magnets.

Keywords: Magnetism, Sugar, Contamination.

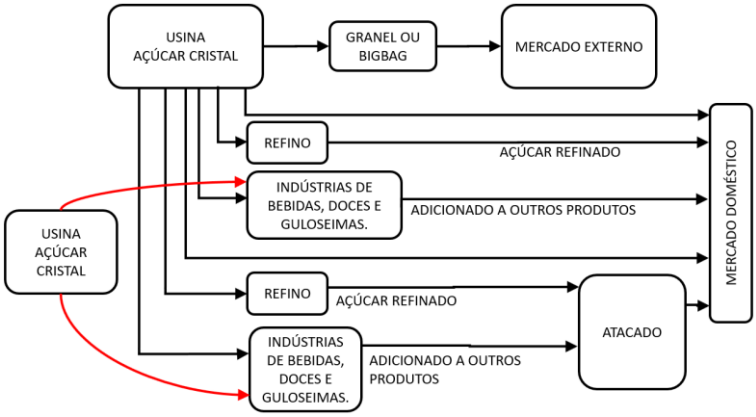
1. Introdução

A cana de açúcar é uma planta que se desenvolve em forma de touceira, e é formada por raízes e rizoma subterrâneas (Araldi-, MOZAMBANI et al,2006). O açúcar extraído da cana é conhecido desde tempos bastante remotos. Ele só foi introduzido na Europa por volta do século X, inicialmente o cultivo e a produção de açúcar restringiram-se a bacia do Mediterrâneo (INMETRO, 2021). Após a chegada dos portugueses ao Brasil, a produção açucareira no Brasil se estabeleceu no século XVI. (LUCIANO; ROSS, 2020)

Entre os principais países produtores de açúcar, o Brasil se destaca sendo o maior produtor e exportador do mundo (VIDAL, 2020). Em 2006, mais de 350 usinas estavam em operação no Brasil, e outras 26 em construção (SATOLO; RUMENOS; BACCHI, 2009). A exportação de 8 bilhões de açúcar bateu recorde, e as vendas externas em outubro de 2020 tiveram um aumento de 121% passando de 543,96 milhões de dólares. (COMPRERURAL, 2020)

Aproximadamente um terço do açúcar produzido no Brasil, é destinado ao mercado interno, distribuído para o atacado que, por conseguinte, distribuirá para indústrias de alimentos que o utiliza como matéria prima para seus produtos e para o comércio varejista que, por fim, destinará ao consumidor final. A figura 1 exemplifica o sistema de fornecimento do açúcar aos mercados externos e domésticos. (MACHADO S., 2012)

Figura 1 – Distribuição da cana de açúcar



Fonte: Tecnologia da Fabricação do Açúcar - Simone Silva Machado

Empresas do setor agroindustrial brasileiro estão se deparando com novas realidades de mercado, exigindo confiabilidade, melhorias no controle de qualidade e menores custos, o que têm propiciado inovações tecnológicas e organizacionais. Como um produto alimentício, a qualidade de açúcar deve atender características regidas por legislações específicas, abordando características físico-químicas, microbiológicas e sensoriais. Dentro das normas para consumo o açúcar deve ter no máximo 10 mg/kg de teor de ferro, ele é considerado um contaminante natural, originado no solo onde a matéria-prima é plantada, ou relacionado a má conservação dos equipamentos do processo. (MACHADO S., 2012)

Laudos divulgados pela Secretaria de Estado de Saúde (SES) e o Ministério Público (MP) de Minas Gerais, confirmaram a contaminação por partículas ferromagnéticas de diferentes tamanhos em embalagens de açúcar com duas marcas comercializadas em Divinópolis, Minas Gerais. As partículas são facilmente identificadas, aproximando um imã pela embalagem plástica, atraindo as mesmas. A principal suspeita é uma contaminação em cadeia, que se iniciou em um fornecedor paulista, comum a todas as marcas, consequentemente, o problema teria se repetido com várias empresas empacotadoras que adquiriram o açúcar. Caso aumente a extensão do problema, as marcas podem ter a

venda de seus produtos suspensas em todo o estado, além de responder processos criminais se houver danos acentuados ao organismo de consumidores. (AMMP, 2021)

O Ferro ingerido em quantidades recomendadas pode evitar doenças de saúde pública como a anemia, que é a deficiência de ferro no organismo. A recomendação de ingestão dietética representada na Tabela 1 é a mais recente revisão dos valores de nutrientes e energia adotados nos Estados Unidos e Canadá que vem sendo publicadas desde 1997. (BORTOLINI; FISBERG, 2010)

Tabela 1 – Recomendações Dietéticas de Ferro
EAR=Estimativa do Requerimento Médio (mg/dia); RDA=Ingestão Diária Recomendada (mg/dia)

Tabela 1. Recomendações dietéticas de ferro

Ciclos de vida	UL	EAR	RDA / AI*
Lactentes			
0 - 6 meses	40	ND	0,27*
7 - 12 meses	40	6,9	11
Crianças			
1 - 3 anos	40	3	7
4 - 8 anos	40	4,1	10
Mulheres			
9 - 13 anos	40	5,7	8
14 - 18 anos	45	7,9	15
19 - 30 anos	45	8,1	18
31 - 50 anos	45	8,1	18
51 - 70 anos	45	5	8
>70 anos	45	5	8
Gestantes			
< 18 anos	45	23	27
19 - 30 anos	45	22	27
31 - 50 anos	45	22	27
Lactantes			
<18 anos	45	7	10
19 - 30 anos	45	6,5	9
31 - 50 anos	45	6,5	9
Homens			
9 - 13 anos	40	5,9	8
14 - 18 anos	45	7,7	11
>19 anos	45	6	8

Fonte: (WILSON, 2013)

Por outro lado, a ingestão excessiva do ferro pode ter efeitos colaterais notados especialmente no trato gastrodigestório, em condições patológicas onde o metabolismo de ferro está alterado (QUINTAES, 2005). A ingestão acima da recomendação pode causar a intoxicação, causando reações gástricas resultando em diarreia, vômito e dores abdominais, a toxidade grave com sintomas de febre, convulsões, lesões no fígado entre outros, ocorre após a ingestão de ferro maior que 0,5 g. (DOULL, 2010)

A partir das informações obtidas a respeito do açúcar e a importância de sua qualidade necessária para o consumo. Este presente estudo tem como objetivo analisar uma máquina de separação magnética do tipo tambor, para então replicá-la em um protótipo, projetando, identificando custos e analisando sua capacidade para eliminar contaminações ferromagnéticas no açúcar. O êxito do estudo tem por consequência a garantia de qualidade do produto evitando assim perdas financeiras, perda de imagem e reputação além de malefício para saúde humana.

1.2 Justificativa

Aproximadamente 90% da produção de açúcar destina-se para consumo alimentar (Heizir), a matéria prima pode ser contaminada durante várias etapas do processo de beneficiamento, manuseio e distribuição (BARBIERI, 1990). As contaminações em alimentos caracterizadas por fragmentos [...] tais como o ferro [...] desprendidos de equipamentos, das embalagens, do meio ambiente ou até mesmo do próprio manipulador são perigos físicos (GERMANO, 2003).

A ingestão de partículas ferrosas pode causar reações gástricas resultando em diarreia, vômito e dores abdominais, a toxidade grave com sintomas de febre, convulsões, lesões no fígado entre outros, ocorre após a ingestão de ferro maior que 0,5 g (DOULL, 2010).

Para evitar a contaminação por partículas ferrosas no açúcar, o estudo propõe a utilização de um equipamento de separação magnética do tipo tambor. O conjunto do equipamento consiste em um tambor giratório com um conjunto fixo internamente que tem campo magnético, direcionando o fluxo magnético para o material ferroso conduzindo-o para um compartimento separado, garantindo desta maneira, que nenhuma partícula de ferromagnética se mantenha com o produto.

A partir da solução proposta, poderemos garantir que nenhuma partícula ferrosa chegue ao consumidor final, evitando intoxicações leves e graves ao consumidor, além de evitar prejuízos financeiros de imagem e reputação para a empresa que comercializa o açúcar.

1.3 Objetivos

Identificar os processos e métodos que possibilitam realizar a separação de ferro do açúcar, para posteriormente construir um protótipo de uma máquina já existente capaz de utilizar um campo magnético que retire as partículas de ferro na produção de grãos para manter a qualidade, valor de mercado e próprio para consumo humano.

- Identificar e aplicar as características das máquinas separadoras de ferro para posteriormente serem replicadas em um protótipo funcional, que seja capaz de remover partículas contaminantes de ferro do açúcar;
- Analisar a eficiência do protótipo através de experimentos reais com diferentes quantidades de ferro e diferentes granulometrias;
- Identificar custo de cada componente e verificar se o imã de Ferrite é eficaz para o funcionamento correto do equipamento na separação do material ferromagnético.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Separação Magnética

A separação magnética teve seus estudos com início por volta de 600 a.C. que chegaram ao conhecimento da humanidade pela divulgação de experimentos do filósofo grego Thales de Mileto, ele descobriu que ao esfregar o âmbar na pele de animal produzia carga eletrostática (Venkatraman et al., 2006). A propriedade de um material que determina a sua resposta ao campo magnético é a susceptibilidade magnética, com base nisso os materiais são classificados em 02 categorias: os que são atraídos e os que são repelidos por esse campo.

Seja nos transportes da habitação e produção de alimentos, o cotidiano da população é diretamente influenciado pela disposição de materiais, a partir da habilidade de produzir e manipular materiais da forma como lhe convém. (CALLISTER, 2016)

No início da história os seres humanos utilizavam apenas os materiais que tinham a sua disposição sob a forma natural como pedra, madeira, argila, peles entre outros, ao longo do tempo com o desenvolvimento de técnicas para obtenção de novos materiais, dentre eles cerâmicos e ligas metálicas. (CALLISTER, 2016)

Por volta de 1940 começou a ser fabricados separadores magnéticos, um equipamento que utiliza de uma disposição de montagem para criar um campo magnético que seja possível a separação de materiais, o primeiro material usado nesses equipamentos foi o ALNICO, estes eram fundidos em alumínio, níquel e ferro, trabalha principalmente para remover pedaços grandes de metais ferrosos, como porcas e parafusos.

A cerâmica, a partir da década de 1960, era de melhor usabilidade podendo ser cortado e moldado em qualquer direção, estes têm uma eficiência maior em relação aos de ALNICO.

Terra rara, este material deriva seu nome porque parte da sua composição inclui pelo menos 14 elementos lantanídeos da tabela periódica entre 57 e 71, samário-cobalto foi o primeiro material usado no início de 1980, hoje os materiais magnéticos com terra rara chegam a produzir até 10x mais força magnética. (CONFER)

Uma forma eficiente de realizar a separação dos materiais foi através da separação magnética, tendo uma grande vantagem de não utilizar reagentes químicos (RODRIGUES, NOGUEIRA, 2019).

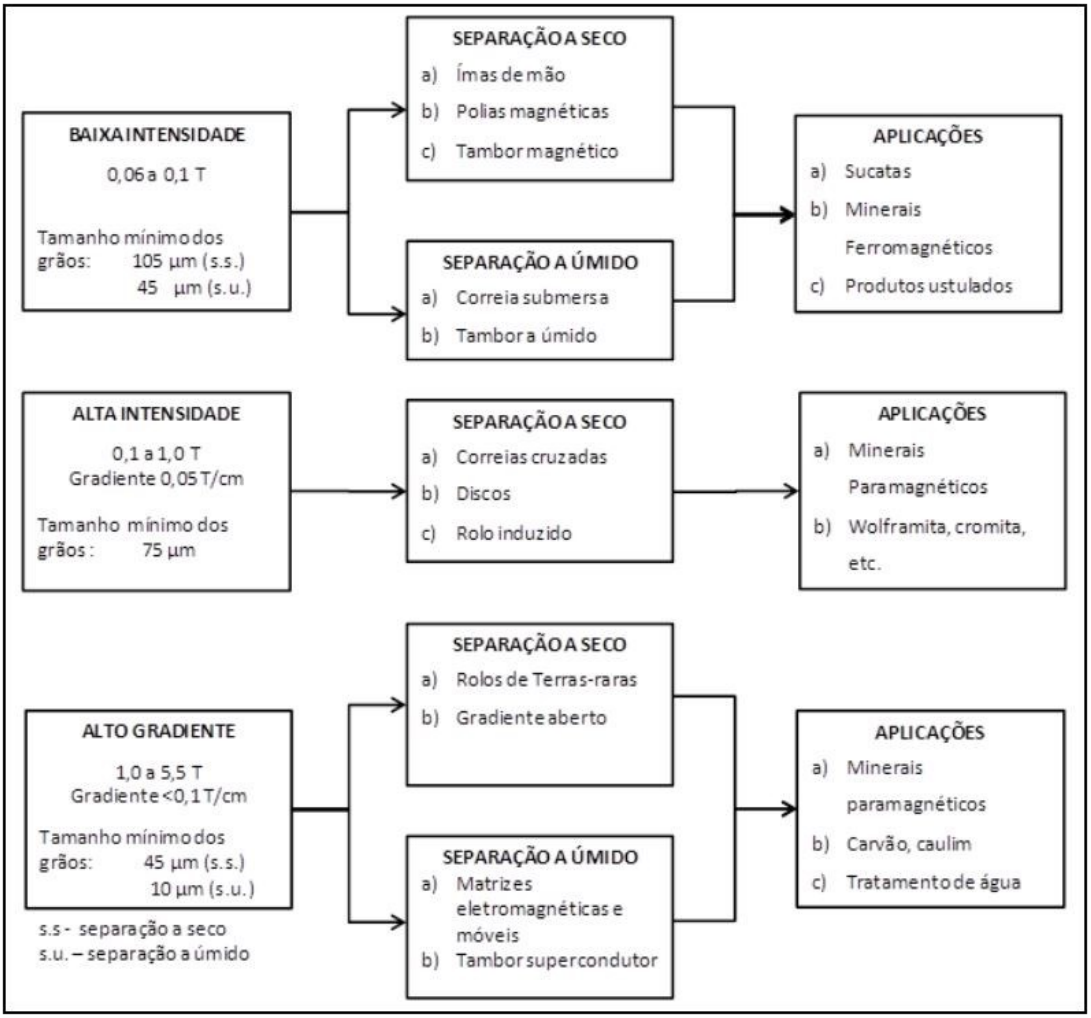
A partir dos avanços na ciência dos materiais e na tecnologia de fabricação, novos equipamentos de separação magnética foram desenvolvidos com campos magnéticos de intensidades elevadas, [...]. Desta maneira, surgiram novos mercados com o emprego dos separadores de imãs permanentes de terras-raras e separadores com a tecnologia dos supercondutores.

2.2 Tipos de Separação

Para cada processo irá existir um tipo de produto e equipamento a ser utilizado, na separação magnética, são muito utilizados nos mais diversos segmentos industriais, mas podemos destacar as indústrias alimentícias, farmacêuticas, químicas, rações, mineração, plástica e reciclagem. (OXIMAG, 2019)

Dependendo da forma que será usada, os separadores magnéticos podem ser classificados em dois grandes grupos: a seco e a úmido, o qual é subdividido de acordo com as características do campo de indução, que por sua vez, é encontrado os separadores de baixa e alta intensidade, utilizado para a operação a seco e a úmido (MAULANA, 2015). Na Figura 2 é ilustrado e apresentado os diferentes tipos de separadores magnéticos, indicando suas principais aplicações diante de cada segmento.

Figura 2 – Características, classificação e aplicações dos separadores magnéticos



Fonte: (Luz, 2004)

O uso da separação magnética depende da susceptibilidade magnética dos minerais a serem processados, a separação magnética no beneficiamento de minérios, atua não apenas na extração de ferro, mas também na concentração de minérios como a hematita. A separação magnética é classificada em quatro categorias, a seco: alta e baixa intensidade e; a úmido: alta e baixa intensidade. (SAMPAIO; FRANÇA; LUZ, 2010)

2.3 Tambor magnético

O Tambor Magnético é comumente o mais recomendado para separação de partículas e grãos a seco, utilizando o processo de queda gravitacional, tendo sua utilização em áreas agrícolas, como a produção de açúcar e outras indústrias de grãos. Em sua operação, a parte frontal do tambor contém um campo magnético que atrai contaminantes ferrosos, que são descartados à medida que passam pela parte traseira não magnética. O movimento e a agitação das partículas sobre os magnetos com polaridades alternadas facilitam a remoção das partículas não magnéticas incrustadas sobre o tambor. (SVOBODA et al., 2003)

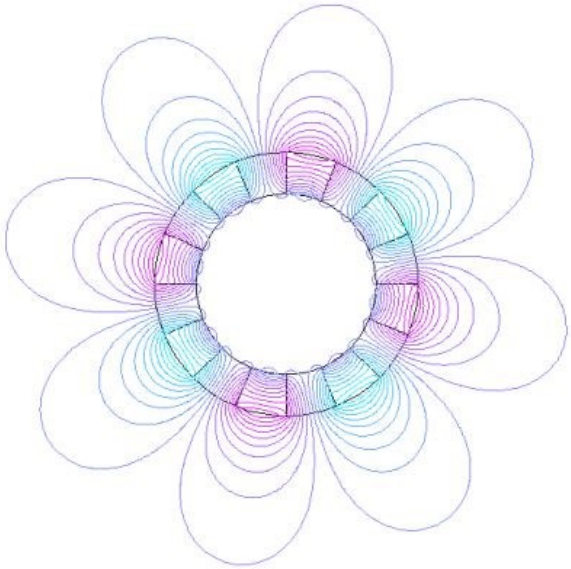
Dos métodos de separação a seco, os mais utilizados são os de imãs permanentes, de correias cruzadas, de rolos induzidos e de discos. Para o desenvolvimento deste projeto será utilizado o método de separação de imãs permanentes, onde possuí diversas vantagens por ser um equipamento compacto e de fácil operação, não tendo necessidade de corrente elétrica e havendo a possibilidade de manter o campo estável na faixa acima de 1T. (SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2007)

2.3.1 Arranjo de Halbach

O Arranjo de Halbach ou Halbacharray foi criado em 1980 por Klaus Halbach, seus estudos tinham como finalidade a aplicação para uso em aceleradores de partículas (DE, 2017), é um sistema de fontes magnéticas que faz a distribuição similar a imãs permanentes em estruturas cíclicas, onde em ambientes paramagnéticos, ocorre a geração de densidades de campos magnéticos com comportamentos específicos e analiticamente modeláveis. (REVIEWED; BERKELEY; CANCER, 2010)

Em nosso desenvolvimento, será utilizado o sistema Halbacharray, pois o mesmo por apresentar ímãs permanentes faz com que aumente o campo magnético em um lado, enquanto do outro se anula, ficando quase zero, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Atuação do Arranjo de Halbach em um rotor



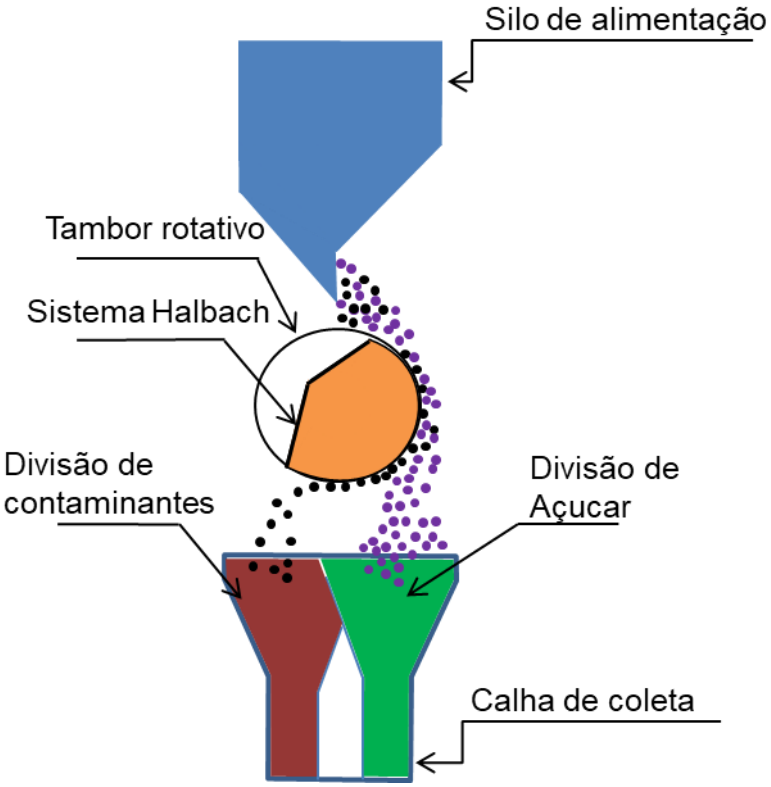
Fonte: BIRD, 2016

3. Metodologia

3.1 Conceito do protótipo à ser construído

A partir dos objetivos determinados e das premissas de separações magnéticas estudadas, foi adotado o método de separação a seco do tipo tambor magnético com imãs permanentes. Seu funcionamento ocorrera da seguinte maneira: A alimentação vai ser realizada por cima na entrada do silo de alimentação, que fornece os grãos para o tambor rotativo pela tangencia superior, que usando do movimento rotativo em torno do sistema Halbacharray que permanece estático (responsável pela magnetização das partículas ferromagnéticas), para que haja interação com o campo magnético. As partículas magnetizadas, ficam presas na superfície da camisa do tambor, até que saia do ângulo de atuação do campo magnético até que a força magnética seja tão baixa que a força peso da massa ocorrendo a queda no local determinado, caindo na divisão de contaminantes ferromagnéticos da calha de coleta e separação, que será responsável em coletar o material após o tambor, será posicionado abaixo do tambor com uma divisão central para que colete o açúcar de um lado e a massa de ferro do outro. Para esboçar de maneira ilustrativa, observe a figura 4.

Figura 4 – Croqui do protótipo para ilustração



Fonte: Autor

Para o desenvolvimento do protótipo, com menor custo possível e maior eficiência, foram selecionados os imãs de Ferrite para montagem do sistema Halbach, que são 10% do valor dos imãs de Neodímio constatado em pesquisa pelo grupo, além da diferença de valor, o imã de Ferrite atinge 1.180 Gauss, possuí cerca de 21% da densidade de fluxo magnético de um imã de Neodímio que atinge 5.700 5x Gauss, o que afeta o desempenho do protótipo, outro fator importante é o espaçamento entre o sistema Halbach e o diâmetro interno da camisa do tambor fique maior do que o determinado em projeto.

Para o dimensionamento do conjunto foi determinado a partir do diâmetro da camisa de 60 mm de diâmetro, com essa premissa podemos dimensionar os componentes internos do conjunto Halbach, rolamentos, flanges, após o tambor rotativo estar determinado vamos realizar a dimensão dos outros componentes como o silo de alimentação, a calha de coleta e por último a estrutura metálica.

No presente estudo, será construído um modelo físico onde será testado com material real simulando uma situação de contaminação analisado o funcionamento aplicando a separação magnética na indústria alimentícia.

3.2 Fabricação e detalhes dos componentes

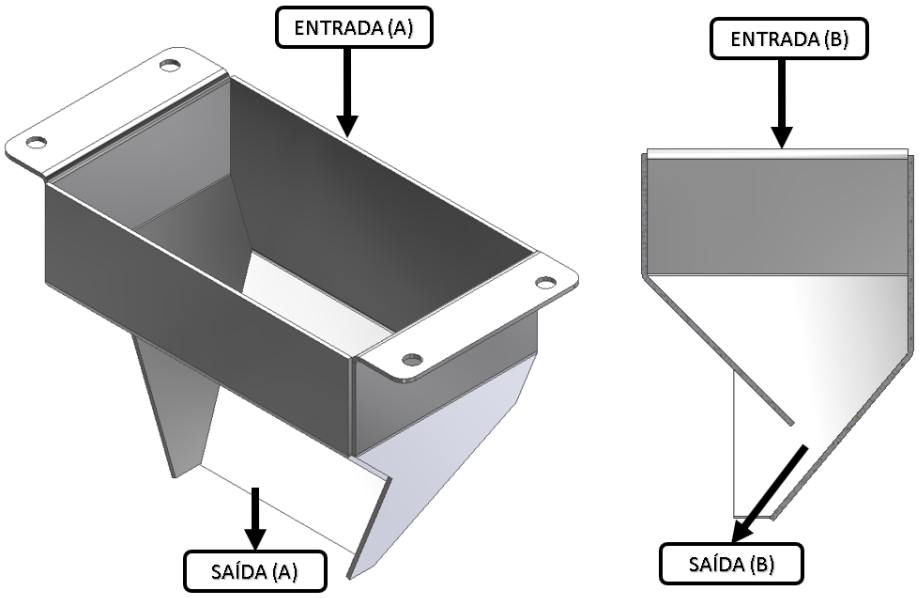
Os componentes do protótipo, possuem diferentes métodos de fabricação e materiais, pensados de maneira em que não seja sujeito ao magnetismo usado na separação, como por exemplo, a camisa o silo de alimentação e a calha de coleta e separação não podem ter influencia magnética e por se tratar de uma área alimenticia devem ser confeccionados em aço inoxidável AISI 304.

3.2.1 Silo de alimentação e calha de coleta

Para fabricação do silo de alimentação e da calha de coleta, ambas com chapa de 1,5 mm de espessura em aço inoxidável austenitico AISI 304, foi utilizado o processo de

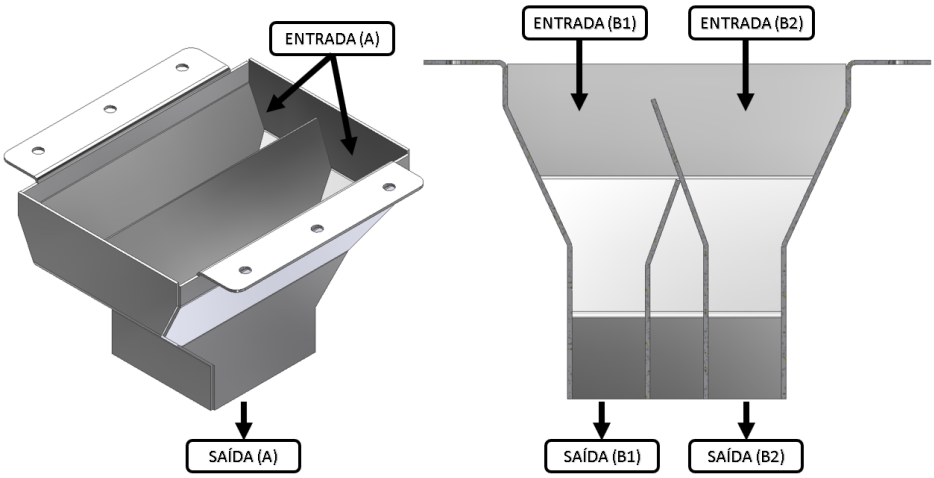
corte, dobra e solda. A união das peças foi realizada com solda TIG com material de adição Inox ER 308L (vareta indicada para soldas de materiais de aço inoxidável).

Figura 5 – Silo de alimentação (A=vista isométrica / B=vista lateral em corte)



Fonte: Autor

Figura 6 – Calha de coleta e separação (A=vista isométrica / B=vista lateral em corte (B1=magnético/B2=não magnético))



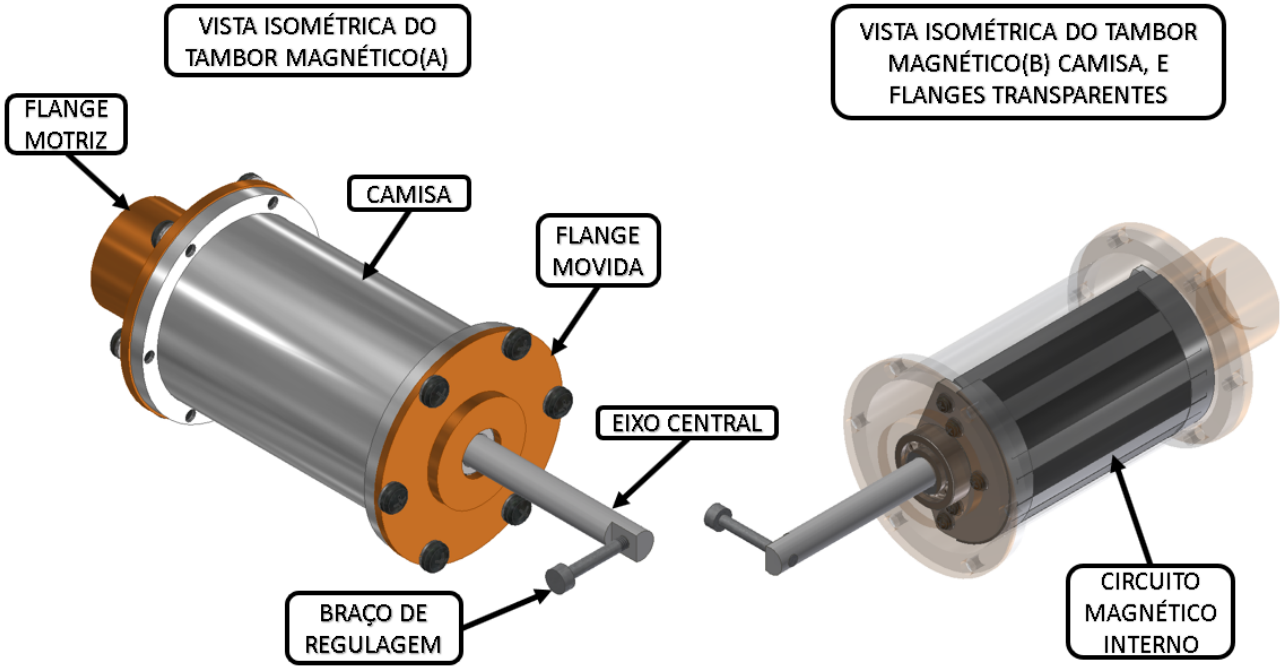
Fonte: Autor

3.2.2 Conjunto do Tambor magnético

A fabricação do conjunto foi possível através dos de usinagem, como torneamento, fresamento, furação e rosqueamento.

O conjunto do Tambor magnético será responsável por receber todas as partículas do silo e através do circuito magnético interno, realiza a atração das partículas ferro magnéticas na superfície da camisa, até que chegue a um ponto onde não existe a incidência de campo magnético, permitindo assim que se desprendam caião no local determinado e possam ser separadas.

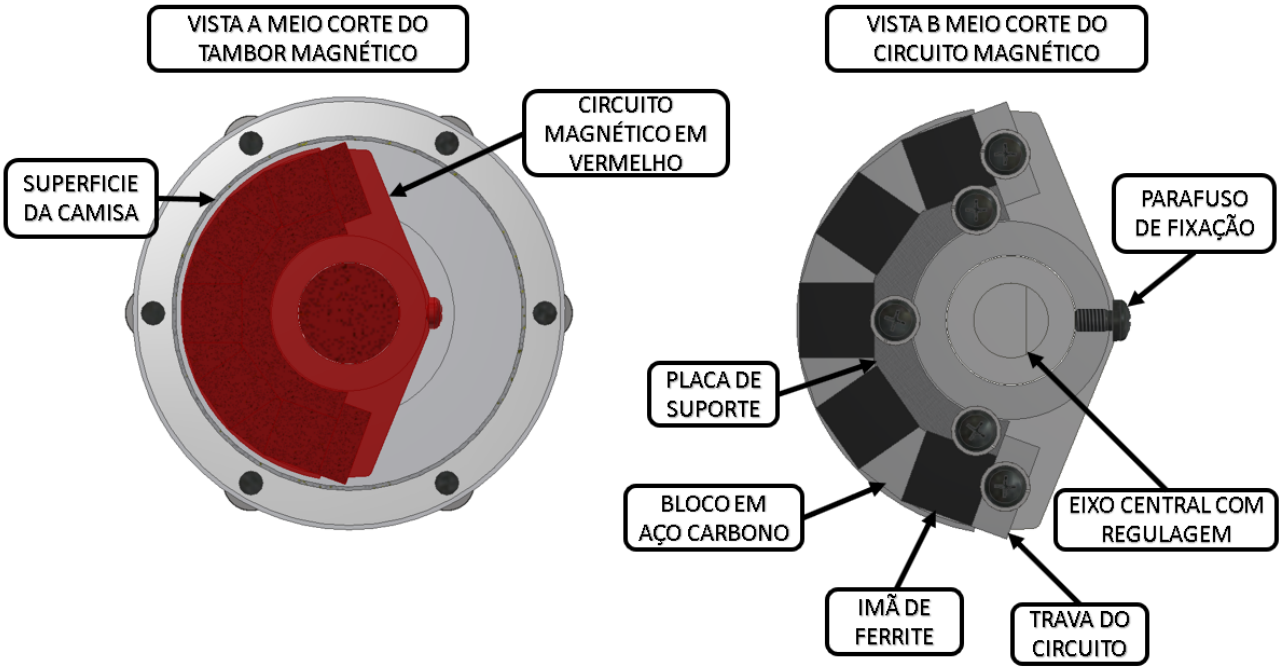
Figura 7 – Conjunto do tambor magnético vista A / circuito magnético montado dentro do tambor vista B



Fonte: Autor

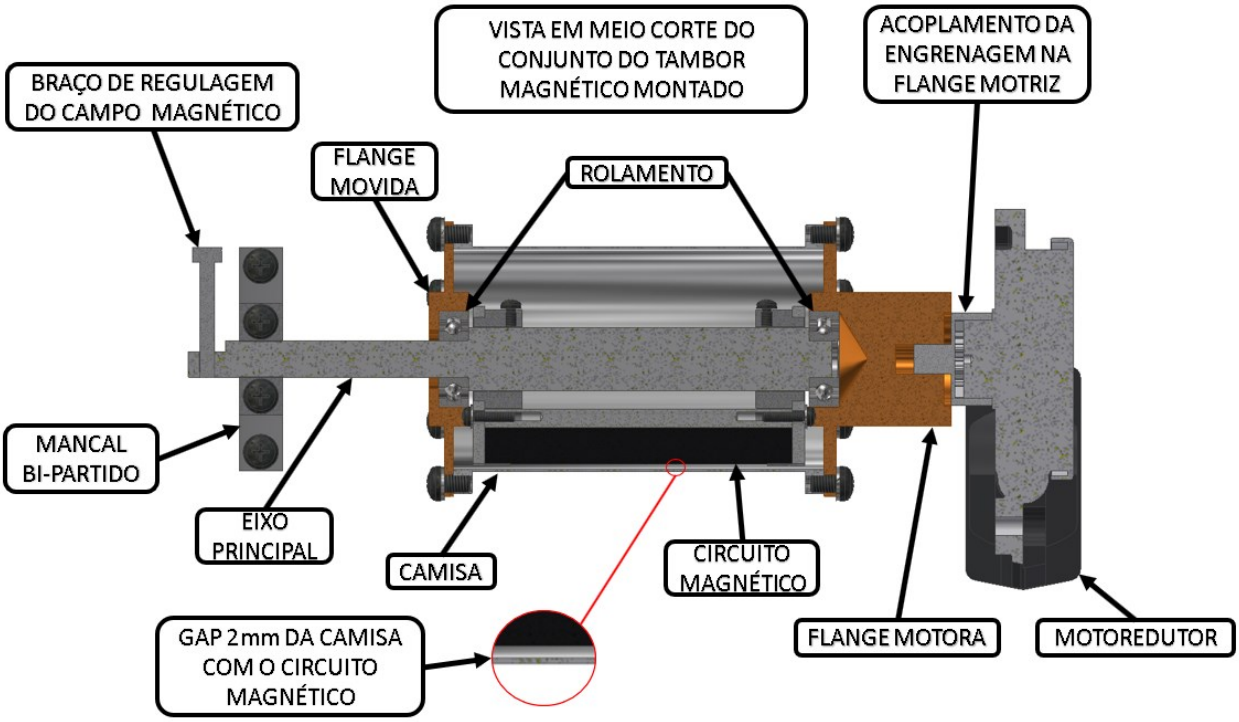
O circuito magnético é posicionado na parte interna da camisa, enquanto a camisa rotaciona o circuito fica estático, possuindo regulagem através da parte do eixo que fica externo é possível alterar a ação do campo magnético, onde o ângulo de ação do campo magnético possa atuar da melhor forma possível. A distância é de 2 mm entre a superfície interna da camisa e da superfície externa do circuito magnético conforme a imagem mostra, quanto menor essa distância maior é a força magnética na superfície da camisa. Com base no sistema Halbach analisado foi projetado o sistema circuito magnético interno confome figura 8 e 9.

Figura 8 – Conjunto do circuito magnético dentro do tambor vista A / componentes do circuito magnético vista B



Fonte: Autor

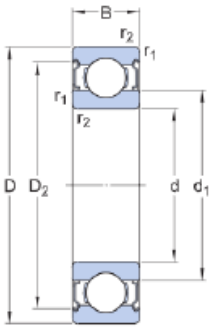
Figura 9 – Vista me meio corte do conjunto montado do tambor magnético com o motoredutor acoplado



Fonte: Autor

Para a rotação dos flanges em torno do eixo fixo principal, foi utilizado dois rolamentos radiais de 26 mm de diâmetro, modelo 6000-2Z. Com uma vida útil de 25 milhões de rotação.

Figura 10 – Dados técnicos do rolamento utilizado



DIMENSÕES

d	10 mm	Diâmetro do furo
D	26 mm	Diâmetro externo
B	8 mm	Largura
d_1	≈ 14.8 mm	Diâmetro do ressalto
D_2	≈ 22.6 mm	Diâmetro do rebaixo
$r_{1,2}$	min. 0.3 mm	Dimensão de chanfro

Fonte: Rolamentos SKF

3.2.3 Acionamento do sistema

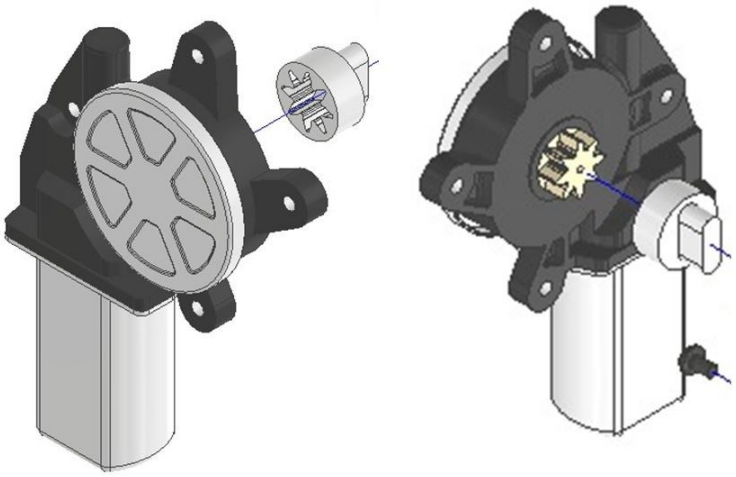
Para realizar o movimento de rotação do conjunto, utilizamos um motor de vidro elétrico universal de veículos. A compra do motor foi feita junto a engrenagem fêmea de um lado e o oblongo macho para o acoplamento ao sistema conforme figura 11. Abaixo seguem as especificações do motor:

Tabela 2 – Específicações do motor utilizado

Voltagem	12 V
Corrente Nominal	7,5 A
Corrente Sem Carga	2,5 A
Corrente Motor Travado	25 A
Torque Nominal	3 N.m
Torque Motor Travado	8 N.m
Ruído	55 dB
Velocidade Nominal	65 ± 15 RPM
Velocidade sem carga	80 RPM
Engrenagem de 8 dentes	

Fonte: Autor

Figura 11 – Motoredutor e engrenagem do conjunto

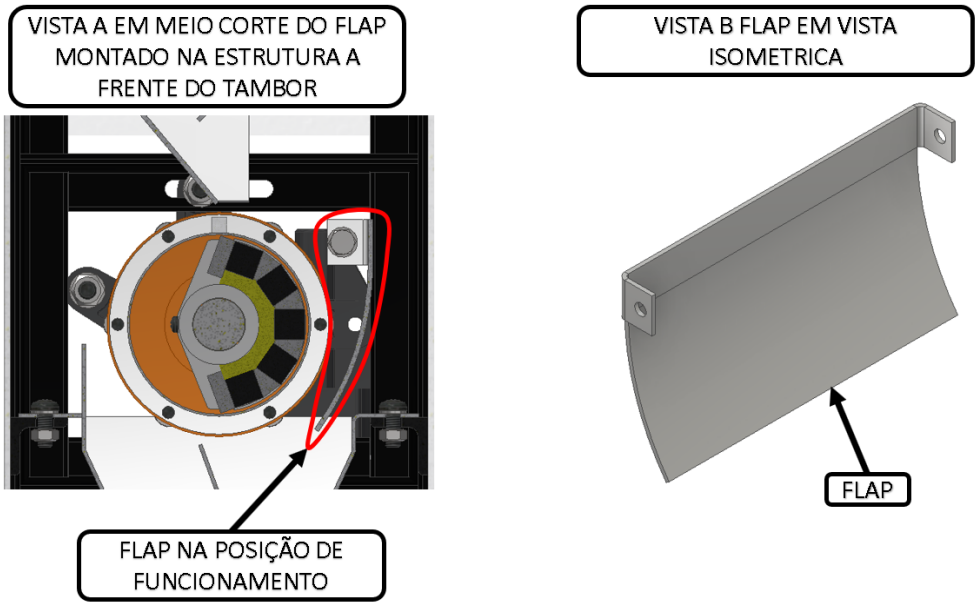


Fonte: Autor

3.2.Flap

O flap tem a função de manter o fluxo de material mais próximo possível da superfície da tambor, logo maior é a ação do campo magnético sobre o fluxo de material.

Figura 12 – Estrutura metálica projetada para funcionamento dos componentes

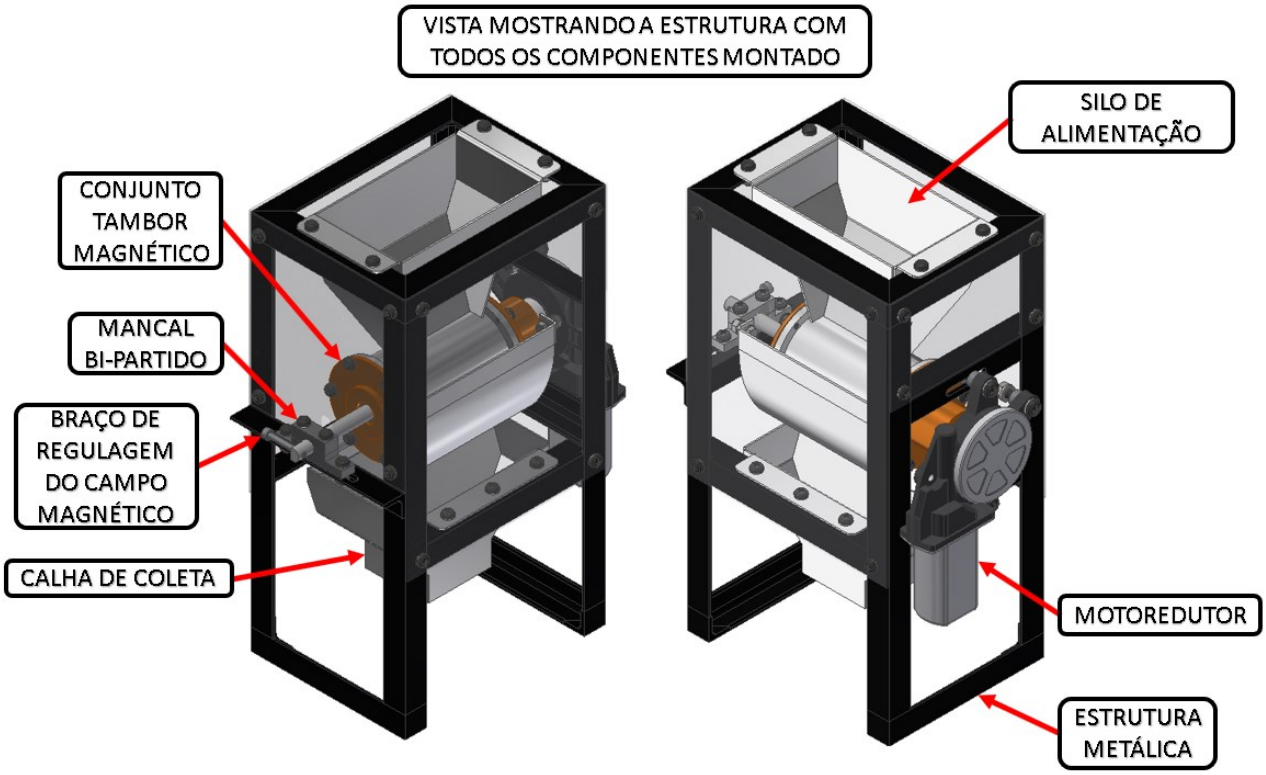


Fonte: O autor

3.2.5 Estrutura metálica e todos os componentes

Para que todos os componentes funcionem em conjunto de forma simultânea ou complementar foi fabricada a estrutura metálica em aço carbono SAE-1020 soldada com eletrodo E6010 para aço carbono em cantoneiras de abas iguais de 1/8”x2”.

Figura 13 – Estrutura metálica projetada para funcionamento dos componentes



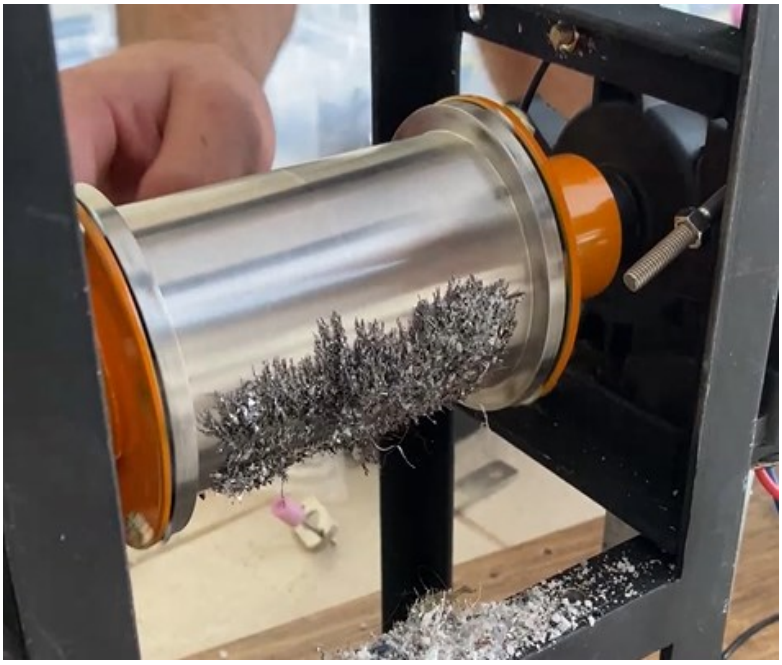
Fonte: Autor

4. Resultados e Discussão

4.1 Protótipo

Durante os testes foi possível obter dados muito relevantes sobre as melhorias necessárias para se obter uma eficácia maior, um dos primeiros pontos observados foram que as partículas de ferro ficavam paradas na mesma posição enquanto o tambor ficava rotacionando, logo foi necessário colocar uma aleta retangular na largura de ação do tambor para que ela arraste-se o material até a zona sem ação do campo magnético, após o primeiro teste foi constatado a necessidade de remover 3mm da altura da aleta por que ela estava raspando no silo.

Figura 14 –Cilindro magnético sem aleta, o material fica parado na zona magnética



Fonte: Autor

Figura 15 – Cilindro magnético com a aleta acrescentada para testar

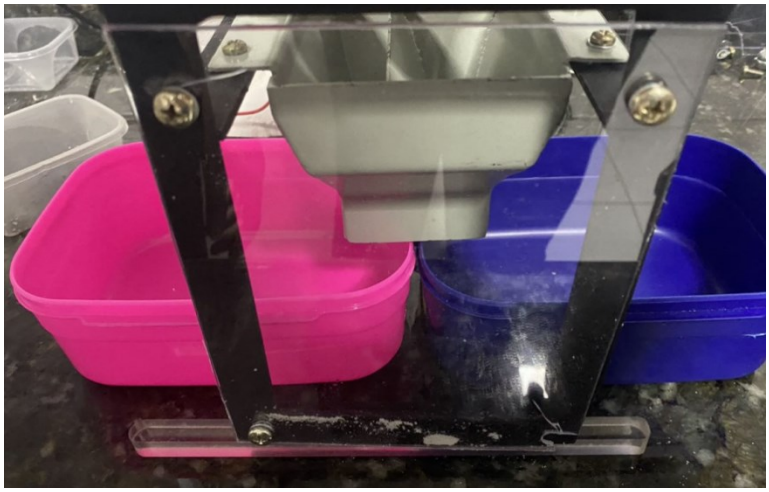
Fonte: Autor

Ao observar a descarga, foi notado que para 200g de açúcar, os potes de coleta estavam pequenos e com pouca capacidade volumétrica, logo foi preciso de potes com maior capacidade volumétrica e ao recalcularmos os potes necessários e obtermos para posicioná-los, não era possível encaixar no local de descarga abaixo da calha porque não tinha altura disponível, logo foi preciso subir a posição da calha de coleta para utilizar os novos itens.

Figura 16 – Altura da calha de coleta baixa para a volumetria a ser testada

Fonte: Autor

Figura 17 – Altura corrigida para completar os testes, posterior revisão da estrutura



Fonte: Autor

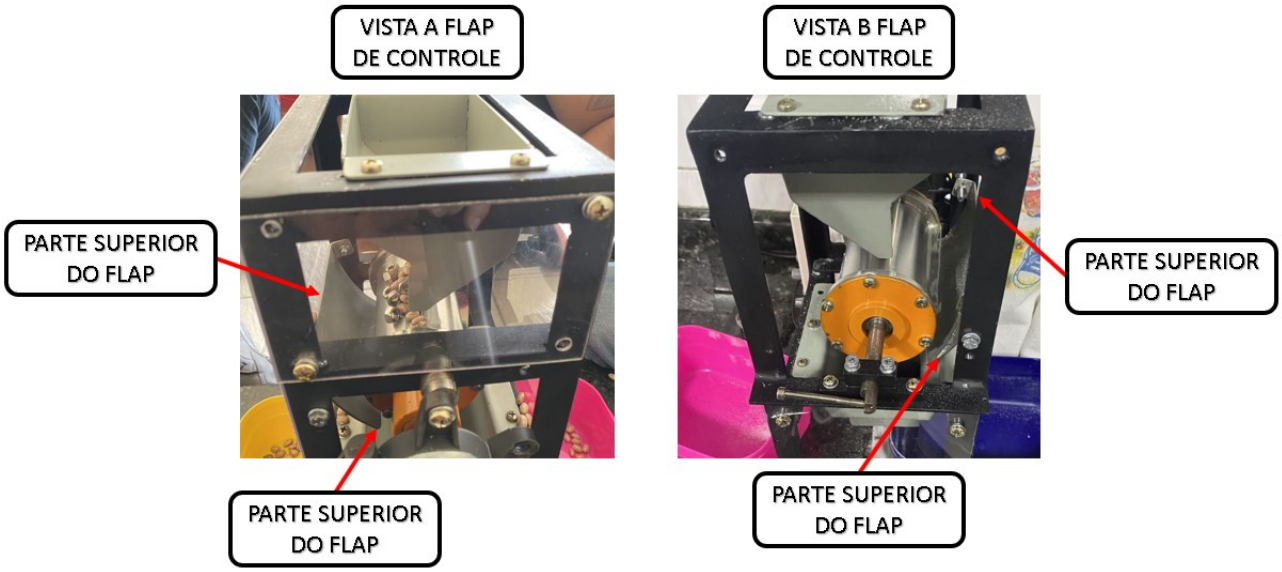
Após alguns testes, foi detectado que a largura da calha de coleta precisa ser maior na largura devido a perdas de produto pelas laterais e mais próxima do tambor em relação à altura, isso ajuda a coletar qualquer partícula que saia da zona limite da calha. Em outras palavras, realiza a captação de todo o material que sai do silo de alimentação.

Figura 18 – Protótipo arremessando material ferromagnético fora da calha de coleta

Fonte: Autor

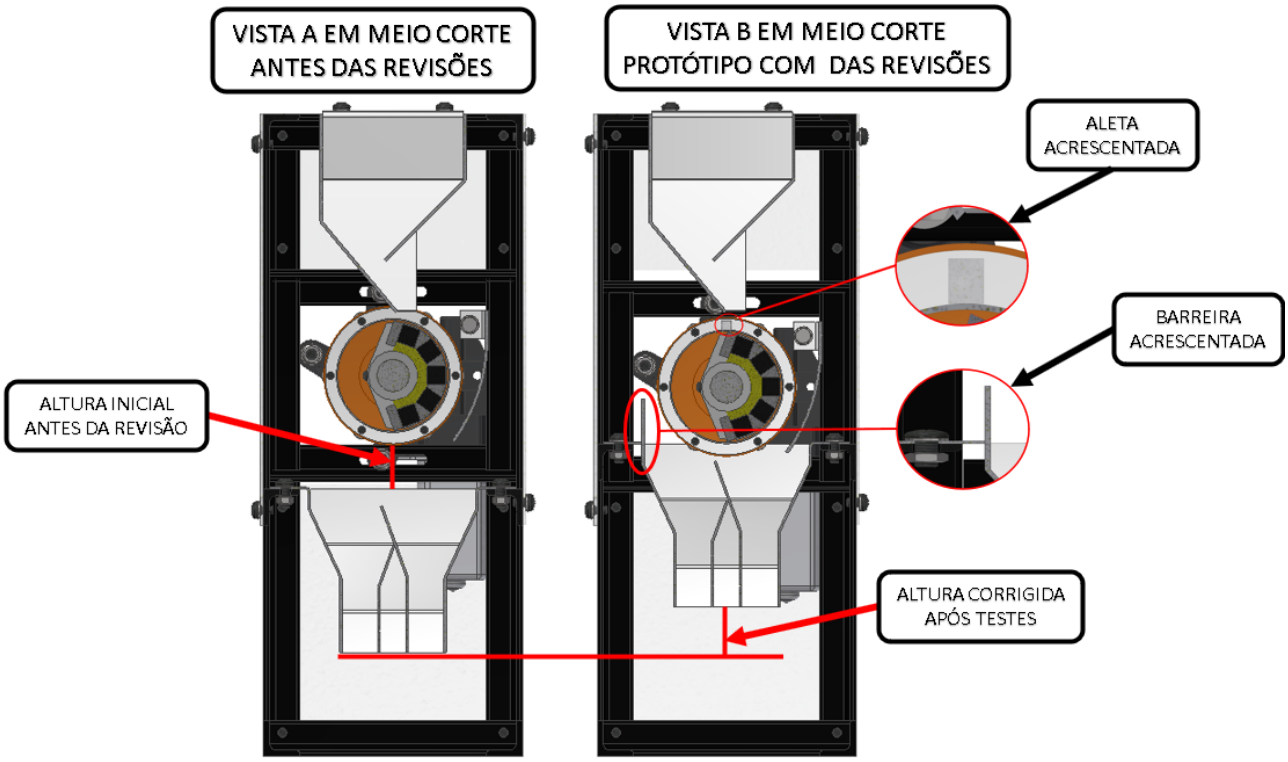
Após alguns testes realizados, foi constatado uma alteração nos dados da material separado, ao realizar uma inspeção cuidadosa constatou-se que o flap de controle estava com uma abertura maior que o determinado inicialmente, ao realizar o reposicionamento e reaperto da mesma os dados de separação magnética voltaram a ficar mais satisfatorios.

Figura 19 – Rampa de controle de fluxo indicada pela seta vermelha



Fonte: Autor

Figura 20 – Protótipo inicial / Protótipo com melhorias identificadas



Fonte: Autor

4.2 Testes e resultados obtidos

4.2.1 Testes de vazão de grão

Para análise da eficácia do equipamento, foi planejado testes que identifique a capacidade de separação de materiais ferrosos e a perda de material resultante dessa separação.

Inicialmente para conhecimento da vazão de escoamento do silo que poderia ser realizado a separação, realizamos o teste de vazão do silo de alimentação, foi feito um ensaio simples com 10 repetições, onde enchemos o silo com açúcar bloqueando a saída e desbloqueando posteriormente, abastecendo até que 1 KG de açúcar tenha sido passado pelo silo. O resultado obtido em todos os testes, foram de 10 segundos para 1 KG de açúcar, logo 6 kg/min. Conforme figura 21.

Figura 21 – Ensaio de vazão de açúcar

Fonte: Autor

4.2.2 Testes de rotação do tambor

Após análise da vazão, foi detereminado os testes iniciais para observar a melhor velocidade de rotação para os testes, para não testar o motoredutor no limite foi determinado que não fosse realizado testes com 4v nem com 12v pois essas tensões poderiam levar a sobrecarga e consegquentemente queima do componente. Os teste foram realizados com 10v que trasminte 66 rpm com essa velocidade foi passado no sistema 10 porcas M6 repetindo 10x e observado os resultados obtidos, o segundo teste foi alterado a tensão para 8v que trasminte 48 rpm mesma quantidade de porcas e número de repetições, terceiro e último teste dessa etapa incial com 6v que transmite 36 rpm.

Além da quantidade de porcas separadas, foram observadas as perdas de material para purificação. Todos os ensaios realizados, foram usados uma amostragem de 200g de açúcar, por se tratar de um volume de açúcar aceitável observado em relação as dimensões do protótipo. Para apurar e mesurar os testes realizados, foi utilizado uma balança de cozinha de 1g – 10 kg.

Abaixo, seguem as tabelas dos resultados obtidos.

Tabela 3 – 66 RPM 10 porcas M6 (22g de aço) 200g de açúcar

Nº do teste	Grãos Coletados (g)	Porcas separadas (peça)	Grãos perdidos (g)	Porcas não coletadas (peça)	% de Grãos recuperados	% de eficiência da máquina
1	192	10	8	0	96,00%	100,00%
2	194	10	6	0	97,00%	100,00%
3	193	9	7	1	96,50%	90,00%
4	200	10	0	0	100,00%	100,00%
5	194	9	6	1	97,00%	90,00%
6	194	10	0	0	97,00%	100,00%
7	198	10	2	0	99,00%	100,00%
8	197	10	3	0	98,50%	100,00%
9	192	9	8	1	96,00%	90,00%
10	199	9	1	1	99,50%	90,00%
Média	**195,3**	**9,6**	**4,1**	**0,4**	**97,65%**	**96,00%**

Fonte: Autor

Tabela 4 - 48 RPM 10 porcas M6 (22g de aço) 200g de açúcar

Nº do teste	Material Coletado (g)	Porcas separadas (peça)	Material perdido (g)	Porcas não coletadas (peça)	% de material recuperado	% de eficiência da máquina
1	198	10	2	0	99,00%	100,00%
2	197	10	3	0	98,50%	100,00%
3	200	9	0	1	100,00%	90,00%
4	198	10	2	0	99,00%	100,00%
5	195	10	5	0	97,50%	100,00%
6	197	9	3	1	98,50%	90,00%
7	195	10	5	0	97,50%	100,00%
8	193	10	7	0	96,50%	100,00%
9	200	10	0	0	100,00%	100,00%
10	199	9	1	1	99,50%	90,00%
Média	**197,2**	**9,7**	**2,8**	**0,3**	**98,60%**	**97,00%**

Fonte: Autor

Tabela 5 - 36 RPM 10 porcas M6 (22g de aço) 200g de açúcar

Nº do teste	Grãos Coletados (g)	Porcas separadas (peça)	Grãos perdidos (g)	Porcas não coletadas (peça)	% de Grãos recuperados	% de eficiência da máquina
1	194	10	6	0	97,00%	100,00%
2	194	10	6	0	97,00%	100,00%
3	198	9	2	1	99,00%	90,00%
4	198	8	2	2	99,00%	80,00%
5	198	9	2	1	99,00%	90,00%
6	200	10	0	0	100,00%	100,00%
7	200	7	0	3	100,00%	70,00%
8	199	9	1	1	99,50%	90,00%
9	197	10	3	0	98,50%	100,00%
10	197	10	3	0	98,50%	100,00%
Média	**197,5**	**9,2**	**2,5**	**0,8**	**98,75%**	**92,00%**

Fonte: Autor

Analisando a rotação com melhor porcentagem de eficiência da máquina, a rotação com melhor separação das porcas ferromagnéticas foi a de 48 RPM, atingindo o resultado de 97% de eficiência, a melhor eficiência de remoção de porcas entre os 3 ensaios realizados.

4.2.3 Testes de separação com porcas M6 e açucar

Com base nos testes mostrados nas tabelas 3, 4 e 5 foi determinado a rotação em de melhor eficiência de separação em 48 RPM, para seguirmos com os testes do protótipo foi determinado usar 10 porcas com 200 g de açúcar e 30 repetições para que tivéssemos uma base sólida de dados para observar a eficiência da máquina. Obtivemos resultados satisfatórios, se aproximando dos resultados realizados em apenas 10 testes, resultando uma eficiência de 97,33% de eficiência.

Tabela 6 - 48 RPM 10 porcas M6 (22g de aço) 200g de açúcar

Nº do teste	Grãos Coletados (g)	Porcas separadas (peça)	Grãos perdidos (g)	Porcas não coletadas (peça)	% de Grãos recuperados	% de eficiência da máquina
1	198	10	2	0	99,00%	100,00%
2	197	10	3	0	98,50%	100,00%
3	200	9	0	1	100,00%	90,00%
4	198	10	2	0	99,00%	100,00%
5	195	10	5	0	97,50%	100,00%
6	197	9	3	1	98,50%	90,00%
7	195	10	5	0	97,50%	100,00%
8	193	10	7	0	96,50%	100,00%
9	200	10	0	0	100,00%	100,00%
10	199	9	1	1	99,50%	90,00%
11	197	10	3	0	98,50%	100,00%
12	199	9	1	1	99,50%	90,00%
13	199	10	1	0	99,50%	100,00%
14	194	10	6	0	97,00%	100,00%
15	197	10	3	0	98,50%	100,00%
16	196	9	4	1	98,00%	90,00%
17	193	10	7	0	96,50%	100,00%
18	192	9	8	1	96,00%	90,00%

19	199	10	1	0	99,50%	100,00%
20	199	10	1	0	99,50%	100,00%
21	197	10	3	0	98,50%	100,00%
22	193	9	7	1	96,50%	90,00%
23	198	10	2	0	99,00%	100,00%
24	199	10	1	0	99,50%	100,00%
25	197	10	3	0	98,50%	100,00%
26	195	10	5	0	97,50%	100,00%
27	197	10	3	0	98,50%	100,00%
28	199	9	1	1	99,50%	90,00%
29	200	10	0	0	100,00%	100,00%
30	199	10	1	0	99,50%	100,00%
Média	**197,0**	**9,7**	**3,0**	**0,3**	**98,52%**	**97,33%**

Fonte: Autor

4.2.4 Testes de separação com porcas M3 e açucar

Após os ensaios com porcas M6 com massa de 2,2g cada, iniciamos os ensaios simulando partículas menores, com porcas M3 com massa de aproximadamente 0,42g cada. Com porcas de massa e dimensões menores, os resultados foram ainda melhores, atingindo o 100% de eficiência idealizados em uma produção real.

Tabela 7 - 48 RPM 12 porcas M3 (5g de aço) 200g de açúcar

Nº do teste	Grãos Coletados (g)	Porcas separadas (peça)	Grãos perdidos (g)	Porcas não coletadas (peça)	% de Grãos recuperados	% de eficiência da máquina
1	200	12	0	0	100,00%	100,00%
2	199	12	1	0	99,50%	100,00%
3	197	12	3	0	98,50%	100,00%
4	199	12	1	0	99,50%	100,00%
5	200	12	0	0	100,00%	100,00%
6	198	12	2	0	99,00%	100,00%
7	198	12	2	0	99,00%	100,00%
8	200	12	0	0	100,00%	100,00%
9	200	12	0	0	100,00%	100,00%
10	199	12	1	0	99,50%	100,00%
11	198	12	2	0	99,00%	100,00%
12	198	12	2	0	99,00%	100,00%
13	197	12	3	0	98,50%	100,00%
14	197	12	3	0	98,50%	100,00%
15	197	12	3	0	98,50%	100,00%
16	197	12	3	0	98,50%	100,00%
17	197	12	3	0	98,50%	100,00%
18	196	12	4	0	98,00%	100,00%
19	200	12	0	0	100,00%	100,00%
20	195	12	5	0	97,50%	100,00%
21	200	12	0	0	100,00%	100,00%
22	200	12	0	0	100,00%	100,00%
23	196	12	4	0	98,00%	100,00%

24	198	12	2	0	99,00%	100,00%
25	197	12	3	0	98,50%	100,00%
26	195	12	5	0	97,50%	100,00%
27	198	12	2	0	99,00%	100,00%
28	198	12	2	0	99,00%	100,00%
29	195	12	5	0	97,50%	100,00%
30	194	12	6	0	97,00%	100,00%
Média	**197,8**	**12,0**	**2,2**	**0,0**	**98,88%**	**100,00%**

Fonte: Autor

4.2.5 Testes de separação com cavacos e açucar

Apesar dos resultados com porcas ser satisfatórios, para ciência e conhecimento do protótipo construído, o submetemos a um teste com pequenos cavacos das furações geradas da estrutura metálica misturados com açúcar. Para mensurar a eficiência do ensaio, foi pesado a quantidade de cavacos e tirado fotografias, antes e depois do teste.

O resultado obtido foi 9g separado dos 14g que haviam sido contaminados propositalmente (cerca de 64,3%). Das 214g totais do teste (200g de açúcar mais 14g de cavaco), foram recuperados após o ensaio 211g totais, que possivelmente ficaram nas laterais da máquina.

Figura 22 – Peso dos cavacos antes do teste

Fonte: Autor

Figura 23 – Peso dos cavacos após do teste

Fonte: Autor

Figura 24 – Peso do açúcar contáminado após do teste

Fonte: Autor

4.2.6 Testes de separação com porcas M6 e arroz e feijão

Finalizado os testes com açúcar, realizamos os mesmos testes com diferentes grãos para observar o comportamento com diferentes granulometrias. Os grãos utilizados paras as análises foram o arroz e o feijão, que tem uma granulometria maior que o açúcar, após os testes foi observado que houve uma redução da porcentagem de eficiência da máquina e do grão recuperado. O que por sua vez possa ocorrer devido as dimensões do protótipo escolhido, ou do imã que poderia ser de maior intensidade magnética para melhor magnetização dos contaminantes.

Comparado aos resultados obtidos com os contaminantes da mesma massa no açúcar, a eficiência da máquina nos grãos testados chegou a uma diferença de 8,7% a menos (97,3% do açúcar contra 88,7% do feijão).

Tabela 8 - 48 RPM 10 Porcas M6 (22g de aço) 200g de arroz

Nº do teste	Grãos Coletados (g)	Porcas separadas (peça)	Grãos perdidos (g)	Porcas não coletadas (peça)	% de Grãos recuperados	% de eficiência da máquina
1	192	9	8	1	96,00%	90,00%
2	189	8	11	2	94,50%	80,00%
3	177	8	23	2	88,50%	80,00%
4	177	6	23	4	88,50%	60,00%
5	186	9	14	1	93,00%	90,00%
6	175	9	25	1	87,50%	90,00%
7	183	10	17	0	91,50%	100,00%
8	184	8	16	2	92,00%	80,00%
9	178	10	22	0	89,00%	100,00%
10	188	6	12	4	94,00%	60,00%
11	181	9	19	1	90,50%	90,00%
12	181	10	19	0	90,50%	100,00%
13	179	9	21	1	89,50%	90,00%
14	182	9	18	1	91,00%	90,00%
15	180	9	20	1	90,00%	90,00%
16	174	7	26	3	87,00%	70,00%
17	179	10	21	0	89,50%	100,00%
18	177	9	23	1	88,50%	90,00%
19	177	10	23	0	88,50%	100,00%
20	176	10	24	0	88,00%	100,00%
21	176	9	24	1	88,00%	90,00%
22	176	10	24	0	88,00%	100,00%
23	178	9	22	1	89,00%	90,00%
24	175	9	25	1	87,50%	90,00%
25	174	9	26	1	87,00%	90,00%
26	173	9	27	1	86,50%	90,00%
27	166	10	34	0	83,00%	100,00%
28	174	10	26	0	87,00%	100,00%
29	177	10	23	0	88,50%	100,00%
30	173	9	27	1	86,50%	90,00%
Média	**178,6**	**9,0**	**21,4**	**1,0**	**89,28%**	**89,67%**

Fonte: Autor

Tabela 9 - 48 RPM 10 Porcas M6 (22g de aço) 200g de feijão

Nº do teste	Grãos Coletados (g)	Porcas separadas (peça)	Grãos perdidos (g)	Porcas não coletadas (peça)	% de Grãos recuperados	% de eficiência da máquina
1	176	10	24	0	88,00%	100,00%
2	169	9	31	1	84,50%	90,00%
3	173	10	27	0	86,50%	100,00%
4	179	9	21	1	89,50%	90,00%
5	176	8	24	2	88,00%	80,00%
6	178	7	22	3	89,00%	70,00%
7	177	8	23	2	88,50%	80,00%
8	177	8	23	2	88,50%	80,00%
9	174	8	26	2	87,00%	80,00%
10	178	8	22	2	89,00%	80,00%
11	174	8	26	2	87,00%	80,00%
12	176	7	24	3	88,00%	70,00%
13	175	9	25	1	87,50%	90,00%
14	168	9	32	1	84,00%	90,00%
15	173	10	27	0	86,50%	100,00%
16	172	10	28	0	86,00%	100,00%
17	173	10	27	0	86,50%	100,00%
18	172	7	28	3	86,00%	70,00%
19	170	10	30	0	85,00%	100,00%
20	171	9	29	1	85,50%	90,00%
21	172	10	28	0	86,00%	100,00%
22	167	8	33	2	83,50%	80,00%
23	172	10	28	0	86,00%	100,00%
24	166	9	34	1	83,00%	90,00%
25	176	10	24	0	88,00%	100,00%
26	177	10	23	0	88,50%	100,00%
27	179	9	21	1	89,50%	90,00%
28	178	7	22	3	89,00%	70,00%
29	175	10	25	0	87,50%	100,00%
30	169	9	31	1	84,50%	90,00%
Média	**173,7**	**8,9**	**26,3**	**1,1**	**86,70%**	**88,67%**

Fonte: Autor

4.2.7 Comparativo de testes

Após todos os testes finalizados, pode ser observado nos dados apresentados que as porcas M3 obtivemos uma eficiência de 100%, que é a melhor, comparada a todos os outros ensaios. Quanto aos testes com arroz e feijão a eficiência foi menor em relação ao açúcar, na separação que foi de 89,7% e 88,7%, enquanto com açúcar chegou até 97,33%, algo que possivelmente pode ter ocorrido devido à baixa intensidade o imã utilizado, ou até mesmo as dimensões do protótipo não ser adequada com o tamanho de grão.

4.2.8 Custo do protótipo

Para fabricar o protótipo, foram utilizados os recursos tabelados abaixo:

Tabela 10 - Custos do protótipo

Componentes	Unid.	QT.	R$ Unit	R$ Total
Estrutura	Peça	1	R$ 325,00	R$ 325,00
Mancal	Peça	1	R$ 46,20	R$ 46,20
Back bar	Peça	1	R$ 53,00	R$ 53,00
Polo de Descarga	Peça	1	R$ 15,00	R$ 15,00
Interpolos	Peça	1	R$ 50,00	R$ 50,00
Camisa	Peça	1	R$ 455,12	R$ 455,12
Flange Móvel	Peça	1	R$ 88,70	R$ 88,70
Flange Motriz	Peça	1	R$ 62,33	R$ 62,33
Silo de alimentação	Peça	1	R$ 532,00	R$ 532,00
Mancal fixo	Peça	1	R$ 42,16	R$ 42,16
Rampa	Peça	1	R$ 125,00	R$ 125,00
Calha de coleta e separação	Peça	1	R$ 625,00	R$ 625,00
Camisa	Peça	1	R$ 50,00	R$ 50,00
Conjunto do circuito magnético	Peça	1	R$ 278,15	R$ 278,15
Motor 12v	Peça	1	R$ 85,00	R$ 85,00
Acoplamento do motor	Peça	1	R$ 35,00	R$ 35,00
Imãs de Ferrite	Peça	6	R$ 10,00	R$ 60,00
Eixo	Peça	1	R$ 65,00	R$ 65,00
Rolamento SKF-6000ZZ	Peça	2	R$ 23,11	R$ 46,22
Fonte 12v	Peça	1	R$ 78,00	R$ 78,00
Acrílico	Peça	1	R$ 38,00	R$ 38,00
Parafuso sextavado M4-0,7 X 50mm	Peça	5	R$ 0,50	R$ 2,50
Parafuso sextavado M4-0,7 X 14mm	Peça	45	R$ 0,20	R$ 9,00
Parafuso sextavado M5-0,8 X 18mm	Peça	5	R$ 0,55	R$ 2,75
Parafuso sextavado M5-0,8 X 30mm	Peça	5	R$ 0,60	R$ 3,00
Parafuso sextavado M3-0,5 X 10mm	Peça	20	R$ 0,30	R$ 6,00
Parafuso sextavado M3-0,5 X 8mm	Peça	20	R$ 0,25	R$ 5,00
Porca sextavada M5-0,8	Peça	5	R$ 0,25	R$ 1,25
Porca sextavada M4-0,8	Peça	20	R$ 0,20	R$ 4,00
Arruela lisa 5 N	Peça	5	R$ 0,10	R$ 0,50
Arruela lisa 4 N	Peça	20	R$ 0,10	R$ 2,00
Arruela de pressão A 5	Peça	5	R$ 0,15	R$ 0,75
Arruela de pressão A 4	Peça	20	R$ 0,15	R$ 3,00
Arruela de pressão A 3	Peça	15	R$ 0,15	R$ 2,25
Total				**R$ 3.196,88**

Fonte: Autor

5. Considerações Finais

Ao fazer a análise das características nas máquinas separadoras de ferro já existentes, constatou-se que a principal característica desse tipo de equipamento é o funcionamento com um arranjo de imãs no sistema Halbach. Após compreender o arranjo Halbacharray, foi possível a replicação de um protótipo funcional da máquina separadora, para a separação das partículas contaminantes de ferro no açúcar.

Os resultados quantitativos através dos teste de análise e eficiência do protótipo, mostraram que existem muitas variáveis envolvidas, desde a granulometria do grão, à massa do contaminante ferroso e até a velocidade de distribuição durante a alimentação, nos testes se notou que a umidade do açúcar influencia na velocidade que o tambor pode operar para maior produção de trabalho, a máquina separadora como protótipo teve uma eficiência de 97% ao realizar a separação do material ferro magnético do açúcar.

No levantamento de custos do projeto notou-se que os preços dos componentes influência diretamente com a necessidade de trabalho do equipamento, o dimensionamento dos componentes é feito de acordo com a quantidade de material a ser processado, como por exemplo a potência do motor que aciona o tambor giratório, a compra do motor é feita em cima da quantidade de material a ser processado. Outro ponto que acaba elevando o custo do projeto é o imã a ser usado, o de Ferrite que foi a escolha do nosso projeto tem seu preço onze vezes menor que o de Neodímio, que é um imã de maior capacidade na comparação de escala de Gauss. Por outro lado, como nosso protótipo tinha finalidade de experimentação e de mostrar a separação com a imantação na prática, verificamos que o imã de Ferrite é eficaz em materiais metálicos de grandes massas, e se notou que para fazer a separação de partículas de menores massas de ferro, seria necessário a utilização de imãs com capacidade de magnetização maior, como por exemplo o Neodímio.

6. Referências Bibliográficas

Artigos

BIRD, J. Z. Aninvestigationintothe use ofelectrodynamicwheels for high-speedgroundtransportation. n. January 2007, p. 429, 2016.

CONFER, P. E. Pureza do Produto Seis maneiras de atacar a Pureza e Evitar Recalls. [s.d.]

DE, P. D. E. D. E. DE FONTES DE CAMPOS MAGNÉTICOS: Florianópolis. 2017.

MAULANA. No Title空間像再生型立体映像の研究動向. Nhk技研, v. 151, n. 2, p. 10–17, 2015.

REVIEWED, P.; BERKELEY, L.; CANCER, B. Lawrence Berkeley NationalLaboratory Lawrence Berkeley NationalLaboratory. n. July, p. 35–43, 2010.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; LUZ, A. B. da. Capítulo 18 – ensaios de separação magnética e eletrostática. Tratamento de minerais, p. 858, 2010.

BORTOLINI, G. A.; FISBERG, M. Nutritionalguidelines for patientswithirondeficiency. Revista Brasileira de Hematologia e Hemoterapia, v. 32, n. SUPPL. 2, p. 105–113, 2010.

CALLISTER, R. Ciência e Engenharia de Materiais. [s.l: s.n.]

INMETRO. Inmetro - Açúcar. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/acucar.asp>. Acesso em: 3 out. 2021.

LUCIANO, J.; ROSS, S. A trajetória da cana-de-açúcar no Brasil: perspectivas geográfica, histórica e ambiental. [s.l: s.n.]

MACHADO S., S. Tecnologia da Fabricação do Açúcar. Universidade Federal de Santa Maria, p. 56, 2012. Disponível em: <http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifgo/tecnico_acucar_alcool/tecnologia_fabricacao_acucar.pdf>.

QUINTAES, K. D. O Uso Das Panelas De Ferro Como Suprimento Das. Rev. Ciênc. Méd, v. 14, n. 6, p. 529–536, 2005.

RODRIGUES, NOGUEIRA, et al. A INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA DE. p. 2–8, 2019.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais. [s.l: s.n.]

SATOLO, L. F.; RUMENOS, M.; BACCHI, P. Dinâmica Econômica Das Flutuações Na. p. 377–397, 2009.

VIDAL, F. Produção E Mercado De Etanol. Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste - ETENE, p. 1–10, 2020.

SALVADOR, R. P. et al. Influenceofacceleratortypeanddosageonthedurabilityofwet-mixedsprayed concrete againstexternal sulfate attack. Constructionand Building Materials, v. 239, p. 117883, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117883>

WILSON, E. O. The National Academies Press. [s.l: s.n.]. v. 12

SVOBODA, J. et al. Recent developments in magnetic methods of material separation. Minerals Engineering, [S. l.], 2003.

Livros

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concrete: Microstructure, Properties, andMaterials, FourthEdition. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

Normas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6023: Informação e documentação - Referências - Elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

Sites

ONU. 17 objetivos para transformar nosso mundo. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>. Acesso em: 15 jul. 2020.

OXIMAG. Separação magnética, livre o seu produto da contaminação ferrosa. Disponível em: <https://www.oximag.com/blog/voce-sabe-o-que-e-e-para-que-serve-a-separacao-magnetica/>. Acesso em: 2 abr. 2022.

W 6000-2Z - Rolamentos rígidos de esferas | SKF. Disponível em: <https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-W 6000-2Z>. Acesso em: 15 maio. 2022.

COMPRERURAL. Embarques de açúcar batem recorde em outubro - Compre Rural. Disponível em: <https://www.comprerural.com/embarques-de-acucar-batem-recorde-em-outubro/>. Acesso em: 26 maio. 2022.

Teses e dissertações

SALVADOR, R. P. Acceleratedcementitiousmatrices: hydration, microstructureandmechanicalstrength. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental). UniversitatPolitècnica de Catalunya, Barcelona, 2016.