



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

CAIQUE SOLON LIMA ALVES DOS SANTOS

**CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM HIDROCICLONE PARA
APLICAÇÕES DE SEPARAÇÃO DE FÉCULA DE MANDIOCA E
MANIPUEIRA.**

CRUZ DAS ALMAS - BA

DEZEMBRO, 2019

CAIQUE SOLON LIMA ALVES DOS SANTOS

**CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM HIDROCICLONE PARA
APLICAÇÕES DE SEPARAÇÃO DE FÉCULA DE MANDIOCA E
MANIPUEIRA.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: IVANOÉ JOÃO RODOWANSKI

Cruz das Almas - BA

DEZEMBRO, 2019

Dedicatória

Agradeço a Deus, por me mostrar cada dia mais, que para quem tem fé tudo é possível. Aos meus pais Raimundo Jorge e Valdecy, por terem me fornecido todo suporte necessário para que eu pudesse realizar meus sonhos. A minha tia, que sempre me incentivou e me deu apoio na minha jornada. A Brenda Queiroz Vinhas, por todo carinho, esforço e paciência. Ao meu orientador Ivanóe, pela disponibilidade, prestatividade, paciência, e incentivo fundamentais para a conclusão deste trabalho. Aos meus amigos da Barregas e da Coliga que sempre me ajudaram nessa caminhada. Ao meu irmão Jorge Vitor pela amizade. Aos membros da banca pela avaliação deste trabalho.

*"Ninguém ignora tudo. Ninguém sabe tudo.
Todos nós sabemos alguma coisa.
Todos nós ignoramos alguma coisa.
Por isso aprendemos sempre".
(Paulo Freire)*

RESUMO

Este trabalho teve como finalidade a construção e avaliação de um dispositivo separador de fases do tipo hidrociclone. Hidrociclones são equipamentos utilizados em diversos tipos de indústria para separar dois componentes que possuem densidades diferentes. Esse tipo de dispositivo utiliza da força centrífuga para criar um fluxo rotacional que gera diferentes pressões dentro do equipamento separando assim os componentes. O componente de maior densidade é expelido por uma saída inferior chamada de *underflow*, já o componente que possui menor densidade é expelido por uma saída superior chamada de *overflow*. Foram construídos dois equipamentos, ambos têm a finalidade de separar fécula de mandioca e manipueira, um com menor diâmetro afim de otimizar o mecanismo de separação, construídos com corpo de garrafa PET e materiais de baixo custo para viabilizar a utilização na agropecuária familiar. A manipueira é o líquido extraído da mandioca quando ela é prensada no processo de fabricação da farinha ou produção de fécula. Tanto a mandioca quanto esse líquido contêm ácido cianídrico, venenoso e nocivo à alimentação humana e animal. Devido a esse risco, muitos produtores despejam esse material a céu aberto sem nenhum tratamento, causando assim dano ao meio ambiente pela presença de ácido cianídrico. Apesar do nível de toxicidade, com o devido tratamento a manipueira pode ser utilizada para alimentação animal, fertilização e como pesticida. Para a realização dos testes foi necessário o *start-up* da operação com água para ajuste dos vórtices responsáveis por parte da separação, após esse ajuste, testes comparativos com amostras de massa e de nível foram feitos, afim de validar a utilização do equipamento. Os resultados apresentaram valores razoáveis para efetividade relativa de separação e valores de eficiência μ maiores que 60%.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrociclone, Fécula de mandioca, Manipueira, Separador de Fases.

ABSTRACT

This work was used to construct and evaluate a hydrocyclone phase separator device. Hydrocyclones are equipment used in various types of industry to separate two components that have different densities. This type of device uses centrifugal force to create a rotating flow that generates different pressures within equipment that separates components, or components of higher intensity. they are expelled by a lower output than the insufficient overflow call, whereas the component that has lower density is expelled by an output higher than the overflow. Two equipments were built, one with smaller diameter to optimize or selection mechanism, both using cassava pressure separator and manipueira, and were constructed with cheaper PET bottle body and low cost materials to enable the use in family farming. . Manipueira is extracted from cassava when it is processed in the flour manufacturing or starch production process. Both cassava and this liquid are acidic, poisonous and harmful to human and animal feed. Due to this risk, many products dump this material in the open without treatment, causing damage to the environment by the presence of hydrocyanic acid, albeit of a low level. of toxicity with handling treatment can be used for animal feed, fertilization and pesticides. To perform the tests it was necessary or the initialization of the water operation to adjust the vortices responsible for the selection, after this adjustment, comparative tests with mass and level samples were made after validation of the use of the equipment. results listed reasonable values for selection effectiveness and efficiency values μ greater than 60%.

KEYWORDS: Hydrocyclone, Cassava starch, Manipueira, Phase Separator.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de um hidrociclone	12
Figura 2 – Escoamentos do hidrociclone	13
Figura 3 – Hidrociclone com eixo horizontal	14
Figura 4 – Curto-Circuito do escoamento	15
Figura 5 – Perfis de Velocidade	16
Figura 6 – Fluxograma de Produção de Fécula de Mandioca	20
Figura 7 – Separador Centrífugo	20
Figura 8 – Fotomicrografia da partícula de fécula de mandioca	22
Figura 9 – Fluxograma de concepção do hidrociclone	25
Figura 10 – Fluxograma de etapas dos testes	25
Figura 11 – Hidrociclone H1	30
Figura 12 – Hidrociclone H2	31
Figura 13 – Layout de Funcionamento dos Hidrociclones	32
Figura 14 – Bancada de Testes	32
Figura 15 – Vórtice Hidrociclone H1	33
Figura 16 – Amostra H2	35
Figura 17 – Amostra H1	36
Figura 18 – Nível hidrociclone H1	39
Figura 19 – Nível hidrociclone H2	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relações geométricas de famílias de hidrociclone	16
Tabela 2 – Caracterização química da manipueira	23
Tabela 3 – Efeito da adubação com manipueira	24
Tabela 4 – MEDIDAS H2	26
Tabela 5 – MEDIDAS H1	27
Tabela 6 – Relações Geométricas	28
Tabela 7 – Materiais e Valores	28
Tabela 8 – Materiais Sem Custo Associado	29
Tabela 9 – Especificações da Bomba	29
Tabela 10 – Quantidade de suspensão nos reservatórios	37
Tabela 11 – Massas das amostras hidrociclone H1	37
Tabela 12 – Massas das amostras hidrociclone H2	38
Tabela 13 – Eficiência η dos hidrociclones	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Contextualização do estudo	10
1.2	Objetivos	11
1.2.1	Objetivo Geral	11
1.2.2	Objetivos Específicos	11
1.3	Estruturação do trabalho	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	Hidrociclone	12
2.1.1	Descrição e Princípio de Funcionamento	12
2.1.2	Classificação de um Hidrociclone	15
2.1.3	Perfil de Velocidade um Hidrociclone	16
2.1.4	Conceitos Relativos a Separação em Hidrociclone	17
2.1.4.1	Razão de Líquido	17
2.1.4.2	Eficiência η	17
2.1.4.3	Eficiência Reduzida η'	18
2.1.4.4	Eficiência Granulométrica η_G	18
2.1.4.5	Eficiência Granulométrica Reduzida η'_G	18
2.1.4.6	Diâmetro de Corte d_C	19
2.2	Fécula de mandioca	19
2.2.1	Caracterização e Obtenção	19
2.2.2	Caracterização da Partícula de Fécula de Mandioca	21
2.3	MANIPUEIRA	22
2.3.1	Caracterização	22
2.3.2	Composição e aplicação da manipueira	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1	Dimensionamento	26
3.1.1	Requisitos de Projeto	26
3.1.2	Definição das medidas	26
3.2	Seleção e compra dos materiais	28
3.3	Montagem do hidrociclone	29
3.4	Planejamento e operação de funcionamento da bancada de testes	31
3.4.1	Regulagem do Fluxo do Hidrociclone	33
3.5	Produção da mistura Fécula/água	34
3.6	Testes de separação da mistura fécula/água	34

3.6.1	Procedimentos experimentais	34
3.6.2	Procedimentos Avaliativos	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1	Quantidade de suspensão nos reservatórios	37
4.2	Análise comparativa de massas	37
4.2.1	Hidrociclone H1	37
4.2.2	Hidrociclone H2	38
4.3	Análise comparativa visual	38
4.4	Resultados de eficiência η	40
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	42
5.1	Conclusões	42
5.2	Sugestões de Trabalhos Futuros	42
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO

Os hidrociclones são equipamentos de separação que podem ser utilizados para separar diversos tipos de substâncias, seja para a separação de sólido/líquido ou sólido/gás, nas mais diversas aplicações. A separação líquido/líquido não é muito comum devido a pequena diferença de densidade entre os mesmos. Uma exceção é a indústria petrolífera que utiliza o equipamento para separar óleos de diferentes densidades (ALVES, 2012). O mecanismo de separação desse dispositivo é o mesmo das centrífugas, realizado pela sedimentação centrífuga.

São dispositivos de construção simples, por não utilizarem partes móveis internas como as centrífugas. São caracterizados pelo baixo custo de fabricação, manutenção e operação, além de necessitarem de espaço reduzido nas plantas industriais, apresentam grande versatilidade para separação de partículas de diferentes tamanhos (FREITAS, 2009).

Por sua versatilidade, o equipamento também pode ser utilizado na separação entre a fécula de mandioca e a manipueira. A fécula de mandioca é um particulado de cor branca, com baixa solubilidade em água fria, quando misturado a água forma uma suspensão leitosa que se deposita rapidamente, permitindo assim a sua separação. Quando misturado a água aquecida entre 60 e 75°C, forma uma substância gelatinosa denominada goma ou grude. Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), a manipueira é um resíduo proveniente da fabricação de farinha ou de fécula de mandioca, constituído da água da raiz misturada a água utilizada no processo produtivo da farinha, ou da fécula de mandioca.

A manipueira pode ser utilizada para diversas aplicações como: fabricar vinagre e sabão, alimentação bovina, combate de pragas e controle de carrapatos. Por possuir ácido cianídrico, que é uma substância tóxica, algumas precauções devem ser tomadas antes de sua utilização. Para o uso como alimentação animal é necessário aguardar um período para a sua utilização, já para o controle de pragas é preciso diluir a substância em água.

Na produção artesanal de fécula de mandioca, a separação entre a fécula e a manipueira é feita através de peneiras e do processo de decantação da fécula, esse processo demanda tempo, além de uma exposição maior do produtor ao ácido cianídrico. Diante disso, este projeto teve como objetivo a construção e avaliação de um hidrociclone para separar fécula de mandioca e manipueira, tendo como premissa de projeto a utilização de garrafa feita de Politereftalato de Etileno (PET) para construção do corpo do equipamento e outros matérias de baixo custo para as demais necessidades construtivas.

A construção do hidrociclone possibilitou testar a eficiência do equipamento na separação entre a fécula e a manipueira. Para isso, foram feitas análises de comparação de massas de amostras, análises visuais de nível e cálculo de eficiência. Ainda, verificou-se a viabilidade da construção do separador de fases com materiais de baixo custo ou recicláveis.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho teve como objetivo a construção e avaliação de um separador de fases do tipo hidrociclone, com o intuito de separar fécula e manipueira provenientes do beneficiamento da mandioca, utilizando materiais de baixo custo ou recicláveis.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Dimensionar, construir, avaliar um hidrociclone para a realização de testes de separação de suspensão;
2. Testar a eficiência do dispositivo;
3. Orçar a construção do equipamento;
4. Verificar a viabilidade de um eventual uso do equipamento em fécularias artesanais.

1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho aqui apresentado está dividido da seguinte forma: o capítulo 1 é uma introdução ao tema, o capítulo 2 descreve todo embasamento teórico necessário para fins da pesquisa, o capítulo 3 detalha os materiais e métodos utilizados necessários para o desenvolvimento do estudo, o capítulo 4 descreve os resultados experimentais tal como toda a sua discussão, e o Capítulo 5 estão relatos do que foi concluído acerca do trabalho realizado e as sugestões de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

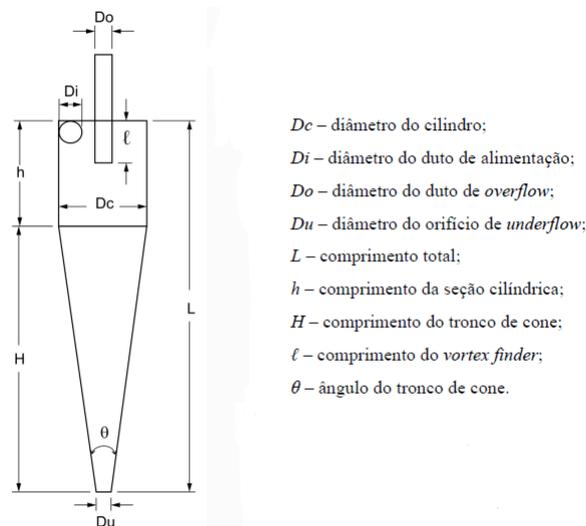
2.1 HIDROCICLONE

2.1.1 Descrição e Princípio de Funcionamento

Estando entre os dispositivos de separação mais antigos da indústria de beneficiamento de particulados, os hidrociclones foram patenteados e utilizados desde o final do século XIX, quando eram utilizados na separação entre areia e água. Atualmente, também são amplamente utilizados em diferentes processos industriais, como separação físicas e reações químicas.

O hidrociclone é definido como um dispositivo de separação de substâncias sólidas, líquidas ou gasosas, formado por uma parte cônica ligada a uma parte cilíndrica na qual existe uma entrada tangencial para a suspensão de alimentação. Na parte superior do hidrociclone está posicionada uma saída para a suspensão diluída, chamada de *overflow*, e na parte inferior há uma saída de suspensão concentrada chamada de *underflow* (JANK, 2016). A Figura 1 mostra o esquema de um hidrociclone convencional com suas principais medidas geométricas:

Figura 1 – Esquema de um hidrociclone

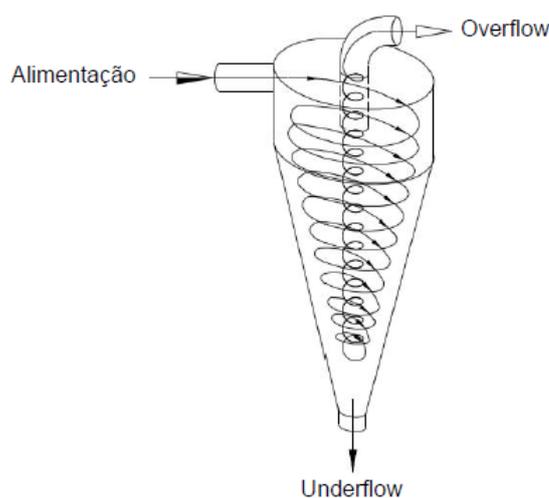


Fonte: SILVA, 2014

O mecanismo de separação é o mesmo das centrífugas, realizado pela sedimentação centrífuga, onde partículas em suspensão são submetidas a um campo centrífugo que provoca a separação do fluido. Quando um hidrociclone é alimentado tangencialmente com uma suspensão sólido-líquida, líquida-líquida ou sólido-gasoso, ocorre a formação de um vórtice descendente dentro do equipamento. Isso faz com que as partículas de maior

densidade sejam projetadas contra a parede e levadas até a saída inferior (*underflow*) para serem expelidas, e as partículas de menor densidade são arrastadas para o centro do equipamento formando um vórtice ascendente saindo pela saída superior (*overflow*). (CRUZ, 2010). A Figura 2 ilustra esse mecanismo.

Figura 2 – escoamentos do hidrociclone



Fonte: SILVA, 2014

Para que o mecanismo de separação seja efetivo, é essencial que exista uma diferença de densidade entre os componentes presentes na mistura. Caso a diferença de densidade entre os componentes seja mínima a efetividade do processo vai ser penalizada (TONIN, 2015).

O diâmetro da porção cilíndrica do ciclone é o parâmetro geométrico de efeito prático mais importante. Ele determina o diâmetro de classificação das partículas separadas e é o responsável pela vazão que o equipamento suporta. Svarovsky (1992) diz que somente hidrociclones específicos ou de pequeno diâmetro têm os diâmetros de saída *overflow* e *underflow* fixos. A maioria das unidades comerciais são fornecidas com essas dimensões variáveis. Isso se deve ao fato de que o tamanho ótimo de abertura não pode ser fixado de forma exata, e um ajuste correto dessas dimensões é vital para se obter a melhor operação do hidrociclone. Nas diversas operações o diâmetro do *underflow* é melhor ajustado após o *start-up* da operação.

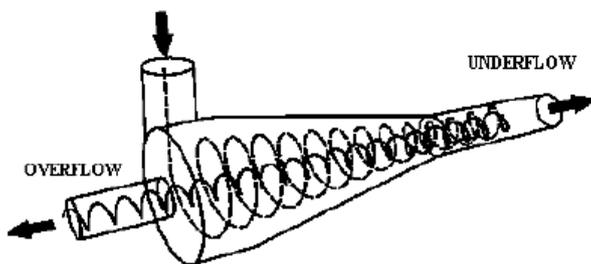
O mecanismo de separação do hidrociclone é uma operação unitária. Assim como ocorre nas outras operações do tipo, (transferência de massa ou de calor), a separação da suspensão nunca é completa. Como algo inerente ao processo, existem pequenas quantidades de partículas de maior densidade saindo através do *overflow*, e certa quantidade de material com menor densidade saindo pelo *underflow*. Dependendo da diferença entre as densidades das partículas é possível que parte do material não seja classificado, ou seja, ocorrência de partículas com maiores densidade em meio as de maior densidade e

vice-versa (SVAROVSKY, 1992).

Devido ao perfil particular de escoamento de um hidrociclone, uma partícula em qualquer ponto do mesmo é sujeita basicamente a duas forças: uma está relacionada com um dos campos de aceleração externo ou interno, que são a força da gravidade e a força centrífuga, a outra força é devido ao arraste exercido na partícula. O efeito do campo gravitacional normalmente é posposto, pois a força centrífuga possui maior intensidade. Então, somente a força de arraste que aparece quando há movimento relativo entre a partícula e o fluido e a força centrífuga são considerados. Quando a força centrífuga excede o arraste, a partícula é direcionada radialmente para a parede do dispositivo, quando a força de arraste é maior, a partícula é direcionada para parte central (SILVA, 2014).

Os hidrociclones podem ser operados com o eixo inclinado em qualquer ângulo, como mostra a Figura 3, pois a força gravitacional pouco influência no seu padrão de escoamento. Entretanto a remoção do fluxo pela saída *underflow* é facilitada pelo eixo na vertical (SILVA, 2014).

Figura 3 – Hidrociclone com eixo horizontal

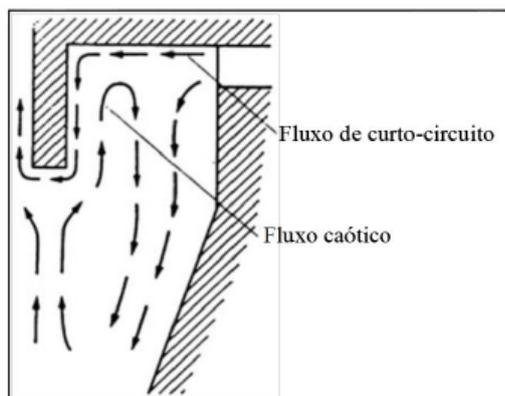


Fonte:COELHO, 2011

Curto-circuito do escoamento entre a entrada e o *overflow* pode ocorrer próximo ao topo do hidrociclone. Esse efeito pode ser reduzido como resultado da formação de redemoinhos circulantes que tendem a atuar como uma barreira. O projeto do *vortex finder* também é importante para redução desse efeito que gera perda de material não classificado (SILVA, 2014).

A Figura 4 ilustra esse fenômeno. As setas indicam o caminho mais curto percorrido por um conjunto de partículas da corrente de alimentação. Quando o canal de captação de saída do *overflow*, chamado de *vortex finder*, tem seu comprimento reduzido, poderá ocorrer a formação de um curto-circuito de partículas no hidrociclone. Por outro lado, se o *vortex finder* for longo reduzirá a migração de partículas do vórtice interno para o vórtice externo, prejudicando a eficiência da separação (SILVA, 2014).

Figura 4 – Curto-Circuito do escoamento



Fonte: SILVA, 2014

Por sua versatilidade os hidrociclones podem ser utilizados como separadores tanto para separação diluídas quanto concentradas, e as partículas dispersas podem ser sólidas, líquidas ou bolhas de gás. Os hidrociclones também são amplamente utilizados para a redução de pigmentação e coloração em tratamentos de efluentes, concentrador e equipamento de lavagem, podendo ainda assumir a função de desgaseificador e classificador (COELHO, 2011).

Para a separação entre dois líquidos é necessário ter conhecimento sobre as propriedades da fase dispersa e da fase contínua. Se o líquido com maior densidade for a fase dispersa, como exemplo da água dispersa em óleo de girassol, a maior parte do fluxo é expelida pelo hidrociclone através do *overflow*. Mas se o líquido com menor densidade está disperso, como exemplo do óleo de girassol disperso em água, a maior parte do fluxo deve ser expelida pelo hidrociclone através da inferior *underflow* (COELHO, 2011).

2.1.2 Classificação de um Hidrociclone

Svarovsky (1992) comenta que, os hidrociclones estão classificados em famílias, onde cada família foi otimizada para determinados regimes de operação. Tendo como principal característica a relação constante entre as suas medidas geométricas, associadas com o diâmetro da parte cilíndrica. As famílias mais utilizadas e conhecidas são as *Rietema* e a *Bradley*.

Existem três grupos bem conhecidos de hidrociclones: *Krebs*, *Rietema* e *Bradley*. As famílias de hidrociclone *Rietema* e *Bradley* são geometricamente semelhantes (ARRUDA, 2008). Estudos mostram que um hidrociclone filtrante pertencente à família *Bradley* proporcionou nas mesmas condições operacionais do equipamento convencional acréscimos na vazão de alimentação e decréscimo nos números de Euler. Utilizando um hidrociclone filtrante da família *Rietema*, foi verificado um comportamento oposto dessa família se

comparado com a família *Bradley*. A Tabela 1 ilustra as relações geométricas das famílias de hidrociclones, essas relações são adimensionais.

Tabela 1 – Relações geométricas de famílias de hidrociclone

Relações Geometricas	Krebs	Rietema	Bradley
D_i/D_c	0,26752	0,28000	1/7
D_o/D_c	0,15924	0,34000	1/5
L/D_c	5,87414	5,00000	6,8
l/D_c	0,95541	0,40000	1/2
h/D_c	-	-	1/2
θ	12,7	20	9,0

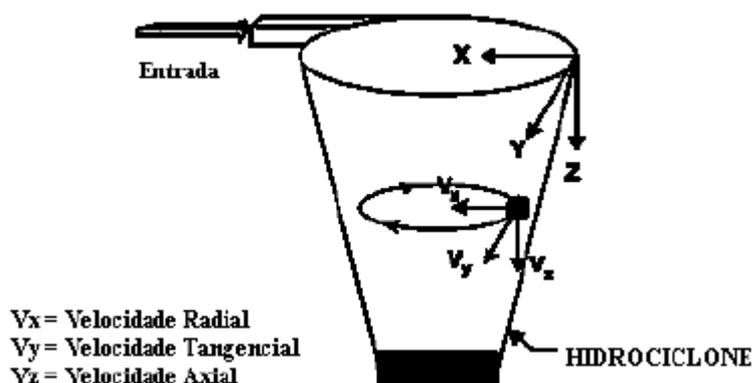
Fonte: ARRUDA, 2008

O critério de seleção de família para determinada operação é bem singular, pois depende muito da finalidade de utilização do hidrociclone. Por exemplo, quanto maior a relação entre o comprimento l do canal de captação de *overflow* com o diâmetro D_c do cilindro, menores as chances de ocorrer um curto-circuito de escoamento.

2.1.3 Perfil de Velocidade um Hidrociclone

Apesar de complexos devido ao escoamento turbulento, os perfis de velocidade no interior de um hidrociclone são importantes para avaliar o bom funcionamento do hidrociclone. A Figura 5 ilustra os perfis.

Figura 5 – Perfis de Velocidade



Fonte:COELHO, 2011

A velocidade global é composta de três componentes: tangencial, axial e radial. A componente tangencial da velocidade é o mais importante no perfil de escoamento de um hidrociclone, por ter relação com a pressão dentro de um hidrociclone. Com o

escoamento em forma de vórtice a pressão estática aumenta radialmente, esse efeito é determinado pela distribuição da componente tangencial da velocidade no escoamento e é a principal causa para queda de pressão através de um hidrociclone em operação (AGUILERA;ARISMENDY, 2014).

É importante ressaltar que a componente tangencial da velocidade aumenta a partir da parede do hidrociclone com o decréscimo do raio. O aumento da velocidade tangencial implica no aumento da força centrífuga imposta na separação de partículas e conseqüentemente num melhor desempenho na separação das partículas com menor tamanho (ANDRADE, 2007).

2.1.4 Conceitos Relativos a Separação em Hidrociclone

Alguns conceitos importantes relacionados aos hidrociclones devem ser apresentados, para um melhor entendimento do seu funcionamento e das variáveis envolvidas no projeto.

2.1.4.1 Razão de Líquido

Quando a vazão da suspensão que alimenta o hidrociclone é pequena, pode ocorrer uma condição em que vórtices internos necessários para a separação da suspensão não se formam, pois não existe movimento rotacional do fluido nem ação do campo centrífugo. Nesse caso, o que existe é uma divisão de escoamento e o separador funciona como uma conexão em “T”, que é suficiente para permitir o arraste das partículas. Esse fenômeno é denominado como efeito “T”, é inerente ao escoamento (SILVA, 2014). A Equação 2.1 demonstra a relação.

$$R_L = \frac{Q_u (1 - C_{vu})}{Q * (1 - C_v)} \quad (2.1)$$

R_L é a razão de líquido que corresponde ao grau de extensão do fenômeno de divisão do escoamento. Q_u é a vazão volumétrica de líquido que é expelida pelo *underflow*. Q é a vazão volumétrica de alimentação, C_{vu} é a concentração volumétrica de sólidos no *underflow* e C_u a concentração volumétrica no corrente de alimentação. O fator R_L está diretamente relacionado a eficiência de coleta, pois se uma quantidade superior de líquido for descarregado no *underflow* mais partículas serão arrastadas com o fluido.

2.1.4.2 Eficiência η

O quociente entre a vazão mássica das partículas expelidas pelo *underflow* e a vazão mássica de alimentação expressa a eficiência total η . Esse quociente abrange todas as partículas descarregadas pelo *underflow* sem levar em consideração o mecanismo de separação, ou seja, considera tanto os sólidos arrastados pela separação de fluxo quanto

aqueles separados devido a ação do campo centrífugo (SILVA, 2014). A Equação 2.2 demonstra essa relação:

$$\eta = \frac{C_{W_u} W_u}{C_w W} \quad (2.2)$$

Onde C_{W_u} é a concentração mássica das partículas expelidas pelo *underflow*, W_u a vazão mássica da corrente do *underflow*, C_w é a concentração mássica das partículas na alimentação e W a vazão mássica da corrente de alimentação.

2.1.4.3 Eficiência Reduzida η'

Contemplando apenas os sólidos coletados no *underflow* através do efeito do campo centrífugo, a eficiência reduzida η está relacionada com a razão de líquido e desconsidera as partículas separadas devido ao efeito de separação de fluxo. A Equação 2.3 demonstra essa relação:

$$\eta' = \frac{\eta - R_L}{1 - R_L} \quad (2.3)$$

2.1.4.4 Eficiência Granulométrica η_G

Segundo Svarovsky (1992) a provável posição de diferentes partículas na entrada do separador e a probabilidade de o regime possuir característica turbulenta, fazem com que a eficiência de separação de um hidrociclone tenha um caráter probabilístico. Sendo assim, as partículas maiores são mais prováveis de serem separadas em relação as menores. A partir dessa análise a eficiência granulométrica η_G relaciona o poder de separação do hidrociclone frente ao tamanho das partículas. A Equação 2.4 representa a eficiência granulométrica.

$$\eta_G = \eta \frac{\frac{dX_u}{dd_p}}{\frac{dX_a}{dd_p}} \quad (2.4)$$

Onde X_u é a fração mássica de partículas no *underflow* com diâmetro menor que d_p , d_p o diâmetro da partícula e X_a a fração mássica de partículas da alimentação com diâmetro menor que d_p .

2.1.4.5 Eficiência Granulométrica Reduzida η'_G

Assim como acontece com a eficiência reduzida, a eficiência granulométrica reduzida considera apenas a separação por meio do campo centrífugo, excluindo a parcela relacionada ao efeito de separação de fluxo. A Equação 2.5 apresenta essa relação:

$$\eta'_G = \frac{\eta_G - R_L}{1 - R_L} \quad (2.5)$$

2.1.4.6 Diâmetro de Corte d_C

Segundo Silva (2014) o diâmetro de corte d_C consiste no diâmetro das partículas coletadas com 50% de eficiência. Em outras palavras, as partículas que possuem o diâmetro igual ao diâmetro de corte têm a mesma probabilidade de ser expelidas pelo *underflow* e pelo *overflow*. As partículas com diâmetro maior que o de corte serão coletadas com eficiência granulométrica superior a 50%, caso as partículas tenham diâmetro menor que o de corte, o valor de η_C vai ser abaixo de 50%. O diâmetro de corte é inversamente proporcional a eficiência total η , ou seja, quanto maior o valor de η menor o valor de d_C .

2.2 FÉCULA DE MANDIOCA

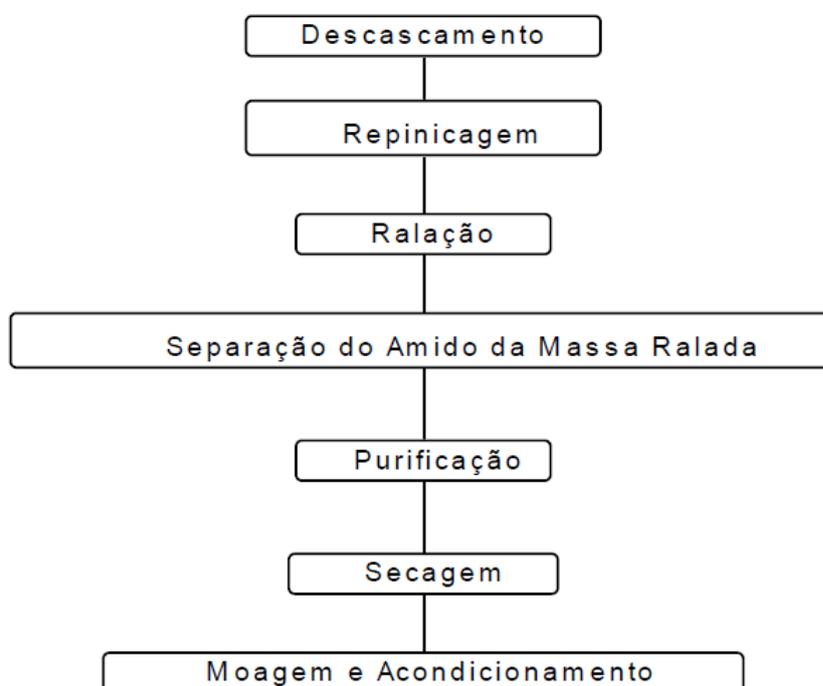
2.2.1 Caracterização e Obtenção

Fécula, amido, polvilho ou goma são sinônimos. A fécula é associada ao produto originado de tubérculos e raízes, já no caso do amido, sua obtenção é por meio de sementes. A fécula de mandioca é branca, insípida e insolúvel em água fria, embora absorva certa quantidade de água o que provoca inchaço nos grânulos. Quando misturado a água fria, forma uma suspensão semelhante ao leite com certa viscosidade que, ao passar do tempo se deposita, o que permite a sua separação. Se misturada a água aquecida entre 60° e 75°C, forma uma substância gelatinosa denominada goma (SILVA, 1995).

A obtenção da fécula de mandioca pode ser feita de maneira artesanal e industrial. A Figura 6 ilustra o fluxograma de obtenção da fécula através de processo industrial.

O processo tem início na etapa de descascamento, onde as cascas da mandioca são retiradas. Depois passam por um processo de repinicagem e ralação para que uma massa seja formada. Daí, adiciona-se água a massa que se transforma em um líquido pastoso sendo direcionado para os extratores que farão a extração da fécula. Após o processo de extração, a fécula é purificada para que todo contaminante seja retirado e direcionada para equipamentos que retiram sua umidade. A etapa de moagem visa refinar a fécula de maneira a atender a demanda a qual ela se enquadra. No acondicionamento, conservantes são adicionados ao produto pois a fécula é altamente perecível (SILVA, 1995).

Figura 6 – Fluxograma de Produção de Fécula de Mandioca



Fonte: SILVA, 1995

No processo de separação, a fécula passa por uma bateria de extratores com peneiras e separadores centrífugos. esses separadores são chamados de separadores centrífugos de pratos e giram em torno de 1000 rotações por minuto. A Figura 7 apresenta um modelo desse tipo de separador, e o custo desse equipamento segundo o fabricante é de 100.000 dólares (MYANDE,).

Figura 7 – Separador Centrífugo



Fonte: MYANDE, 2019

Embora parte da operação de secagem da fécula seja feita em temperaturas superiores a 100°C, não ocorre a gomificação do produto, pois a umidade da fécula que entra no secador foi reduzida pelos processos de operação que antecedem essa etapa. Ao final do processo, o resíduo líquido que sobra das etapas de separação é chamado de manipueira.

Embora haja variedades de mandioca com mais de 30% de fécula, a experiência industrial aconselha adotar 23 a 25% como média de riqueza. Ao longo de uma safra é comum certas partidas de raízes de mandioca serem entregues à fábrica com menos de 10% de fécula (EMBRAPA, 2001).

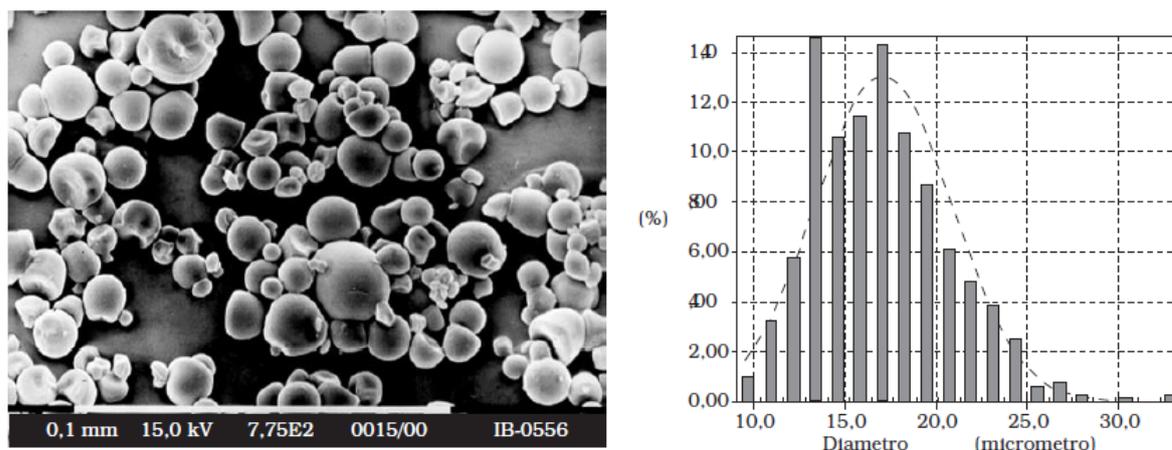
O processamento artesanal é mais simples que o industrial, porém a produtividade da fécula é menor. O processo se inicia na retirada das cascas e lavagem da mandioca, em seguida a mandioca é ralada e a massa que se forma após essa etapa é adicionada a água. A mistura que é formada por massa ralada e água passa por uma peneira para ser refinada. A mistura refinada é colocada em um recipiente para que por diferença de densidade a fécula se concentre no fundo do recipiente (EMBRAPA, 2001). O tempo de decantação da fécula varia de acordo com a quantidade da mistura no recipiente, o formato do recipiente, temperatura da mistura, podendo chegar a mais de 24 horas. Com a conclusão da decantação a fase sólida é a fécula e a líquida a manipueira.

A fécula pode ser utilizada na indústria de adesivos, têxtil, fogos de artifício, fósforos, produção de dextrinas, papel, farmacêuticas, dentre outras. A indústria alimentícia é a principal consumidora de fécula no Brasil (68% da produção), seguida pela indústria de papel (16%), mineração (6%) e têxtil (5%). Considerando-se uma produção anual de amido no Brasil da ordem de 1,5 milhões de toneladas e a produção de fécula de mandioca de 546,5 milhões de toneladas, conclui-se que ela participa com 36,4% do mercado brasileiro (LEONEL, 2007).

2.2.2 Caracterização da Partícula de Fécula de Mandioca

Segundo LEONEL (2007) os grânulos de fécula de mandioca têm em sua maioria formato oval. Alguns apresentam formato truncado, poligonal e cilíndrico, e o tamanho da partícula varia entre 3 a 32 μ m. A figura 8 apresenta fotomicrográfica de grânulos de amido de mandioca e distribuição de tamanho.

Figura 8 – Fotomicrografia da partícula de fécula de mandioca



Fonte:LEONEL, 2007

O tamanho da partícula pode apontar diferentes usos finais. Grânulos pequenos podem ser utilizados como substitutos de gorduras, enquanto os grandes podem ser aplicados na manufatura de filmes de plásticos biodegradáveis. A distribuição de tamanho também influencia diretamente algumas características como: gelatinização, cristalinidade e susceptibilidade enzimática (SANTOS, 2017).

2.3 MANIPUEIRA

2.3.1 Caracterização

Tanto na fabricação de farinha de mesa como na produção de fécula, o processamento de mandioca gera resíduos como: casca, entrecasca e manipueira. Esses subprodutos quando descartados indevidamente geram transtorno ao produtor e ao ambiente (EMBRAPA, 2001).

A água de constituição da raiz misturada a água utilizada no processo produtivo da farinha, ou da fécula de mandioca é denominada de manipueira. Quando é originada das raízes de polpa amarela é chamada de tucupi no Pará, e quando extraída das raízes de polpa branca é chamada de manipueira. Seu descarte inadequado pode gerar problemas ambientais, devido a elevada demanda de oxigênio, algo em torno de 14.000 mg/L variando até 34000 mg/L (EMBRAPA, 2001).

Com relação a quantidade de manipueira produzida e a quantidade de raízes processadas os dados são bem contrastantes, devido as diferentes diluições as quais é submetida durante o processo de beneficiamento. No entanto esse número pode chegar a 300 litros por tonelada de mandioca processada (EMBRAPA, 2001).

A manipueira é altamente poluente, contem em média 6% de sólidos dissolvidos, 30000 mg/kg de demanda bioquímica de oxigênio, 46000 mg/kg de demanda química

de oxigênio e 250 mg/ kg de ácido cianídrico. Algumas indústrias de beneficiamento de mandioca registram um processamento de 20 toneladas por dia de raízes de mandioca. Com isso geram 6m³ por dia de manipueira concentrada, sendo que tal demanda polui o equivalente a esgotos urbanos de 25000 habitantes, se a demanda de oxigênio for o fator de análise. Em 1999, no estado do Pará a manipueira foi o resíduo que causou mais agressão ao meio ambiente, pois foram produzidos 1.026.000 m³ de manipueira (EMBRAPA, 2001).

2.3.2 Composição e aplicação da manipueira

A composição química da manipueira sustenta também a potencialidade do composto como adubo e alimentação bovina, haja vista sua riqueza em nitrogênio, fósforo e, principalmente, em potássio. Por outro lado, a presença de cianetos explica os efeitos nematicida e inseticida inerentes à manipueira. Estudos observaram respostas positivas na utilização da manipueira, nas doses de 60 e 120 m³/ha associadas à adubação mineral, na cultura da mandioca, com aumento do comprimento e diâmetro das raízes e elevação da produtividade. A tabela 2 apresenta a Caracterização química da manipueira de coloração branca e de coloração amarela, extraídas no Laboratório de Agroindústria da Embrapa Amazônia Oriental, e da manipueira misturada coletada na casa de farinha no município de Igarapé (SARAIVA, 2007),.

Tabela 2 – Caracterização química da manipueira

MANIPUEIRA			
Nutrientes (kg/m ³)	Branca	Amarela	Misturada
Nitrogênio	3,42	1,35	2,48
Fosforo	0,70	0,51	0,34
Cálcio	0,19	0,16	0,15
Magnésio	0,60	0,38	0,41
Sódio	0,46	0,29	
pH	6,30	6,15	
Potássio	3,09	1,69	3,03

Fonte: Adaptado de EMBRAPA, 2001

Com relação a adubação com manipueira, a Tabela 3 mostra que seu uso causou um efeito positivo na adubação cultivada em Podzólico Amarelo no município de Santa Izabel, Pará.

Tabela 3 – Efeito da adubação com manipueira

Fonte	Produtividade (ton/hectare)
Manipueira	30
Adubo químico	37
Sem adubo	26

Fonte: Adaptado de SARAIVA, 2007

Para sua utilização em qualquer finalidade, é necessário que se faça uma redução da demanda bioquímica de oxigênio e do teor de ácido cianídrico. Estudos mostram que a fermentação anaeróbica reduz em até 50% os níveis de ácido cianídrico e da demanda bioquímica de oxigênio em 15 dias, após esse tempo ela pode ser utilizada na alimentação de animais, adubação e no combate de pragas (EMBRAPA, 2001) .

3 MATERIAIS E MÉTODOS

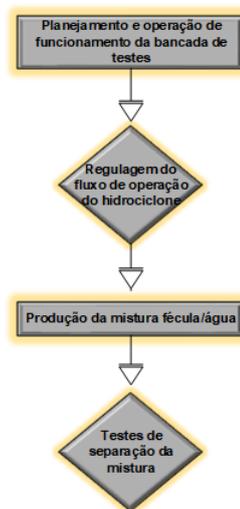
Esta seção apresenta a metodologia utilizada na construção do hidrociclone para separar fécula de mandioca e manipueira, além de mostrar os testes utilizados para validação do protótipo. A Figura 9 apresenta o fluxograma com as etapas de concepção do projeto, e a Figura 10 as etapas de validação do protótipo.

Figura 9 – Fluxograma de concepção do hidrociclone



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019

Figura 10 – Fluxograma de etapas dos testes



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019

3.1 DIMENSIONAMENTO

3.1.1 Requisitos de Projeto

Para o dimensionamento e construção do hidrociclone foi necessário cumprir seu principal requisito de projeto, que era ser produzido em garrafa de polietileno tereftalato (PET), reciclada. Foram selecionadas garrafas de refrigerante Fanta pois, o formato do corpo dessa garrafa é bem semelhante ao formato do corpo de um hidrociclone, contendo as partes cilíndrica e cônica bem definidas. Duas garrafas foram utilizadas, com volumes de 1 e 2 litros cada, a garrafa com volume de 1L possui um diâmetro menor, o que em teoria faz com que a força centrífuga aumente a partir do decréscimo do raio e conseqüentemente resulte num melhor desempenho na separação de partículas com menor tamanho. A garrafa com volume de 2L facilita a visualização dos vórtices, além de abrigar um volume maior de substância para a separação.

Além do hidrociclone, todos os materiais utilizados para o seu funcionamento como: reservatórios, conexões, tubulações, bomba, suportes entre outros, ou foram de baixo custo ou foram matérias recicláveis.

3.1.2 Definição das medidas

As tabelas 4 e 5 apresentam as dimensões dos hidrociclones. As dimensões do hidrociclone H1 são referentes ao protótipo que tem volume de 2L e as dimensões do hidrociclone H2 são referentes ao protótipo que possui volume de 1L.

Tabela 4 – MEDIDAS H2

MEDIDAS DO HIDROCICLONE H2	(mm)
Dc-Diâmetro do cilindro	80
Di-Diâmetro do duto de alimentação	25
Do-Diâmetro de saída do <i>overflow</i>	25
Du-Diâmetro de saída do <i>underflow</i>	13
L-Comprimento total	260
h-Comprimento da seção cilíndrica	180
H-Comprimento do tronco do cone	80
l-Comprimento do <i>vortex finder</i>	77
Ângulo do cone	30°

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 5 – MEDIDAS H1

MEDIDAS DO HIDROCICLONE H1	(mm)
Dc-Diâmetro do cilindro	100
Di-Diâmetro do duto de alimentação	25
Do-Diâmetro de saída do <i>overflow</i>	25
Du-Diâmetro de saída do <i>underflow</i>	13
L-Comprimento total	320
h-Comprimento da seção cilíndrica	220
H-Comprimento do tronco do cone	100
l-Comprimento do <i>vortex finder</i>	77
Ângulo do cone	30°

Fonte: Elaborado pelo Autor

As dimensões dos corpos dos hidrociclones são as mesmas das garrafas PET de 1 e 2L, os diâmetros de alimentação e de saída do *overflow* foram baseados no diâmetro nominal de uma tubulação de 25 mm, pois é uma medida facilmente encontrada nas lojas que comercializam tubulações além de possuir baixo custo. O diâmetro de saída do *underflow* foi determinado empiricamente, pois segundo Svarovsky (1992), a maioria das unidades comerciais são fornecidas com essa dimensão variável. Isso se deve ao fato de que o tamanho ótimo de abertura não pode ser fixado de forma exata e, um ajuste correto dessa dimensão é vital para se obter a melhor operação do hidrociclone. Nas diversas operações, o diâmetro do *underflow* é melhor ajustado após o *star-up* da operação. A subseção 3.4.1 deste trabalho apresenta o modo de ajuste do diâmetro de saída do *underflow*.

Em ambos os hidrociclones, o comprimento do *vortex finder* foi projetado de maneira que fosse maior que o diâmetro de alimentação. Isso é necessário, pois segundo Silva (2014), quando o *vortex finder* tem seu comprimento reduzido, poderá ocorrer a formação de um curto circuito de partículas no hidrociclone, ou seja, as partículas que entram pelo duto de alimentação podem ser direcionadas diretamente para o *overflow*.

Svarovsky (1992) cita que os hidrociclones estão classificados de acordo com as relações constantes entre as suas medidas geométricas, sendo as famílias: *Rietema*, *Bradley* e *Krebs* as mais conhecidas e utilizadas comercialmente. A Tabela 6 apresenta as relações geométricas dos hidrociclones H1 e H2. De acordo com os dados as suas relações geométricas estão entre as famílias *Krebs* e *Rietema*. Como as relações se baseiam no diâmetro do cilindro, não foi possível fazer modificações que permitam que os hidrociclones H1 e H2 se enquadrem em uma determinada família apresentada na Seção 2.1.2 (Classificação de um Hidrociclone).

Tabela 6 – Relações Geométricas

Relações Geométricas	Hidro ciclone H1	Hidro ciclone H2
Di/Dc	0,25	0,315
Do/Dc	0,25	0,315
L/Dc	3,2	3,25
l/Dc	0,77	0,962
h/Dc	2,2	2,25
Ângulo		

Fonte: Elaborada pelo Autor

3.2 SELEÇÃO E COMPRA DOS MATERIAIS

A Tabela 7 apresenta os materiais utilizados e os custos relacionados a eles. Os materiais escolhidos foram adquiridos na cidade de Cruz das Almas.

Tabela 7 – Materiais e Valores

Material	Quantidade	Valor Unitário (R\$)	Valor Total
Adaptador soldável 32mm	2	1,00	2,00
Bucha redução 32mm x 25mm	2	0,90	1,80
União soldável 25mm	2	8,00	16,00
Joelho 90° 25 mm	5	0,50	2,50
Válvula esfera soldável 25mm	1	9,00	9,00
Luva soldável 25 mm	2	0,50	1,00
Durepoxi	1	7,20	7,20
Fita veda rosca	1	2,00	2,00
Adesivo plástico	1	2,50	2,50
Adaptador flange caixa	1	5,60	5,60
Tubo soldável 25 mm	6	2,00	12,00
Bomba periférica	1	125,00	125,00
Bobona 20 litros	2	15,00	30
Bobona 50 litros	1	35,00	35,00
Fécula de mandioca kg	7	4,50	31,50
Total			283,10

Fonte: Elaborado pelo Autor

Nenhum critério específico relacionado a qualidade dos materiais e fabricante foi levado em consideração no momento da compra. O critério de seleção levado em consideração foi o menor custo unitário possível de cada material. Os materiais que não tiveram custo associado são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Materiais Sem Custo Associado

Material	Quantidade
Tábua de madeira 230 x 400 mm	1
Abraçadeira 150 mm	1
Garrafa PET 1 litro	1
Garrafa PET 2 litros	1

Fonte: Elaborado pelo Autor

Para fornecer a vazão necessária para a utilização do hidrociclone foi utilizada uma bomba periférica. A Tabela 9 apresenta as especificações desse equipamento:

Tabela 9 – Especificações da Bomba

Vazão (Q)	1800 litros / hora
Altura manométrica máxima	22 metros de coluna d'água
Potência do motor	1/2 cv
Altura de sucção máxima	8 metros de coluna d'água
Diâmetro de entrada	1 polegada
Tensão nominal	127 V

Fonte: Elaborado pelo Autor

3.3 MONTAGEM DO HIDROCICLONE

A montagem dos hidrociclones foi feita no pavilhão de engenharias da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) na sala C11. A sala dispõe de máquinas e ferramentas necessárias para corte, medição e junção de partes.

A utilização de garrafa PET para produção dos hidrociclones H1 e H2 além de reduzir os custos do projeto, facilitou a montagem de ambos equipamentos, pois o corpo do hidrociclone é composto de uma parte cilíndrica e outra cônica assim como o corpo da garrafa PET. Logo o processo de montagem de ambos consistiu em posicionar as saídas do *underflow* e *overflow*, como também posicionar a entrada do duto de alimentação da mistura fécula/água.

Para ambos os hidrociclones o duto de alimentação possui 25 milímetros de diâmetro e um comprimento de 200 milímetros. A ponta do duto de alimentação recebeu um ajuste visando proporcionar o escoamento tangencial do fluxo dentro do equipamento. A entrada de alimentação foi posicionada lateralmente na parte cilíndrica 40 milímetros abaixo do topo no hidrociclone H1 e 35 milímetros abaixo do topo no H2.

As tampas das garrafas foram utilizadas como saída para o *underflow* após receberem ambas um furo com diâmetro de 13 milímetros cada. Essa dimensão foi especificada

após o *start-up* da operação. Na seção seguinte o critério de seleção dessa dimensão é explicado.

As Figuras 11 e 12 apresentam os hidrociclones H1 e H2 após a construção:

Figura 11 – Hidrociclone H1



Fonte: Arquivo Pessoal do Autor

Figura 12 – Hidrociclone H2

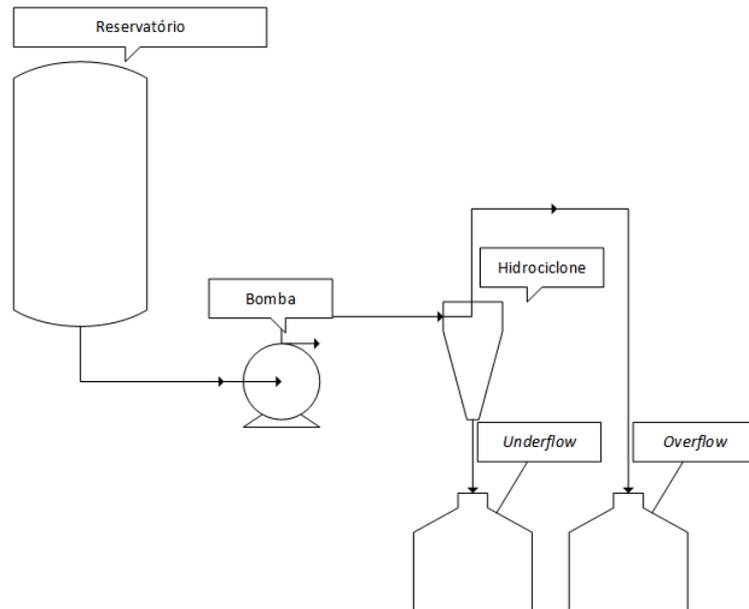


Fonte: Arquivo Pessoal do Autor

3.4 PLANEJAMENTO E OPERAÇÃO DE FUNCIONAMENTO DA BANCADA DE TESTES

A bancada de testes para a validação dos dispositivos de separação foi montada no pavilhão de engenharias da UFRB na sala B13. O planejamento da bancada de testes baseou-se no layout de funcionamento dos hidrociclones. A Figura 13 apresenta esse layout.

Figura 13 – Layout de Funcionamento dos Hidrociclones



Fonte: Elaborado pelo Autor

No processo de montagem da bancada, os hidrociclones e a bomba foram posicionados por cima do reservatório do *underflow*. O reservatório de armazenamento mistura ficou em um nível acima da bomba para beneficiar a sucção da mesma, e o reservatório do *overflow* foi posicionado ao lado do reservatório do *underflow*. A Figura 14 demonstra a bancada após a montagem:

Figura 14 – Bancada de Testes



Fonte: Arquivo Pessoal do Autor

3.4.1 Regulagem do Fluxo do Hidrociclone

O processo de regulagem do fluxo consistiu no dimensionamento do diâmetro de saída do *underflow* através da visualização da intensidade do vórtice ascendente. Utilizando água na operação, diâmetros que variavam entre 8 e 16 milímetros foram testados, afim de selecionar o diâmetro que apresentasse a maior intensidade do vórtice ascendente. Após uma análise visual da intensidade do vórtice, o diâmetro de saída do *underflow* foi fixado em 13 milímetros. Esse processo foi feito nos dois hidrociclones. A Figura 15 apresenta o vórtice ascendente central produzido no hidrociclone H1:

Figura 15 – Vórtice Hidrociclone H1



Fonte: Arquivo Pessoal do Autor

A vazão da bomba foi calculada durante o processo citado anteriormente, e uma vazão de aproximadamente 1689,18 litros/hora foi registrada. Esse valor se traduz em uma perda de carga de aproximadamente 7% em relação a vazão fornecida pelo fabricante, e essa pequena perda de carga se deve ao arranjo da tubulação.

3.5 PRODUÇÃO DA MISTURA FÉCULA/ÁGUA

Por questões logísticas não foi possível a utilização da suspensão de mandioca beneficiada. A solução encontrada foi a utilização de fécula de mandioca diluída em água, afim de obter uma substância com características físicas semelhantes a suspensão de fécula e manípueira.

Segundo EMBRAPA (2001) embora haja variedades de mandioca com mais de 30% de fécula, como já citado, a experiência industrial aconselha adotar 23 a 25% como média de riqueza, ao longo de uma safra é comum certas partidas de raízes de mandioca serem entregues à fábrica com menos de 10% de fécula. Com base nessa informação, a proporção da suspensão foi feita utilizando 300 gramas de fécula de mandioca para cada litro de água, afim de gerar uma suspensão equivalente.

Levando em consideração que a densidade da água a temperatura de 26°C é de 0,996 g/ml e a densidade da fécula de mandioca é aproximadamente 1,508 g/ml, a densidade da suspensão com proporção de 1L de água para 300 gramas de fécula foi calculada utilizando a seguinte equação:

$$d = \frac{m1 + m2}{v1 + v2} \quad (3.1)$$

Onde m1 e m2 são as massas da água e da fécula de mandioca, v1 e v2 são os volumes utilizados de água e fécula de mandioca. Utilizando esses valores a densidade encontrada para a suspensão foi aproximadamente 1,080 g/ml.

3.6 TESTES DE SEPARAÇÃO DA MISTURA FÉCULA/ÁGUA

3.6.1 Procedimentos experimentais

Os ensaios experimentais dos hidrociclones H1 e H2 seguiram os seguintes procedimentos operacionais:

- Preparação de 20L da mistura fécula/água na proporção de 1L de água para 300g de fécula de mandioca;
- Abastecimento do reservatório da mistura ;
- Escorva da bomba com a mistura;

- Acionamento da bomba para *start-up* da operação;
- *Stop* da operação após o bombeamento do volume total produzido da mistura;

3.6.2 Procedimentos Avaliativos

Uma vez encerrado os procedimentos apresentados anteriormente, para avaliar a eficiência dos hidrociclones foram utilizados dois procedimentos. O primeiro consistia na utilização de uma proveta para coleta de 1000 ml do reservatório do *overflow* e do reservatório do *underflow*. Ambas as amostras eram pesadas em uma balança para pequenas massas com precisão de 1g e a diferença de massa entre as duas amostras foi utilizada para avaliação da eficiência de separação dos dois dispositivos.

O segundo procedimento consistia em despejar as amostras coletadas em reservatórios com volume e geometria iguais, aguardar o processo de decantação da fécula de mandioca e fazer uma análise comparativa visual de qual reservatório de teste possuía maior nível de fécula. Apesar de não ser um método avaliativo de precisão, forneceu uma boa percepção da efetividade de separação do hidrociclone, pois espera-se que o nível de fécula presente no *underflow* seja maior que o presente no *overflow*. As Figuras 16 e 17 são as amostras coletadas descritas no procedimento acima.

Figura 16 – Amostra H2



Fonte: Arquivo Pessoal do Autor

Figura 17 – Amostra H1



Fonte: Arquivo Pessoal do Autor

Uma balança de gancho foi utilizada para analisar a quantidade de suspensão presente nos reservatórios do *overflow* e do *underflow*. Essa análise foi feita com intuito de avaliar a quantidade de fluxo que estava sendo direcionada para ambos. A precisão da balança fornecida pelo fabricante é de 200g.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 QUANTIDADE DE SUSPENSÃO NOS RESERVATÓRIOS

Na Tabela 10 encontram-se os resultados referentes a quantidade da solução fécula/água presentes no *underflow* e *overflow*.

Tabela 10 – Quantidade de suspensão nos reservatórios

Hidrociclone	Massa do <i>underflow</i> (kg)	Massa do <i>overflow</i> (kg)
H1	16,45	8,27
H2	18,25	6,67

Fonte: Elaborado pelo Autor

Em ambos os hidrociclones, o fluxo se direcionou com maior intensidade para o *underflow*, pois apesar da abertura do *overflow* ser quase duas vezes maior que a abertura do *underflow*, a suspensão é densa e se beneficia da posição vertical de funcionamento do hidrociclone forçando o fluxo para a saída do *underflow*.

A massa de suspensão presente no *underflow* do hidrociclone H2 é maior que a presente no H1. Isso se deve ao fato que como o diâmetro do cilindro de H2 é menor do que o diâmetro de H1, a força centrífuga é maior, o que favorece o direcionamento do fluxo mais denso para a saída *underflow*.

4.2 ANÁLISE COMPARATIVA DE MASSAS

4.2.1 Hidrociclone H1

Na Tabela 11 encontram-se os resultados referentes as amostras coletadas com a proveta de 1000 mL para o hidrociclone H1.

Tabela 11 – Massas das amostras hidrociclone H1

Reservatório	Massa (kg)
<i>Underflow</i>	1,072
<i>Overflow</i>	1,064

Fonte: Elaborado pelo Autor

A massa da amostra coletada no *underflow* é sensivelmente maior que a coletada no *overflow*, 8g a mais para cada amostra da proveta. Isso indica que uma pequena maioria das partículas mais pesadas foram direcionadas para o *underflow*, condizendo com o princípio de funcionamento do equipamento.

Adotando a proporção de 300 gramas de fécula para cada amostra coletada com a proveta e analisando a massa do *underflow*, a efetividade relativa de separação referente a comparação das massas das amostras de 1000 mL da suspensão está próxima dos 3%. A baixa efetividade de separação indica que o diâmetro da partícula da fécula de mandioca, que varia entre 3 a 32 μm , está próximo ao diâmetro de corte do hidrociclone H1. Ou seja, as partículas têm 50% de chance de serem captadas pelo *underflow* e 50% de serem captadas pelo *overflow*.

4.2.2 Hidrociclone H2

Na Tabela 12 encontram-se os resultados referentes as amostras coletadas com a proveta de 1000 mL para o hidrociclone H2.

Tabela 12 – Massas das amostras hidrociclone H2

Reservatório	Massa (kg)
<i>Underflow</i>	1,086
<i>Overflow</i>	1,075

Fonte: Elaborado pelo Autor

Assim como no hidrociclone H1, a massa da amostra coletada no *underflow* do hidrociclone H2 é sensivelmente maior que a coletada no *overflow*, 11 gramas a mais para cada amostra da proveta, registrando um aumento em relação ao hidrociclone H1. Isso indica que uma pequena maioria das partículas mais pesadas foram direcionadas para o *underflow*, Certificando o princípio de funcionamento do equipamento.

Fazendo a mesma análise feita com o hidrociclone H1, e adotando a proporção de 300g de fécula para cada amostra coletada com a proveta, analisando a massa do *underflow*, a efetividade relativa de separação do equipamento está próxima dos 4%. A baixa efetividade de separação indica que o diâmetro da partícula da fécula de mandioca que varia entre 3 a 32 μm , está próximo ao diâmetro de corte do hidrociclone H2. Assim como no hidrociclone H1, as partículas têm 50% de chance de serem captadas pelo *underflow* e 50% de serem captadas pelo *overflow*.

A efetividade do hidrociclone H2 é maior que a efetividade do hidrociclone H1, pois o diâmetro do cilindro do equipamento H2 é menor que o diâmetro do equipamento H1. Isso proporciona uma maior força centrífuga, aumentando a efetividade de separação do hidrociclone além de permitir a separação de partículas menores.

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA VISUAL

As Figuras 18 e 19 mostram o resultado do processo de decantação da fécula de mandioca em recipientes com geometria idêntica para o processo de comparação visual

de nível. Os recipientes da esquerda são amostras coletadas do *underflow* e os da direita amostras coletadas do *overflow*. Como citado na Seção 3.6.2 deste trabalho, conclui-se que, esse método apesar de não fornecer boa precisão ajuda a ter uma percepção da efetividade de separação do hidrociclone.

Figura 18 – Nível hidrociclone H1



Fonte: Arquivo Pessoal do Autor

Figura 19 – Nível hidrociclone H2



Fonte: Arquivo pessoal do Autor

Para o hidrociclone H2, o recipiente da esquerda que contém a amostra do *underflow* apresenta um nível de fécula decantada sensivelmente maior que o recipiente da direita. Esse resultado indica que as partículas mais pesadas da suspensão foram direcionadas para o *underflow* devido ao mecanismo de separação do equipamento. Para o hidrociclone H1, a diferença entre os níveis de decantação é visualmente imperceptível. Essa igualdade de resultados é reflexo da pequena diferença de massas das amostras da proveta de 1000 mL.

4.4 RESULTADOS DE EFICIÊNCIA η

Utilizando a Equação 2.2 e assumindo a proporção da suspensão de 300g de fécula de mandioca e 1000mL de água, além de utilizar valores de vazão e densidade fornecidos nas seções 3.4 e 3.5 deste trabalho, foi possível calcular valores aproximados da eficiência η . A Tabela 13 apresenta os valores calculados.

Tabela 13 – Eficiência η dos hidrociclones

Hidrociclone	Eficiência η (%)
<i>H1</i>	68
<i>H2</i>	83

Fonte: Elaborado Pelo Autor

A eficiência η relaciona tanto os sólidos arrastados pela separação de fluxo quanto aqueles separados devido a ação do campo centrífugo, ou seja, todos os mecanismos de separação são levados em consideração. Apesar de ser um importante dado que indica o correto funcionamento dos mecanismos de separação, não é muito preciso, justamente por considerar todos os mecanismos de separação. O diâmetro menor do hidrociclone H2 proporcionou um valor maior de eficiência η em relação ao hidrociclone H1.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste trabalho possibilitou a construção e avaliação de 2 hidrociclones com diferentes geometrias, ambos atendendo as premissas construtivas, que eram: a construção do corpo do equipamento utilizando garrafa PET e a utilização de materiais e equipamentos de baixo custo necessários para a operação dos dispositivos.

Em relação ao orçamento, a bomba utilizada para fornecer a vazão de funcionamento do hidrociclone representou a maior parte do investimento. A utilização de um equipamento seminovo diminuiria o custo final do projeto em uma eventual utilização do hidrociclone em feccularias artesanais.

Os resultados encontrados referentes a comparação das massas e dos níveis das amostras coletadas no *underflow* e no *overflow* foram razoáveis, mesmo com a efetividade relativa de separação variando entre 3 e 4%. É necessário destacar que no processo industrial são utilizadas baterias de separadores centrífugos para otimizar a obtenção da fécula. Com base nesta informação, a instalação de um sistema de recirculação do *overflow* otimizaria a efetividade dos hidrociclones, viabilizando seu uso nas feccularias artesanais.

Os hidrociclones H1 e H2 apresentaram eficiência η acima de 50%, o que indica que tanto o mecanismo de separação fluxo quanto o mecanismo de ação do campo centrífugo é satisfatório. Os dois hidrociclones produzidos podem ser utilizados para separar outros tipos de particulados que possuam partículas maiores que as da fécula de mandioca.

O hidrociclone H2 apresentou resultados de separação melhor que o H1, pois possui um diâmetro de cilindro menor que o diâmetro do hidrociclone H1. Isso proporciona um maior campo centrífugo otimizando seu mecanismo de separação. Uma bomba com maior vazão melhoraria os resultados do hidrociclone H1, aumentando o seu campo centrífugo.

Todos os objetivos desse estudo foram cumpridos de forma satisfatória, porém como citado anteriormente, um sistema de recirculação do *overflow* viabilizaria a utilização dos hidrociclones em feccularias artesanais.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, podem ser listadas algumas propostas:

- Projeto e instalação de um sistema de recirculação do *overflow*;
- Produção de outro hidrociclone com menor diâmetro de cilindro;

- Instrumentar a linha de circulação com sensores de vazão ;
- Testar a eficiência de separação de particulados diferentes.

REFERÊNCIAS

- AGUILERA;ARISMENDY. Development of a hydrodynamic model of a hydrocyclone including the simulation of air-core effect, using the finite volume method. 2014.
- ALVES, J. V. B. Hidrociclone para a separação do óleo residual de água em refinarias. 2012.
- ANDRADE, V. T. de. Construção e avaliação de modelos de hidrociclone para tratamento de agua residuaria. 2007.
- ARRUDA, A. A. de. Otimização de um hidrociclone utilizado na separação de uma mistura líquido-líquido. 2008.
- COELHO, D. B. Desempenho de um hidrociclone para separação de águas oleosas. 2011.
- CRUZ, J. R. Z. O. C. D. Eficiência de um hidrociclone de geometria “rietema” para pré-filtragem de Água para irrigação. 2010.
- EMBRAPA. Manipueira: Um adubo orgânico em potencial. 2001.
- FREITAS, A. G. B. D. Modelagem e simulação do tratamento de água oleosa usando hidrociclones. 2009.
- JANK, A. Hydrocyclones for the separation of impurities in pretreated biowaste. 2016.
- LEONEL, M. Análise da forma e tamanho de grânulos de amidos de diferentes fontes botânicas. 2007.
- MYANDE. *Separador de centrífugo para a indústria de amido*. Disponível em: <https://pt.made-in-china.com/co_myande/product_Disc-Centrifuge-Separator-for-Starch-Processing_eisreying.html>. Acesso em: 10 nov. 2019.
- SANTOS, T. P. R. D. Tamanho de grânulos de amido de mandioca. 2017.
- SARAIVA, F. Uso de manipueira no desenvolvimento vegetativo do milho em ambiente protegido. 2007.
- SILVA, N. K. G. Estudo de otimização da configuração de um hidrociclone filtrante. 2014.
- SILVA, R. C. C. A. B. D. Fabricação de amido de mandioca. 1995.
- SVAROVSKY, . *Hydrocyclones Analysis and Applications*. Saint Martin d’ Heres: SPRINGER-SCIENCE+BUSINESS MEDIA, B.V., 1992. 421 p.
- TONIN, P. C. Computer simulation of a rietema-family hydrocyclone used in irrigated agriculture. 2015.