



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA  
QUÍMICA



# Projeto Conceitual de uma Unidade Modular de Biorrefinaria de Etanol Descentralizada

*Autor: Maicon Roldão Borges*

*Orientadores: Jorge Otávio Trierweiler*

*Luciane Ferreira Trierweiler*

Porto Alegre, novembro de 2020

## Sumário

Sumário	ii
Agradecimentos	iv
Resumo	v
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	vii
Lista de Símbolos	viii
Lista de Abreviaturas e Siglas	ix
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	2
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Unidades modulares	3
2.2 Um breve histórico sobre o etanol	3
2.3 Batata-doce	4
2.3.1 Amido	6
2.4 Processo fermentativo a partir de amiláceos (batata-doce)	6
2.5 Destilação	8
2.5.1 Destilação em batelada	9
2.5.2 Destilação multivasos	9
3 Engenharia de Projetos – Fases e Métodos	11
4 Memorial Descritivo do Processo	12
4.1 Definição das etapas	12
4.2 Dados de processo e cronologia das etapas	13
4.2.1 Cronologia das etapas	14
4.3 Descrição das etapas	15
4.3.1 Recebimento da batata-doce	15
4.3.2 Carregamento	16
4.3.3 Lavagem	17
4.3.4 Aquecimento 1	17
4.3.5 Moagem e trituração	17
4.3.6 RVDHF	17
4.3.7 Filtração	18
4.3.8 Aquecimento 2	18
4.3.9 Destilação	19
4.3.10 Armazenamento	20
5 Fluxograma de Processos (PFD)	21
6 Layout Preliminar e Estimativa de Instrumentação da Microusina	23
6.1.1 Definição final do layout preliminar	23
6.1.2 Preliminar do layout do núcleo tecnológico	24
6.1.3 Estimativa de instrumentação	25

---

7	Discussão Sobre os Custos	26
8	Conclusões e Trabalhos Futuros	27
8.1	Conclusões	27
8.2	Sugestões para trabalhos futuros	27
9	Referências	28
	Anexo A: Imagens de Instalações e Equipamentos	32
	Apêndice A: Parte 1, 2, 3 do Fluxograma de Processos (PFD)	34

## **Agradecimentos**

Aos meus pais, Osvaldino e Maria Gorete, por todo incentivo e apoio durante toda minha trajetória acadêmica.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Jorge Otávio Trierweiler e Prof. Dra. Luciane Ferreira Trierweiler, pela atenção, empenho e todo esforço dedicado em cada momento da elaboração deste trabalho.

Ao meu amigo Gustavo Mattioda, pela sua amizade que foi crucial em determinados momentos.

Aos meus padrinhos, Roberto e Margori Bagatini.

As minhas amigas, Tainara Oliveira Amaral e Ana Paula Hardok que estiveram presentes todos os momentos.

Ao Gustavo Fontoura de Aguiar, que me ajudou e orientou na elaboração de um trecho deste trabalho.

Finalmente, a todos que em algum momento me ajudaram de qualquer forma.

## **Resumo**

A batata-doce é uma matéria-prima que tem elevado potencial para a produção de energia renovável, capaz de ser transformada em biocombustível de forma eficiente. Com a descentralização deste insumo e o desperdício que é sofrido ao longo da sua cadeia de produção, a construção de uma unidade modular de processamento de batata-doce para produção de etanol tem tomado suas primeiras formas. Este trabalho busca a conceptualização desta unidade, que será projetada principalmente para o estado do Rio Grande do Sul. Para possuir fácil locomoção, será projetada em dimensões de contêineres, e a montagem e o controle serão feitos através de uma central. Dessa forma, o produtor que queira rendimentos extras com sua produção não precisa fazer um alto investimento e terá um retorno rápido. A variedade da batata-doce que tem maior rendimento em etanol é a BRS CUIA, mas a unidade modular não é específica a esta variedade. Para o desenvolvimento deste estudo, realizou-se uma descrição das etapas principais deste processo em uma unidade produtora de 1000 L de etanol hidratado combustível (EHC) por dia. Como resultados, em todas as etapas foram descritos e apresentados o volume e o tempo de produção, para que possa ser feita uma estimativa inicial do tipo de equipamento e sua carga processada. Foi apresentado um layout preliminar da área de instalação contendo as principais locações para o desenvolvimento deste projeto. Além disso, foram mostrados o layout e a estrutura do principal componente - o núcleo tecnológico - que concentra os principais equipamentos, verificando assim a possibilidade e a viabilidade de construção. Por fim, uma discussão sobre os custos para a construção de unidade produtora foi feita com a finalidade de verificar sua viabilidade econômica. Verificou-se que uma única unidade pode ter seu valor elevado, mas que com a produção em série de várias unidades seu valor pode ser reduzido drasticamente, tornando o projeto ainda mais viável de ser realizado.

## Lista de Figuras

<b>Figura 2.1:</b> Cultivares mais comuns produzidos no Brasil.....	4
<b>Figura 2.2:</b> Produção de batata-doce por região no Brasil .....	5
<b>Figura 2.3:</b> Arranjo molecular do amido, ligações $\alpha$ -1,4 e $\alpha$ -1,6.....	6
<b>Figura 2.4:</b> Reação da transformação do amido, etapas .....	7
<b>Figura 2.5:</b> Etapas até a fermentação do amido. ....	7
<b>Figura 2.6:</b> (A) Arranjo típico de uma destilação em batelada; (B) Arranjo típico de uma destilação multivasos .....	10
<b>Figura 4.1:</b> Balanço de massa e energia para produção de um dia de etanol .....	12
<b>Figura 4.2:</b> Fluxograma de blocos do processo modular .....	13
<b>Figura 4.3:</b> Cronograma de operações da microusina .....	15
<b>Figura 6.1:</b> Layout preliminar da locação em área.....	24
<b>Figura 6.2:</b> Visões do núcleo tecnológico.....	25

**Lista de Tabelas**

<b>Tabela 2.1:</b> Estados com maiores produção de batata-doce em 2019.....	5
<b>Tabela 2.2:</b> Caracterização da batata-doce BRS Cuia.....	5
<b>Tabela 4.1:</b> Resumo de operação das correntes principais do processo.....	14
<b>Tabela 4.2:</b> Valores de horas total por etapa.....	15
<b>Tabela 4.3:</b> Proporção de enzima/levedura para o volume processado de BDs.....	18
<b>Tabela 4.4:</b> Especificações para Etanol Hidratado Combustível (EHC).....	19
<b>Tabela 5.1:</b> Lista de equipamentos da microusina modular.....	21
<b>Tabela 5.2:</b> Funções das principais correntes do processo.....	21
<b>Tabela 6.1:</b> Dimensões de containers mais usuais.....	23
<b>Tabela 6.2:</b> Configurações dos módulos do layout.....	23

### **Lista de Símbolos**

°C	Graus Celsius
h	Hora
kg	Quilograma
L	Litro
μL	Microlitro
mg	Miligrama
t	Tonelada
V	Volume

**Lista de Abreviaturas e Siglas**

ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis
BD	Batata-doce
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
EHC	Etanol Hidratado Combustível
EMATER	Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GIMSCOP	Grupo de Intensificação, Modelagem, Simulação, Controle e Otimização de Processos (Engenharia Química/UFRGS)
GL	Graus Gay-Lussac
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
PFD	Fluxograma de Processos
PRÓALCOOL	Programa Brasileiro de Álcool
R\$	Reais
RS	Rio Grande do Sul
RVDHF	Redução de Viscosidade, Diluição, Hidrólise e Fermentação Simultâneas
SHF	Sacarificação Simultânea com a Hidrolise
SSF	Sacarificação Simultânea com a Fermentação
SWP	<i>Sweet Potato</i>
TQ <sub>rec</sub>	Tanque de Recebimento
TRS	<i>Total Reducing Sugars</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
v/v	Volume por Volume



## 1 Introdução

No decorrer dos últimos anos, combustíveis derivados do petróleo impulsionaram o desenvolvimento da humanidade, e a alta demanda por este produto ocasionou a redução de suas reservas naturais. Os combustíveis fósseis, além de possuir suas fontes esgotáveis, também proporciona liberação de poluentes. Visando a solução do problema ambiental e econômico a produção de biocombustíveis se tonar promissora, como é o caso da produção de etanol combustível.

Em 1975, o governo brasileiro lançou o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) que tinha como principal objetivo a produção de álcool nacional para suprir as demandas do mercado brasileiro (interno e externo). O programa propôs a expansão de matérias primas, enfatizando o aumento da produção agrícola, a modernização, a ampliação e instalação de novas unidades produtoras e a construção de unidades armazenadoras. Em função disso a produção do etanol se tornou centralizada em grandes usinas as quais são possuidoras das terras que produzem o insumo para o seu processo.

Atualmente no Brasil a produção de etanol alcançou a marca histórica de 35,6 bilhões de litros de etanol (safra 2019/20), sendo que a produção está principalmente localizada na região Sudeste, Nordeste e Centro-Oeste, tendo como principais insumos utilizado na produção a cana-de-açúcar e o milho (CONAB,2020). O Rio Grande do Sul produz apenas 0,3% do próprio consumo, cerca de 1,5 bilhão de litros ao ano (Nova Cana, 2020). A baixa produção do estado do Rio Grande do Sul é devido as condições desfavoráveis ao cultivo de cana-de-açúcar, principal matéria prima para produzir o etanol, que inviabiliza a instalação de novas usinas (EMBRAPA, 2019).

Com esta perspectiva, a produção local de etanol, no Rio Grande do Sul, com novas fontes de matéria-prima, pode se tornar uma nova oportunidade de geração de empregos e novo direcionamento de culturas de pequenos produtores rurais. Dentre as diversas culturas estudadas os materiais amiláceos se destacam com sua produtividade, como por exemplo a batata-doce (MASIERO, 2012; RISSO, 2014). Além de proporcionar uma produção integrada entre o alimento e a energia da propriedade, descentraliza a produção do álcool etílico e intensifica a cultura regional (CASTRO et al., 2008).

Além de todos os benefícios de produzir etanol através de fontes alternativas, o estado do Rio Grande do Sul pretende aprovar um projeto de lei a fim de estimular esta diversificação (cereais e tubérculos como arroz, trigo e batata). O projeto “Proetanol/RS” prevê crédito presumido e diferimento de ICMS na venda do combustível para distribuidoras e também determina diretrizes, comercialização, insumos e assistência técnica (Canal Rural 2019; Elton Weber, 2019).

De acordo com Trierweiler (2020) um modelo de biorrefinaria descentralizada com escala menor pode ser aplicado a indústria de etanol. A adaptação deste tipo de estrutura a uma escala modular pode ser aplicado ao RS, tendo em vista que o estado possui grande parte de suas terras ocupadas por monoculturas e pequenos agricultores. Um modelo de refinaria de etanol modular distribuída/descentralizada proporciona diversos benefícios, tais como: agregação de valor do produto, diversificação da produção e diminuição da dependência (liberdade de produção ou cultura plantada), baixo impacto ambiental e uma melhor distribuição de renda através da distribuição de competências.

A proposta para construir uma unidade de produção de etanol de forma descentralizada parte de uma motivação principal de que as biomassas/resíduos estão disponíveis de forma descentralizada, diferentemente das fontes fósseis, como petróleo ou carvão. Por isto, existem diversas questões/desafios envolvidos para o aproveitamento destes resíduos, um deles é a questão logística.

### **1.1 Objetivos**

Dentro do mercado brasileiro grande parcela dos tubérculos de batata-doce são rejeitados pela não conformidade, sendo posteriormente considerado resíduos alimentares. Devido a relevância deste parcela, a facilidade de implementação desta cultura e a grande produtividade, o laboratório GIMSCOP (Grupo de Intensificação, Modelagem, Simulação, Controle e Otimização de Processos) vem realizando diversos estudos de aproveitamento de toda esta cadeia.

Inserido neste contexto, este trabalho tem como objetivo o projeto conceitual de uma unidade modular para biorrefinarias distribuídas/descentralizadas, para produção de etanol combustível tendo como fonte principal de matéria prima a batata-doce no estado do Rio Grande do Sul.

Para tal, será utilizado metodologias da Engenharia de Processos e dados alcançados nos estudos de Schweinberger et al. (2016), tendo como objetivos específicos:

- Analisar os principais gargalos do processo;
- Estudar a modulação da unidade que abrangerá um layout preliminar com dimensões de containers;
- Selecionar os principais equipamentos para instalação e funcionamento da usina.

## **2 Revisão Bibliográfica**

Inicialmente serão apresentados tópicos importantes para o desenvolvimento deste trabalho e conhecimentos teóricos sobre unidades modulares existentes, processos fermentativos para produção de etanol e processos de destilação. Esses assuntos serão descritos através de bibliografias disponíveis na literatura atual.

### **2.1 Unidades modulares**

Como resposta direta à necessidade da aceleração da industrialização, ou seja, a busca por maior eficácia, qualidade, controle de custos e prazos, a construção de unidades modulares para indústria em geral se torna algo realmente atrativo, principalmente pelo fato de que a produção de um determinado produto que antes era produzido em larga escala e uma única região de forma centralizada, agora é possível ser produzido em menor escala de forma descentralizada. Em suma, pode-se levar a indústria até o insumo devido ao fato de que tal insumo se encontra de forma descentralizada.

Com um novo conceito de biorrefinaria descentralizada se destacam duas empresas que foram capazes de fazer a containerização de plantas de pirólise: a Biogreen® e a Biofabrik®. A planta móvel modular da Biogreen® possui capacidade de produção de 250-1500 kg/h de bio-óleo, totalmente compacta e de fácil locomoção que foram projetadas para serem movidas ou reorganizadas a longo prazo; nesta planta é usado como matéria prima qualquer tipo de resíduo de biomassa. A planta da Biofabrik®, denominada de Wastx Plastic, possui características semelhantes da Biogreen®; ela converte resíduos plásticos em óleos de reciclagem de forma descentralizada (BIOGREEN, 2020?; BIOFABRIK, 2020).

Este trabalho se insere neste conceito de biorrefinaria descentralizada em aspecto modular, com a produção de etanol hidratado combustível partindo da batata-doce como principal insumo.

### **2.2 Um breve histórico sobre o etanol**

Para reduzir a crise no setor açucareiro e diminuir dependências do petróleo importado, o etanol produzido através da cana-de-açúcar foi introduzido na matriz energética brasileira, este fato ocorreu em meados do século XX. A partir disso iniciativas governamentais tornaram este objetivo ainda mais claro através de acordos e regulamentações (MORAES, BACCHI; 2014).

Um grande marco para o etanol na economia brasileira ocorreu em 1975 quando foi lançado o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) que teve como objetivo incentivar o setor privado a investir na produção de etanol visto que na época, cerca de 80% do etanol consumido no país ainda era importado, o que representava aproximadamente 50% da balança comercial (MORAES, BACCHI; 2014).

Já em 1997, houve a regulamentação dos combustíveis brasileiros: a Lei do Petróleo. Assim institui-se a política energética nacional, além de serem criados o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Em 2011, a ANP lançou a resolução nº 7, que contém as especificações do Álcool Etílico Anidro Combustível e do Álcool Etílico Hidratado Combustível, as quais são seguidas atualmente (ANP, 2011).

Em março de 2018, uma lei sancionada pela Presidência da República, que cria a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), incentiva a produção de etanol e biodiesel e estabelece metas anuais de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa, conforme compromissos assinados pelo Brasil em acordo climático global.

No estado do Rio Grande do Sul o projeto Proetanol/RS, iniciativa do principal órgão de extensão rural do Rio Grande do Sul, a Emater/RS, foi apresentado à Assembleia Legislativa do estado. O projeto reconhece o potencial do estado na produção de cereais e tubérculos e visa incentivar a diversificação da produção do combustível através da definição de um desconto percentual no ICMS arrecadado pelo estado, promovendo a agregação de renda das famílias produtoras. Entretanto, devido à pandemia de COVID-19, essa proposta ainda não foi aprovada (Canal Rural 2019; Elton Weber, 2019).

### 2.3 Batata-doce

Originária das Américas Central e do Sul, a batata-doce, pertencente à espécie *Ipomoea batatas* (L.) Lam, é uma planta que possui elevado valor econômico e alimentício. Apresenta cerca de 25% à 30% de matéria seca e em média 85% de carboidratos, cujo o amido é seu principal componente (EMBRAPA, 2008). A cultura da batata-doce é de fácil adaptabilidade, pois sendo uma planta rústica e tropical possui alta tolerância a seca e grande resistência à pragas podendo ser cultivada em solos pouco férteis e degradados (Silveira, 2008).

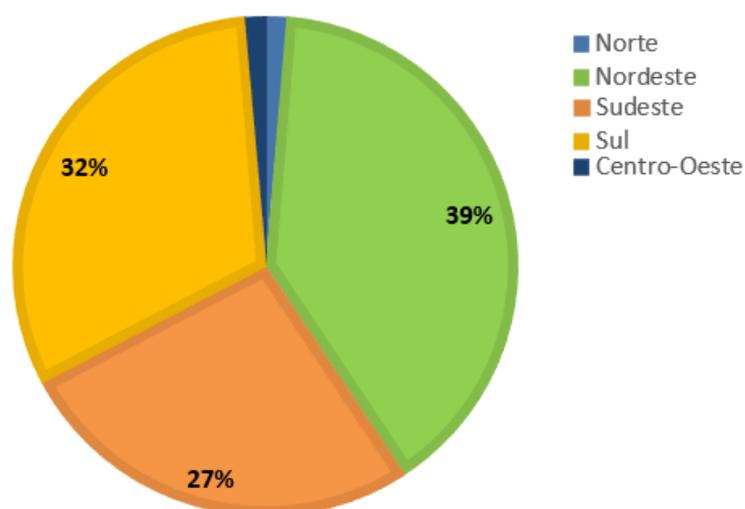
Dentre suas características morfológicas pode-se destacar seu caule herbáceo rastejante com ramificações e folhas que variam em tamanho e cor. Além disso, a batata-doce é constituída de dois tipos de raízes: a de reserva ou tuberosa, que possui a principal parte de interesse econômico e nutricional, e as raízes absorventes que são de suma importância para a absorção de nutrientes e água do solo (EMBRAPA, 2008). Neste trabalho a parte principal em estudo visa a raiz tuberosa da planta.

Com cerca de 400 variedades de batata-doce, dentro os cultivares encontrados no Brasil estão a BRS Rubissol, BRS Amélia e a BRS Cuia (Figura 2.1). Dentre as regiões brasileiras produtoras destacam-se principalmente a região Nordeste e Sul (Figura 2.2). No ranking por estados, de acordo com IBGE (2019), o Rio Grande do Sul destaca-se com produção de 175.041 ton/ano, seguido por São Paulo com produção de 140.727 ton/ano, conforme Tabela 2.1.

**Figura 2.1:** Cultivares mais comuns produzidos no Brasil



Fonte: EMBRAPA, 2011.

**Figura 2.2:** Produção de batata-doce por região no Brasil

Fonte: IBGE, 2019.

**Tabela 2.1:** Estados com maiores produção de batata-doce em 2019

Ranking	Estados	ton/ano
1°	Rio Grande do Sul	175041
2°	São Paulo	140727
3°	Ceará	90990
4°	Paraná	60148
5°	Minas Gerais	58621

Fonte: IBGE, 2019.

A composição química da batata-doce pode variar de acordo com a cultivar (BRS Rubissol, BRS Amélia e a BRS Cuia), condições climáticas da região de plantação, época de colheita e condições de armazenamento (Silva et al., 2002). Conforme os estudos de Risso (2014), foi realizada a caracterização da variedade BRS Cuia, obtendo valores de umidade, açúcares redutores e amido, Tabela 2.2.

**Tabela 2.2:** Caracterização da batata-doce BRS Cuia

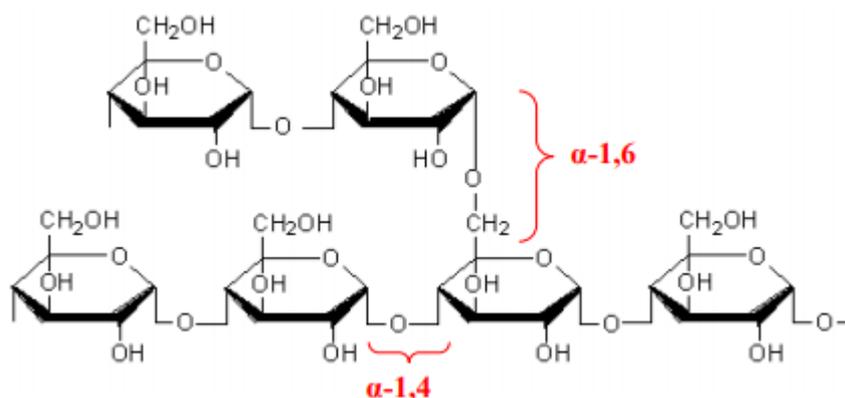
Parâmetros	Valor (%)
Umidade	64,8
Amido	25,1
Açúcares Redutores Totais	2,62

Fonte: Adaptado de Risso, 2014.

### 2.3.1 Amido

O amido ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub> é o maior polissacarídeo natural (Figura 2.3), sendo a principal fonte de reserva energética do reino vegetal. Este é o único polissacarídeo que é produzido em pequenos aglomerados individuais, com tamanho variável de acordo com a fonte botânica, que são denominados de grânulos; composto por dois tipos de macromoléculas: uma de cadeia linear (amilose) e uma de cadeia ramificada (amilopectina). A amilose é caracterizada por ligações  $\alpha$ -1,4, já as ligações  $\alpha$ -1,6 conferem a característica ramificada (RICHARDSON e GORTON, 2003).

**Figura 2.3:** Arranjo molecular do amido, ligações  $\alpha$ -1,4 e  $\alpha$ -1,6



Fonte: Adaptado de Royal Society of Chemistry (2014) apud Schweinberger et al., (2016).

O amido é insolúvel em água fria, decanta na suspensão, mas sofre um grau de inchamento. Sua insolubilidade é devido às ligações de hidrogênio que mantém a cadeia unida. Contudo, quando a água é aquecida estas ligações entre as cadeias de amilopectina e amilose são rompidas e as moléculas de água penetram na macromolécula (PENG et al., 2007). Com um tratamento térmico em excesso de água e em elevada temperatura, ocorre mudanças irreversíveis na estrutura do amido. Este processo é conhecido com a gelatinização do amido que ocasiona inchamento do grânulos, lixiviação da amilose, desaparecimento da cristalinidade e ruptura da estrutura dos grânulos (GARCIA et al., 1997; LAGARRIGUE et al., 2008).

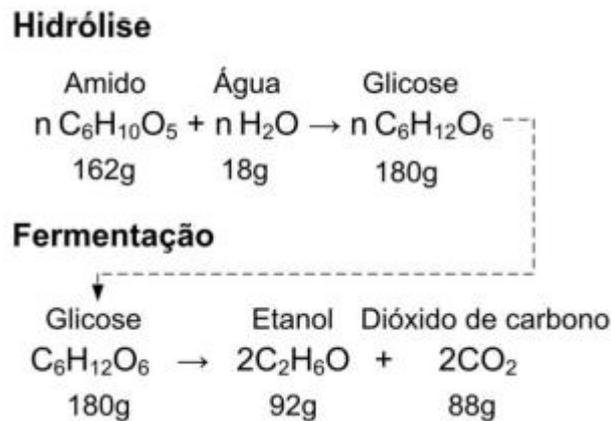
### 2.4 Processo fermentativo a partir de amiláceos (batata-doce)

Microrganismos que são utilizados para a fermentação alcoólica não conseguem metabolizar o amido (polissacarídeo). Para que ocorra a produção de etanol partindo de amiláceos se faz necessário que o amido presente no insumo seja degradado em mono, di ou trissacarídeos; assim uma determinada cepa de levedura conseguirá efetuar a transformação final no produto desejado. Logo, a utilização de batata-doce (*Ipomoea batatas* L.) como fonte de amido pode ser empregada na produção de etanol. A reação química e estequiométrica da transformação do amido em etanol pode ser visto na Figura 2.4.

Existem dois tipos de hidrólise: a ácida, que possui certas desvantagens como condições de operação altas (pressão e temperatura), corrosão dos equipamentos e produção de subprodutos que podem atacar a levedura que atua na fermentação; e a

enzimática, que já está consolidada em diversos processos espalhado por diversos países para diferentes matérias-primas (CEREDA, 2003; MACHADO e ABREU, 2006; GUPTA e VERMA, 2015).

**Figura 2.4:** Reação da transformação do amido, etapas



Fonte: Schweinberger et al., (2016).

De modo geral, o processo para conseguir fermentar o amido segue a rota mostrada na Figura 2.5, para a hidrólise enzimática.

**Figura 2.5:** Etapas até a fermentação do amido.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

A etapa de pré-tratamento varia de acordo com a fonte amilácea, podendo incluir lavagem sucessivas e trituração; nesta fase também é feita a diluição do meio. Na liquefação ocorre a gelatinização do amido, é elevada a temperatura do meio até numa faixa de 67°C – 75°C (ROCHA et al., 2010).

Com a gelatinização as cadeias de do amido ficam suscetíveis a ataques enzimáticos, então a enzima  $\alpha$ -amilase, do grupo endoamilases, é adicionada a fim de romper as ligações  $\alpha$ -1,4 do amido. Já na etapa de sacarificação são adicionadas as enzimas glucoamilases, do grupo exoamilase, responsável, principalmente, pela quebra das ligações  $\alpha$ -1,6 do amido (CINELLI, 2012). Na maioria das vezes, as enzimas  $\alpha$ -amilase e glucoamilases são adicionadas separadamente, pois cada uma tem sua própria condição ótima de operação (pH e temperatura).

Já a fermentação pode ocorrer juntamente com a sacarificação, sendo que a glucoamilase e a levedura (*Saccharomyces cerevisiae*, o microrganismo mais utilizado para fermentação em escala industrial, visto sua robustez, alta adaptabilidade e excelente produtividade) são adicionadas simultaneamente. A sacarificação simultânea com a

Fermentação (SSF) ocorrem em seus pHs ótimos ao redor de 4 a-4,5 e temperaturas mais adequadas à fermentação na faixa de 30 °C – 35 °C, enquanto que para sacarificação ao redor de 65°C. (ALFANI, F. et al., 2000; CINELLI, 2012).

Schweinberger (2016) em sua revisão pelos processos produtivos de etanol utilizando da batata-doce concluiu que em diferentes metodologias desenvolvidas na literatura os processos com elevada densidade (alta concentração de batata-doce do meio) realizados com SSF foram obtidos teores de etanol entre 13 – 16 % v/v, com tempos entre 26 – 48 h. Sendo que houve a necessidade de utilizar uma enzima para a redução da viscosidade.

Em estudos feitos pelo grupo de pesquisa GIMSCOP, comparando a viabilidade econômica de diferentes matérias primas (cana-de-açúcar, mandioca, sorgo e batata-doce) foi verificado que a batata-doce como matéria-prima é a mais viável (MASIERO, 2012). Com isto novos estudos foram realizados para aprimorar técnicas existentes, estes estudos foram feitos por Risso (2014) e Schweinberger (2015, 2016).

Nos estudos mais recentes, Schweinberger (2016) conseguiu determinar parâmetros para implementação de uma indústria na escala macro. Dentre suas principais contribuições, destacam-se:

- Aquecimento prévio da batata-doce in natura até a temperatura de 76 °C através de microondas, facilitando a etapa de trituração e efetuando a gelatinização do amido;
- Utilização da enzima Pectinex Ultra AFP, com concentração de 0,1 µL/g de batata-doce, para redução da viscosidade do meio;
- Simplificação do processo, simultaneidade de etapas: hidrólise, fermentação e redução da viscosidade;
- Utilização da enzima Stargen 002 (uma composição de  $\alpha$ -amilase e glucoamilase) para etapa de hidrólise. Com concentração de 0,1 µL/g de batata;
- Utilização da levedura Angel Thermal Resistance Alcohol com concentração de 3,33 mg/g de batata-doce;
- Otimização do tempo de hidrólise e fermentação simultânea (SHF), faixa de 18 h -19 h.

Neste estudo, várias melhorias foram alcançadas, como aumento da concentração de substrato e teor de etanol; decrescente dosagem enzimática e consumo de energia; e mudanças no processo, tornando-o mais prático.

## 2.5 Destilação

A destilação é um processo utilizado para separação de misturas líquidas baseado na diferença de volatilidade de cada componente presentes na mistura miscível. Utilizando com agente de separação a energia, para a destilação convencional, e energia e massa para destilações extrativas e azeotrópicas. Para a indústria sucroalcooleira a separação de etanol-água é muito importante (BARROS, 1997)

A mistura etanol-água é uma mistura não ideal que possui um azeótropo na fração molar de 11% de água e 89% de etanol. O azeótropo é uma mistura que possui um equilíbrio líquido e vapor no qual as duas fases possuem a mesma concentração (VASCONCELOS, 1999). O ponto de azeótropo de etanol-água é de aproximadamente 95% em massa com ponto de ebulição próxima de 78 °C (PILLA, 2010).

### 2.5.1 Destilação em batelada

Uma unidade convencional de destilação em batelada é composta por duas seções a de esgotamento e outra de retificação. A parte de retificação está associado um condensador, total ou parcial, que é responsável pela condensação da mistura gasosa, já a parte de esgotamento está associado um refeedor responsável por fornecer calor a mistura, Figura 2.6 (A). Há dois modos básicos de operação: taxa de refluxo mantida constante ou composição do destilado em relação a um componente é mantida constante (COATES; PRESSBURG, 1961).

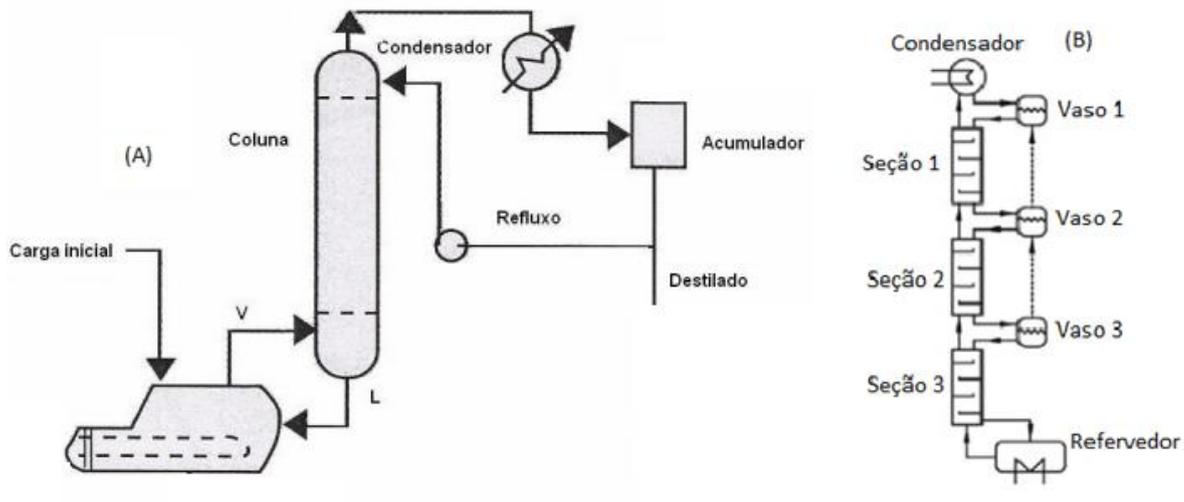
As destilações em bateladas são muito usuais em indústrias de pequenas e médias capacidades, indústrias farmacêuticas e química fina devido a sua flexibilidade e baixo custo operacional, porém possui algumas desvantagens, como demandas altas de energia e maior tempo de processo.

### 2.5.2 Destilação multivasos

Uma unidade de destilação multivasos funciona de forma similar a uma descontínua convencional, porém com um ou mais tanques de alimentação ou de retirada de produto intermediários. Como em uma destilação convencional o tanque de topo é mais rico nos componentes mais leves enquanto no tanque inferior estão presentes os componentes mais pesados. A coluna opera com refluxo total.

Num estudo realizado por Zhao *et al.* (2014) os arranjos multivasos analisados pelo autor mostraram um melhor desempenho comparados com uma destilação em batelada convencional a qual requer cerca de 4%-34,67% de tempo a mais para realizar a separação. Em seu arranjo, são conectados três vasos intermediários e isolados da coluna com by-pass da corrente de vapor. A operação é realizada em três bateladas e a cada batelada a coluna opera de forma contínua até atingir a especificação do produto no vaso de topo. No final da primeira batelada é removido o produto obtido e o produto dos outros vasos são movidos para cima e assim segue até atingir todas a especificações desejadas. Na Figura 2.6(B) pode ser vista uma coluna *multivessel* convencional (ZHAU *et al.*; 2014).

**Figura 2.6:** (A) Arranjo típico de uma destilação em batelada; (B) Arranjo típico de uma destilação multivasos



Fonte: Adaptado de Zhau et al.; (2014) e Kumana (1990) apud Lopes (2008).

### 3 Engenharia de Projetos – Fases e Métodos

De acordo com Perlingeiro (2005) “o projeto é posto como um problema complexo de engenharia que abriga o projeto integrado dos equipamentos. Em seguida, o problema é decomposto em suas etapas lógicas e as ferramentas utilizadas na sua resolução”. Nesta seção será exemplificada as fases que constituem um projeto de forma completa, para cada etapa existem atividades específicas e uma quantidade de informação necessária a fim de estabelecer os procedimentos e o desenvolvimento da Engenharia de Projetos.

As principais fases de um projeto são:

- Estudo da Viabilidade Técnico Econômico Ambiental;
- Projeto Conceitual;
- Projeto de Engenharia Básica;
- Pré-Detalhamento;
- Projeto de Detalhamento;
- *As Built*;
- Assistência Técnica à Obra.

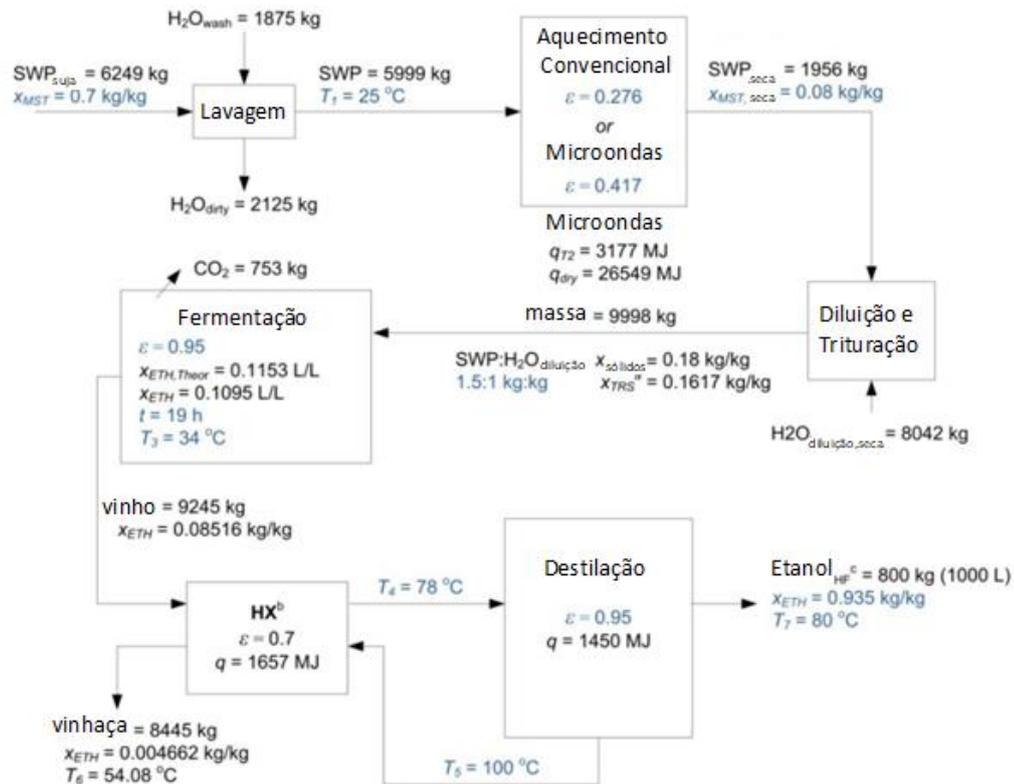
Para este trabalho aborda-se a etapa de Projeto Conceitual que de forma geral é um conjunto de informações cujo conteúdo define conceitualmente um processo e o funcionamento de uma instalação, equipamento ou sistema.

Então o projeto constitui em apresentar: um memorial descritivo (descritivo de instalações, processo, especificações dos produtos, vazões, fluxos, utilidades); critérios e dados para o dimensionamento, mais as premissas a serem adotadas, ou seja, as pré-definições básicas; fluxograma de processos (PFD) e diagrama de blocos e também um estudo de locação de layout.

## 4 Memorial Descritivo do Processo

Como partida inicial irá ser tomado como base da descrição do processo os valores do balanço de massa e energia obtidos por Schweinberger (2016), apresentados na Figura 4.1.

**Figura 4.1:** Balanço de massa e energia para produção de um dia de etanol

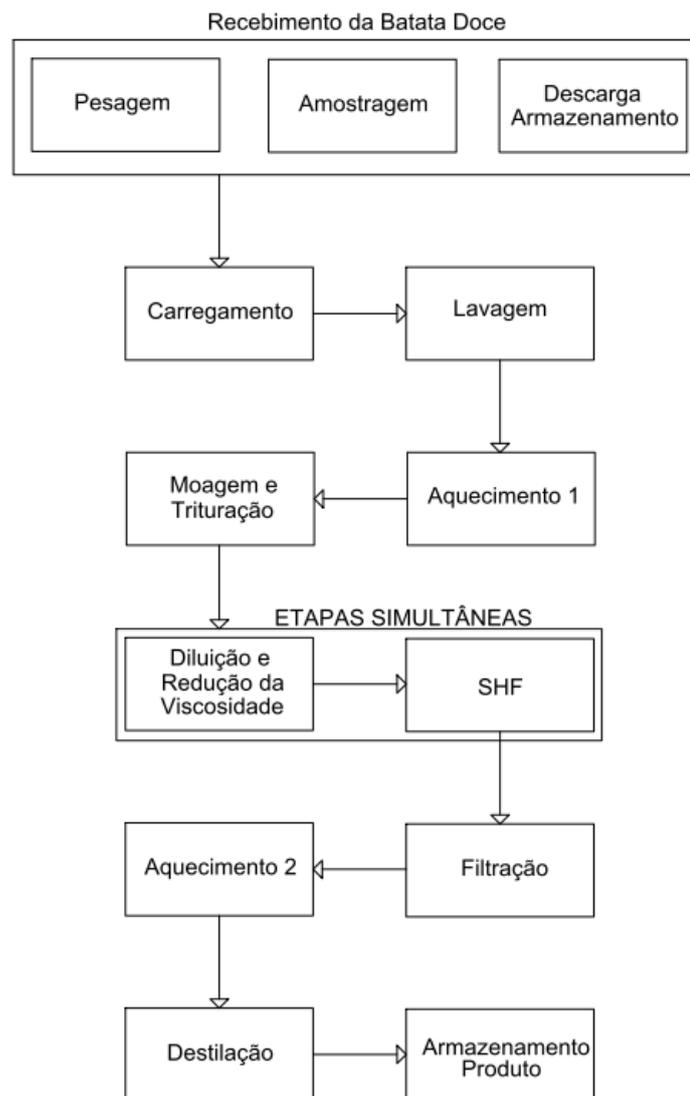


Fonte: Adaptado de Schweinberger (2016).

### 4.1 Definição das etapas

A usina modular de produção de etanol hidratado combustível deve atender a uma demanda diária de mil litros (1000 L/ dia) e o funcionamento da microusina deve ser de 24 h/ dia, considerando que a fermentação ocorra fora do horário de uma jornada de trabalho de 8 h/dia (40 h semanais), pois a fermentação necessita de um período maior para que ocorra seu processo (18 – 19 h). Para que seja atingido o objetivo de produção, a quantidade de insumo (batata-doce - BD) necessária é de aproximadamente 6250 kg/dia, conforme Figura 4.1.

De maneira simplificada o processo se constitui de 10 etapas principais, sendo elas: recebimento, carregamento, lavagem, aquecimento 1, moagem e trituração, simultaneidade de diluição e redução da viscosidade juntamente com SHF, filtração, aquecimento 2, destilação e armazenamento de produto. O fluxograma de blocos da Figura 4.2 exemplifica de maneira visual o processo.

**Figura 4.2:** Fluxograma de blocos do processo modular

Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software Autocad<sup>®</sup>, 2020.

## 4.2 Dados de processo e cronologia das etapas

Cada etapa tem seu intervalo de tempo programado, para que assim possa ser estabelecido o tempo de produção, além de ter seu volume de processamento determinado.

Importante destacar que os “gargalos” do processo são as etapas de diluição e redução da viscosidade junto com SHF e a destilação. A primeira etapa pode ocorrer em uma faixa de 18 – 19 h e a destilação juntamente com as etapas de aquecimento 2 e filtração devem ocorrer dentro de uma jornada de trabalho convencional (8 h diárias). Com bases nos gargalos de processo e nas Figuras 4.1 e 4.2 foi elaborado a Tabela 4.1 determinando o volume de operação de todas as etapas.

**Tabela 4.1:** Resumo de operação das correntes principais do processo

Etapa	Material	Quantidade ou Volume <sup>c</sup>	Temperatura entrada/saída	Localização <sup>a</sup>	Utilidades (tipo/valor)
Recebimento	Batata Doce <sub>suja</sub>	6250 kg/dia <sup>b</sup>	T ambiente	Local	-
Carregamento	Batata Doce <sub>suja</sub>	3125kg/h	T ambiente	Modular	-
Lavagem	Batata Doce <sub>suja</sub>	3125kg/h	T ambiente	Modular	Água/ 1875kg
Aquecimento 1 e Moagem	Batata Doce <sub>limpa</sub>	1500kg/h	25°C / 76°C	Modular	-
RVDHF (8 dornas)	Massa de Batata	489kg/h	76°C / 34°C	Local	Água/ 8042kg
Filtração e Aquecimento 2	Vinho (solução)	2312 kg/h	34°C / 78°C	Modular	Integração Energética
Destilação	Etanol	250 L/h	78°C / 80°C	Modular	-

Notas:

<sup>a</sup> Na coluna localização, quando se referir a local refere-se a propriedade e módulo irá se referir ao módulo container.

<sup>b</sup> Pode conter uma quantidade maior, valores e quantidades armazenadas devem ser alinhados de acordo com a colheita e o tempo de operação anual.

<sup>c</sup> Todos os valores foram arredondados para o valor próximo superior.

Para definição dos valores de vazão encontrados na Tabela 4.1 foi considerado que a microusina operará com 8 dornas de fermentação e os processos de filtração, aquecimento 2 e destilação ocorrerão por 4 h diárias. Para isto foi montado um cronograma lógico a ser seguido e então determinado, considerando a jornada de trabalho de 40 h semanais de um trabalhador, a vazão de cada etapa e ajustada para o período de tempo.

#### 4.2.1 Cronologia das etapas

Para o funcionamento da microusina de etanol foi considerada que há a presença de dois trabalhadores entrando na jornada de trabalho em horas diferentes; o primeiro (trabalhador A) trabalhará entre 07:00-11:00 e 12:00-16:00 e o segundo (trabalhador B) entre 08:00-12:00 e 13:00-17:00. Com os horários estabelecidos foi montado um cronograma de operação conforme Figura 4.3.

**Figura 4.3:** Cronograma de operações da microusina

Horários	Cronograma de Operações por Dorna			
	Dornas 1 e 2	Dornas 3 e 4	Dornas 5 e 6	Dornas 7 e 8
07:00				
07:30				
08:00	Destilação			
08:30		Destilação		
09:00				
09:30				
10:00	Preparação MP		Destilação	
10:30				
11:00	Aquecimento 1 + moagem	Preparação MP		Destilação
11:30				
12:00		Aquecimento 1 + moagem	Preparação MP	
12:30				
13:00			Aquecimento 1 + moagem	Preparação MP
13:30				
14:00				Aquecimento 1 + moagem
14:30	RVDHF + atividades auxiliares	RVDHF + atividades auxiliares		
15:00			RVDHF + atividades auxiliares	
15:30				RVDHF + atividades auxiliares
16:00				
16:30				
17:00				
<b>Fermentação</b>	até 8:00 do dia seguinte	até 9:00 do dia seguinte	até 10:00 do dia seguinte	até 11:00 do dia seguinte
<b>Observações</b>	Atividades auxiliares: lavagem, enchimento, descarga			

Com o cronograma estabelecido pode ser elaborado uma equação simples para o volume de processamento de cada etapa, conforme equação abaixo.

$$V \left( \frac{kg}{h} \right) = \text{Quantidade Processada} \div \text{Horas total da etapa} \quad (4.1)$$

Vale ressaltar que os valores do volume processado são os dados antes das etapas encontrados na Figura 4.1; somente na destilação que foi utilizado o valor de saída. Os valores de horas de cada etapa, conforme a Figura 4.3, estão na tabela 4.2 a seguir.

**Tabela 4.2:** Valores de horas total por etapa

Etapa	Total de Horas
Carregamento	2h
Lavagem	2h
Aquecimento 1 e Moagem	2h
RVDHF (8 dornas)	4h
Filtração e Aquecimento 2	4h
Destilação	4h

### 4.3 Descrição das etapas

Neste tópico está sendo abordado as descrições das etapas (Figura 4.2), seus principais encaminhamentos e sua finalidade. No anexo A estão localizadas figuras de alguns equipamentos que podem ser adaptados para determinado procedimento.

#### 4.3.1 Recebimento da batata-doce

Esta macro etapa é constituída em três operações principais: a pesagem, amostragem e armazenamento.

Presume-se que o insumo seja recebido através de caminhões de carga ou produzido na propriedade. Para que haja um controle do volume recebido há a necessidade de construção de um módulo de pesagem no início da instalação. Este módulo irá pesar o caminhão juntamente com a carga. É necessário o controle da quantidade de batata-doce recebida, pois deve-se ter controle absoluto de quanto/quando será armazenado e a estimativa do tempo. Assim será possível estabelecer uma logística para que não ocorra desperdício de insumo.

Na parte de amostragem deve-se avaliar a qualidade do produto recebido; como o volume de produção independe da qualidade do insumo a avaliação é importante para que seja armazenado pelo período correto, logo não haverá perdas desnecessárias nos galpões de armazenamento.

O armazenamento não faz parte do processo em si, mas uma orientação de como deve ser armazenado o insumo para que o ponto “ótimo” de operação ocorra. Estas orientações baseiam-se que a batata recebida é de colheita recente, não havendo batatas defeituosas ou que foram rejeitadas pelo consumidor.

Para que ocorra uma alta produção de etanol os estudos de Schweinberger et al. (2015) evidenciaram que pode ocorrer uma maturação das batatas-doces por um período de 25 dias (o estudo para avaliou o efeito do tempo de espera para processamento, isto é, não quer dizer que tem que esperar por 25 dias, mas que é possível processar após 25 da colheita, sem prejuízo ao processo).

Por isto, é orientado que seja feito a colheita de forma antecipada para possibilitar um tempo hábil de maturação. Após este tempo de armazenagem o insumo estará pronto para o processamento. A estrutura de estoque deve estar no local, sendo fixa e não fazendo parte dos módulos (exemplo de estrutura na Figura A do Anexo A). O produtor deve possuir galpões ou depósitos bem arejados onde possa ser armazenado a quantidade necessária pela quantidade de tempo orientado.

#### 4.3.2 Carregamento

Segundo a Embrapa (2006) normalmente o transporte de batatas é realizados em embalagem diversas, como sacos, big-bags, caixas e até mesmo a granel.

Várias alternativas podem ser adaptadas de acordo com a região de instalação, devendo ser estudada previamente; o sistema deve ser operado de forma contínua, sendo que toda a carga de insumo seja processada dentro do prazo de 24 h. A seguir são esboçadas algumas alternativas:

1. Os sacos de BD devem ser levantados até o tanque de recebimento (TQrec) através de levantadores pneumáticos (evitando desgaste físico do trabalhador). Após estarem alinhados com TQrec os sacos deverão ser abertos pela parte inferior fazendo com que as batatas-doces caem até o tanque. Aqui a pesagem ocorre devido a quantidade de sacos, sendo que cada saco terá seu peso já definido.
2. Esta outra proposta leva em conta uma esteira de carregamento vertical/horizontal com balança; que esteja instalada próximo ou dentro do local de armazenamento. As batatas-doces estariam agrupadas em grandes

volumes a granel e então a esteira seria alocada até a região desejada fazendo com que os insumos sejam levados até os TQrec.

3. As batatas serão despejadas em série de três moegas com rosca transportadora. As moegas podem ser abastecidas diretamente do recebimento ou podem ser abastecidas após o recebimento da carga. Sendo uma de funcionamento pleno e as outras duas de reserva para alimentação da primeira. Em seguida as batatas-doces serão levadas através de uma rosca infinita até a lavagem.

Para o fluxograma de processos (PFD – *Process Flow Diagram*) optou-se por escolher a terceira forma de carregamento, assim o PFD fica mais susceptível ao entendimento do fluxo.

#### 4.3.3 *Lavagem*

Esta fase é de suma importância para remoção de qualquer resíduo que possa estar associados na carga como terra, cascalhos e também algum microrganismo associados as BDs. O equipamento a ser usado aqui é um tanque agitado com aspersão de água e esteira agregada. Há inúmeros equipamentos de diversos fornecedores das indústrias alimentícias que podem ser adaptados para a biorrefinaria, como exemplo na Figura B do Anexo A.

#### 4.3.4 *Aquecimento 1*

Para que haja um gasto menor de energia na trituração se faz necessário que as batatas estejam um pouco mais macias, a característica da batata-doce é ser rígida em comparação com as batatas convencionais (batatas-inglesas). Para uma hidrólise eficaz, que ocorre na etapa seguinte, é necessário que a estrutura do amido seja degradada assim facilita o ataque enzimático.

De acordo com os Srichuwong et al. (2012) a temperatura ideal para gelatinização do amido da batata-doce é entre 60 à 80 °C. No entanto os estudos de Schweinberger et al. (2015) adequou-se uma temperatura ideal de 76 °C.

Para este processo será utilizado um forno micro-ondas industrial (Figura C do Anexo A), uma vez que em comparação com o processo convencional de aquecimento ele acaba sendo mais compacto (viabilizando a construção modular) e o aquecimento pode ser considerado mais rápido. Outra vantagem do aquecimento com micro-ondas é que ele minimiza ação de microrganismo competidores à levedura, uma vez que o aquecimento por esse mecanismo pode contribuir para desinfecção da batata-doce.

#### 4.3.5 *Moagem e trituração*

Depois de aquecido até 76 °C, a matéria-prima é levada até um moinhos de facas com finalidade de reduzir o tamanho e formação de uma massa de batata-doce. Esta operação tem por objetivo o aumento de superfície de contato que facilita a ação dos agentes enzimáticos na próxima etapa.

#### 4.3.6 *RVDHF*

RVDHF – Etapa de redução de viscosidade, diluição, hidrólise e fermentação que ocorrem simultaneamente. Após redução de tamanho a massa formada na fase de

trituração é levada até os tanques de fermentação (dornas) através de esteiras. Primeiramente é acrescentado a água de diluição na proporção de 1,5 de SWP/H<sub>2</sub>O e então com a utilização do agitador interno das dornas a solução é levemente homogeneizada. A água para diluição pode ser aproveitada da etapa de lavagem ou ser de uma fonte do local de instalação da microusina.

Em seguida é adicionado a enzima pectinase Pectinex Ultra AFP (0,1 µL/g de BD), fornecida pela LNF Latino America®, para que a redução da viscosidade ocorra. Esta solução é resfriada até 34 °C por meio de serpentina interna das dornas operando em sistema fechado. Em seguida, o pH do meio deve ser controlado e mantido em 4 utilizando uma solução tampão de ácido cítrico e citrato de sódio.

Então adiciona-se 1,0 mL STARGEN™ 002/kg de batata-doce e 3,33 mg da cepa Angel Thermal Resistance Alcohol /g de batata-doce. Todos os insumos mencionados e as dosagens citadas para esta fase foram recomendadas pelos estudos prévios realizados pelo laboratório GIMSCOP. Depois do preparo deve-se decorrer o tempo de 18h até a fermentação atingir seu ponto ótimo. Recomenda-se adicionar o antibiótico doxiciclina na proporção de 0,28 mg/g de BD para evitar contaminação bacteriana.

**Tabela 4.3:** Proporção de enzima/levedura para o volume processado de BDs

Enzima/ Levedura	Quantidade
Pectinex Ultra AFP	1,96 L
STARGEN™ 002	1,96 L
Angel Thermal Resistance Alcohol	6,51 g

Para fins de esclarecimento, a enzima STARGEN™ 002 da marca Genencor fabricada pela Dupont, trata-se de uma mistura comercial contendo alfa-amilase de *Aspergillus kawachi* expressa em *Trichoderma reesei* e glucomilase de *Trichoderma reesei*, própria para hidrólise do amido granular. A cepa Angel Thermal Resistance Alcohol Yeast®, fornecida pela LNF Latino America®, é amplamente aplicada para fins de fermentação na produção de etanol.

#### 4.3.7 Filtração

Após decorrido as 18 h de fermentação o mosto com teor entre 9-12% v/v deve ser encaminhado através de tubulações, por meio de uma bomba, para o filtro prensa que tem por finalidade a remoção de todos os sólidos que estão presentes no meio. A partir do filtro duas novas correntes se originam, uma contendo a torta úmida e a mistura líquida, daqui em diante chamada de “vinho”. Enquanto a torta vai para um etapa de secagem que futuramente pode ser aproveitada para outros subprodutos, a corrente de vinho se encaminha para a etapa de aquecimento 2.

#### 4.3.8 Aquecimento 2

Nesta etapa será utilizada uma integração energética visando o máximo aproveitamento da corrente quente originada do fundo da próxima fase, a destilação. O vinho proveniente da filtração à 34 °C é aquecido, por um permutador de calor, até a temperatura de 78 °C que facilitará para o projeto do tamanho do destilador, a corrente de aquecimento é a corrente de fundo do destilador, vinhaça, com cerca de 100 °C. Após

o ciclo a corrente de vinhaça deve ser tratada de modo apropriado. Para esta transferência de calor deverá ser utilizado um trocador de calor do tipo duplo-tubo.

#### 4.3.9 Destilação

A fim de ter um módulo mais compacto o tipo de destilador a ser adotado nessa etapa é um destilador *multivessel* com *by-pass* de vapor. O destilador multivascular facilita a construção modular. A corrente aquecida da etapa anterior irá passar pelos estágios da destilação que se encontram em colunas com tanques intermediários até chegar em sua corrente final com graduação alcoólica variando entre 95,1 à 96° GL (conforme especificação da ANP, Tabela 4.4). A corrente de vinhaça à 100 °C é reintegrada no processo com a finalidade de reaproveitamento na etapa de aquecimento 2.

**Tabela 4.4:** Especificações para Etanol Hidratado Combustível (EHC)

Característica	Unidade	Limite	Método	
			NRB	ASTM
Aspecto	-	Límpido e Isento de Impurezas (LII)		Visual
Acidez total, máx. (em miligramas de ácido acético)	mg/L	30	9866	-
Condutividade elétrica, máx.	µS/m	389	10547	-
Massa específica a 20°C	kg/m <sup>3</sup>	807,6 à 811,0	5992 e 15639	D4052
Teor alcoólico	%volume	95,1 à 96,0	5992 e 15639	-
	%massa	92,5 à 93,8		
Potencial hidrogeniônico (pH)	-	6,0 à 8,0	10891	-
Teor de etanol, mín.	%volume	94,5	-	D5501
Teor de água, máx.	%volume	4,9	15531 15888	E203
Teor de metanol, máx.	%volume	1	cromatografia	
Resíduo por evaporação, máx.	mg/100 mL	5	8644	-
Goma Lavada	mg/100 mL	5	-	D381
Teor de hidrocarbonetos, máx.	%volume	3	13993	-

(conclusão)

Característica	Unidade	Limite	Método	
			NRB	ASTM
Teor de sulfato, máx.	mg/kg	4	10894	D7328 D7319
Teor de ferro, máx.	mg/kg	5	11331	-
Teor de sódio, máx.	mg/kg	2	10422	-
Teor de cobre, máx.	mg/kg	0,07	11331	-

Fonte: Adaptado de ANP (2011).

#### 4.3.10 Armazenamento

Para finalizar, a corrente final será encaminhada através de bombas para os tanques de armazenamento que devem ter capacidade de armazenagem com cerca de 30.000 litros. Deve ser previsto a quantidade de 2 tanques horizontais com bacias próprias. Sendo 1 principal (armazenamento de 1 mês de produção) e um reserva caso ocorra algum imprevisto na retirada pelas distribuidoras. Na Figura D do Anexo A, há um exemplo do tanque a ser utilizado.

## 5 Fluxograma de Processos (PFD)

Neste trabalho o fluxograma de processos (PFD) será dividido em três partes que se encontram no Apêndice A. Parte 1, apresenta as etapas de recebimento até a trituração; a parte 2 apresenta as etapas RVDHF juntamente com a filtragem e a parte 3 apresenta a destilação e armazenamento. A lista dos principais equipamentos e TAGs proposto pelas três partes do PFD são listados na Tabela 5.1 e as funções de cada corrente na tabela do Tabela 5.2.

**Tabela 5.1:** Lista de equipamentos da microusinna modular

TAG	Função	Quantidade
B-01A/B	Retorno de água da lago de decantação ao TQ <sub>rec</sub>	2
D-01 A/B/C/D/E/F/G/H	Dornas de fermentação da etapa RVDHF	8
F-01	Filtro prensa, separação do mosto	
M-01 A/B/C	Moegas de armazenamento/recebimento de produto	3
MO-01	Moinhos de facas, redução de tamanhos das BDs	1
P-01	Aquecedor de microondas da batata <i>in-natura</i>	1
P-02	Permutador de integração energética	1
P-03	Refervedor da destilação <i>multivessel</i>	1
P-04	Condensador da destilação <i>multivessel</i>	1
R-01 A/B/C	Rosca infinita associada as moegas	3
S-01/02/03	Esteira de carregamento de insumo sólidos	3
TQ-01	Tanque de Lavagem de batata-doce	1
TQ-02 A/B/C	Tanques intermediários da destilação <i>multivessel</i>	3
TQ-03 A/B/C	Tanque de armazenamento de produto	3
V-01 A/B/C	Vasos da coluna de destilação <i>multivessel</i>	3

Por se tratar de um projeto conceitual podem haver algum equipamento pendente ou ainda não definido e, também, equipamentos a serem removidos, ou linhas que não foram completamente definidas no processo.

**Tabela 5.2:** Funções das principais correntes do processo

TAG	Função
1,2,3, 6 até 10	Linha indicativa de processo. Batata-doce <i>in-natura</i>
11 até 20	Linha indicativa de processo ou rosca infinita que leva uma massa de batata até as dornas
21 até 28	Linha de encaminhamento de mosto das dornas para o filtro prensa

(conclusão)

TAG	Função
29	Linha indicativa do encaminhamento da torta do filtro
30	Corrente de vinho fino encaminhada ao permutador P-02
31	Corrente previamente aquecida que alimenta a coluna da destilação <i>multivessel</i>
32	Linha de vapor de fundo do V-01A que sai do refeedor P-03
33	Corrente de vapor intermediária entre os vasos V-01A e V-01B
34	Corrente de vapor intermediária entre os vasos V-01B e V-01C
35	Corrente de vapor final da coluna para o condensador P-04
36	Corrente líquida entre o P-04 e o TQ-02C, produto final
37	Corrente líquida de retorno do TQ-02C e o vaso V-01C da coluna
38	Corrente líquida de retorno do V-01C e o tanque TQ-02B da coluna
39	Corrente líquida de retorno do TQ-02B e o vaso V-01b da coluna
40	Corrente líquida de retorno do V-01B e o tanque TQ-02A da coluna
41	Corrente líquida de retorno do TQ-02B e o vaso V-01A da coluna
42	Corrente líquida de retorno do V-01A e o tanque refeedor da coluna
43	Linha de by-pass do TQ-02A e o TQ-02B
44	Linha de by-pass do TQ-02B e o TQ-02C
45	Linha de recolhimento de produto (etanol hidratado)
46	Linha dos tanque de armazenamento para distribuição
47	Linha líquida de vinhaça da última batelada da coluna <i>multivessel</i>
48	Corrente líquida de vinhaça para tratamento

## 6 Layout Preliminar e Estimativa de Instrumentação da Microusina

Por se tratar de uma microusina modular é importante que seus principais equipamentos estejam acessíveis para locomoção, instalação, e construção. Visando estes aspectos, foi pensado na utilização de containers para locação dos principais equipamentos. Com isto, o núcleo principal da microusina pode ser transportado para qualquer região e “encaixado” ao chegar no local da instalação.

No mercado atual existem vários tipos e modelos de containers que podem ser facilmente adaptados ao projeto. Dentre eles destacam-se os seguintes modelos: dry box 20 pés e 40 pés, high cube 40 pés e flat rack 20 pés e 40 pés. A Tabela 6.1 mostra as dimensões internas dos containers mencionados.

**Tabela 6.1:** Dimensões de containers mais usuais

Módulo	Comprimento (m)	Largura (m)	Altura (m)	Capacidade (m <sup>3</sup> )
Dry box 20 pés	5,9	2,35	2,393	33,2
Dry box 40 pés	12,032	2,35	2,392	67,7
High cube 40 pés	12,032	2,352	2,698	76
Flat rack 20 pés	6,038	2,210	2,213	-
Flat rack 40 pés	12,020	2,230	2,23	67

Fonte: Adaptado de <https://www.fazcomex.com.br/blog/conheca-os-tipos-de-container/>.

### 6.1.1 Definição final do layout preliminar

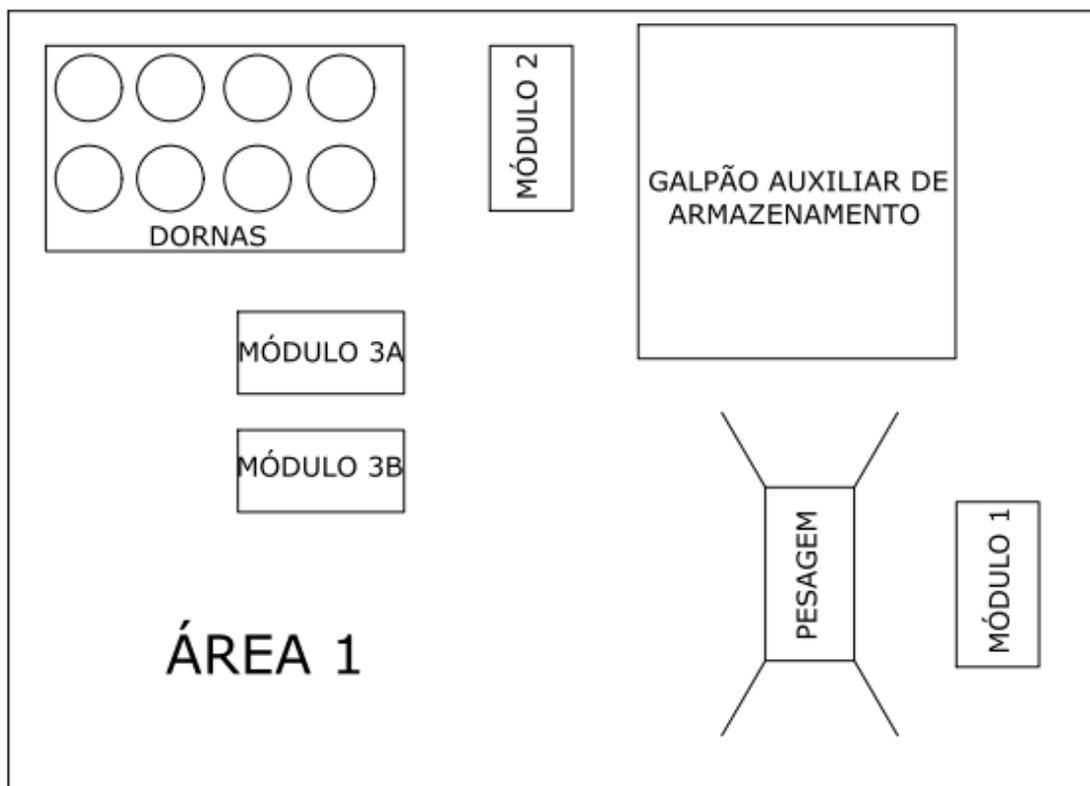
Conforme apresentado na Figura 6.1, a Área 1 apresenta o layout preliminar e sua disposição em relação ao posicionamento dos principais componentes macros da biorrefinaria. Os módulos apresentados na figura são containers ou equipamentos com dimensões de container e cada um deles possui sua função específica podendo ser locado equipamentos principais dentro deles. A Tabela 6.2 esboça a função e os equipamento de cada módulo e o modelo de container adotado.

**Tabela 6.2:** Configurações dos módulos do layout

Módulo	Função	Equipamento	Tipo de Container
1	Administrativo e Laboratório	-	High cube 40 pés
2	Núcleo tecnológico	Todos equipamentos da Tabela 5.1	Flat rack 40 pés
3 A/B	Armazenamento de combustível	Tanques horizontais de armazenamento	-

O layout que é apresentado na Figura 6.1 contempla, também, algumas instalações que serão necessárias para o bom funcionamento da biorrefinaria, a maioria das locações são divididas em módulos.

**Figura 6.1:** Layout preliminar da locação em área

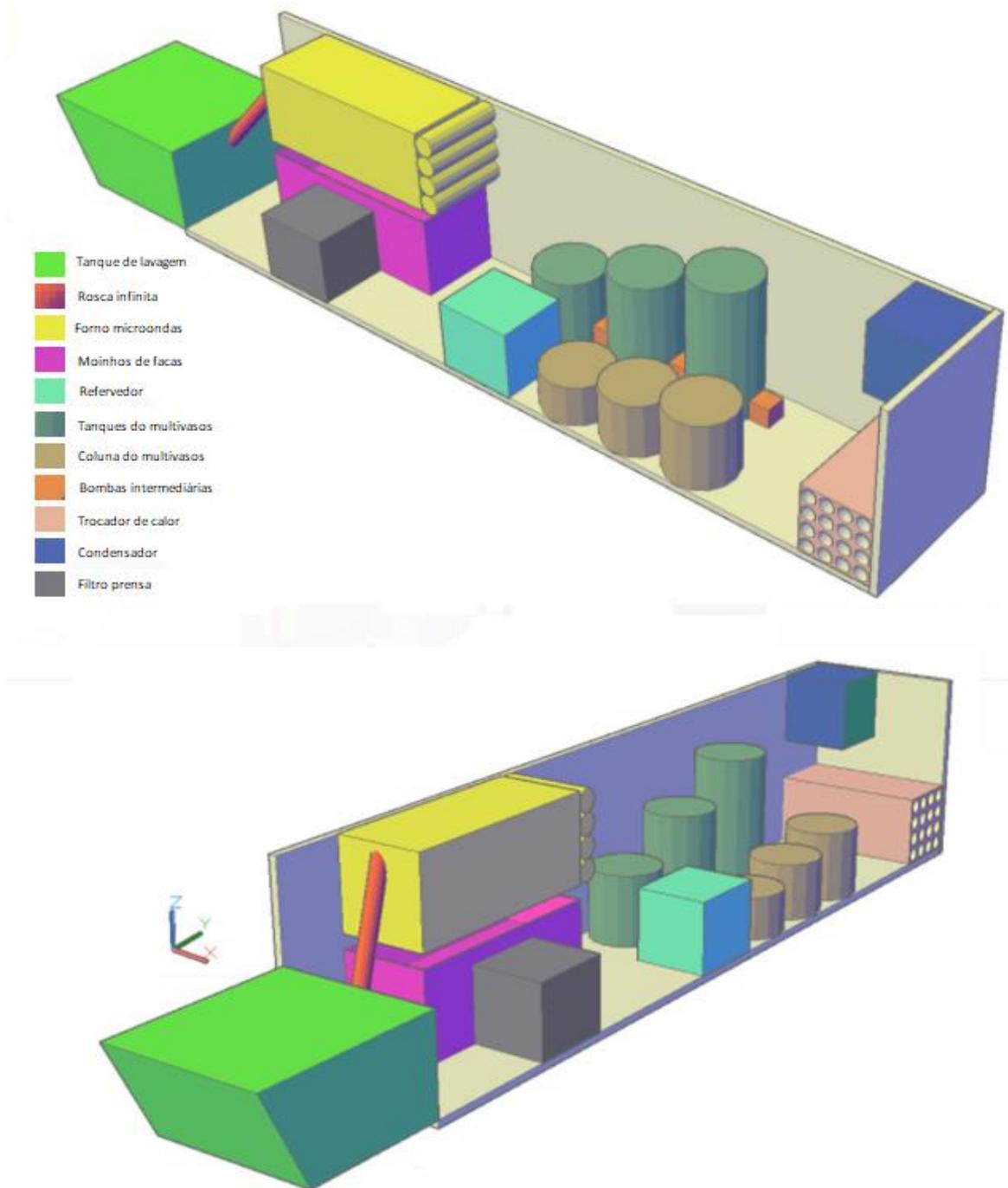


Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

### 6.1.2 Preliminar do layout do núcleo tecnológico

A parte mais importante de toda a estrutura que irá compor os sistemas da destilação de etanol é seu núcleo tecnológico, o qual é responsável por todo o processo. Para tal, é importante que os equipamentos sejam alocados da forma mais apropriada possível dentro das dimensões do contêiner escolhido.

A fim de esboçar como os equipamentos estão localizados dentro do módulo 2, foi projetado um layout preliminar, em 3D, da locação dos equipamentos (Figura 6.2). Isto facilita a visualização do mesmo e a percepção da viabilidade do projeto. Para a elaboração da figura em 3D, todos os equipamentos foram considerados como sólidos convencionais, não atendendo sua real forma e, também, foram desenhados os principais equipamentos do processo. O único equipamento que fica em anexo ao módulo principal é o tanque de lavagem, os demais estão todos adicionados à metragem do núcleo com seu devido espaçamento para manutenção.

**Figura 6.2:** Visões do núcleo tecnológico

Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software Autocad 3D<sup>®</sup>, 2020.

### 6.1.3 Estimativa de instrumentação

Para um controle melhor de todas as etapas se faz necessário um intertravamento através de instrumentos que estarão em diferentes partes do processo. Dentre os principais instrumentos pode-se ter indicadores e controladores de temperatura para as etapas de aquecimento 1 e 2, para a RVDHF e destilação; indicadores e controladores de pressão para a destilação e para os aquecimentos 1 e 2; indicadores de pH para a RVDHF; indicadores de nível para a etapa de lavagem, destilação e RVDHF. E, também, células de carga em todas as etapas para controle do volume (peso) processado em todas as partes.

## 7 Discussão Sobre os Custos

O investimento inicial para um produtor rural no projeto seria a compra da unidade produtiva, construção de instalações secundárias (galpões e dornas) e mão de obra para operação. Um estudo realizado por Masiero (2012) que levou em conta a compra da unidade produtiva, construção das instalações e serviços de montagem e instalação considerando a utilização de batata-doce como insumo ficou no valor estimado de R\$ 597.840,00 (cerca de 598 mil reais). Outro estudo realizado por Fabrício (2011) que levantou os valores dos equipamentos para a montagem de uma pequena unidade de processamento de álcool, chegou no valor de R\$ 210.018,80 (cerca de 210 mil reais).

Tendo em vista que o projeto de uma unidade modular pode atender famílias de pequenos e médios produtores rurais, os valores praticados e encontrados por pesquisadores anteriores (MAISERO, 2012 e FABRÍCIO, 2011) podem ser considerados altos, sendo que o produtor rural possui renda insuficiente ou impossibilidade de conseguir um financiamento com tal valor. Para solução deste problema, este trabalho orienta para os seguintes pontos que podem reduzir em grande parte os custos do projeto:

- Produção de unidades em série;
- Manutenção e suporte através da central;
- Equipamentos fabricados pela fornecedora das unidades.

Cada um dos tópicos anteriores afeta significativamente o valor final da unidade, pois com uma produção em série os valores em relação ao projeto de engenharia acaba sendo distribuídos entre os módulos, barateando cada unidade montada. Este tipo de produção se assemelha a produção de carros, sendo que um única unidade possuiria o valor muito elevado, mas a produção de várias unidades o valor torna-se mais baixo.

Com a manutenção e suporte através de uma central o produtor rural não necessitaria contratar uma mão de obra especializada após a aquisição da unidade este valor de manutenção já estaria incluso na unidade final. Os equipamentos, inseridos no módulo principal, todos fabricados pelo fornecedor da unidade são importantes no quesito valor final, pois a aquisição de equipamentos por fornecedores secundários acaba elevando o preço de cada equipamento. Já produzindo e construindo a partir do seu próprio projeto o equipamento fica adaptado para a unidade de forma personalizada.

Dentro dessas análises estima-se que o valor do núcleo da unidade deve girar em torno de R\$100.000,000 (cem mil reais) com cerca de 10% de margem e que as construções auxiliares cheguem até R\$ 80.000,00 (oitenta mil reais) com margem de 15%. Com estes valores o projeto se torna cada vez mais acessível para produtores de baixa e média renda, facilitando a linha de crédito e o investimento inicial que ele deve dispor.

## **8 Conclusões e Trabalhos Futuros**

Este trabalho dá continuidade ao trabalho iniciado no GIMSCOP/UFRGS e documentado na tese de doutorado de Schweinberger (2016). A principal contribuição foi a conceptualização da unidade modular de produção de etanol partindo da batata-doce.

### **8.1 Conclusões**

A constante procura por encontrar novas alternativas de produção de combustíveis, de cuidar do resíduo gerado e integrar a solução destas duas questões levou muitos pesquisadores a desenvolver métodos satisfatórios para solução do problema que atinge grande parte da população mundial. Para isto, métodos rápidos, compactos e eficientes são os mais visados por investidores e financiadores atualmente. Uma microssina modular de produção de etanol partindo da batata-doce é um investimento altamente eficiente e viável. Para isto a produção de um projeto em todas suas fases se faz necessário.

Em todas as etapas deste trabalho buscou-se elaborar o funcionamento que uma unidade modular deve apresentar. Na primeira parte foi elaborado e discutido a cronologia de cada etapa definindo tempos e padrões de operação assim como o volume de operação de cada equipamento encontrado em determinada etapa. Na segunda parte do trabalho buscou-se definir e apresentar a distribuição (layout) das estruturas em área e dos equipamentos dentro dos módulos (visando dimensões compatíveis ao transporte), verificando que é possível a construção modular e o funcionamento efetivo do mesmo. Por fim, foi discutido valores acessíveis para elaboração de toda a unidade, verificando que pode chegar a valores acessíveis para diferentes tipos de famílias produtoras no estado do Rio Grande do Sul.

### **8.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Como mencionado no item 3, um projeto de engenharia é dividido em várias etapas desde sua viabilidade até sua construção final. Como sugestões para trabalhos futuros propõe-se o projeto de engenharia básica, detalhada e a construção do módulo final, que pode incluir não só a área da engenharia química como também diversas outras como as engenharias mecânicas, civil e elétrica tornando-o multidisciplinar. Também propõe-se ações específicas, como dimensionamento final dos principais equipamentos, avaliação da integração energética e estimativa do valor final de construção de uma unidade do núcleo tecnológico.

## 9 Referências

ALFANI, F. et al. Comparison of SHF and SSF processes for the bioconversion of steam-exploded wheat straw. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, v. 25, n. 4, p. 184-192, 2000.

\_\_\_\_\_. Batata-doce BRS Cuia. Pelotas: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), 2011.

\_\_\_\_\_. Batata-doce BRS Rubissol. Pelotas: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), 2011.

BARROS, A. A. C. **Desenvolvimento de modelo de estágio de não equilíbrio e proposição de correlações para processos de destilação convencional e extrativa**. 1997. 268 f. Tese (Doutorado), Unicamp, São Paulo, 1997.

BIOFABRIK. WASTX Plastic: First pilot series plant is ready for delivery. Disponível em: <<https://biofabrik.com/en/2020/09/28/wastx-plastic-first-pilot-series-plant-is-ready-for-delivery/>>. Acesso em: 2 nov. 2020.

BIOGREEN. Unidade móvel de pirólise em contêineres. Disponível em: <<http://www.biogreen-energy.com/containerised-plant-module/>>. Acesso em: 2 nov. 2020.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução n. 7, de 9 de janeiro de 2011. Disponível em: <<http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2011/fevereiro&item=rnp-7--2011>>. Acesso em: 2 nov. 2020.

Canal Rural. **Rio Grande do Sul quer produzir etanol com batatas, trigo e arroz**. Disponível em: < <https://www.canalrural.com.br/noticias/rio-grande-do-sul-quer-produzir-etanol-com-batatas-trigo-e-arroz>>. Acessado em: 18 out. 2020.

CASTRO, L.A.S.; EMYGDIO, B.M.; ABRANTES, V.L.; ROCHA N.E.M. **Acessos de batata-doce do banco ativo de germoplasma da Embrapa Clima Temperado, com potencial de produção de biocombustível**. Publicação da Embrapa Clima Temperado, Pelotas – RS. 2008.

CEREDA, M. P. **Tecnologia, usos e potencialidades de tuberosas amiláceas latino americanas**. Fundação Cargill, 2003. Disponível em: < <http://books.google.com.br/books?id=XoH4ZwEACAAJ> >. Acesso em: 31 out. 2020.

CINELLI, B. A. **Produção de etanol a partir da fermentação simultânea às hidrólise do amido granular de resíduo agroindustrial**. 2012. 200f. Dissertação (Mestrado). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

COATES, J.; PRESSBURG, B. S. How to analyze the calculations for batch rectification in tray columns. **Chemical Engineering**, New York, v. 68, n. 2, p. 131-136, 1961.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias> >. Acesso em: 18 out. 2020.

DE CASTRO, L. A. S.; BECKER, A. **Batata-doce BRS Amélia**. Pelotas: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), 2011.

ELTON WEBER. **Frente de Defesa do Etanol entrega projeto de fomento ao governo**. Disponível em: <http://www.eltonweber.com.br/index.php/imprensa/1158-frente-em-defesa-do-etanol-entrega-projeto-de-fomento-ao-governador>>. Acessado em: 15 mai. 2020.

EMBRAPA HORTALIÇAS. **Sistemas de produção**. Disponível em: < [https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Batata-doce/Batata-doce\\_Ipomoea\\_batatas/composicao\\_uso.html](https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Batata-doce/Batata-doce_Ipomoea_batatas/composicao_uso.html)>. Acesso em 31 out. 2020.

EMBRAPA. **A cultura da batata-doce**. Disponível em: < <http://https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/162018/1/A-cultura-da-batata-doce.pdf>>. Acesso em: 20 mai. 2020.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias>>. Acesso em: 18 out. 2020.

FABRÍCIO, A. M. **Determinação dos Custos de Produção do Etanol a partir da Mandioca (Manihot esculenta Crantz) pelo Método de Custeio Baseado em Atividades (ABC)**. 2011. f.137. Dissertação (Mestrado). UFSM, Santa Maria, 2011.

GUPTA, A.; VERMA, J. P. Sustainable bio-ethanol production from agro-residues: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, n.0, p. 550-567, 2015.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção Agrícola Municipal – Culturas temporárias e permanentes. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457>>. Acessado em 30 out. 2020.

KUMANA, J. D. Run batch distillation processes with spreadsheet software. **Chemical Engineering Progress**, v.86, p.53-57, 1990.

LIMBERGER, V. M.; SILVA, L. P.; EMANUELLI, T.; COMARELA, C. G.; PATIAS, L. D. Modificação química e física do amido de quirera de arroz para aproveitamento na indústria de alimentos. **Química Nova**. v. 31, n. 1, p. 84-88, 2008.

LOPES, M. M. **Estudo comparativo da destilação em batelada operando com refluxo constante e com composição do destilado constante**. 2008. f.155. Dissertação (Mestrado), São Paulo, 2008.

MACHADO, C. M. M.; ABREU, F. R. E. Produção de álcool combustível a partir de carboidratos. **Revista de Política Agrícola**. 64-78 p. 2006.

MASIERO, S. S. **Microusina de Etanol de Batata-Doce: Viabilidade Econômica e Técnica**. 2012. 141 f. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Química, Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

MORAES, M. L. de.; BACCHI, M. R. P.; Etanol do início às fases atuais de produção. **Revista de Política Agrícola**. v. 4, p. 5-22, 2014.

Nova Cana. **As usinas de Açúcar e Etanol**. Disponível em: <[https://www.novacana.com/usinas\\_brasil](https://www.novacana.com/usinas_brasil)>. Acesso em: 19 out. 2020

PERLINGEIRO, Carlos Augusto G. Introdução Geral. In:\_\_\_\_\_. **Engenharia de processos análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos**. 1. Ed. Rio de Janeiro: Blucher, 2005. Cap. 1, p. 1.

PILLA, L.; Físico-química II: equilíbrio de fases, soluções e eletroquímica. 2. Ed. Porto Alegre: UFRGS, 2010. Cap. 8, p. 191.

RICHARDSON, S.; GORTON, L. Characterisation of the substituent distribution in starch and cellulose derivatives. **Analytica Chimica Acta**. v.497, p. 27-65. 2003.

RISSO, R. D. S. **Etanol de Batata-Doce: Otimização do Pré-Processamento da Matéria-Prima e da Hidrólise Enzimática**. 2014. 98 f. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Química, Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ROCHA, T. S.; CARNEIRO, A. P. A.; FRANCO, C. M. L. Effect of enzymatic hydrolysis on some physicochemical properties of root and tuber granular starches. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.30, p. 234-245, 2012.

RSC. Royal Society of Chemistry. **Carbohydrates**. 2014. Disponível em: <<http://www.rsc.org/Education/Teachers/Resources/cfb/carbohydrates.htm>>. Acesso em: 01 out. 2020.

SCHWEINBERGER, C. M. et al. Estudo sobre a temperatura de liquefação e utilização de micro-ondas no processo de hidrólise do amido de batata-doce para a produção de etanol. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 20., 2014, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: COBEQ, 2014. P.1-8.

SCHWEINBERGER, C. M. et al. Ethanol production from sweet potato: The effect of ripening, comparison of two heating methods, and cost analysis. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, 2016. ISSN 1939-019X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/cjce.22441>>. Acesso em: 23 out. 2020.

SCHWEINBERGER, C. M. **Inovação e Otimização no Processo de Produção de Etanol a Partir de Batata-doce**. 2016. 173 f. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Química, Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SILVA, J. B. C.; LOPES, C. A.; MAGALHÃES, J. S. Cultura da batata-doce. In: CEREDA M. P.; **Agricultura: tuberosas amiláceas latino americanas**. São Paulo: Cargill, 2002. 2, p. 448-504.

SILVEIRA, M. A. Batata-Doce: Uma Nova Alternativa para Produção de Etanol. **Álcool Combustível – Série Industria em Perspectiva**. v. 1, p. 109-122, 2008.

SRICHUWONG, S. et al. Sweet potato having a low temperature-gelatinizing starch as a promising feedstock for bioethanol production. **Biomass and Bioenergy**. v. 39, p. 120 – 127, 2012.

Trierweiler, J. O.; **Biorrefinarias Descentralizadas e Autônomas: um Modelo de Economia Circular, Verde e Digital.** Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=-jts0g2IJUc&t=583s>>. Acesso em: 18 out. 2020.

VASCONCELOS, C. J. G. **Simulação, otimização e controle de processos para a separação de misturas não ideais.** 1999. 201 f. Dissertação (Mestrado), Unicamp, São Paulo, 1999.

ZHAO, S.; et al. Time requirements in closed and open batch distillation arrangements for separation of a binary mixture. **Polish Journal of Chemical Technology.** v. 16, p. 66-74, 2014.

## Anexo A: Imagens de Instalações e Equipamentos

**Figura A:** Modelo de galpão de armazenamento



Fonte: Adaptado de <<https://pt.dreamstime.com/fotos-de-stock-royalty-free-batata-na-casa-do-armazenamento-image39360928>>.

**Figura B:** Modelo de um tanque de lavagem para adaptação a microrrefinaria



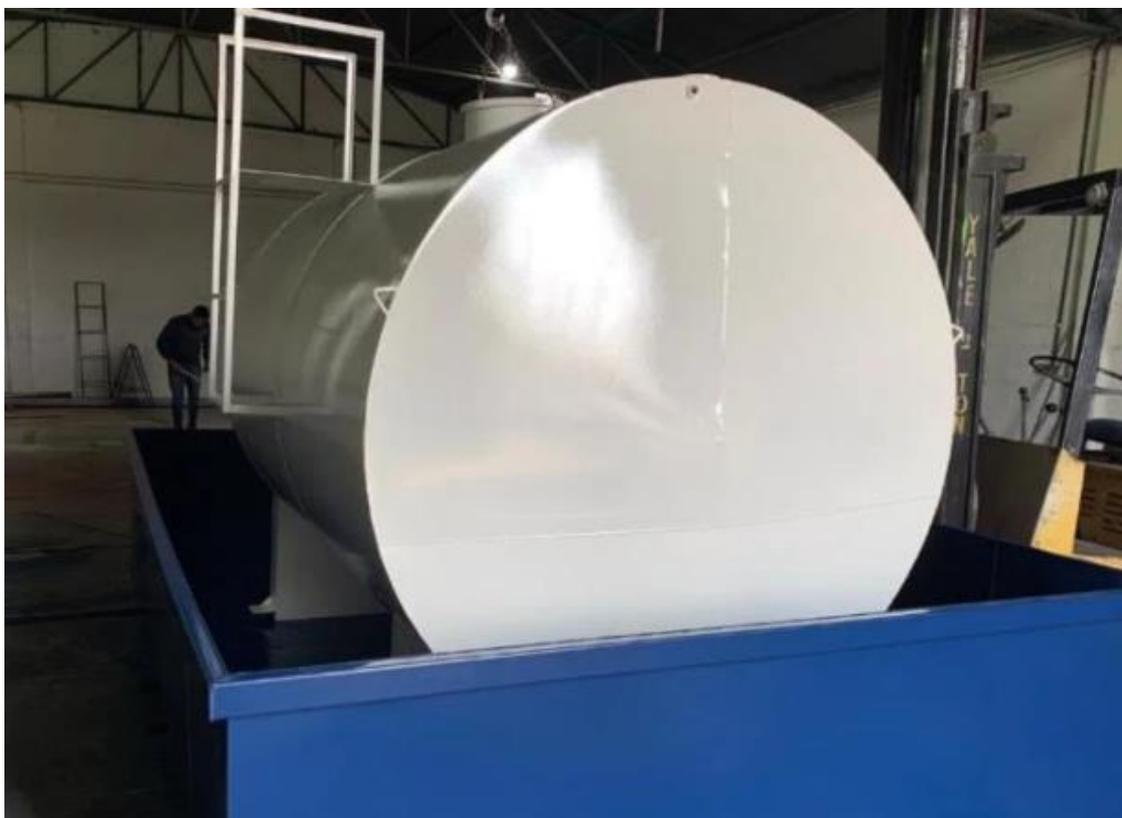
Fonte: Adaptado de <<https://www.musquito.com.br/lavador-batata-doce>>.

**Figura C:** Modelo um forno microondas industrial para adaptação a microrrefinaria



Fonte: Adaptado de < <https://www.mfrural.com.br/detalhe/278786/forno-microondas-industrial-com-esteira-1369>>.

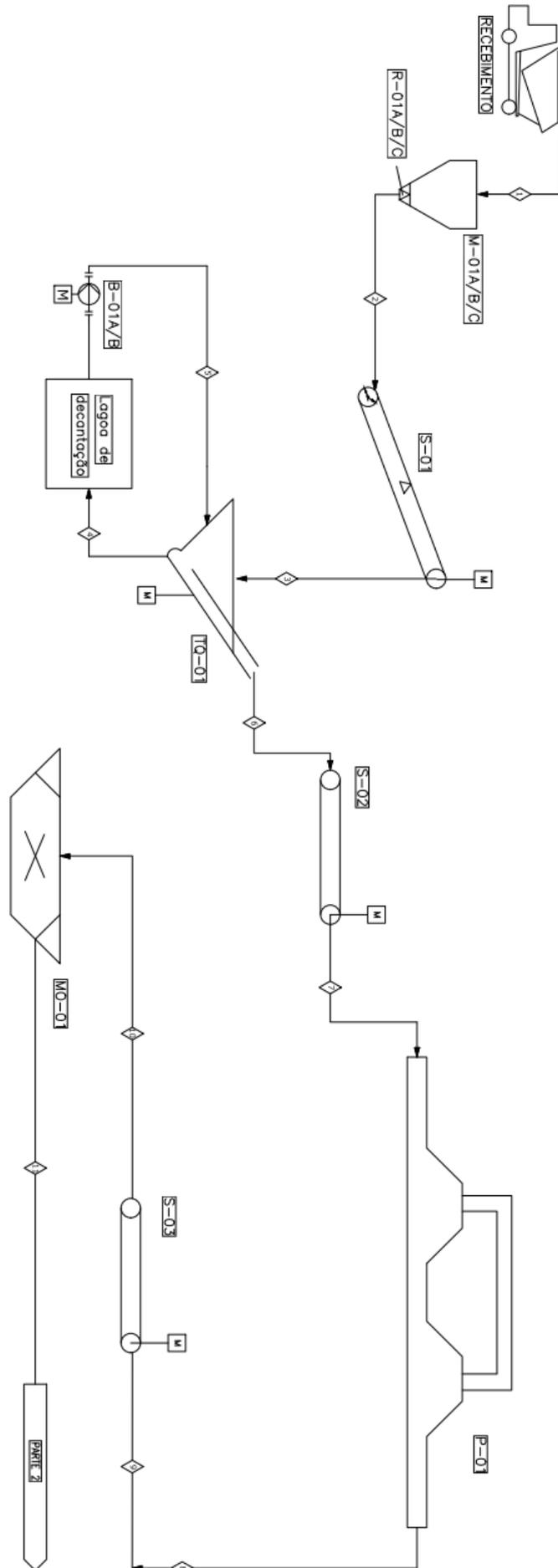
**Figura D:** Modelo de um tanque de armazenamento horizontal com bacia própria



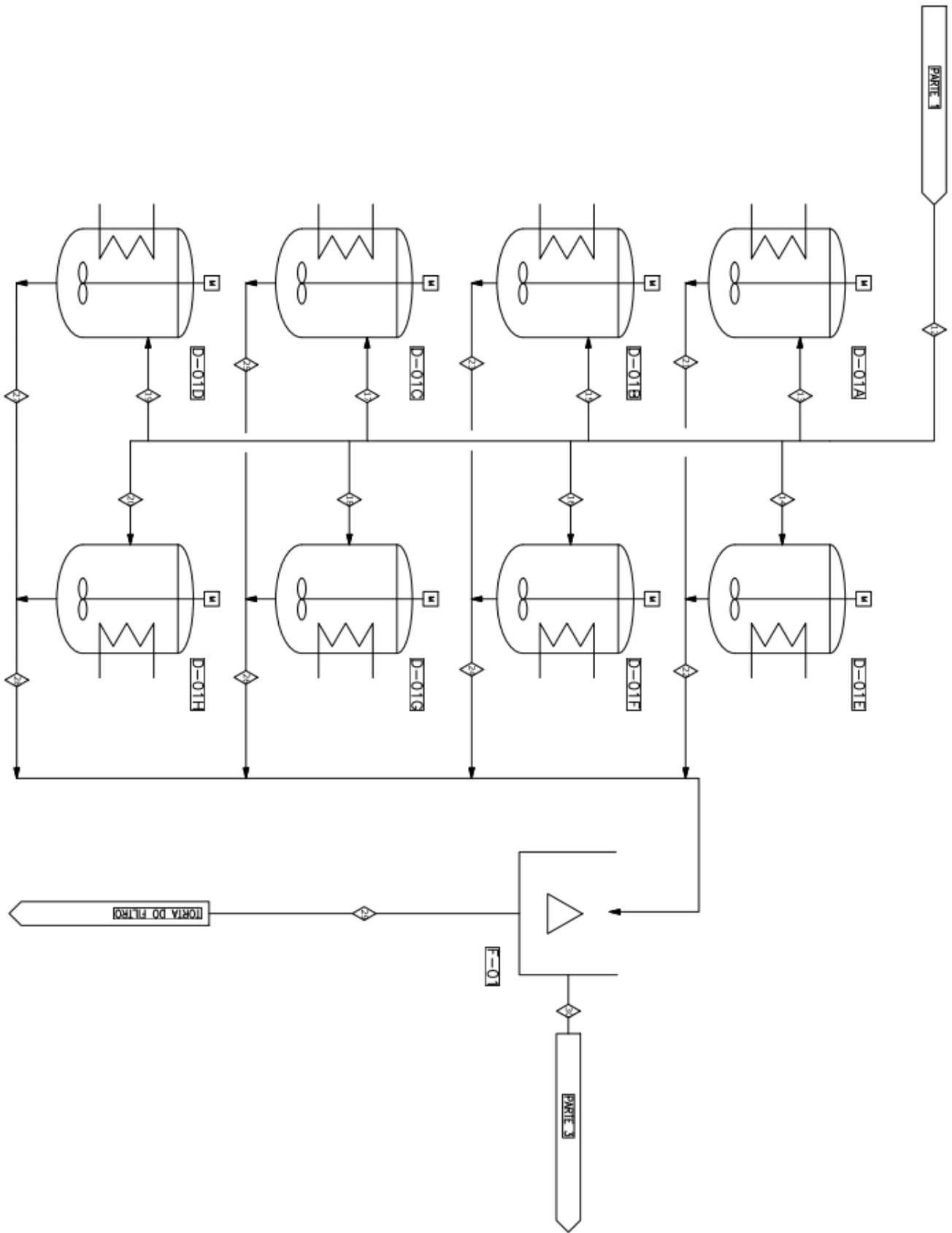
Fonte: Adaptado de: < <https://www.mfrural.com.br/detalhe/220705/tanque-metalico-aereo-para-armazenamento-de-combustivel>>.

## Apêndice A: Parte 1, 2, 3 do Fluxograma de Processos (PFD)

### PARTE 1



PARTE 2



PARTE 3

