



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



Estudo de caso da viabilidade técnico-econômica da reutilização do resíduo de terra diatomácea em indústria cervejeira

Autor: Robson Giovani Altissimo

Orientadora: Débora Jung Luvizetto Faccin

Porto Alegre, dezembro de 16

Sumário

Sumário	ii
Agradecimentos	iv
Resumo	v
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	viii
Lista de Símbolos	ix
Lista de Abreviaturas e Siglas	x
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1. Cerveja: História e cenário atual	3
2.2. Processo de produção da cerveja	3
2.2.1. Moagem	3
2.2.2. Mosturação	3
2.2.3. Filtração, Fervura e Preparo do Mosto	4
2.2.4. Obtenção da Cerveja	4
2.2.5. Filtração da Cerveja	4
2.3. Terra diatomácea	5
2.3.1. Propriedades gerais da terra diatomácea	5
2.3.2. Beneficiamento da terra diatomácea após extração	6
2.3.3. Reservas de terra diatomácea	7
2.3.4. Aplicações da terra diatomácea	7
2.4. Viabilidade técnica da recuperação do resíduo de terra diatomácea	9
2.5. Subprodutos agroindustriais	13
2.5.1.1. Subprodutos gerados pela indústria cervejeira	13
2.5.2. Bagaço de malte e casca de arroz	15
2.5.2.1. Caracterização energética e aplicabilidade do bagaço de malte	15
2.5.2.2. Caracterização energética e aplicabilidade da casca de arroz	18
3 Estudo de Caso	19
3.1 Descrição dos processos	20
3.2 Projeto de recuperação da terra diatomácea	21
3.3 Viabilidade técnica da recuperação de terra diatomácea	23
3.4 Alternativa ao processo de recuperação de terra diatomácea na própria unidade fabril	24
3.5 Viabilidade econômica da recuperação de terra diatomácea	25

3.6	Cálculo do Tempo de <i>Payback</i>	31
4	Resultados	32
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	35
6	Referências	37

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, à minha família e especialmente aos meus pais, por terem me dado a oportunidade e sempre garantirem as condições para que eu pudesse concluir a graduação.

Gostaria de agradecer também à minha namorada, que diariamente me ajudou a ter disciplina, motivação e foco nos estudos.

Agradeço à minha orientadora Débora, pela receptividade e disponibilidade constante para auxiliar com as dúvidas, desde as mais simples até as mais complexas e que, com certeza, teve grande participação no desenvolvimento de um trabalho consistente e relevante.

Agradeço também aos colegas de trabalho, que nesse período de estágio me ensinaram muitas coisas que levarei para a vida toda e que foram fundamentais, inclusive, para a concepção do trabalho de conclusão.

Finalmente, agradeço por todos os churras no Pupi, as cevas no Xiru, os salchipões dos formandos e todos os outros, e, finalmente, por todas as amizades construídas no decorrer do curso.

Resumo

O setor de fabricação de bebidas vem apresentando grande dinamismo nos últimos anos. A produção nacional tem no refrigerante e na cerveja seus dois grandes produtos. Juntos, esses dois segmentos representam aproximadamente 82 % do volume produzido e 76 % do valor total das vendas de bebidas no Brasil. Dessa forma, a dinâmica do setor de bebidas no país é substancialmente dependente do desempenho desses dois segmentos. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade técnica e determinar a viabilidade econômica do processo de recuperação do resíduo de terra diatomácea, para ser novamente utilizada no processo produtivo com a mesma função de auxiliar de filtração, a partir da utilização de biomassa como fonte energética. A biomassa a ser utilizada é proveniente do próprio processo produtivo, a partir do bagaço de malte, e como alternativa outra biomassa que tem grande disponibilidade, principalmente no Rio Grande do Sul e que possui baixo custo, a casca de arroz, ambos com considerável poder calorífico.

Além de determinar o tempo de *Payback* do projeto de reutilização do resíduo de terra diatomácea na própria unidade fabril onde o mesmo é gerado, serão analisadas alternativas, como a viabilidade da instalação de uma planta de recuperação, que receberia os resíduos de terra diatomácea de algumas fábricas, os processaria e reenviaria para ser novamente utilizada no processo produtivo. Como vantagem, seria feito o investimento em equipamentos de maior porte, que poderiam tratar um volume maior de resíduos e, portanto, ter menor custo do que cada fábrica ter seu próprio sistema de recuperação, de menor porte; por outro lado, há o custo econômico do transporte dos resíduos entre as fábricas antes e após o tratamento, além do inconveniente ambiental pelo transporte dos resíduos, e, como consequência, as emissões gasosas decorrentes de tal. Outro fator relevante refere-se ao volume de cinzas gerado pela combustão das biomassas, sendo muito mais significativa para o caso da casca de arroz em comparação ao bagaço de malte; além disso, o bagaço de malte um valor de mercado maior que a casca de arroz. Pode-se observar, portanto, que diferentes pontos de vista podem existir, dependendo tanto da posição geográfica da fábrica, do seu volume de produção mensal, da sua estratégia com relação a investimentos em processos sustentáveis, entre outros fatores que serão citados no texto.

Todas essas alternativas foram avaliadas e, considerando as vantagens e desvantagens de cada caso, a escolha da melhor alternativa para a implantação de projeto de recuperação do resíduo de terra diatomácea em indústria cervejeira depende de fatores geográficos e de disponibilidade de recursos. A melhor alternativa, que concilia interesses econômicos e ambientais é a de recuperação do resíduo de terra diatomácea na própria unidade fabril, com utilização de bagaço de malte como fonte energética.

Lista de Figuras

- Figura 1: Curva termogravimétrica referente ao resíduo gerado pela indústria cervejeira. Fonte: (Goulart et al., 2011)..... **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 2: Difractogramas de raios-X para: (A) amostras de terra diatomácea tratada térmicamente e (B) terra diatomácea nova. Fonte: (Goulart et al., 2011).....10
- Figura 3: Micrografia referente à terra diatomácea nova. Fonte: (Goulart et. al., 2011).....10
- Figura 4: Micrografia referente à terra diatomácea saturada com matéria orgânica. Fonte: (Goulart et al., 2011).....10
- Figura 5: Micrografia referente à terra diatomácea tratada térmicamente. Fonte: (Goulart et al., 2011).....11
- Figura 6: (a) Resíduo úmido e saturado com matéria orgânica; (b) resíduo saturado com matéria orgânica, seco a 105°C; (c) resíduo tratado térmicamente a 700°C por 6 horas; (d) terra diatomácea nova. Fonte: (Goulart et al., 2011).....12
- Figura 7: Fluxograma simplificado do projeto de recuperação da terra diatomácea em indústria cervejeira.....22

Lista de Tabelas

Tabela 1: Composição química da terra diatomácea. Fonte: (Pollock 1987).	6
Tabela 2: Reserva e produção mundial de Diatomita. Fonte: (DNPM/DIPLAM; USGS- Mineral Commodity Summaries, 2013.) (1) reserva lavrável; (2) minério processado; (3) produção bruta; (p) dado preliminar; (nd) dado não disponível.	7
Tabela 3: Médias dos atributos físico-químicos para terra diatomácea nova(T1), terra diatomácea recuperada(T2) e terra diatomácea saturada(T3). Estão descritos os resultados de pH, densidade aparente(DA), densidade úmida(DU), teor de umidade em base seca(TUS) e sed sedimentação(S). (Goulart <i>et al.</i> , 2011).....	11
Tabela 4: Médias dos atributos físico-químicos para a água e cerveja, antes da filtração (T4), após filtração com terra nova (T5) e após filtração com terra recuperada (T6). Fonte: (Goulart <i>et al.</i> , 2011)	12
Tabela 5: Inventário de dados para matérias-primas no processo de produção de cerveja. Fonte: (Amienyo; Azapagic, 2016).	14
Tabela 6: Relação entre umidade, densidade e calor específico do bagaço de malte. Fonte: (Luana <i>et al.</i> 2012)	16
Tabela 7: Valores médios dos materiais voláteis(Materials volatile), cinzas(Ash) e carbono fixo(Fixed carbono) do bagaço de malte. Fonte: (Luana <i>et al.</i> 2012)	17
Tabela 8: Teor de umidade, cinzas, voláteis e carbono fixo de diferentes amostras de casca de arroz oriundas do RS, comparadas a valores encontrados na bibliografia pelos autores. Fonte: (Fernandes <i>et al.</i> , 2015).....	18
Tabela 9: Custos envolvidos no projeto de reutilização da terra diatomácea.....	25
Tabela 10: Custo médio do frete por tonelada. Obs.: parte da tabela foi omitida por não conter informações relevantes ao problema em questão. Fonte: (Bortolin, N. 2015).	26
Tabela 11: Cálculo do Payback referente à primeira alternativa de projeto.	32
Tabela 12: Cálculo do Payback referente à segunda alternativa de projeto.	32
Tabela 13: Cálculo do Payback referente à terceira alternativa de projeto.	33
Tabela 14: Cálculo do Payback referente à quarta alternativa de projeto.	34

Lista de Símbolos

μm – Micrômetro

b.u. – Teor de umidade em base úmida

η - relação de eficiência energética entre calcinação em forno rotativo e em mufla

DRX – Difração de Raios-X

E – Energia

i – corrente elétrica

M1 – Massa de bagaço necessária para calcinar matéria em mufla

M2 – Massa de bagaço necessária para calcinar matéria em forno rotativo

M3 - Massa de casca de arroz necessária para calcinar matéria em forno rotativo

Mb – Massa de bagaço de malte

Mc – Massa da casca de arroz

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

Mt – Massa de terra diatomácea

P – Potência elétrica do equipamento

Pb – Preço da tonelada do bagaço de malte

Pc – Preço da tonelada da casca de arroz

PCsb – Poder Calorífico Superior do bagaço de malte

PCSc – Poder Calorífico Superior da casca de arroz

Pt – Preço de aquisição da terra diatomácea

Ptr1 – Preço de transporte por tonelada para a distância 1

Ptr2 – Preço de transporte por tonelada para a distância 2

R – Resistência elétrica do equipamento

t – tempo

TGA – Análise termogravimétrica

TD – Terra diatomácea

U – Voltagem ou ddp aplicada

Lista de Abreviaturas e Siglas

DRX – Difração de Raios-X

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

TGA – Análise termogravimétrica

1 Introdução

O setor de bebidas vem apresentando grande dinamismo no Brasil. Juntos, os segmentos de produção de cerveja e refrigerante representam aproximadamente 82 % do volume produzido e 76 % do valor total das vendas de bebidas no Brasil. O crescimento do setor gera uma enormidade de benefícios para o país, como geração de empregos diretos e indiretos, geração de tributos para o governo e movimentação do mercado relacionado. Porém, acaba também gerando malefícios como geração de um maior volume de resíduos, sendo que em alguns casos não há destinação correta para os mesmos. Dessa forma, empresas que tem como valor compromissos ambientais com a sociedade trabalham constantemente para reduzir o consumo de materiais que tornar-se-ão resíduos após sua utilização.

Tendo em vista o crescente volume de produção da indústria cervejeira, fica claro que tornam-se necessárias medidas para otimizar os processos de produção, a fim de reduzir custos, produzir com mais sustentabilidade e com menor volume de resíduos, que são geralmente proporcionais ao volume de produção. As matérias-primas seguem uma receita de produção e não podem, em princípio, sofrer alterações a fim de reduzir seu consumo e, por consequência, o custo de produção e impactos ambientais, a não ser que se admitam modificações no perfil ou que se assuma uma perda de qualidade no produto final. Por sua vez, os materiais intermediários de produção são insumos utilizados durante o processo produtivo, que não fazem parte da composição final do produto, e, portanto, podem ter seus consumos otimizados a fim de obter-se um menor custo fixo de produção. Entre os principais materiais intermediários de produção das indústrias cervejeiras pode-se destacar a soda cáustica e o ácido nítrico, principais componentes químicos utilizado na assepsia de tanques, tubulações e equipamentos em geral, os lubrificantes de esteira, utilizados nas esteiras transportadoras de produtos da área de envase, auxiliares de filtração, como terra diatomácea e carvão ativado, utilizados na filtração de refrigerantes e cervejas, entre outros.

Dessa forma, o primeiro passo no sentido de reduzir custos de produção e o impacto ambiental gerado pela atividade é reduzir o consumo desses insumos. Trabalhos de melhoria contínua são realizados nas cervejarias com o objetivo de reduzir a utilização de tais insumos. Porém, naturalmente, existe uma quantidade mínima de utilização do recurso para que haja efetividade no processo para o qual o mesmo é utilizado. Assim, o próximo passo visando maior sustentabilidade no processo de produção é a reutilização dos insumos, o que já é uma realidade para, por exemplo, soda cáustica e ácido nítrico, que são reutilizados até o ponto de apresentarem uma sujidade que possa comprometer a qualidade do produto, e só então são descartados.

No entanto, a terra diatomácea, assim como alguns outros resíduos, não pode ser reutilizada diretamente após o processo de filtração, pois encontra-se saturada com matéria orgânica, ou seja, seus poros ficam obstruídos e ela perde sua capacidade de filtração. Assim, para que o material possa ser reutilizado, torna-se necessário um tratamento térmico no resíduo, também conhecido como

calcinação, que consiste na combustão da matéria orgânica presente no material até que o mesmo volte a apresentar características adequadas para ser utilizado como material filtrante. A terra diatomácea é um material de origem fóssil, ou seja, não-renovável, sendo que atualmente não há outro material que apresente a viabilidade econômica e a aplicabilidade técnica a ponto de ser utilizado na filtração de cerveja a níveis industriais.

Com o intuito de desenvolver um trabalho de integração mássica e energética, será avaliada técnica e economicamente a utilização de outro resíduo do processo de produção de cerveja, o bagaço de malte, e como alternativa outro subproduto de grande abundância, principalmente na região Sul do Brasil, como fonte energética para geração da energia a ser utilizada na calcinação da terra diatomácea em forno rotativo. A utilização de biomassa residual como fonte energética é interessante porque, além de garantir que não haja disposição inadequada do resíduo em questão, possibilita uma redução das emissões de gás carbônico na atmosfera se comparado a combustíveis fósseis, pois apesar de também ser liberado no processo de combustão da matéria, absorve quantidade similar do gás durante o processo de fotossíntese das plantas.

Atualmente, o resíduo de terra diatomácea é enviado para compostagem junto com outros resíduos do processo de produção da cerveja em localidade próxima à fábrica. Por sua vez, o bagaço de malte é vendido a pecuaristas locais.

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar a viabilidade técnico-econômica do tratamento térmico da terra diatomácea para reutilização, contemplando o custo de instalação e de operação da planta de tratamento, propondo a utilização de bagaço de malte ou casca de arroz como matéria-prima para geração de energia necessária ao processo de tratamento térmico, na própria unidade fabril. Além disso, como objetivos secundários, serão avaliadas outras alternativas para a reutilização do resíduo, como a instalação de uma central de reutilização que receba e processe os resíduos de um conjunto de fábricas que sejam geograficamente próximas, e a determinação do *Payback* das alternativas de plantas de secagem que serão propostas.

2 Revisão Bibliográfica

Para desenvolver um projeto de reutilização do resíduo de TD em uma cervejaria, utilizado na etapa de filtração, é necessário o entendimento da importância do mercado cervejeiro para o país, e também de algumas etapas do processo de produção da cerveja, que tem influência na utilização do insumo em questão.

2.1. Cerveja: História e cenário atual

A cerveja, produto tradicionalmente aceito e em evidência por milhares de anos, pode ser definida como sendo uma bebida carbonatada de baixo teor alcoólico, preparada a partir da fermentação do malte de cevada, contendo lúpulo e água, podendo ainda utilizar outras matérias-primas como arroz, trigo ou adjuntos (Silva, 2005).

Estima-se que o homem começou a utilizar bebidas fermentadas há 30 mil anos. Estudos indicam que a produção da cerveja teve seu início por volta de 8000 a.C. Na Antiguidade, difundiu-se lado a lado com as culturas de milho, centeio e cevada, entre os povos da Suméria, Babilônia e Egito. Também foi produzida por gregos e romanos (Aquarone, 2013). O setor cervejeiro produziu, em 2015, segundo dados da CervBrasil (2016), 14,1 bilhões de litros de cerveja, gerando um faturamento na ordem de R\$ 70 bilhões, com uma geração de tributos de aproximadamente R\$ 21 bilhões, empregando cerca de 2,2 milhões de pessoas e movimentando uma cadeia produtiva responsável por 1,6 % do PIB (Produto Interno Bruto) do país.

2.2. Processo de produção da cerveja

Durante o processo de produção, alguns componentes acabam sendo agregados à cerveja, e, se não forem eliminados durante o processo produtivo, podem afetar tanto a qualidade do produto final quanto a saúde do consumidor.

2.2.1. Moagem

Na moagem do malte, o grão deve ter sua casca aberta longitudinalmente, para deixar exposto o endosperma amiláceo. Este deve ser triturado para facilitar o ataque das enzimas durante o processo de mosturação. O tipo de moinho utilizado, de rolos ou martelos, está diretamente relacionado com o equipamento de filtração do mosto, tina filtro ou filtro prensa, respectivamente (Aquarone, 2013).

2.2.2. Mosturação

O processo de transformação das matérias-primas cervejeiras (água, malte, lúpulo e adjuntos) em mosto, denomina-se mosturação ou brassagem (Aquearone, 2013). O objetivo principal da mosturação é quebrar, através de ação enzimática, as moléculas de amido contido nos grãos de malte, produzindo extrato e outros nutrientes (Green, 2015). O mosto cervejeiro é composto

geralmente de 75 % de açúcares fermentescíveis, sendo 10 % de glicose, 45 % de maltose, 15 % de maltotriose e 5 % de sacarose. Os 25 % de açúcares não fermentescíveis são divididos em 10 % de maltotetraose e 15 % de dextrinas (Barnes, 2004).

2.2.3. Filtração, Fervura e Preparo do Mosto

Ao final da mosturação, o mosto segue para a etapa de filtração, para ser realizada a retirada do bagaço, massa resultante da aglutinação da casca com resíduos do processo (Oetterer, 2010).

Antes do mosto seguir para a etapa de fermentação, é necessário finalizar o seu tratamento através da retirada do precipitado, também chamado de *trub*, em um tanque denominado decantador, além de resfriar o mosto e aerar o mesmo com objetivo de melhorar a atuação das leveduras sobre o mesmo (Silva, 2005).

2.2.4. Obtenção da Cerveja

No processo cervejeiro, vários subprodutos desenvolvem-se durante a fermentação, produtos intermediários permanecem no líquido e componentes do mosto são assimilados pela levedura (Silva, 2005). As leveduras produzem os compostos ativos do aroma e do sabor da cerveja como subprodutos da síntese necessários ao seu crescimento e metabolismo (Barnes, 2004).

2.2.5. Filtração da Cerveja

Após o processo de fermentação, a cerveja apresenta uma turbidez significativa devido à presença de fermento residual, que permaneceu agregado à cerveja no momento da retirada do fermento, e tecidos celulares cominuídos durante o beneficiamento do malte. Para produzir uma bebida límpida e clarificada, as partículas coloidais devem ser retiradas da cerveja para obter-se uma aparência e sabor agradáveis do produto final (Fleet e Siebert, 2005; Siebert, 2006). Segundo Narziß (2005), o consumidor espera uma cerveja brilhante e bem clarificada. A turbidez é normalmente considerada como um defeito na qualidade da cerveja, exceto para cervejas não filtradas como “Kellerbier”, “Yeast Beer” ou outras cervejas tradicionalmente turvas.

É necessário um período de repouso de alguns dias para remover, por decantação, a maior parte do fermento e resíduos celulares, que são transferidos para tinas de fermento, armazenados e reutilizados no processo até que apresentem características adequadas para tal (Bamforth, 2003). Mesmo assim, após este período, partículas coloidais ainda permanecem em suspensão na cerveja, causando uma turbidez significativa. Dessa forma, a filtração da cerveja, através da utilização de auxiliares de filtração como a terra diatomácea, é necessária (Atkinson, 2005; Fillaudeau et al., 2007; Bamforth, 2009 apud Benítez

et al., 2013). Por fim, a cerveja é geralmente tratada com absorventes insolúveis para remover precursores de turbidez a longo prazo (Briggs *et al.*, 2004).

Partículas de turvação na cerveja são divididas em três grupos. Partículas >1 µm (leveduras e proteínas coaguladas) que geram uma turbidez macroscópica e visível; partículas coloidais <1 µm, que são basicamente proteínas e complexos tanino-proteicos, que são somente visíveis perante luz refratada e ainda partículas <0,001 µm, que não são visíveis (Narziß, 2005 apud Braun *et al.*, 2011).

O processo de filtração é composto tanto pela ação da profundidade quanto pela ação da superfície. Durante a filtração pela superfície, as partículas de turvação não adentram ou passam pelos poros do meio filtrante, e são retidas na superfície do meio filtrante. São formadas camadas que tornam-se mais densas durante o andamento do processo de filtração. Devido a isto, a taxa de separação entre líquido e sólido aumenta, porém, o fluxo da cerveja no filtro diminui. A filtração pela ação da profundidade é baseada em dois efeitos complementares. De um lado, há o efeito de peneiramento, onde as partículas de turvação entram nos poros do meio filtrante até encontrar reduções de poros, que fazem com que as partículas sejam retidas. Neste caso o tamanho da partícula é maior do que o tamanho do poro, naquele ponto e dessa forma fica retida na estrutura do auxiliar de filtração. Por outro lado, existe o efeito de adsorção. Especialmente partículas pequenas são retidas por cargas negativas ou positivas (Kunze, 2007 apud Braun *et al.*, 2011).

A graduação do tamanho das partículas e a porosidade do auxiliar de filtração utilizado influenciam o fluxo da cerveja no filtro. Quanto menor a granulometria do auxiliar de filtração e maior sua porosidade, maior é a separação e menor é o fluxo da filtração. A porosidade interior do auxiliar de filtração e o efeito de peneiramento beneficiam, naturalmente, a performance de filtração (Eiselt, 1999; Fütterer, 1977 apud Braun *et al.*, 2011).

2.3. Terra diatomácea

De acordo com Souza e Kavalco (1973, 1998 apud Pimentel, 2006), a diatomita ou *kieselguhr* é um material que ocorre nos terrenos de sedimentação, principalmente em zonas de formação de lacustre ou oceânica, constituído principalmente de uma acumulação de esqueletos ou frústulas, fósseis de diátomos. Os diátomos são organismos unicelulares, do reino vegetal, possuindo células completas, com membrana, núcleo e protoplasma, pertencente ao reino *Bacillariophita*. São fonte alimentar primária para a fauna aquática. Apesar de a maioria das espécies dessa classe serem planctônicas, algumas ocorrem em sedimentos ou sobre outras plantas.

2.3.1. Propriedades gerais da terra diatomácea

De acordo com Antonides e Dolley (1998, 2003 apud Pimentel, 2006) a terra diatomácea é um material de pequena granulometria em geral, de estrutura bastante porosa, baixa condutividade térmica, elevado ponto de fusão, elevada

área superficial, baixa densidade e essencialmente inerte a maioria dos líquidos e gases químicos. Segundo Pollock (1987), outros compostos inorgânicos como alumina, ferro, metais alcalinos e alcalinos terrosos estão presentes na terra diatomácea. A composição química de dez amostras do minério de diatomácea é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química da terra diatomácea. Fonte: (Pollock 1987).

Mineral	Percentual	
	Mínimo	Máximo
Sílica – SiO ₂	58	90
Alumina – Al ₂ O ₃	0,5	8,0
Óxido de Ferro – Fe ₂ O ₃	0,2	3,2
Óxido de cálcio – CaO	0,3	1,4
Óxido de sódio – Na ₂ O	0,2	1,2
Óxido de magnésio – MgO	0,3	4,5
Óxido de titânio – TiO ₂	0,2	3,5

2.3.2. Beneficiamento da terra diatomácea após extração

Segundo Abreu (1973 apud Pimentel, 2006), em princípio, realizam-se as seguintes operações para o beneficiamento do minério de terra diatomácea, a partir do minério extraído da lavra: calcinação em alta temperatura para eliminar a matéria orgânica; moagem e seleção do material calcinado e classificação em tipos de partículas de diferentes tamanhos, que terão diferentes aplicações posteriormente.

No processo de calcinação do minério de terra diatomácea empregado pela empresa CIEMIL, (França e Luz, 2002) a diatomita, com umidade entre 10 a 20 %, (ideal: 12 a 15 %), é misturada com o carbonato de sódio (Na₂CO₃) a uma concentração de 2 % em massa. A mistura com carbonato de sódio tem a função de auxiliar na aglomeração das partículas de diatomita, bem como na eliminação das impurezas; em seguida a mistura é alimentada no forno de calcinação.

A temperatura de calcinação realizada pela empresa CIEMIL varia de 800 a 1000 °C, de acordo com o teor de matéria orgânica presente no minério de terra diatomácea. A terra diatomácea calcinada, proveniente do forno, passa por um resfriador cilíndrico, cai em um ventilador para ser desagregada e segue para a etapa de classificação pneumática. Ainda, segundo França e Luz (2002), o tempo de residência utilizado em planta piloto para calcinar toda a matéria orgânica presente no minério de terra diatomácea a 800 °C é de 45 minutos, enquanto na

mufla o tempo é de 1 hora, comprovando a maior eficiência do forno rotativo empregado experimentalmente pelos autores, no referido artigo.

As perdas de matéria orgânica por combustão são chamadas de calcinação, porém quando se deseja obter modificações nas propriedades filtrantes da terra diatomácea, como redução da área de superfície por unidade de volume e a clarificação do material, adiciona-se ao minério de diatomita bruto de 3 a 10 % em massa de hidróxido de sódio, carbonato de sódio ou cloreto de sódio, processo descrito por Souza (1973 apud Pimentel, 2006) como fluxo-calcinação.

2.3.3. Reservas de terra diatomácea

Segundo dados do DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral), os Estados Unidos da América são o maior produtor e consumidor mundial de diatomita, com uma produção estimada de 820 mil toneladas em 2012. Na Tabela 2 são apresentados os dados referentes às reservas e à produção de Diatomita no mundo, em 2012.

Tabela 2: Reserva e produção mundial de Diatomita. Fonte: (DNPM/DIPLAM; USGS-Mineral Commodity Summaries, 2013.) (1) reserva lavrável; (2) minério processado; (3) produção bruta; (p) dado preliminar; (nd) dado não disponível.

Discriminação	Reservas ⁽¹⁾ (10 ³ t)	Produção (10 ³ t)		
		Países	2011	2012 (p)
Brasil ⁽³⁾	1.944	4,4	3,4	0,16
Estados Unidos da América	250.000	813	820 ⁽²⁾	39,26
China	110.000	440	440	21,07
Dinamarca	nd	225 ⁽²⁾	230 ⁽²⁾	11,01
Japão	nd	100	100	4,79
México	nd	90	90	4,31
França	nd	75	75	3,59
Argentina	nd	62	60	2,87
Espanha	nd	50	50	2,40
Turquia	nd	45	50	2,40
Outros países	nd	160	170	8,14
TOTAL	361.944	2.052	2.078	100,0

2.3.4. Aplicações da terra diatomácea

Antunes *et al.* (2011) analisaram a eficácia de diferentes doses de terra diatomácea para controle de pragas no armazenamento de grãos de milho, provando que de fato a utilização da terra previne a infestação de determinadas pragas, especialmente para níveis de umidade por volta de 12 %.

Vu *et al.* (2013) propuseram a utilização de terra diatomácea agregada a cinzas vulcânicas na produção de novos materiais de construção, obtendo materiais que apresentam grande porosidade e excelente controle de umidade.

Mateo *et al.* (2016) propuseram a utilização de resíduos de terra diatomácea na produção de tijolos, gerando um aumento da porosidade do material e uma

diminuição da densidade aparente, agindo principalmente como um agente formador de poros.

Singh, B. e Singh, V. (2016) estudaram o potencial inseticida de dosagens de terra diatomácea em sistemas de cultivo de arroz e trigo para controle de pulgões, que vem sendo considerada a principal peste nesses tipos de lavoura no noroeste da Índia.

Diferentes amostras de terra diatomácea foram utilizadas por Mazidi *et al.*, (2016) como suporte para catalisador de Óxido de Vanádio (V₂O₅). Os autores concluíram que a melhor conversão da reação na qual o catalisador é aplicado foi obtida com terra diatomácea tratada com ácido a 15 %.

Izuagie *et al.* (2016) avaliaram a utilização de terra diatomácea para tratamento de água com quantidades muito elevadas de flúor, condição frequentemente encontrada em regiões da África Subsaariana, e obteve resultados próximos a 25 % de remoção do íon fluoreto, sendo necessária uma modificação na estrutura da terra diatomácea para incremento na remoção de flúor.

Sherief *et al.* (2015) propuseram a utilização de diferentes tipos de terra diatomácea modificada para remoção de íons fosfato de soluções aquosas.

Além destas, a terra diatomácea possui uma extensa e variada utilização tradicional, sendo que Souza (1973 apud Pimentel, 2006), relaciona os seguintes usos mais frequentes:

- Agente de filtração – na clarificação e classificação de açúcar, sucos de frutas, bebidas alcoólicas ou não, ácidos, compostos de petróleo, vernizes, goma-laca, ceras, graxas, resinas, óleos minerais, vegetais e animais, gelatina, antibióticos, etc. Isto é resultado da elevada permeabilidade e da capacidade de retenção do material sólido entre as partículas de terra diatomácea.
- Agente isolante de calor – isolamento das paredes de edifícios, caldeiras, fornos, condutos, som e temperatura em forma de tijolos ou pó. Devido ao seu baixo coeficiente de condutividade térmica e conter ar aprisionado entre as minúsculas partículas de que é composta.
- Agente de carga industrial – na fabricação de papel, borracha, tintas, sabões, sabonetes, massa de fósforos, secantes e plásticos diversos.
- Agente suporte absorvente – em inseticidas, fungicidas, pilhas elétricas, dinamite, ar líquido explosivos, líquidos catalisadores em virtude da alta porosidade.
- Agente abrasivo – em líquidos e pastas para limpar e polir metais;

- Uso variado – como matéria-prima silicosa para fabricação de silicato de cálcio sintético, silicato de sódio, azul ultramar, material anti-sonoro, concreto e argamassas leves para cúpulas, lajes e cascos de navios.

2.4. Viabilidade técnica da recuperação do resíduo de terra diatomácea

Para que se justifique a instalação e operação de uma planta de recuperação de um resíduo para sua reutilização no processo produtivo, deve-se avaliar a viabilidade técnica desse resíduo após o tratamento térmico. A viabilidade técnica será discutida na seção 3.3 com base no artigo de (Goulart *et al.*, 2011), que foi o único encontrado na literatura relacionado ao tema. Os autores realizaram experimentos para reutilização de terra diatomácea após utilização dessa como auxiliar de filtração na produção de cerveja.

No referido trabalho, amostras de terra diatomácea foram submetidas a dois tratamentos térmicos em sequência, o primeiro à temperatura de 105 °C por 4 h para eliminar os resíduos líquidos provenientes da filtração da cerveja e o segundo, a 700 °C por 6 h, para eliminar a matéria orgânica retida pela terra diatomácea durante o processo de filtração. A cada intervalo de 1 h o material foi retirado do forno e homogeneizado. Após o tratamento térmico os autores realizaram análises para determinar se o resíduo tratado apresentava características estruturais, físico-químicas e sensoriais adequadas para tal. Os resultados estão apresentados nas seções 2.4.1 – 2.4.5 e por serem de fundamental importância para o presente trabalho, serão discutidos na seção 3.3.

2.4.1. Análise termogravimétrica

O resíduo foi submetido à análise termogravimétrica (TGA) para avaliar a perda de massa da matéria em função do tempo, em ambiente de temperatura controlada, e determinar a temperatura de degradação dos compostos orgânicos que ficam aderidos à estrutura da terra diatomácea na etapa de filtração da cerveja. Na Figura 1 está apresentada a TGA para o resíduo de terra diatomácea.

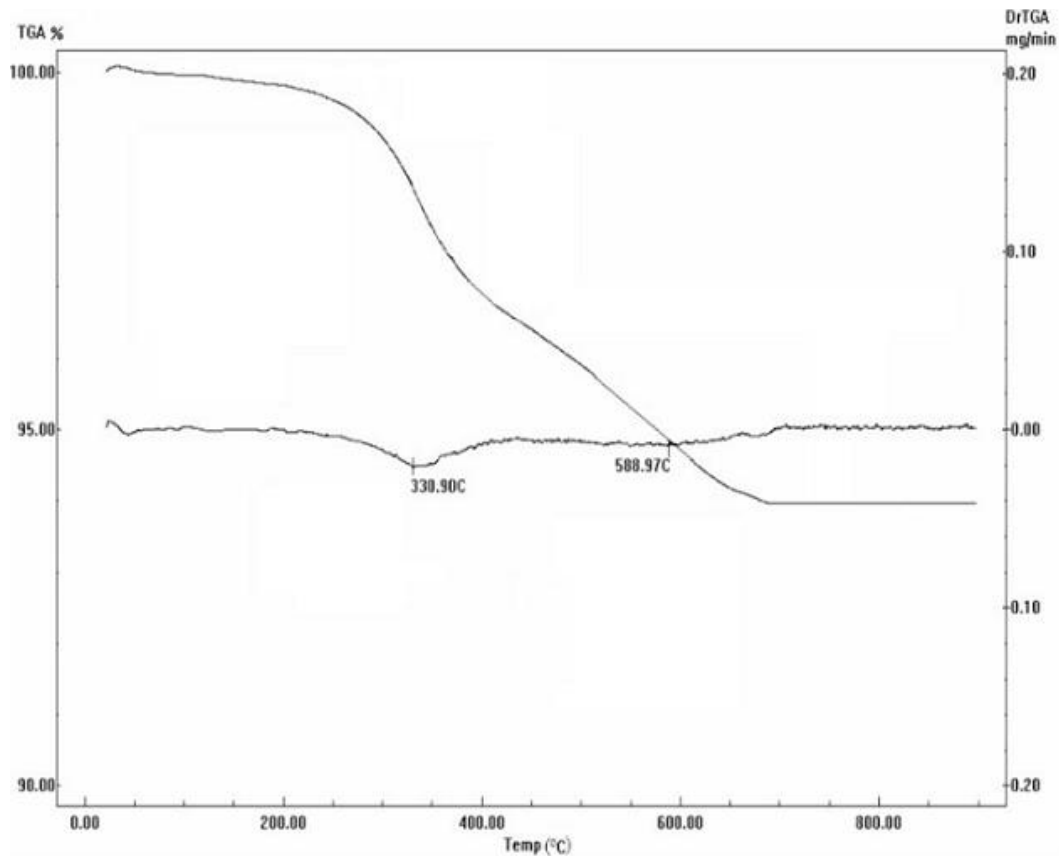


Figura 1: Curva termogravimétrica referente ao resíduo gerado pela indústria cervejeira. Fonte: (Goulart et al., 2011).

2.4.2. Difração de Raios-X

Para a avaliação de mudanças mineralógicas na estrutura da terra diatomácea antes e depois do tratamento térmico os autores utilizaram a técnica de difração de raios-X (DRX). Na Figura 2 é apresentado o resultado da análise.

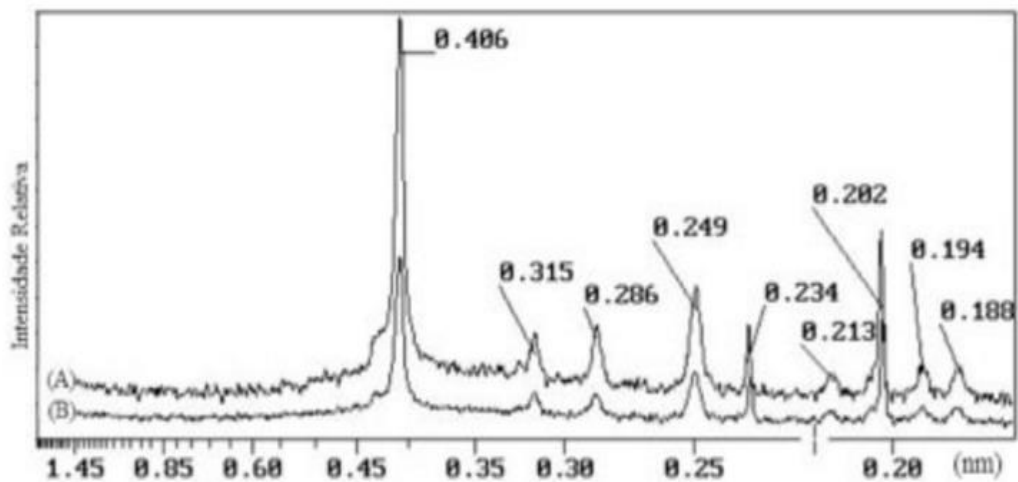


Figura 2: Difratogramas de raios-X para: (A) amostras de terra diatomácea tratada termicamente e (B) terra diatomácea nova. Fonte: (Goulart et al., 2011)

2.4.3. Microscopia Eletrônica de Varredura

A avaliação da morfologia da terra diatomácea, antes e após o processo de filtração da cerveja e após a realização do tratamento térmico, foi realizada com auxílio da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Nas figuras 3, 4 e 5 são apresentados os resultados da análise.

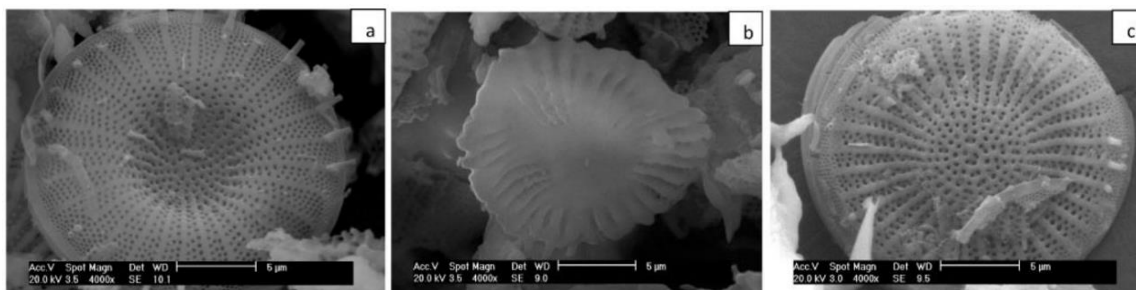


Figura 3: Micrografia referente à terra diatomácea nova. Fonte: (Goulart et al., 2011).

Figura 4: Micrografia referente à terra diatomácea saturada com matéria orgânica. Fonte: (Goulart et al., 2011).

Figura 5: Micrografia referente à terra diatomácea tratada térmicamente. Fonte: (Goulart et al., 2011).

2.4.4. Atributos físico químicos da terra diatomácea

Para avaliar mudanças físico-químicas no material após o tratamento, os autores realizaram análises para determinações de pH, densidade aparente, densidade úmida, teor de umidade em base seca e sedimentação. Na Tabela 3, são mostrados os resultados das análises mencionadas, que foram realizadas em triplicata pelos autores.

Tabela 3: Médias dos atributos físico-químicos para terra diatomácea nova (T1), terra diatomácea recuperada (T2) e terra diatomácea saturada (T3). Estão descritos os resultados de pH, densidade aparente(DA), densidade úmida (DU), teor de umidade em base seca (TUS) e sed sedimentação (S). (Goulart *et al.*, 2011).

Tratamento	pH	DA	DU	TUS	S
T1	8,59b	204,8c	402.0a	0,16b	1,63a
T2	9,43 a	248,5b	406.6a	0,00b	1,71a
T3	5,92 c	276,7a	399.6a	2,34a	0,82a

Tukey a 5% de significância. DA – g/L; DU – g/L; TSU – % e S – g.

2.4.5. Atributos físico-químicos aplicados à água e cerveja

Os autores realizaram medidas de pH para a água e a cerveja, antes da filtração, após serem filtradas com a terra diatomácea nova e com a terra recuperada. Os resultados das análises mencionadas são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4: Médias dos atributos físico-químicos para a água e cerveja, antes da filtração (T4), após filtração com terra nova (T5) e após filtração com terra recuperada (T6). Fonte: (Goulart et al., 2011)

Tratamentos	Água			Cerveja		
	pH	Turbidez	Cor	pH	Turbidez	Cor
T4	5,17 c	0,00 c	0,00 c	4,14 c	21,93 a	13,72 a
T5	7,90 b	6,53 a	1,77 a	4,33 b	09,63 c	8,55 c
T6	9,34 a	3,28 b	0,58 b	4,69 a	11,16 b	9,02 b

Teste a 5% de significância

Abaixo, na Figura 6, são mostradas amostras de terra diatomácea durante o processo de recuperação, bem como a terra diatomácea nova, ainda não utilizada no processo de filtração.

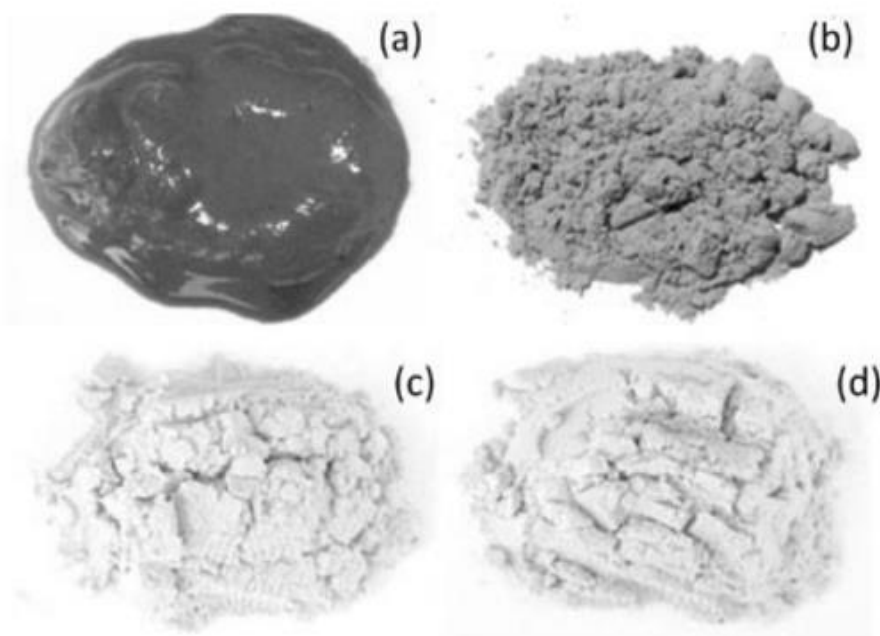


Figura 6: (a) Resíduo úmido e saturado com matéria orgânica; (b) resíduo saturado com matéria orgânica, seco a 105°C; (c) resíduo tratado termicamente a 700°C por 6 horas; (d) terra diatomácea nova. Fonte: (Goulart et al., 2011).

2.5. Subprodutos agroindustriais

Os subprodutos são obtidos a partir do processamento de produtos agroindustriais destinados à alimentação humana. Podem ser classificados de acordo com o grau de nobreza, sendo os mais valorizados os subprodutos e, na sequência, os resíduos (Coelho e Figueiredo, 2005).

Apenas 5 % dos subprodutos agroindustriais produzidos no planeta seriam suficientes para alimentar todo o rebanho mundial. A América Latina produz mais de 500 milhões de toneladas de subprodutos e resíduos agroindustriais, sendo que o Brasil produz mais desta metade, dos quais 1,7 milhões de toneladas são de resíduo de cervejaria (Souza, 2004 e Mussato et al., 2006 apud Portilho, F.P., 2010).

A maior parte desses subprodutos pode ser reciclada ou reutilizada. Sendo assim, na estratégia de se combater o desperdício e aproveitar sobras ou descartes inutilizados pelas indústrias, os subprodutos são utilizados como fontes de matéria-prima para outros setores e processos (Coelho e Figueiredo, 2005).

Se os resíduos agrícolas provenientes de lavouras comerciais fossem utilizados como fontes de energia para a secagem, seriam mais do que suficientes para a secagem dos produtos que lhes deram origem. O calor produzido pela queima de um sabugo de milho seria suficiente para secar os grãos de duas ou três espigas, por exemplo (Silva et al., 2001).

2.5.1.1. Subprodutos gerados pela indústria cervejeira

Segundo dados da CervBrasil (2016), o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de bebidas. No processo cervejeiro, os resíduos sólidos são gerados principalmente nas etapas de filtração, envase e tratamento de água e de efluentes líquidos.

Subprodutos da cevada são obtidos durante o processo industrial da produção de cerveja, como no caso do broto ou radícula de malte, obtido através da germinação forçada dos grãos antes da produção de malte que de acordo com Andriguetto *et al.* (1990), possui 24 % de proteína bruta. Na tabela 5, inventariada por Amienyo e Azapagic (2016) são apresentados as principais matérias-primas do processo de produção da cerveja. Alguns deles, como é o caso da terra diatomácea atualmente, são convertidos integralmente em resíduo.

Tabela 5: Inventário de dados para matérias-primas no processo de produção de cerveja.
 Fonte: (Amienyo; Azapagic, 2016).

Inputs	Amount per litre of beer	Cost per litre of beer (£ pence/l)
<i>Raw materials and auxiliaries^a</i>		
Barley	73 g	1.15
Water (process)	8.43 l	1.12
Hops	1.3 g	2.81
Yeast	21 g	0.64
Diatomaceous earth	1.7 g	5×10^{-2}
Sodium hydroxide (50 %)	9 g	0.27
Phosphoric acid (50 %)	2 g	0.11
Sulphuric acid (63 %)	2.5 g	3.43×10^{-2}
Carbon dioxide (liquid)	30 g	0.22
Light fuel oil ^b	0.04 l	2.72
<i>Packaging</i>		
Glass bottles (0.33 l)	691 g	1.6
Bottle (85 % recycled content) ^c	636.4 g	2.44×10^{-3}
Bottle top (steel) ^d	6.1 g	0.3
Multi-pack crate (cardboard) ^a	48.5 g	
Aluminium cans (0.44 l)	36 g	2.7 ^e
Can body (48 % recycled content) ^c	29.9 g	–
Can ends (100 % virgin aluminium alloy) ^c	6.1 g	
Steel cans (0.44 l)	76.0 g	1.0 ^e
Can body (62 % recycled content) ^c	69.9 g	–
Can end (100 % virgin aluminium alloy) ^c	6.1 g	

Os grãos de malte processados são o principal tipo de resíduo, em relação à quantidade gerada. São aqueles resíduos oriundos do aproveitamento do conteúdo dos grãos de malte, constituídos de restos de casca e polpa dos grãos, misturados, em suspensão ou dissolvidos no mosto. Embora de origem semelhante, dependendo da etapa onde são retirados do mosto possuem características físicas e composição distinta, e, portanto, são separados em três tipos.

O bagaço de malte, que é o resíduo gerado da filtração do mosto após a tina de mostura, que constitui-se no principal subproduto do processo de produção; o *trub* grosso, que é o resíduo retirado do decantador, após o cozimento e que possui basicamente gordura vegetal e proteínas coaguladas; e o *trub* fino, resíduo obtido da segunda filtração, composto de gordura vegetal e que sai misturado à terra diatomácea e a parcelas de levedura. Todos esses possuem excelentes características nutricionais e, por esta razão, são usados na fabricação de ração animal. Em alguns casos, estes são misturados ao bagaço de malte, e em algumas plantas até se utiliza deste *trub* no preparo de novas bateladas de mosto (UNEP, 1996).

O lúpulo, também utilizado na produção de cerveja, é empregado na mistura de alimentos, mas é um produto bastante fibroso como afirmam Andriguetto *et al.* (1990).

As leveduras, segundo Luana *et al.* (2011), reproduzem-se durante o processo de fermentação, obtendo-se ao final do processo mais massa de levedo do que se utilizará na batelada subsequente. Parte desta levedura é reutilizada no preparo de nova batelada e parte, que não atende mais às características de qualidade necessárias para ser reutilizada no processo, é vendida para a indústria alimentícia.

Ainda durante o processo de industrialização da cerveja, materiais solúveis são extraídos e resíduos de destilação restantes podem ser filtrados e, por serem fibrosos, servir como alimento principalmente para ruminantes, contendo consideráveis valores em proteína bruta (acima de 18 %). Ainda são descritos subprodutos como resíduos do envase, como pasta celulósica e garrafas quebradas e também lodo, gerado tanto na Estação de Tratamento de Águas (ETA) como na Estação de Tratamento de Efluentes Industriais (ETEI), que deve ser corretamente gerenciado como resíduo (Andriguetto *et al.*, 1990; Luana *et al.*, 2011).

2.5.2. Bagaço de malte e casca de arroz

A combustão da biomassa apresenta diferenças significativas relativamente à combustão do carvão, principalmente no que diz respeito ao teor da matéria volátil. Deste modo, convém referenciar quais os processos envolvidos e os principais fatores que influenciam a combustão da biomassa.

O bagaço de malte é um subproduto do processo de produção de cerveja formado pela parte sólida obtida da filtração do mosto, antes da fervura do mesmo e consiste principalmente de pele e da polpa do malte. O bagaço de malte é quantitativamente o principal subproduto do processo de produção da cerveja, com uma geração de 14 a 20 kg de massa de bagaço para cada hectolitro (hl) de cerveja produzida (Santos e Ribeiro, 2005).

É estimado que sejam produzidas aproximadamente duas milhões de toneladas por ano desse subproduto no Brasil (Lima, 2010).

2.5.2.1. Caracterização energética e aplicabilidade do bagaço de malte

Para determinar a viabilidade ou não da utilização de um resíduo como fonte de energia, deve ser feita uma caracterização energética do mesmo, para obtenção de estimativas de valores de umidade, densidade, poder calorífico e composição química do resíduo.

Segundo a ASTM (American Society for Testing and Materials), o poder calorífico é a energia contida na umidade de massa. Dois poderes caloríficos devem ser considerados, o poder calorífico superior (PCS), que é determinado experimentalmente no laboratório e o poder calorífico inferior (PCI), que pode ser

calculado a partir do PCS. O conhecimento do PCI torna-se um indicador realista do estado de energia da biomassa, e é geralmente utilizado como efeito comparativo entre diferentes biomassas. O PCS é determinado pela combustão de uma amostra em uma bomba calorimétrica em uma atmosfera de oxigênio (30 atm). Este parâmetro é crucial para o design e seleção da caldeira e na produção de energia.

Valores médios de poder calorífico superior do bagaço de malte, para cada nível de umidade, são mostrados na Tabela 6, e, como esperado, há um considerável acréscimo do poder calorífico com a diminuição da umidade. Podemos observar o PCS variando desde 2656 kcal.kg⁻¹ até 5026 kcal.kg⁻¹ para umidades de 50 e 15 % respectivamente.

Tabela 6: Relação entre umidade, densidade e calor específico do bagaço de malte. Fonte: (Luana et al. 2012)

Umidade (%)	Densidade (kg.m ⁻³)	Poder Calorífico Superior (kcal.kg ⁻¹)
50	219,0	2.656,0
40	161,1	3.687,0
30	171,0	4.037,0
20	117,2	4.697,0
15	123,0	5.026,0

A umidade contida é o fator mais relevante no uso de biomassa como combustível, já que existe uma relação inversamente proporcional com o poder calorífico. O conhecimento do teor de umidade é também crucial em análises de custo para armazenamento e transporte de biomassa. O teor de umidade também é importante pois determina a performance do combustível, além de ocasionar a proliferação de fungos e a degradação do material ainda durante o processo de auto-ignição em caldeiras (Villanueva *et al.*, 2011; Albuquerque, 2006).

A densidade fornece dados para um melhor entendimento do processo, pois biomassas com altas densidades apresentam diferente comportamento daquelas com baixas densidades, em termos de inflamabilidade. A densidade também tem uma grande influência em propriedades combustíveis, como condutividade térmica. Já a quantidade de calor que pode ser liberado por unidade volumétrica de bagaço de malte seco nas condições em que é produzido (umidade em base seca 50 %, 40 %, 30 %, 20 % e 15 %) é 581.607 kcal.m⁻³, 594.076 kcal.m⁻³, 690.126 kcal.m⁻³, 550.638 kcal.m⁻³ e 617.746 kcal.m⁻³, respectivamente. Dessa forma, é mais vantajoso utilizar bagaço com 30 % de umidade comparado com o bagaço contendo 15 % de umidade, porque haverá maior produção de calor por unidade de volume (Luana et al., 2012).

Tabela 7: Valores médios dos materiais voléteis (Materials volatile), cinzas (Ash) e carbono fixo (Fixed carbono) do bagaço de malte. Fonte: (Luana et al. 2012)

Materials volatile/%	95.95
Ash/%	0.74
Fixed carbono/%	3.31

Ao analisar os resultados da Tabela 7, pode-se observar uma alta porcentagem de materiais voléteis e uma pequena porcentagem de cinzas e carbono fixo do bagaço de malte. Combustíveis com grande percentual de carbono fixo apresentam combustão mais lenta, indicando tempos de residência elevados na câmara de combustão, se comparado com outros combustíveis, com menor conteúdo de carbono fixo. A casca de arroz, por exemplo, apresenta um teor de carbono fixo por volta de 15 %, representando tempos de residência maiores para a biomassa (Brito e Barrichelo 1982; Vieira, A. C., 2012).

Já a composição dos voléteis é de fundamental importância para a determinação dos produtos finais de combustão e para estimar a energia liberada no processo. O conteúdo volátil tem também um importante papel durante a ignição e os estágios iniciais da combustão de combustíveis sólidos, sendo benéficos valores altos de componentes voléteis. Ainda analisando a Tabela 7, observa-se que o conteúdo de cinzas do bagaço de malte é de 0,74 %, o que é satisfatório por não prejudicar a integridade de caldeiras e fornos, além de não gerar volume muito grande de passivos.

De acordo com Ascheri *et al.* (2007), o bagaço de malte caracteriza-se por ter alto teor de umidade, 86 % (b.u.), que limita seu tempo útil até 30 dias para seu consumo *in natura*. A elevada quantidade de água no resíduo úmido pode resultar em outros fatores limitantes como a dificuldade no transporte a longa distância e dificuldades no armazenamento. Muitos autores limitam a utilização deste subproduto a determinadas distâncias das indústrias. Em termos das condições climáticas brasileiras, não é recomendado ultrapassar 50 km de distância entre a indústria e a destinação (Chandler, 1990).

Com relação à aplicabilidade do bagaço de malte, a conservação deste material em propriedades rurais também é considerada uma limitação. Allen (1997) cita os fungos e as leveduras como os principais microrganismos responsáveis pela degradação do resíduo. Estudos em condições de aerobiose aconselham períodos de no máximo 10 dias (Johnson, 1987).

O uso do bagaço de malte na alimentação animal apresenta limitações, como o alto teor de umidade. Apresenta também quantidade de proteínas totais insuficientes para alimentação animal, mas na forma seca torna-se uma fonte rica em proteínas. Logo, podemos perceber que para um bom aproveitamento do bagaço de malte na alimentação animal este deve sofrer um processo de secagem para se conseguir quantidades satisfatórias de nutrientes. (Luana *et al.*, 2011).

2.5.2.2. Caracterização energética e aplicabilidade da casca de arroz

De acordo com as estatísticas da FAO, o Brasil é o nono maior produtor de arroz do mundo. Apesar de o arroz ser uma cultura comum a quase todo país, a maior parte da produção ocorre em 5 estados. O Rio Grande do Sul concentra 68,1 % da produção nacional de 2014/15, totalizando 8441 mil toneladas (MAPA, 2016). A casca de arroz é uma matéria-prima de baixo custo, de difícil reaproveitamento, baixas propriedades nutritivas e elevado teor de sílica (Pandey; Soccol; Mitchell, 2000). Em função do elevado poder calorífico, a casca de arroz tem sido utilizada como biomassa na alimentação de reatores para geração de energia, o que reduz o impacto causado pela destinação do produto, já que a compostagem da casca, que é o destino mais usual, tem um tempo muito elevado de duração, além de liberar um volume de metano (CH₄). Porém, contribui para a redução da dependência dos derivados de petróleo (Kieling, 2009; Oliveira, C. R. M. De; Tannous, 2009).

Portanto, assim como para o bagaço de malte, é necessária uma caracterização energética do subproduto. Fernandes *et al.* (2015) caracterizaram experimentalmente o resíduo de casca de arroz, a fim de analisar a viabilidade de sua utilização como biomassa para geração de energia. Foram realizadas análises do teor de umidade, cinzas, materiais voláteis, carbono fixo, massa específica e poder calorífico para duas cascas de arroz A e B, de diferentes regiões do estado do Rio Grande do Sul, mostrados na Tabela 8.

Tabela 8: Teor de umidade, cinzas, voláteis e carbono fixo de diferentes amostras de casca de arroz oriundas do RS, comparadas a valores encontrados na bibliografia pelos autores. Fonte: (Fernandes *et al.*, 2015).

Análise	Casca A	Casca B	Vieira et al. (2013)	Morais et al. (2006)
Teor de Umidade (%)	11,00	9,25	11,31	10,61
Teor de Cinzas (%)	21,52	22,13	15,51	23,84
Teor de Voláteis (%)	36,12	34,75	82,09	64,26
Carbono Fixo (%)	42,37	43,12	2,39	11,90

A massa específica, também determinada por Fernandes et al (2015) foi de 1,40 g.cm⁻³ e 1,41 g.cm⁻³ para as cascas A e B, respectivamente. Os valores de PCS encontrados pelos autores foram de 13,54 MJ.kg⁻¹ para a casca A e de 13,26 MJ.kg⁻¹ para a casca B. Pela análise dos dados acima citados a casca de arroz tem um poder calorífico considerável para ser utilizado como fonte energética, porém possui uma massa específica extremamente baixa, dificultando o transporte da biomassa por distâncias muito elevadas.

3 Estudo de Caso

O presente estudo de caso foi baseado em uma planta de cervejaria situada no Rio Grande do sul. Porém, o projeto é aplicável a praticamente qualquer outra planta industrial de produção de cerveja, podendo existir algumas diferenças de tipo ou configuração dos equipamentos, mas que de forma geral não inviabilizam a aplicação do projeto de recuperação do resíduo de terra diatomácea em indústria cervejeira.

Como foi visto anteriormente na seção 2.3.2, a produção da terra diatomácea a partir do minério extraído das jazidas necessita de uma etapa de calcinação, que também faz parte do processo de recuperação da mesma. Ou seja, em teoria, o projeto de recuperação elimina etapas importantes do processo de produção da terra diatomácea, como extração e beneficiamento do minério, assim como seu transporte a partir da jazida até a planta de tratamento. A distribuição do custo de produção do minério de diatomita, em 1983, é de 10 % atribuída à fonte de exploração, 60 % no processo de beneficiamento e 30 % na embalagem e transporte (Antonides (1998), Dolley (2003) e Founie (2004) apud Pimentel 2006).

Apesar da grande disponibilidade mundial do minério de terra diatomácea, as reservas brasileiras são de apenas 1,9 milhões de toneladas, segundo a Tabela 2. Essas representam, portanto, menos de 1 % das reservas mundiais. Isso implica que o país, em um futuro próximo, seja totalmente dependente da importação do insumo, e, dessa forma, seja sujeito, assim como os outros países, às flutuações de moeda e também sofra influência da relação oferta e demanda do insumo.

Segundo os dados da CervBrasil (2016), com produção de 14,1 bilhões de litros de cerveja em 2015, e utilizando os dados de inventário apresentados na Tabela da seção 2.5.1, pode-se estimar que o consumo anual de terra diatomácea em indústrias cervejeiras no Brasil gire em torno de 24 mil toneladas. Da mesma forma, segundo Santos e Ribeiro (2005), para cada 100 litros de cerveja são gerados de 14 a 20 kg de bagaço de malte. Assim, estima-se uma produção anual do subproduto de aproximadamente 2 milhões e 110 mil toneladas de bagaço de malte. Em uma unidade fabril de médio porte, supondo-se produção de 300 mil hl mensais, o consumo mensal de terra diatomácea deve ficar em torno de 50 toneladas e a geração de bagaço é de aproximadamente 4500 toneladas, segundo cálculos realizados conforme os valores acima citados.

Atualmente esse volume de resíduo de terra diatomácea é enviado para compostagem em localidade próxima à fábrica e o bagaço de malte é vendido a pecuaristas locais. A proposta é, portanto, utilizar parte dessa massa de bagaço de malte para gerar a energia necessária ao tratamento do resíduo de terra diatomácea, a fim de reaproveitá-lo no processo produtivo da própria unidade fabril. Como alternativa, será avaliada a utilização da casca de arroz, que já é atualmente utilizada na fábrica em questão para geração de vapor para os processos em geral.

3.1 Descrição dos processos

O bagaço de malte e o resíduo de terra diatomácea são obtidos em momentos distintos do processo produtivo. O processo de mosturação é o início do processo de fabricação da cerveja. Antes disso, há somente etapas de beneficiamento e limpeza do malte e tratamento da água de processo, que serão utilizados na mosturação. São adicionados à tina de mostura a água de processo em temperatura adequada e o malte previamente moído. A partir disso ocorre uma rampa de mosturação, com diversos patamares de temperatura, responsável por determinar a composição dos açúcares do mosto, que é o líquido contendo os substratos necessários para que ocorra o processo de fermentação e obtenha-se, então, a cerveja.

Após o processo de mosturação, a mistura de mosto com os sólidos presentes na tina de mostura passam pelo processo de filtração, para que se separe o mosto, que vai seguir o processo produtivo e passar para a etapa de fermentação, do sólido presente na tina de mostura, que é o bagaço do malte. A filtração do mosto ocorre através de um equipamento denominado filtro prensa, que é uma caixa retangular composta por diversas placas paralelas entre si, dotadas de um meio filtrante, por onde passa a mistura de mosto e sólidos, e então fica retida nas placas do filtro somente a parcela sólida da mistura. O mosto segue então para o tanque intermediário, responsável por propiciar ao mesmo um pré-aquecimento antes da etapa de fervura, que ocorre no Cozinhador de mosto.

Por sua vez, o bagaço de malte, que fica retido nas placas do filtro, é derrubado para a caixa de malte através de um processo automático denominado *shift*. A caixa de malte é basicamente uma caixa afunilada, de formato triangular, que acompanha toda a extensão do filtro e possui um transportador do tipo rosca na parte inferior, responsável por transportar o bagaço de malte até o final da caixa. A partir desse ponto, a expulsão do bagaço é realizada com a utilização de ar comprimido proveniente de um compressor específico para tal, até os silos de bagaço, onde o subproduto fica armazenado até ser carregado por caminhões e transportado até os pecuaristas locais.

Deve-se ter um cuidado especial com a etapa de jateamento das placas do filtro, que acontece antes da assepsia do mesmo. A logística de jateamento tem papel fundamental no conteúdo de umidade do bagaço que vai para os silos. Como visto anteriormente, a umidade é fator determinante para o poder calorífico, e, conseqüentemente, o aproveitamento energético do mesmo. Se ainda houver bagaço na caixa e já for feito o jateamento do filtro, essa umidade excessiva será agregada a essa massa de bagaço e, quando a mesma for transportada, irá também umidificar o restante do bagaço contido no silo.

Por outro lado, a geração do resíduo de terra diatomácea é regido por um processo mais complexo, que depende de um maior número de fatores. A filtração da cerveja é composta basicamente por dois tipos de filtros, instalados em série, cada um com uma função específica. A filtração industrial de cerveja

ocorre em ciclos. A primeira etapa é a preparação do filtro para receber a cerveja maturada. Para isso, é realizada a operação de formação de pré-camada no filtro. O filtro é composto por uma série de velas, arranjadas vertical e paralelamente, e o fluxo de cerveja se dá de fora para dentro das velas, sendo que a camada filtrante fica aderida à parte externa das velas.

A formação da pré-camada é realizada com utilização de água desaerada para evitar a incorporação de oxigênio à cerveja, e então, após a formação da pré-camada, o filtro começa a receber a cerveja maturada. A cerveja, que até então estava armazenada em tanques maturadores, começa a ser filtrada. Como já mencionado, a cerveja maturada contém uma quantidade considerável de sólidos suspensos, que devem ser retidos pela camada filtrante para que a cerveja então torne-se clarificada e límpida.

À medida que a cerveja é filtrada, os sólidos em suspensão começam a ser retidos pela camada filtrante e, assim, a obstruir os poros da terra diatomácea. Dessa forma, a camada filtrante deve ser continuamente renovada para que seja mantido o poder de filtração da camada. Dessa forma, através de dosagem contínua de terra diatomácea no filtro, há a renovação da camada filtrante.

O ciclo de filtração continua até que o diferencial de pressão do filtro ou a quantidade total de terra diatomácea atinjam seus valores limitantes. Geralmente, o fator limitante do ciclo de filtração é o diferencial de pressão entre a entrada e a saída do filtro, e a quantidade de terra diatomácea utilizada nos ciclos de filtração é basicamente a mesma, a não ser que a cerveja apresente turbidez excessiva. Nesse caso, a obstrução dos poros da camada filtrante acontece de forma muito abrupta, e mesmo efetuando-se a reposição de terra diatomácea com taxa máxima, a camada filtrante não é renovada suficientemente para manter o ciclo de filtração, pois o diferencial de pressão aumenta excessivamente e o ciclo tem que ser encerrado.

Assim que o diferencial de pressão máximo admitido ou a quantidade limite de terra diatomácea são atingidos, o ciclo deve ser encerrado e todos os procedimentos de assepsia necessários à realização do próximo ciclo de filtração devem ser realizados. Para isso, o primeiro passo é a remoção da terra diatomácea, então saturada com matéria orgânica, para os silos de terra, com utilização de ar comprimido. O resíduo fica armazenado nos silos até que exista um determinado volume e então ocorre a retirada do resíduo através de caminhões.

3.2 Projeto de recuperação da terra diatomácea

O projeto proposto para recuperação de terra diatomácea é apresentado através do fluxograma apresentado na Figura 7.

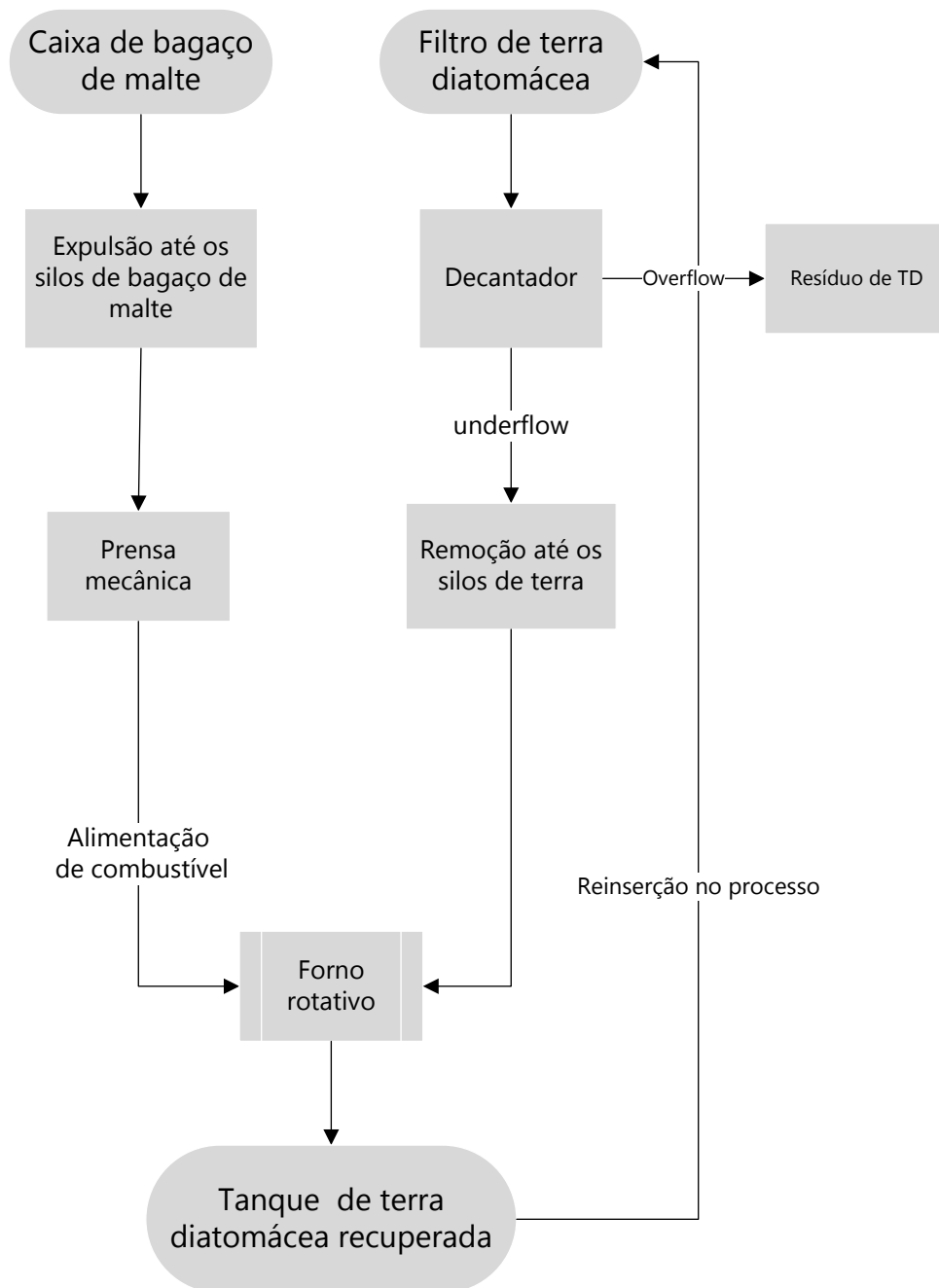


Figura 7: Fluxograma simplificado do projeto de recuperação da terra diatomácea em indústria cervejeira

Após a expulsão do bagaço para os silos de malte, este apresenta uma determinada umidade, pela presença de mosto residual, que é inerente ao processo e segundo a bibliografia é de aproximadamente 80 %. Porém, para um melhor aproveitamento energético, como foi citado na revisão bibliográfica, a umidade ideal para a combustão da biomassa fica em torno de 30 %. Dessa forma, é necessária a instalação de uma prensa mecânica para retirada parcial da umidade do subproduto.

A terra diatomácea é enviada a um tanque decantador, onde há uma prévia separação entre a água em excesso que está agregada à terra diatomácea de forma livre, o *overflow*, e a massa de terra diatomácea que decantou,

constituindo o *underflow*. Nessa etapa, segundo ensaios de sedimentação experimentais realizados por França e Luz (2002) admite-se a perda de 10 % de massa de terra diatomácea, arrastada pelo *overflow* do decantador, e um tempo médio de 9 horas de decantação. O *underflow* então é enviado ao forno rotativo e submetido ao aquecimento para que seja calcinado, através do calor gerado pelo resíduo de bagaço de malte, já apresentando umidade de aproximadamente 30 %. O forno de calcinação é instalado horizontalmente, e a biomassa é queimada no lado oposto à alimentação do resíduo, sendo o processo conduzido, portanto, em contracorrente. O forno, de formato cilíndrico gira em torno do próprio eixo através de motores e engrenagens, possibilitando a máxima eficiência de troca térmica e também a manutenção da temperatura uniforme radialmente. Da mesma forma, são necessárias alimentações de ar quente em diferentes posições ao longo do forno, para garantir a manutenção da temperatura longitudinalmente. É importante salientar que não há necessidade de haver um controle muito rígido da umidade da biomassa, pois como foi apresentado na Tabela 6 não existe uma variabilidade considerável de poder calorífico em torno desse valor de umidade. Depois de passar pelo processo de calcinação, a terra diatomácea recuperada será transportada a um tanque de armazenamento, juntamente com água desaerada, onde ficará armazenada para ser novamente utilizada no processo de filtração.

3.3 Viabilidade técnica da recuperação de terra diatomácea

As seguintes observações são referentes ao procedimento experimental realizado por (Goulart *et al.*, 2011), e se fazem necessárias para avaliar aspectos estruturais e físico-químicos, que são fundamentais para a determinação da operacionalidade da terra diatomácea no processo de filtração.

- **Análise termogravimétrica:** Como pode ser observado na Figura 1, a perda de massa em função da temperatura da amostra de terra diatomácea apresenta uma região de perda acentuada de massa, que acontece aproximadamente entre 300 e 400°C, sendo indispensável submeter o resíduo a esta faixa de temperatura para que haja eliminação efetiva de boa parte da matéria orgânica presente. A partir deste ponto, torna-se questionável a rentabilidade de continuar aquecendo a matéria, pois muita energia deve ser aplicada ao resíduo para remoção de uma quantidade não tão significativa de matéria orgânica. Essa matéria orgânica residual na terra diatomácea poderia provocar uma menor efetividade no processo de filtração, mas pode ser utilizada para a filtração de cervejas específicas.

- **Difração de Raios-X:** Através da análise de difração de raios-X é possível observar que não há mudança significativa na estrutura do material, sendo semelhantes a posição e intensidade relativa dos picos, como observado por (Goulart *et al.*, 2011).

- **Microscopia Eletrônica de Varredura:** Como pode ser observado na figura 3, há considerável disponibilidade de poros vazios na estrutura do material, que

garantem ao material a capacidade de filtração necessária. Já na figura 4, referente ao material saturado após ser utilizado no processo de filtração, pode-se observar uma completa obstrução dos poros, motivo pelo qual há a saturação da camada filtrante e, como consequência, um aumento significativo no diferencial de pressão do filtro. Por fim, na figura 5 podemos observar a efetividade do processo de calcinação, pois, assim como para o material novo, há grande disponibilidade de poros vazios.

- Atributos físico-químicos da terra nova, recuperada e saturada: Conforme mostrado na Tabela 3, os valores de pH para a terra nova e para a terra recuperada apresentam diferença estatística significativa, porém a relação entre massa de terra e volume de cerveja que entram em contato é muito pequena, ou seja, uma pequena massa de terra entra em contato com um grande volume de cerveja, e dessa forma essa pequena diferença de pH existente não tem influência no grande volume de cerveja filtrado. A medida de densidade aparente apresenta diferenças estatísticas significativas, porém essa diferença não influencia de maneira significativa o processo de filtração. As medidas de densidade úmida, teor de umidade em base seca e a sedimentação não apresentam diferença estatística significativa, comparando-se a terra diatomácea nova e a recuperada.

- Atributos físico-químicos aplicados à água e cerveja, filtradas com a terra nova, recuperada e saturada: Analisando a Tabela 4, pode-se observar que, para o pH, há uma alteração significativa do valor do atributo comparando-se a filtração com terra nova e com terra recuperada. No entanto, essa análise refere-se a um pequeno volume de água ou cerveja filtrados, sabendo-se que os experimentos em questão foram realizados em bancadas com volumes da ordem de mililitros de água e cerveja e gramas de terra diatomácea. Para relações maiores entre terra diatomácea e cerveja, a tendência é que não haja influência significativa do pH da terra diatomácea no pH da cerveja. Já para turbidez e cor, apesar de serem diferenças estatisticamente significantes, assim como para o pH não devem representar diferenças de processo. Em relação à turbidez, caso a diferença representasse alguma alteração no atributo, esta poderia ser contornada utilizando-se quantidade adicional de terra diatomácea no processo de filtração.

3.4 Alternativa ao processo de recuperação de terra diatomácea na própria unidade fabril

A opção de fazer a recuperação do resíduo na própria fábrica e reutilizá-lo no processo produtivo possui tanto vantagens quanto desvantagens, que devem ser levadas em conta em qualquer projeto de implantação. A principal desvantagem dessa opção é a de demandar um custo de instalação elevado, devido a necessidade de aquisição de novos equipamentos e estruturas adjacentes para o processo.

Como alternativa a isso, surge a possibilidade da instalação de uma central de recuperação, que receba o resíduo de várias fábricas, localizadas próximas umas às outras, fazendo com que o custo de instalação seja proporcionalmente

menor, para um volume maior de tratamento, reduzindo o tempo de *Payback* do projeto. Por outro lado, onera-se o projeto devido à necessidade de transporte dos resíduos até a central de recuperação.

3.5 Viabilidade econômica da recuperação de terra diatomácea

Apesar de existirem argumentos ambientais favoráveis a certos processos de reuso, reutilização ou reaproveitamento, na maioria das vezes as indústrias só consideram a implantação de projetos que sejam viáveis economicamente. Assim, apesar de representar um significativo avanço em termos ambientais, é necessária uma análise de viabilidade econômica do processo de reutilização de terra diatomácea com bagaço de malte como fonte energética. Assim sendo, pode-se estimar que 10 % da massa de TD é perdida para o *overflow* do decantador, e, de forma conservadora, que há mais 5 % de perda de massa pelo material que fica aderido ao secador e outros equipamentos e tubulações. Das 50 toneladas utilizadas, portanto, 42,5 toneladas serão recuperadas e poderão ser reutilizadas no processo. Os fatores apresentados na Tabela 9 devem ser levados em conta para estimar-se a viabilidade econômica do projeto. As legendas a seguir serão utilizadas para descrever cada um dos itens apresentados.

Tabela 9: Custos envolvidos no projeto de reutilização da terra diatomácea.

VT	Custos e receitas mensais
V1	Custo de oportunidade da venda do bagaço de malte
V1b	Custo de aquisição da casca de arroz
V2	Receita de oportunidade de aquisição de terra diatomácea
V3	Receita de oportunidade do transporte de terra diatomácea
V4	Custo com o transporte ida/volta para central de recuperação
V5	Custo de manutenção dos equipamentos
FT	Investimento inicial
F1	Custo de instalação do sistema de tratamento térmico
F2	Custo de instalação da prensa mecânica para pré-secagem do BM
F3	Custo de instalação do decantador para TD

i. Custo de oportunidade da venda do bagaço de malte

A receita com a venda do bagaço de malte, segundo informações cedidas por empresa do ramo cervejeiro, pode ser aproximado para R\$ 100,00 por tonelada. Através da Equação 1 é calculado o custo de oportunidade do bagaço de malte, ou seja, a receita que a empresa deixa de ter ao não vender o bagaço de malte como subproduto para utilizá-lo como fonte de energia.

$$V1 = Mb * Pb \quad \text{Equação 1}$$

ii. Custo de aquisição da casca de arroz

Através da Equação 2 é calculado o custo com a aquisição da casca de arroz a ser submetida à combustão.

$$V1b = Mc * Pc \text{ Equação 2}$$

iii. Receita de oportunidade da aquisição de terra diatomácea

A receita de oportunidade da terra diatomácea é o fator que tem potencial para viabilizar economicamente o projeto. Segundo cotação realizada com empresa do ramo, o custo de aquisição da terra diatomácea é de U\$D 0,75.kg⁻¹, que atualmente representa em torno de R\$ 2,50.kg⁻¹, valor arredondado para facilitar os cálculos. A Equação 3 mostra o cálculo da receita que a empresa tem ao não ter que comprar terra diatomácea, e sim utilizar a terra diatomácea recuperada no processo de calcinação.

$$V2 = Mt * Pt \text{ Equação 3}$$

iv. Receita de oportunidade do transporte da terra diatomácea

O transporte do resíduo de terra diatomácea é atualmente responsabilidade da empresa, e apesar de o transporte ser referente a pequenas distâncias, ainda assim será considerado. A Tabela 10 será utilizada como base de cálculo para o transporte das cargas. Porém, essa tabela não contempla encargos financeiros para pagamento a prazo, margem de lucro, despesas de carga e descarga e gerenciamento de risco. Dessa forma será acrescido 50% ao valor mostrado na tabela para, de forma conservadora, estimar os custos com o transporte. A Equação 4 mostra o cálculo da receita que a empresa tem ao não ter que transportar a terra diatomácea à sua destinação atual, de acordo com a Tabela 10.

$$V3 = Mt * Ptr1 \text{ Equação 4}$$

Tabela 10: Custo médio do frete por tonelada. Obs.: parte da tabela foi omitida por não conter informações relevantes ao problema em questão. Fonte: (Bortolin, N. 2015).

TABELA REFERENCIAL DE CUSTOS DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGA							
Distância em Km			Custo Tonelada (R\$)	Distância em Km			Custo Tonelada (R\$)
1	a	50	28,26	1.401	a	1.500	210,88
51	a	100	34,56	1.501	a	1.600	223,48
101	a	150	40,85	1.601	a	1.700	236,07
151	a	200	47,15	1.701	a	1.800	248,67
201	a	250	53,45	1.801	a	1.900	261,26
251	a	300	59,75	1.901	a	2.000	273,86
301	a	350	66,04	2.001	a	2.200	299,05
351	a	400	72,34	2.201	a	2.400	324,23
401	a	450	78,64	2.401	a	2.600	349,42

v. O custo do transporte até a central de reutilização é um custo referente somente à alternativa de reutilização em uma central, citada na seção 3.4. Para que haja viabilidade para essa alternativa, a distância entre as fábricas não deve ser muito grande, pois além do custo monetário com o transporte, há o impacto ambiental causado pela geração de gases de efeito estufa, que não entram na conta de custo mas devem ser sempre considerados em uma análise coerente. Para estimativa de custo também será considerada a Tabela 10. elaborada pela comissão de caminhheiros autônomos.

$$V4 = Mt * Ptr2 \text{ Equação 5}$$

vi. Os custos de instalação do forno rotativo, assim como a prensa mecânica destinada à redução de umidade do bagaço de malte e o tanque decantador foram cotados com empresas do ramo, e os melhores orçamentos foram considerados para os cálculos. A estimativa do custo de instalação do forno de calcinação, estimado em R\$ 385.000,00 foi obtido com empresa do ramo e é subdividido entre os seguintes itens e respectivos valores:

- a) Forno de calcinação: R\$ 270.000,00
- b) Instalação mecânica: R\$ 60.000,00
- c) Instalação elétrica: R\$ 25.000,00
- d) Instalação civil: R\$ 30.000,00

Já a prensa mecânica foi cotada em R\$ 80.000,00 por empresa do ramo, enquanto a cotação do tanque decantador é de R\$ 50.000,00.

vii. O custo com manutenção contempla tanto a mão-de-obra alocada para realização de inspeções preventivas e, eventualmente corretivas, além dos materiais que porventura venham a ser substituídos, como válvulas, vedações, tubulações e manutenções periódicas dos sistemas de secagem. O custo mensal com esses itens pode ser estimado em 3 % do valor total do equipamento,

anualmente. Para fins de cálculo, esse valor foi dividido igualmente durante os meses do ano.

$$V5 = FT * \frac{0,03}{12} \quad \text{Equação 6}$$

Para uma análise completa do problema em questão, serão avaliadas as alternativas citadas a seguir, cada qual com suas vantagens e desvantagens, em termos econômicos, ambientais, de qualidade do produto e operacionais.

Primeira alternativa: recuperação de terra diatomácea na própria unidade fabril, com utilização de bagaço de malte como fonte de energia. Essa alternativa é, em princípio, a alternativa essencialmente mais sustentável, pois utiliza o subproduto produzido na própria fábrica como fonte energética, sem necessidade de transporte adicional de carga. No entanto, economicamente falando é uma alternativa menos vantajosa se comparada à segunda alternativa, que será posteriormente discutida, pois utilizar o bagaço de malte como fonte energética demanda, além de um custo de aproximadamente 30 % maior por tonelada que é queimada, o investimento adicional em uma prensa mecânica para realizar a pré-secagem do bagaço e deixá-lo na condição de maior aproveitamento energético. Porém, outro cenário que deve ser analisado é o caso onde não há demanda para a venda de parte ou de todo o bagaço de malte gerado pela fábrica. Nesse caso, é mais aplicável a utilização do bagaço como fonte energética, pois não há receita com a venda do mesmo.

Segunda alternativa: recuperação de terra diatomácea na própria unidade fabril, com utilização de casca de arroz como fonte de energia. A casca de arroz produz, em média, um volume 30 vezes maior de cinzas em relação ao bagaço de malte após a combustão. Além de representar um grande passivo ambiental que deve ser descartado, esse grande volume de resíduo pode significar, dependendo das condições operacionais da empresa, um problema de saúde ocupacional devido à exposição dos trabalhadores a um ambiente insalubre, seja pelos momentos de retirada dos resíduos de cinzas - que são, assim como a terra diatomácea, destinadas à compostagem - seja no caso de as manutenções não serem devidamente realizadas, possibilitando a existência de pontos de escape de cinza e formação de um ambiente insalubre nas imediações do equipamento. Além disso, a abrasividade da sílica, principal componente da cinza da casca de arroz, tem impacto na vida útil dos equipamentos adjacentes ao sistema de secagem.

Terceira alternativa: recuperação de terra diatomácea em uma central de tratamento, com utilização de bagaço de malte como fonte de energia: essa alternativa demanda um maior investimento inicial, pois o secador rotativo utilizado no processo de calcinação deve ser de maior porte quando comparado às alternativas anteriores. Além disso, não foram considerados fatores importantes, devido à dificuldade de estimação dos mesmos, mas que teriam impacto tanto econômico quanto com relação à qualidade e segurança alimentar

da cerveja. Um dos grandes desafios no dia-a-dia de uma cervejaria refere-se aos cuidados que devem existir para evitar contaminações microbiológicas no produto final. Dessa forma, grandes esforços tanto no projeto quanto no na rotina da fábrica deveriam ser tomados com relação a isso, pois haveria uma demanda muito grande com relação a sanitização de equipamentos, e, principalmente, do meio de transporte da terra diatomácea de volta à fábrica de origem, depois do processo de calcinação.

Quarta alternativa: reutilização de terra diatomácea em uma central de tratamento, com utilização de casca de arroz como fonte de energia: Essa alternativa tem os mesmos problemas relacionados ao transporte do material tratado e aos cuidados relacionados às contaminações microbiológicas, citados na alternativa anterior. Dessa forma, apesar de ser preferível economicamente em relação à alternativa 3, pelos fatos acima expostos, ainda assim é, de forma geral menos aplicável que as alternativas 1 e 2.

Para fins de cálculo foi considerado, conforme Amienyo, D.; Azapagic, A. (2016), que o consumo médio de TD é de $1,7 \text{ g.L}^{-1}$. Já o cálculo de consumo energético do processo de calcinação foi baseado na energia empregada para recuperação do resíduo apresentado por (Goulart *et al.*, 2011) e, conforme citado por França e Luz (2002), o processo de calcinação conduzido em forno rotativo é aproximadamente 25 % mais eficiente do que o mesmo em forno elétrico. A principal explicação para tal é a constante agitação do produto durante o processo de calcinação em forno rotativo, que promove uma troca térmica mais eficiente entre o produto e as superfícies do forno rotativo, ao contrário do processo conduzido na mufla, onde a amostra foi homogeneizada somente a cada hora.

A seguir seguem os cálculos para a determinação da energia total consumida no processo de calcinação conduzido em mufla. A corrente máxima de trabalho, dada pela Equação 7, sabendo que o aparelho em questão possui voltagem de 220 V e potência máxima de 1720 W é de 7,82 A. Para os cálculos, foram desconsideradas perdas de calor para o ambiente e não-linearidades do sistema, a fim de simplificar os cálculos realizados. As considerações feitas são de que a energia consumida pelo forno e a temperatura de trabalho tem uma relação linear entre si, e também que a resistência do forno é constante no intervalo de temperatura de trabalho.

$$i = \frac{P}{U} \quad \text{Equação 7}$$

As correntes elétricas de trabalho para 105 °C e para 700 °C são, respectivamente, 0,63 A e 4,20 A, calculadas através da Equação 8.

$$i_2 = T_2 * \frac{i_1}{T_1} \quad \text{Equação 8}$$

Assim, para o cálculo da potência em cada temperatura, que é determinada pelas correntes acima citadas, foi utilizada a Equação 9:

$$P = R * i^2 \quad \text{Equação 9}$$

Finalmente, a energia consumida para calcinação é calculada através da Equação 10.

$$E = P * t \quad \text{Equação 10}$$

Sendo assim, a potência é de 11,2 W para a primeira etapa, de evaporação da água em excesso, e de 497 W para a etapa de calcinação. A energia total consumida é, portanto, de 44,8 Wh para a primeira etapa, de 4 h e de 2982 Wh para a segunda etapa, de 6 h, totalizando 3,25 kwh ou 2795 kcal para cada 100 g de terra diatomácea calcinada. Para determinar a massa de bagaço de malte, com 30 % de umidade a ser utilizada para secar essa quantidade de produto foi calculada pela Equação 11.

$$Mb = \frac{E}{PCsb} \quad \text{Equação 11}$$

Ou seja, 2795 kcal são necessárias para calcinar, em forno rotativo, 100 g de terra diatomácea. Dividindo essa energia pelo poder calorífico superior do bagaço de malte, que é de 4037 kcal/kg, para a umidade de 30 %, temos a massa de 0,69 kg de bagaço de malte. Para determinar a massa necessária para secagem em forno rotativo, deve ser considerado que, conforme referenciado por França e Luz (2002), o processo em forno rotativo é 25 % mais eficiente do que o processo conduzido em mufla. Assim sendo, a massa necessária para a calcinação de 100 g de terra diatomácea em forno rotativo é finalmente calculada pela Equação 12.

$$M2 = M1 * \eta \quad \text{Equação 12}$$

Dessa forma, a massa necessária para de bagaço de malte para calcinar 100 g de terra diatomácea é de 0,52 kg, sendo a relação então de 5,2:1. Para calcular a viabilidade econômica da utilização de casca de arroz como fonte de energia, foi considerado o valor médio obtido por Fernandes *et al.* (2015) para o poder calorífico superior, de 3202,6 kcal.kg⁻¹. Assim, a relação entre o poder calorífico da casca de arroz e do bagaço de malte foi determinada pela Equação 13.

$$R = \frac{PCsb}{PCSc} \quad \text{Equação 13}$$

Sendo assim, calculou-se que R = 1,26 e, portanto, a massa de casca de arroz necessária para calcinar 100 g de terra diatomácea é dada pela Equação 14.

$$M3 = R * M2 \quad \text{Equação 14}$$

Portanto, a relação entre casca de arroz a ser queimada e terra diatomácea recuperada é de 6,5:1. Em ambos os casos, porém, deve ser consideradas as perdas energéticas intrínsecas aos processos industriais de troca de calor. Segundo Viana *et al.* (2012) as perdas a serem estudadas para cálculo de eficiência térmica de fornos são:

- Perdas por transferência de calor: através do calor absorvido pelas paredes e soleira do forno e liberado por radiação e convecção. O valor dessas perdas,

embora possam ser calculadas, são estimadas em função do isolamento, correspondendo a cerca de 20 % do calor total.

- Perdas por vazamentos na estrutura do forno: que costumam operar com pressão superior à atmosférica, e perdas de calor pela porta, quando esta é aberta. Essas perdas geralmente variam de 2 a 8 % do calor total, dependendo da operação e manutenção do forno. Será considerado o valor médio de 5 %.

- Perdas pelos gases de exaustão: Correspondem a maior parte das perdas. Para a estimativa dessas perdas é necessário o conhecimento das temperaturas dos gases de exaustão, além do conhecimento dos volumes gerados dos gases CO e CO₂ pelo processo de combustão. Será considerado, de forma conservadora, que mais 20 % de calor são perdidos pelos gases de exaustão.

Portanto, somando-se as perdas por transferência de calor, perdas por vazamento na estrutura do forno e perdas pelos gases de exaustão, chega-se ao valor de 45 % de perda de calor no processo de calcinação. Ou seja, para o bagaço de malte a relação, que era de 5,2:1 passa a ser 7,54 e para a casca de arroz, a relação que era de 6,5:1 passa a ser de 9,43.

3.6 Cálculo do Tempo de *Payback*

Os cálculos de tempo de *Payback* foram realizados a partir dos itens citados na Tabela 9. Para as alternativas 1 e 2, foi considerado que a empresa deixará de comprar, por mês, 42,5 toneladas de terra diatomácea que será recuperada e reutilizada no processo produtivo. Para as alternativas onde foi estimado o custo com geração de energia a partir de bagaço de malte, 1 e 3, foi usada a relação encontrada pela equação 12, corrigida pelas perdas de energia anteriormente mencionadas. Ou seja, para recuperar 42,5 toneladas de terra diatomácea será necessário que 320,5 toneladas de bagaço de malte contendo 30 % de umidade entrem em combustão. Seguindo o mesmo raciocínio, para a combustão das mesmas 42,5 toneladas de terra diatomácea será necessário que 400,8 toneladas de casca de arroz entrem em combustão, de acordo com a Equação 14 corrigida pelas perdas de calor estimadas para o processo. Já para a receita de oportunidade do transporte da TD foi considerado o custo referente a menor distância contida na Tabela 10, devido ao fato de que os resíduos são transportados para localidades próximas à fábrica. Os custos com manutenção, conforme citado anteriormente, foram aproximados para 3 % do valor total dos equipamentos ao ano, igualmente divididos durante o ano.

Para as alternativas 3 e 4, foi considerado que a central de recuperação processe os resíduos de 3 fábricas, todas com produção média mensal de 300000 hl. Além disso, para o cálculo do custo com o frete foi utilizado o custo referente à distância de 401 a 450 km, duplicado devido à ida e volta, e acrescido de 50 %, conforme mencionado no item 4 da seção 3.5.

4 Resultados

A seguir, seguem os resultados referentes a cada uma das alternativas de projeto citadas na seção anterior.

Tabela 11: Cálculo do tempo de *Payback* referente à primeira alternativa de projeto

Custos e receitas mensais				
	Item	Quantidade (t)	Preço (R\$/t)	Valor mensal
V1	Custo com a não-venda do bagaço de malte	320,45	R\$ 100,00	R\$ 32.045,00
V2	Receita de oportunidade de aquisição de terra diatomácea	42,5	R\$ 2.500,00	R\$ 106.250,00
V3	Receita de oportunidade do transporte de terra diatomácea	42,5	R\$ 42,39	R\$ 1.801,58
V5	Custo mensal de manutenção dos equipamentos		R\$ 1.288	
VT	Receita total mensal		R\$ 74.719	
Investimento inicial				
	Item		Custo (R\$)	
F1	Custo de instalação do sistema de tratamento térmico		R\$ 385.000	
F2	Custo de instalação da prensa mecânica para pré-secagem do BM		R\$ 80.000	
F3	Custo de instalação do decantador para a TD		R\$ 50.000	
FT	Custo total inicial		R\$ 515.000	
	Payback simples		8 meses	

Os resultados apresentados na Tabela 11 são referentes à primeira alternativa levantada, de recuperação do resíduo de TD na própria unidade fabril, com utilização de bagaço de malte como fonte energética. O custo total inicial para implantação do projeto é de R\$ 515.000,00, com receita mensal de R\$ 74.719,00 e um *Payback* simples de 8 meses.

Tabela 12: Cálculo do tempo de *Payback* referente à segunda alternativa de projeto

	Item	Quantidade (t)	Preço (R\$/t)	Valor mensal
V1b	Custo com geração de calor a partir da casca de arroz	400,775	R\$ 68,00	R\$ 27.252,70
V2	Receita de oportunidade de aquisição de terra diatomácea	42,5	R\$ 2.500,00	R\$ 106.250,00
V3	Receita de oportunidade do transporte de terra diatomácea	42,5	R\$ 28,26	R\$ 1.201,05
V5	Custo mensal de manutenção dos equipamentos		R\$ 1.088	
VT	Receita mensal total		R\$ 79.110,85	
Investimento inicial				
	Item		Custo (R\$)	
F1	Custo de instalação do sistema de tratamento térmico		R\$ 385.000,00	
F4	Custo de instalação do decantador para a TD		R\$ 50.000	
FT	Custo total inicial		R\$ 435.000	
	Payback simples		6 meses	

Os resultados apresentados na Tabela 12 são referentes à segunda alternativa levantada, de recuperação do resíduo de TD na própria unidade fabril, com utilização de casca de arroz como fonte energética. O custo total inicial para implantação do projeto é de R\$ 435.000,00, com receita mensal de R\$ 79.110,85 e um tempo de *Payback* de 6 meses. As alternativas 1 e 2 possuem contrapontos

interessantes a serem avaliados, em termos financeiros e ambientais. Em termos puramente econômicos, considerando-se localidades onde haja disponibilidade de venda para toda a massa de bagaço de malte gerada pelo processo produtivo – o que não é uma realidade para a totalidade das fábricas do Brasil – torna-se natural a escolha pela casca de arroz, por ser aproximadamente 30 % mais barato com relação ao bagaço de malte. Porém os fatores ambientais e a durabilidade dos equipamentos também devem ser considerados, conforme citado acima.

Tabela 13: Cálculo do tempo de *Payback* referente à terceira alternativa de projeto

Custos e receitas mensais				
	Item	Quantidade (t)	Preço (R\$/t)	Valor mensal
V1	Custo com a não-venda do bagaço de malte	1281,8	R\$ 100,00	R\$ 128.180,00
V2	Receita de oportunidade de aquisição de terra diatomácea	170	R\$ 2.500,00	R\$ 425.000,00
V3	Receita de oportunidade do transporte de terra diatomácea	170	R\$ 42,39	R\$ 7.206,30
V4	Custo com o transporte ida/volta para central de recuperação	R\$ 170	R\$ 236	R\$ 40.106
V5	Custo mensal de manutenção dos equipamentos		R\$ 3.300	
VT	Receita total mensal		R\$ 260.620	
Investimento inicial				
	Item	Custo (R\$)		
F1	Custo de instalação do sistema de tratamento térmico	R\$ 800.000		
F2	Custo de instalação da prensa mecânica para pré-secagem do BM	R\$ 320.000		
F3	Custo de instalação do decantador para a TD	R\$ 200.000		
FT	Custo total inicial	R\$ 1.320.000		
	Payback simples	6 meses		

Os resultados apresentados na Tabela 13 são referentes à terceira alternativa levantada, de recuperação do resíduo de TD em central de recuperação, com utilização de bagaço de malte como fonte energética. O custo total inicial para implantação do projeto é de R\$ 1.320.000,00, com receita mensal de R\$ 260.620,00 e um tempo de *Payback* de 6 meses. Assim sendo, apesar de apresentar-se como o projeto mais viável economicamente do que as alternativas 1 e 2, por demandar, além de um investimento inicial maior pela empresa, cuidados complexos e constantes com relação a contaminação, principalmente no transporte, e pelos demais fatores citados acima, a alternativa 3 é menos aplicável do que as alternativas 1 e 2, de modo geral.

Tabela 14: Cálculo do tempo de *Payback* referente à quarta alternativa de projeto

Custos e receitas mensais				
	Item	Quantidade (t)	Preço (R\$/t)	Valor mensal
V1b	Custo com geração de calor a partir da casca de arroz	1202,325	R\$ 68,00	R\$ 81.758,10
V2	Receita de oportunidade de aquisição de terra diatomácea	127,5	R\$ 2.500,00	R\$ 318.750,00
V3	Receita de oportunidade do transporte de terra diatomácea	127,5	R\$ 28,26	R\$ 3.603,15
V4	Custo com o transporte ida/volta para central de recuperação	127,5	R\$ 157	R\$ 20.053
V5	Custo mensal de manutenção dos equipamentos		R\$ 2.500	
VT	Receita total mensal		R\$ 218.041,85	
Custo fixo total				
	Item		Custo (R\$)	
F1	Custo de instalação do sistema de tratamento térmico		R\$ 800.000,00	
F4	Custo de instalação do decantador para a TD		R\$ 200.000	
FT	Custo total inicial		R\$ 1.000.000	
	Payback simples		5 meses	

Os resultados apresentados na Tabela 14 são referentes à quarta alternativa levantada, de recuperação do resíduo de TD em central de recuperação, com utilização de casca de arroz como fonte energética. O custo total inicial para implantação do projeto é de R\$ 1.000.000,00, com receita mensal de R\$ 218.041,85 e um tempo de *Payback* de 5 meses.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

O constante incremento de produção nas industriais tem a imediata consequência de que, se não existirem formas inovadoras e mais sustentáveis de produzir em grande escala, a produção de resíduos também aumenta proporcionalmente. Com o intuito de reduzir o grande consumo de terra diatomácea, auxiliar de filtração amplamente utilizado em indústrias cervejeiras, foram propostas alternativas para recuperação desse resíduo para ser novamente utilizado no próprio processo produtivo, com a mesma função de auxiliar de filtração.

Visando atender realidades distintas de fábricas situadas em diferentes localizações do país ou até do mundo, foram propostas quatro alternativas de projeto de recuperação do resíduo, apesar de que as alternativas referentes à utilização de casca de arroz como combustível para o processo de calcinação sejam principalmente aplicáveis, no Brasil, à região Sul. Cada alternativa apresenta contrapontos em termos econômicos, ambientais, de qualidade e segurança alimentar. Não foi considerada nessa análise nenhuma variação de preço da TD. Porém, como há dependência de importação do insumo, e considerando que a diminuição da oferta em locais próximos pode gerar um aumento de demanda por terra diatomácea a ser transportada por distâncias maiores, há uma tendência de aumento do preço do insumo com o decorrer dos anos.

A viabilidade técnica da recuperação do resíduo foi comprovada, conforme experimentos realizados por Goulart *et al.* (2011), e as pequenas modificações físico-químicas apresentadas pelo material, quando o mesmo é submetido à filtração da cerveja, não representam dificuldades operacionais relacionadas ou influência em atributos físico-químicos da cerveja, porque a razão entre a massa de terra diatomácea utilizada e a cerveja filtrada é muito pequena, não sendo suficiente para alterar significativamente o valor dos atributos da cerveja.

Através das estimativas realizadas no presente trabalho, concluiu-se que o projeto de recuperação de terra diatomácea é viável economicamente, com um tempo de *Payback* de menos de 1 ano para todas as alternativas analisadas. A escolha da alternativa, porém, depende de fatores relacionados à localização geográfica da fábrica, porque nos casos de não haver clientes para comprar o resíduo de bagaço de malte a alternativa torna-se, naturalmente, mais viável do que qualquer outra. A alternativa mais viável, economicamente falando, é a de utilizar casca de arroz como combustível para o processo de calcinação, mas depende, da mesma forma, da disponibilidade do recurso em localidades próximas, fato que só é assegurado, no Brasil, na região Sul. Ainda assim, devem ser considerados os impactos ambientais, na manutenção dos equipamentos e, possivelmente, de saúde ocupacional, decorrentes da utilização da casca de arroz como fonte energética, pelo fato de a mesma gerar um volume de resíduo pós-combustão cerca de 30 vezes maior se comparada ao bagaço de malte.

Em relação às alternativas onde avaliou-se a instalação de uma central de recuperação, apesar de apresentarem o menor tempo de *Payback*, apresentam

desvantagens relacionados à qualidade do produto e segurança alimentar que não foram estimados, devido à complexidade de estimação dos mesmos, além de causarem também impactos ambientais relacionados ao transporte da terra diatomácea antes e após o processo de recuperação.

Como trabalhos futuros, sugere-se a determinação precisa das perdas de calor no processo de calcinação, para que possa ser estimada com menor margem de erro a energia necessária ao processo. No mesmo sentido, para obter com precisão a energia utilizada no processo de calcinação em mufla, devem ser consideradas perdas e não-linearidades do sistema, através da obtenção da relação exata entre potência e temperatura do forno e também considerar a variação da resistência do equipamento com a temperatura.

Além disso, pode ser realizada a calcinação do resíduo de terra diatomácea a menores temperaturas, que demandaria um menor custo energético e, apesar de produzir terra recuperada com resíduos de matéria orgânica, essa pode ser utilizada para filtração de cervejas específicas, onde houve algum descontrole de temperatura ou tempos do processo, que venham a causar turbidez excessiva na cerveja a ser filtrada. Nesse caso, a saturação do filtro ocorre de maneira abrupta e a utilização de terra diatomácea que já tenha determinado teor de matéria orgânica somente acelera um processo que aconteceria naturalmente em pouco tempo. Como pode ser visto na Figura 1, a TGA da terra diatomácea indica que temperaturas de 500 °C poderiam eliminar aproximadamente 70 % dos resíduos orgânicos aderidos à estrutura da terra, sendo uma solução viável para redução da energia aplicada ao processo, propiciando a utilização da terra recuperada em ocasiões específicas.

Outro importante fator que deve ser levado em conta mas que só pode ser mensurado experimentalmente, é a efetividade da terra diatomácea como material filtrante após sucessivas calcinações do material. Como sugestão para trabalhos futuros também há a possibilidade de encontrar um percentual correto para misturar bagaço de malte e casca de arroz, a fim de reduzir o custo do projeto e diminuir o impacto ambiental causado pelo mesmo.

6 Referências

ALLEN, M.S. "Relationship between fermentation acid production in the rumen and the requirement for physically effective fiber. *Journal of Dairy Science*, v.80, p. 1447 – 1462, 1997.

ANDRIGUETTO et al. 1990. " Nutrição animal volume 1 – As bases e os fundamentos da nutrição animal." Editora Nobel, P. 396.

ANTUNES, L.E.G *et al.* 2011. "Evaluation of the use of diatomaceous earth against the corn grains infestation". Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Fitossanidade.

AMIENYO, D.; AZAPAGIC, A. Life cycle environmental impacts and costs of beer production and consumption in the uk. **International journal of life cycle assessment**, 2016. v. 21, n. 4, p. 492–509.

BENÍTEZ, E. I. *et al.* Turbidimetric behavior of colloidal particles in beer before filtration process. **Food and bioprocess technology**, 2013. v. 6, n. 4, p. 1082–1090.

BRAUN, F. *et al.* Large-scale study on beer filtration with combined filter aid additions to cellulose fibres. **Journal of the institute of brewing**, 2011. v. 117, n. 3, p. 314–328.

CRISTINA, S.; FRANÇA, A. **Série rochas e minerais industriais beneficiamento de diatomita da bahia.**

EDIZ, N.; BENTLI, I.; TATAR, I. Improvement in filtration characteristics of diatomite by calcination. **International journal of mineral processing**, 2010. v. 94, n. 3–4, p. 129–134.

ESTADUAL, U. *et al.* Campus de botucatu análise físico-química e energética do resíduo da terra diatomácea utilizada como auxiliar de campus de botucatu análise físico-química e energética do resíduo da. 2006.

FERNANDES, I. J. *et al.* Caracterização do resíduo industrial casca de arroz com vistas a sua utilização como biomassa. **6º forum internacional de resíduos sólidos**, 2015. v. 1, n. November 2016, p. 1–9.

FLEET, C. F.; SIEBERT, K. J. Effect of illumination intensity on visual perception of turbidity. **Food quality and preference**, 2005. v. 16, n. 6, p. 536–544.

GOULART, M. R. *et al.* Methodology for the reused of the diatomite earth residue,

originating from the filtration and clarification of the beer | metodologias para reutilização do resíduo de terra diatomácea proveniente da filtração e clarificação da cerveja. **Química nova**, 2011. v. 34, n. 4.

KIELING, A. G. Influência da segregação no desempenho de cinzas de casca de arroz como pozolanas e material adsorvente. 2009. p. 131.

MATEO, S. *et al.* Preliminary study of the use of spent diatomaceous earth from the brewing industry in clay matrix bricks. **Advances in applied ceramics**, 2016. v. 6753, n. September, p. 1–7. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17436753.2016.1221019>>.

MAZIDI, M.; MOSAYEBI BEHBAHANI, R.; FAZELI, A. Screening of treated diatomaceous earth to apply as v_2o_5 catalyst support. **Materials research innovations**, 2016. v. 8917, n. November, p. 1–10. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14328917.2016.1211478>>.

OLIVEIRA, C. R. M. De; TANNOUS, K. Fluidodinâmica de biomassa em leito fluidizado gasoso ¹. **Viii congresso brasileiro de engenharia química em iniciação científica**, 2009. p. 2–6.

PANDEY, A.; SOCCOL, C. R.; MITCHELL, D. New developments in solid state fermentation : i-bioprocesses and products. 2000. v. 35, p. 1153–1169.

SIEBERT, K. J. Haze formation in beverages. **Lwt - food science and technology**, 2006. v. 39, n. 9, p. 987–994.

VIANA, A. *et al.* 2012. "Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações". 2012 p. 205-206, Universidade Federal de Itajubá.

VILLANUEVA, M. *et al.* Energetic characterization of forest biomass by calorimetry and thermal analysis. **Journal of thermal analysis and calorimetry**, 2011. v. 104, n. 1, p. 61–67.

VU, D. H. *et al.* Humidity control materials prepared from diatomite and volcanic ash. **Construction and building materials**, 2013. v. 38, p. 1066–1072. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.040>>.